

# Distribuert lydnivåmåling

Trådløs dosimetri

**Thor-Anders Amundsen**

Master i elektronikk

Oppgaven levert: Juni 2011

Hovedveileder: Odd Kr. Pettersen, IET

Biveileder(e): Olav Kvaløy, SINTEF

Asbjørn Sæbø, Nordic Semiconductor



## Problembeskrivelse

I et komplekst arbeidsmiljø er det behov for å overvåke støynivået på flere posisjoner. Å distribuere måleenheter på et sett forskjellige posisjoner eller personer er aktuelt. De forskjellige sensorene trenger å sende dataene med jevne mellomrom til en sentral maskin som kan lagre og visualisere nivåene.

Slike distribuerte akustiske sensorer er aktuelle for eksempel i symfoniorkestre, på store konsert arenaer, kinoer og på industriarbeidsplasser for å visualisere lydtrykket 'live'.

Oppgaven vil ha elementer som hardware realisering av måleren og radiolinken og GUI for visning av data.

Oppstartsdato: 17. januar 2011  
Hovedveileder: Odd Kr. Pettersen  
Ekstern veileder: Olav Kvaløy  
Ekstern veileder: Asbjørn Sæbø

# Distribuert lydnivåmåling

## Forord

Denne rapporten er resultatet av arbeidet med min masteroppgave – ”Distribuert lydnivåmåling”. Masterrapporten er sluttproduktet i faget TTT4900 – ”Akustikk, signalbehandling og kommunikasjon, masteroppgave”, og er skrevet for å rapportere det arbeidet som har blitt gjort i løpet av våren 2011. Rapporten vil også omhandle de resultatene jeg fikk, og løsningen som er valgt for å kunne gi andre en nytteverdi eller idé til videre utvikling av denne prototypen.

Målgruppen til prosjektet er musikere og andre som blir utsatt for høye lydtrykk i arbeid eller på fritiden. Musikere er en meget utsatt gruppe når det kommer til hørselskader, da deres profesjon er å skape lyd. Det finnes mange måter å beskytte seg mot høye lydtrykk på, men mange av disse ødelegger lyden eller er på andre måter ikke aktuelle for musikere å bruke. Dette prosjektet skal resultere i en prototype hvor hensikten er å gi en indikasjon på og bedre bevisstheten rundt forebygging av hørselskader for den aktuelle yrkesgruppen.

Ideene bak dette prosjektet startet med at det i mange musikermiljøer har blitt en større oppmerksomhet og bekymring rundt hørselskader og forebygging av disse. I Trondheim Symfoniorkester (TSO) hadde de lest en rapport som indikerte hørselskader i andre orkestre i verden, og de ville da prøve å forebygge dette hos sine egne musikere. Denne problemstillingen ble Odd Pettersen ved Sintef IKT gjort oppmerksom på gjennom sin stilling som forskningssjef for avdelingen for akustikk. Fra før av hadde dr. ing. Asbjørn Sæbø ved Nordic Semiconductor ASA vært i kontakt med Odd Pettersen om en mulighet for å bruke en helt ny teknologi, Bluetooth Low Energy (BTLE), i forskningsprosjekter ved Sintef. Sammen med Olav Kvaløy ved Sintef IKT ble ideen om en trådløs lyd dosemåler basert på Bluetooth Low Energy lagd. Dette konseptet ble uttestet i et prosjekt høsten 2010 av undertegnede, og resultatene viste at det var mulig å lage én enkelt trådløs dosimetrimåler [1]. Prosjektet viste dog at det var mange muligheter til å forbedre resultatet, og at det med de begrensningene som fantes ville bli vanskelig å implementere flere sensorer i det samme systemet. Mange av disse begrensningene ble det forsøkt tatt hensyn til i denne masteroppgaven.

For all hjelp jeg har fått i tilknytning til denne oppgaven vil jeg gjerne få takke:

- Olav Kvaløy ved Sintef IKT, for alle regelmessige møter, kommentarer, tilbakemeldinger og verdifulle synspunkter
- Asbjørn Sæbø ved Nordic Semiconductor ASA, for daglig hjelp, kommentarer og utlån av utstyr og kontor.
- Odd Pettersen ved Sintef IKT, som har hatt ansvaret for og ideen bak oppgaven, og har gjort det hele mulig.
- Alle på lesesalen for deres innspill, kommentarer, spørsmål og hjelp i løpet av prosjektet.
- Marte, for alle gangene jeg har kommet hjem til ferdig middag og ren leilighet.

Trondheim 13.06.2011

Thor-Anders Amundsen

# Distribuert lydnivåmåling

## Sammendrag

Det finnes flere gode måter for personer å forebygge og motvirke hørselskader på. En av disse metodene er ved å måle lyddosen en person blir utsatt for. Denne metoden er grunnlaget for dette prosjektet.

Prosjektet ”Distribuert lydnivåmåling” har resultert i en prototype av et system som skal varsle personer som oppholder seg i miljøer med farlige lydtrykk. Prototypen består av to sensorer som sender data til en datamaskin som er mottakeren i systemet. Hver sensor består av mikrofon, filter, mikrokontroller og radiomodul. Sensorene måler momentant lydtrykk og peak-verdi som mottakeren visualiserer. Det ekvivalente lydnivået blir også utregnet av mottakeren og vist sammen med de andre parametrene på en oversiktlig måte.

Kravene til en dosimetrimåler er definert i en egen standard, og det er en lydtrykknivåmåler som i tillegg beregner det ekvivalente lydtrykket måleren blir utsatt for over tid. Denne standarden definerer blant annet frekvensrespons, batterilevetid og dynamisk område. Underveis i prosjektet har det blitt jobbet mye med å finne gode løsninger på kravene til prototypen fra denne standarden. Det ble designet to sensorer i prosjektet da det viste seg at den ene ikke tilfredsstilte standardens krav til frekvensrespons. Det viste seg også at begge disse sensorene hadde analoge kretser som ga for mye støy. Dette gjorde at støygulvet i kretsene ble for høyt og senket det dynamiske området til enhetene. Batterilevetiden og bruk av strømgjerrige komponenter i prosjektet ble sett på som viktig, og prototypen har en teoretisk lenger batterilevetid enn standarden krever.

Ved prosjektets slutt er det ferdige produktet to sensorer som måler det meste av det ønskede dynamiske området med god nøyaktighet. Dataene blir sendt til en mottaker, hvor det ekvivalente lydnivået blir beregnet og vist grafisk. Produktet er også skalerbart, og kan bestå av opptil 90 sensorer som kan rapportere til samme mottaker.

# Distribuert lydnivåmåling



## Innholdsfortegnelse

|  |      |
|--|------|
| Problembeskrivelse .....                                   | I    |
| Forord .....   | III  |
| Sammendrag .....   | V    |
| Innholdsfortegnelse .....                                  | VII  |
| Figurliste.....  | IX   |
| Tabelliste .....   | XI   |
| Nomenklaturliste .....                                     | XIII |
| 1 Innledning.....  | 1    |
| 2 Spesifikasjon .....                                      | 3    |
| 2.1 Funksjonskrav til systemet .....                       | 3    |
| 2.2 Utfyllende tekniske krav i henhold til standarder..... | 3    |
| 2.3 Krav til prototype.....                                | 4    |
| 2.4 Krav ved testing, testoppsett.....                     | 4    |
| 3 Hørselskader .....                                       | 7    |
| 3.1 Typer hørselskader .....                               | 7    |
| 3.2 Krav for vern mot støy på arbeidsplassen .....         | 8    |
| 3.3 Forebygging av hørselskader .....                      | 9    |
| 4 Mikrofon.....  | 11   |
| 4.1 Bakgrunn .....   | 11   |
| 4.2 Kravspesifikasjon .....                                | 11   |
| 4.3 Løsning .....  | 12   |
| 4.4 Resultater .....                                       | 12   |
| 5 Filterkretsen.....                                       | 15   |
| 5.1 Bakgrunn .....   | 15   |
| 5.2 Kravspesifikasjon .....                                | 17   |
| 5.3 Løsning .....  | 18   |
| 5.4 Resultater .....                                       | 21   |
| 6 Mikrokontroller .....                                    | 31   |
| 6.1 Bakgrunn .....   | 31   |
| 6.2 Kravspesifikasjon .....                                | 31   |
| 6.3 Løsning .....  | 32   |
| 6.4 Resultater .....                                       | 34   |
| 7 Radiolink .....  | 37   |
| 7.1 Bakgrunn .....   | 37   |
| 7.2 Kravspesifikasjon .....                                | 40   |
| 7.3 Løsning .....  | 40   |

## Distribuert lydnivåmåling

|      |  |    |
|------|--|----|
| 7.4  | Resultater .....                                 | 43 |
| 8    | Mottaker .....                                   | 45 |
| 8.1  | Bakgrunn .....                                   | 45 |
| 8.2  | Kravspesifikasjon .....                          | 45 |
| 8.3  | Løsning .....                                    | 46 |
| 8.4  | Resultater .....                                 | 50 |
| 9    | Systemet .....                                   | 51 |
| 9.1  | Oppbygging .....                                 | 51 |
| 9.2  | Frekvensrespons .....                            | 51 |
| 9.3  | Støygulv .....                                   | 53 |
| 9.4  | Dynamisk område .....                            | 54 |
| 9.5  | Simulering av enheter .....                      | 55 |
| 9.6  | Strømforbruk .....                               | 55 |
| 9.7  | Oppstartstid .....                               | 56 |
| 10   | Diskusjon .....                                  | 57 |
| 10.1 | Strømforbruk .....                               | 57 |
| 10.2 | Dynamikk .....                                   | 57 |
| 10.3 | Frekvensrespons .....                            | 58 |
| 10.4 | Pakketap .....                                   | 59 |
| 10.5 | Rekkevidde .....                                 | 60 |
| 10.6 | Mottaker .....                                   | 60 |
| 11   | Konklusjon .....                                 | 63 |
| 12   | Referanseliste .....                             | 65 |
| 13   | Vedlegg .....                                    | 69 |
| 13.1 | Analog krets – Antifoldningsfilter, 16 kHz ..... | 69 |
| 13.2 | Analog krets – Antifoldningsfilter, 32 kHz ..... | 70 |
| 13.3 | Analog krets – A-veiefilteret .....              | 71 |
| 13.4 | Koeffisienter til A-veiefilter .....             | 72 |
| 13.5 | Koeffisienter til høypassfilteret .....          | 73 |
| 13.6 | Flytskjema for mikrokontrolleren .....           | 74 |
| 13.7 | Vedlegg i Zip-fil .....                          | 75 |

## Figurliste

|  |    |
|--|----|
| Figur 1: Systemoversikt med alle delene .....  | 2  |
| Figur 2: Oversikt over systemet .....  | 3  |
| Figur 3: Audiogram av henholdsvis et friskt øre og et hørselsskadet øre [12] .....   | 7  |
| Figur 4: Kategorisering og oppbygging av utvalgte typer hørselsnedsettelse [12].....   | 8  |
| Figur 5: Forspenningskrets til mikrofon.....   | 12 |
| Figur 6: Filteralternativene.....  | 17 |
| Figur 7: Forskjellen mellom det simulerte analoge A-veiefilteret og det standardiserte filteret [4].....                     | 19 |
| Figur 8: Oppbygging av digitalt filter .....   | 19 |
| Figur 9: Frekvensresponsen til det simulerte digitale filteret og det standardiserte filteret [4] i stiplede linje.....      | 20 |
| Figur 10: Forskjellen mellom det simulerte digitale filteret og det standardiserte filteret [4] .....                        | 20 |
| Figur 11: Frekvensresponsen til oppkoblet 16 kHz antifoldningsfilter.....  | 22 |
| Figur 12: Frekvensresponsen til oppkoblet 32 kHz antifoldningsfilter.....  | 22 |
| Figur 13: Frekvensresponsen til oppkoblet A-veie og 16 kHz antifoldningsfilter.....  | 23 |
| Figur 14: Frekvensresponsen til oppkoblet A-veie og 32 kHz antifoldningsfilter.....  | 23 |
| Figur 15: Design av heltallsfilter.....  | 24 |
| Figur 16: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret med 256 som koeffisient .....  | 25 |
| Figur 17: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret med 4096 som koeffisient ..... | 25 |
| Figur 18: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret .....                          | 26 |
| Figur 19: Området rundt null hertz til heltallsfilteret .....  | 26 |
| Figur 20: Skisse av høypassdelen til heltallsfilteret.....   | 27 |
| Figur 21: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret med høypassfilteret.....       | 27 |
| Figur 22: Området rundt null hertz til heltallsfilteret med høypassfilteret.....   | 27 |
| Figur 23: Heltallsfilteret med høypassdelen minus det standardiserte filteret [4] i det aktuelle området .....               | 28 |
| Figur 24: Heltallsfilteret uten høypassdelen minus det standardiserte filteret [4] i det aktuelle området .....              | 28 |
| Figur 25: Flytskjema for main og avbrudd i sensorene.....  | 34 |

## Distribuert lydnivåmåling

|   |    |
|---|----|
| Figur 26: Stjerne-, tre- og mesh-struktur [46] .....  | 37 |
| Figur 27: "Alle til Alle"-, Ring- og Linje-struktur [46] .....  | 38 |
| Figur 28: De forskjellige WLAN kanalene, antatt ledige kanaler er markert hvite [60] .....                | 42 |
| Figur 29: Grensesnittet mellom nRF24AP2 og mikrokontrolleren [61] .....                                   | 42 |
| Figur 30: Pakketap i prosent ved målinger utført innendørs .....  | 43 |
| Figur 31: Skjerm bilde av Antware2, Master .....  | 47 |
| Figur 32: Grafvinduet til mottakeren .....  | 48 |
| Figur 33: Mottakerens statusvindu .....   | 49 |
| Figur 34: Utdrag av logg for måling av lydnivå .....  | 49 |
| Figur 35: Sammensetning av systemet .....   | 51 |
| Figur 36: Frekvensresponsen til systemet med 16 kHz antifoldningsfilter .....                             | 52 |
| Figur 37: Frekvensresponsen til systemet med 32 kHz antifoldningsfilter .....                             | 53 |
| Figur 38: Feil i dB for målt A-veid lydtrykk etter standarden [4], 16 kHz<br>antifoldningsfilter .....    | 53 |
| Figur 39: Feil i dB for målt A-veid lydtrykk etter standarden [4], 32 kHz<br>antifoldningsfilter .....    | 54 |
| Figur 40: Skjematisk tegning, dynamikkområde .....  | 54 |
| Figur 41: Skjerm bilde av Antware2, slave .....   | 55 |
| Figur 42: Manipulert grafvindu til mottakeren som viser lydnivået i dB som funksjon av<br>sensorene ..... | 61 |
| Figur 43: Filterdesign og simulert frekvensrespons antifoldningsfilter, 16 kHz .....                      | 69 |
| Figur 44: Filterdesign og simulert frekvensrespons antifoldningsfilter, 32 kHz .....                      | 70 |
| Figur 45: Filterdesign og simulert frekvensrespons A-veiefilteret .....                                   | 71 |
| Figur 46: Flytskjema for mikrokontrolleren .....  | 74 |

## Tabelliste

|  |    |
|--|----|
| Tabell 1: Frekvensvekting og maksimalt avvik i henhold til standarden [5] .....                                | 4  |
| Tabell 2: Krav til testoppsett .....   | 5  |
| Tabell 3: Oversikt over operasjonsforsterkere og egenskaper .....  | 16 |
| Tabell 4: Frekvensrespons til det digitale filteret og maksimalavvik i henhold til<br>standarden [5] .....     | 21 |
| Tabell 5: Strømforbruk filterkretsene .....  | 21 |
| Tabell 6: Forskjell i frekvensrespons til det digitale filteret og maksimalt avvik fra<br>standarden [5] ..... | 28 |
| Tabell 7: Strømforbruk filterkrets .....   | 29 |
| Tabell 8: Tid for beregninger i mikrokontrolleren .....  | 35 |
| Tabell 9: Strømforbruk for de forskjellige scenarioene .....   | 36 |
| Tabell 10: Sammenligning av relevante radiostandarder .....  | 39 |
| Tabell 11: Pakkeformat applikasjonspakker .....  | 41 |
| Tabell 12: Strømforbruk for nRF24AP2 .....   | 43 |
| Tabell 13: Programmeringstråder og deres funksjoner .....  | 50 |
| Tabell 14: Teoretisk dynamisk område til de forskjellige komponentene .....                                    | 54 |
| Tabell 15: Strømforbruk hos sensoren i tre ulike scenarioer .....  | 56 |
| Tabell 16: Koeffisienter til digitalt A-veiefilter .....   | 72 |
| Tabell 17: Koeffisienter til digitalt høypassfilter .....  | 73 |

# Distribuert lydnivåmåling

## Nomenklaturliste

|                      |   |
|----------------------|---|
| AD:                  | Analog til digital omformer   |
| ANT:                 | Radiokommunikasjons protokoll for korte avstander                       |
| A-veiefilter:        | Standardisert filter med frekvensrespons lignende det menneskelige øret |
| Antifoldningsfilter: | Filter med knekkfrekvens på maksimalt $F_s/2$                           |
| Bit:                 | Er en logisk verdi, enten 0 eller 1                                     |
| BTLE:                | Bluetooth Low Energy  |
| Byte:                | Består av 8 bit   |
| C-veiefilter:        | Standardisert filter med en gitt frekvensrespons.                       |
| dB:                  | Desibel   |
| Flyttall:            | Tall bestående av desimaler   |
| Fotavtrykk:          | Området enheten legger beslag på  |
| $F_s$ :              | Samplingfrekvens i [Hz]   |
| Heltall:             | Tall uten desimaler   |
| Hz:                  | Hertz, antall svingninger per sekund                                    |
| ISO:                 | International organization for standardization                          |
| kSPS:                | Kilo samples per second, antall tusen punktprøvinger per sekund         |
| $L_{EX, 8h}$ :       | Ekvivalent A-veid lydtrykk, normalisert på 8 timer                      |
| $L_{pC, peak}$ :     | Peak C-veid lydtrykk  |
| LPCEXpresso:         | Utviklingsplattform fra NXP Semiconductors                              |
| Matlab:              | Numerisk beregningsverktøy  |
| Mbps:                | Megabit per sekund  |
| MCU:                 | Microcontroller Unit  |
| MDU:                 | Multiply divide unit, gange-dele enhet                                  |
| NFC:                 | Near field communication  |
| Nordic:              | Nordic Semiconductor ASA, tidligere Nordic VLSI ASA                     |
| nRF24AP2:            | Kortholds radioenhet med innebygd ANT-protokoll                         |
| NXP:                 | NXP Semiconductors N.V.   |
| Oktett:              | Består av 8 bit   |
| $p_0$ :              | Referanselydtrykket. $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$                            |
| PTS:                 | Permanent terskelskift  |
| Proteus:             | Simuleringsprogram fra Labcenter Electronics Ltd.                       |
| SCC:                 | Single Chip Connection  |
| SDK:                 | Software Development Kit  |
| Simulink:            | Verktøy for modellering og simulering av dynamiske systemer             |
| SPI:                 | Serial Peripheral Interface, kommunikasjonsstandard                     |
| TDMA:                | Time Division Multiple Access   |
| TSO:                 | Trondheim Symfoniorkester   |
| TTS:                 | Temporært terskelskift  |
| UART:                | Universal asynchronous receiver/transmitter, kommunikasjonsstandard     |
| $\mu\text{Blue}$ :   | Serienavn for enheter fra Nordic som er lagd for Bluetooth low energy   |
| USB:                 | Universal Serial Bus  |
| WPAN:                | Wireless Personal Area Network  |

# Distribuert lydnivåmåling



## 1 Innledning

Prosjektet ”Distribuert lydnivåmåling” er utført i samarbeid med Sintef IKT og Nordic Semiconductor ASA (heretter kalt Nordic). I dette samarbeidet har Sintef ved Odd Pettersen og Olav Kvaløy, hatt ansvaret for henholdsvis det formelle og for veiledningen, mens Nordic, ved Asbjørn Sæbø har stått for utlån av utstyr og arbeidsplass. Sintef er en forskningsbedrift som har sterke bånd til NTNU, og er Skandinavias største uavhengige forskningsbedrift [2]. Nordic er en halvlederprodusent med trådløs kommunikasjon som spesialisering og har bakgrunn fra NTNU-miljøet i Trondheim [3].

Prosjektet startet som en ide mellom Odd Pettersen og Olav Kvaløy ved Sintef IKT. Ideen var å kunne gi et hjelpemiddel til personer som vanskelig kan beskytte seg mot hørselskader med tradisjonelle metoder, som for eksempel hørselvern og støydempning.

Prosjektets formål er å lage et trådløst system som kan gi en indikasjon på om det er risikofullt, med hensyn på hørselskader for personen å oppholde seg i et område over lengre tid. Systemet er tenkt brukt til tre ulike typer situasjoner. Den første situasjonen er rettet mot et orkester, hvor systemet skal signalisere til dirigenten om hvor stort lydtrykk den enkelte musiker har blitt utsatt for. Dette kan brukes til å la enkelte musikere, eller rekker av musikere, ta flere pauser enn andre under en øvelse på bakgrunn av målingene. Den andre situasjonen er myntet på større arrangementer som for eksempel konserter eller andre underholdningsarrangement. Her kan det være en fordel å overvåke lydnivået flere steder samtidig under arrangementet, for å påse at lydtrykket ikke er skadelig høyt for publikum. Den siste situasjonen hvor prototypen kan være til hjelp er et tenkt industriområde med mange individuelle og dynamiske lydkilder. Mange arbeidstakere kan miste respekten for hørselvern hvis det er et konstant påbud om det selv i perioder med lavt lydtrykk. Et dynamisk varslingsystem kan da være løsningen for å gi informasjon til arbeidstakerne om hva slags beskyttelsesutstyr som er gjeldende til enhver tid.

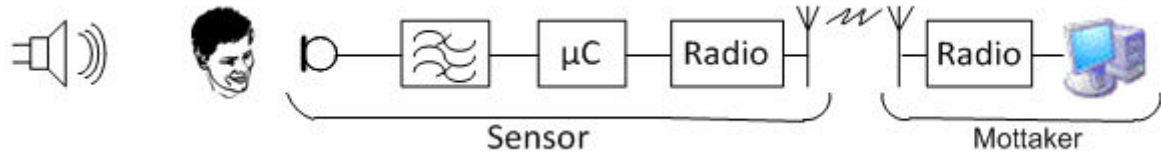
Disse tre situasjonene har til felles at det er hensiktsmessig at målingen og avlesningen av lydtrykket skjer på to forskjellige steder, og dette gir opphavet til en trådløs kommunikasjonslink.

Oppgaven går ut på å lage en prototype av en enhet som kan gi en tilfredsstillende løsning på situasjonene som er skissert ovenfor. Det vil i oppgaven bli lagt ekstra vekt på og jobbet mot en løsning for den første situasjonen som omhandler et orkester.

Dette prosjektet er avgrenset og delt opp i tre deler: sensor, radiolink og visualisering. Sensoren skal kunne måle A-veid ekvivalent lydnivå og impulsnivå. Radiolinken skal kunne støtte mange enheter, og sende informasjonen over en avstand gitt av prosjektets formål. Prosjektets prototype skal også gjengi resultatene på en intuitiv og oversiktlig måte. I prosjektet gjenspeiler ordet lydnivå det A-veide lydtrykksnivået gitt i desibel.

Under prosjektet ble de tre delene delt opp i flere deler som vist i Figur 1 under, og kapitlene i denne rapporten tar utgangspunkt i disse delene. Prosjektets spesifikasjon og hørselskader, som er prosjektets bakgrunn, er vist som en høyttaler og en person. Sensoren er i figuren oppdelt i mikrofon, filter og mikrokontroller, mens radiolinken og visualiseringen ikke har blitt delt opp i mindre enheter.

## Distribuert lydnivåmåling



Figur 1: Systemoversikt med alle delene

Det ble i starten av prosjektet satt opp en framdriftsplan (se vedlegg 13.7.6). Her ble løsningsstrategien å starte med undersøkelse av teori, for så å sette teorien ut i praksis. De forskjellige aksjonspunktene i framdriftsplanen ble satt opp med naturlige, etterfølgende punkter med hensyn på kompleksitet. De mest komplekse og uoversiktelige punktene ble utført tidlig for å minske usikkerheten i prosjektet.

Prosjektrapporten er delt opp i kapitler slik det er naturlig å dele opp prototypen i forskjellige elementer. Innenfor hvert element blir det beskrevet hvilke krav og spesifikasjoner som hører til det elementet, samt løsninger og resultater. Som avrundning av rapporten blir det sett på hele systemet under ett, og hvordan systemet fungerer opp i mot de krav som er satt til en prototype.

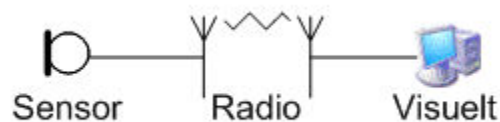


## 2 Spesifikasjon

Det stilles ulike krav til systemer, som beskrevet i innledningen. Man har diverse funksjonskrav til systemet, tekniske krav i forhold til internasjonale standarder, krav til en prototype og krav i forhold til uttesting av systemet. Kravene vil bli presentert og definert i delkapitlene under.

### 2.1 Funksjonskrav til systemet

Ved starten av prosjektet ble det satt opp tre overordnede og generelle krav til et ferdig system som vist i Figur 2. Det første kravet var at radioløsningen skulle gi rask og sikker overføring av informasjon og inneha mange kanaler. På sensorsiden skulle en sensor gi peak og RMS-verdien av lydtrykket. Det tredje kravet var at systemet skulle ha en oversiktlig visualisering så det ville være enkelt å styre systemet.



Figur 2: Oversikt over systemet

### 2.2 Utfyllende tekniske krav i henhold til standarder

Det er tre standarder som det er naturlig å ta med i arbeidet med å lage en trådløs dosimetrimåler. Den ene er IEC standard nummer 61672 som spesifiserer hvilke krav som gjelder til en lydnivåmåler [4]. Den andre standarden er IEC standard nummer 61252 som spesifiserer hvilke krav som gjelder for personlige lydeksponeringsmålere [5], ofte også kalt dosimetre. ISO 1999:1990 er den tredje aktuelle standarden [6]. Denne standarden tar blant annet for seg sannsynligheten for å få hørselskader sett i sammenheng med lydtrykket en blir eksponert for i løpet av en gitt periode. Av disse tre standardene er det standarden for lydeksponeringsmålere som er viktigst for dette prosjektet. Standarden for lydnivåmåler blir brukt mer som veiledning i prosjektet.

De to viktigste punktene i standarden for dosimetrimålere er virkeområdet både for lydtrykket og for frekvensområdet. Virkeområdet for lydtrykket til enheten er spesifisert i kapittel 4.7 [5], hvor det står at lydtrykket til enheten minimum skal måles fra 80 til 120 dB. Kravet til frekvensvirkeområdet til enheten er spesifisert i kapittel 7.1 [5], til området fra 63 til 8000 Hz. Det anbefales i det samme kapitlet at enheten bør kunne oppfatte frekvenser over området fra 31,5 Hz til 12,5 kHz for å kunne få med støy i et bredere frekvensområde, men dette er imidlertid ikke et krav.

## Distribuert lydnivåmåling

I tillegg til de to overnevnte punktene er det i tabell 1 i [5] også definert hvordan vektingen av de ulike lydmålingene skal være i enheten, og hvor mye avvik fra tabellen som kan tolereres. Disse verdiene er gjengitt i Tabell 1.

Tabell 1: Frekvensvekting og maksimalt avvik i henhold til standarden [5]

| Nominell frekvens , Hz | A-vekting, dB | $\Delta A$ -vekting, dB |
|------------------------|---------------|-------------------------|
| 63                     | -26,2         | $\pm 2,0$               |
| 125                    | -16,1         | $\pm 1,5$               |
| 250                    | -8,6          | $\pm 1,5$               |
| 500                    | -3,2          | $\pm 1,5$               |
| 1 000                  | 0,0           | 0,0                     |
| 2 000                  | 1,2           | $\pm 2,0$               |
| 4 000                  | 1,0           | $\pm 3,0$               |
| 8 000                  | -1,1          | $\pm 5,0$               |

Andre punkter som ikke er kritiske, men som definerer hvordan utstyret skal bli designet er blant annet kravet til levetid. I kapittel 4.12 i [5] er det gitt et krav om at en dosimetrimåler som er utstyrt med batteri må kunne være fungerende i minimum åtte timer. Det er også et krav om at det skal være en mulighet for brukeren å sjekke at batterispenningen er god nok til å utføre målinger med. Denne kontrollen skal da ikke forstyrre målingen av lydeksponeringen.

Standarden krever dessuten at det skal være en indikator som sier ifra dersom mikrofonen blir overstyrt.

### 2.3 *Krav til prototype*

I tillegg til de andre kravene som er spesifisert, ble det satt opp noen generelle krav til en ferdig enhet. Selv om det ikke er aktuelt å lage en ferdig enhet i dette prosjektet, skal designet og kravene til prototypen reflektere kravene til et ferdig system.

Prototypen må kunne vise til at den ferdige enhetens størrelse vil være liten nok til å kunne settes nærme eller på skuldrene til en person uten at det virker sjenerende eller misplassert.

Strømbruket til enheten er et annet krav, og dette har igjen stor innvirkning på størrelsen til enheten. Ved et høyt strømforbruk kan det, hvis det ikke er noen begrensning på størrelsen til prototypen, bli satt inn tilsvarende større batterier for å kunne drive enheten over en ønsket tidsperiode.

Det siste generelle kravet er prisen til enheten, som bør ligge i samme prisklasse som tilsvarende enheter. Siden prisen per enhet er sterkt avhengig av kvantum og andre variabler som ikke nødvendigvis er direkte tekniske, vil det ikke bli lagt stor vekt på å estimere prisnivået i denne rapporten.

### 2.4 *Krav ved testing, testoppsett*

For å gjøre en avsluttende test av systemet så virkelighetsnært som mulig, ble det tatt utgangspunkt i å lage en løsning for et orkester. Tanken bak prosjektet var å lage et system for

## Distribuert lydnivåmåling

Trondheim Symfoniorkester (TSO), og mange av kravene under ble satt for at prototypen skulle kunne brukes av dette orkesteret. Disse kravene er oppsummert i Tabell 2.

Den trådløse forbindelsen mellom sensorene og sentralen i systemet stiller krav til både rekkevidde, redundans, pakketap, oppdateringsfrekvens og stabilitet. Rekkevidden mellom de trådløse enhetene må være lengre enn avstanden mellom dirigenten og musikerne for at systemet skal kunne fungere. I følge [7] er scenearealet for musikere i operaen i Oslo 145 m<sup>2</sup>, og det skal gi rom for opptil 100 musikere. I beste tilfellet gir dette en 1:2 fordeling av området, som betyr en lengde på 17 meter og en dybde på 8,5 meter. Dette resulterer i en diagonal fra dirigenten og til ytterpunktene på 12 meter som da må være minimum rekkevidde til systemet.

Redundans, pakketap, oppdateringsfrekvens og stabilitet er fire parametre som er avhengig av hverandre. Det viktigste er i midlertidig at ved konstruering av systemet skal stabiliteten i systemet være så god at all informasjon fra sensorene når sentralen i systemet, slik at det blir et minimalt informasjonstap. For å kunne få et dynamisk utseende på sentralen i systemet skal oppdateringsfrekvensen til hver sensor minimum være én gang per minutt.

Batterilevetiden til en enhet må være lenger enn arbeidstiden til en musiker. En konsert varer som oftest i to til fire timer, men musikere har ofte lengre øvelser. Kravet om 8 timers varighet fra standarden om dosimetrimålere blir derfor det gjeldende kravet.

Systemet er tenkt med en personlig sensor til hver musiker, slik at lydmålingene blir individuelle og riktige for hver person. På bakgrunn av dette må antall noder eller sensorer i systemet være like mange som antall musikere på scenen. Ved å fortsette og ta utgangspunkt i TSO med en orkesterstruktur på opptil 90 personer [8], gir dette et system med 90 noder. I et prosjekt som dette skal konseptet vises, og det skal ikke være en serieproduksjon av sensorer. Derfor blir kravet til antall noder nedskalert til fire stykker.

Ved testing av systemet skal sensorene ha en nøyaktighet og et dynamisk område som beskrevet i kapittel 2.2. Hvis det er et avvik mellom kravet og målingene, skal avviket være slik at det varslar brukeren av systemet for tidlig, enn for sent.

Tabell 2: Krav til testoppsett

| Type                 | Krav                                       |
|----------------------|--|
| Rekkevidde           | 12 meter                                   |
| Redundans            | Skal gi tilfredstillende stabilitet        |
| Pakketap             | Skal gi tilfredstillende stabilitet        |
| Oppdateringsfrekvens | En gang per minutt                         |
| Stabilitet           | Ingen informasjon skal kunne gå tapt       |
| Levetid              | 8 timer                                    |
| Antall sensorer      | Praktisk 4 sensorer, teoretisk 90 sensorer |
| Dynamisk område      | 80 til 130 dB, A-veid                      |

# Distribuert lydnivåmåling



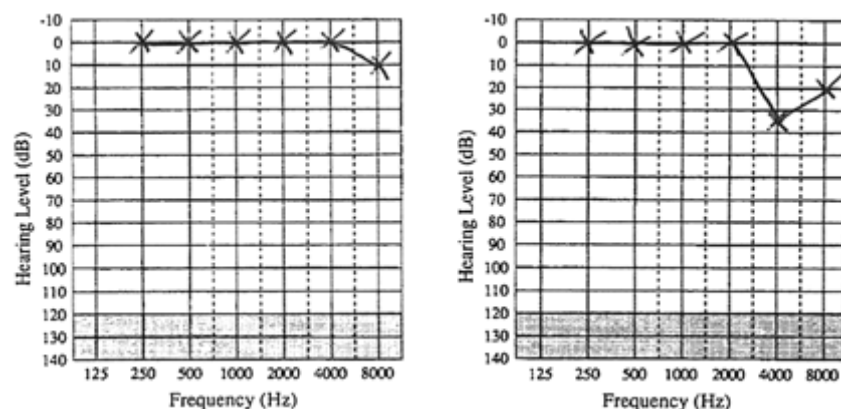
## 3 Hørselskader

Syv prosent av alle europeiske arbeidstakere har en hørselsskade som er relatert til arbeid [9]. I kategorien produksjon og gruvesektoren er sannsynligheten for å få en arbeidsrelatert hørselsskade størst, tett etterfulgt av konstruksjonssektoren. I produksjons- og gruvesektoren betrakter 16 prosent av arbeidstakerne seg selv for å være i faresonen for å få en arbeidsrelatert hørselsskade.

### 3.1 Typer hørselskader

Det er vanlig å kategorisere hørselsnedsettelse i to hovedkategorier; konduktiv og sensorineural hørselsnedsettelse [10]. En konduktiv hørselsnedsettelse kjennetegnes ved at det har oppstått en skade i det ytre øret, mellom øret eller ved overføringen til det indre øret. En nedsettelse her er i veldig mange tilfeller reverserbar. Ved en sensorineural hørselsnedsettelse innebærer det en skade i det indre øret eller i hørselsnervene til hjernen. Som oftest er en sensorineural skade ikke mulig å reversere. Figur 4 viser de forskjellige typene hørselskader i de to hovedkategoriene.

I dette prosjektet er det kun aktuelt å se på hørselskader som kommer av høye lydtrykk. I Figur 3 er det til venstre gitt et audiogram av et friskt øre, hvor frekvensresponsen er nesten flat. Audiogrammet til høyre i Figur 3 viser frekvensresponsen til et hørselsskadet øre med en støyskade. Dette har en tydelig demping av frekvenser ved 4 kHz mens det har en flat frekvensrespons under 2 kHz. Denne typen hørselsskade ligger i kategorien sensorineurale hørselskader, da skaden ødelegger hørselssansene i det indre øret og ikke gir noen skader i ytre eller mellomøret. Hørselskader fra høye lydtrykk kategoriseres vanligvis opp i to deler, akustisk traume og permanent terskelskift (PTS) [11].

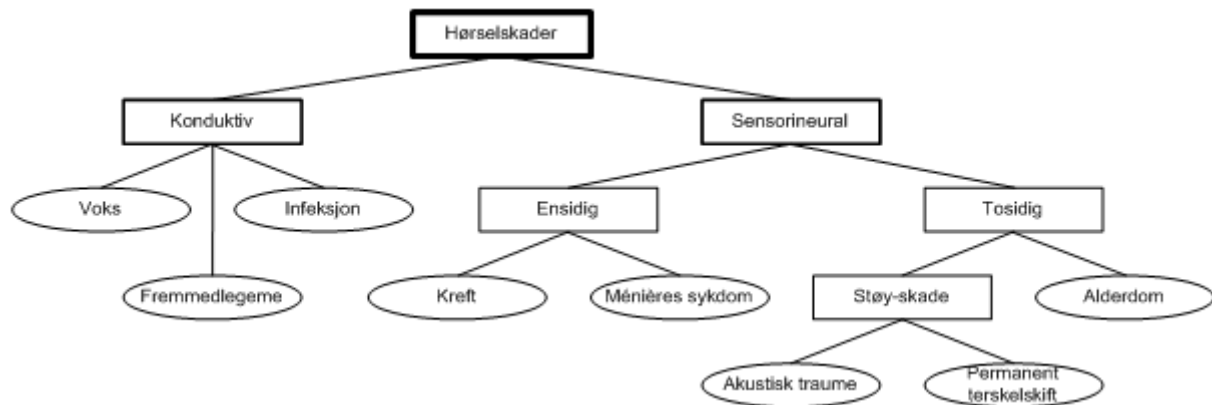


Figur 3: Audiogram av henholdsvis et friskt øre og et hørselsskadet øre [12]

Ved akustisk traume er årsaken en impulsstøy, fra for eksempel en hammer eller pistol, med meget kort varighet og høy amplitude. Skaden fra en slik lydkilde kan gi mekaniske feil og skader på musklene og hårene i sneglehuset. Arbeidsmiljøloven setter en grense som spesifisert i kapittel 3.2 på 130 dB ved støykilder med slike karakteristikker.

## Distribuert lydnivåmåling

Temporært terskelskift (TTS) er en tilstand mange har erfaring med. De fleste opplever dette etter en konsert med mye lyd som ”dotter” i ørene, og gir seg etter en liten stund med hviling av øret i omgivelser med lave lydtrykk. Når situasjoner med mye høy lyd forekommer hyppig og regelmessig kan det resultere i et permanent terskelskift. Ved en slik skade blir hår i sneglehuset utslitt og ødelagt over tid, og mister da sin evne til å fungere. Denne skaden og slitasjen er ikke-reverserbar. I motsetning til akustisk traume, trenger ikke lydtrykket å være så høyt for å kunne gi et permanent terskelskift. Det som da er essensielt er at perioden som en person utsettes for lydkilden er mye lengre enn tidsperioden som skal til for å kunne få et akustisk traume.



Figur 4: Kategorisering og oppbygging av utvalgte typer hørselsnedsettelse [12]

### 3.2 Krav for vern mot støy på arbeidsplassen

Med formål om å sikre arbeidstakere mot helseskadelig støy er forskriften ”Forskrift om vern mot støy på arbeidsplassen” [13] opprettet. Denne har som mål å sette krav til arbeidsplassen slik at arbeidstakernes helse og sikkerhet beskyttes, og slik at arbeidstakeren ikke utsettes for støy som potensielt kan ødelegge hørselen. I paragraf 8 i [13] er det definert to grenseverdier som ikke må overskrides på arbeidsplassen. Det daglige støyeksponeringsnivået,  $L_{EX,8h}$  må ikke overskride 85 dB i løpet av en dag, og lydtrykknivåets toppverdi,  $L_{pC,peak}$  må ikke overskride 130 dB.

Det daglige støyeksponeringsnivået er definert i kapittel 3.6 i [6], og er vist i formel 3.1. Her er  $T_e$  lengden på arbeidsdagen,  $T_0$  er referanselengden på åtte timer og  $L_{Aeq,T_e}$  er definert i kapittel 3.5 i [6] og vist i formel 3.2. I formel 3.2 så er  $t_2 - t_1 = T$  perioden for når kalkuleringen for støyeksponeringsnivået er målt ut ifra. Variabelen  $p_A$  er det A-vektede lydtrykket gitt i pascal, og  $p_0$  er referanseverdien med verdien 20  $\mu$ Pa.

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,T_e} + 10 \times \lg(T_e/T_0) \quad (3.1)$$

$$L_{Aeq,T_e} = 10 \times \lg \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \times \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (3.2)$$



## Distribuert lydnivåmåling

I paragraf 4a i [13] er  $L_{pC,peak}$  definert som ”(...) høyeste observerte C-veide lydtryknivå målt i løpet av måletiden (...)”. Dette er illustrert i formel 3.3, hvor  $p_c$  er det C-veide lydtrykket gitt i pascal, og  $p_0$  er referanseverdien på 20  $\mu$ Pa.

$$L_{pC,peak} = maks \left[ 10 \times lg \left( \frac{p_c^2(t)}{p_0^2} \right) \right] \quad (3.3)$$

Kravene, som gjengitt over er absolutte minstekrav til alle arbeidsplasser i Norge. I tillegg til disse, finnes det andre krav for arbeidstakere som skal kunne føre uanstrengte samtaler, konsentrere seg over lengre tid eller har andre prestasjonskrav. Disse kravene er gjengitt i paragraf 7 i [13], men de har ikke som primærmål å hindre skade på hørselen.

### 3.3 Forebygging av hørselskader

Det er arbeidsgivers plikt å oppfylle kravene i arbeidsmiljøloven. Ved overskridelse av grensene som er gjengitt i kapittel 3.2, er det i paragraf 10 i [13] listet opp noen tiltak. Mange av disse tiltakene går ut på å isolere kilden, eller bytte den ut. Det er også nevnt tiltak som hensiktsmessig bruk av arbeids- og verneutstyr, men disse skal i følge paragraf 5 kun brukes etter at alle muligheter ved å dempe ned selve kilden er forsøkt. En av årsakene til dette er fordi personlig verneutstyr kan bli brukt feil, og at det mange ganger ikke blir gitt god nok opplæring til arbeidstakerne om bruk av hørselvern [14].

Et annet alternativ, som er nevnt er underpunkt g i paragraf 10 i [13], hvor det står: ”Arbeidsgiveren skal blant annet sørge for at risiko som er forårsaket av støy fjernes eller reduseres til et lavest mulig nivå, ved å (...) tilrettelegge arbeidet ved begrensnig av eksponeringstid og intensitet, og med tilstrekkelige støyfrie hvileperioder (...)”

Andre tiltak som skal utføres er helseundersøkelser av arbeidstakerne, samt å utforske om det finnes andre arbeidsmetoder som gir redusert støyeksponering og vedlikehold av personlig verneutstyr.

# Distribuert lydnivåmåling



## 4 Mikrofon

Siden oppgaven til dette systemet er å måle lydtrykket lokalt ved flere sensorer, er det essensielt å bruke en mikrofon til å overføre lydbølger til elektriske signaler for behandling.

### 4.1 Bakgrunn

Bakgrunn for valg av mikrofon og løsning blir skissert i kapitlene under.

#### 4.1.1 Elektretmikrofon

En elektretmikrofon er en mikrofon som ligner mye på en kondensatormikrofon. Elektretmikrofoner produserer et elektrisk signal som produkt av mekaniske svingninger mellom to plater i mikrofonen. Når disse platene svinger gir dette en forskjell i kapasitansen mellom disse, og dette gir en forandring i utgangsspenningen til mikrofonen. Likheten mellom en elektretmikrofon og en kondensatormikrofon er at begge trenger en spenningsforsyning for å få mikrofonen til å fungere. Denne spenningsforsyningen brukes hos begge typene til å forandre signalet fra mikrofonen, som har en høy impedans, til et lavimpedanssignal som kan sendes ut av mikrofonen. Forskjellen mellom disse metodene er at mens kondensatormikrofonen setter opp en spenning på platene ved hjelp av spenningsforsyningen, er denne spenningen satt i elektretmikrofonen ved å velge to materialer med en stabil elektrisk ladning mellom seg.

#### 4.1.2 FG-3629

Mikrofonen FG-3629 fra Knowles Acoustics er en liten elektretmikrofon med lavt strømforbruk på 50  $\mu\text{A}$ , og den var tilgjengelig fra Sintef ved oppstarten av prosjektet. Hvorvidt den har en helt flat frekvensrespons eller ikke er mer usikkert. [15] viser at mikrofonen har en helt flat frekvensrespons opp til 10 kHz, mens [16] og [17] viser at mikrofonen har en økning fra 6 kHz, og ender på 3 dB økning ved 10 kHz. Ut ifra [15] har mikrofonen en følsomhet på -53 dB relativt til 1 volt/0,1 pascal, og krever en likespenning inn på mellom 0,9 til 1,6 volt.

#### 4.1.3 FG-23742

Mikrofonen FG-23742 er i likhet med FG-3629, en liten og strømgjerrig elektretmikrofon fra Knowles Acoustics [18]. I følge [19] har denne mikrofonen en helt flat frekvensrespons til over 10 kHz. Det som vesentlig skiller den fra FG-3629 er at den har en lavere følsomhet på -63 dB relativt til 1 volt/0.1 pascal. Denne forskjellen gir mikrofonen en mulighet til å måle lydtrykk som er høyere enn det FG-3629 kan måle.

## 4.2 Kravspesifikasjon

Ut ifra kapittel 2.2 er det et krav i standarden som sier at sensoren skal kunne måle lydtrykk i området 80 til 130 dB. Dette kapitlet sier også at frekvensvektingen mellom 31,5 Hz og 12,5 kHz er spesifisert, slik at frekvensresponsen til mikrofonen bør være flat. I tillegg til dette kommer det krav om størrelse og strømforbruk, som beskrevet i kapittel 2.3

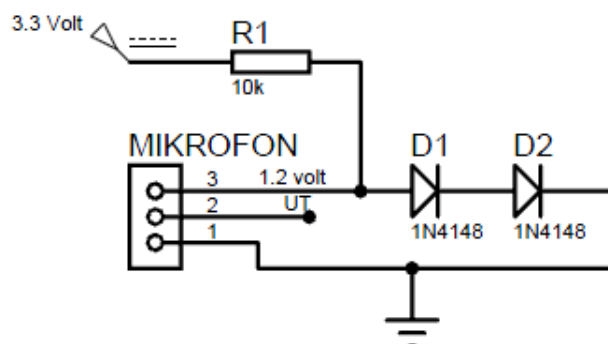
## 4.3 Løsning

Løsningen i prosjektet ble å bruke FG-3629 som mikrofon, da denne var tilgjengelig hos Sintef ved oppstarten av prosjektet. Mikrofonen tilfredsstiller de fleste kravene, med unntak av blant annet at den ikke er i stand til å måle så høye lydtrykk som er nødvendig i henhold til standarden. Ut ifra kapittel 4.1.2 kan inngangsspenningen til mikrofonen gå opp til 1,6 volt, og den har en følsomhet på -53 dB relativt til 1 volt/0,1 pascal. Ved å bruke formlene (4.1) og (4.2) gir dette et teoretisk maksimalt målbart lydtrykk på 125 dB, noe som er mindre enn kravet fra standarden.

$$p = 0,1 \times \frac{u/2}{-53 \text{ dBV}} = 0,1 \times \frac{u/2}{10^{-53/20}} = 0,1 \times \frac{u/2}{2,2387 \times 10^{-3}} \quad (4.1)$$

$$L_p = 20 \times \log\left(\frac{p}{p_0}\right) = 20 \times \log\left(\frac{p}{20 \mu}\right) \quad (4.2)$$

For å kunne bruke mikrofonen ble det designet en forspenningskrets til mikrofonen, se Figur 5. Denne forspenningskretsen har som mål å gi mikrofonen en fast spenning på 1,2 volt, og levere mer strøm enn mikrofonen trekker. Spenningen på 1,2 volt ble valgt for å være sikker på at mikrofonen ikke skulle få en høyere spenning enn den er lagd for. Den lavere spenningsforsyningen påvirker også det teoretiske høyeste lydtrykket mikrofonen kan detektere. Med (4.1) og (4.2) gir en spenningsforsyning på 1,2 volt et teoretisk høyeste lydtrykk på 122,5 dB som mikrofonen kan måle. Dette er 2,5 dB mindre enn 125 dB, som mikrofonen kunne detektere hvis forspenningen hadde vært på 1,6 volt.



Figur 5: Forspenningskrets til mikrofon

Forspenningskretsen til mikrofonen må kunne levere nok strøm til å drive mikrofonen på 50  $\mu$ A. Denne kretsen leverer en strøm på  $(3,3-1,2 / 10k) = 0,21$  mA til mikrofonen, som er nesten fire ganger så mye som den trenger.

## 4.4 Resultater

Ved implementering av kretsen vist i Figur 5, viser det seg praktisk at spenningen over diodene ligger i underkant av 1,1 volt i stedet for 1,2 volt. Denne spenningen synker også ved påføring av høye impulslydtrykk, men det er usikkert om dette har noen konsekvens på signalet fra mikrofonen. Spenningsnedgangen ved høye impulslydtrykk kan forhindres ved å sette på en stor kondensator mellom inngangsspenningen og jordingspunktet til mikrofonen. Ved å sette ned motstanden R1, kan spenningen over mikrofonen økes til 1,2 volt, men det går da på bekostning av et høyere strømforbruk til forspenningskretsen.

## Distribuert lydnivåmåling

Ut ifra løsningen ble det regnet ut et maks lydtrykk som mikrofonen fungerer for. Ved uttesting greide mikrofonen å måle lydtrykk på opptil 120 dB uten noen markant differanse mellom denne mikrofonen og referansemåleren (se Figur 38 og Figur 39 på side 53 og 54). Det ble ikke målt høyere lydtrykk da testutstyret ikke tillot dette, og det er derfor ikke testet om mikrofonen greier høyere lydtrykk.

En eventuell forbedring av mikrofonen kan være å bytte den ut med FG-23742. Denne har ingen økning av frekvensresponsen i høyere frekvenser og den har en lavere følsomhet enn FG-3629. Den lavere følsomheten på -63 dB istedenfor -53 dB gjør at ved å bruke formlene 4.1 og 4.2 kan mikrofonen måle lydtrykk helt opp til 135 dB ved 1,6 volt. Med en spenningsforsyning som designet på 1,2 volt, gir dette et maksimalt lydtrykk på 132,5 dB. På bakgrunn av dette tilfredsstillen den nye mikrofonen kravene fra standarden og bør ut ifra dette bli brukt videre. Ulempen med å bytte mikrofon til FG-23742 i dette prosjektet vil bli belyst ytterligere i kapittel 10.2 på side 57.

# Distribuert lydnivåmåling



## 5 Filterkretsen

En filterkrets er helt nødvendig i systemet for å fjerne frekvenser som ikke er ønsket å få inn på analoginngangen til mikrokontrolleren. Filterkretser kan være bygd opp av analoge eller digitale kretser, og de analoge filtrene kan igjen bygges opp av aktive, passive eller en kombinasjon av disse filterstrukturene.

Det er to filtre med ulik hensikt som er aktuelle i dette prosjektet. Det ene filteret skal simulere ørets frekvensrespons, A-veiekurven, mens det andre er et antifoldningsfilter som skal fjerne frekvenser over halve punktprøvningsfrekvensen.

### 5.1 Bakgrunn

En filterkrets kan filtrere signalet enten analogt eller digitalt. Forskjellen mellom disse og hovedkomponenten i aktive analoge filtre; operasjonsforsterkeren, blir kort beskrevet i kapitlene under.

#### 5.1.1 Operasjonsforsterkere

Et aktivt analogt filter består av motstander, kondensatorer og en eller flere operasjonsforsterkere. I tillegg til å bestemme verdien til motstanderne og kondensatorene for å få riktig frekvensrespons, må operasjonsforsterkeren velges individuelt til hvert filter. I dette prosjektet ble det sett på flere operasjonsforsterkere, og i Tabell 3 er noen av de viktigste parametrene til de ulike operasjonsforsterkerne oppgitt. En kolonne som kan innby til misforståelser er kolonnen ”Spenningsområde ut”. Denne kolonnen sier hvor mange millivolt fra jord og VCC operasjonsforsterkeren greier å forsterke signalet. Et lavt tall her gir en liten forskjell mellom det utgående signalet og operasjonsforsterkerens jord og VCC spenning.

# Distribuert lydnivåmåling

Tabell 3: Oversikt over operasjonsforsterkere og egenskaper

| Operasjonsforsterker | Spenningsforsyning | Strømbruk    | Offset             | Spenningsområde inn i antall volt    | Spenningsområde ut i antall millivolt  |
|----------------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------------------------------|--|
| AD8032 [20]          | 2,7 – 12 V         | 750 $\mu$ A  | $\pm$ 1000 $\mu$ V | (GND-0.2) $\rightarrow$<br>(VCC+0.2) | (GND+80) $\rightarrow$<br>(VCC-80)     |
| AD823 [21]           | 3 – 36 V           | 5000 $\mu$ A | $\pm$ 200 $\mu$ V  | (GND-0.2) $\rightarrow$<br>(VCC-1.5) | (GND+80) $\rightarrow$<br>(VCC-80)     |
| LM6142 [22]          | 1,8 – 2,4 V        | 800 $\mu$ A  | $\pm$ 1800 $\mu$ V | GND $\rightarrow$<br>VCC             | (GND+80) $\rightarrow$<br>(VCC-80)     |
| OP291 [23]           | 2,7 – 12 V         | 300 $\mu$ A  | $\pm$ 80 $\mu$ V   | GND $\rightarrow$<br>VCC             | (GND+40) $\rightarrow$<br>(VCC-40)     |
| OP495 [24]           | 3 – 36 V           | 150 $\mu$ A  | $\pm$ 300 $\mu$ V  | GND $\rightarrow$<br>(VCC-1)         | (GND+2) $\rightarrow$<br>(VCC-2)       |
| OPA2350 [25]         | 2,7 – 5,5 V        | 5200 $\mu$ A | $\pm$ 150 $\mu$ V  | (GND-0.1) $\rightarrow$<br>(VCC+0.1) | (GND+25) $\rightarrow$<br>(VCC-25)     |
| OPA2340 [26]         | 2,7 – 5 V          | 750 $\mu$ A  | $\pm$ 150 $\mu$ V  | (GND-0.3) $\rightarrow$<br>(VCC+0.3) | (GND+40) $\rightarrow$<br>(VCC-40)     |
| OPA2344 [27]         | 2,7 – 5,5 V        | 150 $\mu$ A  | $\pm$ 200 $\mu$ V  | (GND-0.3) $\rightarrow$<br>(VCC+0.3) | (GND+40) $\rightarrow$<br>(VCC-40)     |
| OPA2134 [28]         | 5 – 36 V           | 4000 $\mu$ A | $\pm$ 500 $\mu$ V  | (GND+2.5) $\rightarrow$<br>(VCC-2.5) | (GND+1200) $\rightarrow$<br>(VCC-1200) |

En annen viktig parameter, som er felles for alle operasjonsforsterkerne i Tabell 3, er båndbredden til enhetene som er større enn 75 kHz ved en forsterkning på én i kretsen. Dette er mer enn nok for lydfiltrering i området 20 til 20.000 Hz.

## 5.1.2 Analog og digital filtrering

I dette prosjektet var det aktuelt å se på analog og digital filtrering, og viktigst - forskjellen mellom disse to måtene å filtrere signalet på. Begge kategoriene innehar mange forskjellige oppbygninger av filterkretsen, men det vil det ikke bli sett nærmere på her.

### 5.1.2.1 Analog filtrering

Analog filtrering foregår ved hjelp av motstander og kondensatorer som satt sammen på ulike måter gir et frekvensavhengig system. I et aktivt analogt filter er operasjonsforsterkeren ofte den enheten som bruker mest strøm, og det er derfor viktig å velge riktig operasjonsforsterker til filteret.

### 5.1.2.2 Digital filtrering

Filtrering av signalet digitalt fungerer ved først å punktprøve det analoge signalet for å digitalisere det. Signalet blir da kodet som et tall og filtrert ved å lagre, addere og multiplisere signalet med en rekke koeffisienter, som til sammen bestemmer filterets frekvensrespons.

En utfordring ved digital filtrering i en mikrokontroller er at det som oftest kun er de største mikrokontrollerne som støtter flyttallsmultiplikasjon. Disse mikrokontrollerne har da også som oftest en egen Digital Signal Prosesseringsenhet (DSP) innebygd og bruker da mer strøm. Et eksempel på dette er for eksempel LPC4350 fra NXP Semiconductors (NXP) [29], som bruker en Cortex-M4 prosessor fra ARM.



## 5.1.2.3 Forskjeller

De tre største forskjellene mellom digital og analog filtrering er strømforbruket, tilpasningsevnen ved design av prototype og størrelsen til filteret.

### *Strømforbruk*

Strømforbruket til et filter er kun avhengig av hvilke komponenter som er brukt i filteret. I et digitalt filter er det en mikrokontroller eller en DSP-enhet som bruker mest strøm, mens i et aktivt analogt filter er det operasjonsforsterkeren som trekker mest strøm. Forskjellen i strømforbruk er derfor helt avhengig av hvilken operasjonsforsterker eller prosessor man velger til kretsen. Dette valget kan da gi andre konsekvenser med hensyn til støy, tilpasningsevne, nøyaktighet og størrelse.

### *Prototype*

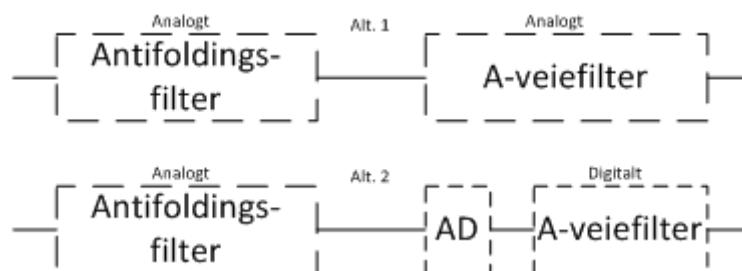
Tilpasningsevnen til en prototype av filtrene er svært forskjellig. Et analogt filter må loddes opp for å minske støy i filteret ved uttesting. En forandring av filteret vil da gi mye arbeid i form av lodding og bruk av nye komponenter. Et digitalt filter har ikke denne ulempen, da det er lett å forandre noen konstanter i programvaren og overføre dette til mikrokontrolleren.

### *Størrelse*

Størrelsesforskjellen mellom et analogt og digitalt filter bestemmes ut fra de andre komponentene som skal være med i systemet. Hvis det allerede er en mikrokontroller som kan filtrere signalet med i systemet, kan man se bort ifra størrelsen til det digitale filteret. I det motsatte tilfellet hvor mikrokontrolleren må byttes ut med en større mikrokontroller, øker fotavtrykket til mikrokontrolleren.

## 5.2 Kravspesifikasjon

En filterkrets skal bestå av to komponenter - et antifoldingsfilter og et A-veiefilter. Antifoldingsfilteret skal fjerne frekvenser som er høyere enn halve samplingsfrekvensen, mens A-veiefilteret skal simulere det menneskelige ørets frekvenskurve, som spesifisert i [5]. Det er to alternative måter å konstruere A-veiefilteret på, analogt eller digitalt, mens antifoldningsfilteret må være analogt for å kunne fjerne høye frekvenser før signalet punktpøves i mikrokontrolleren, se Figur 6.



Figur 6: Filteralternativene

Ut fra kapittel 2.2 og Tabell 1 er det definert et krav til nøyaktighet og avvik fra den teoretiske kurven som filteret må tilfredsstille. I tillegg til dette kommer de mer generelle kravene fra kapittel 2.3 angående strøm, størrelse og pris.

### 5.3 Løsning

For å kunne lage et system etter spesifikasjonene er det behov for to filtre som sammen skal ta seg av de frekvensavhengige komponentene. Det er et antifoldningsfilter og et A-veid filter. Antifoldningsfilteret ble valgt til å være et fjerdeordens filter som skal forhindre foldningsfeil i AD-omformerer. A-veiefilteret er et filter som skal representere frekvenskurven til det menneskelige øret, og skal derfor gi informasjon om hvilke lyder mennesker subjektivt mener at er høye og hvor høye de er.

I prosjektet ble det valgt å bruke operasjonsforsterkeren OPA2340. Denne operasjonsforsterkeren er gjennomsnittlig god på alle punktene, som vist i Tabell 3, selv om den ikke er den beste på enkeltpunktene. OPA2340 trekker middels mye strøm, har et godt dynamisk spenningsområde både inn og ut og har en lav offset for å få en stabil DC-spenning. Det var mulig å få tak i gratisseksemplarer av enheten i starten av prosjektet.

#### 5.3.1 Antifoldningsfilteret, $F_s = 16$ kHz

Antifoldningsfilteret ble satt opp som et analogt lavpassfilter for å filtrere bort informasjon med frekvens over halve samplingsfrekvensen. I starten av prosjektet var samplingsfrekvensen satt til 16 kHz, noe som krever en knekkfrekvens på 8 kHz i filteret. Filteret ble designet med hjelp av en filterdesignnettside [30], og ble tegnet opp med praktiske verdier i et analogt simuleringsprogram, Proteus [31]. Her ble filteret simulert, og frekvensresponsen til filteret ble som ønsket. Filterdesignet og frekvensresponsen er vist i vedlegg 13.1. Ut ifra den simulerte og ønskede frekvensresponsen til filteret har filteret en demping på 3 dB ved 8 kHz. I Tabell 1 er maksimalt avvik ved 8 kHz 5 dB, noe filteret tilfredsstillter.

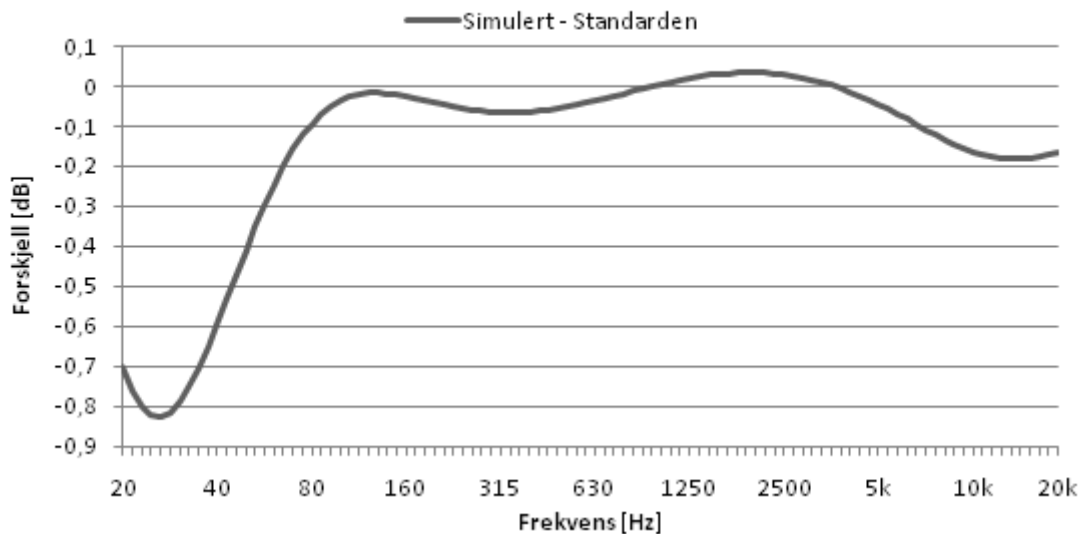
#### 5.3.2 Antifoldningsfilteret, $F_s = 32$ kHz

Etter måleresultatene i Figur 36 på side 52, viste det seg at dempingen av totalsystemet ved signaler på 8 kHz ble for stor. Mulige årsaker til dette blir drøftet i kapittel 9.2 på side 51. På bakgrunn av dette ble det designet et nytt antifoldningsfilter med knekkfrekvens på 16 kHz. Dette filteret ble også designet med hjelp av den samme filterdesignnettsiden [30], og simulert med praktiske verdier i Proteus. Frekvensresponsen til filteret ble som ønsket med en knekkfrekvens på 16 kHz. Filterdesignet og frekvensresponsen til det simulerte filteret er vist i vedlegg 13.2.

#### 5.3.3 A-veiefilteret, analogt

Det analoge A-veiefilteret ble designet etter [32], og ble simulert med praktiske verdier i Proteus. Filterets oppbygning og verdier er vist i vedlegg 13.3, og forskjellen i frekvensrespons mellom det simulerte analoge filteret og det standardiserte filteret [4] er vist i Figur 7. Filteret er designet med en forsterkning på 7,3 desibel, men er normalisert i grafen under for lettere å kunne sammenligne det med det teoretiske filteret. Forsterkningen til filteret er nødvendig for å kunne nyttiggjøre seg av hele det dynamiske området til AD-omformerer, og er omhandlet mer i kapittel 9.4 på side 54.

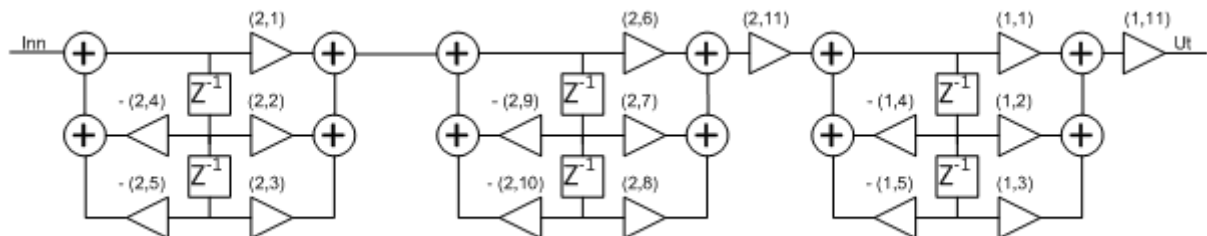
## Distribuert lydnivåmåling



Figur 7: Forskjellen mellom det simulerte analoge A-veifilteret og det standardiserte filteret [4]

### 5.3.4 A-veifilteret, digitalt

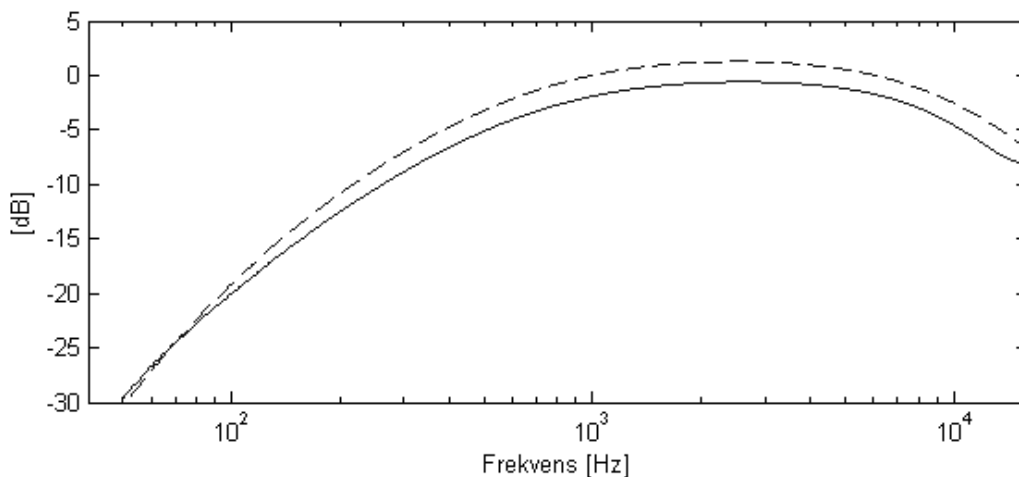
Fra Sintef [33] fikk jeg i dette prosjektet et eksempelprogram som viste oppbyggingen og koeffisientene til et digitalt A-veifilter. Koeffisientene er gjengitt i vedlegg 13.4, og Figur 8 viser hvordan koeffisientene i parentes skulle bli implementert og den skjematiske oppbyggingen til filteret. De to første delene utgjør til sammen et C-veifilter, mens den siste delen utgjør forskjellen mellom et C- og et A-veifilter.



Figur 8: Oppbygging av digitalt filter

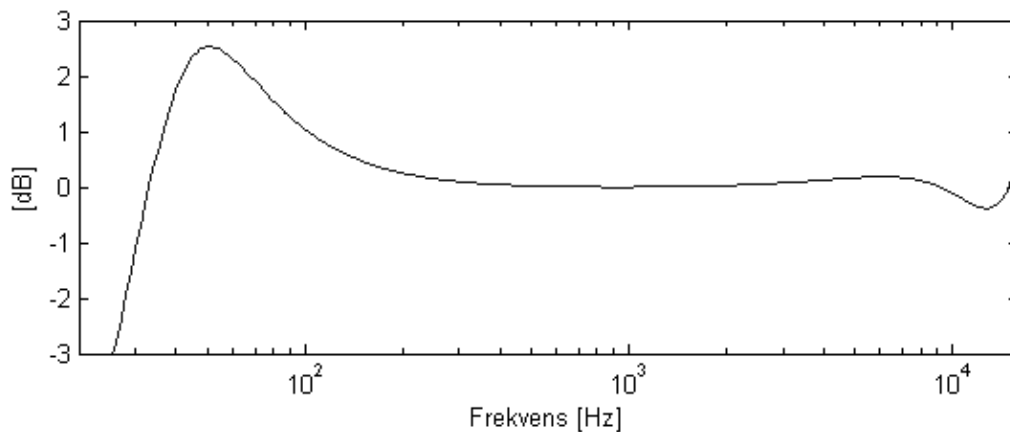
Med de gitte koeffisientene ble dette filteret simulert med Matlab [34] og det ga frekvensresponsen vist i Figur 9. Filterets punktprøvningsfrekvens er på 32 kHz, og aksene representerer amplitude i dB og frekvensene fra 40 til 16 kHz. Det standardiserte filteret er hentet fra kapittel 5.4.8 til 5.4.11 i [4] og vist med stiplet linje i Figur 9.

## Distribuert lydnivåmåling



Figur 9: Frekvensresponsen til det simulerte digitale filteret og det standardiserte filteret [4] i stiplede linje

Forskjellen mellom det standardiserte og det simulerte digitale filteret er vist i Figur 10. Denne figuren viser at det simulerte filterdesignet stemmer godt overens med det standardiserte. I figuren representerer aksene amplitude til det simulerte minus det standardiserte i dB og frekvensene fra 20 til 16 kHz som er halve punktprøvningsfrekvensen. Figuren er normalisert til null desibel ved en kilohertz for lettere å kunne sammenlignes med kravene som er gitt i Tabell 1.



Figur 10: Forskjellen mellom det simulerte digitale filteret og det standardiserte filteret [4]

Verdiene ved frekvensene gitt i Tabell 1 er gitt sammen med de simulerte frekvensverdiene i Tabell 4. Ut fra dette kan vi se at filteret stemmer ganske bra, men har en litt for lav demping ved 63 hertz. Dette blir mer omtalt i kapittel 5.4.4.

# Distribuert lydnivåmåling

Tabell 4: Frekvensrespons til det digitale filteret og maksimalavvik i henhold til standarden [5]

| Nominell frekvens , Hz | Forskjell, digitalt filter | $\Delta A$ -veking, dB |
|------------------------|----------------------------|------------------------|
| 63                     | 2,188                      | $\pm 2,0$              |
| 125                    | 0,6784                     | $\pm 1,5$              |
| 250                    | 0,1531                     | $\pm 1,5$              |
| 500                    | 0,02078                    | $\pm 1,5$              |
| 1 000                  | -0,0003346                 | 0,0                    |
| 2 000                  | 0,02713                    | $\pm 2,0$              |
| 4 000                  | 0,1234                     | $\pm 3,0$              |
| 8 000                  | 0,1183                     | $\pm 5,0$              |

## 5.3.5 Virtuell jord

I filterkretsen ble det lagt inn et virtuelt jordpunkt. Dette var nødvendig for å kunne få lydsignalet til å inneha en likespenningskomponent midt på inngangsnivået til AD-omformerer som kommer etter filterkretsen. Ideen til å lage det virtuelle jordingspunktet på denne måten kommer fra [35]. Kretsen som lager det virtuelle jordingspunktet er vist oppe til høyre i Figur 43 i vedlegg 13.1, og består av to motstander på 100 k $\Omega$ , en kondensator på 470 nF og en operasjonsforsterker. Dette gir et totalt strømforbruk for denne virtuelle jordingskretsen på cirka 766  $\mu A$ .

## 5.3.6 Strømforbruk

Filterkretsen kan deles opp i tre strømbrukende kretser, det virtuelle jordingspunktet, antifoldningsfilteret og det analoge A-veiefilteret. Strømforbruket til de forskjellige kretsene er gitt i Tabell 5 nedenfor. Det er i utregningen av A-veie- og antifoldnings-filteret ikke tatt hensyn til motstanderne og kondensatorene i kretsen, da strømforbruket til disse er mye mindre enn strømforbruket til operasjonsforsterkerene.

Tabell 5: Strømforbruk filterkretsene

| Krets                 | Strømforbruk |
|-----------------------|--------------|
| Virtuell jord         | 766 $\mu A$  |
| Antifoldningsfilteret | 1500 $\mu A$ |
| A-veiefilteret        | 750 $\mu A$  |

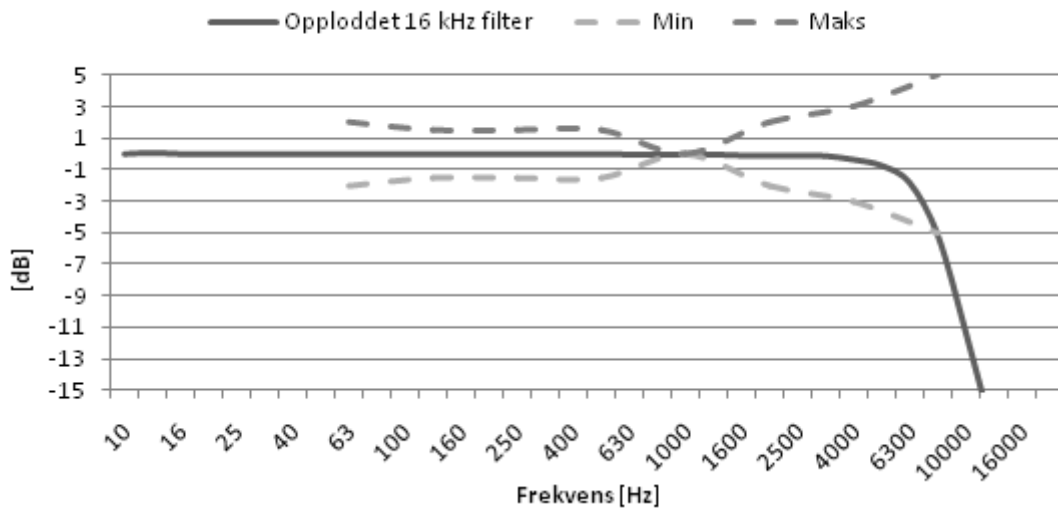
## 5.4 Resultater

Filtrene som er beskrevet over ble konstruert og implementert praktisk, og resultatene blir presentert i kapitlene under.

### 5.4.1 Antifoldningsfilteret, 16 kHz

Det ble konstruert et antifoldningsfilter med en knekkfrekvens på 8 kHz ut fra det simulerte filteret i kapittel 5.3.1. Dette filteret ble testet ut og frekvensresponsen ble plottet i Figur 11. Grafene *Min* og *Maks* er hentet fra Tabell 1, og viser kravene til filterets frekvensrespons.

## Distribuert lydnivåmåling

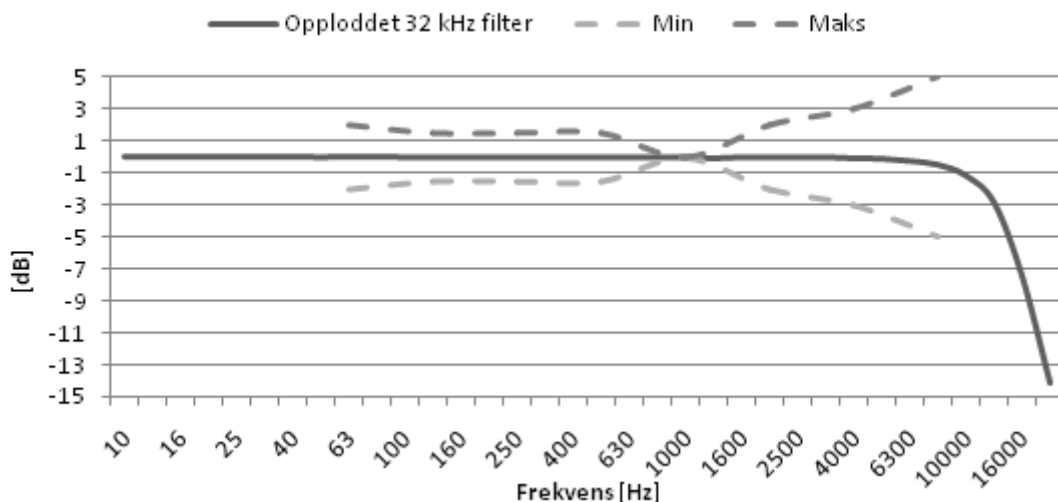


Figur 11: Frekvensresponsen til oppkoblet 16 kHz antifoldningsfilter

Tallene bak figuren viser at filteret har en demping på 5,1 dB ved 8 kHz. Dette kommer til uttrykk i figuren ved at frekvensresponsen til filteret krysser grafen som markerer den laveste frekvensresponsen et godkjent filter kan ha. Selv om dette ga en litt for stor demping i forhold til standarden, kan en for liten demping ved 8 kHz gi foldningsfeil i enheten og potensielt gi uriktig informasjon til brukeren. Med bakgrunn i dette ble det ikke vurdert å forandre filteret før frekvensresponsen til systemet oppkoblet ble målt til å ha en enda større demping, som vist i Figur 36 på side 52.

### 5.4.2 Antifoldningsfilteret, 32 kHz

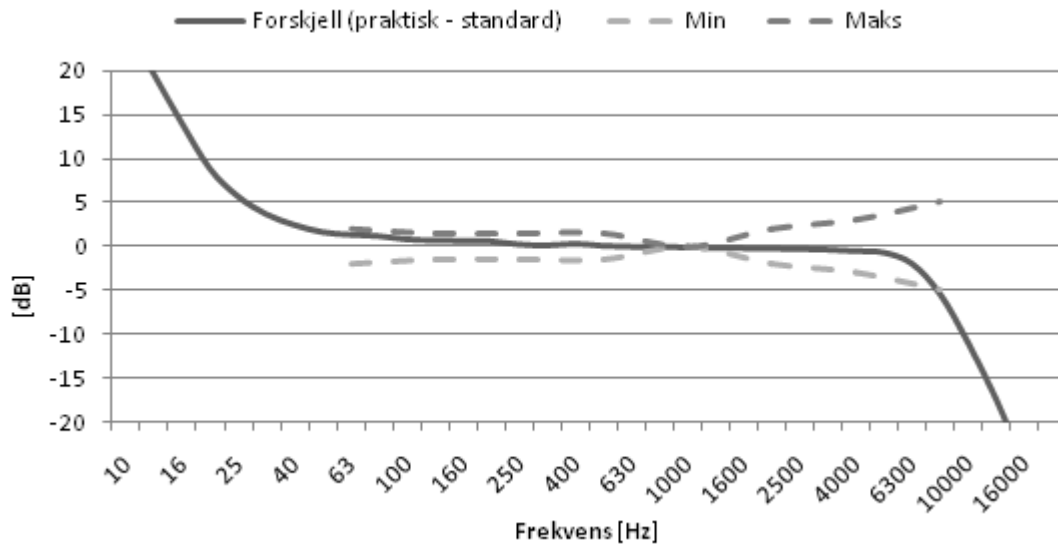
Det ble konstruert et antifoldningsfilter med en knekkfrekvens på 16 kHz for å redusere dempingen til systemet ved 8 kHz som vist i Figur 36 på side 52. Filteret ble konstruert ut ifra det simulerte filteret i kapittel 5.3.2. Frekvensresponsen til filteret ble plottet i Figur 12. Grafene *Min* og *Maks* er også her hentet fra Tabell 1, og viser kravene til filterets frekvensrespons. Ut ifra denne figuren kan vi se at antifoldningsfilteret er godt innenfor de gjeldende kravene til filteret.



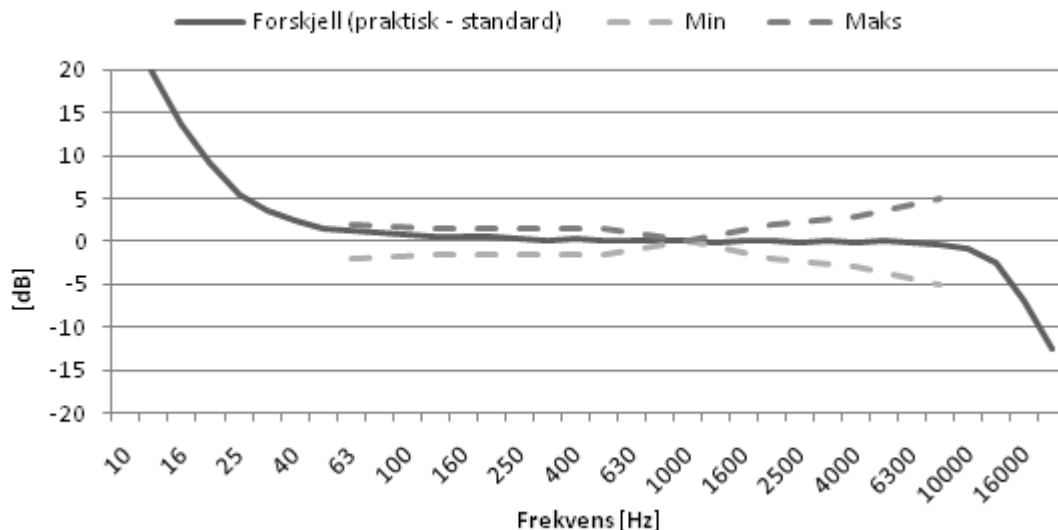
Figur 12: Frekvensresponsen til oppkoblet 32 kHz antifoldningsfilter

## 5.4.3 A-veiefilteret, analogt

Det ble konstruert to analoge A-veiefiltre i løpet av prosjektet. Det ene filteret ble koblet sammen med et antifoldningsfilter med knekkfrekvens på 8 kHz, mens det andre ble koblet på et antifoldningsfilter med en knekkfrekvens på 16 kHz. Begge filtrene ble loddet til et Veroboard [36] og verifisert. I Figur 13 og Figur 14 er forskjellen mellom den standardiserte frekvensresponsen [4] og den praktiske frekvensresponsen til filtrene plottet sammen med kravet til filtrenes frekvensrespons fra [5] for henholdsvis 16 kHz- og 32 kHz-filteret.



Figur 13: Frekvensresponsen til oppkoblet A-veie og 16 kHz antifoldningsfilter



Figur 14: Frekvensresponsen til oppkoblet A-veie og 32 kHz antifoldningsfilter

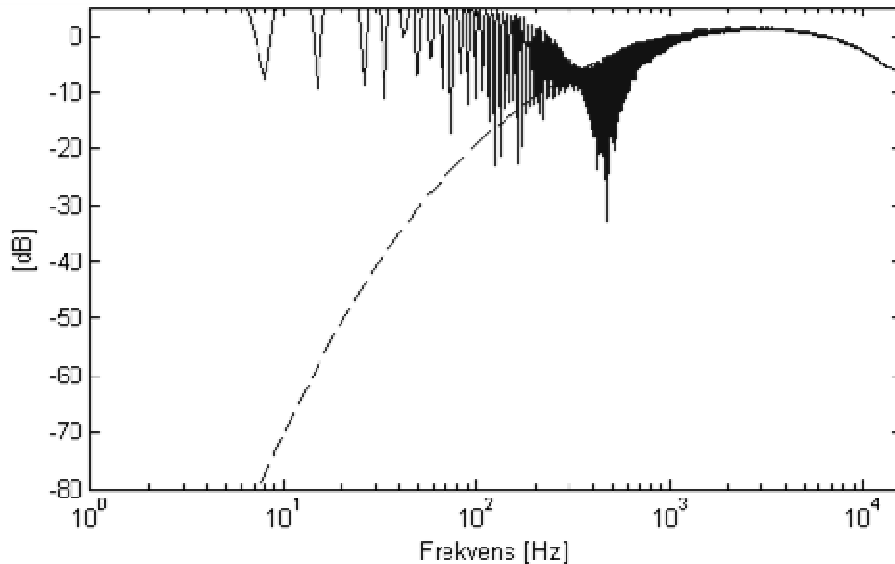
Ut fra de ovenstående figurene kan vi se at også her har filteret med knekkfrekvens på 8 kHz litt for høy demping til å kunne tilfredsstillere kravene fra standarden. 32 kHz filteret med knekkfrekvens på 16 kHz er godt innenfor kravene fra standarden, og er dermed det foretrukne filteret av disse to. Begge filtrene har en betydelig forskjell fra det teoretiske filteret ved lave frekvenser. Dette kommer av støy og vanskeligheter med å måle svake signaler. Hvis de praktiske filtrene skulle hatt en like stor demping som det standardiserte ved



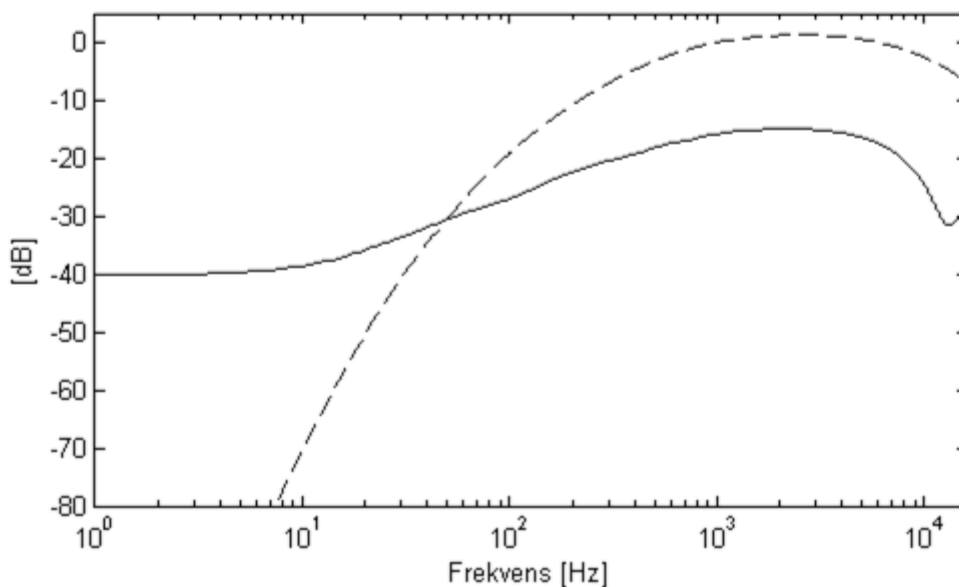


## Distribuert lydnivåmåling

Ved simulering av filteret i Matlab viste det seg at ved å sette  $n$  til 8, som gir en koeffisient på 256, resulterer det i en stor avrundingsfeil ved lave frekvenser. Ved å øke denne koeffisienten til 4096, som tilsvarer en  $n$  på 12, gir det et filter med overstyringsfeil. I Figur 16 og Figur 17 under er forskjellen i filterene med henholdsvis 256 og 4096 som multiplikasjonskoeffisient sammenlignet med den standardiserte kurven fra [4] plottet som funksjon av frekvens i Hz.



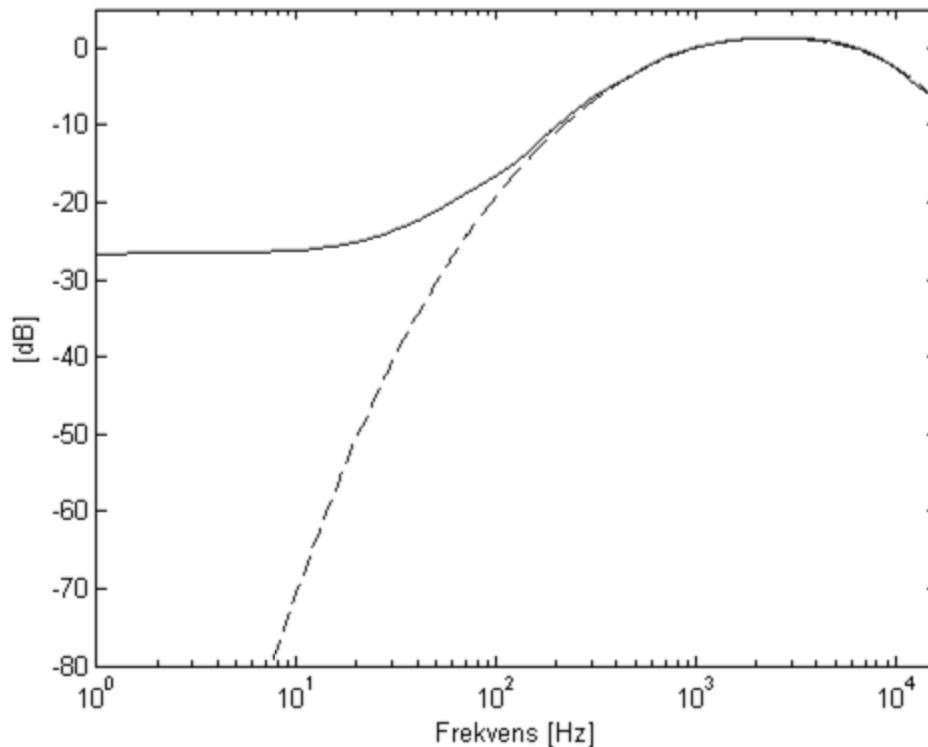
Figur 16: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret med 256 som koeffisient



Figur 17: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret med 4096 som koeffisient

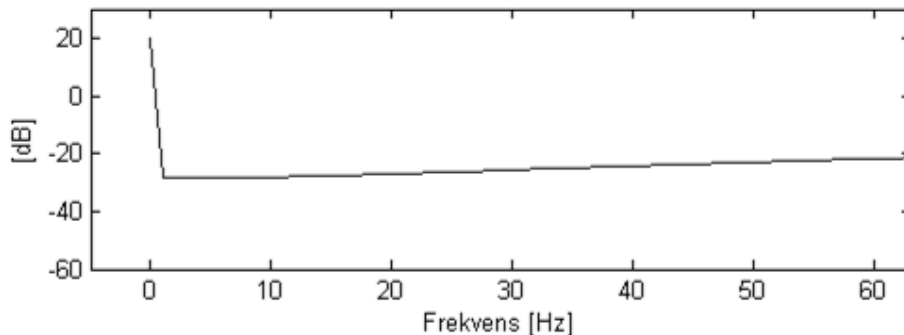
En mellomting mellom disse to negative effektene som er vist over er med en koeffisient på 1024 som gir  $n = 10$ . Dette filteret med en koeffisient på 1024 er normalisert og vist sammen med det standardiserte filteret i Figur 18 under.

## Distribuert lydnivåmåling



Figur 18: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret

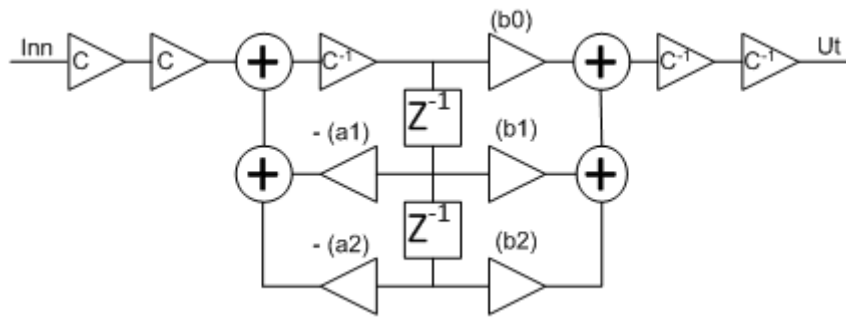
Figuren over viser at filteret har en nokså god frekvensrespons helt ned mot lave frekvenser, men at det simulerte filteret demper mye mindre her enn det teoretiske filteret. Ved å se på Figur 19, som viser kun det simulerte filteret ned mot lave frekvenser, har dette filteret en positiv forsterkning av frekvenser med svært lave frekvenser. Uavhengig av problemet med at dette ikke er slik A-veiefilteret er spesifisert, så kan dette føre til en potensielt stor ustabilitet i filteret.



Figur 19: Området rundt null hertz til heltallsfilteret

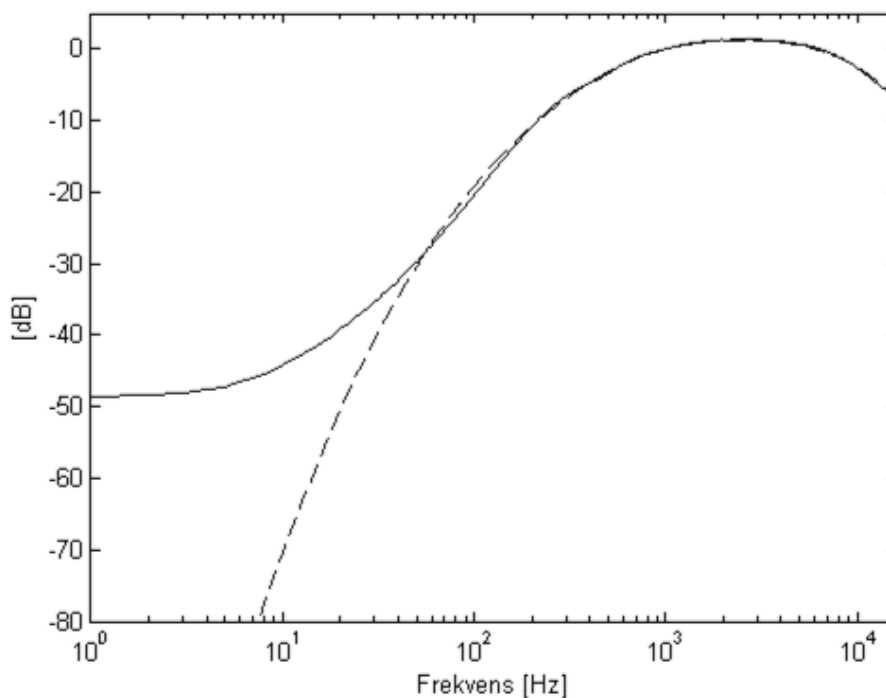
Det ble forsøkt å endre noen av koeffisientene og feilsøke filteret med matlab for å finne ut hvor denne feilen lå. Dette førte ikke fram, og en alternativ måte for å løse problemet ble brukt. Denne metoden gikk ut på å konstruere et digitalt høypassfilter og sette dette på utgangen av A-veiefilteret. Dette filteret ble konstruert ved hjelp av Simulink, som er en utvidelse til Matlab. Filteret er skissert i Figur 20 under, og koeffisientene er lagt ved i vedlegg 13.5

## Distribuert lydnivåmåling

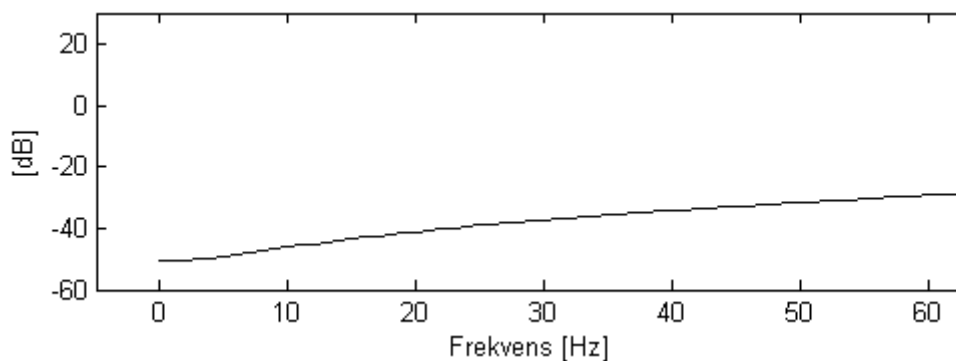


Figur 20: Skisse av høypassdelen til heltallsfilteret

Den simulerte frekvensresponsen til det digitale filteret er vist sammen med det standardiserte filteret [4] i Figur 21. Figur 22 viser frekvensresponsen til det simulerte filteret ved frekvenser rundt null Hz.



Figur 21: Det standardiserte [4] (stiplet) og det normaliserte (helstrukket) heltallsfilteret med høypassfilteret

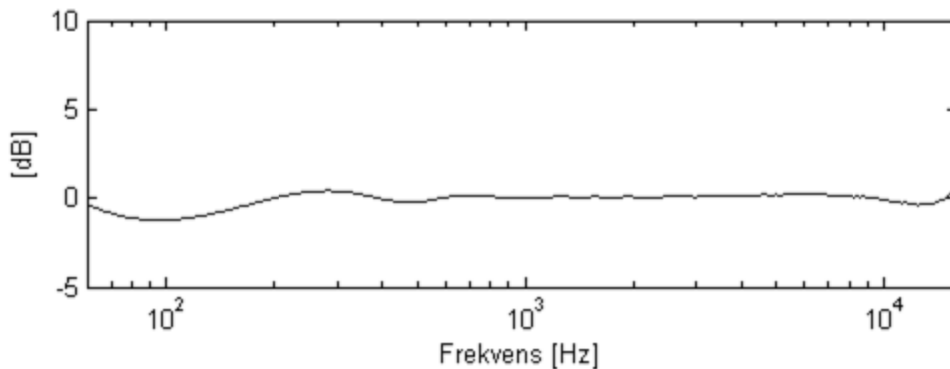


Figur 22: Området rundt null hertz til heltallsfilteret med høypassfilteret

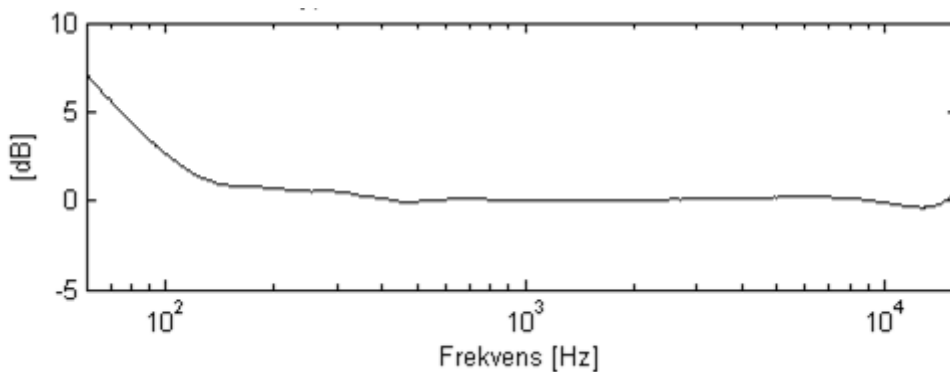
På bakgrunn av dette kan man se at det simulerte filteret med høypassdelen har en mye bedre frekvensrespons, og innehar ingen forsterkning av frekvenser rundt null Hz. Figur 23 og Figur

## Distribuert lydnivåmåling

24 viser forskjellen i frekvensrespons mellom det standardiserte filteret og det simulerte filteret, henholdsvis med og uten høypassfilteret.



Figur 23: Heltallsfilteret med høypassdelen minus det standardiserte filteret [4] i det aktuelle området



Figur 24: Heltallsfilteret uten høypassdelen minus det standardiserte filteret [4] i det aktuelle området

Tabell 6 under viser verdiene til filtrene og sammenligner det med kravene til frekvensrespons fra Tabell 1.

Tabell 6: Forskjell i frekvensrespons til det digitale filteret og maksimalt avvik fra standarden [5]

| Nominell frekvens , Hz | Med høypass | Uten høypass | $\Delta A$ -vekting, dB |
|------------------------|-------------|--------------|-------------------------|
| 63                     | -0,5292     | 6,654        | $\pm 2,0$               |
| 125                    | -0,9992     | 1,34         | $\pm 1,5$               |
| 250                    | 0,3554      | 0,5289       | $\pm 1,5$               |
| 500                    | -0,2286     | -0,05635     | $\pm 1,5$               |
| 1 000                  | 0           | 0            | 0,0                     |
| 2 000                  | 0,09        | 0,06292      | $\pm 2,0$               |
| 4 000                  | 0,1485      | 0,1502       | $\pm 3,0$               |
| 8 000                  | 0,1138      | 0,1455       | $\pm 5,0$               |

Selv om det digitale filteret med høypassfilteret viste seg å tilfredsstille kravene fra standarden ved simulering, ble filteret ikke implementert i mikrokontrolleren. Dette på grunn

## Distribuert lydnivåmåling

av at det ikke var mulig å legge til den påkrevde høypassdelen av filteret innenfor de tidsbegrensningene som finnes i mikrokontrolleren.

Ved enden av det tidsrommet som ble satt av til digital filtrering ble det ved personlig kontakt anbefalt av eksterne personer [37, 38] å endre filterstrukturen til en Agarwal-Burrus struktur [39, 40]. Dette ble ikke prioritert, da det allerede hadde blitt brukt mer tid enn planlagt på digital filtrering. Dette kan imidlertid være en mulig løsning da denne skal gi mindre feil for frekvenser langt under punktprøvningsfrekvensen.

### 5.4.5 Strømforbruk

En forskjell mellom et digitalt og analogt filter er strømforbruket til filterkretsen. Som tidligere beskrevet trenger det aktive analoge filteret en operasjonsforsterker mer enn det digitale filteret. Strømforbruket til det analoge filteret og det digitale filteret er vist i Tabell 7 under. Her er det vist at forskjellen i strømforbruk mellom filtreringsmåtene er på 750  $\mu\text{A}$ , eller strømforbruket til en operasjonsforsterker.

Tabell 7: Strømforbruk filterkrets

| Krets                 | Analog filtrering  | Digital filtrering |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Virtuell jord         | 766 $\mu\text{A}$  | 766 $\mu\text{A}$  |
| Antifoldningsfilteret | 1500 $\mu\text{A}$ | 1500 $\mu\text{A}$ |
| A-veiefilteret        | 750 $\mu\text{A}$  | --                 |
| Sum                   | 3016 $\mu\text{A}$ | 2266 $\mu\text{A}$ |

## Distribuert lydnivåmåling



## 6 Mikrokontroller

Det er hovedsakelig to grunner til at sensorene i dette prosjektet trenger en mikrokontroller hver. Den ene er for å behandle data fra mikrofonen med punktprøving av signalet, eventuelt filtrere signalet digitalt og beregne de ønskede resultatene som er beskrevet i kapittel 2.1. Den andre er å opprettholde en kommunikasjonslink med radiomodulen som skal sende resultatene videre til datamaskinen.

### 6.1 Bakgrunn

I dette prosjektet ble det kun sett på en mikrokontroller som allerede var ferdig montert på kretskort fra Nordic, nRF2743. Denne mikrokontrolleren var LPC1114 fra NXP Semiconductors (NXP) [41].

#### 6.1.1 LPC1114

LPC111x-familien som LPC1114 tilhører er et sett med mikrokontrollere som er basert på en ARM prosessor, Cortex-M0. Denne prosessoren er blant de minste, mest strømgjerrige og energieffektive ARM prosessorene som er tilgjengelig [42]. Cortex-M0 er en 32 bits prosessor, og er bygd opp med minimal størrelse, strømbruk og pris for å kunne konkurrere med 8-bits prosessorer. Tanken bak dette er at ved å sette opp størrelsen på registrene i enheten, kan hastigheten senkes tilsvarende, slik at prosessoren bruker mindre strøm. Et positivt resultat av dette er i tillegg at kodelinjen i mikrokontrolleren blir mindre, da prosessoren kan jobbe direkte med 32-bits tall og slipper å bruke mange kodelinjer på å få mikrokontrolleren til å utføre disse kommandoene.

Andre egenskaper som er viktige for dette prosjektet er LPC1114s maksimale klokkehastighet på 50 MHz og 10 bits analog til digital omformer som kan punktprøve på opptil 400 kHz. Den støtter også vanlige kommunikasjonsstandarder som Universal Asynchronous receiver/transmitter (UART) og Serial Peripheral Interface (SPI). I følge figur 8 i [41] bruker LPC1114 9 mA når hastigheten til systemklokka er satt til 48 MHz. Ved å sette ned denne hastigheten til 12 MHz senker dette strømforbruket med 6 mA til 3 mA i aktivt modus.

#### 6.1.2 nRFGo Motherboard

Nordic sitt Motherboard, nRF6310 [43], er et stort utviklingskretskort med kontakter for prøving og testing av moduler fra Nordic. Kortet har blant annet mulighet for strømforsyning fra batterier, og gir en spenning på 3.3 volt til påmonterte moduler.

### 6.2 Kravspesifikasjon

Ut ifra spesifikasjonen er det fire krav til mikrokontrolleren i dette prosjektet. Det viktigste kravet er at mikrokontrolleren må være tilgjengelig og lett å integrere i prosjektet. I tillegg er det en stor fordel at den er rask og sterk nok til å kunne filtrere signalet fra mikrofonen digitalt. Her er det en stor fordel om mikrokontrolleren har mulighet til å kjøre flyttallsaritmetikk i hardware i stedet for software. Et annet generelt krav til mikrokontrolleren er at den må trekke lite strøm i forhold til de andre komponentene i sensorene.

## Distribuert lydnivåmåling

For å kunne fungere i oppsettet med de andre komponentene i systemet, må mikrokontrolleren i tillegg til de overnevnte kravene, kunne punktprøve det analoge signalet fra filteret i riktig hastighet. Signalet må videre kunne bli kvadrert og summert i mikrokontrolleren for å kunne beregne det ekvivalente lydtrykket. Til slutt må mikrokontrolleren kunne kommunisere med en radiomodul over vanlige standarder for å kunne sende informasjonen videre i systemet.

### 6.3 Løsning

Løsningen i dette prosjektet ble å bruke LPC1114 fra NXP. Det viktigste grunnlaget for dette var at mikrokontrolleren internt hos Nordic var tilgjengelig på et kretskort, nRF2743, sammen med radiomodulen nRF24AP2 ved starten av prosjektet.

Siden det ikke var noen andre ulemper med mikrokontrolleren, annet enn at den hadde litt for liten oppløsning i AD-omformeren og den ikke hadde støtte for flyttalsdivisjon i hardware, var det ingen grunn til å velge en større og mer strømbrukende mikrokontroller enn denne i dette prosjektet.

#### 6.3.1 Kommunikasjon

På kortet nRF2743 var det mulighet for å benytte både UART og SPI som kommunikasjonsstandard mellom LPC1114 og ANT-modulen. ANT-modulen blir beskrevet mer detaljert i kapittel 7.1.2.1 og viste seg å bli den foretrukne radioprotokollen i dette prosjektet som beskrevet i kapittel 7.3.1. I dette prosjektet ble det brukt UART som standard, da det forelå en eksempelkode for LPC1114 på oppsett og programmering av mikrokontrolleren. SPI er i noen tilfeller mer strømgjerrig enn UART, men ved å sette baudraten, eller overføringshastigheten mellom modulene til 50 kilobit per sekund ligger strømforbruket til ANT-modulen nokså nærme det strømforbruket den ville hatt ved å bruke den raskeste SPI-overføringen.

#### 6.3.2 Strømforbruk

Strømforbruket til enheten er svært avhengig av klokkehastigheten til mikrokontrolleren. Ved starten av prosjektet ble det tatt et valg om at mikrokontrolleren skulle gå på 48 MHz. Dette valget ble tatt med bakgrunn i at mikrokontrolleren skulle kunne brukes til digital filtrering. Ved denne hastigheten er strømforbruket til mikrokontrolleren 9 mA.

I tillegg til klokkehastigheten til mikrokontrolleren bruker LPC1114 også strøm til analog til digital omformeren og til kommunikasjon. Strømforbruket til disse er gitt i tabell 10 i [41] og er henholdsvis 0,29 mA og 0,82 mA ved en klokkehastighet på 48 MHz. Ved 12 MHz er strømforbruket henholdsvis 0,08 mA og 0,22 mA

Strømforbruket til enheten er avhengig av hvilket scenario enheten brukes til. Det blir beskrevet tre scenarioer under, hvor strømforbruket til mikrokontrolleren er forskjellig. I alle scenarioene forutsettes det at mikrokontrolleren bruker nesten ingen tid på å forberede kommunikasjonen til radioenheten, og at samplingsfrekvensen er på 32 kHz.

#### *Digital filtrering*

Ved digital filtrering i mikrokontrolleren må enheten jobbe nesten hele tiden. Dette gjør at enheten konstant står i aktivt modus og forbruker en konstant grunnstrøm. Fordelen med digital filtrering er at noen av de analoge komponentene kan fjernes. Hvis filteret består av mange operasjonsforsterkere vil gevinsten av å bruke digital filtrering være stor.



### ***Analog filtrering, sovemodus***

En analog filtrering av signalet før det kommer til mikrokontrolleren gjør at mikrokontrolleren kan settes i sovemodus og bruke mindre strøm når den ikke brukes aktivt. Dette blir implementert ved at mikrokontrolleren gjør all prosessering av data og punktprøving av neste verdi samtidig. Mellom punktprøving av verdiene og prosessering av data settes mikrokontrolleren i sovemodus, og strømbruket blir da som forklart lavere.

### ***Analog filtrering, senking av klokkefrekvens***

En annen måte å spare strøm på i mikrokontrolleren ved analog filtrering, er å sette ned klokkehastigheten til mikrokontrolleren. En lavere klokkehastighet er i mange tilfeller mer strømsparende enn å sette mikrokontrolleren i sovemodus, da den høye hastigheten ikke er nødvendig. Den største ulempen med denne metoden er at det ikke gir noen mulighet for å kunne takle en høyere arbeidskapasitet hvis det er behov for det i et begrenset tidsrom.

Når mikrokontrolleren bruker 10  $\mu$ s på prosesseringen av inngangssignalet med en klokkefrekvens på 50 MHz, tilsvarer dette 500 klokkesykluser. Tiden mikrokontrolleren har til rådighet for prosessering av inngangssignalet er 31,25  $\mu$ s, noe som fører til at den laveste klokkefrekvens mikrokontrolleren kan kjøre på er 16 MHz.

### **6.3.3 Programmering**

For å kunne programmere mikrokontrolleren i programmeringsspråket C ble gratisprogrammet LPCXpresso [44] brukt. Dette er et enkelt program, med mulighet for feilsøking av kode under kjøring av mikrokontrolleren. En NXP LPC-Link blir brukt for å kunne kommunisere med og overføre programmet til LPC1114.

### **6.3.4 Dynamisk område**

Mikrokontrollerens dynamiske område bestemmes av antall bit AD-omformerens greier å omgjøre det analoge signalet til. Formel 6.1 under viser størrelsen på det dynamiske området til en AD-omformer på  $n$  bit. [45]

$$D = 20 \times \log_{10}(2^n) \quad (6.1)$$

Ved implementering går et bit fra AD-omformerens bort til å likerette signalet, da fortegnsværdien ikke er interessant for å finne signalets amplitude. Det dynamiske området til AD-omformerens blir da utregnet til 54 dB, siden 9 bit representerer signalets amplitude.

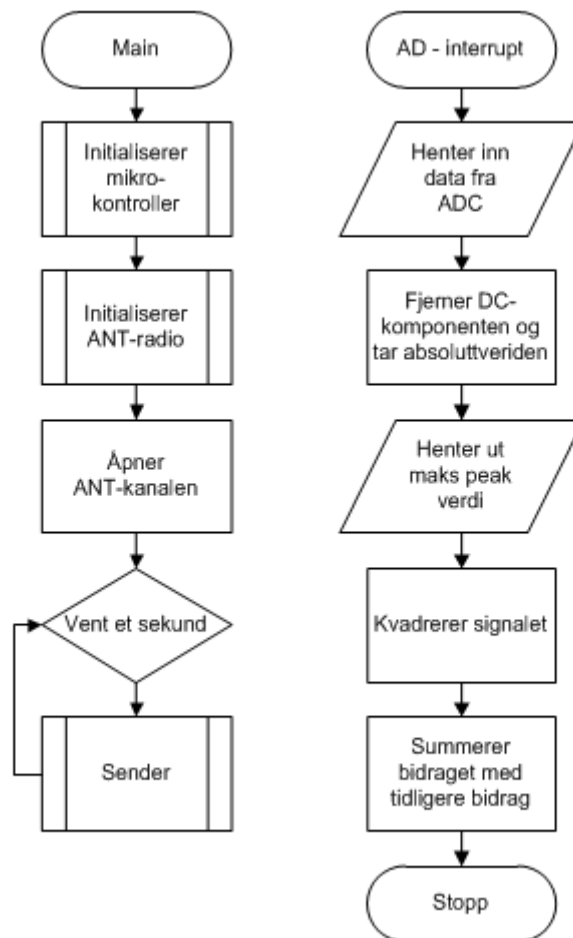
### **6.3.5 Programmet**

Flytskjema som beskriver programmet som kjøres i sensorene er vist i Figur 25. De to programmene som er vist er hovedprogrammet og avbruddsprogrammet, henholdsvis *main* og *AD-interrupt*. *Main* har som mål å først starte opp mikrokontrolleren og radiomodulen, for deretter å sende en kommunikasjonspakke hvert sekund. En kommunikasjonspakke består av 13 byte, hvor 8 av dem er applikasjoninformasjon. Dette blir forklart nærmere i kapittel 7.3.2 og kapittel 7.3.5. Flytskjema for *Initialiserer ANT-radio*, *Initialiserer mikrokontroller* og *sender* er vist i vedlegg 13.6, og formelen for utregning av verdien til *Sender* er vist i formel 6.2.

*AD-interrupt* har som mål å motta en ny verdi fra AD-omformerens for hver punktprøve som tas. Som flytskjemaet i Figur 25 viser, fjernes likespenningsverdien og signalet blir tatt absoluttverdien av. Hvis verdien av signalet er høyere enn den forrige verdien, blir den

## Distribuert lydnivåmåling

nåværende verdien satt til den nye peak-verdien før signalet blir kvadrert og summert med tidligere verdier. Utregningen av ekvivalentverdien i avbruddsrutinen er vist matematisk i formel 6.3.



Figur 25: Flytskjema for main og avbrudd i sensorene

$$L_{Aeq,T1} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{Sum}{T1} \right) + Kalibrering \quad (6.2)$$

$$Sum = \sum_0^{T1} p_A^2 \quad (6.3)$$

### 6.4 Resultater

De viktigste resultatene fra implementeringen av mikrokontrolleren er beskrevet under. Under alle forsøk og tester er klokkehastigheten til mikrokontrolleren satt til 48 MHz. Det er også forutsatt at det er valgt analog filtrering av signalet, og ikke digital filtrering i mikrokontrolleren.

#### 6.4.1 Kommunikasjon

Mikrokontrolleren ble satt til å kommunisere med ANT-modulen, som er den valgte radiomodulen med en baudrate på 50 kilobit per sekund. Dette ble verifisert praktisk ved å lese av kommunikasjonspakkene fra mikrokontrolleren til ANT-modulen med et oscilloskop. Kommunikasjonsprotokollen og informasjon om hvordan modulene kommuniserer sammen

## Distribuert lydnivåmåling

blir gjennomgått mer i detalj i kapittel 7.3.2 under radiodelen. En kommunikasjonspakke mellom modulene består av 130 bit, og med en baudrate på 50 000 tar det  $130/50000 = 2,6$  ms å overføre en kommunikasjonspakke. For å sikre redundans i kommunikasjonspakkene mellom mikrokontrolleren og radioenheten blir det sendt to like kommunikasjonspakker i sekundet. Totalt bruker da mikrokontrolleren 5,2 ms per sekund til kommunikasjon med radioenheten.

### 6.4.2 Analog til digital omformer

Den analoge til digitale omformerer kan ved programmering av en klokkenedskalere bruke fra 2,44  $\mu$ s til 58,4  $\mu$ s på konverteringen av det analoge inngangssignalet til en digital verdi. Dette tilsvarer samplingsfrekvenser på henholdsvis 410 kHz og 17,1 kHz.

I starten av prosjektet ble det brukt en samplingsfrekvens på 17,1 kHz sammen med antifoldningsfilteret med en knekkfrekvens på 8 kHz. Denne ble verifisert ved å sette utgangen på en pinne høy og lav ved hver konvertering og måle tiden mellom de med et oscilloskop. Senere i prosjektet ble denne samplingsfrekvensen byttet til 32 kHz for å kunne få en bedre frekvensrespons i systemet. Denne samplingsfrekvensen ble verifisert på samme måte, og ga ingen avvik.

### 6.4.3 Tid

Tiden det tar for mikrokontrolleren å utføre beregninger og oppgaver er vist i Tabell 8. Både punktprøvingen av det analoge inngangssignalet og UART sendingen går i parallell med den interne prosessoren, og bruker derfor ikke store prosessorressurser. *AD-interrupt* viser her til den prosessen som må gjøres for hver punktprøving ved analog filtrering. Hvert sekund blir den summerte verdien tatt logaritmen til, multiplisert og kalibrert. Dette og konstruksjonen av datapakken er vist i tabellen under som *Sender*.

Tabell 8: Tid for beregninger i mikrokontrolleren

| Enhet           | Tid           | Merknad                                 |
|-----------------|---------------|---|
| AD-interrupt    | 10 $\mu$ s    | For hver punktprøving                   |
| Sender          | 36,6 $\mu$ s  | For hvert sekund                        |
| UART-sending    | 5,2 ms/sek    | Parallelt                               |
| AD-punktprøving | 31,25 $\mu$ s | Parallelt, 32 kHz punktprøvingsfrekvens |

### 6.4.4 Strøm

Strømforbruket til de tre scenarioene som ble presentert i kapittel 6.3.2 blir gjennomgått i Tabell 9 under. I tabell 10 i [41] er det ikke oppgitt andre klokkehastigheter på mikrokontrolleren enn 12 og 48 MHz. Det er derfor gjort en forenkling ved å anta at strømforbruket stiger lineært med klokkefrekvensen for å regne ut strømforbruket ved 16 MHz.

## Distribuert lydnivåmåling

Tabell 9: Strømforbruk for de forskjellige scenarioene

| Enhet                                  | Merknad  | Strømbruk | Sum             |
|--|--|-----------|-----------------|
| <b>Digital filtrering</b>              |  |           |                 |
| Mikrokontroller, 50 MHz                |  | 9 mA      |                 |
| AD-omformer                            |  | 0,29 mA   |                 |
| Kommunikasjon                          |  | 0,82 mA   |                 |
| <b>Sum</b>                             |  |           | <b>10,11 mA</b> |
| <b>Analog filtrering, sovemodus</b>    |  |           |                 |
| Mikrokontroller, 50 MHz                | $9 \text{ mA} * (10\mu\text{s}/31,25\mu\text{s}) = 9 \text{ mA} * 0,32$    | 2,88 mA   |                 |
| Mikrokontroller, sovemodus             | $6 \text{ mA} * (21,25\mu\text{s}/31,25\mu\text{s}) = 6 \text{ mA} * 0,68$ | 4,08 mA   |                 |
| AD-omformer                            |  | 0,29 mA   |                 |
| Kommunikasjon                          |  | 0,82 mA   |                 |
| <b>Sum</b>                             |  |           | <b>8,07 mA</b>  |
| <b>Analog filtrering, nedskalering</b> |  |           |                 |
| Mikrokontrolleren                      | $3 + ((5-3)/(24-12))*(16-12)$  | 3,67 mA   |                 |
| AD-omformeren                          | $0,08 + ((0,29-0,08) / (48-12)) * (16-12)$                                 | 0,10 mA   |                 |
| Kommunikasjon                          | $0,22 + ((0,82-0,22) / (48-12)) * (16-12)$                                 | 0,29 mA   |                 |
| <b>Sum</b>                             |  |           | <b>4,06 mA</b>  |

Strømforskjellen mellom analoge og digitale filtre blir presentert ytterligere under kapittel 9.6.



## 7 Radiolink

Det som skiller denne lydnivåmåleren fra andre vanlige lydnivåmålere er muligheten til å gjøre lydovervåkingen og avlesningen på to forskjellige steder i sanntid. For å kunne få til dette er det implementert en radiolink for å sette opp forbindelsen mellom alle sensorene og mottakeren i systemet.

### 7.1 Bakgrunn

Her blir det nevnt de elementene som har betydning i valg av radiostandard, og løsningen av radiodelen av oppgaven. Videre i rapporten blir mottakeren og datamaskinen i systemet kalt master og sensorene noder. Noen av sensorene kan i de etterfølgende kapitlene være master i ett system og node i et annet, og blir da betegnet som en masternode.

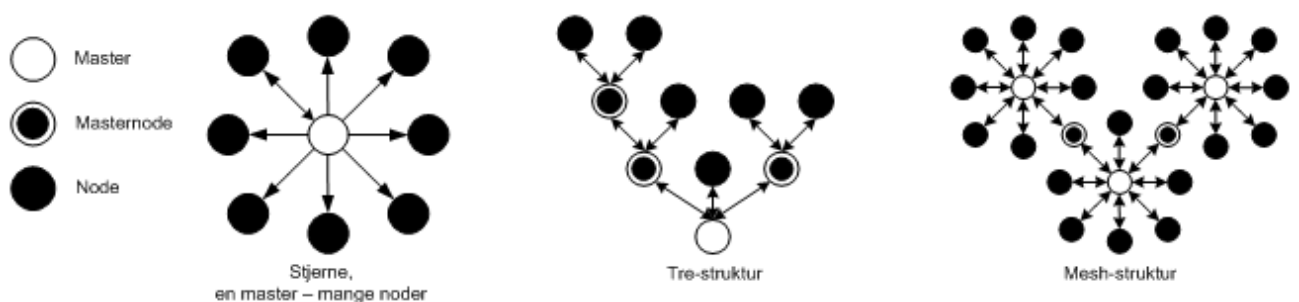
#### 7.1.1 Forskjellige nettverkstopologier

Det finnes mange ulike nettverkstopologier, og noen av de vanligste innenfor trådløse nettverk er beskrevet kort under [46]. Se Figur 26 for en visuell framstilling av noen av topologiene.

Stjernenettverk er en oppbygning med én master og mange noder. I dette systemet bestemmer masteren hvem den vil kommunisere med, og nodene venter kun på å bli kommunisert til. Denne oppbygningen krever svært lite prosesseringskraft hos sensorene, men lyttetiden til sensorene blir lengre. Et stjernenettverk kan også bygges opp med mange mastere og en node, hvor masterne sender informasjon når de ønsker til noden som prosesserer all informasjonen.

En videreutvikling av stjernenettverket er trenettverket. Rent visuelt kan det se ut som et tre med en master i bunnen av nettet. Ut fra masteren går det en eller flere noder eller masternoder med forgreininger til flere noder eller masternoder. På denne måten sprer nettverket seg utover til alle nodene er inkludert i nettet.

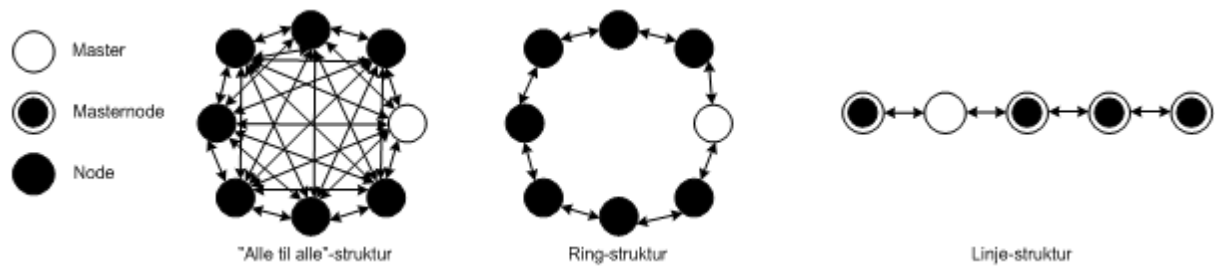
Et meshnettverk er et nokså avansert nettverk. Dette kan som navnet tilsier se ut som et nett av enheter i et tilsynelatende tilfeldig mønster. I et slikt nettverk vet alle noder hvem de har direkte kontakt med, og hvilken node de skal sende informasjonen videre til for at det skal komme fram til riktig enhet.



Figur 26: Stjerne-, tre- og mesh-struktur [46]

## Distribuert lydnivåmåling

Andre topologier som alle-til-alle, ring og linje er topologier som ikke er aktuelt i dette prosjektet, og vil ikke bli sett nærmere på med unntak av skisseringen av disse i Figur 27.



Figur 27: "Alle til Alle"-, Ring- og Linje-struktur [46]

### 7.1.2 Forskjellige radiostandarder

Det finnes mange forskjellige radiostandarder som er innebefattet i begrepet kortholdsradiokommunikasjon. Under er noen av de standardene som er aktuelt for dette prosjektet listet opp. Som fellesnevnerne av standardene under er lavt strømforbruk, lav pris og kort til middels lang rekkevidde.

#### 7.1.2.1 ANT og nRF24AP2

Radioprotokollen og systemet ANT ble startet av Dynastream i 2000, og er en ikke-standardisert protokoll. Dynastream ble i 2006 kjøpt opp av Garmin [47] som er en stor leverandør av GPS utstyr, avionikk og elektronisk treningsutstyr. Bakgrunnen var at selskapet ville lage en strømgjerrig radioenhet for sensorer i treningsutstyr. I 2004 begynte Dynastream et samarbeid sammen med Nordic [48]. I dette samarbeidet bidrar Nordic med sine radioer i 2,4 GHz området, mens ANT står for kommunikasjonsprotokollen.

Dynastream, og igjen Garmin, sitt eierskap i ANT har gjort at ANT har spesialisert seg i markedet for sport og trening. I dette markedet er kommunikasjon mellom mange sensorer over korte avstander viktig. ANT støtter store praktiske nettverk, og kan kommunisere både som en master og en node i samme konfigurasjon. Dette gjør ANT til en meget fleksibel og enkel kommunikasjonsplattform, selv om den nevnte konfigurasjonen må gjøres manuelt før oppstarten av nettverket.

nRF24AP2 [49] er en lavenergiradio fra Nordic med ferdig kommunikasjonsprotokoll fra Dynastream. Denne ANT enheten er optimalisert med tanke på strømforbruk og kan bruke så lite som 14 uA gjennomsnittlig og kommunisere med opptil 300 noder [50]. Maksimal datarate er på 20 kbps, som er den minste dataraten blant de radiosystemene som er aktuelle i dette prosjektet.

#### 7.1.2.2 Bluetooth low energy

Bluetooth Low Energy (BTLE) er en del av den nye standarden Bluetooth v.4.0, og den ble formelt adoptert av Bluetooth SIG i juli 2010 [51]. Denne er lagd for å kunne overføre data svært strømeffektivt mellom to enheter. BTLE bruker i likhet med tidligere standarder fra Bluetooth SIG det ulisensierte 2,4 GHz frekvensbåndet til overføring av informasjon. En stor forskjell mellom BTLE og Bluetooth v.3.0 High speed er overføringskapasiteten. For å kunne få et så lite strømforbruk som mulig i BTLE standarden, er dataraten senket fra maksimalt 24 Mbps [52] til 1 Mbps i BTLE [53].

## Distribuert lydnivåmåling

Sammenlignet med ANT og ZigBee er den største fordelen for BTLE frekvenshoppingen den implementerer i kanalen. For å kunne motvirke støy fra andre enheter og negativ interferens fra seg selv, hopper BTLE mellom 40 ulike kanaler, delt opp i frekvenser med 2 MHz båndbredde. Denne hoppingen fører til at BTLE har en bedre motstandsdyktighet enn de andre standardene i et vanskelig radiomiljø. BTLE benytter seg av en stjernetopologi, hvor en master kan snakke med et ubegrenset antall noder, men med opp- og nedkobling av hver node etter tur [53].

Utstyr som klokker, medisinske sensorer, fjernkontroller eller pulsmålere er noen av bruksområdene til BTLE. Disse bruksområdene kjennetegnes som oftest av en-til-en-kommunikasjon, lang batterilevetid, lite informasjon som skal sendes og liten størrelse på enhetene.

### 7.1.2.3 ZigBee

ZigBee er standardisert igjennom IEEE802.15.4. En av de største forskjellene mellom ZigBee og de andre standardene er hva slags marked enhetene er lagd for. ZigBee er her mer rettet mot trådløse sensornettverk med opptil 65 000 sensorer i samme nettverk enn det de andre radioprotokollene er [54]. For å kunne få til dette støtter ZigBee avanserte topologier, og sørger selv for å sende pakker hensiktsmessig gjennom nettverket til riktig mottaker. Dataraten til ZigBee er litt høyere enn hos ANT, og ligger på mellom 40 til 250 kbps [55]. ZigBee er den eneste av de nevnte radiostandardene som i tillegg til å kjøre på 2.4 GHz båndet, også kan kjøres på 868 MHz båndet [56].

### 7.1.2.4 Andre ikke-standardiserte løsninger

Nordic har i tillegg andre radioløsninger i 2,4 GHz båndet som ikke er standardiserte. Disse blir ofte brukt til kortholds-kommunikasjon i applikasjoner som trådløse mus, tastatur, spillkonsoller og andre strømeffektive produkter. Ved starten av dette prosjektet var de personene som hadde kompetanse og kunnskaper om disse standardene opptatt, og for å minimalisere risikoen i prosjektet ble denne løsningen sett bort ifra.

### 7.1.2.5 Sammenligning

Tabell 10 under viser noen av egenskapene til de tre mest relevante radiostandardene til dette prosjektet.

Tabell 10: Sammenligning av relevante radiostandarder

|                          | ANT                      | BTLE               | ZigBee                             |
|--------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|
| <b>Frekvensområde</b>    | 2,4 GHz                  | 2,4 GHz            | 2,4 GHz og 868 MHz                 |
| <b>Antall sensorer</b>   | 300                      | Ubegrenset         | 65 000                             |
| <b>Topologier</b>        | En-til-en, stjerne, mesh | En-til-en, stjerne | Mesh, stjerne                      |
| <b>Datarate</b>          | 20 kbps                  | 1 Mbps             | 40 – 250 kbps                      |
| <b>Antatt rekkevidde</b> | Ca 10-20 meter           | Ca 10-20 meter     | 5 til 500 meter med flere sensorer |

### 7.2 *Kravspesifikasjon*

Kravene til radiolinken i prosjektet kommer fra kravene til testsystemet og prototypen som er skissert i kapitlene 2.3 og 2.4. Standardene som ble gjennomgått i kapittel 2.2 setter ingen spesielle krav i forhold til radiolinken i dette prosjektet, da dette ikke er en vanlig måte å implementere en dosimetri eller lydnivåmåler på. Det som derimot er et krav fra standarden er at det ikke må vises uriktige verdier på enheten slik at den gir en falsk trygghet til brukeren. Dette forhindres ved at det i prosjektet settes strenge krav til hvor mange pakker med informasjon mellom enhetene som kan gå tapt.

Av andre krav til radiolinken, som ikke kommer av standarden, er hvor mange noder det vil være mulig å implementere i systemet og rekkevidden mellom disse enhetene. Strømforbruket til enheten er også viktig, da større strømforbruk fører til en økning i størrelsen til batteriene og da også enheten.

Ved valg av radiotype ble det også sett på hvor enkelt det ville være å få satt opp radiolinken, og om det var nødvendig å skaffe utstyr med lang leveringstid for å kunne starte med prosjektet.

### 7.3 *Løsning*

Under er den valgte radioløsningen til prosjektet skissert.

#### 7.3.1 *Valg av radioløsning*

Til dette prosjektet ble ANT valgt som radiostandard. Denne ble valgt fordi det skal være en svært enkel og liten protokoll som har støtte for mange noder i nettverket. Ved store nettverk over lengre avstander, har ANT-enhetene også mulighet til å fungere som en relestasjon som videresender alle innkommende pakker, og kan derfor sende informasjon på avstander lengre enn de oppgitte 20 meterne. Radiomodulene som har implementert ANT bruker lite strøm og plass, og sammen med protokollen svarer denne løsningen til spesifikasjonene.

Enhetene som blir brukt er nRF24AP2 fra Nordic på sensorsiden og AT3 [57], som Nordic har lagd radioenheten til, på mottakersiden. AT3 består i hovedsak av to komponenter, en mikrokontroller fra ANT og radiomodulen nRF24L01 [58] fra Nordic. Denne enheten ble levert med en USB-stick og ble i prosjektet brukt som mottakeren til systemet.

Disse komponentene ble valgt på grunn av at de skulle være enkle å sette opp i et nettverk uten at pakkene og sensorene skulle bli for avanserte. Her var det også mulig å få hjelp underveis hvis det skulle vise seg å være noen problemer, noe som fjernet en del usikkerhet rundt prosjektet.

#### 7.3.2 *Pakkeformat*

ANT-protokollen tar seg av all kommunikasjon mellom enhetene og masteren på det fysiske-, link- og transport-laget. På applikasjonsnivået i mikrokontrolleren i sensorene og i dataprogrammet hos masteren var det nødvendig å lage en egen overføringsprotokoll. I dette prosjektet ble det valgt å bruke en delt kanal med stjernetopologi til å sende og motta pakker på. Denne delte kanalen sørger for at kun den enheten som er ønsket mottaker av en pakke kan svare på denne pakken, noe ANT-protokollen styrer selv. Formatet pakkene på applikasjonsnivå blir sendt med fra sensorene til masteren er skissert i Tabell 11 under. I tabellen representerer de to oktettene med enhetsnumre hvilke noder masteren vil



## Distribuert lydnivåmåling

kommunisere med, og gir ANT-radioen samtidig beskjed fra mikrokontrolleren i sensorene informasjon om hvilket enhetsnummer enheten har i nettverket. *Programvariabel* viser til variabelen som er brukt til å lagre verdiene i mikrokontrolleren, for lettere å kunne forstå programmet som er vedlagt i vedlegg 13.7.2.

Tabell 11: Pakkeformat applikasjonspakker

|                  | Data_1         | Data_2         | Data_3       | Data_4         | Data_5  | Data_6  | Data_7  | Data_8  |
|------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| Innhold          | Enhetsnummer 1 | Enhetsnummer 2 | Pakke-nummer | Peak (høyeste) | Nivå -3 | Nivå -2 | Nivå -1 | Nivå nå |
| Program-variabel |                |                | data(0)      | data(1)        | data(2) | data(3) | data(4) | data(5) |

Med unntak av de to første oktettene med enhetsnummeret som er bestemt fra ANT-standarden, er formatet til pakkene mellom applikasjonslagene i sensorene og masteren fritt. Det ble valgt å bruke en oktett til pakkenummeret til pakken slik at det ville være enkelt å registrere tapte pakker eller duplikater av pakker. For å kunne tilfredstille kravene ble det brukt en oktett til å overføre den høyeste målte verdien ved sensoren, også kalt peak-verdien. Siden det er et ønske om å ha en god redundans i pakkestrukturen blir nåværende lydnivå sendt i hver pakke i tillegg til de tre foregående verdiene. På denne måten må det mistes fire pakker på rad før informasjon om lydnivået mellom hver sensor og masteren går tapt.

Denne pakkestrukturen går på bekostning av muligheten til å sende tilleggsinformasjon fra sensorene til masteren, som for eksempel ved overstyring av mikrofonen, batteristatus, feilmeldinger og statusinformasjon fra mikrokontrolleren.

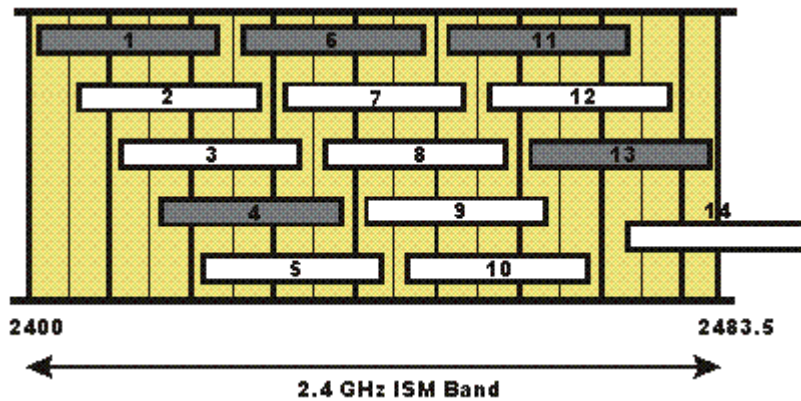
### 7.3.3 Sendeperiode

I kapittel 2.4, hvor det er spesifisert krav ved testing av enheten, er det oppgitt at enheten teoretisk skal kunne hente ut informasjon fra 90 sensorer i løpet av et minutt. Dette gir en sendefrekvens på 1,5 Hz. Etter at valget av protokoll falt på ANT, ble det mer aktuelt å se om det var teoretisk mulig å hente ut informasjon fra de 90 sensorene i løpet av et sekund. Dette gir en sendefrekvens på 90 Hz, som er mindre enn den teoretiske begrensningen i ANT, som er på 200 Hz [59]. Ved utførelse av prosjektet ble det brukt en sendefrekvens på 4 Hz, da det ble satt et krav på fire praktiske enheter ved uttesting.

### 7.3.4 Radiofrekvens

På Nordic sine kontorer er det et vanskelig radiomiljø grunnet trådløse nettverk og hyppig uttesting av Bluetooth-enheter. Trådløse nettverk bruker som oftest WLAN-kanalene 1, 6 og 11, mens Bluetooth-enheter hos Nordic avorterer på frekvensene 2402 MHz, 2426 MHz og 2480 MHz. Ved å gjøre en forenkling, og overføre disse frekvensene til nærmeste WLAN-kanal, gir dette henholdsvis kanalene 0, 4 og 13. Se Figur 28 for plassering av de antatt ledige kanalene merket med hvitt, og [60] for frekvensene til de forskjellige WLAN-kanalene. På bakgrunn av dette ble det valgt å flytte radiofrekvensen til ANT-enheter fra frekvensen 2466 MHz på kanal 12 til frekvensen 2450 MHz, som er mellom kanalene 6 og 11.

## Distribuert lydnivåmåling

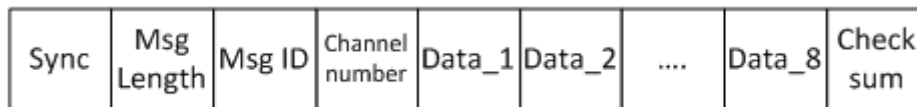


Figur 28: De forskjellige WLAN kanalene, antatt ledige kanaler er markert hvite [60]

Et alternativ til dette kunne vært å ha implementert frekvenshopping på applikasjonsnivå i enhetene, men dette ble sett på som veldig tidtakende og ble nedprioritert i prosjektet.

### 7.3.5 Kommunikasjon

Kommunikasjonen mellom nRF24AP2 og mikrokontrollerne foregår med UART, som er beskrevet i kapittel 6.3.1. Grensesnittet mellom disse to enhetene bruker pakkeformatet som er vist i Figur 29 under. Hver av boksene representerer 8 bit, og blir sendt over med ett start- og stoppbit over UART grensesnittet. Formatet bruker ingen paritetsbit i overføringen.



Figur 29: Grensesnittet mellom nRF24AP2 og mikrokontrolleren [61]

### 7.3.6 Oppstart

Ved oppstart av ANT-modulen må enheten bli nullstilt. Dette kan bli utført ved enten å sette nivået til et inngangssignal høyt i hardware, eller å sende en spesiell konfigurasjonspakke fra mikrokontrolleren i software. Før enheten kan kommunisere med masteren er det en del informasjon som må bli sendt fra mikrokontrolleren til ANT-enheten. Det er minimum to konfigurasjonspakker som må bli sendt med informasjon om hva slags kanal enheten skal tilhøre, og kanalens identifikasjon. I tillegg til den påkrevde informasjonen, er det dessuten mulig å forandre informasjon som radiofrekvens, kanalperiode, sendestyrke og tiden det tar før enheten slutter å respondere. Mikrokontrolleren sender, som siste informasjonspakke, en ”Åpne kanal”-pakke som gir ANT-enheten mulighet til å starte å lytte på nettverket.

I dette prosjektet blir ANT moduler nullstilt først i hardware og så i software for å være sikker på at enheten ikke har noen tidligere aktive konfigurasjoner. De påkrevde konfigurasjonspakkene som omhandler hvilken kanal enheten hører til og kanalens identifikasjon blir overført. Det samme blir informasjon om den forandrede radiofrekvensen og tiden det tar før enheten stopper å svare, som begge har blitt valgt til ikke å samsvare med det som er standard på ANT-radioene.

## 7.3.7 Strømforbruk

Strømforbruket til nRF24AP2 er regnet ut ved hjelp av kapittel 8.1 og 8.2 i [49] og vist i Tabell 12.

Tabell 12: Strømforbruk for nRF24AP2

| Applikasjon     | Antall meldinger per sekund | Strømforbruk per melding per sekund | Totalt strømforbruk |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Grunnstrøm      | 1                           | 87 $\mu\text{A}$                    | 87 $\mu\text{A}$    |
| Mottatt melding | 4 per sek                   | 25 $\mu\text{A}$                    | 100 $\mu\text{A}$   |
| Sendt melding   | 1 per sek                   | 52 $\mu\text{A}$                    | 52 $\mu\text{A}$    |
| Sum             |                             |                                     | 239 $\mu\text{A}$   |

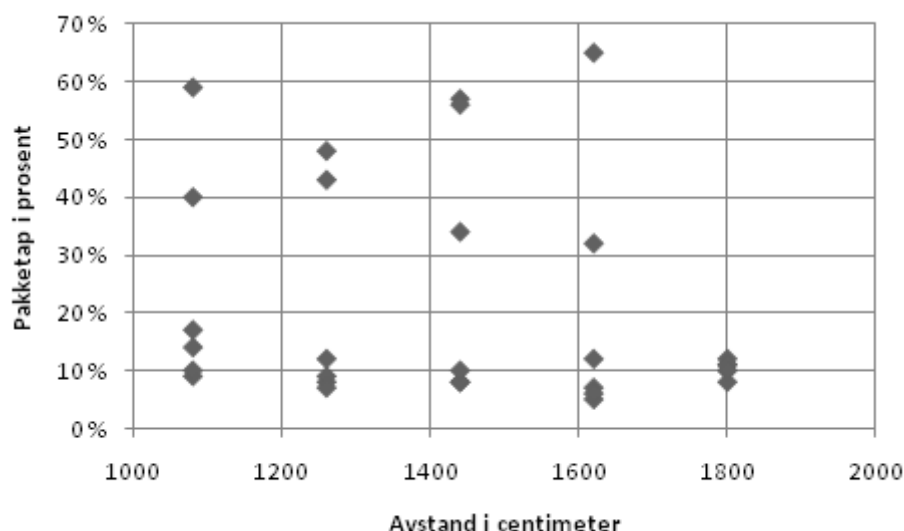
## 7.4 Resultater

I de etterfølgende kapitlene er resultatene fra målinger og tester som ble gjort på ANT-radioene beskrevet.

### 7.4.1 Rekkevidde

Ut fra Tabell 2 skal rekkevidden til testoppsettet være på 12 meter. Det ble gjort to måleserier for å kunne verifisere at rekkevidden til sensorene er på mer enn 12 meter, som er minstekravet. Siden kravet til informasjonstap i systemet er lik null, så kan det ikke være et høyere pakketap enn at hver fjerde pakke kommer fram til mottakeren.

Den første måleserien som ble gjort, ble gjort innendørs i en gang hos Nordic. Resultatene fra måleserien viser at miljøet rundt hadde en sterk innvirkning på hvor bra radiolinken fungerte. Gangen hadde glassvegger på begge sider, metall i gelenderne og mest sannsynlig metall under gulvet. Forsøket ble gjort med to sensorer plassert på en stol i en avstand markert med centimeter i Figur 30 fra masteren, som var en bærbar datamaskin. Det var ingen mobiltelefoner i nærheten eller trådløst nettverk på dataen som forstyrret målingene. Målingene ble gjort for de to sensorene med masteren i tre forskjellige sideveis posisjoner, i midten av gangen, og fem centimeter til hver av sidene.



Figur 30: Pakketap i prosent ved målinger utført innendørs

## Distribuert lydnivåmåling

Figuren viser at pakketapet som oftest ligger på mellom 5 og 20 prosent, men at noen målinger utmerker seg i negativ forstand med pakketap på opptil 65 prosent. Disse resultatene blir diskutert mer i kapitlene 10.4 og 10.5.

Den andre måleserien ble gjort utendørs, og på grunn av dårlig vær ble det bare målt på to forskjellige lengder. Lengdene var på 14 og 16 meter fra sensorene til masteren. Pakketapene var på 22 og 3 prosent for målingen på 14 meter og 11 og 3 prosent for målingene på 16 meter. På disse målingene hendte det to ganger at fire pakker gikk tapt ved 14 meter slik at to sekunder av målingen ikke ble overført til mottakeren. Det samme skjedde en gang på 16 meter. Det ble mottatt 230 pakker fra hver av sensorene på 14 meter og 440 pakker fra hver av sensorene på 16 meter.

### 7.4.2 Antall sensorer

Tabell 2 gir et krav om at systemet skal kunne kjøre 90 sensorer samtidig. Dette viste seg å være vanskelig å gjennomføre, da det ikke var tilgang til så mange sensorer i prosjektet. Flaskehalsen var den raske sendefrekvensen til enhetene som må ligge på 90 Hz i alle sensorene og mottakeren. For å kontrollere at sensorene greide en så høy sendefrekvens, ble sendefrekvensen hos alle sensorene og mottakeren endret til 90 Hz. Med unntak av en litt høy arbeidsbelastning av prosessoren hos mottakeren ble ingen data tapt, og alt fungerte tilfredsstillende.



## 8 Mottaker

Brukeren av systemet kan ikke forholde seg til verdier som blir ramset opp uoversiktlig i et vindu. En mottaker må først og fremst være en brukervennlig og oversiktlig måte å presentere de dataene som kommer fra sensorene i systemet på. Mottakeren må også kunne kalkulere relevante verdier ut fra dataene og styre sensorene.

### 8.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for konstruksjon av mottakeren er beskrevet i kapitlene under.

#### 8.1.1 Radiomottaker

På mottaker-, eller PC-siden av radiolinken er det brukt en enhet som heter AT3. Denne består av en liten mikrokontroller og radiomodulen nRF24L01 fra Nordic. Det følger med en USB-kontakt til denne enheten, og det gjør den godt egnet til bruk på mottakersiden i dette prosjektet.

#### 8.1.2 Antware2

Sammen med AT3 som er radiomottakeren i systemet, ligger det et tilgjengelig applikasjonsprogram, Antware2, på ANT sine hjemmesider [62]. Ved bruk av utviklingssettet til ANT følger også kildekoden til Antware2 med, noe som forenkler oppgaven med å lage et fungerende og skreddersydd mottakerprogram til systemet. Dette programmet er skrevet i Visual Studio C# 2008.

Antware2 er et meget enkelt program som skal gjøre det lett å kunne sette opp et nettverk med flere sensorer mot en datamaskin. Programmet innehar det meste av funksjonalitet som det er mulig å benytte på en ANT-radio. Noen av disse funksjonene er endring av sendefrekvens, oppsett av nettverkstopologi, sendehastighet, pakketype og automatisk svar på innkommende meldinger.

#### 8.1.3 Programmering

C# er et objektorientert programmeringsspråk som er lagd av Microsoft, og ble gitt ut i 2000 [63]. Språket er bygd opp for å være et fleksibelt og enkelt programmeringsspråk, og er utviklet fra programmeringsspråkene C og C++. C# er designet for å brukes i Microsofts .net plattform, og er for mange det foretrukne språket ved programmering i Windows applikasjoner.

## 8.2 Kravspesifikasjon

Det viktigste kravet til mottakeren er å vise resultatene og informasjonen fra sensorene til den som styrer systemet på en oversiktlig og god måte. Mottakeren må også beregne og vise informasjon som ekvivalent lydnivå, pakketap og statusen til sensorene. Designet til mottakeren må gjøres på en slik måte at den skal kunne greie å hente informasjon fra alle sensorene i løpet av et minutt. Det er på mottakersiden av systemet ingen krav til verken

## Distribuert lydnivåmåling

størrelse eller strømbruk slik kravene er på sensorsiden av systemet. Dette fordi det antas at masteren kan kjøre på strømmettet, og at skjermen kan settes i nærheten av dirigenten og ikke skal virke sjenerende på publikum.

### 8.3 Løsning

Denne oppgaven ble løst ved å bruke en datamaskin på mottakersiden med et program designet for å vise resultatene på en oversiktlig måte. Dette programmet ble laget med Antware2 som utgangspunkt, og fikk flere funksjoner for å kunne tilfredsstille kravene til mottakeren. Programkoden som har blitt modifisert er vedlagt i vedlegg 13.7.3. Kildekoden til Antware2 er lisensiert, og blir derfor ikke vedlagt i sin helhet i rapporten.

#### 8.3.1 Programmet

Rent utseendemessig er det lite som skiller Master-programmet (heretter: Master), vist i Figur 31, fra Antware2. Det har blitt lagt til to knapper på Master; *Start* og *Skriv*. *Start*-knappen åpner opp vinduene *GraphForm2* og *Status* på skjermen, og starter opp programmeringstrådene som oppdaterer disse to vinduene. *Skriv*-knappen gir brukeren mulighet til å lagre alle verdiene og resultatene fra de forskjellige sensorene i en tekstfil. Disse to vinduene og tekstfilen blir gjennomgått nærmere i kapitlene under.

Det er flere forskjeller mellom Master og det opprinnelige Antware2-programmet som ikke er like lette å oppdage som de to nevnte knappene. En av dem er at standardverdiene til kanaloppsettet har blitt forandret slik at brukeren av systemet kan opprette kontakt med sensorene uten å gjøre noen inntastinger i kanaloppsettet. En annen av forskjellene er at hver gang en radiolink til sensorene stoppes, lagres alle målingene i en tekstfil. Dette blir beskrevet nærmere i kapittel 8.3.1.3.

ANT er lagt opp for at en enhet skal kunne kommunisere med flere noder i et stjernenettverk. Dette gjøres ved at nodene lytter etter alle pakkene, og svarer kun hvis pakken starter med nodens nummer. For å få implementert dette i Master, er det programmert inn en teller som styrer hvilken enhet som kan sende pakker til hvilken tid.

## Distribuert lydnivåmåling

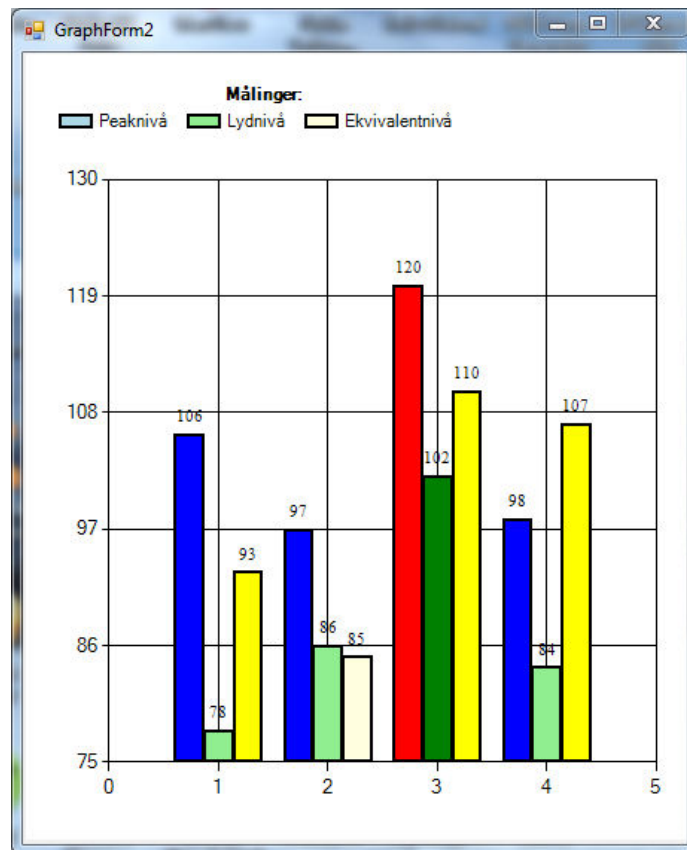


Figur 31: Skjerm bilde av Antware2, Master

### 8.3.1.1 Grafvindu

For at brukeren av systemet skal kunne ha en enkel visuell kontroll på systemet ble det valgt å lage et vindu med grafer til sensorene. Prosjektet gikk ut på å måle tre forskjellige parametre, peak-, momentant- og ekvivalent-lydnivå hos hver sensor. Figur 32 under viser hvordan grafvinduet har blitt programmert. Her viser den horisontale akse hvilken enhet verdiene tilhører, mens den vertikale akse viser verdien til sensoren for hver av de tre parametrene i dB. En rød farge på grafene signaliserer at det er en farlig høy verdi, og kan medføre hørselskade. I dette prosjektet har denne grensen blitt satt til 110 dB. Ved verdier på over 120 dB finnes det en usikkerhet på om verdien kan stole på. Grafen blir da sort for å markere en mulig overstyring av mikrofonen. Med bakgrunn i statusvinduet som blir forklart i neste kapittel, blir grafene grå hvis masteren mister tilkoblingen til en sensor. Dette gjøres for at brukeren skal slippe å forholde seg til to vinduer samtidig, og for å forbedre brukervennligheten betraktelig i situasjoner med mange sensorer.

## Distribuert lydnivåmåling



Figur 32: Grafvinduet til mottakeren

I tillegg til selve grafoversikten består grafvinduet av flere programmeringstråder, som i tillegg til å oppdatere det visuelle vinduet også utfører beregning av ekvivalentnivået til hver sensor. Oppdateringsfrekvensen til disse er vist i Tabell 13. Her vises blant annet tråden for oppdatering av ekvivalentnivå, *calculate*. Denne tråden implementerer formel (8.1) under for hver av sensorene som er koblet til slik at verdien kan bli vist til brukeren.

$$L_{Aeq,T,diskret} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\sum_0^T 10^{L/10}}{T} \right) \quad (8.1)$$

### 8.3.1.2 Statusvindu

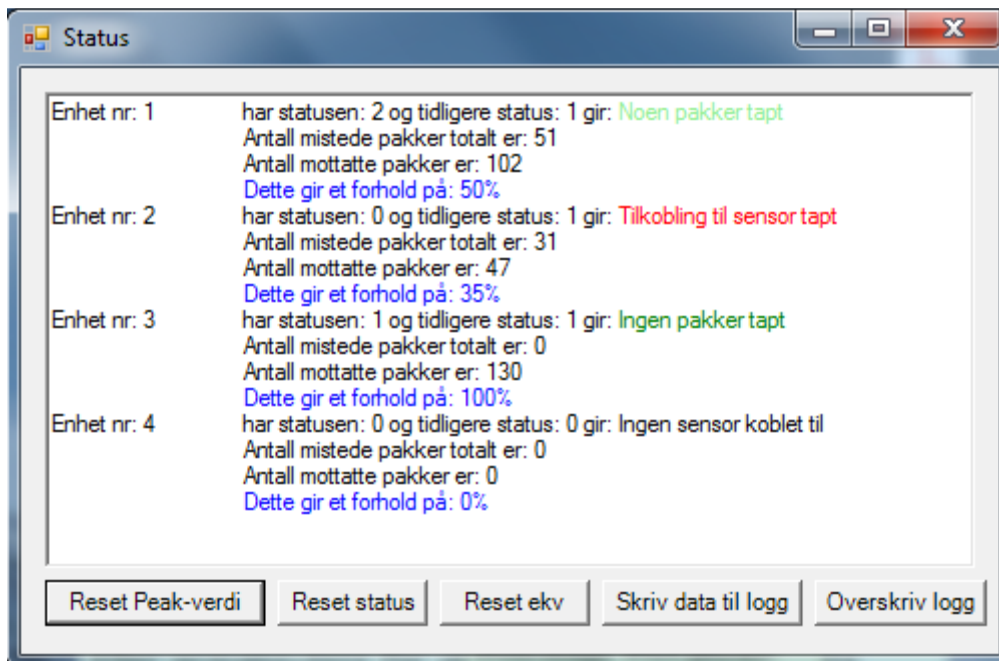
Statusvinduet ble en nødvendighet å ta med i prosjektet for å kunne vise statusen til alle sensorene som er koblet til systemet. En sensor som faller ut vil ikke gi noen høye verdier til systemet, og kan derfor feiltolkes som om lydnivået ved sensoren er lavt. Dette kan resultere i betydelige feil, og er svært uønsket i et system som skal ivareta personers helse.

Statusvinduet består av to deler; et tekstområde og en knappelinje som vist i Figur 33. Tekstområdet viser statusen til hver sensor med fargekoder sammen med antall mottatte pakker, antall mistede pakker og forholdet mellom disse for hver sensor. Knappelinjen i statusvinduet består av fem knapper, og gir brukeren mulighet til å styre innhenting, representering og lagring av informasjon. De tre reset-knappene nullstiller henholdsvis maksimal peak-verdi, statusinformasjonen til sensorene og det utregnede ekvivalentnivået til sensorene. Siden sensorene nullstiller den høyeste peak-verdien etter fem sekunder som vist i flytskjemaet i vedlegg 0, er det mulig å nullstille den maksimale peak-verdien. Dette er spesielt nyttig i tilfelle det skulle komme en høy verdi fra sensoren ved installering av



## Distribuert lydnivåmåling

mikrofonen eller lignende. De to siste knappene skriver den nye informasjonen til en loggfil, med muligheten til å fortsette å skrive på forrige loggfil, eller skrive over tidligere verdier.



Figur 33: Mottakerens statusvindu

### 8.3.1.3 Logg

Når programmet avsluttes skrives det automatisk en tekstfil med alle dataene som programmet mottok. Denne tekstfilen kan brukeren også få systemet til å skrive ved enten å trykke på *Skriv data til logg* eller *Overskriv logg* knappene i statusvinduet. Et utdrag av tekstfilen for en simulert sensor er vist i Figur 34.

```
05.06.2011 08:59:40
      Tid          Enhet   Pakke   Lydnivå
      08:59:35     1       0      103
      08:59:36     1       1       75
      08:59:37     1       2      119
      08:59:38     1       3       90
      08:59:39     1       4       93
Ekvivalent lydnivå for enhet nummer 1 er: 112
Status for enheten er: 1
```

Figur 34: Utdrag av logg for måling av lydnivå

### 8.3.1.4 Tråder

I masterprogrammet er det lagt inn fire programmeringstråder. Dette er programbolker som kjører i bakgrunnen av programmet, og som kun starter opp hvis det er behov for at de kjører. I Tabell 13 under er programmeringstrådene i mottakerprogrammet listet opp sammen med hva slags funksjon de har og hvor ofte de kjøres. I tillegg til disse, kommer tråder som kjøres av det originale Antware2 programmet og tråder som har tilknytning til vinduer eller knapper.

# Distribuert lydnivåmåling

Tabell 13: Programmeringstråder og deres funksjoner

| Programmeringsnavn | Funksjon   | Kjører i                          | Tid mellom hver kjøring i millisekund |
|--------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| <b>addData</b>     | Legger til data i grafvinduet, og tegner dette på nytt | Grafvinduet                       | 400                                   |
| <b>calculate</b>   | Regner ut ekvivalent lydnivå til hver sensor           | Grafvinduet                       | 8000                                  |
| <b>checkStatus</b> | Sjekker statusen til sensorene, og oppdaterer denne    | Hovedvinduet, <i>ChannelPanel</i> | 5000                                  |
| <b>AddText</b>     | Fjerner gammel, og legger på ny tekst i statusvinduet  | Statusvinduet                     | 8000                                  |

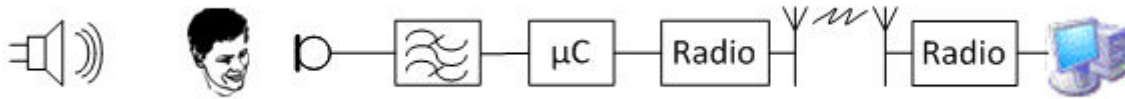
## 8.4 Resultater

Resultatet av programmeringen er et program som fungerer slik det er beskrevet i løsningen med et par unntak.

En ulempe som ble oppdaget under en demonstrasjon av systemet, er at programmet ble for avansert, og ikke hadde den brukervennligheten som var ønskelig. Det viste seg også at vinduet med grafer ble for masete for brukeren å forholde seg til.

Et annet resultat er at ved oppstart av programmet blir ikke frekvensen til enhetene satt til den riktige frekvensen på 2450 MHz, men er i stedet er på den opprinnelige frekvensen på 2466 MHz. Dette må da settes av brukeren ved oppstarten av programmet.

Under uttesting ble det også oppdaget en ustabilitet med oppstart og avvikling av programmeringstrådene i programmet. De kjente feilene er problemer med å starte opp grafvinduet og en feilmelding ved avslutning av statusvinduet. En midlertidig løsning på feil ved oppstart av grafvinduet, er å avslutte programmet og starte det opp igjen.

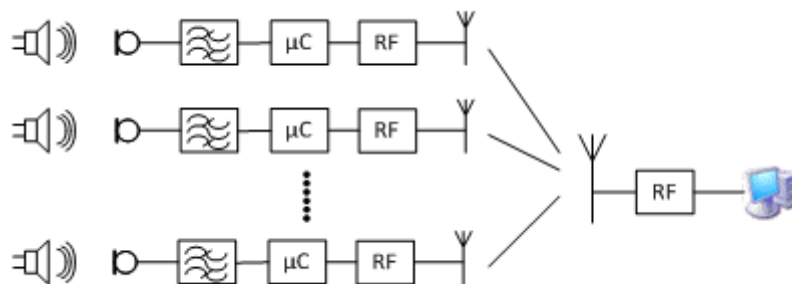


### 9 Systemet

Dette kapitlet setter sammen alle delene som er beskrevet i de tidligere kapitlene, og tar opp problemstillinger knyttet til de kravene som gjelder for det komplette systemet.

#### 9.1 Oppbygging

Systemet er sammensatt som vist i Figur 35. Her starter systemet med et lydtrykk vist som høyttalere i figuren. Hver sensor inneholder mikrofon, filter, mikrokontroller og en radiomodul, som beskrevet i de foregående kapitlene. Systemet er tenkt å være oppbygd av mange slike sensorer som alle sender informasjon om lydtrykket til en sentral datamaskin som presenterer dette på en oversiktlig måte. På denne måten kan systemet overvåke lydnivået der sensorene er utplassert, og samtidig gi beskjed til brukeren dersom lydnivået er farlig høyt.



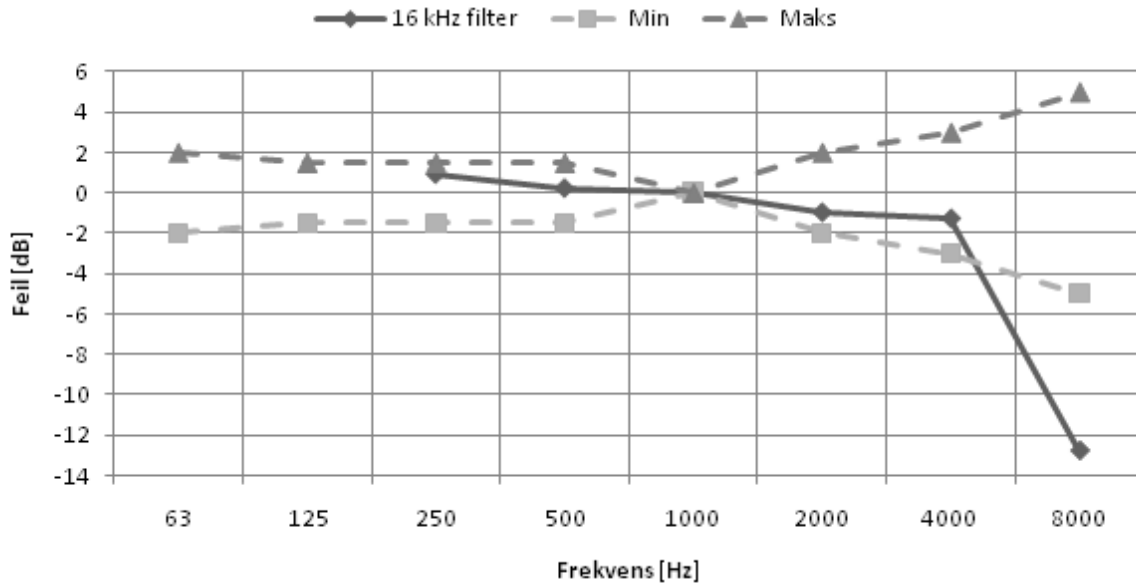
Figur 35: Sammensetning av systemet

#### 9.2 Frekvensrespons

Frekvensresponsen til systemet ble målt for hver av de to antifoldningsfiltrene som ble lagd i kapittel 5.3.

Under målingen ble lydnivåmåleren TES-1350A fra TES Electrical Electronic Corporation brukt som referansemåler til å sammenligne resultatene med. Målingene er tatt med alle komponentene i systemet sammenkoblet, og resultatene er avlest fra mottakerprogrammet. Målingene av frekvensresponsen til systemet ble gjort med et A-veid lydtrykk på 100 dB. Figur 36 viser forskjellen i desibel mellom prototypen og referansemåleren for seks forskjellige frekvenser. Utstyret som ble brukt for å skape lydtrykket i dette og neste kapittel hadde begrensninger både i frekvenser og lydstyrke, og det ble derfor ikke gjort flere målinger med høyere lydtrykk eller lavere og høyere frekvenser enn de som er vist.

## Distribuert lydnivåmåling

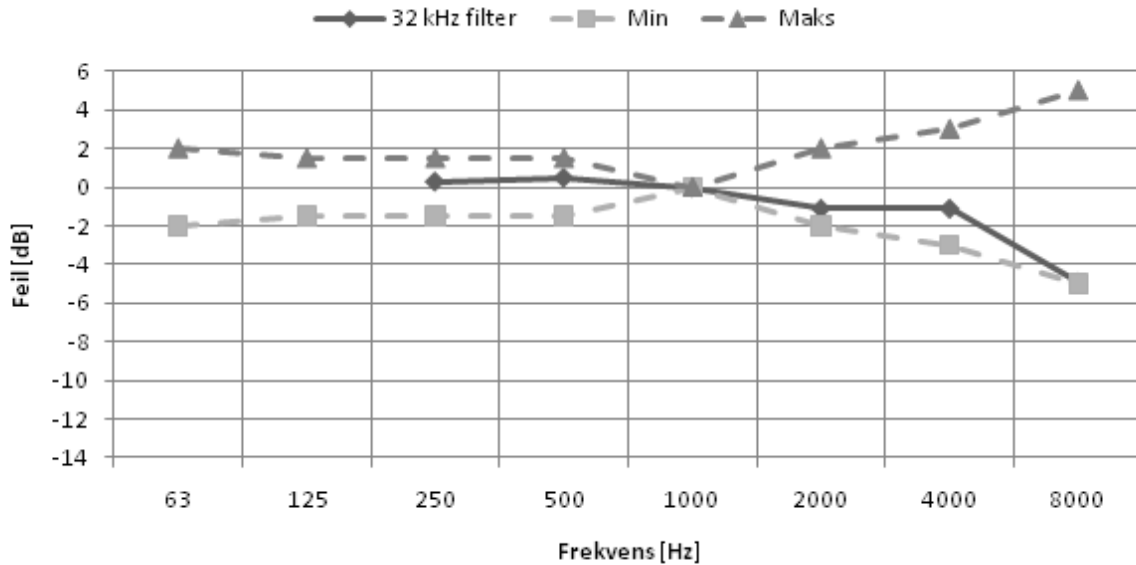


Figur 36: Frekvensresponsen til systemet med 16 kHz antifoldningsfilter

Avlest av Figur 36, med unntak av signalet bestående av en 8 kHz sinustone, ligger alle signalene med rundt 0 dB differanse fra referanseverdien. Signalet på 8 kHz har en klar forskjell og demping i systemet med 16 kHz antifoldningsfilteret, og er ikke innenfor den verdien som er spesifisert i Tabell 1. Denne dempingen skulle ut ifra løsningen være på litt over 3 dB, men er her mye høyere. En mulig grunn til dette kan være at det oppstår refleksjoner mellom flaten mikrofonen er plassert over, mens en annen mulig grunn til dette avviket kan være at filteret har en lavere kutfrekvens enn det som ble simulert og testet ut i kapittel 5.4.1.

Som et resultat av at signalet med frekvensen på 8 kHz ble dempet så mye som vist i Figur 36, ble det designet et nytt antifoldningsfilter. Dette filteret har en knekkfrekvens på 16 kHz, og er lagd slik at signalet skal kunne punktprøves med en frekvens på 32 kHz. Frekvensresponsen til systemet med det nye filteret er vist i Figur 37, og viser også her forskjellen i desibel mellom prototypen og referansemikrofonen for seks forskjellige frekvenser.

## Distribuert lydnivåmåling

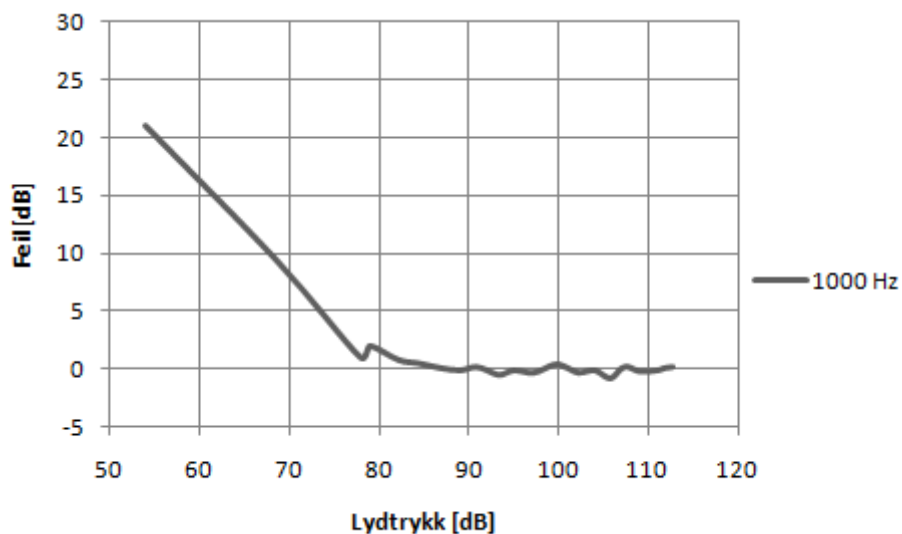


Figur 37: Frekvensresponsen til systemet med 32 kHz antifoldningsfilter

Ut ifra Figur 37 kan vi se at dempingen av frekvensen på 8 kHz ble mye mindre enn i Figur 36, og at feilen på den frekvensen nå er innenfor kravet på -5 dB fra Tabell 1. Dempingen er også her større enn dempingen på 0,5 dB, som ble målt i filteret og vist i Figur 14. Bakgrunnen for hvorfor begge filterne har en for stor demping ved høye frekvenser er usikkert, og ble ikke undersøkt ytterligere i dette prosjektet.

### 9.3 Støygulv

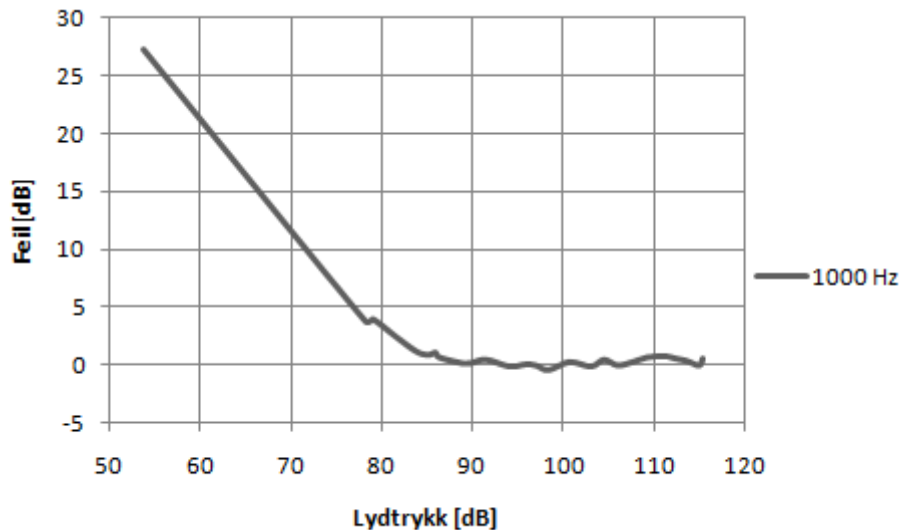
Figur 38 viser at nøyaktigheten til sensoren med 16 kHz antifoldningsfilteret er god fra 80 til litt over 110 dB. Denne økningen av støygulvet fra teoretiske 68 dB til ca 80 dB kommer sannsynligvis fra støy mellom filteret og mikrokontrolleren. Ved støy her vil lave spenningsverdier ble unøyaktige i AD-omformerer, og gi et høyere resultat enn det egentlige lydnivået.



Figur 38: Feil i dB for målt A-veid lydtrykk etter standarden [4], 16 kHz antifoldningsfilter

## Distribuert lydnivåmåling

For sensoren med 32 kHz antifoldningsfilter er feilen i målt lydtrykk vist i Figur 39. Her er det tydelig at enheten har en høy feil ved nivåer under 90 dB, og har derfor et støygulv som ligger nesten 10 dB høyere enn antifoldningsfilteret på 16 kHz. Denne effekten kan komme av en økt støy på utgangen av filteret.



Figur 39: Feil i dB for målt A-veid lydtrykk etter standarden [4], 32 kHz antifoldningsfilter

### 9.4 Dynamisk område

Komponentene i systemet har et gitt dynamisk område. I prosjektet er hele systemet optimalisert med tanke på dynamikken i signalet. Det dynamiske området i radiolinken og mottakersystemet blir ikke sett på, da det ikke er noen begrensninger i dynamikken her.

Tabell 14: Teoretisk dynamisk område til de forskjellige komponentene

|                             | Lyd            | Mikrofon              | Filter og forsterker                 | Analog til digital omformer |
|-----------------------------|----------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Maks</b>                 | 130 dB (RMS)   | 122,5 dB (0,6 V)      | 3,3 V                                | 3,3 V → 1024                |
| <b>Min</b>                  | 80 dB          | 30 dB (0 V)           | 0 V                                  | 0 V → 0                     |
| <b>Dynamisk område i dB</b> | 80 - 130 dB    | 30 - 122,5 dB         |                                      | 68,5 - 122,5 dB             |
| <b>Merknad</b>              | Fra standarden | Lydtrykk til spenning | Forsterkning og løfter DC-spenningen | Punktprøver signalet        |



Figur 40: Skjematisk tegning, dynamiskområde

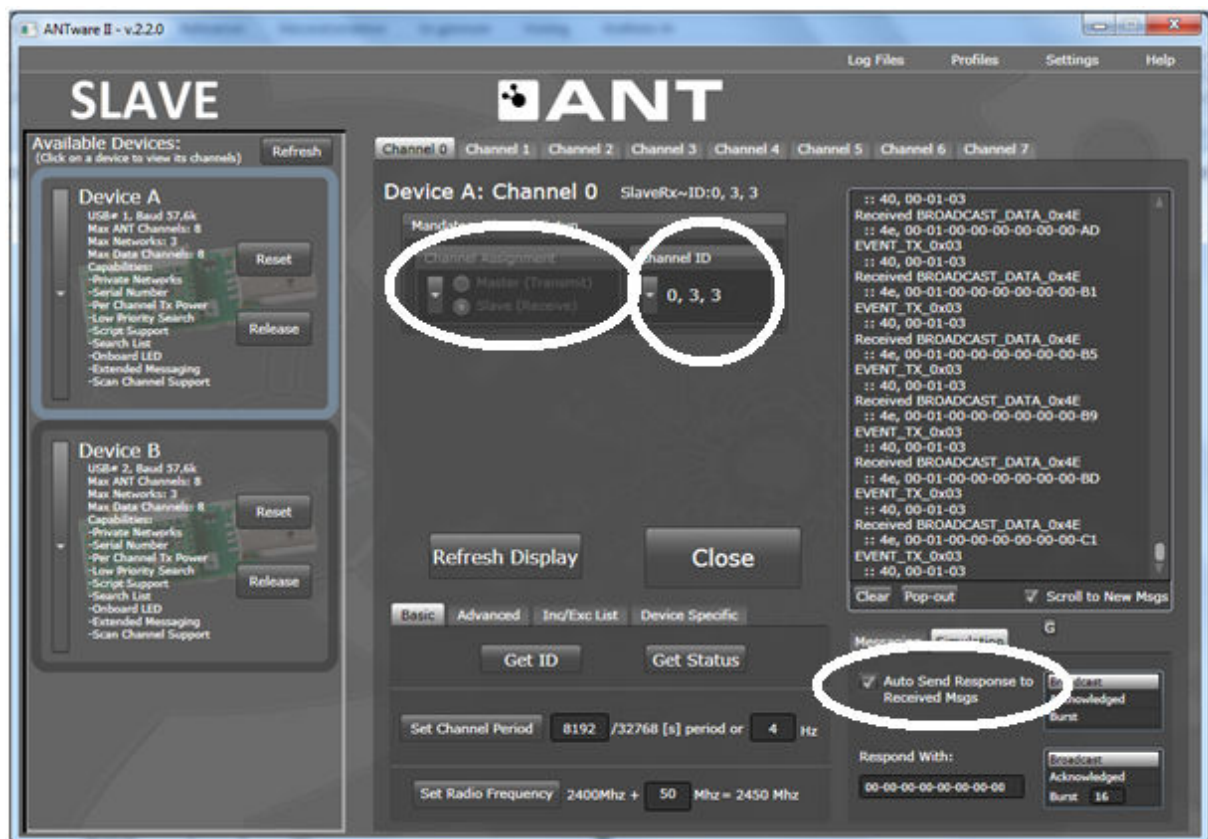
Tabell 14 og Figur 40 viser den teoretiske dynamikken i de forskjellige delene av sensoren. Den praktiske dynamikken i sensorene ble en del lavere på grunn av et høyere støygulv som omtalt i kapittel 9.3, og går fra 80 dB til 122 dB med 16 kHz filteret og fra i underkant av 90

## Distribuert lydnivåmåling

til 122 dB med 32 kHz filteret. Dette gir et dynamisk område på henholdsvis 42 og 32 dB hos sensorene.

### 9.5 Simulering av enheter

Et av kravene til systemet var at det skulle være mulig å teste om systemet greier å håndtere fire sensorer samtidig. Da det ble vanskelig å låne mer enn to kretskort for sensorer fra Nordic, ble det lagd et program som simulerte de to siste sensorene med to AT3-enheter tilkoblet USB-kontakter på datamaskinen. Det ble også her tatt utgangspunkt i Antware2-programmet, som ble modifisert til å implementere applikasjonspakken og de andre parametrene som blir satt i sensorene.



Figur 41: Skjermbilde av Antware2, slave

Det er heller ikke her mange synlige forskjeller mellom slaveprogrammet vist i Figur 41 og det opprinnelige Antware2-programmet. Av forskjellene som synes er kanalparametrene kodet inn for å øke brukervennligheten til programmet. De skjulte forskjellene er større, da applikasjonsprotokollen til systemet er lagt inn her på samme måte som de er implementert i sensorene. Denne aktiveres ved å huke av på boksen merket med automatisk respons (eng: Auto Send Response to Received Msgs) nederst til høyre i Figur 41.

### 9.6 Strømforbruk

Strømforbruket til sensorene er avhengig av hvilket av de tre mulige alternativene, som skissert i kapittel 6.3.2, enheten bruker. Det første av de tre alternativene var å fjerne noe av den analoge kretsen før mikrokontrolleren, og heller la denne ta seg av filtreringen digitalt. De to andre alternativene var begge to analoge, mens forskjellen lå i nedskalering av

## Distribuert lydnivåmåling

klokkehastighet og implementering av sovemodus i mikrokontrolleren. Disse tre alternativene er vist i Tabell 15 sammen med strømforbruket til de komponentene som er felles for de tre alternativene.

Tabell 15: Strømforbruk hos sensoren i tre ulike scenarier

| Komponent                              | Strømforbruk | Sum            | Kilde          |
|--|--------------|----------------|----------------|
| <b>Digital filtrering</b>              |              |                |                |
| Mikrokontroller                        | 10,11 mA     |                | Kapittel 6.4.4 |
| <b>Sum</b>                             |              | <b>10,1 mA</b> |                |
| <b>Analog filtrering, sovemodus</b>    |              |                |                |
| Mikrokontroller                        | 8,07 mA      |                | Kapittel 6.4.4 |
| A-vektingsfilter                       | 750 $\mu$ A  |                | Kapittel 5.4.5 |
| <b>Sum</b>                             |              | <b>8,8 mA</b>  |                |
| <b>Analog filtrering, nedskalering</b> |              |                |                |
| Mikrokontroller                        | 4,06 mA      |                | Kapittel 6.4.4 |
| A-vektingsfilter                       | 750 $\mu$ A  |                | Kapittel 5.4.5 |
| <b>Sum</b>                             |              | <b>4,8 mA</b>  |                |
| <b>Felles</b>                          |              |                |                |
| Virtuell jord                          | 766 $\mu$ A  |                | Kapittel 5.4.5 |
| Antifoldningsfilter                    | 1500 $\mu$ A |                | Kapittel 5.4.5 |
| Mikrofon                               | 50 $\mu$ A   |                | Kapittel 4.1.1 |
| Forspenningsskrets mikrofon            | 210 $\mu$ A  |                | Kapittel 4.3   |
| Radiomodulen                           | 239 $\mu$ A  |                | Kapittel 7.3.7 |
| <b>Sum</b>                             |              | <b>2,8 mA</b>  |                |

### 9.7 Oppstartstid

Oppstartstiden til sensorene ble målt til å være 45 sekunder. Denne tiden går det an å kutte betraktelig ned på, og det skal være mulig å få den godt under 20 sekunder. Det ble ikke fokusert på å finne mulige måter å gjøre det på i dette prosjektet, da oppstartstiden til sensorene ikke er kritisk for de scenarioene som prototypen er tenkt brukt til.



### 10 Diskusjon

I dette kapitlet vil resultatene som er funnet under hver enhet og i det totale systemet bli omtalt og vurdert.

#### 10.1 Strømforbruk

Å se på strømforbruket til en krets er alltid viktig. Ved bruk av mindre strøm kan kretsen enten utstyres med mindre batterier og redusere størrelsen, eller så kan opptiden til kretsen bli lengre og gi økt brukervennlighet. I dette prosjektet ble tre scenarioer med forskjellig strømforbruk satt opp imot hverandre, og resultatene av disse er gitt i Tabell 15 på side 56.

Av Tabell 15 kan vi se at de to mest strømgjerrige alternativene bruker analog filtrering til å implementere A-veiekurven. Det mest strømsparende alternativet av disse er å nedskalere klokka til å jobbe saktere, mens alternativet med å bruke sovemodus aktivt bruker 4 mA mer. Ulempen med dette kan være tap av data hvis prosessoren ikke greier å få prosessert unna inngangssignalet fort nok, så data blir tapt i mikrokontrolleren. Derfor vil antakeligvis en kombinasjon av å sette ned klokkefrekvensen til mikrokontrolleren og å bruke sovemodus aktivt være et godt kompromiss med det beste fra disse to mulighetene.

Den løsningen som bruker mest strøm er å filtrere signalet digitalt i mikrokontrolleren. Dette er fordi gevinsten med å fjerne en operasjonsforsterker er mye mindre enn det økende strømforbruket mikrokontrolleren får ved å implementere det digitale filteret. Dersom kravet til det dynamiske området i filterkretsen hadde vært høyere og mer vektet, hadde OPA2350, som beskrevet i Tabell 3, blitt foretrukket framfor OPA2340. Denne forandringen hadde gjort at alternativet med digital filtrering hadde spart 3 mA i forhold til analog filtrering med sovemodus.

Ved å sammenligne enhetenes strømforbruk i scenarioet med klokkenedskalering, ser vi at de to enhetene som bruker minst strøm er radiolinken og mikrofonen, med under tre prosent hver av det totale forbruket. Den analoge kretsen med A-veiefilteret, virtuell jord og antifoldningsfilteret bruker over 30 prosent av det totale strømforbruket, mens mikrokontrolleren bruker 60 prosent. Dette viser at ved en eventuell forbedring av strømforbruket til sensorene kan det være mest hensiktsmessig å se på mer strømsparende mikrokontrollere.

Selv om strømforbruket på nesten 8 mA i det mest strømgjerrige alternativet kan virke relativt høyt, vil enhetene kunne bli drevet i 28 timer med for eksempel et lithium klokkebatteri [64]. Dette batteriet tilsvarer størrelsen til to kronestykker oppå hverandre og gir 225 mAh. 28 timer opptid er over tre ganger høyere enn kravet til prototypen på 8 timer, som er skissert i Tabell 2. Selv med digital filtrering vil et slikt batteri kunne drive kretsen i over 16 timer, som er det dobbelte av kravet. Dette forutsetter da at batteriet greier å levere en konstant spenning selv om det nesten er utladet.

#### 10.2 Dynamikk

Det dynamiske området til enhetene er beskrevet i kapittel 9.4 på side 54, og er for lite i følge standarden som er omtalt i kapittel 2.2. Her er kravet til sensorene at det dynamiske området skal være fra 80 til 130 dB. For å kunne tilfredsstille kravet til dynamikk er det tre ting i prosjektet som kan gjøres annerledes ved en eventuell forbedring, noe som nå skal bli forklart

## Distribuert lydnivåmåling

nærmere. For det første må det velges en mikrofon som takler lydtrykk opp til 130 desibel, og en mikrofon som gjør det er FG-23742. Denne er beskrevet i kapittel 4.1.3.

Selv om analog til digital omformeren egentlig har et stort nok dynamisk område, kan en økning av nøyaktigheten ved å velge en analog til digital omformer med flere bit gi sensoren et lavere støygulv. Spesielt ved lave lydtrykk kan nøyaktigheten til enheten da økes.

Den siste forandringen i sensorene som må bli gjort er å prøve å fjerne så mange støykilder i kretsen som mulig. Det vil resultere i et lavere støygulv og dermed et større dynamisk område, som er den største begrensningen til sensorene i dette prosjektet. Ved å konstruere et ordentlig kretskortutlegg med gode jordingslinjer kan det gi en støyforbedring fra de nåværende filterne som er loddet opp på et Veroboard [36].

Det er en stor forskjell i støygulvet mellom 16 kHz filteret og 32 kHz filteret på nesten 10 dB. En mulig forklaring på dette kan være at det er mye høyfrekvent støy i begge filterne, men siden 16 kHz filteret demper høye frekvenser mer enn 32 kHz filteret gir denne støyen kun utslag på 32 kHz filteret. En annen mulig forklaring på denne forskjellen kan også ligge i spenningsdeleren som er implementert i begge filterne. Hvis denne er unøyaktig vil det ligge en DC-verdi på inngangen til analog til digital omformeren og gi feil verdi i mikrokontrolleren. En mulig løsning på dette kunne vært å implementere et andreordens høypassfilter i mikrokontrolleren for å fjerne denne unøyaktigheten. En slik implementering øker da strømforbruket til kretsen, og må vurderes i forhold til det. Dette ble ikke implementert i dette prosjektet, da det ikke ble prioritert.

Slik systemet er satt opp nå er det optimalisert med hensyn på å dekke det dynamiske området i nedre del av kravet fra standarden. Dersom systemet hadde blitt optimalisert på det øvre området fra 90 til 130 dB i stedet, ville enhetene ikke fungert etter hensikten, da det ekvivalente støynivået alltid ville være over 90 dB. Det daglige støyeksponeringsnivået må i følge kapittel 3.2 aldri være over 85 dB for arbeidstakere, noe det da kommer til å være hvis sensorene starter å måle lydnivået på 90 dB. Derfor er det i dette prosjektet valgt å bruke en mikrofon med høyere følsomhet slik at det dynamiske området starter på 80 dB og måler opp til 120 dB. For å kunne forsvare dette, og for å få avviket i systemet i en slik retning at den ikke er skadelig, må alle verdier fra sensorene som er over 122 dB beregnes som om de var på 130 dB. Dette utgjør naturligvis en betydelig feil, men feilen er gunstig da denne varsler arbeidstakeren om at vedkommende må ta pause heller for tidlig enn for sent. Denne omgjøringen av alle verdier fra 122 til 130 dB ble ikke implementert i prototypen, men er en skisse til hvordan problemet kan bli løst.

I Figur 38 og i Figur 39 på side 53 og 54, som omtaler feilen i beregnet lydtrykk som en funksjon av det A-veide lydtrykket er det tydelig at ved lydtrykk høyere enn støygulvet til sensorene er nøyaktigheten til sensorene gode. Dette sees ved at grafene flater ut når det A-veide lydtrykket ved sensorene er større enn støygulvet til enhetene.

### **10.3 Frekvensrespons**

Frekvensresponsen til 16 kHz filteret har, som vist i Figur 36 på side 52, en kraftig demping ved 8 kHz som er høyere enn de grensene som er spesifisert i standarden. Utfallet av dette blir at sensoren kan varsle for sent i forhold til en dosimetrimåler med riktig frekvensrespons, dersom lydtrykket sensoren befinner seg i har mange høye frekvenser. På en annen side vil en for lav demping av frekvenser ved 8 kHz gi en antifoldningsfeil i AD-omformeren. Det er

## Distribuert lydnivåmåling

derfor viktig at filteret demper frekvenser på 8 kHz og høyere. Som en konsekvens av dette ble det lagd et nytt antifoldningsfilter på 32 kHz, og i følge Figur 37 tilfredsstiller dette filteret kravene til frekvensrespons fra standarden.

I kapittel 3.2 på side 8 er det et krav fra forskriften ”Forskrift om vern mot støy på arbeidsplassen” om at det høyeste C-veide lydtrykket på arbeidsplassen ikke må overskride 130 dB. I dette prosjektet ble dette punktet forenklet, og det høyeste lydtrykket ble veid med A-kurven i stedet for C-kurven. Forskjellen mellom disse kurvene er at A-veiekurven har en større demping enn C-veiekurven ved lave frekvenser. Ved høye frekvenser over 1 kHz, er frekvensresponsen til de to kurvene nesten like. Ved implementering av digital filtrering, som foreslått i kapittel 5.3.4 på side 19, gir denne filterstrukturen mulighet til å hente ut både den C-veide og den A-veide verdien, og er en mulig løsning på denne begrensningen.

### **10.4 Pakketap**

Målingene av pakketap innendørs hos Nordic er vist i Figur 30 på side 43. Her er det tydelig at en liten sideveis forandring av posisjonen til mottakeren gir stort utslag på pakketapet mellom enhetene. Dette er fordi sensorene da mest sannsynlig kommer i en posisjon der signalets fase og motfase utfaser hverandre, og sensoren mister kontakt med masteren. Denne effekten er spesielt tydelig i en situasjon som dette, hvor alle enhetene står i ro under målingene. Det er ikke mulig å fjerne denne effekten fra et radiosystem, da det alltid er mulig å få en sterk refleksjon i motfase med det opprinnelige signalet. En mulig løsning på problemet er å sette senderen eller mottakeren i bevegelse, slik at når en sterk refleksjon med motfase treffer og ødelegger en pakke, vil det være liten sannsynlighet for at den samme refleksjonen er i motfase i den nye plasseringen til mottakeren eller senderen. På bakgrunn av dette er det naturlig å anta at pakketapet til en sensor som ikke er stasjonær vil ligge i det nedre området i Figur 30. Videre er det også naturlig å anta at ved en sensor i bevegelse vil pakketapet ikke være preget av tap i en skur, hvor etterfølgende pakker blir mistet, men at tapene vil være jevnt fordelt.

En annen mulig måte å forhindre mye pakketap i systemet, og da øke stabiliteten til systemet på er å sette opp sendehastigheten. Ved å doble sendehastigheten til systemet vil hver sensor ha mulighet til å sende data inn til masteren to ganger per sekund. Dette gir økt redundans i systemet, samtidig som det reduserer batteritiden til sensorene og krever en raskere prosessering av dataene hos mottakeren. I teorien skal det være mulig å sette sendefrekvensen til systemet på 180 Hz, som er to ganger per sekund for 90 sensorer. Dette fordi den teoretiske kapasiteten til systemet er på ca 200 Hz som beskrevet i kapittel 7.3.3. Hvorvidt dette er mulig i praksis er usikkert, og ble ikke testet ut.

ANT-protokollen har ingen støtte for frekvenshopping slik som Bluetooth-protokollen har. En slik frekvenshopping hadde gitt en større sannsynlighet for at tilkoblingen til sensorene ikke hadde gått tapt, selv om det på enkelte frekvenser ikke hadde vært mulig å få igjennom noe informasjon. En løsning er å implementere en form for frekvenshopping i ANT-protokollen på applikasjonsnivå. Mens Bluetooth-protokollen kan hoppe mellom 40 ulike kanaler per pakke, er det her tenkt å la ANT-enhetene bytte frekvens hvis mer enn to pakker ikke blir mottatt. Dette kan implementeres ved å la sensorene sende pakker som blir bekreftet fra mottakeren om de kommer fram eller ikke, i motsetning til kringkastingspakkene som sensorene er programmert til å sende i dette prosjektet. Med en grense på for eksempel 2 pakker, vil sensorene og masteren bytte frekvens før den tredje pakken slik at den har en høyere sannsynlighet til å komme fram. På denne måten så kan pakketapet ved stasjonære

## Distribuert lydnivåmåling

sensorer og mottakere minimeres, og stabiliteten til systemet økes. Dette er en mulig løsning, men ble ikke implementert i prototypen.

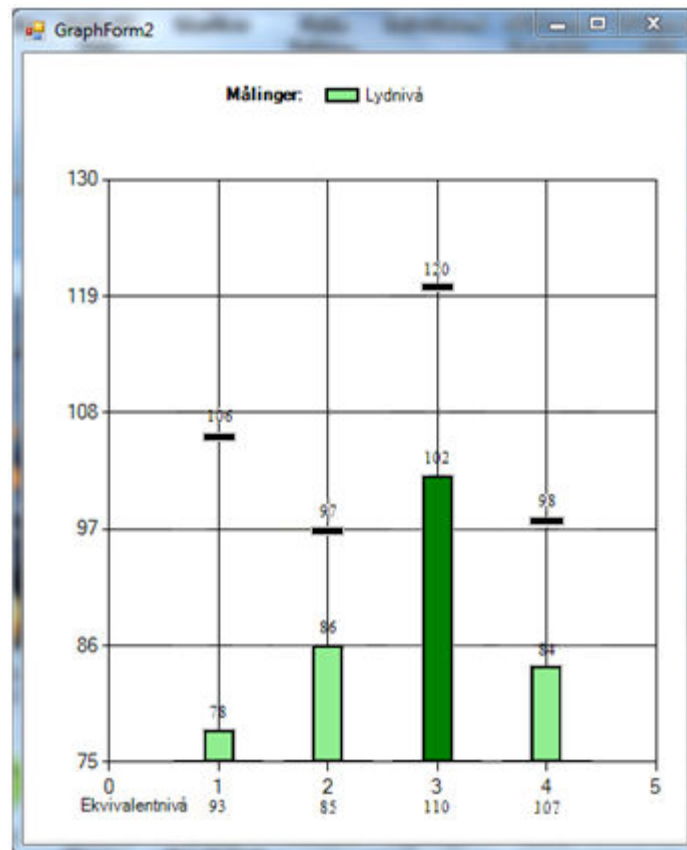
### **10.5 Rekkevidde**

Rekkevidden til sensorene ble i kapittel 7.4.1 på side 43 testet ut og målt til å være lengre enn kravet på 12 meter ved gode forhold. Kravet til avstanden på 12 meter fra Tabell 2 ble satt på bakgrunn av at prototypen skulle brukes for å overvåke lydnivået i et orkester. Det ble i innledningen av prosjektet sett på to andre situasjoner som det var ønskelig at prototypen skulle kunne brukes til. De to andre situasjonene var overvåking av lydnivå på underholdningsarrangementer og dynamiske støykart i industrien. Begge disse to situasjonene har vage krav til rekkevidden mellom sensorene og mottakeren, og det er i mange tilfeller ønskelig at avstanden til sensorene i underholdningsarrangementer og i industrien er større enn avstanden systemet trenger for å dekke et orkester. Det er flere mulige løsninger på dette problemet, og det enkleste av dem er å plassere radiomodulen til mottakeren på et strategisk sted nærmere sensorene for å redusere avstanden mellom radiomodulene. Radiomodulen til mottakeren trenger ikke å være plassert fysisk ved siden av mottakeren, men kan være forbundet med en kabel til et mer optimalt sted for mottak av informasjon fra sensorene. En annen løsning som er mer omfattende er å konstruere en reléstasjon med en mikrokontroller og en ANT-radio. Denne kan da motta informasjon fra en eller flere sensorer, og videresende denne informasjonen trådløst til mottakeren. Ved implementering av flere slike reléstasjoner forandrer nettverkstopologien til systemet seg fra en en-til-alle-struktur til en tre-struktur. Det ble i prosjektet ikke prioritert å bruke mye tid på å programmere en reléstasjon i applikasjonsnivået i prototypen, og dette ble derfor ikke utprøvd i praksis.

### **10.6 Mottaker**

Mottakeren i systemet har et litt dårlig brukergrensesnitt opp imot brukeren av systemet, og da spesielt hvis antallet sensorer økes fra fire til 90. Mottakeren legger blant annet opp til at brukeren har teknisk innsikt ved avlesning av grafene, og en forbedring her kunne vært å fjerne grafen med utregnet ekvivalentverdi. Denne kunne så ha blitt erstattet med et prosenttall, som viste hvor stor prosentandel av dagens maksimale dose arbeidstakeren har blitt utsatt for. Denne forandringen fjerner behovet for at brukeren trenger teknisk innsikt for å kunne bruke systemet til å måle daglig støydose. En annen forenkling for å bedre brukervennligheten kan være å fjerne stolpen som viser peaknivået, og heller vist denne som en vannrett linje over stolpen til lydnivået. Ved å gjøre disse to tingene så vil det visuelle kun bestå av en graf per sensor, og være mye mer intuitivt ovenfor brukeren av systemet. Et eksempel på denne visualiseringen er vist i Figur 42, som er en manipulert figur, men uten omgjøring av ekvivalentnivået fra dB til prosent.

## Distribuert lydnivåmåling



Figur 42: Manipulert grafvindu til mottakeren som viser lydnivået i dB som funksjon av sensorene

Logg-fila som mottakeren skriver når systemet blir avsluttet lagrer ingen informasjon om maksimalt peaknivå til hver sensor. I et ferdig produkt bør dette være implementert, men selv om dette ikke er et omfattende arbeid, ble det ikke prioritert i prosjektet.

# Distribuert lydnivåmåling

### 11 Konklusjon

I innledningen ble det beskrevet tre tenkte situasjoner prototypen skulle kunne brukes til. Det første bruksområdet var rettet mot et orkester, og kravene til prototypen var satt opp ut ifra dette. På bakgrunn av de resultatene som er funnet i prosjektet kan systemet fungere i en slik situasjon, selv om noen av resultatene viser at systemet ikke tilfredsstillende standarden.

Det andre bruksområdet som ble presentert var større underholdningsarrangementer, hvor det kan være en fordel å overvåke lydnivået på flere forskjellige steder. På denne måten kan man dekke store deler av publikumsområdet og enkelt se om lydtrykket er større enn tillatt på bestemte steder. Denne rapporten viser at et slikt bruksområde for systemet er realiserbart. De største begrensningene i systemet i en slik situasjon er rekkevidden til sensorene.

Den siste situasjonen systemet var tiltenkt var i en industri med et variabelt støynivå. Tanken var da at systemet kunne inngå i et dynamisk kart som viste arbeidstakerne hva slags type hørselvern som var påkrevd til enhver tid. I denne situasjonen kan en negativ egenskap hos enheten være rekkevidden mellom sensorene og mottakeren. Siden situasjonen er en arbeidsplass, er det også et krav om at systemet er godkjent i forhold til standardene, da målingene ikke kun brukes til å gi brukerne en følelse eller formening om hvor høyt lydnivået er.

Ved prosjektets avslutning er sluttproduktet en fungerende prototype av en trådløs dosimetrimåler med flere spennende bruksområder, deriblant de som er beskrevet over. Prototypen har to klare forenklinger ut ifra kravene som standarden setter til en dosimetrimåler, men denne prosjektrapporten viser flere mulige måter å løse disse problemene på. Den mest sentrale forenklingen er det dynamiske området som prototypen fungerer for. Standarden sier at en dosimetrimåler skal kunne måle i området fra 80 til 130 dB, mens prototypen måler i området 80 til 120 dB. Ved å sette alle måleverdier fra sensorene som er over 120 dB til å registreres som 130 dB i mottakeren, vil feilen en arbeidstaker opplever ved å bruke systemet ikke gi en høyere sannsynlighet for å få en hørselsskade, men heller varsle arbeidstakeren for tidlig.

Den andre forenklingen er kun til stede i den ene av de to sensorene, og det gjelder frekvensresponsen til filteret. Siden den målte frekvensresponsen til 16 kHz filteret hadde en stor demping ved 8 kHz, ble det designet et nytt filter i løpet av prosjektet. Dette filteret som ble konstruert for en samplingsfrekvens på 32kHz, hadde et mindre dynamisk område, som gikk fra 90 til 120 dB, men en frekvensrespons som tilfredsstillende kravene fra standarden. Dette viser at den eneste forenklingen fra standarden for dette går på det lavere dynamiske området sensoren har mulighet til å registrere.

Med bakgrunn i det arbeidet som er gjort, viser denne rapporten hvordan det er mulig å lage et komplett system med flere trådløse lydnivåmålere og en mottaker. Selv om systemet ikke tilfredsstillende standarden, er det likevel et fullverdig og enkelt verktøy med flere bruksområder. Det viktigste bruksområdet er systemets mulighet til å øke forståelsen og bevisstgjøre arbeidstakere på den risikoen vedkommende tar ved å utsette seg for høye lydtrykk. På denne måten kan systemet være et effektivt verktøy for å forebygge hørselskader i blant annet de situasjonene som er nevnt.

# Distribuert lydnivåmåling



### 12 Referanseliste

Ansiktet av mann i overskriftstegning: [65]

1. Amundsen, T.-A., *Trådløs dosimetri ved hjelp av Bluetooth low energy*. 2010, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet: Trondheim. p. 40.
2. Sintef. *Om SINTEF*. 2010 [cited 2011 28/4]; Available from: <http://www.sintef.no/Om-oss/>.
3. Nordic Semiconductor. *About us*. [cited 2011 28/4]; Available from: <http://www.nordicsemi.com/eng/About-us>.
4. International Electrotechnical Commission, *61672-1, Electroacoustics - Sound level meters, Part 1: Specifications*. 1.0 ed. 2002, Geneva: Printed by the IEC Central Office, Geneva Switzerland. 100 s.
5. International Electrotechnical Commission, *61252, Electroacoustics - Specifications for personal sound exposure meters*. 1.1 ed. 2002, Geneva: Printed by the IEC Central Office, Geneva Switzerland. 72 s.
6. International Organization for Standardization, *ISO 1999 Acoustics: determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment*. 1990, Geneva: ISO. iv,17 s.
7. Otterbeck, J., *Operaen*. 2008, Oslo: Opera forl. 203 s.
8. Trondheim Symfoniorkester. *Historikk*. [cited 2011 16/4]; Available from: [http://tso.no/om\\_tso](http://tso.no/om_tso).
9. *Work and health in the EU: a statistical portrait : data 1994-2002. Page 62*. 2004, Luxembourg: Publications Office. 129 s.
10. Sataloff, J. and R.T. Sataloff, *Occupational hearing loss*. 2006, Boca Raton, FL: CRC Taylor & Francis. xxii, 984 s., [4] s. of plates.
11. Humes, L.E., L.M. Joellenbeck, and J. Durch, *Noise and military service: implications for hearing loss and tinnitus*. 2005, Washington, DC: National Academies Press. xviii, 320 s.
12. Barden, D.S., D.C. Simon, and D.N. Jones. *Hearing loss*. 2010 [cited 2011 2/5]; Available from: <http://rcgp-innovait.oxfordjournals.org/content/3/11/646.full>.
13. Arbeidsdepartementet. *FOR 2006-04-26 nr 456: Forskrift om vern mot støy på arbeidsplassen*. 2006 1/2 - 2010 [cited 2011 17/4]; Forskrift om støy på arbeidsplassen ]. Available from: <http://www.lovdatabasen.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20060426-0456.html>.
14. Hear-it. *Work noise to be removed by design*. 2010 [cited 2011 4/5]; Available from: <http://www.hear-it.org/page.dsp?page=6839>.
15. Knowles Acoustics. *FG Series Microphones*. [Brosjyre] [cited 2011 18/4]; Available from: <http://www.futurashop.it/download/FG.pdf>.
16. Knowles Acoustics. *FG Series 2002*; Available from: Vedlagt som vedlegg 13.7.1 i zip-fil.
17. Knowles Electronics. *Specification FG-3629-P16*. 2002 [cited 2011 8/5]; Available from: [http://www.knowles.com/search/prods\\_pdf/FG-3629-P16.pdf](http://www.knowles.com/search/prods_pdf/FG-3629-P16.pdf).
18. Knowles Acoustics. *Acoustic Interface Design Guide - 2010*. 2010 [cited 2011 4/5]; Available from: <http://www.knowles.com/search/pdf/2010%20Design%20Guide.pdf>.
19. Knowles Acoustics. *FG-23742 Datasheet*. 2009 [cited 2011 4/5]; Available from: [http://www.knowles.com/search/prods\\_pdf/FG-23742-D36.pdf](http://www.knowles.com/search/prods_pdf/FG-23742-D36.pdf).

## Distribuert lydnivåmåling

20. Analog Devices. *Datablad AD8031/AD8032*. 2008 [cited 2011 20/4]; Available from: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8031\\_8032.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8031_8032.pdf).
21. Analog Devices. *Datablad AD823*. 2010 [cited 2011 20/4]; Available from: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD823.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD823.pdf).
22. National Semiconductor. *Datablad LM6142/LM6144*. 2004 [cited 2011 20/4]; Available from: <http://www.national.com/ds/LM/LM6142.pdf>.
23. Analog Devices. *Datablad OP191/OP291/OP491*. 2010 [cited 2011 20/4]; Available from: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/OP191\\_291\\_491.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/OP191_291_491.pdf).
24. Analog Devices. *Datablad OP295/OP495*. 2009 [cited 2011 20/4]; Available from: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/OP295\\_495.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/OP295_495.pdf).
25. Texas Instruments. *Datablad OPA350/OPA2350/OPA4350*. 2005 [cited 2011 20/4]; Burr-Brown product]. Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa2350.pdf>.
26. Texas Instruments. *Datablad OPA340/OPA2340/OPA4340*. 2007 [cited 2011 20/4]; Burr-Brown product]. Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa2340.pdf>.
27. Texas Instruments. *Datablad OPA344/OPA2344/OPA4344/OPA345/OPA2345/OPA4345*. 2008 [cited 2011 20/4]; Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa2344.pdf>.
28. Texas Instruments. *Datablad OPA134/OPA2134/OPA4134*. 1997 [cited 2011 20/4]; Burr-Brown product]. Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa2134.pdf>.
29. NXP Semiconductors. *LPC4350/30/20/10 Objective data sheet*. 2010 [cited 2011 5/5]; Available from: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC4350\\_30\\_20\\_10.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC4350_30_20_10.pdf).
30. Beis, U. *Active Low-Pass Filter Design and Dimensioning*. 2005 [cited 2011 10/4]; Available from: <http://beis.de/Elektronik/Filter/ActiveLPFilter.html>.
31. Labcenter Electronics. *Proteus*. [cited 2011 10/4]; Available from: <http://www.labcenter.com/index.cfm>.
32. Beis, U. *Weighting Filter Set*. 2006 [cited 2011 10/4]; Available from: <http://beis.de/Elektronik/AudioMeasure/WeightingFilters.html>.
33. Olsen, H., *Fortrankode - A,C and Z weighting filters on buffer data*, T.-A. Amundsen, Editor. 2010, Sintef IKT: Trondheim.
34. MathWorks. *MATLAB*. [cited 2011 10/4]; Available from: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
35. Carter, B. and Texas Instruments. *A Single-Supply Op-Amp Circuit Collection*. 2000 [cited 2011 2/6]; Available from: <http://www.eng.yale.edu/ee-labs/morse/compo/sloa058.pdf>.
36. hazzer123. *Prototyping Circuits with Veroboard*. 2008 [cited 2011 11/6]; Available from: [http://www.societyofrobots.com/member\\_tutorials/node/90](http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/90).
37. Sørdsdal, S., *Hjelp til digitalt filter*, T.-A. Amundsen, Editor. 2011: Trondheim.
38. Henriksen, V., *Hjelp til digitalt filter*, T.-A. Amundsen, Editor. 2011: Trondheim.
39. Agarwal, R.C. and C.S. Burrus, *New Recursive Digital Filter Structures Having Very Low Sensitivity and Roundoff Noise*. IEEE Transactions on circuits and Systems, 1975. **CAS-22**(No. 12): p. 921-927.

## Distribuert lydnivåmåling

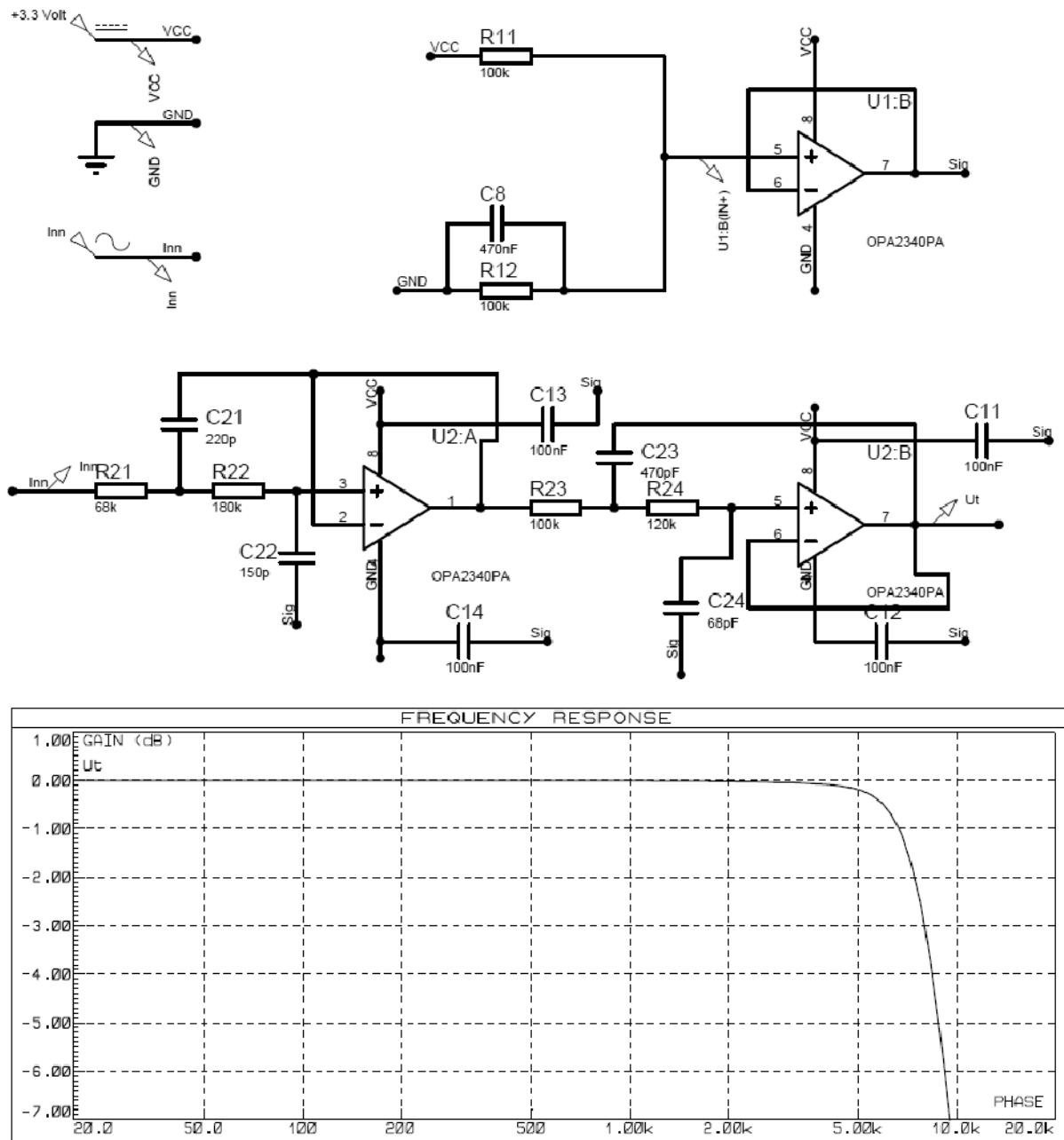
40. Ritzerfeld, J.H.F. and G.S. Mollova, *Controlled rounding in low noise digital filter structures*, in *Technische Universiteit Eindhoven, Fac. Elektrotechniek*: Eindhoven. p. 5.
41. NXP Semiconductors. *Product data sheet - LPC1111/12/13/14*. 2011 [cited 2011 8/5]; Available from: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC1111\\_12\\_13\\_14.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC1111_12_13_14.pdf).
42. ARM. *Cortex-M0 Processor*. 2011 [cited 2011 8/5]; Available from: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m0.php>.
43. Nordic Semiconductor. *nRFgo Starter Kit User Guide*. 2010 [cited 2011 2/6]; v 1.4:[Available from: [https://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download\\_resource/7456/4/12545294](https://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download_resource/7456/4/12545294).
44. NXP Semiconductors. *LPCXpresso*. 2011 [cited 2011 25/5]; Available from: <http://ics.nxp.com/lpcxpresso/>.
45. Lincoln, A. *High Dynamic Range - Fact or Fiction*. 2010 [cited 2011 9/6]; Available from: <http://blog.prosig.com/2010/11/18/high-dynamic-range-%E2%80%93-fact-or-fiction/>.
46. ATIS. *ATIS Telecom Glossary 2007 - Network topology*. 2007; Available from: <http://www.atis.org/glossary/definition.aspx?id=3516>.
47. Garmin Ltd. *Garmin Ltd. Acquires Dynastream Innovations Inc*. 2006 [cited 2011 6/5]; Available from: [http://garmin.blogs.com/my\\_weblog/2006/12/dynastream\\_beca.html](http://garmin.blogs.com/my_weblog/2006/12/dynastream_beca.html).
48. ANT. *ANT Wireless Company*. [cited 2011 10/4]; Available from: <http://www.thisisant.com/company/the-ant-story>.
49. Nordic Semiconductor. *nRF24AP2 Product specification*. 2010 [cited 2011 2/6]; v 1.2:[Available from: [http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download\\_resource/8146/2/3665232](http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download_resource/8146/2/3665232).
50. Nordic Semiconductor. *Product brief - nRF24AP2-8ch*. [cited 2011 12/5]; version 1.1:[Available from: [http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download\\_resource/7657/3/17975587](http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download_resource/7657/3/17975587).
51. Bluetooth SIG Inc. *Low energy technology is an evolution in Bluetooth wireless technology*. 2011 [cited 2011 7/5]; Available from: <http://www.bluetooth.com/Pages/Low-Energy.aspx>.
52. Shah, A. *Data transfer rates to jump with Bluetooth 3.0*. 2009 [cited 2011 24/5]; Available from: [http://www.pcworld.com/businesscenter/article/163545/data\\_transfer\\_rates\\_to\\_jump\\_with\\_bluetooth\\_30.html](http://www.pcworld.com/businesscenter/article/163545/data_transfer_rates_to_jump_with_bluetooth_30.html).
53. Bluetooth SIG Inc. *Master Table of Contents & Compliance Requirement*. 2010 [cited 2011 24/5]; Specification of the bluetooth system]. Available from: [https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc\\_id=229737](https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737).
54. Kinney, P. *ZigBee technology: Wireless Control that Simply Works*. 2003 [cited 2011 12/5]; Available from: [http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop\\_download.asp?contentID=5162](http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=5162).
55. Donovan, J. *Bluetooth low-energy: An introduction*. 2010 [cited 2011 24/5]; Available from: <http://low-powerwireless.com/blog/2010/07/08/bluetooth-low-energy-an-introduction/>.
56. Adams, J. *Meet the ZigBee standard*. 2003 [cited 2011 12/6]; Available from: <http://www.sensormag.com/sensors-mag/meet-zigbee-standard-733>.

## Distribuert lydnivåmåling

57. Dynastream Innovations Inc. *AT3 RF Transceiver Chipset*. 2009 [cited 2011 4/6]; Available from: [http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/1216050529\\_at3%20rf%20transceiver%20chipset\\_datasheet.pdf](http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/1216050529_at3%20rf%20transceiver%20chipset_datasheet.pdf).
58. Nordic Semiconductor. *nRF24L01 Product specification*. 2007 [cited 2011 4/6]; Available from: [http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download\\_resource/8041/1/45586779](http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download_resource/8041/1/45586779).
59. Dynastream Innovations Inc. *Multi-Channel Design Considerations*. 2011 [cited 2011 24/5]; Rev. 1.0:[Available from: [http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/ANT\\_AN15\\_Multi\\_Channel\\_Design\\_Considerations.pdf](http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/ANT_AN15_Multi_Channel_Design_Considerations.pdf).
60. Adrio Communications Ltd. *WiFi / WLAN channels, frequencies and bandwidths*. [cited 2011 24/5]; Available from: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/80211-channels-number-frequencies-bandwidth.php>.
61. Dynastream Innovations Inc. *ANT Message Protocol and Usage*. 2010 [cited 2011 24/5]; Available from: [http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/1204662412\\_ant%20message%20protocol%20and%20usage.pdf](http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/1204662412_ant%20message%20protocol%20and%20usage.pdf).
62. Dynastream Innovations Inc. *ANTware 2, Software*. 2010 [cited 2011 5/6]; v.3.0:[Available from: [http://www.thisisant.com/images/Resources/ANTware\\_II.zip](http://www.thisisant.com/images/Resources/ANTware_II.zip).
63. Jones, B.L. *What is C#?* 2001 [cited 2011 20/5]; Available from: <http://www.developer.com/net/asp/article.php/922211/What-is-C.htm>.
64. Panasonic. *Lithium Handbook, Specifications CR2032*. 2005 [cited 2011 11/6]; Available from: [http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic\\_Lithium\\_CR2032\\_CR2330.pdf](http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_Lithium_CR2032_CR2330.pdf).
65. Hogia AB. *Bilde, Huvud*. [cited 2011 12/6]; Available from: <http://www.multimedia.skolverket.se/scripts/objectinfo/objectinfo.asp?i=330210>.

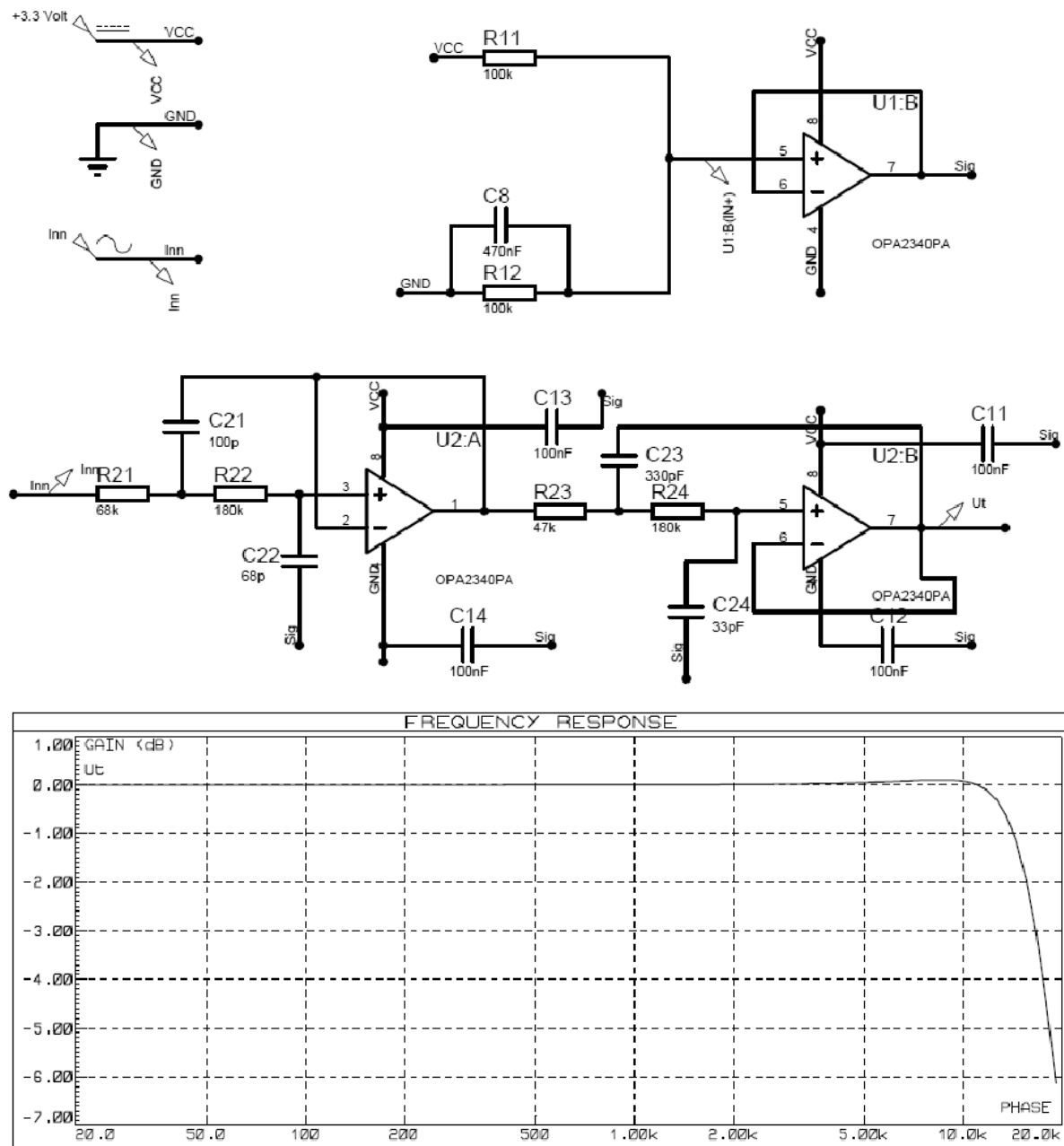
## 13 Vedlegg

### 13.1 Analog krets – Antifoldningsfilter, 16 kHz



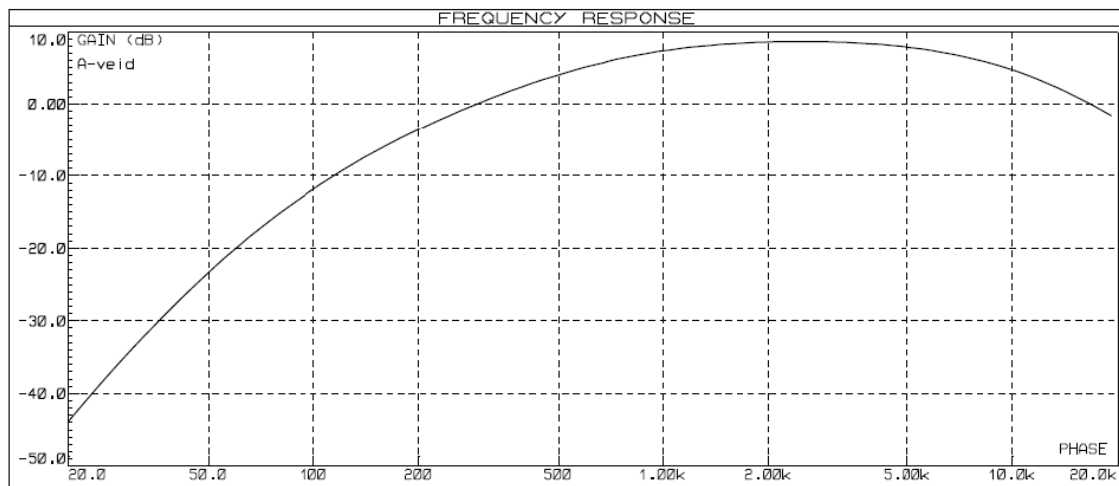
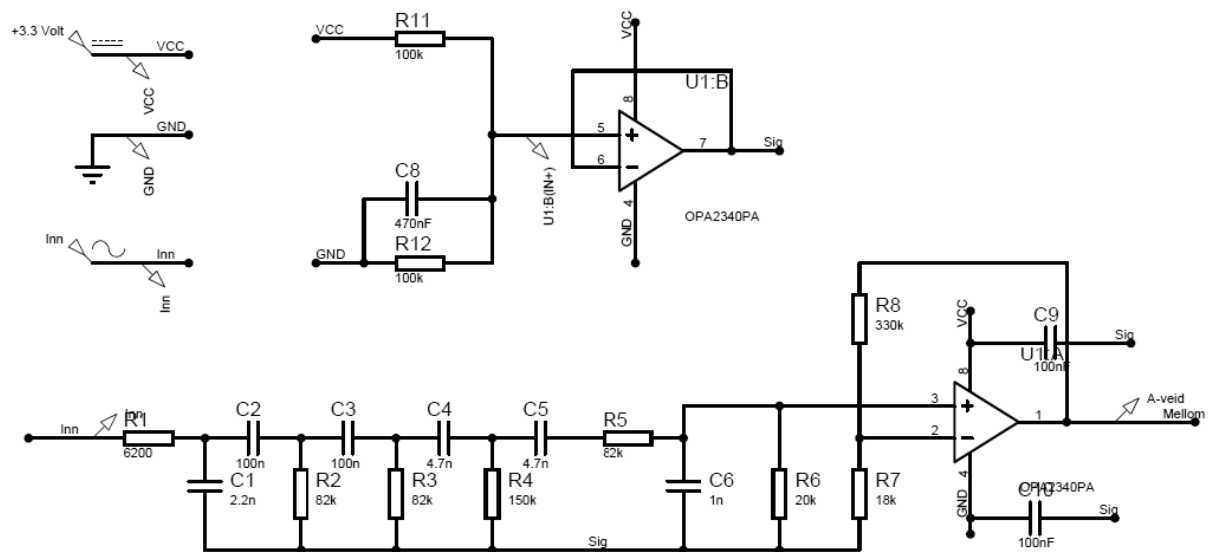
Figur 43: Filterdesign og simulert frekvensrespons antifoldningsfilter, 16 kHz

13.2 Analog krets – Antifoldningsfilter, 32 kHz



Figur 44: Filterdesign og simulert frekvensrespons antifoldningsfilter, 32 kHz

### 13.3 Analog krets – A-veiefilteret



Figur 45: Filterdesign og simulert frekvensrespons A-veiefilteret

**13.4 Koeffisienter til A-veiefilter**

Tabell 16: Koeffisienter til digitalt A-veiefilter

| Koeffisient | Verdi           |
|-------------|-----------------|
| (1,1)       | 1.00            |
| (1,2)       | -2.00           |
| (1,3)       | 1.00            |
| (1,4)       | -1.84398492     |
| (1,5)       | 0.84681175      |
| (1,11)      | 9.22699169e-001 |
| (2,1)       | 1.00            |
| (2,2)       | -2.00           |
| (2,3)       | 1.00            |
| (2,4)       | 0.04486793      |
| (2,5)       | 0.00050328      |
| (2,6)       | 1.00            |
| (2,7)       | 0.50            |
| (2,8)       | 0.0625          |
| (2,9)       | -1.99192712     |
| (2,10)      | 0.99194341      |
| (2,11)      | 6.70191746e-001 |

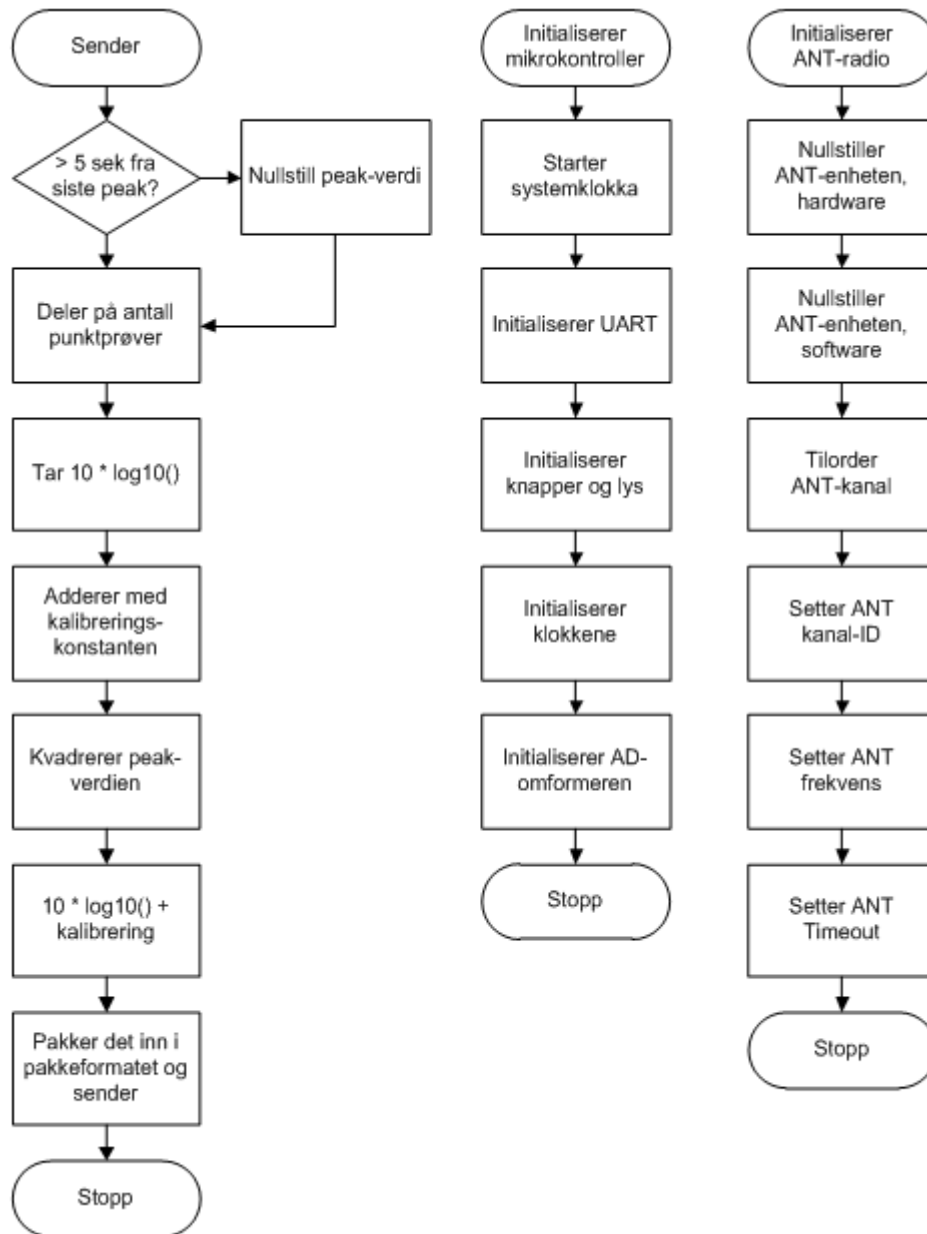


### 13.5 Koeffisienter til høypassfilteret

Tabell 17: Koeffisienter til digitalt høypassfilter

| Koeffisient | Verdi            |
|-------------|------------------|
| (a1)        | -1,988192 * 1024 |
| (a2)        | 0,988288 * 1024  |
| (b0)        | 0,99412 * 1024   |
| (b1)        | -1,98824 * 1024  |
| (b2)        | 0,99412 * 1024   |

13.6 Flytskjema for mikrokontrolleren



Figur 46: Flytskjema for mikrokontrolleren

## 13.7 Vedlegg i Zip-fil

### 13.7.1 Datablad om Knowles FG serie

Vedlagt som PDF-fil

### 13.7.2 Program sensor

Disse filene er vedlagt:

- Main.c
- Func.h
- Gpio.c
- Gpio.h
- Uart.c
- Uart.h
- Timer16.c
- Timer16.h
- Cr\_startup\_lpc11.c
- Driver\_config.h

Av disse så er det gjort minimale forandringer av undertegnede i Timer16.c, Timer16.h, cr\_startup\_lpc11.c og Driver\_config.h.

### 13.7.3 Program Master

Disse filene er vedlagt:

- ANTChannelPanel.xaml.cs
- ANTChannelPanel.xaml
- GraphForm2.Designer.cs
- GraphForm2.cs
- Status.Designer.cd
- Status.cs
- ChannelProfile.cs
- Install

De andre filene som ikke er lagt med, og som tilhører programmet er lisensiert, og siden det ikke er gjort store forandringer på disse i løpet av prosjektet, så vil ikke disse bli vedlagt. Mappa med *Install* inneholder installeringsfiler for programmet. En forutsetning for bruk av dette er at drivere til ANT-enheten er installert, og at en ANT-enhet er koblet til.

### 13.7.4 Program Slave

Disse filene er vedlagt:

- MessagingPanel.xaml.cs
- ChannelProfile.cs
- Install

De andre filene som ikke er lagt med, og som tilhører programmet er lisensiert, og siden det ikke er gjort store forandringer på disse i løpet av prosjektet, så vil ikke disse bli vedlagt. Mappa med *Install* inneholder installeringsfiler for programmet. En forutsetning for bruk av dette er at drivere til ANT-enheten er installert, og at en ANT-enhet er koblet til.

### 13.7.5 Matlabkode digitale filtre

Disse filene er vedlagt:

- Test\_tidsfilter\_variabel.m
- Digitalt\_filter.m

Simuleringer av digitale filtre i kapittel 5 er lagd av disse, eller av små forandringer av disse filene.

### 13.7.6 Framdriftsplan

Vedlagt som PDF-fil

### 13.7.7 Figurer / Bilder

Disse filene er vedlagt:

- Alle figurene i rapporten
- Alle formlene i rapporten
- Et bilde av lokalet hvor testene på rekkevidde foregikk
- Et bilde av hvert filter, og et med begge filtrene
- Enkelte skjermbilder av oscilloskopet for verifisering av mikrokontrolleren

### 13.7.8 Frekvensrespons

- Analoge filteret
  - o Simulert A-veiefilter viser verdiene til det simulerte filteret før det ble loddet opp
  - o Frekvensrespons oppkoblet filter viser frekvensresponsen til kun de to analoge filtrene som ble målt med en spenningsgenerator og avlest på et oscilloskop
- Systemet
  - o Frekvensrespons, 100 dB viser frekvensresponsen til de to systemene med 16 kHz og 32 kHz punktprøvningsfrekvens ved et lydtrykk på ca 100 dB A-vektet.
  - o Frekvensrespons\_Fs16kHz viser støygulvet og frekvensresponsen til 16 kHz filteret med forskjellig påtrykt lydtrykk.
  - o Frekvensrespons\_Fs32kHz viser støygulvet og frekvensresponsen til 32 kHz filteret med forskjellig påtrykt lydtrykk

### 13.7.9 Rekkevidde

- Resultater inneholder de viktigste resultatene fra måleserien
- Logg inneholder alle tekstfilene som mottakeren har blitt programmert til å skrive. Disse filene her har blitt modifisert slik at de også viser hvilke pakker til hvilken enhet som kom fram for å kunne kontrollere om pakketap forekom i skur eller i et tilfeldig mønster.

### 13.7.10 Masterkontrakten

Masterkontrakten er vedlagt.

# Distribuert lydnivåmåling