

# Referansemålinger av frekvensresponsen til høytalerelementer med ulik form

**Joakim Myren**

Elektronisk systemdesign og innovasjon  
Innlevert: juli 2014  
Hovedveileder: Peter Svensson, IET

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon



## Prosjektbeskrivelse

<b>Tittel:</b>	Referansemålinger av frekvensresponsen til høytalerelementer med ulik form
<b>English title:</b>	Reference Measurements of the Frequency Response for Loudspeaker Elements of various Shapes
<b>Student:</b>	Joakim Myren, IET, NTNU
<b>Hovedveileder:</b>	Professor Peter Svensson, IET, NTNU
<b>Emnekode:</b>	TTT4900
<b>Emnenavn:</b>	Signalbehandling og kommunikasjon, masteroppgave
<b>Prosjektets varighet:</b>	31. januar–18. juli 2014

## Problemstilling

En høytalers frekvensrespons påvirkes i sterk grad av høytalerkassens størrelse og form og høytalerelementets form og egenskaper. Datasimuleringsmetoder er fortsatt under utvikling for å beregne slike frekvensresponsen over et stort frekvensområde. Alle datasimuleringsmetoder krever dog sammenligninger med målinger som må gjøres under svært kontrollerte former.

Dette prosjektet skal gjennomføre en serie med nøyaktig kontrollerte målinger hva gjelder signal/støy-forhold, uønskede refleksjoner og geometrisk presisjon. En fast høytalerkasse, med utskiftbare frontplater, kan benyttes for å studere forskjellige høytalerelementformer, og usikkerheten i resultatene skal kvantifiseres. Sammenligning med numeriske beregninger kan gjøres for noen av de målte eksemplene.



## Abstract

The purpose with this master thesis has been to look deeper into the frequency response of a loudspeaker with replaceable front panels. A wooden loudspeaker enclosure with replaceable aluminium front panels has been produced and used in measurements in an anechoic chamber.

A series of accurate and controlled measurements of impulse responses have been made. These measurements have been used to calculate the frequency responses of the different front panels mounted on the loudspeaker enclosure. Measurements have been done with the software WinMLS, before being analyzed in Matlab.

Measured frequency responses have been compared to simulated frequency responses. Simulations have been done in EDBtoolbox, a toolbox for Matlab. Uncertainty in measurements and deviations between measurements and simulations have been calculated and shown graphically.

Measuring in an anechoic chamber has been challenging, regarding realizing a series of accurate and controlled measurements. The deviations between frequency responses from two repeated measurements have sometimes been large.

Comparisons have shown that the measurements and simulations in varying degrees correspond to each other. The geometrical precision of the measurements seem to have been too inaccurate. The signal-to-noise ratio of the measurements has been satisfying.



## Sammendrag

Formålet med masteroppgaven har vært å se nærmere på frekvensresponsen til en høyttalerkasse med utskiftbare frontplater. En høyttalerkasse laget av treplater med utskiftbare frontplater i aluminium har blitt realisert og benyttet i målinger i et ekkofritt rom.

Det har blitt utført en serie med nøyaktige og kontrollerte målinger av impulsresponser for å kunne beregne frekvensresponsen til de ulike frontplatene påmontert høyttalerkassen. Målingene er gjort ved hjelp av programvaren WinMLS, før de deretter er analysert i Matlab.

Målte frekvensresponser er sammenliknet med simulerte frekvensresponser. Simuleringene er utført i EDBtoolbox, en forskningsbasert programpakke for Matlab. Usikkerheten i målingene samt variasjonene mellom målinger og simuleringer har blitt beregnet og vist grafisk.

Erfaringene fra målingene i ekkofritt rom har vist at det har vært krevende å få å realisert en serie med nøyaktige og kontrollerte målinger. Det er mange aspekter å ta hensyn til for å få til et nøyaktig måleoppsett, som kan dokumenteres godt og etterprøves ved å repetere samme måling. Analyser av avvikene mellom frekvensresponsen for to repeterte målinger i samme punkt på samme frontplate har vist at måleoppsettet ikke var det mest ideelle. Avvikene er til tider store og kan ikke betegnes som svært nøyaktige målinger.

Sammenligninger mellom målinger og simuleringer har vist at målingene i varierende grad samsvarer med simuleringene for de ulike frontplatene. De geometriske presisjonene i målingene har dermed vært noe unøyaktige. Signal/støy-forholdet for målingene har vært tilfredsstillende.

Det har blitt sett nærmere på i hvilken grad frekvensresponsen påvirkes av tidsvinduet i overgangen fra tidsdomenet til frekvensdomenet. I tillegg har det blitt utprøvd ulike sweep-lengder for å analysere dens påvirkning på målinger og måleresultat.





## Forord

Denne individuelle masteroppgaven er utført våren 2014 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Masteroppgaven startet 31. januar 2014 og ble levert 18. juli 2014. Masteroppgaven er den obligatoriske «diplomoppgaven» i 5. klasse på toårig masterutdanning i elektronikk, studieretning signalbehandling, akustikk og media. Oppgaven vektet 30 studiepoeng.

Veileder for masteroppgaven har vært professor i akustikk Peter Svensson ved Institutt for elektronikk og telekommunikasjon (IET) ved NTNU.

Jeg vil takke Peter Svensson for god dialog og god hjelp underveis i masteroppgaven. Samtidig vil jeg takke Tim Cato Netland for praktisk hjelp i forbindelse med målinger i ekkofritt rom.

Trondheim, 18. juli 2014

Joakim Myren



# Innhold

<b>Innhold</b>	<b>vii</b>
<b>Figurer</b>	<b>xi</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xv</b>
<b>Akronymer</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Frekvensresponsen til høytalere . . . . .	1
1.2 Problemstilling og avgrensning . . . . .	1
1.3 Rapportens struktur . . . . .	1
<b>2 Teori</b>	<b>3</b>
2.1 Sirkulært stempel i uendelig baffel . . . . .	3
2.2 Resiprositetsprinsippet . . . . .	4
2.3 Høytalerkassens og høytalerelementets innvirkning på frekvensresponsen	6
2.4 Oppsett for å måle impulsresponsen til høytalere . . . . .	7
2.5 Eliminere mikrofonens innvirkning på frekvensresponsen . . . . .	8
<b>3 Høytalerkasse og frontplater</b>	<b>11</b>
3.1 Design og produksjon av høytalerkasse . . . . .	11
3.1.1 Design av høytalerkasse . . . . .	11
3.1.2 Materialvalg til høytalerkasse . . . . .	11
3.1.3 Produksjon av høytalerkasse . . . . .	11
3.2 Design og produksjon av frontplater . . . . .	13
3.2.1 Design av frontplater . . . . .	13
3.2.2 Materialvalg til frontplater . . . . .	15
3.2.3 Produksjon av frontplater . . . . .	15
3.3 Montering av frontplater på høytalerkasse . . . . .	16
<b>4 Målinger og simuleringer</b>	<b>17</b>
4.1 Målinger i ekkofritt rom . . . . .	17

4.1.1	Måleoppsett i ekkofritt rom . . . . .	17
4.1.2	Utstyrsliste for målinger . . . . .	18
4.1.3	Arbeidsrutine for nøyaktig måleoppsett . . . . .	19
4.1.4	Mikrofonplasseringer på frontplater og målepinne . . . . .	19
4.1.5	Målinger i ekkofritt rom . . . . .	20
4.1.6	Målepinne for fritt signal-målinger . . . . .	21
4.1.7	Programvare og maskinvare for målinger . . . . .	22
4.2	Simuleringer i EDBtoolbox . . . . .	25
4.2.1	Kort om EDBtoolbox . . . . .	25
4.2.2	Simuleringsparametere i EDBtoolbox . . . . .	25
4.2.3	Simuleringsmodell for målepinne . . . . .	26
4.2.4	Simuleringsmodeller for høytalerkasse med frontplate . . . . .	26
4.3	Resultater fra målinger og simuleringer . . . . .	28
4.3.1	Tidsvinduetts innvirkning på frekvensresponsen . . . . .	28
4.3.2	Sweep-lengdens innvirkning på målinger . . . . .	31
4.3.3	Signal/støy-forhold til målinger . . . . .	33
4.3.4	Nøyaktighet ved gjentakelse av samme måling . . . . .	34
4.3.5	Frontplatenes innvirkning på frekvensresponsen . . . . .	36
4.3.6	Målepinnens innvirkning på frekvensresponsen til simuleringer . . . . .	36
4.3.7	Sammenligning av målinger og simuleringer . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Avslutning</b>	<b>47</b>
5.1	Diskusjon . . . . .	47
5.2	Videre arbeid . . . . .	48
5.3	Konklusjon . . . . .	48
	<b>Referanseliste</b>	<b>49</b>
	<b>Vedlegg</b>	
<b>A</b>	<b>Resultater fra målinger og simuleringer</b>	<b>I</b>
A.1	Målinger og simuleringer med frontplate 0 . . . . .	I
A.2	Målinger og simuleringer med frontplate A . . . . .	VI
A.3	Målinger og simuleringer med frontplate B . . . . .	IX
A.4	Målinger og simuleringer med frontplate C . . . . .	XII
<b>B</b>	<b>Oversikt over filer i filarkiv</b>	<b>XVII</b>
<b>C</b>	<b>Mottakerposisjoner</b>	<b>XIX</b>
<b>D</b>	<b>Simuleringsmodeller</b>	<b>XXI</b>
D.1	Simuleringsmodell for målepinne . . . . .	XXI
D.2	Simuleringsmodell for frontplate 0 . . . . .	XXI
D.3	Simuleringsmodell for frontplate A . . . . .	XXII

D.4	Simuleringsmodell for frontplate B . . . . .	XXII
D.5	Simuleringsmodell for frontplate C . . . . .	XXII
<b>E</b>	<b>Matlab-koder</b>	<b>XXIII</b>
E.1	Matlab-koder for målinger . . . . .	XXIII
E.1.1	Opprettelse av «workspace» for alle målinger . . . . .	XXIII
E.2	Matlab-koder for simuleringer . . . . .	XXXI
E.2.1	Eksempel på simuleringsoppsett . . . . .	XXXI
E.2.2	Opprettelse av «workspace» for alle simuleringer . . . . .	XXXII
E.3	Matlab-koder for presentasjon av målinger og simuleringer . . . . .	XXXV
E.3.1	Nøyaktighet ved gjentakende målinger . . . . .	XXXV
E.3.2	Målepinnens innvirkning på frekvensresponsen til simuleringer	XXXVII
E.3.3	Sammenligninger av målinger og simuleringer . . . . .	XL



# Figurer

2.1	Høytalerelement plassert i en uendelig baffel og i en lukket kasse . . . . .	3
2.2	Akustisk resiprositet med ombytte av kilde og mottaker . . . . .	4
2.3	Resiprositet og sammenhengen mellom mekaniske krefter og lydutstråling	5
2.4	Blokkskjematisk fremstilling av resiprositetsprinsippet . . . . .	5
2.5	Frekvensresponsen til to ulike høytalerelementer . . . . .	6
2.6	Blokkskjema av måleoppsettet . . . . .	7
3.1	Foto av høytalerkassen med frontplate A påmontert . . . . .	12
3.2	3D-skisse av høytalerkassen . . . . .	12
3.3	3D-skisse av frontplate 0 . . . . .	13
3.4	3D-skisse av frontplate A . . . . .	14
3.5	3D-skisse av frontplate B . . . . .	14
3.6	3D-skisser av frontplate C . . . . .	15
3.7	Foto av frontplater . . . . .	16
4.1	Skisse av måleoppsett i ekkofritt rom . . . . .	17
4.2	Blokkskjema av måleoppsettet . . . . .	18
4.3	Omriss av frontplater med mikrofonplasseringer . . . . .	20
4.4	Foto av måleoppsett i ekkofritt rom . . . . .	20
4.5	Foto av «målepinne» montert på stativ . . . . .	21
4.6	Innstillinger i WinMLS - valg av signaltype . . . . .	22
4.7	Innstillinger i WinMLS - valg av utgangsnivå . . . . .	23
4.8	Innstillinger i WinMLS - valg av sweeptype . . . . .	23
4.9	WinMLS - informasjon fra måleopptak . . . . .	24
4.10	Skjerm bilde fra LynxTWO-C Mixer . . . . .	24
4.11	Simuleringsmodell for målepinne . . . . .	26
4.12	Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate 0 . . . . .	26
4.13	Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate A . . . . .	27
4.14	Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate B . . . . .	27
4.15	Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate C . . . . .	28

4.16	Impulsresponser - utdraget viser 2 ms før peak-nivå til 20 ms etter peak-nivå. Øverst: Impulsrespons med høyttalerkasse påmontert frontplate C - mottakerposisjon 0. Nederst: Impulsrespons uten høyttalerkasse - mottakerposisjon 0. . . . .	29
4.17	Innvirkningen på frekvensresponsen med tidsvindu 1 ms og 2 ms før peak-nivå . . . . .	29
4.18	Innvirkningen på frekvensresponsen med tidsvindu 1 ms, 3 ms og 7 ms etter peak-nivå . . . . .	30
4.19	Frekvensresponsen til frontplate 0 for målinger med ulik sweep-lengde . . . . .	31
4.20	Frekvensresponsen til frontplate 0 for målinger med ulik sweep-lengde - utdrag fra 18 til 20 kHz . . . . .	32
4.21	Avviket til frekvensresponsen for gjentakende målinger med samme sweep-lengde . . . . .	32
4.22	Signal/støy-forhold for målinger med frontplate 0 og A . . . . .	33
4.23	Signal/støy-forhold for målinger med frontplate B og C . . . . .	34
4.24	Avvik mellom to gjentakende målinger med frontplate 0 og A . . . . .	35
4.25	Avvik mellom to gjentakende målinger med frontplate B og C . . . . .	35
4.26	Frontplatenes innvirkning på frekvensresponsen . . . . .	36
4.27	Frekvensresponser til simuleringer med og uten målepinne . . . . .	37
4.28	Avvik mellom simuleringer med og uten målepinne for frontplate 0 og A . . . . .	37
4.29	Avvik mellom simuleringer med og uten målepinne for frontplate B og frontplate C . . . . .	38
4.30	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 0 . . . . .	39
4.31	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 1 . . . . .	40
4.32	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 2 . . . . .	40
4.33	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 0 . . . . .	41
4.34	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 1 . . . . .	41
4.35	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 2 . . . . .	42
4.36	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 0 . . . . .	42
4.37	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 1 . . . . .	43
4.38	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 2 . . . . .	43
4.39	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 0 . . . . .	44
4.40	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 1 . . . . .	44
4.41	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 2 . . . . .	45
A.1	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 3 . . . . .	I
A.2	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 4 . . . . .	II
A.3	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 5 . . . . .	II
A.4	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 6 . . . . .	III
A.5	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 7 . . . . .	III
A.6	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 8 . . . . .	IV
A.7	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 9 . . . . .	IV



A.8	Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 10 . . . . .	V
A.9	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 3 . . . . .	VI
A.10	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 4 . . . . .	VI
A.11	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 5 . . . . .	VII
A.12	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 6 . . . . .	VII
A.13	Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 7 . . . . .	VIII
A.14	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 3 . . . . .	IX
A.15	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 4 . . . . .	IX
A.16	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 5 . . . . .	X
A.17	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 6 . . . . .	X
A.18	Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 7 . . . . .	XI
A.19	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 3 . . . . .	XII
A.20	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 4 . . . . .	XII
A.21	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 5 . . . . .	XIII
A.22	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 6 . . . . .	XIII
A.23	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 7 . . . . .	XIV
A.24	Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 8 . . . . .	XIV



# Tabeller

4.1	Utstysrliste for målinger . . . . .	18
4.2	Parameterinnstillinger for måleoppsettet . . . . .	22
4.3	Simuleringsparametere i EDBtoolbox . . . . .	25
C.1	Plassering av mikrofon på frontplater - mottakerposisjoner . . . . .	XIX



# Akronymer

**GPL** GNU General Public License

**FFT** Fast Fourier transform

**FP** Frontplate

**IET** Institutt for elektronikk og telekommunikasjon

**NTNU** Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

**MEMS** Mikroelektromekaniske systemer

**MP** Målepinne

**SNR** Signal-to-noise ratio



# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Frekvensresponsen til høytalere

En høytales frekvensrespons påvirkes i sterk grad av høytalerkassens størrelse og form og høytalerelementets form og egenskaper. [1] Datasimuleringsmetoder er fortsatt under utvikling for å beregne slike responser over et stort frekvensområde. [2] Alle datasimuleringsmetoder krever likevel sammenligninger med målinger som må gjøres under svært kontrollerte former.

Helt siden 1960-tallet har det blitt gjort omfattende studier av høytalerkassens innvirkning på frekvensresponsen. [1] [3] [4] Det er i mindre grad blitt gjort studier som ser på innvirkningen av høytalerelementets form på frekvensresponsen.

### 1.2 Problemstilling og avgrensning

Denne masteroppgaven ser nærmere på en serie med nøyaktige og kontrollerte målinger med hensyn til signal/støy-forhold, uønskede refleksjoner og geometrisk presisjon.

En høytalerkasse med utskiftbare frontplater har blitt benyttet for å måle impulsresponsen til ulike høytalerelementformer. Impulsresponsene har blitt brukt for å beregne frekvensresponsene.

Deretter er målte frekvensresponser sammenliknet med simulerte frekvensresponser. Usikkerheten i målingene samt variasjonene mellom målinger og simuleringer er vist.

### 1.3 Rapportens struktur

Rapporten er inndelt i fem kapitler. I kapittel 2 blir relevant bakgrunnsteori presentert.

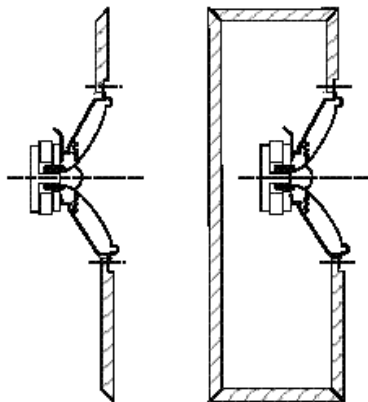
Kapittel 3 tar for seg design og produksjon av en høytalerkasse, «en kube med åpen front», med fire utskiftbare frontplater. Spesifikasjoner og materialvalg er dokumentert.

Måleresultater og simuleringer blir presentert i kapittel 4. Oppgaven avsluttes med diskusjon, videre arbeid og konklusjon i kapittel 5.



### 2.1 Sirkulært stempel i uendelig baffel

Gitt at en lydkilde er montert på, eller plassert svært tett inntil, en plan og stiv overflate, og at overflatens dimensjoner er mye større enn bølgelengden til lyden, vil overflaten kunne bli sett på som en «uendelig» størrelse. Dette betegnes som en «uendelig baffel» i akustikkterminologien. [5] [6] Et høytalerelement som er plassert i et tett hull, eller i en stor vegg, kan ses på som et stivt stempel som er plassert i en *uendelig baffel*. [7]



**Figur 2.1:** Høytalerelement plassert i en uendelig baffel og i en lukket kasse

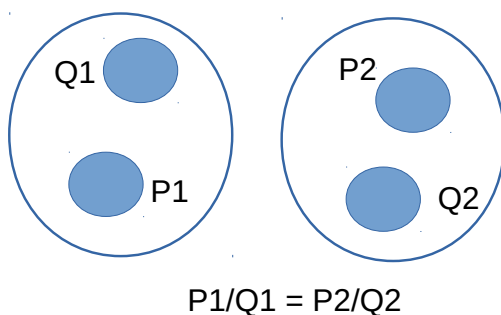
I figur 2.1 [8] er det en skisse av et høytalerelement som er plassert i en uendelig baffel og i en lukket kasse. Fordelen ved en uendelig baffel er at lufta foran og bak høytalerelementet er separert fra hverandre, dermed unngår man at trykkforskjellene foran og bak kansellerer hverandre. Det er av praktiske hensyn vanskelig å få til en uendelig baffel, siden veggene minimum må være en halv bølgelengde for å unngå

for store kanselleringer av lyden. Dermed er det mer hensiktsmessig å innkapsle høytalerelementet i en lukket kasse, *trykkammer*, for å oppnå tilnærmet samme effekt som i en uendelig baffel. [7]

Ved å plassere et høytalerelement i en lukket kasse vil ofte den mekaniske resonansfrekvensen til høytalerelementet øke noe. Den totale stivheten til høytalerelementet har økt som følge av at lufta bak elementet i den lukkede kassen reduserer bevegelseheten til høytalerelementet. Når stivheten til høytalerelementet økes, vil også den mekaniske resonansfrekvensen økes. [7]

## 2.2 Resiprositetsprinsippet

Resiprositet betegner en gjensidighet i et lineært elastisk system; hvis frekvensresponsen for et gitt punkt skyldes påtrykk i et annet punkt, vil responsen være upåvirket av et ombytte av kilde- og mottakerpunkt. [5]

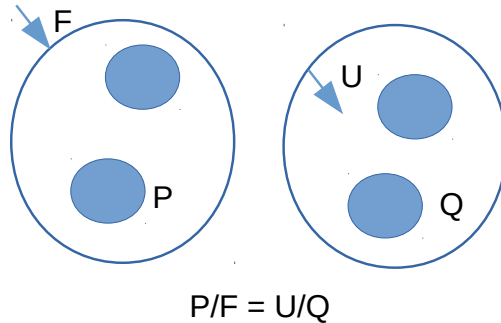


**Figur 2.2:** Akustisk resiprositet med ombytte av kilde og mottaker

Resiprositetsprinsippet innen akustikk forklarer hvorfor vi kan bytte om kilde og mottaker - og likevel oppnå samme resultat. I figur 2.2 (gjengitt fra [5]) er det en skisse med ombytte av kilde og mottaker. Resiprositetsprinsippet er nyttig både i teoretiske beregninger og i praktiske sammenhenger. Når man skal beregne et systems overføringsfunksjon, kan man benytte seg av resiprositetsprinsippet for å kunne gjøre forenklinger. Dette er spesielt nyttig når man skal beregne en overføringsfunksjon basert på fysiske målinger. [5]

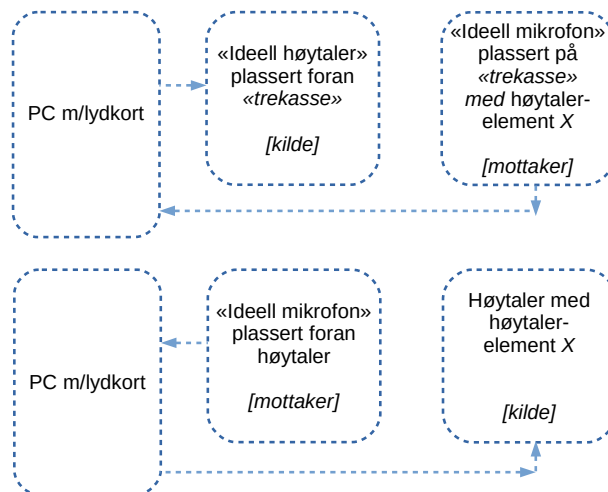
Sammenhengen mellom mekaniske krefter og lydstråling er en viktig anvendelse av resiprositetsprinsippet. Denne sammenhengen er vist i figur 2.3 (gjengitt fra [5]). Frekvensresponsen for lydstrålingen fra en vibrerende struktur for en gitt

egenmode<sup>1</sup> vil være lik frekvensresponsen for innfallende lyd av samme mode<sup>2</sup> på den samme strukturen. [5] Ved anvendelse av resiprositetsprinsippet kan man beregne frekvensresponsen til en høytaler ved innfallende lyd på høytalerstrukturen.



**Figur 2.3:** Resiprositet og sammenhengen mellom mekaniske krefter og lydutstråling

I figur 2.4 er det vist en blokkskjematisk fremstilling av resiprositetsprinsippet. De to systemene er teoretisk identiske, og de viser hvordan man kan bytte om kilde og mottaker for å oppnå samme resultat.



**Figur 2.4:** Blokkskjematisk fremstilling av resiprositetsprinsippet

<sup>1</sup>**Egenmode:** Stående bølgemønster, det vil si lydtrykk som funksjon av posisjon ved de enkelte egenfrekvensene. [9]

<sup>2</sup>**Mode:** Lydtrykk som funksjon av posisjon ved en gitt frekvens. [9]

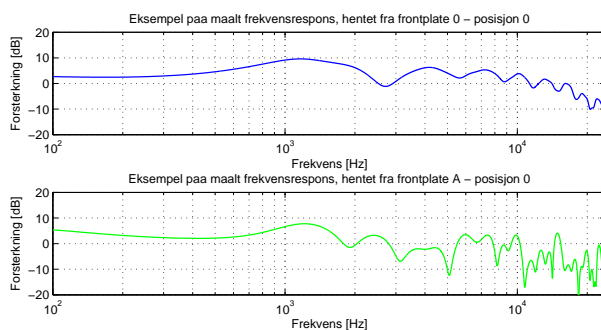
I det øverste systemet er det en ideell høyttaler, «målehøyttaler», som representerer kilden. Målehøyttaleren sender ut et sweep-signal<sup>3</sup> av typen eksponentielt (rosa spektrum) til en «trekasse» hvor fronten er formet som et høyttalerelement  $X$ . På høyttalerelementet er det plassert en ideell mikrofon som «mottar» sweep-signalet. I programvaren blir mikrofonsignalet, impulsresponsen, lagret. Med andre ord fungerer «trekassen» med mikrofon som en mottaker. Systemet styres fra programvaren i datamaskinen, eksempel på programvare som kan benyttes for slike målinger, er WinMLS. [10] I dette systemet er altså «trekassen» en «statisk gjenstand» som simulerer høyttaleren.

I det nederste systemet er kilde og mottaker byttet om. I dette systemet er kilden en høyttaler med høyttalerelement  $X$ . Høyttaleren sender ut et sweep-signal til en mikrofon, mottakeren. I programvaren blir mikrofonsignalet, impulsresponsen, lagret.

Ved praktiske målinger er det øverste systemet mye brukt. Fordelen med dette systemet er at man kan beregne frekvensresponsen til en *ønsket* høyttaler kun ved bruk av en «gjenstand» formet som den *ønskede* høyttaleren. Dette er kostnadsbesparende siden man ikke behøver å designe og bygge en *ekte* høyttaler.

### 2.3 Høyttalerkassens og høyttalerelementets innvirkning på frekvensresponsen

En høyttalers frekvensrespons påvirkes i sterk grad av høyttalerkassens størrelse og form og høyttalerelementets form og egenskaper.



**Figur 2.5:** Frekvensresponsen til to ulike høyttalerelementer

I figur 2.5 er det vist frekvensresponsen til to ulike høyttalerelementer. Den øverste frekvensresponsen er hentet fra en måling med en høyttalerkasse på 22 cm x 22 cm x 22

<sup>3</sup>**Sweep-signal:** Lydsignal med økende frekvens.

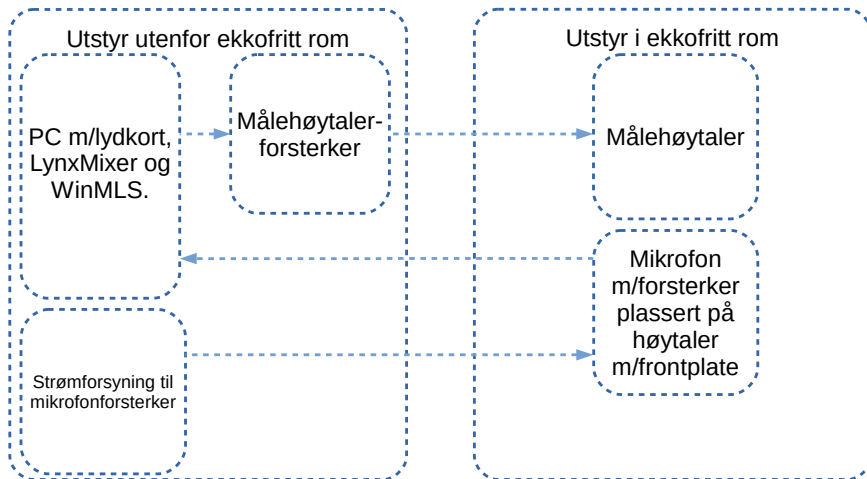
cm med påmontert finérplate på 2 cm (frontplate 0), slik at kassens totale dybde blir 24 cm. Den nederste frekvensresponsen er hentet fra en måling med en høytalerkasse på 22 cm x 22 cm x 22 cm med påmontert frontplate som har geometrisk form som et stempel. Stempelet med diameter 150 mm og dybde 40 mm er plassert i sentrum på frontplaten.

Vi ser tydelig at høytalerelementets form har sterk innvirkning på frekvensresponsen.

## 2.4 Oppsett for å måle impulsresponsen til høytalere

Resiprositetsprinsippet er velegnet å anvende når man skal gjøre målinger av impulsresponsen til høytalere. Figur 2.6 viser en blokkskjematisk fremstilling av et måleoppsett som kan benyttes for å måle impulsresponsen til en høytaler.

For å unngå uønskede refleksjoner fra omgivelsene er alt utstyr som ikke er nødvendig å ha i ekkofritt rom, plassert i «kontrollrommet» utenfor ekkofritt rom. De stiplede linjene angir kabelføring og signalflyten i systemet.



**Figur 2.6:** Blokkskjema av måleoppsettet

Blokkskjemaet i figur 2.6 er en utvidet versjon av det øverste systemet vist i figur 2.4. Nøyaktighet og etterprøvbarehet er viktige stikkord for å kunne få målt nøyaktige impulsresponsen, og dermed kunne beregne nøyaktige frekvensresponsen. Mest mulig ideelle komponenter er ønskelig å benytte i måleoppsettet. I tillegg må man dokumentere godt under hvilke forutsetninger målingene har blitt utført.

Avstanden mellom målehøytaler og høytalerkasse med frontplate må være konstant og mest mulig uendret under alle målinger. I tillegg må senter på målehøytaler og senter på høytalerkassen stå vinkelrett på hverandre, og dermed i samme høyde over gulvnivå i et ekkofritt rom.

Mikroelektromekaniske systemer (MEMS)-mikrofoner er velegnet til bruk for å måle impulsresponsen til høytalere. Størrelsesmessig er de svært små, gjerne 5 mm x 5 mm x 2 mm, i tillegg er frekvensresponsen ganske ideell. Målekondensatormikrofoner har frekvensrespons som er mer ideelle.

Frekvensresponsen for en MEMS-mikrofon av typen Knowles SPM0408LE5H-TB er nokså ideell. I frekvensområdet 100 Hz til 1 kHz er frekvensresponsen i fritt felt i området fra -2 til 0 dB. I frekvensområdet 1 til 10 kHz er frekvensresponsen i fritt felt i området fra 0 til 2 dB. [11]

En mikrofon av denne typen vil gjøre det mulig å kunne beregne frekvensresponsen svært nøyaktig for et bestemt punkt på høytalerkassens frontplate. Mikrofonen festes ved hjelp av eksempelvis voks på det bestemte punktet på frontplaten.

## 2.5 Eliminere mikrofonens innvirkning på frekvensresponsen

Et lydopptak vil påvirkes av mikrofonens egen frekvensrespons ettersom en mikrofon ikke er en ideell komponent. Måleoppsettet, systemet, i figur 2.6 vil bli en kaskadekobling av ulike blokker i frekvensdomenet.

$$H(z)_{\text{SYSTEM}} = H(z)_{\text{MHF}} \cdot H(z)_{\text{MH}} \cdot H(z)_{\text{HK}} \cdot H(z)_{\text{M}} \cdot H(z)_{\text{MF}} \quad (2.1)$$

Overføringsfunksjonen til dette systemet er vist i ligning 2.1. Forkortelsene til de ulike blokkene, leddene, i ligningen er målehøytalerforsterker (MHF), målehøytaler (MH), høytalerkasse (HK), mikrofon (M) og mikrofonforsterker (MF).

I et ideelt tilfelle vil  $H(z)_{\text{MHF}} = 1$ ,  $H(z)_{\text{MH}} = 1$ ,  $H(z)_{\text{M}} = 1$  og  $H(z)_{\text{MF}} = 1$ . Dette gir følgende forenklete ligning:

$$H(z)_{\text{SYSTEM}} = H(z)_{\text{HK}} \quad (2.2)$$

Den ideelle ligningen i 2.2 er naturlig nok ikke praktisk mulig å realisere. Til tross for at målehøytalerforsterkeren, målehøytaleren, mikrofonen og mikrofonforsterkeren skal være mest mulig ideelle komponenter, er det likevel ønskelig å eliminere alle disse faktorene. Dette skyldes at de tilfører systemet en viss forsterkning, samt at den målte frekvensresponsen til høytalerkassen vil bli mer nøyaktig.

For å eliminere mikrofonens innvirkning på frekvensresponsen må man utføre to ulike målinger. I denne rapporten betegnes disse som «signal» og «fritt signal». Det som kjennetegner signal-målinger, er at mikrofonen er plassert på et bestemt punkt på høytalerkassen. Ved fritt signal-målinger er mikrofonen plassert på det samme punktet, men uten at høytalerkassen er til stede.

$$H(z)_{\text{SIGNAL}} = H(z)_{\text{MHF}} \cdot H(z)_{\text{MH}} \cdot H(z)_{\text{HK}} \cdot H(z)_{\text{M}} \cdot H(z)_{\text{MF}} \quad (2.3)$$

I ligning 2.3 ser vi overføringsfunksjonen for signal-målinger.

$$H(z)_{\text{FRITT SIGNAL}} = H(z)_{\text{MHF}} \cdot H(z)_{\text{MH}} \cdot H(z)_{\text{M}} \cdot H(z)_{\text{MF}} \quad (2.4)$$

I ligning 2.4 ser vi overføringsfunksjonen for fritt signal-målinger.

Ved å kombinere overføringsfunksjonen for signal- og fritt signal-målingene vil man kunne eliminere mikrofonens innvirkning på frekvensresponsen, samt innvirkningen fra målehøytalerforsterkeren, målehøytaleren, mikrofonen og mikrofonforsterkeren.

$$\frac{H(z)_{\text{SIGNAL}}}{H(z)_{\text{FRITT SIGNAL}}} = \frac{H(z)_{\text{MHF}} \cdot H(z)_{\text{MH}} \cdot H(z)_{\text{HK}} \cdot H(z)_{\text{M}} \cdot H(z)_{\text{MF}}}{H(z)_{\text{MHF}} \cdot H(z)_{\text{MH}} \cdot H(z)_{\text{M}} \cdot H(z)_{\text{MF}}} = H(z)_{\text{HK}} \quad (2.5)$$

I ligning 2.5 ser vi at vi sitter igjen med samme resultat som i det ideelle tilfellet i ligning 2.2, altså  $H(z)_{\text{HK}}$  som er overføringsfunksjonen for høytalerkassen med frontplate.





# Kapittel 3

## Høytalerkasse og frontplater

### 3.1 Design og produksjon av høytalerkasse

#### 3.1.1 Design av høytalerkasse

Høytalerkassen ble designet som «en kube med åpen front». Utskiftbare frontplater «simulerer» høytalerelementet.

Størrelsen til de kvadratiske sideflatene ble valgt til 220 mm x 220 mm. Dette fordi det i fremtiden skal være mulig å produsere frontplater i en 3D-printer. Dimensjonen til høytalerkassen er dermed 220 mm x 220 mm x 220 mm.

#### 3.1.2 Materialvalg til høytalerkasse

Det er flere hensyn å ta når man skal bestemme riktig materiale for å bygge en høytalerkasse. Høytalerkassen må produseres i et stivt materiale som tåler slitasje ved normal bruk. Frontplatene skal skrues av og på, og dette medfører en risiko for at skruehullene kan «ødelegges». Finérplate ble valgt som materiale til høytalerkassen. Det er et slitesterkt materiale som dessuten ikke krever mye arbeid ved produksjon. I tillegg er 20 mm finérplate et rimelig materiale.

På undersiden av høytalerkassen er det montert et metallbeslag, festebrakett, som muliggjør at høytaleren kan skrues fast til et stativ.

#### 3.1.3 Produksjon av høytalerkasse

Høytalerkassen er produsert i 20 mm tykke finérplater av verkstedet ved Institutt for elektronikk og telekommunikasjon (IET). Foto av høytalerkassen med frontplate A påmontert er vist i figur 3.1.

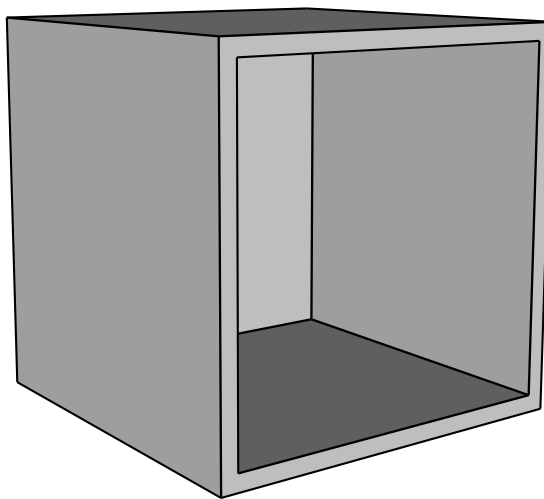
Det ble også produsert en finérplate med dimensjoner 220 mm x 220 mm med tykkelse 20 mm. Denne ble senere benyttet som frontplate 0. I kapittel 3.2 beskrives arbeidet

med design og produksjon av frontplater til høytalerkassen.



**Figur 3.1:** Foto av høytalerkassen med frontplate A påmontert

En 3D-skisse av høytalerkassen er vist i figur 3.2.



**Figur 3.2:** 3D-skisse av høytalerkassen

## 3.2 Design og produksjon av frontplater

### 3.2.1 Design av frontplater

Dimensjonene til høytalerkassen ble bestemt ut fra muligheten for i fremtiden å kunne produsere frontplater i en 3D-printer. Eksempelvis har en 3D-printer av typen Stratasys - uPrint SE Plus maksimale utskriftsdimensjoner på 8" (203 mm) x 8" (203 mm) x 6" (152 mm). [12] Utskriftsdimensjonene til en 3D-printer av denne typen ble brukt som referanse da endelig størrelse på frontplatene ble bestemt.

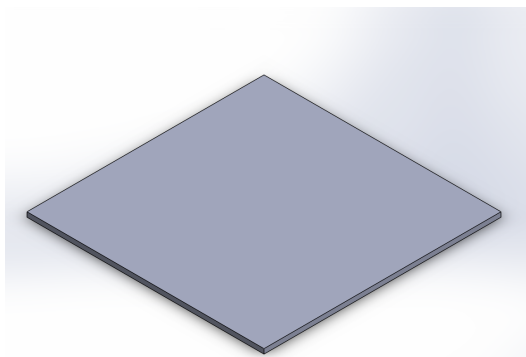
Frontplatenes dimensjoner ble valgt til 195 mm x 195 mm. For å kunne montere frontplatene på høytalerkassen ble det frest ut et 8 mm bredt og 6 mm dypt, nedsenket spor rundt hele frontåpningen.

De indre målene for høytalerkassen setter begrensninger for hvor stor ytre diameter «høytalerelementet» maksimalt kan ha. De indre dimensjonene for bredde og lengde til høytalerkassen er 180 mm x 180 mm, mens dybden er 200 mm. En indre diameter på 150 mm for «høytalerelementet» er en ideell størrelse som gir tilstrekkelig plass for materialtykkelsen til frontplaten. I tillegg vil det gi «luft» mellom frontplate og høytalerkasse.

Det ble skissert ønsket design for totalt fire frontplater; frontplate 0, A, B og C.

#### Design av frontplate 0

Frontplate 0 er en kvadratisk frontplate med sideflater 220 mm, tykkelsen er 20 mm. Frontplate 0 og høytalerkassen er produsert av samme materiale, altså finérplate. En 3D-skisse av frontplate 0 er vist i figur 3.3.

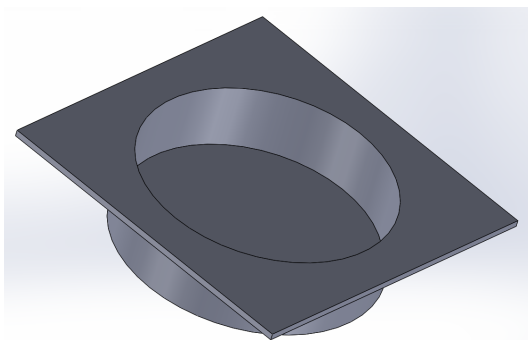


**Figur 3.3:** 3D-skisse av frontplate 0

På baksiden av frontplate 0 er det montert en festebrakett som muliggjør at frontplaten kan monteres på et mikrofonstativ, uten å være montert på selve høyttalerkassen.

### Design av frontplate A

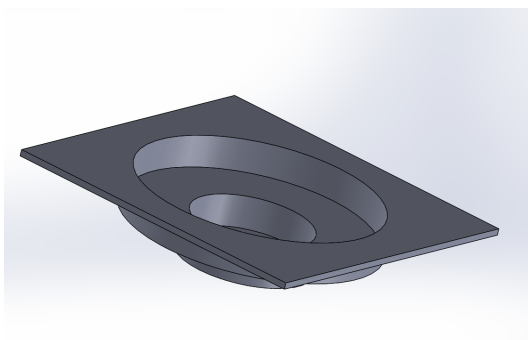
Frontplate A er en kvadratisk frontplate med sideflater på 195 mm, og tykkelsen for hele frontplaten er 4 mm. I midten av frontplaten er det et «stempel» med indre diameter på 150 mm. Stempelet er en «uthuling» som har indre dybde 40 mm. Sideveggene til stempelet har tykkelse 4 mm. En 3D-skisse av frontplate A er vist i figur 3.4.



**Figur 3.4:** 3D-skisse av frontplate A

### Design av frontplate B

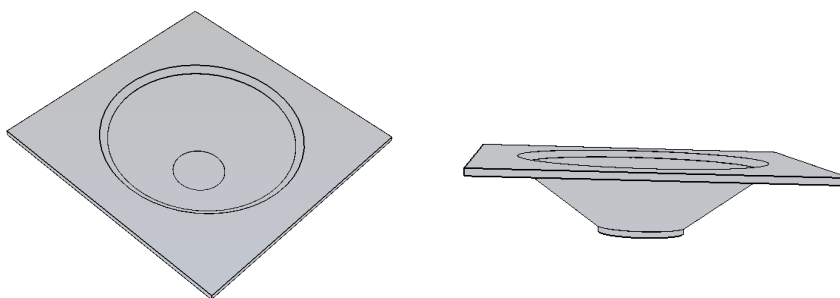
Frontplate B er en kvadratisk frontplate med sideflater på 195 mm og tykkelsen for hele frontplaten er 4 mm. I midten av frontplaten er det et «dobbelstempel». Indre diameter til stempelen er henholdsvis 150 mm og 75 mm. Total indre dybde for frontplate B er 40 mm, hvorav hvert «stempel» har en dybde på 20 mm. En 3D-skisse av frontplate B er vist i figur 3.5.



**Figur 3.5:** 3D-skisse av frontplate B

### Design av frontplate C

Frontplate C er en kvadratisk frontplate med sideflater på 195 mm og tykkelsen for hele frontplaten er 4 mm. I midten av frontplaten er det et «høytalerelement» med konisk form. Den koniske formen har en indre diameter som avtar proporsjonalt fra 150 mm til 40 mm og dybden går fra 0 mm til 40 mm. 3D-skisser av frontplate C er vist i figur 3.6.



**Figur 3.6:** 3D-skisser av frontplate C

#### 3.2.2 Materialvalg til frontplater

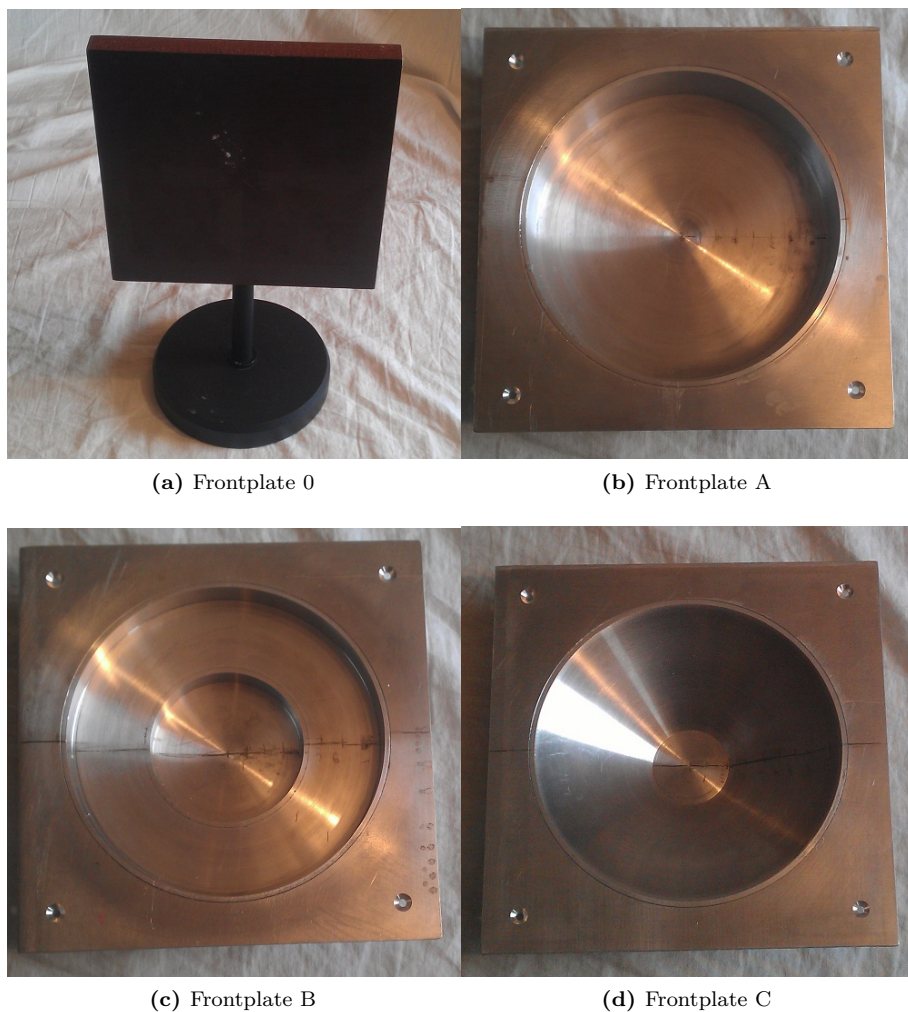
Frontplate A, B og C er ukompliserte geometriske figurer som vil være enkle å produsere i en dreiebenk. En fordel ved å benytte dreiebenk kontra 3D-printer vil være større presisjon i jevne overflater. 3D-modeller vil ha større unøyaktighet med ujevn overflate enn modeller fra dreiebenk.

IET-verkstedet tilbyr plast eller aluminium som materialvalg for frontplate A, B og C. I dialog med verkstedet ble det besluttet å velge aluminium.

#### 3.2.3 Produksjon av frontplater

Det er altså blitt designet og produsert totalt fire frontplater til høytalerkassen. Frontplate 0 er en finérplate, og frontplate A, B og C er designet i 3D-program og produsert i aluminium i en dreiebenk. Det er laget skruehull i hvert hjørne på alle frontplatene for å kunne feste de på høytalerkassen.

Foto av alle frontplatene er vist i figur 3.7. I figur 3.7a er frontplate 0 montert på et stativ som viser hvordan frontplaten kan «stå alene» uten å være påmontert høytalerkassen.



**Figur 3.7:** Foto av frontplater

### 3.3 Montering av frontplater på høytalerkasse

Høytalerkassen fylles med isolasjonsmateriale, hvor vanlig mineralull som Glava er å foretrekke. Frontplatene monteres på høytalerkassen med skruer. Skru hullene og overgangen mellom frontplate og høytalerkassen dekkes til med maskeringsteip.

# Kapittel 4

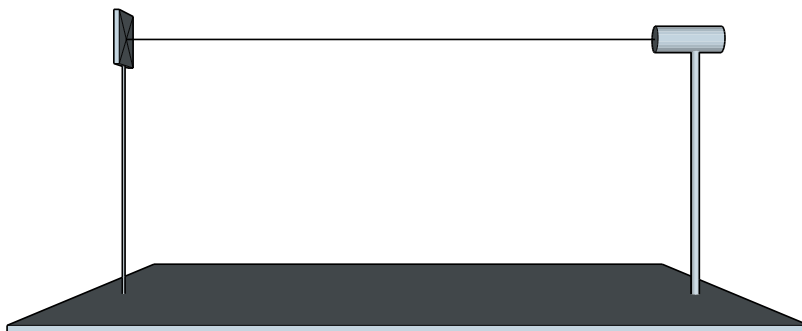
## Målinger og simuleringer

### 4.1 Målinger i ekkofritt rom

Målingene er utført ved NTNU våren 2014. IET har et eget ekkofritt rom som har blitt benyttet for alle målingene. Usikkerheten i måleresultatene har blitt kvantifisert.

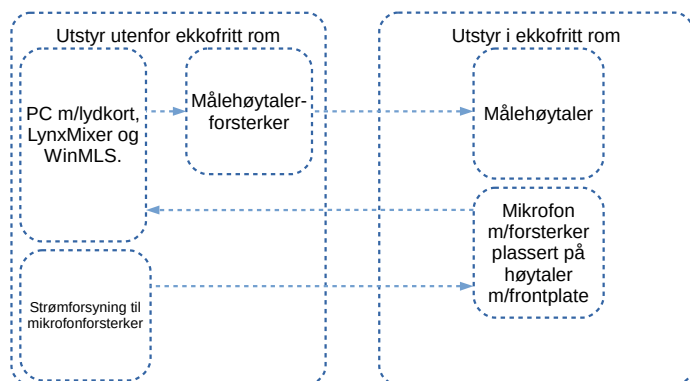
#### 4.1.1 Måleoppsett i ekkofritt rom

I figur 4.1 er det en skisse av måleoppsettet som har blitt benyttet i ekkofritt rom.



**Figur 4.1:** Skisse av måleoppsett i ekkofritt rom

Avstanden, den horisontale streken mellom høytalerkassen til venstre og målehøytaleren til høyre, er 230 cm. Midtpunktet til høytalerkassen og målehøytaleren er 100 cm over gulvnivå.



**Figur 4.2:** Blokkskjema av måleoppsettet

I figur 4.2 er måleoppsettet vist blokkskjematisk, figuren er den samme som figur 2.6.

#### 4.1.2 Utstyrliste for målinger

Utstyrliste for målingene er vist i tabell 4.1.

**Tabell 4.1:** Utstyrliste for målinger

Utstyrstype	Modellnavn	Plassering
Forsterker	Forsterker til mikrofon: Bygget ved NTNU	Ekkofritt
Høytaler	Høytalerkasse med frontplate	Ekkofritt
Mikrofon	MEMS-mikrofon: Knowles SPM0408LE5H-TB	Ekkofritt
Målehøytaler	Aurasound 1.75" extended range element	Ekkofritt
Stativ	Stativ til høytalerkasse	Ekkofritt
Stativ	Stativ til målehøytaler	Ekkofritt
Lydkort	LynxTWO-C	Måle-PC
Programvare	LynxTWO-C Mixer	Måle-PC
Programvare	WinMLS 2004	Måle-PC
Forsterker	Forsterker til målehøytaler: Quad 50E	Utenfor ekkofritt
Strømforsyning	Strømforsyning til mikrofonforsterker (12 V)	Utenfor ekkofritt
Kabler	Ulike kabler	
Avstandsmåler	Tommestokk	
Avstandsmåler	Lasermåler Bosch	



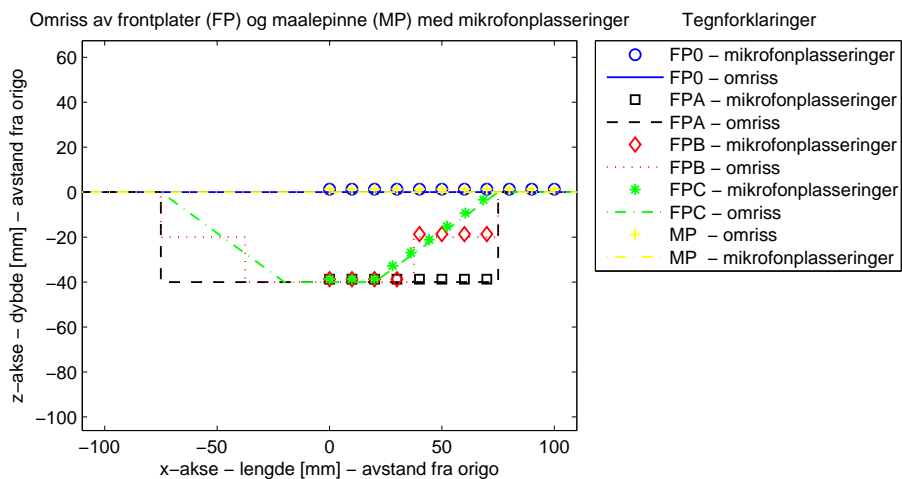
### 4.1.3 Arbeidsrutine for nøyaktig måleoppsett

Et nøyaktig måleoppsett er noe krevende å få til da det er mange aspekter å ta hensyn til. Nedenfor er fremgangsmåten for måleoppsett vist.

1. Koble opp alt nødvendig utstyr som trengs i ekkofritt rom og i «kontrollrom» utenfor ekkofritt rom.
2. Plassér høytalerkasse på stativ, midten av kassen skal være ca. 100 cm over gulvnivået i ekkofritt rom. Tommestokk er egnet for å få til denne høyden nøyaktig.
3. Plassér målehøytaler på stativ, midten av målehøytalerelementet skal være ca. 100 cm over gulvnivået i ekkofritt rom. Tommestokk er egnet for å få til denne høyden nøyaktig.
4. Plassér stativene til høytalerkasse og målehøytaler 230 cm fra hverandre. Midtpunktet på høytalerkassen og midtpunktet på høytalerelementet skal stå vinkelrett på hverandre.
5. Legg ut skumplastmatter/annet isolasjonsmateriale i gulvområdet mellom høytalerkasse og målehøytaler.
6. Finjustér slik at høytalerkassen og målehøytaleren begge er 100 cm over gulvnivået. Tommestokk er egnet verktøy.
7. Mål avstanden *fra* høytalerkasse *til* målehøytaler. Denne avstanden er vanskelig å få helt nøyaktig og konstant under alle målinger. 230 cm  $\pm$  3 cm er ansett som nøyaktig. Laseravstandsmåler er å foretrekke for å få målt denne avstanden nøyaktig. Det som menes med avstanden mellom høytalerkassen og målehøytaleren, er avstanden uten dybden til frontplaten.
8. Fest MEMS-mikrofon med «voks» på ønsket posisjon på frontplaten.
9. Sørg for at målehøytaler og høytalerkasse står vinkelrett på hverandre. Dette er veldig krevende å få til da målehøytaleren og høytalerkassen raskt kan endre sin posisjon ved vibrasjoner når man beveger seg på «nettinggulvet» i ekkofritt rom.

### 4.1.4 Mikrofonplasseringer på frontplater og målepinne

I figur 4.3 er plasseringen av mikrofon på frontplatene under måling og simulering vist. Det er 10 mm avstand mellom hvert målepunkt langs x-aksen for frontplate 0, A og B. For frontplate C er det 10 mm avstand mellom hvert målepunkt.



Figur 4.3: Omriss av frontplater med mikrofonplasseringer

#### 4.1.5 Målinger i ekkofritt rom



Figur 4.4: Foto av måleoppsett i ekkofritt rom

I figur 4.4 er det et foto av måleoppsettet i ekkofritt rom. Målehøytaleren er i forgrunnen. I bakgrunnen er «målepinnen» for fritt signal-målinger montert på stativet.

Det er tre ulike hovedtyper av målinger som har blitt utført i ekkofritt rom:

- **Signal.** Mikrofonen er plassert på et bestemt punkt på frontplaten.
- **Fritt signal.** Mikrofonen er plassert på et bestemt punkt på «målepinnen».
- **Støy.** Mikrofonen er plassert på et bestemt punkt på frontplaten. Lydsignalet ut fra måle-PC skrur av for å gjennomføre målinger av støynivå.

#### 4.1.6 Målepinne for fritt signal-målinger

I figur 4.5 er det et foto av «målepinnen» som har blitt benyttet for å gjøre fritt signal-målinger. Målepinnen er tenkt å være så tynn at det blir omtrent som fritt felt. Hensikten er å kunne gjøre kontrollerte fritt signal-målinger for de ulike mikrofonposisjonene som er vist i figur 4.3.



**Figur 4.5:** Foto av «målepinne» montert på stativ

På målepinnen er det streket opp elleve målepunkter med 10 mm avstand mellom hvert målepunkt. Dette representerer x-akse-punktene, som vist i figur 4.3. Dimensjonene til målepinnen er 214 mm x 30 mm x 4 mm.

Parameterinnstillinger som har blitt brukt for målingene, er vist i tabell 4.2.

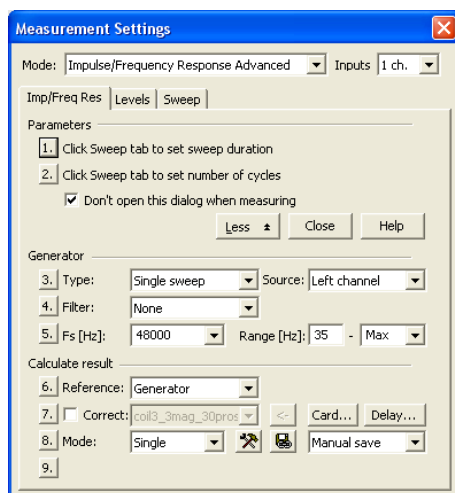
**Tabell 4.2:** Parameterinnstillinger for måleoppsettet

Måleutstyr	Parameterinnstilling
LynxTWO-C Mixer	Utgangsnivå: - 10 dB
Mikrofon	Forsterkning: 0 dB
WinMLS	Sweep-lengde: 4 sekunder
WinMLS	Samplingsfrekvens: 48 kHz
WinMLS	Frekvensområde: 35 Hz til 24 kHz
WinMLS	Utgangsnivå: - 10 dBFS

#### 4.1.7 Programvare og maskinvare for målinger

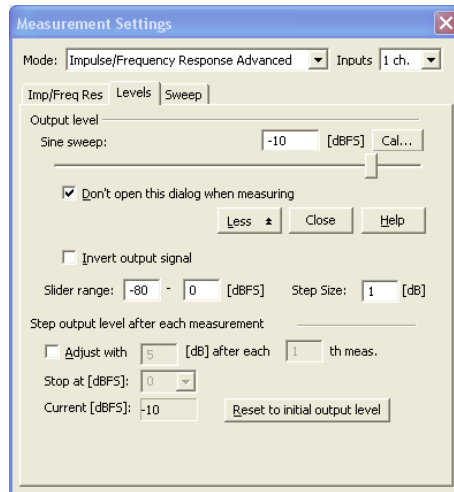
##### Oppsett og innstillinger i WinMLS

Målingene er utført i WinMLS. WinMLS sender ut et sweep-signal til utgangen på lydkortet (målehøytaleren) og tar opp impulsresponsen fra inngangen på lydkortet (mikrofonen).



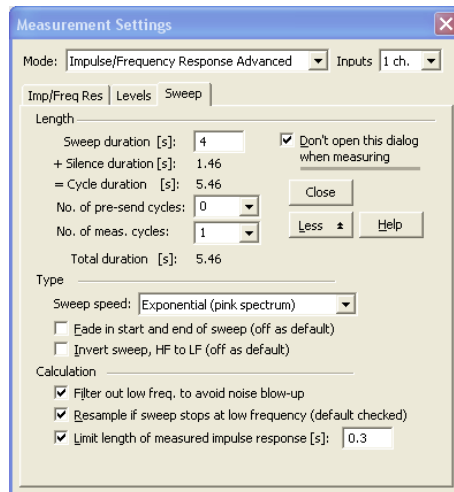
**Figur 4.6:** Innstillinger i WinMLS - valg av signaltipe

I figur 4.6 er måleinnstillinger for signaltipe i WinMLS vist. Signaltypen som ble valgt er et enkelt sweep fra 35 Hz til 24 kHz med samplingsfrekvens ( $F_s$ ) på 48 kHz.



**Figur 4.7:** Innstillinger i WinMLS - valg av utgangsnivå

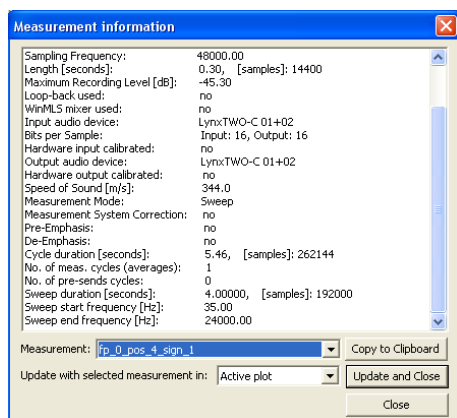
I figur 4.7 er måleinnstillinger for utgangsnivå i WinMLS vist. Utgangsnivået fra WinMLS ble valgt til å være -10 dBFS.



**Figur 4.8:** Innstillinger i WinMLS - valg av sweeptype

I figur 4.8 er måleinnstillinger for sweeptype i WinMLS vist. Innvirkningen av ulike

sweep-lengder ble prøvd ut; 1 sekund, 2 sekunder, 4 sekunder, 8 sekunder og 16 sekunder. Sweep-lengde på 4 sekunder ble valgt som gjeldende. Måleopptakene blir kuttet ned til 300 ms ved lagring.

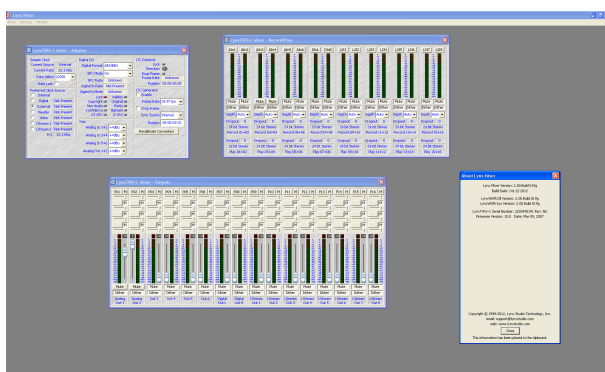


Figur 4.9: WinMLS - informasjon fra måleopptak

Når man lagrer opptaket av en impulsrespons i WinMLS, vil programmet lagre en del informasjon om valgte innstillinger. Et eksempel på slik informasjon er vist i figur 4.9.

### Innstillinger i LynxTWO-C Mixer

Lydkortet, LynxTWO-C, styres via programmet LynxTWO-C Mixer. I figur 4.10 er det vist skjermbilde fra LynxTWO-C Mixer, utgang 0 er dempet med -10 dB i figuren.



Figur 4.10: Skjermbilde fra LynxTWO-C Mixer

## 4.2 Simuleringer i EDBtoolbox

### 4.2.1 Kort om EDBtoolbox

EDBtoolbox er en verktøyboks for Matlab som er utviklet av professor Peter Svensson ved akustikkavdelinga ved NTNU. Simuleringsverktøyet beregner impulsresponsen til en punktkilde i miljø med rigide og plane overflater. [13] EDBtoolbox er publisert med åpen kildekode og kan fritt lastes ned fra <http://www.iet.ntnu.no/~svensson/software/>. Toolboxen er lisensiert under GNU General Public License (GPL).

Alle simuleringer for målepinne og frontplate 0, A, B og C er gjort i EDB1toolbox. Maksimal kantdiffraksjonsorden og maksimal spekulærrefleksjonsorden er andreorden for alle simuleringer.

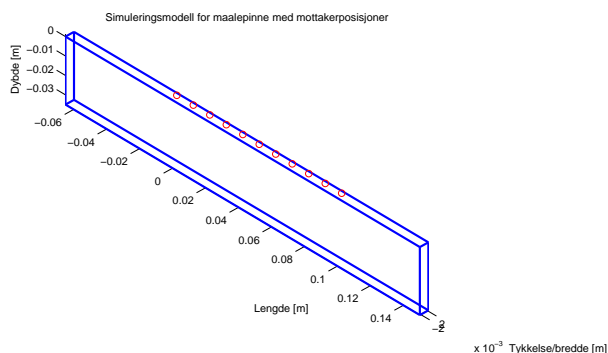
### 4.2.2 Simuleringsparametere i EDBtoolbox

I tabell 4.3 er det vist simuleringsparameterene for diffraksjonsorden og spekulærrefleksjonsorden.

**Tabell 4.3:** Simuleringsparametere i EDBtoolbox

Frontplate	specorder	difforder
Frontplate 0	2	2
Frontplate A	2	2
Frontplate B	2	2
Frontplate C	2	2
Målepinne	2	2

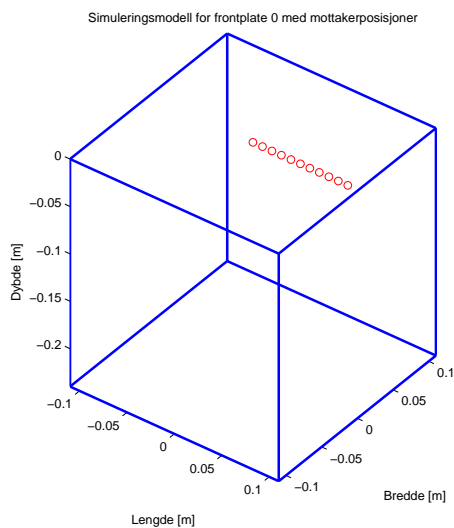
### 4.2.3 Simuleringsmodell for målepinne



**Figur 4.11:** Simuleringsmodell for målepinne

I figur 4.11 er simuleringsmodellen for målepinne vist. De elleve røde sirklene angir de elleve ulike mikrofonplasseringene. Posisjon 0 er nærmest origo.

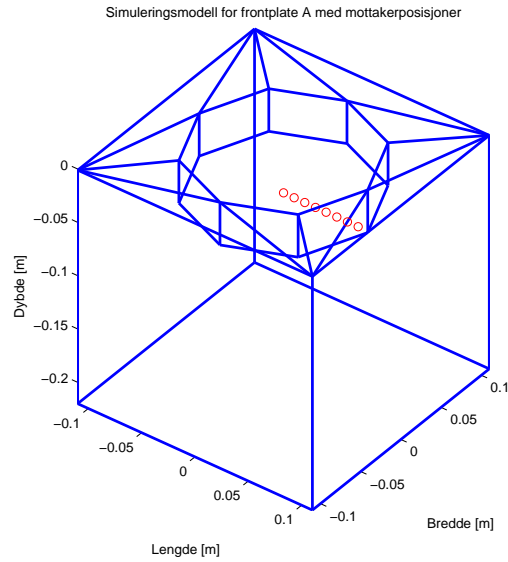
### 4.2.4 Simuleringsmodeller for høytalerkasse med frontplate 0



**Figur 4.12:** Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate 0

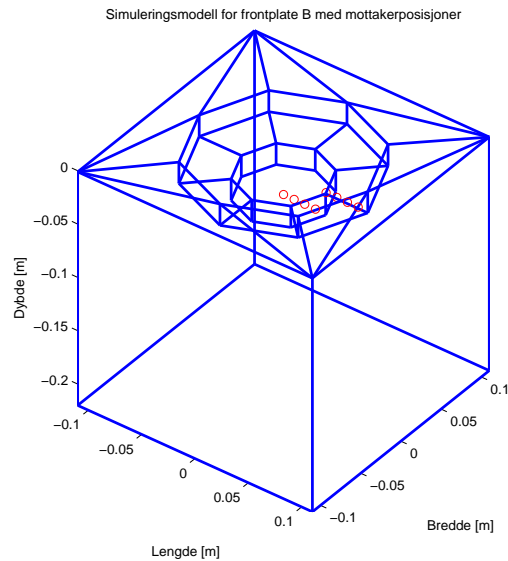
I figur 4.12 er simuleringsmodellen for frontplate 0 vist. De elleve røde sirklene angir de elleve ulike mikrofonplasseringene. Posisjon 0 er nærmest origo.





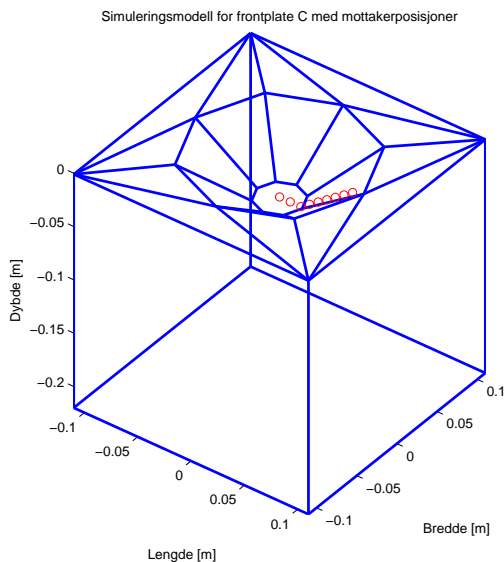
**Figur 4.13:** Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate A

I figur 4.13 er simuleringsmodellen for frontplate A vist. De åtte røde sirklene angir de åtte ulike mikrofonplasseringene. Posisjon 0 er nærmest origo.



**Figur 4.14:** Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate B

I figur 4.14 er simuleringsmodellen for frontplate B vist. De åtte røde sirklene angir de åtte ulike mikrofonplasseringene. Posisjon 0 er nærmest origo.



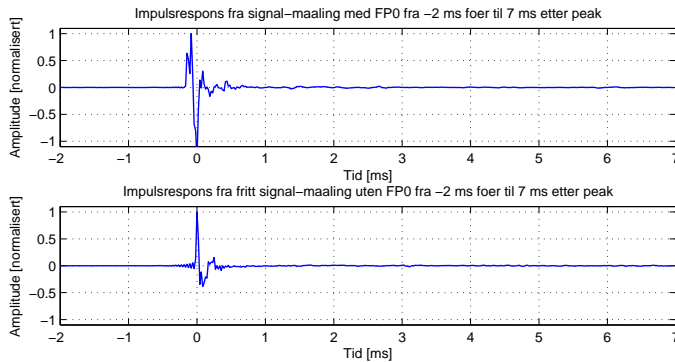
**Figur 4.15:** Simuleringsmodell for høytalerkassen med frontplate C

I figur 4.15 er simuleringsmodellen for frontplate C vist. De ni røde sirklene angir de ni ulike mikrofonplasseringene. Posisjon 0 er nærmest origo.

### 4.3 Resultater fra målinger og simuleringer

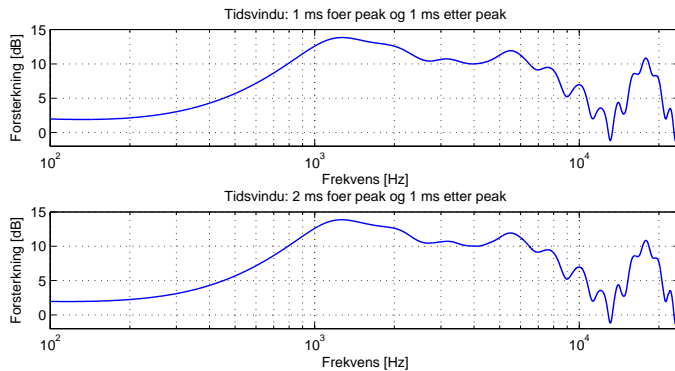
#### 4.3.1 Tidsvinduets innvirkning på frekvensresponsen

I overgangen fra tidsdomenet (impulsresponsen) til frekvensdomenet (frekvensresponsen) kan man påvirke hvor mye «informasjon» man kan ta med. Det som menes med informasjon, er hvor stort tidsvindu av impulsresponsen man velger å konvertere til frekvensdomenet ved bruk av Fast Fourier transform (FFT).



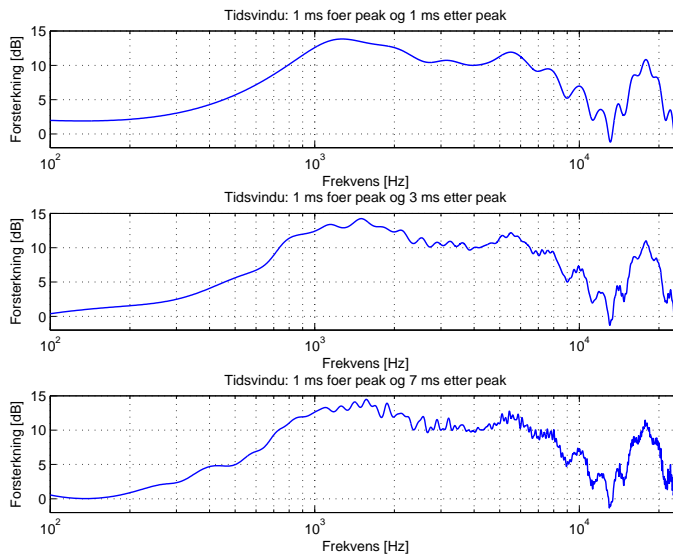
**Figur 4.16:** Impulsresponser - utdraget viser 2 ms før peak-nivå til 20 ms etter peak-nivå. Øverst: Impulsrespons med høyttalerkasse påmontert frontplate C - mottakerposisjon 0. Nederst: Impulsrespons uten høyttalerkasse - mottakerposisjon 0.

I figur 4.16 er det vist et eksempel på impulsrespons med tidsvindu 2 ms før peak-nivå til 20 ms etter peak-nivå. Peak-nivåene er ved  $t = 0$  ms. Den øverste impulsresponsen er hentet fra målinger med frontplate C påmontert høyttalerkassen i mottakerposisjon 0. Den nederste impulsresponsen er hentet fra målinger uten høyttalerkasse, hvor plasseringen av mikrofonen sett fra målehøyttaleren samsvarer med mottakerposisjon 0.



**Figur 4.17:** Innvirkningen på frekvensresponsen med tidsvindu 1 ms og 2 ms før peak-nivå

I figur 4.17 er det vist to frekvensresponser som viser forskjellen mellom å ta med 1 ms og 2 ms før peak-nivå. Det er svært liten forskjell mellom frekvensresponsene. Derfor vil det være tilstrekkelig å velge et tidsvindu som tar med 1 ms før peak-nivå.



**Figur 4.18:** Innvirkningen på frekvensresponsen med tidsvindu 1 ms, 3 ms og 7 ms etter peak-nivå

I figur 4.18 er det vist tre frekvensresponsen som viser forskjellen mellom å ta med 1 ms, 3 ms og 7 ms etter peak-nivå. De tre frekvensresponsene er tilnærmet like for frekvenser opp til 1 kHz. For frekvenser mellom 1 og 24 kHz er det større forskjeller. Et tidsvindu på 7 ms etter peak-nivå inneholder for detaljert informasjon om høyfrekvent innhold, som gjør det vanskelig å sammenligne målinger med simuleringer. Et tidsvindu på 3 ms etter peak er for stort tidsvindu da det er litt for mye høyfrekventinnhold. Frekvensresponsen for 1 ms etter peak-nivå har en glatt kurve og inneholder tilstrekkelig med detaljert informasjon om alle frekvenser. Ved å ta med et større tidsvindu etter peak-nivå vil flere (seine) refleksjoner tas med, desto flere interferenseffekter blir det i frekvensresponsen.

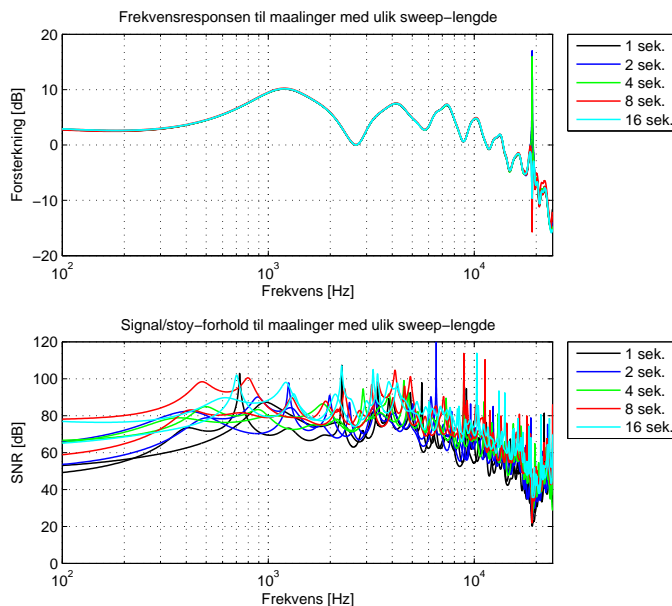
Et tidsvindu på 1 ms før peak-nivå og 1 ms etter peak-nivå vil være et tilstrekkelig tidsvindu.

### 4.3.2 Sweep-lengdens innvirkning på målinger

Frontplate 0 ble produsert for å kartlegge om 20 mm finérplate var et hensiktsmessig materiale for høytalerkassen. I tillegg var det ønskelig å bekrefte at de akustiske egenskapene til et overflateareal på 220 mm x 220 mm var tilfredsstillende ved fysiske målinger, slik at høytalerkassen kunne settes i produksjon. I forbindelse med dette ble også ulike sweep-lengder utprøvd.

Formålet med disse målingene med frontplate 0 var å velge hensiktsmessig sweep-lengde til impulsresponsene som gir godt signal/støy-forhold. Det ble gjort målinger med sweep-lengder på 1 sekund, 2 sekunder, 4 sekunder, 8 sekunder og 16 sekunder. Det ble gjort totalt 16 målinger for hver sweep-lengde med signal-, fritt signal- og støymålinger. Alle målingene ble gjentatt uten endringer i måleoppsettet inne i ekkofritt rom.

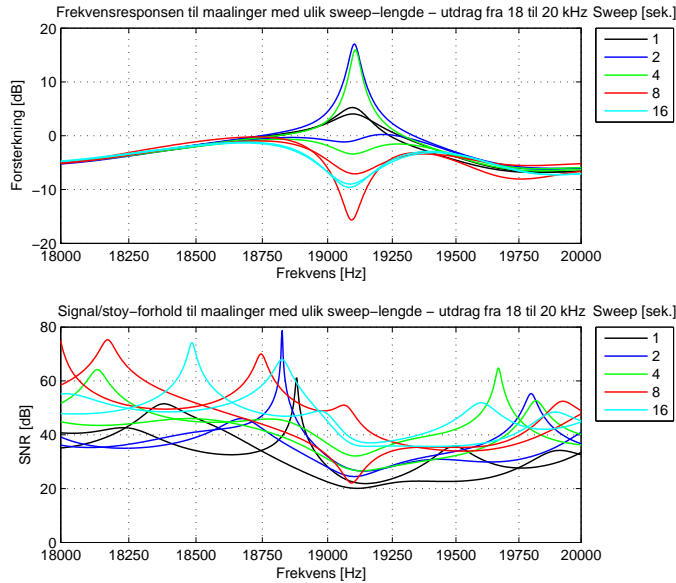
I figurene 4.19 og 4.20 er frekvensresponsen til frontplate 0 og signal/støy-forholdet for to målinger med fem ulike sweep-lengder vist.



**Figur 4.19:** Frekvensresponsen til frontplate 0 for målinger med ulik sweep-lengde

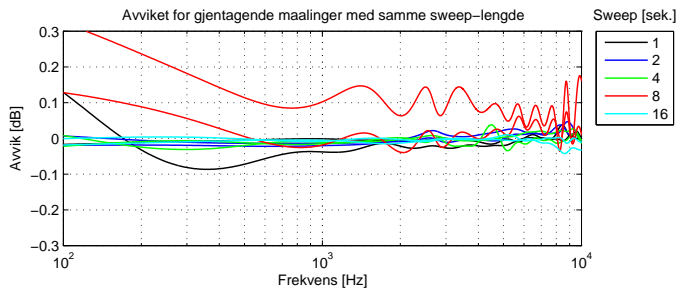
I figur 4.19 (øverst) ser vi at impulsresponsene er tilnærmet identiske og uavhengige av sweep-lengden, med unntak av større variasjoner i frekvensområdene fra 18 til 20 kHz. I figur 4.19 (nederst) ser vi at signal/støy-forholdet stort sett bedres for hver

dobling av sweep-lengde. Signal/støy-forholdet er større enn 60 dB fra 100 Hz til 10 kHz, hvis sweep-lengden er 4, 8 eller 16 sekunder.



**Figur 4.20:** Frekvensresponsen til frontplate 0 for målinger med ulik sweep-lengde - utdrag fra 18 til 20 kHz

I figur 4.20 er frekvensskalaen 18 til 20 kHz. Det er uvisst hva som har forårsaket de to peakene ved ca. 19,125 kHz for de to målingene med henholdsvis 2 sekunders og 4 sekunders sweep.



**Figur 4.21:** Avviket til frekvensresponsen for gjentagende målinger med samme sweep-lengde

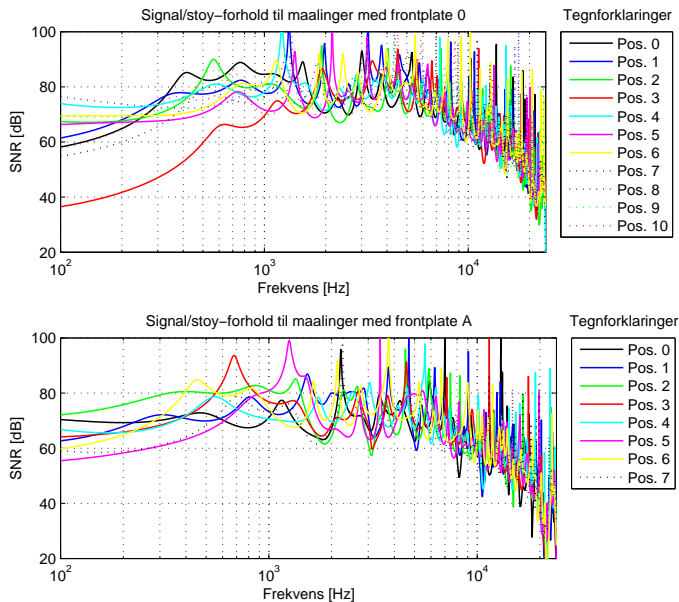
I figur 4.21 er avviket til frekvensresponsen for gjentagende målinger med samme

sweep-lengde vist. Det kan se ut som avviket i frekvensresponsene for sweep-lengder på 1 sekund og 8 sekunder er ugunstig. Det samme gjelder 16 sekunder siden gjentakende målinger med denne sweep-lengden tar unødvendig lang tid å gjennomføre.

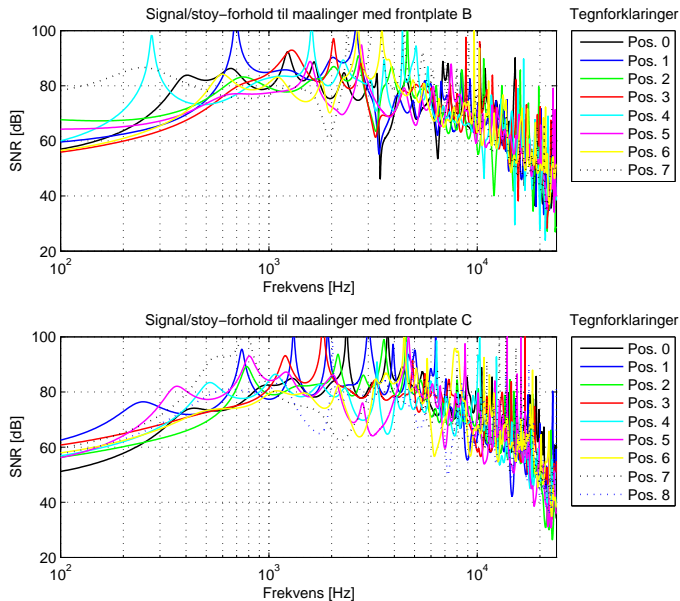
Det kan se ut som 4 sekunders sweep-lengde kan være en hensiktsmessig sweep-lengde til bruk for målinger med høyttalerkassen. Signal/støy-forholdet er godt. Tidsbruken ved gjentakende målinger med 4 sekunders sweep-lengde vil være merkbart mye kortere enn hvis man bruker sweep-lengde på 16 sekunder. En sweep-lengde på 8 sekunder synes å være ugunstig grunnet de store avvikene man ser i figur 4.21.

### 4.3.3 Signal/støy-forhold til målinger

Et tilstrekkelig godt signal/støy-forhold er grunnleggende for å kunne sammenligne målinger med simuleringer.



**Figur 4.22:** Signal/støy-forhold for målinger med frontplate 0 og A



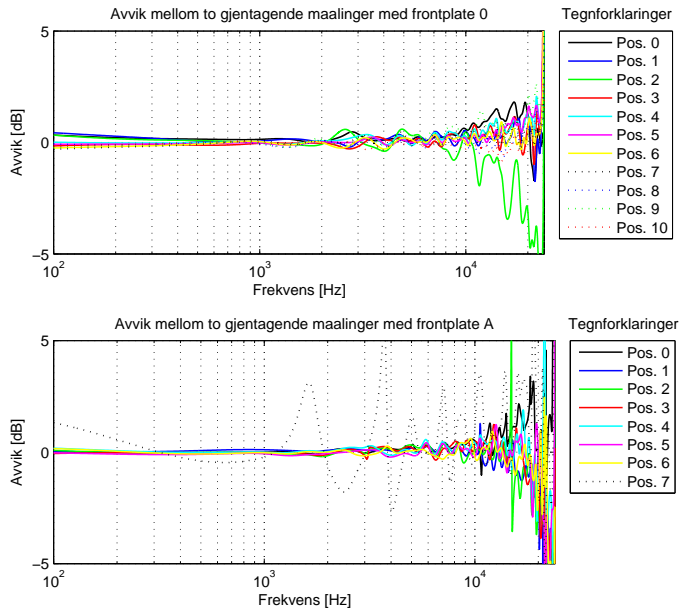
**Figur 4.23:** Signal/støy-forhold for målinger med frontplate B og C

I figur 4.22 og 4.23 er signal/støy-forhold for én signalmåling og én støymåling i en bestemt mottakerposisjon vist. Vi ser at signal/støy-forhold er svært godt for alle målinger opp til ca. 20 kHz.

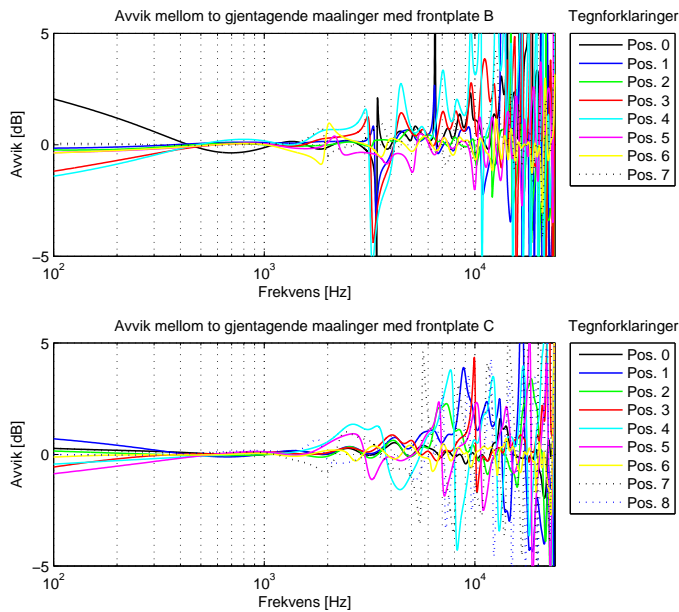
#### 4.3.4 Nøyaktighet ved gjentakelse av samme måling

Det har blitt gjort to målinger for hver mikrofonplassering for hver frontplate. Mikrofonen ble festet med voks på et punkt, løsnet og festet på et annet punkt. Det ble gjort målinger fra posisjon 0 til ytterste posisjon, for så å gjenta disse målingene én gang. Oppsettet har ikke vært demontert helt mellom målingene. Det har vært forsøkt på minst mulig avvik i høytalerplassering og målehøytalerplassering i forbindelse med endring av mikrofonplassering. Likevel har det vært en viss forandring i måleoppsettet.





Figur 4.24: Avvik mellom to gjentakende målinger med frontplate 0 og A

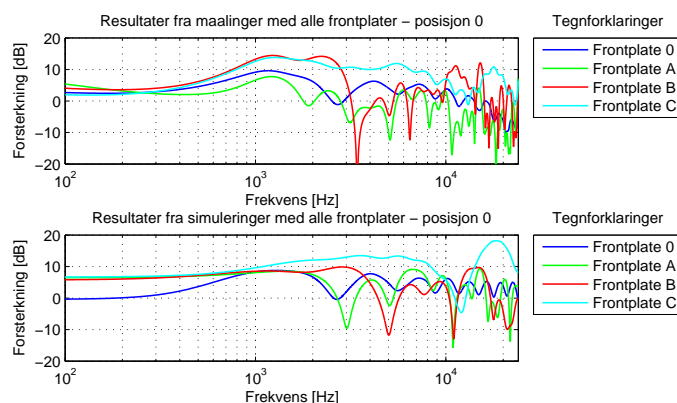


Figur 4.25: Avvik mellom to gjentakende målinger med frontplate B og C

I figur 4.24 og 4.25 er avvikene mellom to gjentakende målinger for alle mikrofonplasseringer for alle frontplater vist. Avviket er til tider stort mellom to gjentakende målinger for frekvenser høyere enn 2 kHz. Avviket mellom to gjentakende målinger i frekvensområdet 100 Hz til 2 kHz er omlag  $\pm 1$  dB. I frekvensområdet fra 2 til 24 kHz er avviket omlag  $\pm 5$  dB.

Det er minst avvik mellom to gjentakende målinger med frontplate 0. Det skyldes nok at frontplate 0 har en den enkleste geometriske fasongen.

### 4.3.5 Frontplatenes innvirkning på frekvensresponsen

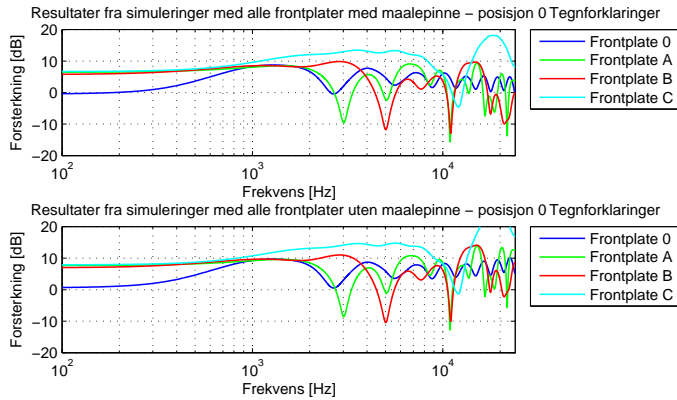


**Figur 4.26:** Frontplatenes innvirkning på frekvensresponsen

I figur 4.26 er det vist frontplatenes innvirkning på frekvensresponsen. Alle målinger viser mottakerposisjon 0. Vi ser at det er store forskjeller mellom frekvensresponsen for de fire ulike frontplatene.

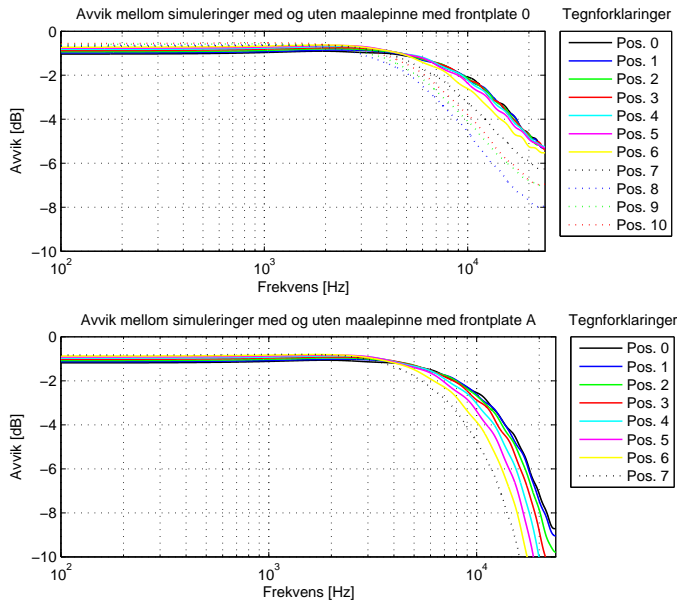
### 4.3.6 Målepinnens innvirkning på frekvensresponsen til simuleringer

Hensikten med bruk av målepinnen inne i ekkofritt rom er å kunne få til nøyaktige målinger av fritt signal for de ulike mikrofonposisjonene. Målepinnen vil ha en viss innvirkning på målinger, dermed vil det være nyttig å ta med denne innvirkningen i simuleringene.



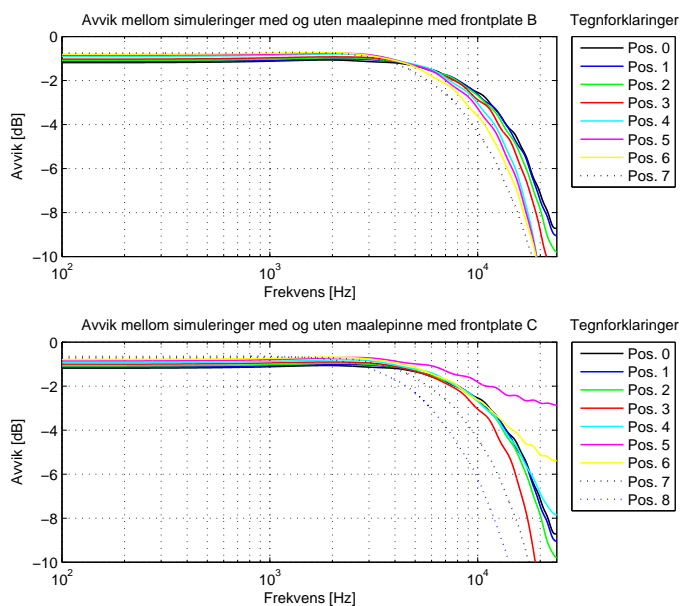
**Figur 4.27:** Frekvensresponser til simuleringer med og uten målepinne

I figur 4.27 er frekvensresponser til simuleringer med og uten målepinne vist. Alle simuleringer viser mottakerposisjon 0.



**Figur 4.28:** Avvik mellom simuleringer med og uten målepinne for frontplate 0 og A

I figur 4.28 er avvikene mellom simuleringer med og uten målepinne for frontplate 0 og A for alle mottakerposisjoner vist.



**Figur 4.29:** Avvik mellom simuleringer med og uten målepinne for frontplate B og frontplate C

I figur 4.29 er avvikene mellom simuleringer med og uten målepinne for frontplate B og C for alle mottakerposisjoner vist.

Målepinnen har liten innvirkning på simuleringer i frekvensområdet 100 Hz til 3 kHz. I dette frekvensområdet er avviket konstant på ca. 1-2 dB. I frekvensområdet 3 til 24 kHz er avviket mellom simuleringer med og uten målepinne på ca. 3 dB/oktav.

#### 4.3.7 Sammenligning av målinger og simuleringer

Målingene er gjennomført med sweep-lengde på 4 sekunder. Avstanden mellom høytalerkasse og målehøytaler er 230 cm. Målingene av impulsresponser og støy-signal for hver frontplate ble utført med to målinger for hver mottakerposisjon; posisjon 0 til ytterste posisjon, så posisjon 0 til ytterste posisjon igjen. Dermed har det vært et visst fysisk avvik ved repetisjon av målingene. Simuleringene tar høyde for innvirkningen av målepinnen.

Resultater fra målinger og simuleringer for alle frontplater for mottakerposisjonene 0, 1 og 2 er vist i dette kapitlet. I vedlegg A er resultater for de øvrige mottakerposisjonene vist.

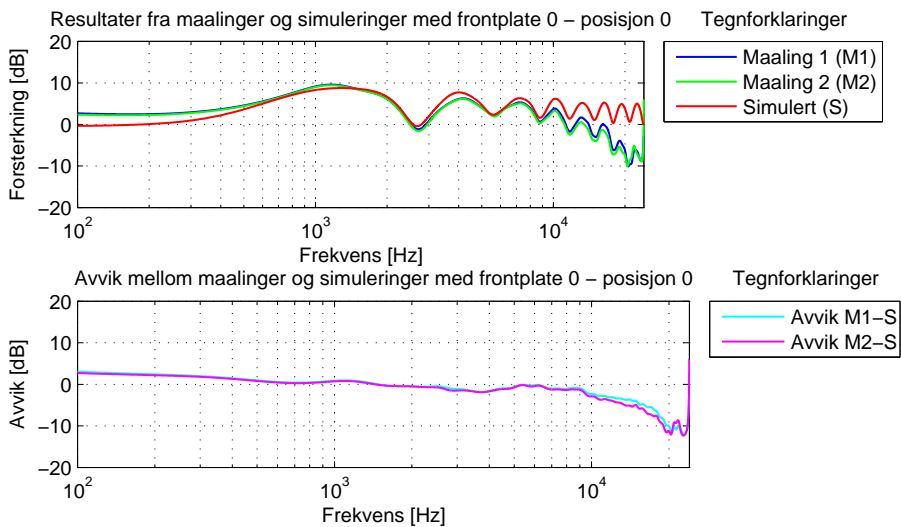
Hver figur med resultater viser måleresultater og simuleringer for en bestemt mottakerposisjon for en bestemt frontplate. Det er to ulike plottvinduer i hver figur med resultater.

Det øverste plottet viser frekvensresponsen for målinger og simuleringer. Tidsvinduet som er brukt for målingene er 1 ms før peak og 1 ms etter peak.

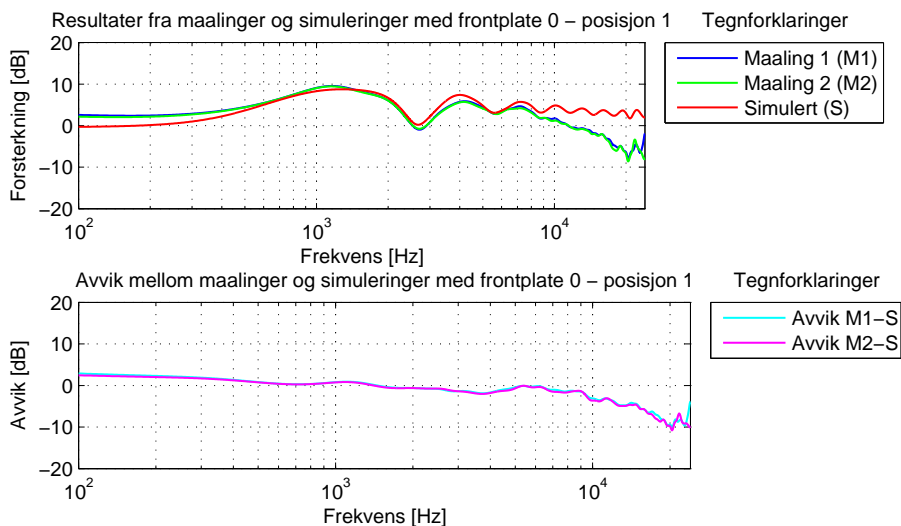
Det nederste plottet viser avviket mellom måling og simulering. Avviket er funnet ved subtraksjon; måling - simulering.

Målingene samsvarer best med simuleringer for frontplate 0 og C. For frontplate A og B er det store avvik mellom måling og simulering.

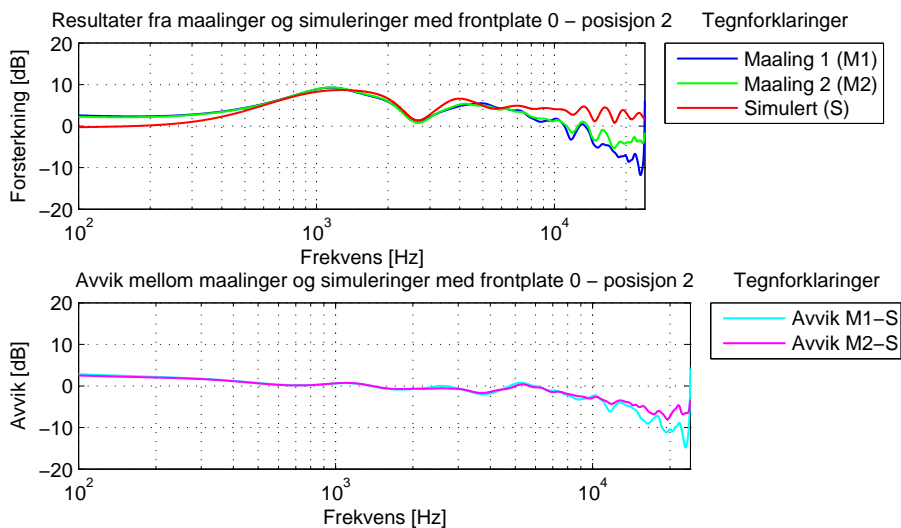
### Sammenligning av målinger og simuleringer med frontplate 0



**Figur 4.30:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 0



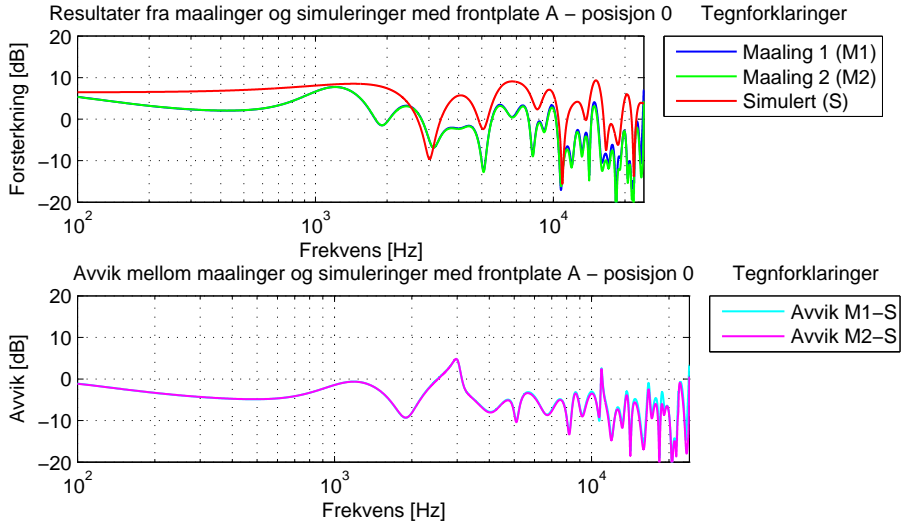
**Figur 4.31:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 1



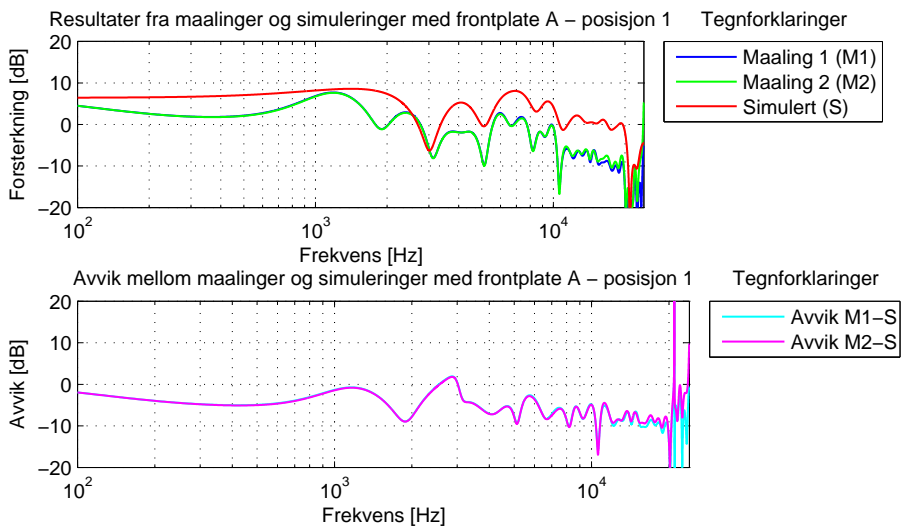
**Figur 4.32:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 2

I figurene 4.30, 4.31 og 4.32 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i henholdsvis mottakerposisjon 0, 1 og 2 vist.

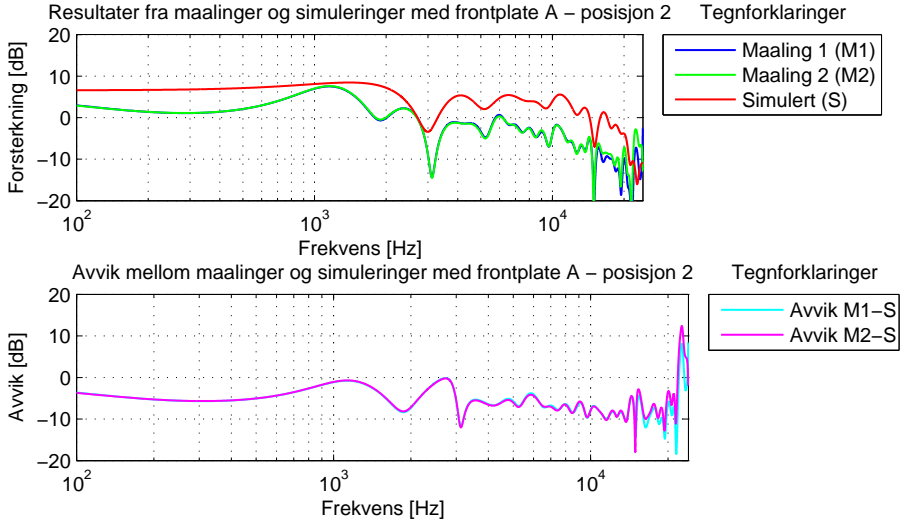
## Sammenligning av målinger og simuleringer med frontplate A



Figur 4.33: Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 0



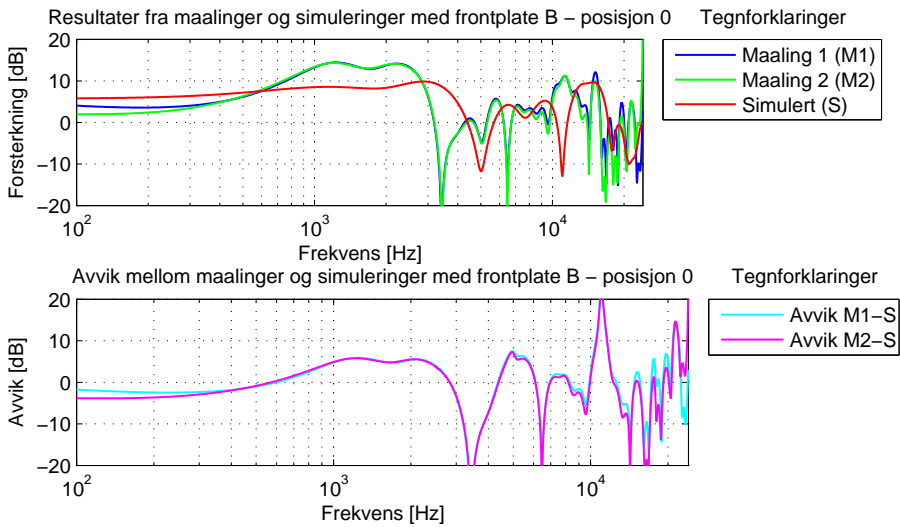
Figur 4.34: Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 1



**Figur 4.35:** Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 2

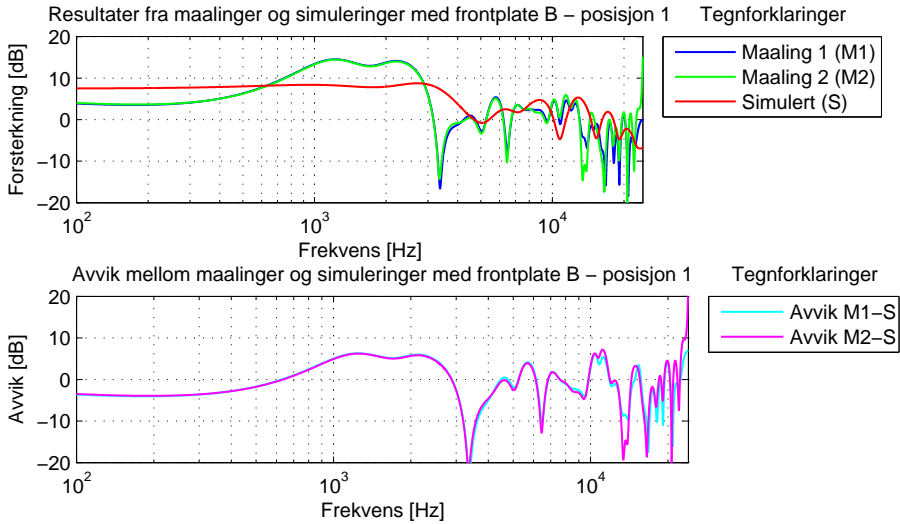
I figurene 4.33, 4.34 og 4.35 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i henholdsvis mottakerposisjon 0, 1 og 2 vist.

**Sammenligning av målinger og simuleringer med frontplate B**

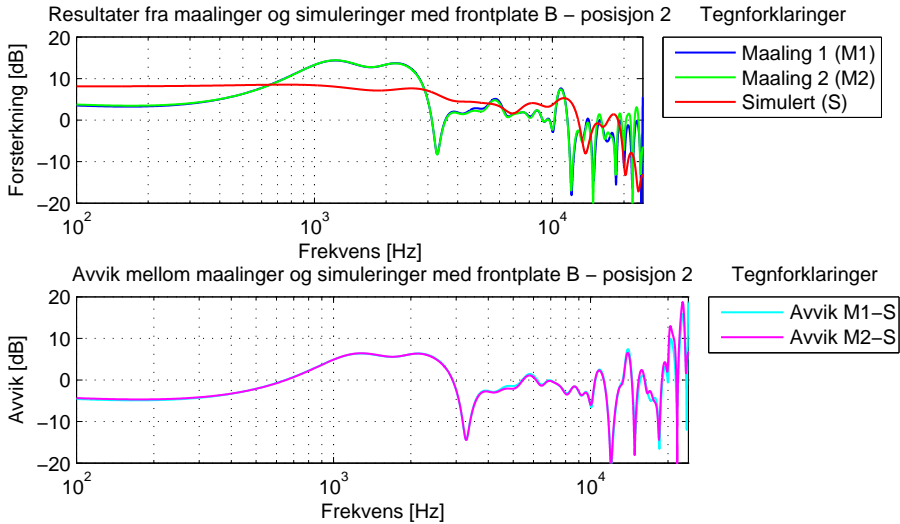


**Figur 4.36:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 0





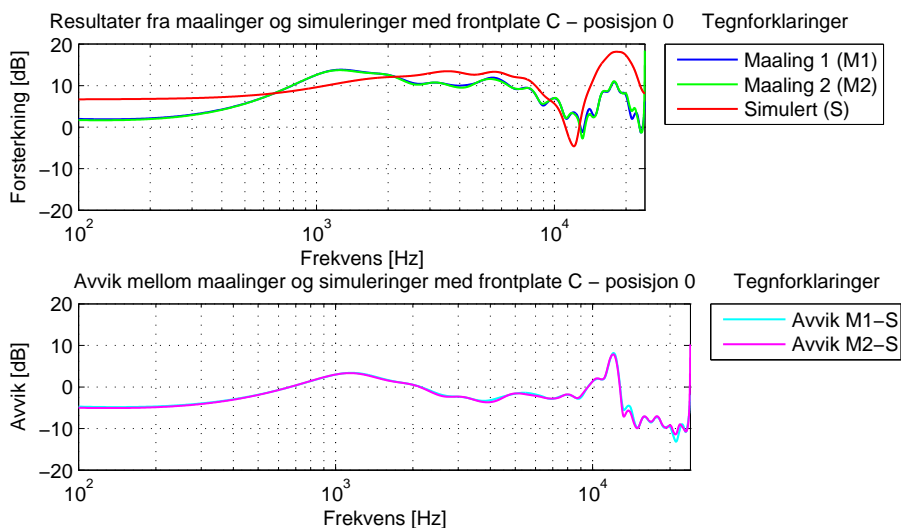
**Figur 4.37:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 1



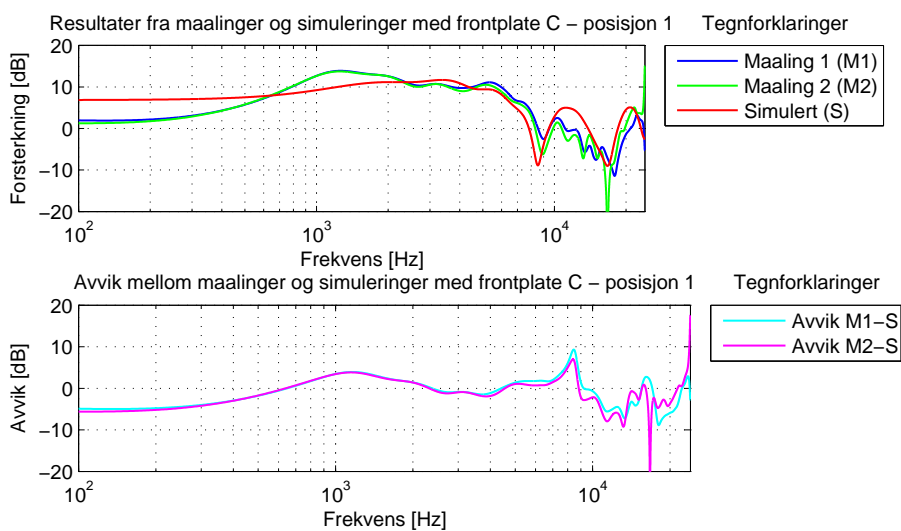
**Figur 4.38:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 2

I figurene 4.36, 4.37 og 4.38 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate B i henholdsvis mottakerposisjon 0, 1 og 2 vist.

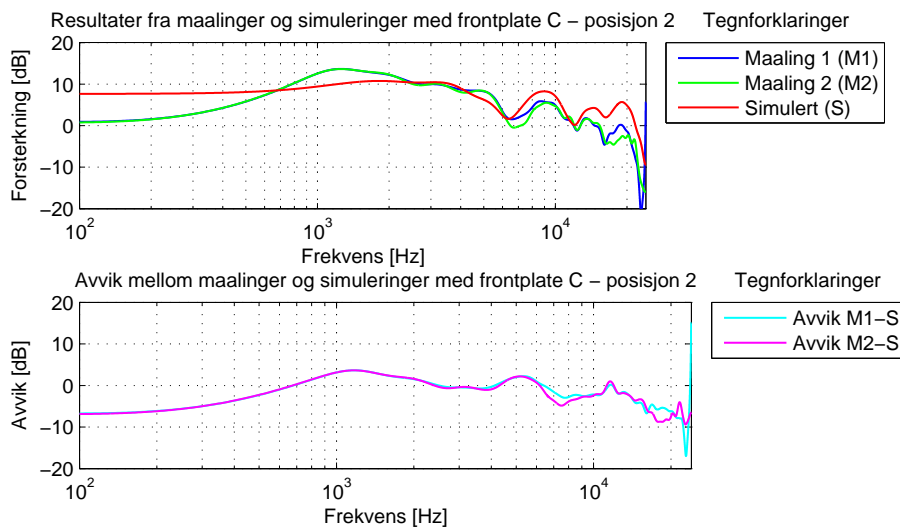
## Sammenligning av målinger og simuleringer med frontplate C



Figur 4.39: Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 0



Figur 4.40: Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 1



**Figur 4.41:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 2

I figurene 4.39, 4.40 og 4.41 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i henholdsvis mottakerposisjon 0, 1 og 2 vist.



# Kapittel

## Avslutning

### 5.1 Diskusjon

Analysen av måledataene viser til dels store avvik ved repetisjon av samme måling, under samme forutsetning som den opprinnelige målingen. Dette skyldes at målingene som har blitt gjort, må ha vært tildels unøyaktig utført. Dette kan forklares ved at måleoppsettet som ble brukt, ikke kan ha vært det mest ideelle. Dermed blir graden av nøyaktighet for å kunne realisere etterprøvbarehet dårlig.

Erfaringene fra målinger i ekkofritt rom har vist at det er krevende å få til høy geometrisk presisjon for måleoppsettet som ble valgt. Dessverre så beveger høyttalerkassen og målehøytaleren seg lett som følge av vibrasjoner når man beveger seg inne i ekkofritt rom. Avstanden på ca. 230 cm mellom høyttalerkasse og målehøytaler er for stor til å kunne få et pålitelig oppsett under alle målinger. På ca. 230 cm avstand er det vanskelig å vinkle høyttalerkassen og målehøytaleren vinkelrett på hverandre. Det er nærmest umulig å få til et vinkelrett oppsett med enkle hjelpemidler som tommestokk og laser, samt det blotte øye som støttespiller.

Den grafiske sammenligningen av målinger med simuleringer viser at målingene i varierende grad samsvarer med simuleringene for de ulike frontplatene til høyttalerkassen. Simuleringsparameterene for spekulærrefleksjonsorden og diffraksjonsorden har stor innvirkning på simuleringsresultatene. Beregningene var begrenset til andre orden for både spekulær refleksjon og diffraksjon på grunn av frontplatenes geometri. De valgte eksemplene er dermed gode testeksempler som viser forskjellen mellom målinger og simuleringer.

Tidsvinduet har stor påvirkningsgrad på frekvensresponsen i overgangen fra tidsdomenet til frekvensdomenet. Ved å kutte ned tidsvinduet til et minimum filtreres mye frekvensinnhold vekk. Frekvensresponsen blir glattere og enklere å kunne sammenligne med simuleringer.

Signal/støy-forholdet har vært svært tilfredsstillende for alle målingene som har blitt gjennomført. Det har ikke vært behov for å iverksette tiltak for å forbedre signal/støy-forholdet.

## 5.2 Videre arbeid

I videre arbeid med denne type prosjekt er det viktig å fokusere på en forbedring av måleoppsettet. Det har vist seg å være vanskelig og få til gode, nøyaktige og etterprøvbare målinger med høytalerkassen og målehøytaleren plassert på to frittstående stativer. En videreutvikling kan eksempelvis være å designe og bygge et felles stativ for høytalerkassen og målehøytaleren. Dette stativet må sørge for at høytalerkassen og målehøytaleren står vinkelrett på hverandre og at man ved enkle hjelpemidler kan påse at dette stemmer.

Stativet må være utformet slik at det blir minst mulig refleksjon mellom høytalerkasse og målehøytaler. Stativet bør kles i isolasjonsmateriale for å redusere uønskede refleksjoner. Avstanden mellom høytalerkasse og målehøytaler bør være mindre enn 100 cm, slik at det blir lettere å kontrollere at de står vinkelrett på hverandre og i samme høyde over gulvnivå.

## 5.3 Konklusjon

Resultatene fra målingene har vist at frekvensresponsen til en høytaler påvirkes i sterk grad av høytalerkassens form og høytalerelementets form og egenskaper.

Erfaringene fra målingene i ekkofritt rom har vist at det har vært krevende å få realisert en serie med nøyaktige og kontrollerte målinger. Det er mange aspekter å ta hensyn til for å få til et nøyaktig måleoppsett som kan dokumenteres godt og etterprøves ved å repetere samme måling.

# Referanseliste

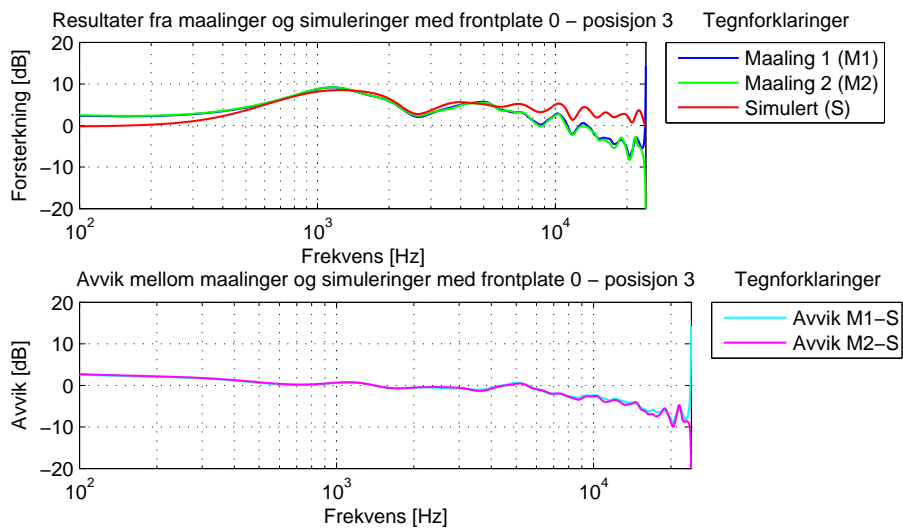
- [1] Harry F. Olson. Direct radiator loudspeaker enclosures. *J. Audio Eng. Soc.*, 17(1):22–29, 1969.
- [2] Andreas Asheim and U. Peter Svensson. An integral equation formulation for the diffraction from convex plates and polyhedra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6), 2013.
- [3] U. Peter Svensson and K. Wendlandt. The influence of a loudspeaker cabinet’s shape on the radiated power. *Journal of Vibroengineering*, 3(4):189–192, 2000.
- [4] Søren Rasmussen and Karsten Bo Rasmussen. On loudspeaker cabinet diffraction. *J. Audio Eng. Soc.*, 42(3):147–150, 1994.
- [5] Tor Erik Vigran. *Bygningsakustikk - et grunnlag*. Tapir Akademisk forlag, 2002.
- [6] Lawrence E. Kinsler m.fl. *Fundamentals of Acoustics*. Wiley Ltd., 4th edition, 2000.
- [7] Jens Jørgen Dammerud. Elektroakustikk, 4. utgave. Hentet fra: <http://ac4music.files.wordpress.com/2013/08/elektroakustikk-4-utgave-dammerud.pdf>, sist besøkt 8. juli 2014.
- [8] Wikipedia Commons. Loudspeaker baffle - sketch. Hentet fra: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loudspeaker\\_baffle.gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loudspeaker_baffle.gif), sist besøkt 18. juli 2014.
- [9] Truls Vidarssønn Klami. Utvikling av simuleringsverktøy for lavfrekvent lyd i små rom. Hentet fra: <http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgave?id=9748>, sist besøkt 8. juli 2014.
- [10] Morset Sound Development. WinMLS 2004. Hentet fra: <http://www.winmls.com/>, sist besøkt 8. juli 2014.
- [11] Knowles. Datablad mems-mikrofon: Spm0408le5h-tb. Hentet fra: <http://www.knowles.com/eng/content/download/3901/49448/version/4/file/SPM0408LE5H.pdf>, sist besøkt 10. juli 2014.
- [12] Stratasys. uPrint SE Plus Product Specs. Hentet fra: <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/uprint-se-plus#specifications>, sist besøkt 5. april 2014.

- [13] Peter Svensson. Edge diffraction toolbox - edbtoolbox - description. Hentet fra: [http://www.iet.ntnu.no/~svensson/software/edbtoolbox/EDBtoolbox\\_description.txt](http://www.iet.ntnu.no/~svensson/software/edbtoolbox/EDBtoolbox_description.txt), sist besøkt 12. juli 2014.



# Resultater fra målinger og simuleringer

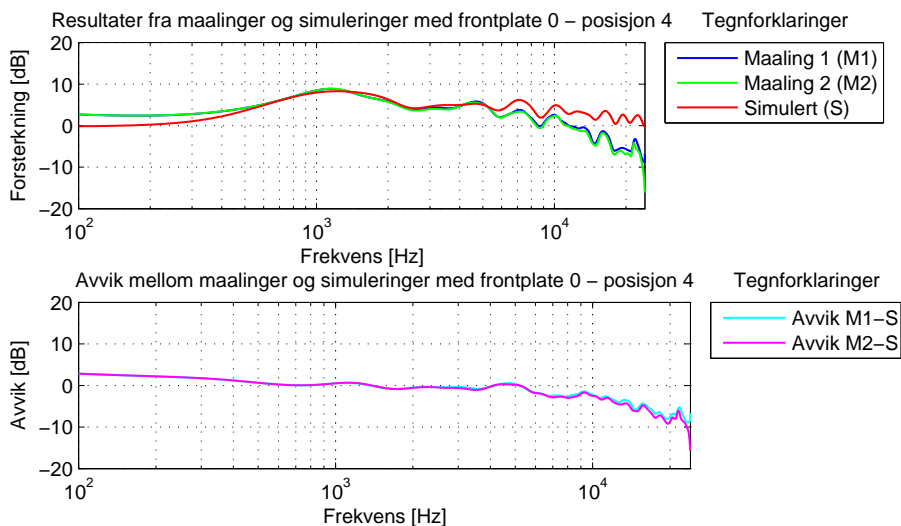
## A.1 Målinger og simuleringer med frontplate 0



**Figur A.1:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 3

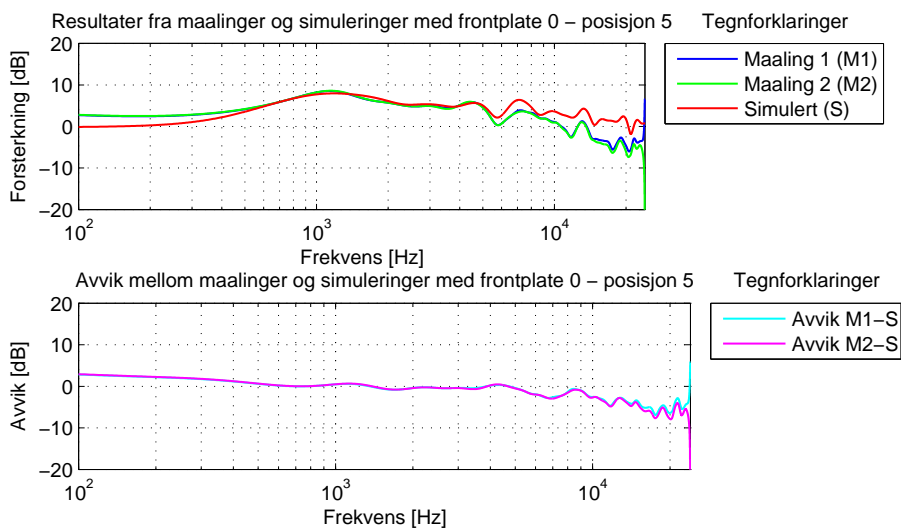
I figur A.1 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 3 vist.

## II A. RESULTATER FRA MÅLINGER OG SIMULERINGER



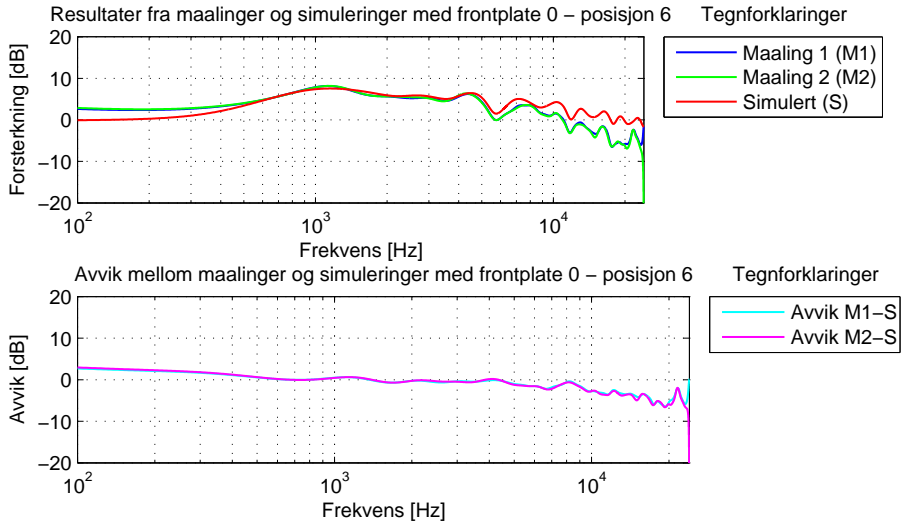
**Figur A.2:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 4

I figur A.2 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 4 vist.



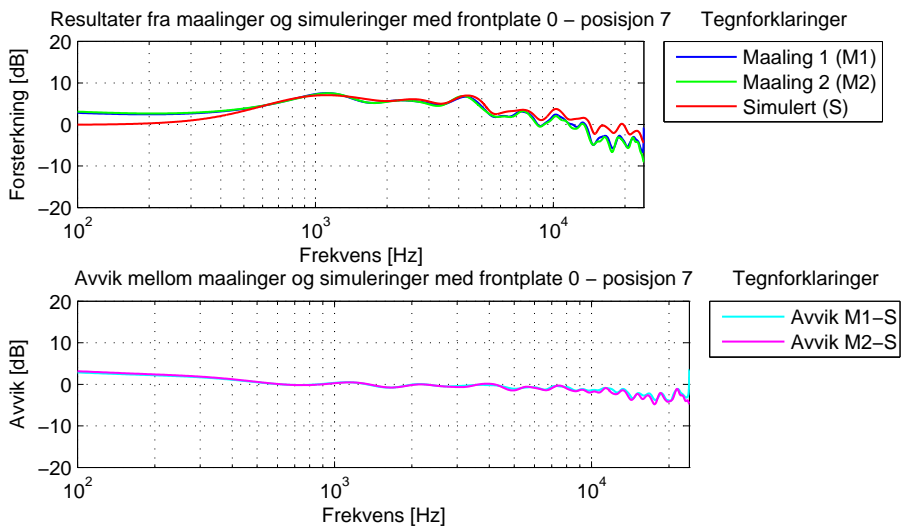
**Figur A.3:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 5

I figur A.3 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 5 vist.



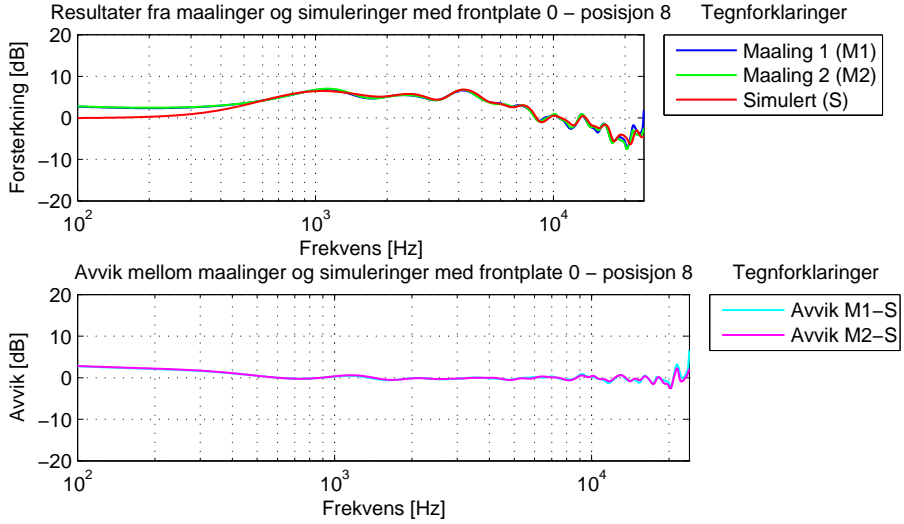
**Figur A.4:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 6

I figur A.4 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 6 vist.



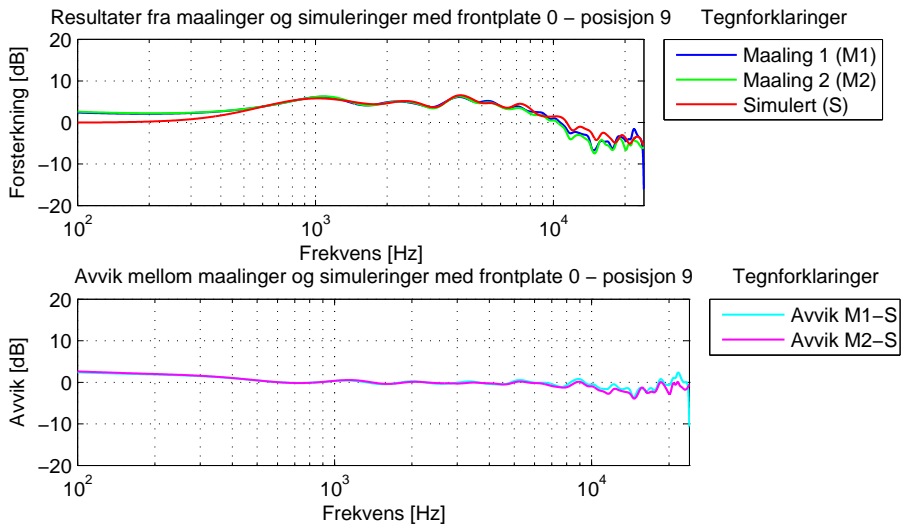
**Figur A.5:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 7

I figur A.5 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 7 vist.



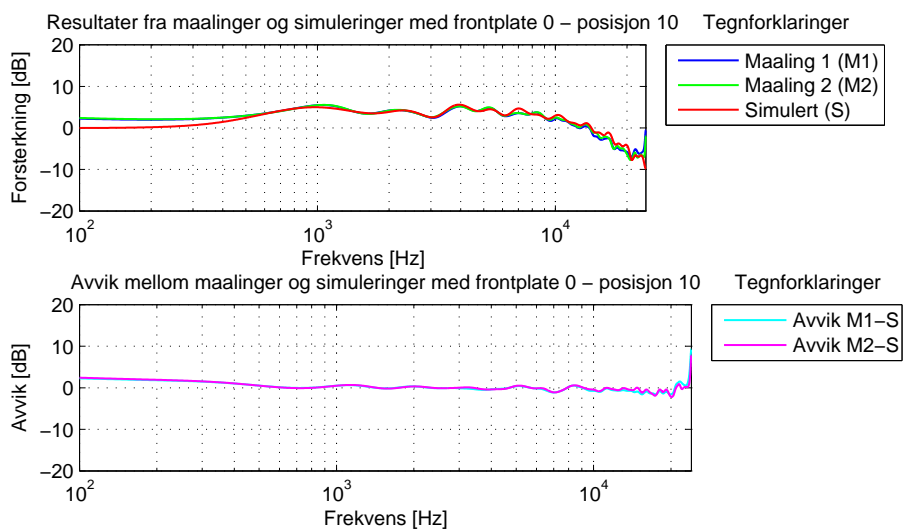
**Figur A.6:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 8

I figur A.6 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 8 vist.



**Figur A.7:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 9

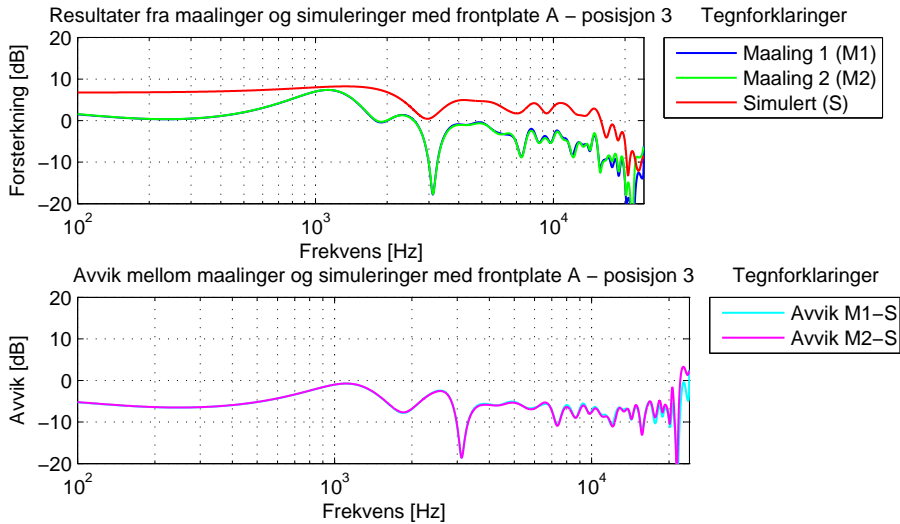
I figur A.7 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 9 vist.



**Figur A.8:** Resultater med frontplate 0 - mottakerposisjon 10

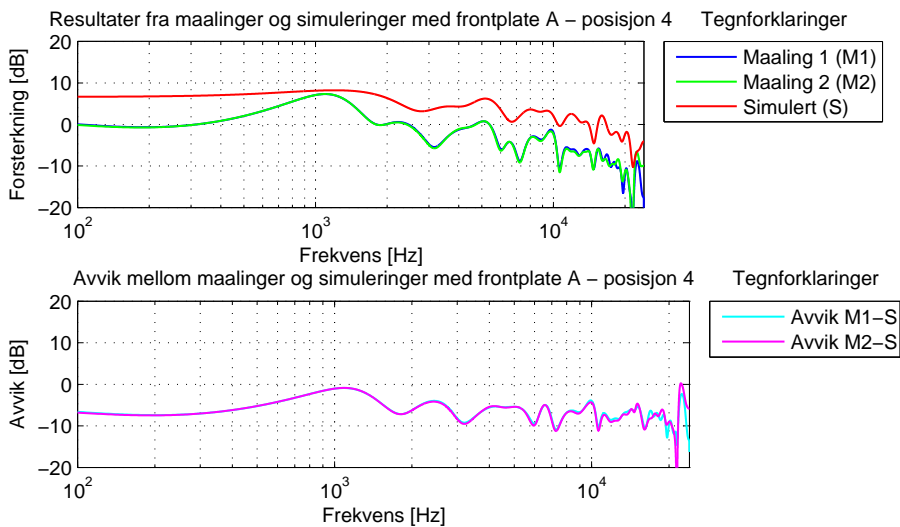
I figur A.8 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate 0 i mottakerposisjon 10 vist.

## A.2 Målinger og simuleringer med frontplate A



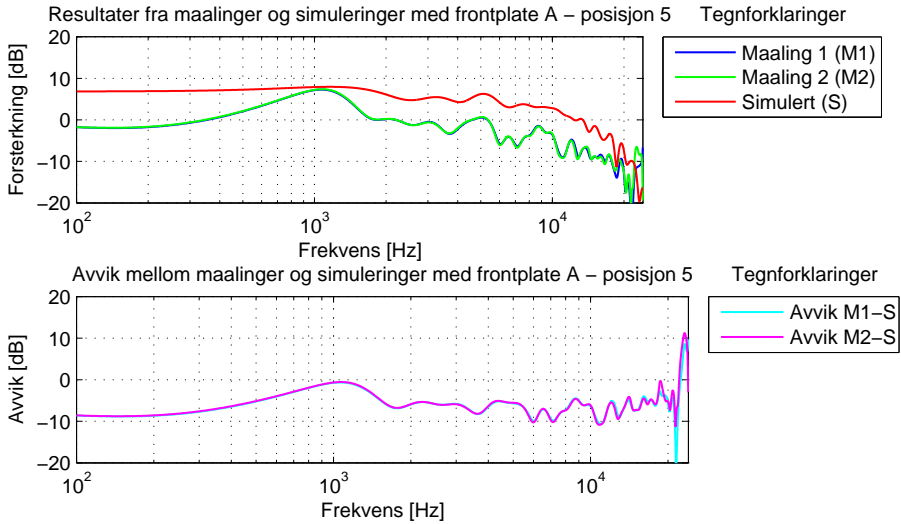
**Figur A.9:** Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 3

I figur A.9 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i mottakerposisjon 3 vist.



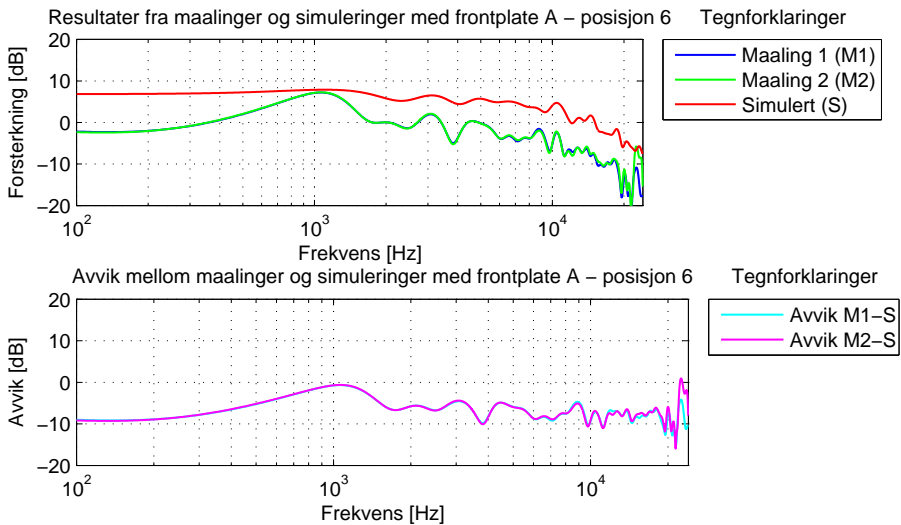
**Figur A.10:** Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 4

I figur A.10 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i mottakerposisjon 4 vist.



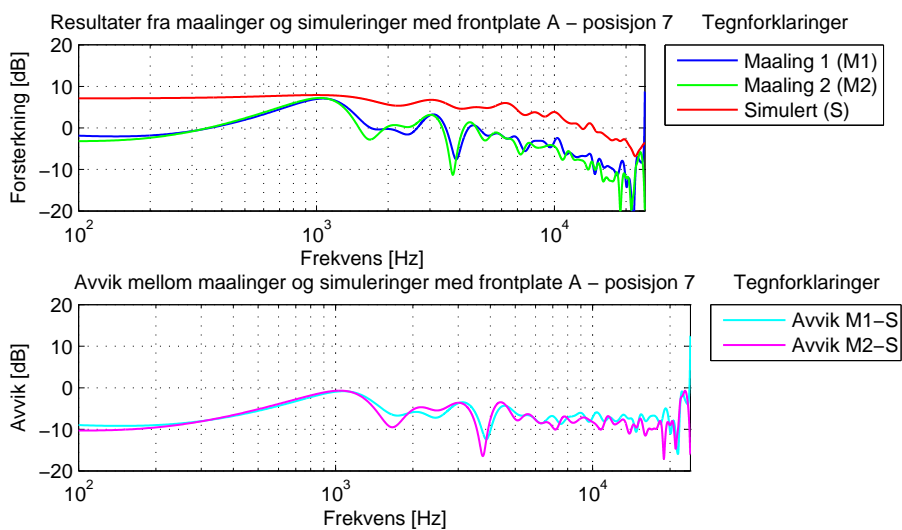
**Figur A.11:** Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 5

I figur A.11 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i mottakerposisjon 5 vist.



**Figur A.12:** Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 6

I figur A.12 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i mottakerposisjon 6 vist.

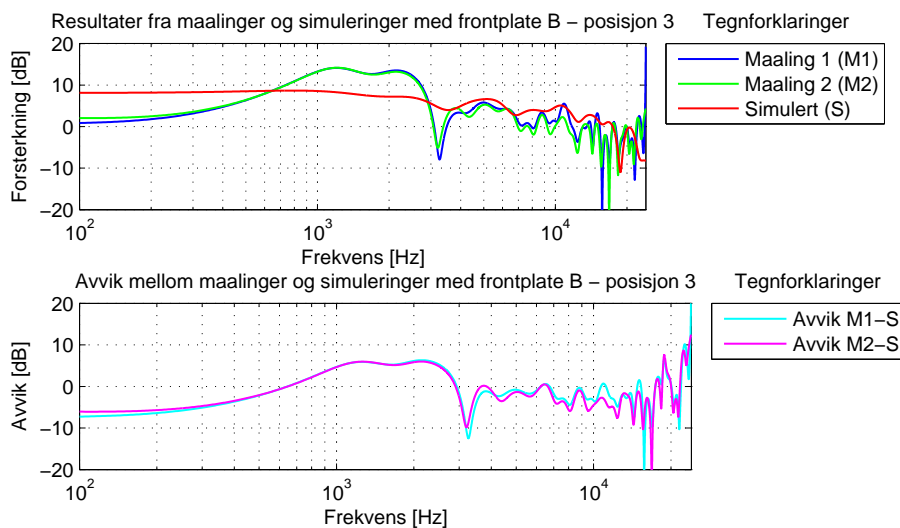


**Figur A.13:** Resultater med frontplate A - mottakerposisjon 7

I figur A.13 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i mottakerposisjon 7 vist.

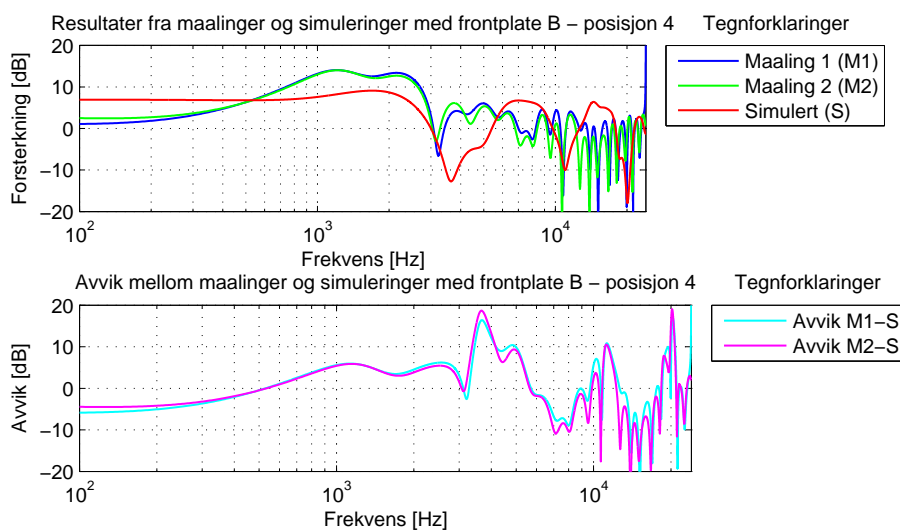


### A.3 Målinger og simuleringer med frontplate B



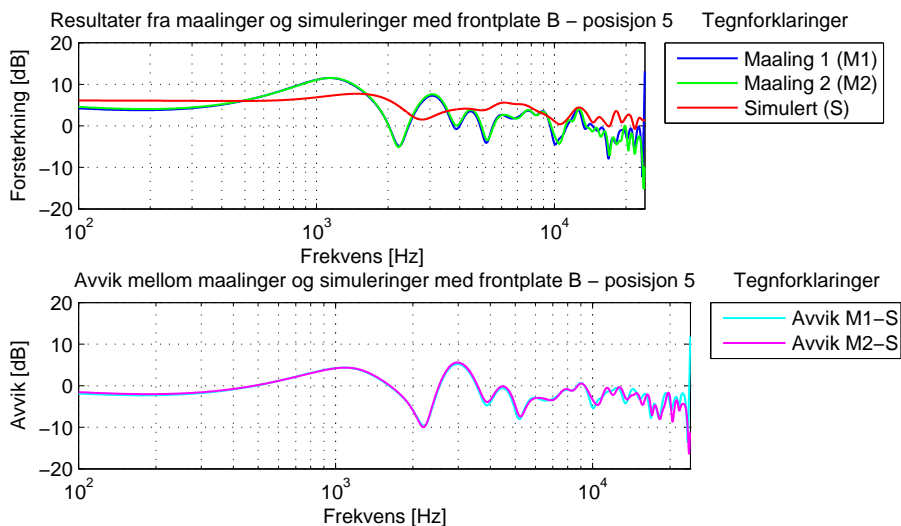
**Figur A.14:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 3

I figur A.14 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate B i mottakerposisjon 3 vist.



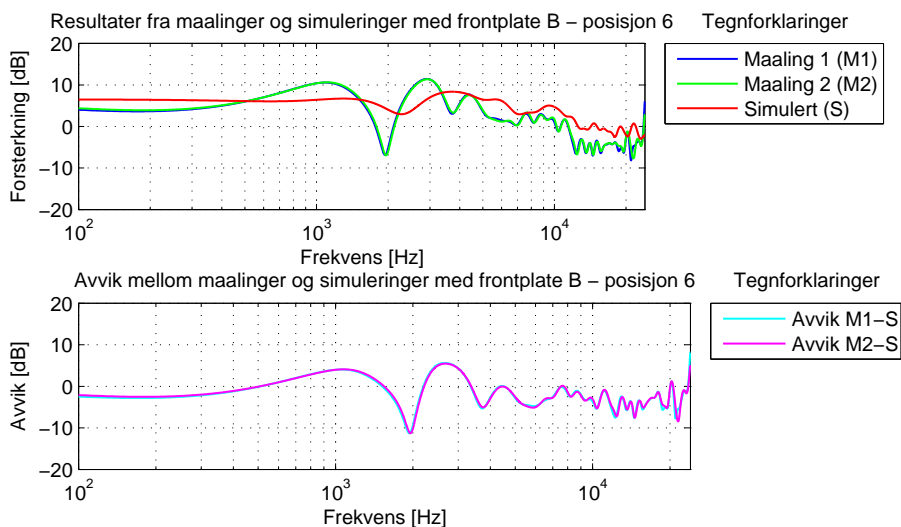
**Figur A.15:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 4

I figur A.15 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate B i mottakerposisjon 4 vist.



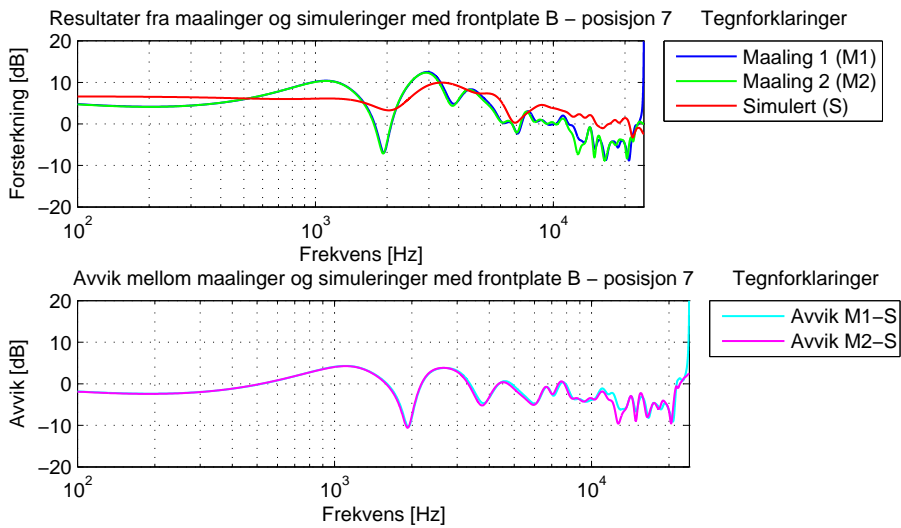
**Figur A.16:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 5

I figur A.16 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate B i mottakerposisjon 5 vist.



**Figur A.17:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 6

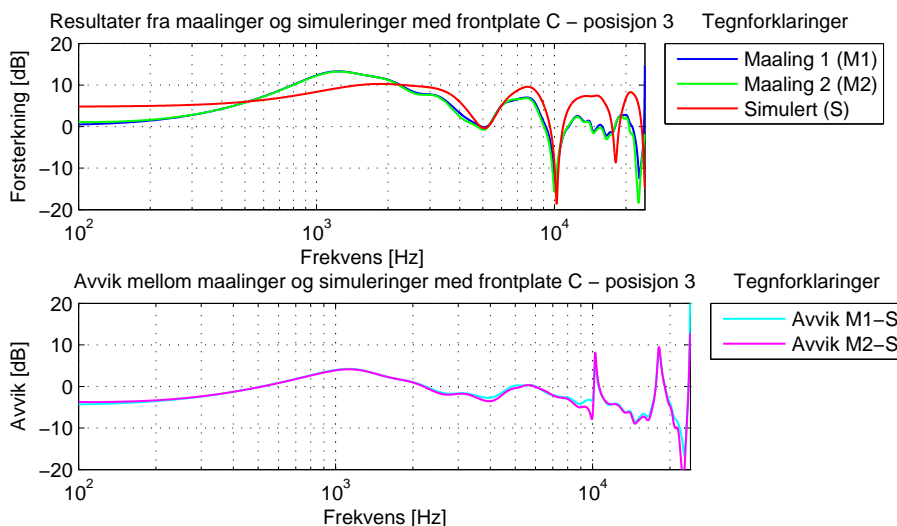
I figur A.17 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate B i mottakerposisjon 6 vist.



**Figur A.18:** Resultater med frontplate B - mottakerposisjon 7

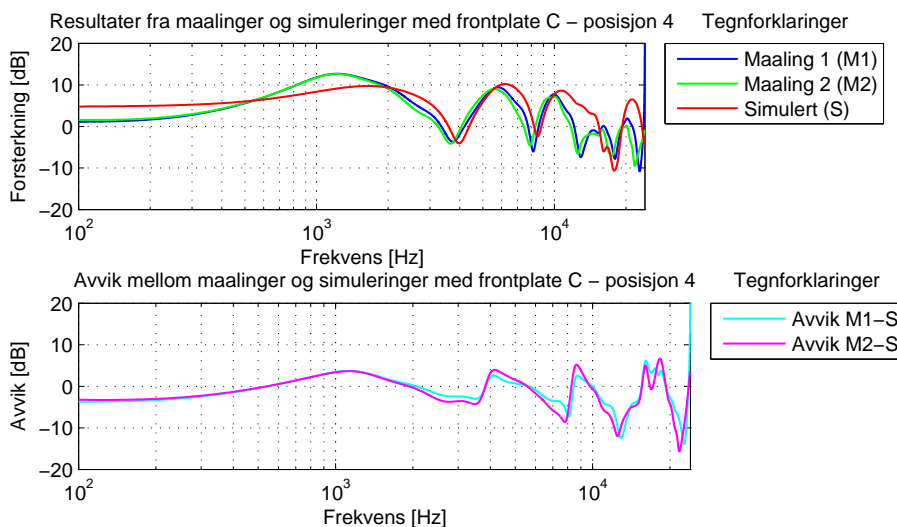
I figur A.18 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate A i mottakerposisjon 7 vist.

### A.4 Målinger og simuleringer med frontplate C



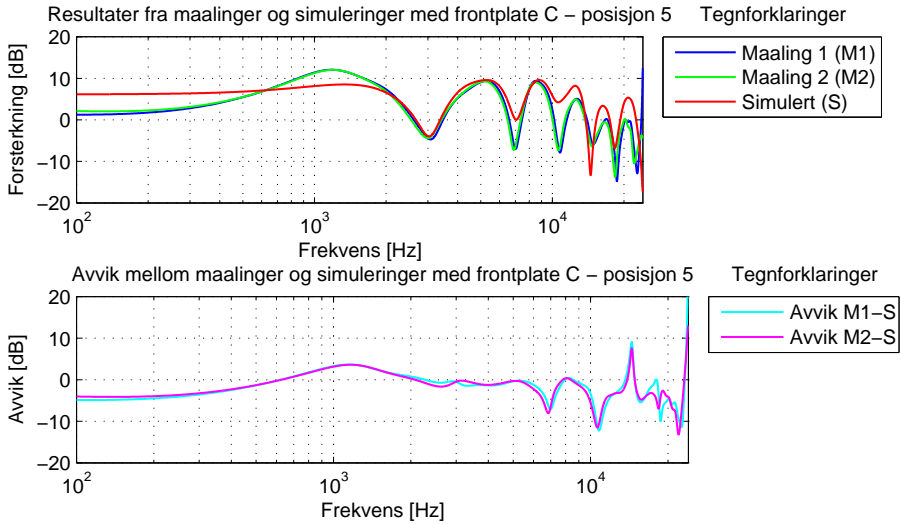
**Figur A.19:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 3

I figur A.19 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i mottakerposisjon 3 vist.



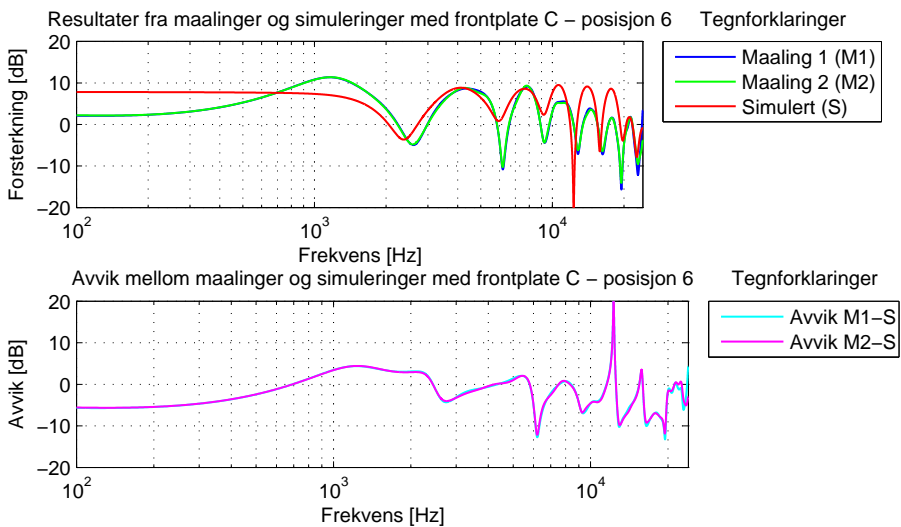
**Figur A.20:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 4

I figur A.20 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i mottakerposisjon 4 vist.



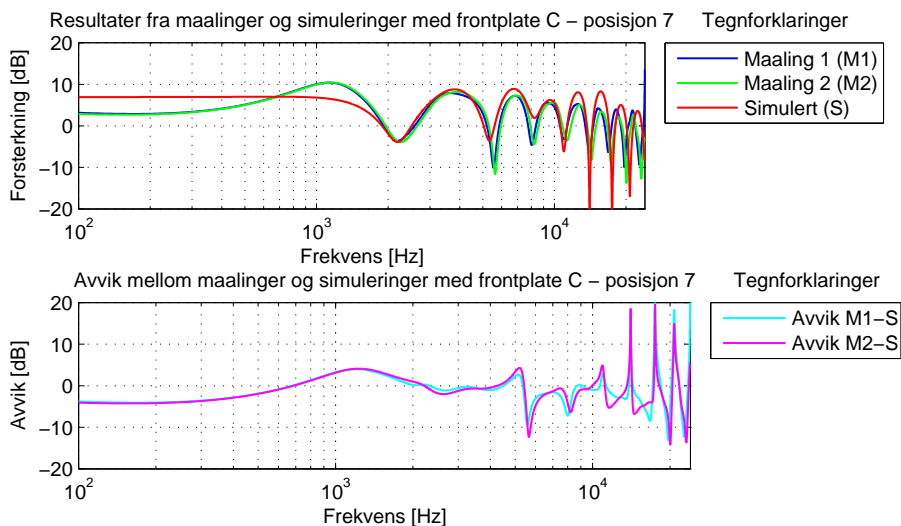
**Figur A.21:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 5

I figur A.21 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i mottakerposisjon 5 vist.



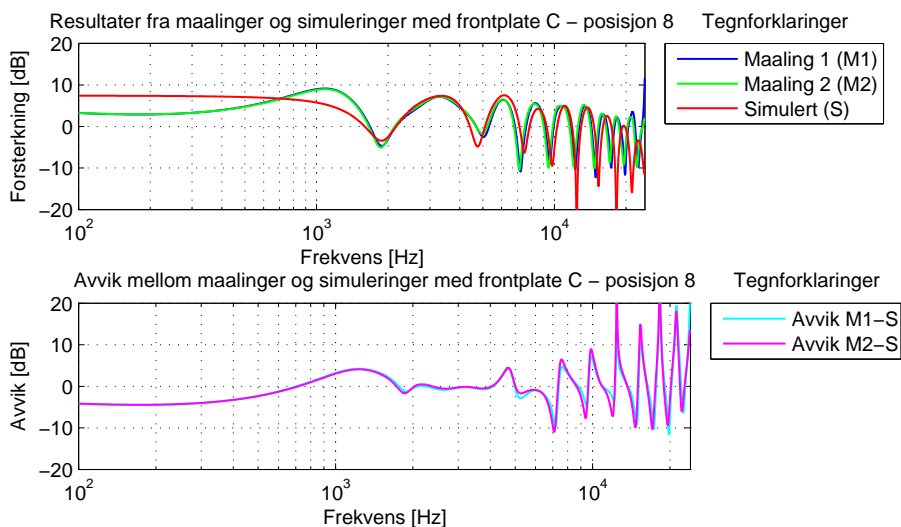
**Figur A.22:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 6

I figur A.22 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i mottakerposisjon 6 vist.



**Figur A.23:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 7

I figur A.23 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i mottakerposisjon 7 vist.



**Figur A.24:** Resultater med frontplate C - mottakerposisjon 8

I figur A.24 er resultater fra målinger og simuleringer med frontplate C i mottakerposisjon 8 vist.





# Vedlegg **B**

## Oversikt over filer i filarkiv

I vedlagte zip-arkiv ligger EDB1toolbox, målingene, Matlab-kodene og simuleringene.

- EDB1toolbox ligger plassert i mappen:  
`/Matlab/EDB1toolbox/`
- Målingene ligger plassert i mappene:  
`/Matlab/Measurement/2014-02-03/`  
`/Matlab/Measurement/2014-02-20/`  
`/Matlab/Measurement/2014-02-21/`  
`/Matlab/Measurement/2014-05-29/`
- Matlab-kodene ligger plassert i mappen:  
`/Matlab/Measurement/Frontplate/`
- Simuleringene ligger plassert i mappene:  
`/Matlab/Measurement/Frontplate/fp0-simulation-jm/`  
`/Matlab/Measurement/Frontplate/fpa-simulation-jm/`  
`/Matlab/Measurement/Frontplate/fpb-simulation-jm/`  
`/Matlab/Measurement/Frontplate/fpc-simulation-jm/`  
`/Matlab/Measurement/Frontplate/mp-simulation-jm/`



# Vedlegg

## Mottakerposisjoner

I figur 4.3 er plasseringen av mikrofonen på frontplatene under måling vist. I tabell C.1 er mottakerposisjonene vist som tabellverdier. Frontplate 0 og målepinne har nøyaktig samme posisjoner.

**Tabell C.1:** Plassering av mikrofon på frontplater - mottakerposisjoner

Frontplate 0	Posisjon 0	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6	Posisjon 7	Posisjon 8	Posisjon 9	Posisjon 10
x-akse	0.0000	0.0100	0.0200	0.0300	0.0400	0.0500	0.0600	0.0700	0.0800	0.0900	0.1000
y-akse	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
z-akse	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013

Frontplate A	Posisjon 0	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6	Posisjon 7
x-akse	0.0000	0.0100	0.0200	0.0300	0.0400	0.0500	0.0600	0.0700
y-akse	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
z-akse	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0387

Frontplate B	Posisjon 0	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6	Posisjon 7
x-akse	0.0000	0.0100	0.0200	0.0300	0.0400	0.0500	0.0600	0.0700
y-akse	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
z-akse	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0187	-0.0187	-0.0187	-0.0187

Frontplate C	Posisjon 0	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6	Posisjon 7	Posisjon 8
x-akse	0.0000	0.0100	0.0200	0.0281	0.0362	0.0443	0.0523	0.0604	0.0685
y-akse	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
z-akse	-0.0387	-0.0387	-0.0387	-0.0328	-0.0269	-0.0211	-0.0152	-0.0093	-0.0034



# Vedlegg **D**

## Simuleringsmodeller

For å kunne gjøre simuleringer i EDB1toolbox må man generere eller lage en .cad-fil som beskriver geometrien til høytalerkassen med frontplate. Slike .cad-filer er bygd opp av hjørnepunkter med x-, y- og z-koordinater og plan som forbinder de ulike hjørnepunktene. Alle .cad-filer er skrevet i klartekst og er dermed enkle å kunne justere manuelt, eller opprette ved hjelp av enkle script.

### D.1 Simuleringsmodell for målepinne

Simuleringsmodellen for målepinnen er laget på egen hånd da det ikke finnes script for å kunne opprette denne type geometri automatisk.

### D.2 Simuleringsmodell for frontplate 0

Simuleringsmodellen for frontplate 0 er laget på egen hånd da det ikke finnes script for å kunne opprette denne type geometri automatisk.

Nedenfor er simuleringsmodellen for frontplate 0 vist. De øvre simuleringsmodellene for frontplate A, B og C er basert på samme oppsett.

```
1 % Frontplate 0
2
3 %CORNERS
4
5     1  -0.1100000  -0.1100000  -0.24
6     2   0.1100000  -0.1100000  -0.24
7     3   0.1100000   0.1100000  -0.24
8     4  -0.1100000   0.1100000  -0.24
9     5  -0.1100000  -0.1100000   0
10    6   0.1100000  -0.1100000   0
11    7   0.1100000   0.1100000   0
12    8  -0.1100000   0.1100000   0
13
14 %PLANES
15
16     1 / /RIGID
17     1 4 3 2
```

```
18
19 2 / /RIGID
20 5 6 7 8
21
22 3 / /RIGID
23 1 2 6 5
24
25 4 / /RIGID
26 3 4 8 7
27
28 5 / /RIGID
29 2 3 7 6
30
31 6 / /RIGID
32 1 5 8 4
```

### D.3 Simuleringsmodell for frontplate A

Simuleringsmodellen for frontplate A er laget ved bruk av scriptet `GEOMakelspconeinbox.m`. Følgende kommandolinje er benyttet:

```
GEOMakelspconeinbox(frontplate-a.cad,0.075,0.075,8,0.04,0.22,0.22).
```

### D.4 Simuleringsmodell for frontplate B

Simuleringsmodellen for frontplate B er laget på egen hånd da det ikke finnes script for å kunne opprette denne type geometri automatisk.

### D.5 Simuleringsmodell for frontplate C

Simuleringsmodellen for frontplate C er laget ved bruk av scriptet `GEOMakelspconeinbox.m`. Følgende kommandolinje er benyttet:

```
GEOMakelspconeinbox(frontplate-c.cad,0.075,0.02,8,0.04,0.22,0.22).
```

# Vedlegg E

## Matlab-koder

Dette vedlegget inneholder et utvalg av Matlab-koder som har blitt laget i forbindelse med målinger og simuleringer.

### E.1 Matlab-koder for målinger

#### E.1.1 Opprettelse av «workspace» for alle målinger

Denne Matlab-koden leser inn alle målinger og lagrer frekvensresponsene til `measurement.mat`.

```
1 %
2 % Lese inn maalinger for frontplate 0, A, B og C
3 % Scriptet lagrer frekvensresponsene for maalingene i .mat-fil
4 %
5
6 % Blanke ut Workspace
7 clear all;
8 close all;
9
10 % Plassering av maaledata
11 filepath = cellstr('E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement
    \2014-05-29\');
12
13
14 % Plassering av maalinger
15 dirpath = cellstr(['\Frittfeltmal\';'\Frontplate_0\';'\Frontplate_A\';'
    \Frontplate_B\';'\Frontplate_C\']);
16
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18
19
20 % Filnavn for 'frittfelt'-maalinger - felles for alle frontplate
21 fritttsign = cellstr(['frittfelt_pos_00_sign_1.wmb';'
    frittfelt_pos_00_sign_2.wmb';'frittfelt_pos_01_sign_1.wmb';'
    frittfelt_pos_01_sign_2.wmb'; ...
22 'frittfelt_pos_02_sign_1.wmb';'frittfelt_pos_02_sign_2.wmb';'
    frittfelt_pos_03_sign_1.wmb';'frittfelt_pos_03_sign_2.wmb';'
    frittfelt_pos_04_sign_1.wmb';...
23 'frittfelt_pos_04_sign_2.wmb';'frittfelt_pos_05_sign_1.wmb';'
    frittfelt_pos_05_sign_2.wmb';'frittfelt_pos_06_sign_1.wmb';'
    frittfelt_pos_06_sign_2.wmb';...

```

```

24 'frittfelt_pos_07_sign_1.wmb';'frittfelt_pos_07_sign_2.wmb';'
    frittfelt_pos_08_sign_1.wmb';'frittfelt_pos_08_sign_2.wmb';'
    frittfelt_pos_09_sign_1.wmb';...
25 'frittfelt_pos_09_sign_2.wmb';'frittfelt_pos_10_sign_1.wmb';'
    frittfelt_pos_10_sign_2.wmb'];
26
27 % Filnavn for 'signal'-maalinger for frontplate 0
28 signfile_0 = cellstr(['fp_0_pos_00_sign_1.wmb';'fp_0_pos_00_sign_2.wmb
    ';'fp_0_pos_01_sign_1.wmb';'fp_0_pos_01_sign_2.wmb'; ...
29 'fp_0_pos_02_sign_1.wmb';'fp_0_pos_02_sign_2.wmb';'fp_0_pos_03_sign_1.
    wmb';'fp_0_pos_03_sign_2.wmb';'fp_0_pos_04_sign_1.wmb';...
30 'fp_0_pos_04_sign_2.wmb';'fp_0_pos_05_sign_1.wmb';'fp_0_pos_05_sign_2.
    wmb';'fp_0_pos_06_sign_1.wmb';'fp_0_pos_06_sign_2.wmb';...
31 'fp_0_pos_07_sign_1.wmb';'fp_0_pos_07_sign_2.wmb';'fp_0_pos_08_sign_1.
    wmb';'fp_0_pos_08_sign_2.wmb';'fp_0_pos_09_sign_1.wmb';...
32 'fp_0_pos_09_sign_2.wmb';'fp_0_pos_10_sign_1.wmb';'fp_0_pos_10_sign_2.
    wmb']);
33
34 % Filnavn for 'stoy'-maalinger for frontplate 0
35 stoy_0 = cellstr(['fp_0_pos_00_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_00_stoy_2.wmb';'
    fp_0_pos_01_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_01_stoy_2.wmb'; ...
36 'fp_0_pos_02_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_02_stoy_2.wmb';'fp_0_pos_03_stoy_1.
    wmb';'fp_0_pos_03_stoy_2.wmb';'fp_0_pos_04_stoy_1.wmb';...
37 'fp_0_pos_04_stoy_2.wmb';'fp_0_pos_05_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_05_stoy_2.
    wmb';'fp_0_pos_06_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_06_stoy_2.wmb';...
38 'fp_0_pos_07_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_07_stoy_2.wmb';'fp_0_pos_08_stoy_1.
    wmb';'fp_0_pos_08_stoy_2.wmb';'fp_0_pos_09_stoy_1.wmb';...
39 'fp_0_pos_09_stoy_2.wmb';'fp_0_pos_10_stoy_1.wmb';'fp_0_pos_10_stoy_2.
    wmb']);
40
41 % Filnavn for 'signal'-maalinger for frontplate A
42 signfile_a = cellstr(['fp_a_pos_0_sign_1.wmb';'fp_a_pos_0_sign_2.wmb';
    'fp_a_pos_1_sign_1.wmb';'fp_a_pos_1_sign_2.wmb'; ...
43 'fp_a_pos_2_sign_1.wmb';'fp_a_pos_2_sign_2.wmb';'fp_a_pos_3_sign_1.wmb'
    ';'fp_a_pos_3_sign_2.wmb';'fp_a_pos_4_sign_1.wmb';...
44 'fp_a_pos_4_sign_2.wmb';'fp_a_pos_5_sign_1.wmb';'fp_a_pos_5_sign_2.wmb'
    ';'fp_a_pos_6_sign_1.wmb';'fp_a_pos_6_sign_2.wmb';...
45 'fp_a_pos_7_sign_1.wmb';'fp_a_pos_7_sign_2.wmb']);
46
47 % Filnavn for 'stoy'-maalinger for frontplate A
48 stoy_a = cellstr(['fp_a_pos_0_stoy_1.wmb';'fp_a_pos_0_stoy_2.wmb';'
    fp_a_pos_1_stoy_1.wmb';'fp_a_pos_1_stoy_2.wmb'; ...
49 'fp_a_pos_2_stoy_1.wmb';'fp_a_pos_2_stoy_2.wmb';'fp_a_pos_3_stoy_1.wmb'
    ';'fp_a_pos_3_stoy_2.wmb';'fp_a_pos_4_stoy_1.wmb';...
50 'fp_a_pos_4_stoy_2.wmb';'fp_a_pos_5_stoy_1.wmb';'fp_a_pos_5_stoy_2.wmb'
    ';'fp_a_pos_6_stoy_1.wmb';'fp_a_pos_6_stoy_2.wmb';...
51 'fp_a_pos_7_stoy_1.wmb';'fp_a_pos_7_stoy_2.wmb']);
52
53 % Filnavn for 'signal'-maalinger for frontplate B
54 signfile_b = cellstr(['fp_b_pos_0_sign_1.wmb';'fp_b_pos_0_sign_2.wmb';
    'fp_b_pos_1_sign_1.wmb';'fp_b_pos_1_sign_2.wmb'; ...
55 'fp_b_pos_2_sign_1.wmb';'fp_b_pos_2_sign_2.wmb';'fp_b_pos_3_sign_1.wmb'
    ';'fp_b_pos_3_sign_2.wmb';'fp_b_pos_4_sign_1.wmb';...
56 'fp_b_pos_4_sign_2.wmb';'fp_b_pos_5_sign_1.wmb';'fp_b_pos_5_sign_2.wmb'
    ';'fp_b_pos_6_sign_1.wmb';'fp_b_pos_6_sign_2.wmb';...
57 'fp_b_pos_7_sign_1.wmb';'fp_b_pos_7_sign_2.wmb']);
58
59 % Filnavn for 'stoy'-maalinger for frontplate B
60 stoy_b = cellstr(['fp_b_pos_0_stoy_1.wmb';'fp_b_pos_0_stoy_2.wmb';'
    fp_b_pos_1_stoy_1.wmb';'fp_b_pos_1_stoy_2.wmb'; ...
61 'fp_b_pos_2_stoy_1.wmb';'fp_b_pos_2_stoy_2.wmb';'fp_b_pos_3_stoy_1.wmb'
    ';'fp_b_pos_3_stoy_2.wmb';'fp_b_pos_4_stoy_1.wmb';...

```



```

62 'fp_b_pos_4_stoy_2.wmb';'fp_b_pos_5_stoy_1.wmb';'fp_b_pos_5_stoy_2.wmb'
    ;'fp_b_pos_6_stoy_1.wmb';'fp_b_pos_6_stoy_2.wmb';...
63 'fp_b_pos_7_stoy_1.wmb';'fp_b_pos_7_stoy_2.wmb']];
64
65 % Filnavn for 'signal'-maalinger for frontplate C
66 signfile_c = cellstr(['fp_c_pos_0_sign_1.wmb';'fp_c_pos_0_sign_2.wmb';
    'fp_c_pos_1_sign_1.wmb';'fp_c_pos_1_sign_2.wmb'; ...
67 'fp_c_pos_2_sign_1.wmb';'fp_c_pos_2_sign_2.wmb';'fp_c_pos_3_sign_1.wmb'
    ;'fp_c_pos_3_sign_2.wmb';'fp_c_pos_4_sign_1.wmb';...
68 'fp_c_pos_4_sign_2.wmb';'fp_c_pos_5_sign_1.wmb';'fp_c_pos_5_sign_2.wmb'
    ;'fp_c_pos_6_sign_1.wmb';'fp_c_pos_6_sign_2.wmb';...
69 'fp_c_pos_7_sign_1.wmb';'fp_c_pos_7_sign_2.wmb';'fp_c_pos_8_sign_1.wmb'
    ;'fp_c_pos_8_sign_2.wmb']]);
70
71 % Filnavn for 'stoy'-maalinger for frontplate C
72 stoy_c = cellstr(['fp_c_pos_0_stoy_1.wmb';'fp_c_pos_0_stoy_2.wmb';'
    fp_c_pos_1_stoy_1.wmb';'fp_c_pos_1_stoy_2.wmb'; ...
73 'fp_c_pos_2_stoy_1.wmb';'fp_c_pos_2_stoy_2.wmb';'fp_c_pos_3_stoy_1.wmb'
    ;'fp_c_pos_3_stoy_2.wmb';'fp_c_pos_4_stoy_1.wmb';...
74 'fp_c_pos_4_stoy_2.wmb';'fp_c_pos_5_stoy_1.wmb';'fp_c_pos_5_stoy_2.wmb'
    ;'fp_c_pos_6_stoy_1.wmb';'fp_c_pos_6_stoy_2.wmb';...
75 'fp_c_pos_7_stoy_1.wmb';'fp_c_pos_7_stoy_2.wmb';'fp_c_pos_8_stoy_1.wmb'
    ;'fp_c_pos_8_stoy_2.wmb']]);
76
77 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
78
79 % Generere filplasseringer for 'frittsign'-maalinger
80 for j=1:length(frittsign)
81     frittsignfilnavn(j) = fullfile(filepath,dirpath(1),frittsign(j)
    );
82 end
83
84 clear j;
85
86
87 % Generere filplasseringer for 'signal'-maalinger for frontplate 0
88 for j=1:length(signfile_0)
89     signfilnavn_0(j) = fullfile(filepath,dirpath(2),signfile_0(j));
90 end
91
92 clear j;
93
94
95 % Generere filplasseringer for 'stoy'-maalinger for frontplate 0
96 for j=1:length(stoy_0)
97     stoyfilnavn_0(j) = fullfile(filepath,dirpath(2),stoy_0(j));
98 end
99
100 clear j;
101
102
103 % Generere filplasseringer for 'signal'-maalinger for frontplate A
104 for j=1:length(signfile_a)
105     signfilnavn_a(j) = fullfile(filepath,dirpath(3),signfile_a(j));
106 end
107
108 clear j;
109
110
111 % Generere filplasseringer for 'stoy'-maalinger for frontplate A
112 for j=1:length(stoy_a)
113     stoyfilnavn_a(j) = fullfile(filepath,dirpath(3),stoy_a(j));

```

```
114 end
115
116 clear j;
117
118 % Generere filplasseringer for 'signal'-maalinger for frontplate B
119 for j=1:length(signfile_b)
120     signfilnavn_b(j) = fullfile(filepath,dirpath(4),signfile_b(j));
121 end
122
123 clear j;
124
125 % Generere filplasseringer for 'stoy'-maalinger for frontplate B
126 for j=1:length(stoy_b)
127     stoyfilnavn_b(j) = fullfile(filepath,dirpath(4),stoy_b(j));
128 end
129
130
131 clear j;
132
133 % Generere filplasseringer for 'signal'-maalinger for frontplate C
134 for j=1:length(signfile_c)
135     signfilnavn_c(j) = fullfile(filepath,dirpath(5),signfile_c(j));
136 end
137
138 clear j;
139
140 % Generere filplasseringer for 'stoy'-maalinger for frontplate B
141 for j=1:length(stoy_c)
142     stoyfilnavn_c(j) = fullfile(filepath,dirpath(5),stoy_c(j));
143 end
144
145 clear j;
146
147
148 % Lese inn 'frittstign'-maalinger
149 for i = 1:length(frittstignfilnavn)
150     [ir_frittstign(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(frittstignfilnavn(i)));
151 end
152
153 clear i;
154
155 % Lese inn 'stign'-maalinger for frontplate 0
156 for i = 1:length(signfilnavn_0)
157     [ir_sign_0(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(signfilnavn_0(i)));
158 end
159
160 clear i;
161
162 % Lese inn 'stoy'-maalinger for frontplate 0
163 for i = 1:length(stoyfilnavn_0)
164     [ir_stoy_0(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(stoyfilnavn_0(i)));
165 end
166
167 clear i;
168
169 % Lese inn 'stign'-maalinger for frontplate A
170 for i = 1:length(signfilnavn_a)
171     [ir_sign_a(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(signfilnavn_a(i)));
172 end
173
174 clear i;
```

```

176
177 clear i;
178
179
180 % Lese inn 'stoy'-maalinger for frontplate A
181 for i = 1: length(stoyfilnavn_a)
182     [ir_stoy_a(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(stoyfilnavn_a(i)));
183 end
184
185 clear i;
186
187 % Lese inn 'sign'-maalinger for frontplate B
188 for i = 1:length(signfilnavn_b)
189     [ir_sign_b(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(signfilnavn_b(i)));
190 end
191
192 clear i;
193
194
195 % Lese inn 'stoy'-maalinger for frontplate B
196 for i = 1: length(stoyfilnavn_b)
197     [ir_stoy_b(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(stoyfilnavn_b(i)));
198 end
199
200 clear i;
201
202 % Lese inn 'sign'-maalinger for frontplate C
203 for i = 1:length(signfilnavn_c)
204     [ir_sign_c(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(signfilnavn_c(i)));
205 end
206
207 clear i;
208
209
210 % Lese inn 'stoy'-maalinger for frontplate C
211 for i = 1: length(stoyfilnavn_c)
212     [ir_stoy_c(:,i),Fs(i)]=loadimp(char(stoyfilnavn_c(i)));
213 end
214
215 clear i;
216
217
218 % Finne toppunkt til impulsresponsene
219
220 for i = 1:size(ir_frittsign,2)
221     ir_fritt_peak(i) = findinit(ir_frittsign(:,i).^2,0.0001);
222 end
223 clear i;
224
225 for i = 1:size(ir_sign_0,2)
226     ir_sign_0_peak(i) = findinit(ir_sign_0(:,i).^2,0.0001);
227 end
228 clear i;
229
230 for i = 1:size(ir_sign_a,2)
231     ir_sign_a_peak(i) = findinit(ir_sign_a(:,i).^2,0.0001);
232 end
233 clear i;
234
235 for i = 1:size(ir_sign_b,2)
236     ir_sign_b_peak(i) = findinit(ir_sign_b(:,i).^2,0.0001);
237 end

```

```

238 clear i;
239
240 for i = 1:size(ir_sign_c,2)
241     ir_sign_c_peak(i) = findinit(ir_sign_c(:,i).^2,0.0001);
242 end
243 clear i;
244
245
246 % Fs i tusendeler
247 Fsk = Fs(1)./1000;
248
249
250 nfft = 16384;
251 measure_nfft = nfft;
252 measure_Fs = Fs(1);
253
254 %Angi tre nivaaer for tidsvinduer - alle tidsvindu har lengde 1 ms foer
    peak
255 w=7; %Tidsvindu etter peak i ms
256 w2=1; %Tidsvindu etter peak i ms
257 w3=3; %Tidsinvud etter peak i ms
258
259
260
261 %2 ms tidsvindu
262 for i = 1:size(ir_sign_0,2)
263     ir_frittsign_F_2ms(:,i) = fft(ir_frittsign(ir_fritt_peak-Fsk:
        ir_fritt_peak+(Fsk*w2),i),nfft);
264     ir_sign_F_0_2ms(:,i) = fft(ir_sign_0(ir_sign_0_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_0_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
265     ir_stoy_F_0_2ms(:,i) = fft(ir_stoy_0(ir_sign_0_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_0_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
266 end
267 clear i;
268
269 for i = 1:size(ir_sign_a,2)
270     ir_sign_F_a_2ms(:,i) = fft(ir_sign_a(ir_sign_a_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_a_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
271     ir_stoy_F_a_2ms(:,i) = fft(ir_stoy_a(ir_sign_a_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_a_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
272 end
273 clear i;
274
275 for i = 1:size(ir_sign_b,2)
276     ir_sign_F_b_2ms(:,i) = fft(ir_sign_b(ir_sign_b_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_b_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
277     ir_stoy_F_b_2ms(:,i) = fft(ir_stoy_b(ir_sign_b_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_b_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
278 end
279 clear i;
280
281 for i = 1:size(ir_sign_c,2)
282     ir_sign_F_c_2ms(:,i) = fft(ir_sign_c(ir_sign_c_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_c_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
283     ir_stoy_F_c_2ms(:,i) = fft(ir_stoy_c(ir_sign_c_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_c_peak(i)+(Fsk*w2),i),nfft);
284 end
285 clear i;
286
287
288 measure_frittsign_2ms = abs(ir_frittsign_F_2ms(1:nfft/2+1,:));
289 measure_0_sign_2ms = abs(ir_sign_F_0_2ms(1:nfft/2+1,:));

```

```

290 measure_0_stoy_2ms = abs(ir_stoy_F_0_2ms(1:nfft/2+1,:));
291 measure_a_sign_2ms = abs(ir_sign_F_a_2ms(1:nfft/2+1,:));
292 measure_a_stoy_2ms = abs(ir_stoy_F_a_2ms(1:nfft/2+1,:));
293 measure_b_sign_2ms = abs(ir_sign_F_b_2ms(1:nfft/2+1,:));
294 measure_b_stoy_2ms = abs(ir_stoy_F_b_2ms(1:nfft/2+1,:));
295 measure_c_sign_2ms = abs(ir_sign_F_c_2ms(1:nfft/2+1,:));
296 measure_c_stoy_2ms = abs(ir_stoy_F_c_2ms(1:nfft/2+1,:));
297
298
299 %4 ms tidsvindu
300 for i = 1:size(ir_sign_0,2)
301     ir_frittsign_F_4ms(:,i) = fft(ir_frittsign(ir_fritt_peak-Fsk:
        ir_fritt_peak+(Fsk*w3),i),nfft);
302     ir_sign_F_0_4ms(:,i) = fft(ir_sign_0(ir_sign_0_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_0_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
303     ir_stoy_F_0_4ms(:,i) = fft(ir_stoy_0(ir_sign_0_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_0_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
304 end
305 clear i;
306
307 for i = 1:size(ir_sign_a,2)
308     ir_sign_F_a_4ms(:,i) = fft(ir_sign_a(ir_sign_a_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_a_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
309     ir_stoy_F_a_4ms(:,i) = fft(ir_stoy_a(ir_sign_a_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_a_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
310 end
311 clear i;
312
313 for i = 1:size(ir_sign_b,2)
314     ir_sign_F_b_4ms(:,i) = fft(ir_sign_b(ir_sign_b_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_b_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
315     ir_stoy_F_b_4ms(:,i) = fft(ir_stoy_b(ir_sign_b_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_b_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
316 end
317 clear i;
318
319 for i = 1:size(ir_sign_c,2)
320     ir_sign_F_c_4ms(:,i) = fft(ir_sign_c(ir_sign_c_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_c_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
321     ir_stoy_F_c_4ms(:,i) = fft(ir_stoy_c(ir_sign_c_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_c_peak(i)+(Fsk*w3),i),nfft);
322 end
323 clear i;
324
325
326 measure_frittsign_4ms = abs(ir_frittsign_F_4ms(1:nfft/2+1,:));
327 measure_0_sign_4ms = abs(ir_sign_F_0_4ms(1:nfft/2+1,:));
328 measure_0_stoy_4ms = abs(ir_stoy_F_0_4ms(1:nfft/2+1,:));
329 measure_a_sign_4ms = abs(ir_sign_F_a_4ms(1:nfft/2+1,:));
330 measure_a_stoy_4ms = abs(ir_stoy_F_a_4ms(1:nfft/2+1,:));
331 measure_b_sign_4ms = abs(ir_sign_F_b_4ms(1:nfft/2+1,:));
332 measure_b_stoy_4ms = abs(ir_stoy_F_b_4ms(1:nfft/2+1,:));
333 measure_c_sign_4ms = abs(ir_sign_F_c_4ms(1:nfft/2+1,:));
334 measure_c_stoy_4ms = abs(ir_stoy_F_c_4ms(1:nfft/2+1,:));
335
336
337 %8 ms tidsvindu
338 for i = 1:size(ir_sign_0,2)
339     ir_frittsign_F_8ms(:,i) = fft(ir_frittsign(ir_fritt_peak-Fsk:
        ir_fritt_peak+(Fsk*w),i),nfft);
340     ir_sign_F_0_8ms(:,i) = fft(ir_sign_0(ir_sign_0_peak(i)-Fsk:
        ir_sign_0_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);

```

```

341         ir_stoy_F_0_8ms(:,i) = fft(ir_stoy_0(ir_sign_0_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_0_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
342     end
343     clear i;
344
345     for i = 1:size(ir_sign_a,2)
346         ir_sign_F_a_8ms(:,i) = fft(ir_sign_a(ir_sign_a_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_a_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
347         ir_stoy_F_a_8ms(:,i) = fft(ir_stoy_a(ir_sign_a_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_a_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
348     end
349     clear i;
350
351     for i = 1:size(ir_sign_b,2)
352         ir_sign_F_b_8ms(:,i) = fft(ir_sign_b(ir_sign_b_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_b_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
353         ir_stoy_F_b_8ms(:,i) = fft(ir_stoy_b(ir_sign_b_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_b_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
354     end
355     clear i;
356
357     for i = 1:size(ir_sign_c,2)
358         ir_sign_F_c_8ms(:,i) = fft(ir_sign_c(ir_sign_c_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_c_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
359         ir_stoy_F_c_8ms(:,i) = fft(ir_stoy_c(ir_sign_c_peak(i)-Fsk:
           ir_sign_c_peak(i)+(Fsk*w),i),nfft);
360     end
361     clear i;
362
363
364     measure_frittsign_8ms = abs(ir_frittsign_F_8ms(1:nfft/2+1,:));
365     measure_0_sign_8ms = abs(ir_sign_F_0_8ms(1:nfft/2+1,:));
366     measure_0_stoy_8ms = abs(ir_stoy_F_0_8ms(1:nfft/2+1,:));
367     measure_a_sign_8ms = abs(ir_sign_F_a_8ms(1:nfft/2+1,:));
368     measure_a_stoy_8ms = abs(ir_stoy_F_a_8ms(1:nfft/2+1,:));
369     measure_b_sign_8ms = abs(ir_sign_F_b_8ms(1:nfft/2+1,:));
370     measure_b_stoy_8ms = abs(ir_stoy_F_b_8ms(1:nfft/2+1,:));
371     measure_c_sign_8ms = abs(ir_sign_F_c_8ms(1:nfft/2+1,:));
372     measure_c_stoy_8ms = abs(ir_stoy_F_c_8ms(1:nfft/2+1,:));
373
374
375     save('measurement.mat','measure_frittsign_2ms','measure_0_sign_2ms','
           measure_0_stoy_2ms','measure_a_sign_2ms','measure_a_stoy_2ms',...
376     'measure_b_sign_2ms','measure_b_stoy_2ms','measure_c_sign_2ms','
           measure_c_stoy_2ms','measure_frittsign_4ms',...
377     'measure_0_sign_4ms','measure_0_stoy_4ms','measure_a_sign_4ms','
           measure_a_stoy_4ms', ...
378     'measure_b_sign_4ms','measure_b_stoy_4ms','measure_c_sign_4ms','
           measure_c_stoy_4ms','measure_frittsign_8ms',...
379     'measure_0_sign_8ms','measure_0_stoy_8ms','measure_a_sign_8ms','
           measure_a_stoy_8ms', ...
380     'measure_b_sign_8ms','measure_b_stoy_8ms','measure_c_sign_8ms','
           measure_c_stoy_8ms','measure_nfft','measure_Fs')

```

## E.2 Matlab-koder for simuleringer

### E.2.1 Eksempel på simuleringsoppsett

Dette er et eksempel på simuleringsoppsett. Simuleringsoppsettet er benyttet for simuleringer med frontplate 0.

```

1  % Simulation setup for frontplate 0
2
3  global FSAMP CAIR RHOAIR SHOWTEXT
4  % CAIR is approx 331.6 + 0.6*T-celsius
5  FSAMP = 48000; CAIR = 344; RHOAIR = 1.21;
6  SHOWTEXT = 1;
7
8  % Filepath and input file
9  jm = 1; % JM: Filepath for Joakim Myren
10 %ps = 1; % PS: Filepath for Peter Svensson
11
12
13
14 if jm == 1
15     Filepath = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\
16     Frontplate\fp0-simulation-jm\';
17     CADfile = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\
18     Frontplate\simulation_model_frontplate0.cad';
19
20 elseif ps == 1
21     Filepath = '/Users/svensson/Documents/Projekt/Dokum_EDdatain/
22     Frontplate/fp0-simulation-ps/';
23     CADfile = '/Users/svensson/Documents/Projekt/Dokum_EDdatain/
24     Frontplate/simulation_model_frontplate0.cad';
25
26 else
27     Filepath = pwd;
28     CADfile = fullfile(pwd, 'simulation_model_frontplate0.cad')
29 end
30
31 Filestem = mfilename;
32
33 % Calculation parameters
34 EDcalcmethod = 'n';
35 directsound = 1;
36 specorder = 2; % irrelevant
37 difforder = 2; % irrelevant
38 elemsize = [1 0.71 0.71 0.35]; % irrelevant
39 nedgesubs = 2; % irrelevant
40 calcpaths = 1;
41 calcirs = 1;
42 calctfs = 0;
43 calcinteq = 0;
44 calcinteq_souterms = 1;
45 calcinteq_edgeterms = 1;
46 calcinteq_propagate = 1;
47 inteq_solmethod = 5;
48 inteq_niter = 20;
49 inteq_ngauss = 8;
50 inteq_discretizationtype = 2;
51 frequencies = logspace(log10(20), log10(24000), 100);
52
53 open_or_closed_model = 'closed';

```

```

51 | int_or_ext_model = 'ext';
52 |
53 | % Sources and receivers
54 | sources = [0 0 2.30];
55 | %receivers = [0 0 -0.0395];
56 | xposreceivers = [0.0000, 0.0100, 0.0200, 0.0300, 0.0400, 0.0500,
57 |                 0.0600, 0.0700, 0.0800, 0.0900, 0.1000];
58 | yposreceivers = [0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,
59 |                 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000];
60 | zposreceivers = [0.0013, 0.0013, 0.0013, 0.0013, 0.0013, 0.0013,
61 |                 0.0013, 0.0013, 0.0013, 0.0013, 0.0013];
62 | receivers = [xposreceivers' yposreceivers' zposreceivers'];
63 |
64 | % Extra parameters
65 | skipcorners = 1000000; Rstart = 0; saveindividualdiffirs = [1 0];
66 |
67 | if exist('doplot') == 1
68 |     if doplot == 1
69 |         nfft = 16384;
70 |         fvec = FSAMP/nfft*[0:nfft/2-1];
71 |
72 |         F = fft(full(irtot),nfft);
73 |
74 |         semilogx(fvec,20*log10(abs(F(1:nfft/2))))
75 |
76 |     end
77 | end

```

## E.2.2 Opprettelse av «workspace» for alle simuleringer

Denne Matlab-koden leser inn alle simuleringer og lagrer frekvensresponsene til `simulation_workspace_jm.mat`.

```

1 | clear all;
2 | close all;
3 |
4 | filepath0 = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\Frontplate\fp0
5 |             -simulation-jm\';
6 | filepath0edb1 = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\Frontplate
7 |                 \fp0-simulation-jm-edb1\';
8 | filepatha = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\Frontplate\fpa
9 |             -simulation-jm\';
10 | filepathb = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\Frontplate\fpb
11 |             -simulation-jm\';
12 | filepathc = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\Frontplate\fpc
13 |             -simulation-jm\';
14 | filepathmp = 'E:\Dropbox\Masteroppgave\Matlab\Measurement\Frontplate\mp
15 |              -simulation-jm\';
16 | nfft = 16384;
17 | simulation_nfft = nfft;
18 |
19 | for i = 1:11
20 |     stringmp = sprintf('%ssimulation_maalepinne_1_%d_ir.mat',
21 |                       filepathmp, i);

```



```

17         load(stringmp)
18         simulation_mp_jm(:,i) = fft(full(irtot),nfft);
19         clear CAIR;
20         clear EDcalcmethod;
21         clear Rstart;
22         clear irdiff;
23         clear irdirect;
24         clear irgeom;
25         clear irtot;
26     end
27
28
29     clear i;
30
31     for i = 1:11
32
33         string1 = sprintf('%ssimulation_frontplate0_1_%d_ir.mat',
34             filepath0, i);
35         load(string1)
36         simulation_0_jm_ump(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./fft(full(
37             irdirect),nfft);
38         simulation_0_jm(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./simulation_mp_jm
39             (:,i);
40         clear CAIR;
41         clear EDcalcmethod;
42         clear Rstart;
43         clear irdiff;
44         clear irdirect;
45         clear irgeom;
46         clear irtot;
47     end
48
49     simulation_0_jm = abs(simulation_0_jm(1:nfft/2+1,:));
50     simulation_0_jm_ump = abs(simulation_0_jm_ump(1:nfft/2+1,:));
51
52
53     for i = 1:8
54
55         string2 = sprintf('%ssimulation_frontplatea_1_%d_ir.mat',
56             filepatha, i);
57         load(string2)
58         simulation_a_jm_ump(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./fft(full(
59             irdirect),nfft);
60         simulation_a_jm(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./simulation_mp_jm
61             (:,i);
62         clear CAIR;
63         clear EDcalcmethod;
64         clear Rstart;
65         clear irdiff;
66         clear irdirect;
67         clear irgeom;
68         clear irtot;
69     end
70
71     simulation_a_jm = abs(simulation_a_jm(1:nfft/2+1,:));
72     simulation_a_jm_ump = abs(simulation_a_jm_ump(1:nfft/2+1,:));
73
74
75     for i = 1:8
76
77         string3 = sprintf('%ssimulation_frontplateb_1_%d_ir.mat',
78             filepathb, i);

```

```

72     load(string3)
73     simulation_b_jm_ump(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./fft(full(
       irdirect),nfft);
74     simulation_b_jm(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./simulation_mp_jm
       (:,i);
75     clear CAIR;
76     clear EDcalcmethod;
77     clear Rstart;
78     clear irdiff;
79     clear irdirect;
80     clear irgeom;
81     clear irtot;
82 end
83
84 simulation_b_jm = abs(simulation_b_jm(1:nfft/2+1,:));
85 simulation_b_jm_ump = abs(simulation_b_jm_ump(1:nfft/2+1,:));
86
87
88
89 for i = 1:9
90     string4 = sprintf('%ssimulation_frontplatec_1_%d_ir.mat',
       filepathc, i);
91     load(string4)
92     simulation_c_jm_ump(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./fft(full(
       irdirect),nfft);
93     simulation_c_jm(:,i) = fft(full(irtot),nfft)./simulation_mp_jm
       (:,i);
94     clear CAIR;
95     clear EDcalcmethod;
96     clear Rstart;
97     clear irdiff;
98     clear irdirect;
99     clear irgeom;
100    clear irtot;
101 end
102
103 simulation_c_jm = abs(simulation_c_jm(1:nfft/2+1,:));
104 simulation_c_jm_ump = abs(simulation_c_jm_ump(1:nfft/2+1,:));
105
106
107 simulation_Fs = FSAMP;
108
109 save ('simulation_workspace_jm.mat', 'simulation_0_jm', 'simulation_a_jm'
       , ...
110 'simulation_b_jm', 'simulation_c_jm', 'simulation_nfft', 'simulation_Fs',
       ...
111 'simulation_0_jm_ump', 'simulation_a_jm_ump', 'simulation_b_jm_ump',
       simulation_c_jm_ump')

```

## E.3 Matlab-koder for presentasjon av målinger og simuleringer

### E.3.1 Nøyaktighet ved gjentakende målinger

Denne Matlab-koden presenterer nøyaktigheten for gjentakende målinger grafisk.

```

1  close all;
2  clear all;
3
4  load('measurement.mat');
5  load('simulation_workspace_jm.mat');
6
7  fvecm = measure_Fs/measure_nfft * [0:measure_nfft/2];
8  fvecs = simulation_Fs/measure_nfft * [0:measure_nfft/2];
9
10
11  colorm = {'k','b','g','r','c','m','y'};
12  coloravvik = {'k','b','g','r','c','m','y',':k',':b',':g',':r',':c',':m',
13              ':y'};
14  colorm2 = {':k',':b',':g',':r',':c',':m',':y'};
15  colors = {'-k','-b','-g','-r','-c','-m','--y'};
16  legendavvik = {'Pos. 0','Pos. 1','Pos. 2','Pos. 3','Pos. 4','Pos. 5','
17                Pos. 6','Pos. 7','Pos. 8','Pos. 9','Pos. 10'};
18  lw=1.00;
19  k=1;
20  %AVVIK FPO FPA
21  figure(k)
22  subplot(2,1,1)
23  for i = 1:11
24      gav0(:,i) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_0_sign_2ms(:,2*i-1)
25          ./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
26              measure_0_sign_2ms(:,2*i)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))
27              ,char(coloravvik(i)),'LineWidth',lw);
28
29  hold on
30  end
31  grid on
32  axis([100 24000 -5 5])
33
34  gav0=gav0(1,:);
35  h=legend(gav0,legendavvik(1:11),'Location','NorthEastOutside');
36  v = get(h,'title');
37  set(v,'string','Tegnforklaringer');
38  titlestring = sprintf('Avvik mellom to gjentakende maalinger
39      med frontplate 0');
40  title(titlestring)
41  xlabel('Frekvens [Hz]')
42  ylabel('Avvik [dB]')
43
44  clear i;
45
46  subplot(2,1,2)
47  for i = 1:8
48      gava(:,i)=semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_a_sign_2ms(:,2*i-1)
49          ./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
50              measure_a_sign_2ms(:,2*i)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))
51              ,char(coloravvik(i)),'LineWidth',lw);
52
53  hold on

```

```

45 end
46 grid on
47 axis([100 24000 -5 5])
48
49 gava=gava(1,:);
50 h=legend(gava,legendavvik(1:8),'Location','NorthEastOutside');
51 v = get(h,'title');
52 set(v,'string','Tegnforklaringer');
53 titlestring = sprintf('Avvik mellom to gjentakende maalinge
54 med frontplate A');
55 title(titlestring)
56 xlabel('Frekvens [Hz]')
57 ylabel('Avvik [dB]')
58 print -depsc2 'E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
59 fp0_fpa_avvik.eps'
60
61 k=k+1;
62 clear i;
63
64 %AVVIK FPB FPC
65 figure(k)
66 subplot(2,1,1)
67 for i = 1:8
68     gavb(:,i) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_b_sign_2ms(:,2*
69     i-1)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
70     measure_b_sign_2ms(:,2*i)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))
71     ,char(coloravvik(i)),'LineWidth',lw);
72 hold on
73 end
74 grid on
75 axis([100 24000 -5 5])
76
77 gavb=gavb(1,:);
78 h=legend(gavb,legendavvik(1:8),'Location','NorthEastOutside');
79 v = get(h,'title');
80 set(v,'string','Tegnforklaringer');
81 titlestring = sprintf('Avvik mellom to gjentakende maalinge
82 med frontplate B');
83 title(titlestring)
84 xlabel('Frekvens [Hz]')
85 ylabel('Avvik [dB]')
86
87 clear i;
88
89 subplot(2,1,2)
90 for i = 1:9
91     gavc(:,i)=semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_c_sign_2ms(:,2*i
92     -1)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
93     measure_c_sign_2ms(:,2*i)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))
94     ,char(coloravvik(i)),'LineWidth',lw);
95 hold on
96 end
97 grid on
98 axis([100 24000 -5 5])
99
100 gavc=gavc(1,:);
101 h=legend(gavc,legendavvik(1:9),'Location','NorthEastOutside');
102 v = get(h,'title');
103 set(v,'string','Tegnforklaringer');

```

```

98     titlestring = sprintf('Avvik mellom to gjentakende maalinger
99         med frontplate C');
100    title(titlestring)
101    xlabel('Frekvens [Hz]')
102    ylabel('Avvik [dB]')
103    print -depsc2 'E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
104        fpb_fpc_avvik.eps'
105    k = k + 1;

```

### E.3.2 Målepinnens innvirkning på frekvensresponsen til simuleringer

Denne Matlab-koden presenterer målepinnens innvirkning på simuleringene grafisk.

```

1  close all;
2  clear all;
3
4  load('measurement.mat');
5  load('simulation_workspace_jm.mat');
6
7  fvecm = measure_Fs/measure_nfft * [0:measure_nfft/2];
8  fvecs = simulation_Fs/measure_nfft * [0:measure_nfft/2];
9
10
11  colorm = {'k','b','g','r','c','m','y'};
12  coloravvik = {'k','b','g','r','c','m','y',':k',':b',':g',':r',':c',':m',
13              ':y'};
14  colorm2 = {':k',':b',':g',':r',':c',':m',':y'};
15  colors = {'--k','--b','--g','--r','--c','--m','--y'};
16
17  legendavvik = {'Pos. 0','Pos. 1','Pos. 2','Pos. 3','Pos. 4','Pos. 5','
18              Pos. 6','Pos. 7','Pos. 8','Pos. 9','Pos. 10'};
19
20  legendtekst4 = {'Frontplate 0','Frontplate A','Frontplate B','
21              Frontplate C'};
22  lw=1.00;
23  k=1;
24
25  figure(k)
26  subplot(3,1,1)
27  g(:,1) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(simulation_0_jm(:,1))))), char(
28              colorm(2)), 'LineWidth',lw);
29  hold on
30  g(:,2) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(simulation_a_jm(:,1))))), char(
31              colorm(3)), 'LineWidth',lw);
32  g(:,3) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(simulation_b_jm(:,1))))), char(
33              colorm(4)), 'LineWidth',lw);
34  g(:,4) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(simulation_c_jm(:,1))))), char(
35              colorm(5)), 'LineWidth',lw);
36  grid on
37  axis([100 24000 -20 20])
38  xlabel('Frekvens [Hz]')
39  ylabel('Forsterkning [dB]')

```

```

36 | titlestring = sprintf('Resultater fra simuleringer med alle frontplater
    | med maalepinne - posisjon 0');
37 | title(titlestring)
38 | g=g(1,:);
39 | h=legend(g,legendtekst4,'Location','NorthEastOutside');
40 | v = get(h,'title');
41 | set(v,'string','Tegnforklaringer');
42 |
43 | clear g;
44 |
45 | subplot(3,1,2)
46 | g(:,1) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_0_jm_ump(:,1))))), char
    | (colorm(2)), 'LineWidth',lw);
47 | hold on
48 | g(:,2) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_a_jm_ump(:,1))))), char
    | (colorm(3)), 'LineWidth',lw);
49 | g(:,3) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_b_jm_ump(:,1))))), char
    | (colorm(4)), 'LineWidth',lw);
50 | g(:,4) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_c_jm_ump(:,1))))), char
    | (colorm(5)), 'LineWidth',lw);
51 | grid on
52 | axis([100 24000 -20 20])
53 | xlabel('Frekvens [Hz]')
54 | ylabel('Forsterkning [dB]')
55 | titlestring = sprintf('Resultater fra simuleringer med alle frontplater
    | uten maalepinne - posisjon 0');
56 | title(titlestring)
57 | g=g(1,:);
58 | h=legend(g,legendtekst4,'Location','NorthEastOutside');
59 | v = get(h,'title');
60 | set(v,'string','Tegnforklaringer');
61 |
62 |
63 | str2 = sprintf('E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
    | fp0abc_pos0_simu.eps');
64 | print('-depsc2', str2);
65 |
66 | clear g;
67 |
68 |
69 |
70 |
71 |
72 |
73 | k=k+1;
74 |
75 |
76 |
77 |
78 |
79 |
80 | %AVVIM SIMULERINGER MED OG UTEN MAALEPINNE
81 | figure(k)
82 |
83 |
84 | subplot(2,1,1)
85 | for i = 1:11
86 |     gav0(:,i) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(simulation_0_jm(:,i))))
    |     -20*log10(abs(simulation_0_jm_ump(:,i))),char(coloravvik(i)
    |     ), 'LineWidth',lw);
87 | hold on
88 | end

```

```

89 grid on
90 axis([100 24000 -10 0])
91
92 gav0=gav0(1,:);
93 h=legend(gav0,legendavvik(1:11),'Location','NorthEastOutside');
94 v = get(h,'title');
95 set(v,'string','Tegnforklaringer');
96 titlestring = sprintf('Avvik mellom simuleringer med og uten
    maalepinne med frontplate 0');
97 title(titlestring)
98 xlabel('Frekvens [Hz]')
99 ylabel('Avvik [dB]')
100
101 clear i;
102
103 subplot(2,1,2)
104 for i = 1:8
105     gava(:,i)= semilogx(fvecm,20*log10(abs(simulation_a_jm(:,i)))
        -20*log10(abs(simulation_a_jm_ump(:,i))),char(coloravvik(i)
        ),'LineWidth',lw);
106 hold on
107 end
108 grid on
109 axis([100 24000 -10 0])
110
111 gava=gava(1,:);
112 h=legend(gava,legendavvik(1:8),'Location','NorthEastOutside');
113 v = get(h,'title');
114 set(v,'string','Tegnforklaringer');
115 titlestring = sprintf('Avvik mellom simuleringer med og uten
    maalepinne med frontplate A');
116 title(titlestring)
117 xlabel('Frekvens [Hz]')
118 ylabel('Avvik [dB]')
119 print -depsc2 'E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
    fp0_fpa_avvik_simu.eps'
120
121
122 k=k+1;
123
124 clear i;
125
126
127
128
129
130 figure(k)
131
132
133 subplot(2,1,1)
134 for i = 1:8
135     gavb(:,i) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(simulation_b_jm(:,i)))
        -20*log10(abs(simulation_b_jm_ump(:,i))),char(coloravvik(i)
        ),'LineWidth',lw);
136 hold on
137 end
138 grid on
139 axis([100 24000 -10 0])
140
141 gavb=gavb(1,:);
142 h=legend(gavb,legendavvik(1:8),'Location','NorthEastOutside');
143 v = get(h,'title');

```

```

144     set(v,'string','Tegnforklaringer');
145     titlestring = sprintf('Avvik mellom simuleringer med og uten
146         maalepinne med frontplate B');
147     title(titlestring)
148     xlabel('Frekvens [Hz]')
149     ylabel('Avvik [dB]')
150
151 clear i;
152
153 subplot(2,1,2)
154 for i = 1:9
155     gavg(:,i) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(simulation_c_jm(:,i)))
156         -20*log10(abs(simulation_c_jm_ump(:,i))),char(coloravvik(i)
157         ),'LineWidth',lw);
158
159 hold on
160 end
161 grid on
162 axis([100 24000 -10 0])
163
164 gavg=gavg(1,:);
165 h=legend(gavg,legendavvik(1:9),'Location','NorthEastOutside');
166 v = get(h,'title');
167 set(v,'string','Tegnforklaringer');
168 titlestring = sprintf('Avvik mellom simuleringer med og uten
169     maalepinne med frontplate C');
170 title(titlestring)
171 xlabel('Frekvens [Hz]')
172 ylabel('Avvik [dB]')
173 print -depsc2 'E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
174     fpb_fpc_avvik_simu.eps'
175
176 k=k+1;
177
178 clear i;

```

### E.3.3 Sammenligninger av målinger og simuleringer

Denne Matlab-koden presenterer sammenligningene av målinger og simuleringer grafisk.

```

1 close all;
2 clear all;
3
4 load('measurement.mat');
5 load('simulation_workspace_jm.mat');
6
7 fvecm = measure_Fs/measure_nfft * [0:measure_nfft/2];
8 fvecs = simulation_Fs/measure_nfft * [0:measure_nfft/2];
9
10
11 colorm = {'k','b','g','r','c','m','y'};
12 coloravvik = {'k','b','g','r','c','m','y',':k',':b',':g',':r',':c',':m',
13     ':y'};
14 colorm2 = {':k',':b',':g',':r',':c',':m',':y'};
15 colors = {'--k','--b','--g','--r','--c','--m','--y'};
16
17 legendavvik = {'Pos. 0','Pos. 1','Pos. 2','Pos. 3','Pos. 4','Pos. 5',
18     'Pos. 6','Pos. 7','Pos. 8','Pos. 9','Pos. 10'};

```



```

17 %legendtekst = {'Pos. 0 - maalt','Pos. 0 - simu.','Pos. 1 - maalt','Pos
    . 1 - simu.','Pos. 2 - maalt','Pos. 2 - simu.','...
18 %'Pos. 3 - maalt','Pos. 3 - simu.','Pos. 4 - maalt','Pos. 4 - simu.','
    Pos. 5 - maalt','Pos. 5 - simu.','...
19 %'Pos. 6 - maalt','Pos. 6 - simu.','Pos. 7 - maalt','Pos. 7 - simu.','
    Pos. 8 - maalt','Pos. 8 - simu.','...
20 %'Pos. 9 - maalt','Pos. 9 - simu.','Pos. 10 - maalt','Pos. 10 - simu
    .'};
21 %legendtekst = {'2 ms tidsvindu','4 ms tidsvindu','8 ms tidsvindu','
    Simulert'};
22 %legendtekst = {' 2 ms tidsvindu',' 4 ms tidsvindu',' Simulert'};
23 legendtekst = {'Maaling 1 (M1)','Maaling 2 (M2)','Simulert (S)'};
24 legendtekst2 = {'Avvik M1-S','Avvik M2-S'};%,'4 ms - simulert',' 2 ms -
    2 ms','4 ms - 4 ms'};
25 legendtekst3 = {' 2 ms tidsvindu',' 4 ms tidsvindu'};
26 legendtekst4 = {'Frontplate 0','Frontplate A','Frontplate B','
    Frontplate C'};
27 lw=1.00;
28 %figure(1)
29 k=1;
30
31 figure(k)
32 subplot(3,1,1)
33 g(:,1) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_0_sign_2ms(:,(1))./
    measure_frittsign_2ms(:,(1))))), char(colorm(2)),'LineWidth',lw);
34 hold on
35 g(:,2) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_a_sign_2ms(:,(1))./
    measure_frittsign_2ms(:,(1))))), char(colorm(3)),'LineWidth',lw);
36 g(:,3) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_b_sign_2ms(:,(1))./
    measure_frittsign_2ms(:,(1))))), char(colorm(4)),'LineWidth',lw);
37 g(:,4) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_c_sign_2ms(:,(1))./
    measure_frittsign_2ms(:,(1))))), char(colorm(5)),'LineWidth',lw);
38 grid on
39 axis([100 24000 -20 20])
40 xlabel('Frekvens [Hz]')
41 ylabel('Forsterkning [dB]')
42 titlestring = sprintf('Resultater fra maalinger med alle frontplater -
    posisjon 0');
43 title(titlestring)
44 g=g(1,:);
45 h=legend(g,legendtekst4,'Location','NorthEastOutside');
46 v = get(h,'title');
47 set(v,'string','Tegnforklaringer');
48
49 clear g;
50
51 subplot(3,1,2)
52 g(:,1) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_0_jm(:,1)))), char(
    colorm(2)),'LineWidth',lw);
53 hold on
54 g(:,2) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_a_jm(:,1)))), char(
    colorm(3)),'LineWidth',lw);
55 g(:,3) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_b_jm(:,1)))), char(
    colorm(4)),'LineWidth',lw);
56 g(:,4) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_c_jm(:,1)))), char(
    colorm(5)),'LineWidth',lw);
57 grid on
58 axis([100 24000 -20 20])
59 xlabel('Frekvens [Hz]')
60 ylabel('Forsterkning [dB]')
61 titlestring = sprintf('Resultater fra simuleringer med alle frontplater
    - posisjon 0');

```

```

62 title(titlestring)
63 g=g(1,:);
64 h=legend(g,legendtekst4,'Location','NorthEastOutside');
65 v = get(h,'title');
66 set(v,'string','Tegnforklaringer');
67
68
69 str2 = sprintf('E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
    fp0abc_pos0.eps');
70 print('-depsc2', str2);
71
72 clear g;
73
74 k=k+1;
75
76 for i = 1:11
77 figure(k)
78 subplot(3,1,1)
79     g(:,1) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_0_sign_2ms(:,(2*i
    -1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))), char(colorm(2)),
    'LineWidth',lw);
80     hold on
81     g(:,2) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_0_sign_2ms(:,(2*i
    -1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))), char(colorm(3)),
    'LineWidth',lw);
82     g(:,3) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_0_jm(:,i)))),
    char(colorm(4)), 'LineWidth',lw);
83     grid on
84     axis([100 24000 -20 20])
85     xlabel('Frekvens [Hz]')
86     ylabel('Forsterkning [dB]')
87     titlestring = sprintf('Resultater fra maalinger og simuleringer
    med frontplate 0 - posisjon %d', i-1);
88     title(titlestring)
89     g=g(1,:);
90     h=legend(g,legendtekst,'Location','NorthEastOutside');
91     v = get(h,'title');
92     set(v,'string','Tegnforklaringer');
93
94 subplot(3,1,2)
95     g2(:,1) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_0_sign_2ms(:,2*i
    -1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
    simulation_0_jm(:,i))), char(colorm(5)), 'LineWidth',lw);
96     hold on
97     g2(:,2) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_0_sign_2ms(:,2*i
    -1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))-20*log10(abs(
    simulation_0_jm(:,i))), char(colorm(6)), 'LineWidth',lw);
98     axis([100 24000 -20 20])
99     grid on
100    g2=g2(1,:);
101    h=legend(g2,legendtekst2,'Location','NorthEastOutside');
102    v = get(h,'title');
103    set(v,'string','Tegnforklaringer');
104    titlestring = sprintf('Avvik mellom maalinger og simuleringer
    med frontplate 0 - posisjon %d', i-1);
105    title(titlestring)
106    xlabel('Frekvens [Hz]')
107    ylabel('Avvik [dB]')
108
109    str2 = sprintf('E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
    fp0_pos_%d.eps',i-1);
110    print('-depsc2', str2);

```

```

111
112 k=k+1;
113 end
114
115
116
117
118
119 for i = 1:8
120 figure(k)
121 subplot(3,1,1)
122 g(:,1) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_a_sign_2ms(:,(2*i
-1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))), char(colorm(2)),
'LineWidth',lw);
123
124 hold on
125 g(:,2) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_a_sign_2ms(:,(2*i
))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))), char(colorm(3)),
'LineWidth',lw);
126
127 g(:,3) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_a_jm(:,i))))),
char(colorm(4)), 'LineWidth',lw);
128
129 grid on
130 axis([100 24000 -20 20])
131 xlabel('Frekvens [Hz]')
132 ylabel('Forsterkning [dB]')
133 titlestring = sprintf('Resultater fra maalinger og simuleringer
med frontplate A - posisjon %d', i-1);
134
135 title(titlestring)
136 g=g(1,:);
137 h=legend(g,legendtekst,'Location','NorthEastOutside');
138 v = get(h,'title');
139 set(v,'string','Tegnforklaringer');
140
141 subplot(3,1,2)
142 g2(:,1) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_a_sign_2ms(:,2*i
-1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
simulation_a_jm(:,i))), char(colorm(5)), 'LineWidth',lw);
143
144 hold on
145 g2(:,2) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_a_sign_2ms(:,2*i
)./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))-20*log10(abs(
simulation_a_jm(:,i))), char(colorm(6)), 'LineWidth',lw);
146
147 axis([100 24000 -20 20])
148 grid on
149 g2=g2(1,:);
150 h=legend(g2,legendtekst2,'Location','NorthEastOutside');
151 v = get(h,'title');
152 set(v,'string','Tegnforklaringer');
153 titlestring = sprintf('Avvik mellom maalinger og simuleringer
med frontplate A - posisjon %d', i-1);
154
155 title(titlestring)
156 xlabel('Frekvens [Hz]')
157 ylabel('Avvik [dB]')
158
159 str2 = sprintf('E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
fpa_pos_%d.eps',i-1);
160 print('-depsc2', str2);
161
162 k=k+1;
163 end
164
165
166
167
168
169
170

```

```

161
162
163 for i = 1:8
164 figure(k)
165 subplot(3,1,1)
166 g(:,1) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_b_sign_2ms(:,(2*i
-1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))), char(colorm(2)),
'LineWidth',lw);
167 hold on
168 g(:,2) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_b_sign_2ms(:,(2*i
-1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))), char(colorm(3)),
'LineWidth',lw);
169 g(:,3) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_b_jm(:,i))),
char(colorm(4)), 'LineWidth',lw);
170 grid on
171 axis([100 24000 -20 20])
172 xlabel('Frekvens [Hz]')
173 ylabel('Forsterkning [dB]')
174 titlestring = sprintf('Resultater fra maalinger og simuleringer
med frontplate B - posisjon %d', i-1);
175 title(titlestring)
176 g=g(1,:);
177 h=legend(g,legendtekst,'Location','NorthEastOutside');
178 v = get(h,'title');
179 set(v,'string','Tegnforklaringer');
180
181 subplot(3,1,2)
182 g2(:,1) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_b_sign_2ms(:,2*i
-1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
simulation_b_jm(:,i))), char(colorm(5)), 'LineWidth',lw);
183 hold on
184 g2(:,2) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_b_sign_2ms(:,2*i)
./measure_frittsign_2ms(:,(2*i))))-20*log10(abs(
simulation_b_jm(:,i))), char(colorm(6)), 'LineWidth',lw);
185 axis([100 24000 -20 20])
186 grid on
187 g2=g2(1,:);
188 h=legend(g2,legendtekst2,'Location','NorthEastOutside');
189 v = get(h,'title');
190 set(v,'string','Tegnforklaringer');
191 titlestring = sprintf('Avvik mellom maalinger og simuleringer
med frontplate B - posisjon %d', i-1);
192 title(titlestring)
193 xlabel('Frekvens [Hz]')
194 ylabel('Avvik [dB]')
195
196 str2 = sprintf('E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
fpb_pos_%d.eps',i-1);
197 print('-depsc2', str2);
198
199 k=k+1;
200 end
201
202
203 for i = 1:9
204 figure(k)
205 subplot(3,1,1)
206 g(:,1) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_c_sign_2ms(:,(2*i
-1))./measure_frittsign_2ms(:,(2*i-1))))), char(colorm(2)),
'LineWidth',lw);
207 hold on
208 g(:,2) = semilogx(fvecm,(20*log10(abs(measure_c_sign_2ms(:,(2*i

```

```

    ) ./measure_frittsgn_2ms(:,(2*i))))), char(colorm(3)), '
    LineWidth',lw);
209 g(:,3) = semilogx(fvecs,(20*log10(abs(simulation_c_jm(:,i))))),
    char(colorm(4)), 'LineWidth',lw);
210 grid on
211 axis([100 24000 -20 20])
212 xlabel('Frekvens [Hz]')
213 ylabel('Forsterkning [dB]')
214 titlestring = sprintf('Resultater fra maalinger og simuleringer
    med frontplate C - posisjon %d', i-1);
215 title(titlestring)
216 g=g(1,:);
217 h=legend(g,legendtekst,'Location','NorthEastOutside');
218 v = get(h,'title');
219 set(v,'string','Tegnforklaringer');
220
221 subplot(3,1,2)
222 g2(:,1) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_c_sign_2ms(:,2*i
    -1) ./measure_frittsgn_2ms(:,(2*i-1))))-20*log10(abs(
    simulation_c_jm(:,i))), char(colorm(5)), 'LineWidth',lw);
223 hold on
224 g2(:,2) = semilogx(fvecm,20*log10(abs(measure_c_sign_2ms(:,2*i)
    ./measure_frittsgn_2ms(:,(2*i))))-20*log10(abs(
    simulation_c_jm(:,i))), char(colorm(6)), 'LineWidth',lw);
225 axis([100 24000 -20 20])
226 grid on
227 g2=g2(1,:);
228 h=legend(g2,legendtekst2,'Location','NorthEastOutside');
229 v = get(h,'title');
230 set(v,'string','Tegnforklaringer');
231 titlestring = sprintf('Avvik mellom maalinger og simuleringer
    med frontplate C - posisjon %d', i-1);
232 title(titlestring)
233 xlabel('Frekvens [Hz]')
234 ylabel('Avvik [dB]')
235
236 str2 = sprintf('E:/Dropbox/Masteroppgave/Rapport/figs/results/
    fpc_pos_%d.eps',i-1);
237 print('-depsc2', str2);
238
239 k=k+1;
240 end

```