

Masteroppgave i akustikk

Transduser med stabil åpningsvinkel over et stort  
frekvensområde

Design, konstruksjon og eksperimentelle målinger

Mathias Sæther



Institutt for Fysikk og Teknologi  
August 2009



# Forord

I forbindelse med masteroppgaven vil jeg først takke min hovedveileder Halvor Hobæk som alltid er imøtekommende og interessert i sine studenter. Deretter går takken til biveileder Rolf Korneliussen og Magne Vestrheim for gode råd og vink. En takk rettes også til Slettebakken ved mekanisk verksted, IFT, for presisjonsoppkutting av piezoelektriske element.

Masterstudiet overrasket meg på et punkt. Det krever faktisk mot å holde på med forsøk du aldri helt vet hvor ender. Det gode miljøet i akustikkgruppen blant ansatte og studenter har derfor vært uvurderlig. Både faglig og sosialt. Jeg vil spesielt trekke frem medstudent Espen Storheim. Hans hjelp med dataproblemer, korrekturlesing og andre faglige spørsmål er jeg svært takknemlig for. Sånt glemmer man ikke.

God hjelp fra familien har også vært viktig. Den økonomiske støtten i sommermånedene uten inntekt gjorde det lettere å holde fullt fokus. Til slutt vil jeg rette en stor takk til min kjære mor for arbeidet med oppkutting av ledninger. Det var direkte antall timer spart.

# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
1.1	Motivasjon . . . . .	1
1.2	Åpningsvinkel for forskjellige transduserkonstruksjoner . . . . .	2
1.3	Ideen i denne oppgaven . . . . .	3
1.4	Disposisjon . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Bakgrunnsteori</b>	<b>5</b>
2.1	Åpningsvinkel og direktivitet . . . . .	5
2.2	Stempelkilde . . . . .	5
2.2.1	Stempelsvingninger og direktivitet . . . . .	6
2.2.2	Sidelobenivå . . . . .	7
2.3	Piezoelektriske element . . . . .	8
2.4	Piezoelektriske relasjoner . . . . .	10
2.5	Endimensjonal modell for piezoelektriske staver. . . . .	10
2.6	Komposittransdusere . . . . .	11
2.7	Utstrålt effekt . . . . .	12
2.8	Fouriertransformasjon . . . . .	12
2.9	Økt båndbredde . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Preforsøk: Piezoelektrisk element med varierende koblingslag</b>	<b>15</b>
3.1	Tanken bak konstruksjonen . . . . .	16
3.2	Transduserkonfigurasjonen . . . . .	18
3.3	Konduktansmålinger- og simuleringer . . . . .	19
3.4	Oppsett for direktivitetmålinger . . . . .	23
3.4.1	Utstyr . . . . .	23
3.4.2	Oppsett for direktivitetmålinger . . . . .	23
3.4.3	Resultat . . . . .	24
3.5	Midlet forskyvning av forsøkelementet med baklag . . . . .	26
3.6	Sammendrag . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Teoretisk beskrivelse av transduser med konstant direktivitet over stort frekvensområde</b>	<b>29</b>
4.1	Ideen bak . . . . .	29
4.2	Resonansfrekvenser til indre elementer . . . . .	30
4.3	Dimensjoner av indre element . . . . .	32
4.4	Leverte element . . . . .	33
4.5	Plassering av elementer . . . . .	34
4.6	Faktisk svingemønster . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Konstruksjon av transduser og konduktansmålinger</b>	<b>43</b>
5.1	Utstyrliste . . . . .	43
5.2	Konstruksjonen . . . . .	43
5.3	Fargekoder på kanalene . . . . .	45
5.4	Konduktansmålinger . . . . .	46



5.5	Diskusjon av konduktansmålinger . . . . .	49
5.6	Problemer underveis . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Undersøkelse av den hvite, ytre kanalen</b>	<b>53</b>
6.1	Direktivitetsmålinger . . . . .	53
6.1.1	Utstyr . . . . .	54
6.1.2	Metode og oppsett . . . . .	54
6.1.3	Resultat . . . . .	55
6.2	Ekkoregistrering og aksetrykk . . . . .	56
6.2.1	Utstyr . . . . .	56
6.2.2	Metode og oppsett . . . . .	56
6.2.3	Resultat . . . . .	57
6.3	Oppsummering . . . . .	59
<b>7</b>	<b>Åpningsvinkel kanalvis</b>	<b>61</b>
7.1	Simuleringer og sammenligning . . . . .	61
7.2	Direktivitetsmålinger . . . . .	64
7.3	Direktivitetsmålinger med større steplengde . . . . .	71
7.4	Drøfting . . . . .	74
7.5	Kanalsammensetninger som gir åpningsvinkel syv grader . . . . .	75
<b>8</b>	<b>Usikkerhetsanalyse</b>	<b>77</b>
8.1	Generelt uttrykk for usikkerhet . . . . .	77
8.2	Punktmålinger . . . . .	78
8.3	Åpningsvinkelen tatt utfra direktivitetsmålinger . . . . .	79
8.4	Usikkerhet knyttet til hydrofonens avvik fra en kurvet bane . . . . .	80
8.5	Intervall for åpningsvinkel og andre usikkerheter . . . . .	80
<b>9</b>	<b>Oppsummering og videre arbeid</b>	<b>83</b>
9.1	Oppsummering . . . . .	83
9.2	Diskusjon av avviket fra teoretisk og målt åpningsvinkel . . . . .	84
9.3	Forklaringsmodell for avvik mellom målt og simulert åpningsvinkel . . . . .	84
9.4	Videre arbeid . . . . .	86
<b>A</b>	<b>m-filer</b>	<b>A.1</b>
A.1	m-filer beregnet for teoretiske utregninger. . . . .	A.1
A.1.1	endimkladdMain.m . . . . .	A.1
A.1.2	endimkladd.m . . . . .	A.1
A.1.3	direkt_femp.m . . . . .	A.2
A.1.4	finn_3dB_main.m . . . . .	A.2
A.2	m- filer fra kapittel 4 . . . . .	A.4
A.2.1	nirunde.m . . . . .	A.4
A.3	Generelle m- filer . . . . .	A.8
A.3.1	impanel1.m . . . . .	A.8
A.4	m-filer for direktivitetsmålinger . . . . .	A.8
A.4.1	Direktivitet.m . . . . .	A.8
A.4.2	Innlasting.m . . . . .	A.9
A.4.3	Full.m . . . . .	A.9
A.4.4	Minus3dB.m . . . . .	A.10
A.5	Plott.m . . . . .	A.11
A.5.1	PlottAvvik.m . . . . .	A.12

<b>B</b>	<b>Figurer</b>	<b>B.1</b>
B.1	Direktivitetssimuleringer og kildesammensetninger . . . . .	B.1
B.1.1	Simulerte 200 og 222 kHz element. . . . .	B.1
B.1.2	Simulerte 315 og 350 kHz element. . . . .	B.2
B.2	Ekstra konduktansmålinger . . . . .	B.3
B.2.1	Konduktansmålinger på diverse frie element før ledningene ble festet. . . . .	B.3
B.2.2	Konduktansen simulert for forsøks-elementet med heldekkende koblingslag. . . . .	B.7
B.3	Hydrofon Brüel & Kjær 8103 . . . . .	B.8
B.3.1	Datablad . . . . .	B.8
B.3.2	Direktivitetsplott for Brüel & Kjær 8103. . . . .	B.9
<b>C</b>	<b>Resultater fra direktivitetmålinger</b>	<b>C.1</b>
C.1	Målinger m.t.p mekanisk filter i kapittel 6 . . . . .	C.1
C.2	Målinger av direktivitet fra kapittel 7. . . . .	C.5
<b>D</b>	<b>Innfiler og modifikasjoner gjort av m-filen read.inn fra FEMP</b>	<b>D.1</b>
D.1	read_inn_mfront.m (utrag) . . . . .	D.1
D.2	disk_front_back_vacum_direct.inn . . . . .	D.3
D.3	element.inn . . . . .	D.5
<b>E</b>	<b>Materialfil</b>	<b>E.1</b>



# Figurer

1.1	Overlappende sone for to forskjellige transdusere med lik åpningsvinkel på syv grader (sterkt overdrevet) . . . . .	2
1.2	Overlappende sone for to forskjellige transdusere med ulik åpningsvinkel på syv og tolv grader (sterkt overdrevet) . . . . .	2
2.1	$\theta_{3dB}$ regnet ut for skiver og ringer. . . . .	7
2.2	$\theta_{3dB}$ regnet ut for skiver og ringer. . . . .	7
2.3	Egenmodediagram for PZT-5A skive med forskjellige $D/T$ -forhold [1]. For en detaljert beskrivelse av figurens størrelser henvises det til refereansen. . . . .	9
2.4	Komposittransduser med piezoelektriske staver og fyllmateriale. Figuren er hentet fra [2].	12
2.5	Viser mulige svingemoder for to masser med fjærkobling. Figuren er hentet fra [3]. . . . .	13
3.1	Målt og simulert konduktans. Dimensjonene til de simulerte elementene er lik det ukjentes. Utsrålingsmediet for målt og simulert konduktans er henholdsvis luft og vakum, utstrålingen i luft regnes som tilnærmet lik null. Se vedlegg D.3 for oppsett av simuleringen i FEMP. . . . .	16
3.2	Transduserkonfigurasjonen sett fra siden. A: Pz27, B: Aluminium. Både baklag og frontlag består av aluminium. . . . .	17
3.3	FEMP-simulering av $\theta_{3dB}$ for forsøkelementet. De største utslagene er uinteressante i detalj fordi det her gjerne er en splitting av hovedloben. Den røde linjen viser tendensen i plottet. Utstrålingsmediet er vann. . . . .	18
3.4	Transduseren med både baklag og frontlag. Selve elementet er montert i et metallchassis.	18
3.5	Målt og simulert konduktans for transduseren. I den simulerte konduktansen er ikke aluminiumschassis og resten av transduserkonstruksjonen tatt med, kun forsøkelementet med frontlag og baklag. Simuleringene skjer i vakum, mens målingene i luft. Denne forskjellen antas å være neglisjerbar. . . . .	19
3.6	Sammenligning av det opprinnelige elementet og prototypen. . . . .	20
3.7	Sammenligning av simulert konduktans der forskjellige deler av forsøkelementet er aktivt av gangen. Simuleringene er gjort for forsøkelementet alene med og uten koblingslagene. De delene som ikke er aktive, har fått fjernet sine piezoelektriske konstanter i FEMP-simuleringene. Det gjøres oppmerksom på at $y$ -aksen har ulik skala og at $x$ -aksen i figur e og f går ned til 50 kHz. . . . .	21
3.8	Sammenligning av simulert konduktans der elektroden er flyttet over de forskjellige delene av forsøkelementet. Simuleringene er gjort for forsøkelementet alene med og uten koblingslagene. Det gjøres oppmerksom på at $y$ -aksen har ulik skala og at $x$ -aksen i figur e og f går ned til 50 kHz. . . . .	22
3.9	Viser målt og simulert konduktans for prototypen i vann. . . . .	23
3.10	Viser blokkdiagram for måleoppsettet . . . . .	24
3.11	Hydrofon festet til posisjoneringsutstyret og transduseren er plassert i bunnen av tanken.	24
3.12	Måleresultater av direktivitet og avvik fra symmetriaksen for transduseren. Desibelskalaen er i forhold til maksimalverdien for hver frekvens. . . . .	25
3.13	Målt åpningsvinkel for transduseren. . . . .	25
3.14	Simuleringer av åpningsvinkelen for forskjellige skiver og ringer. . . . .	26
3.15	Gjennomsnittlig forskyvning av forsøkelementets overflate med og uten baklag. Regnet ut i vakum i FEMP. . . . .	27

4.1	Figurene viser utregnet åpningsvinkel for ulike sirkulærestempler. . . . .	30
4.2	Resistans og konduktansmålinger for en piezoelektrisk stav med høyde og bredde henholdsvis 10 mm og 2 mm. $f_s = 140$ kHz og $f_p = 164$ kHz (max resistans [4]). Impedansanalysatoren gikk i metning for verdier større enn 2 M $\Omega$ . . . . .	31
4.3	Viser tykkelsen til sylindere for en gitt hovedresonans . . . . .	33
4.4	Viser plasseringen av de forskjellige elementene med fargekode. Sirklene viser ytterkanten til hvert elementsett. . . . .	36
4.5	Kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 116 til 144 kHz. . . . .	37
4.6	Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 185 og 200 kHz. I figur 4.6(e) er tilsvarende direktivitetsplott for et stempel vist. . . . .	38
4.7	Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 222 til 287 kHz. . . . .	39
4.8	Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 315 og 380 kHz. . . . .	40
4.9	Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for blandede elementer. . . . .	41
5.1	Kort bildeserie over produksjonen av transduseren. . . . .	45
5.2	Viser fargekoder for de forskjellige kanalene. . . . .	46
5.3	Konduktansen målt for de forskjellige kanalene. Det gjøres oppmerksom på det lille hoppet i konduktans ved ca 150 kHz i figur 5.3(g)-5.3(k). . . . .	49
5.4	Sammenligning av konduktans for elementer i ulike områder av transduseren. . . . .	51
6.1	Viserblokkdiagram over måleoppsettet. . . . .	54
6.2	Viser konturplott for direktivetsmålinger gjort med kanalsammensetningene fra innledningen. Desibelskalaen er i forhold til maksimalverdien for hver frekvens. . . . .	55
6.3	Viserblokkdiagram over måleoppsettet for ekkoregistrering. . . . .	57
7.1	Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. De passive kanalene er ikke jordet. . . . .	64
7.2	Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. . . . .	66
7.3	Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. . . . .	68
7.4	Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. . . . .	70
7.5	Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. . . . .	72
7.6	Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. . . . .	74
B.1	Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for blandede elementer med resonansfrekvens 315 og 380 kHz. . . . .	B.1
B.2	Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for blandede elementer med resonansfrekvens 315 og 380 kHz. . . . .	B.2
B.3	Konduktansen målt for et enkelt element for 110 kHz- kanalen. . . . .	B.3
B.4	Konduktansen målt for et enkelt element for 140 kHz- kanalen. . . . .	B.4
B.5	Konduktansen målt for et enkelt element for 145 kHz- kanalen. . . . .	B.5
B.6	Konduktansen målt for et enkelt element for kanalene 190-265 kHz. . . . .	B.6
B.7	Konduktansen målt for et enkelt element for kanalene 290-395 kHz. . . . .	B.7
B.8	Konduktansen simulert for forsøks-elementet med heldekkende koblingslag. . . . .	B.7
B.9	Viser datablad for for Brüel & Kjær 8103. . . . .	B.8
B.10	Direktivetsplott for Brüel & Kjær 8103. . . . .	B.9

# Tabeller

2.1	Dimensjon for et sirkulært element med varierende frekvens som skal oppnå åpningsvinkel på syv grader. . . . .	6
2.2	Dimensjon for ringer med frekvens som skal oppnå åpningsvinkel på syv grader. . . . .	6
2.3	Forklaring av variabler og konstanter i lign (2.7 - 2.14). . . . .	10
3.1	Antatt hovedresonans for forsøkelementet med heldekkende front- og baklag. Hovedresonansen er plukket ut ved største konduktanstop. Se fig 3.1(c) og B.8(a) - B.8(b). . . . .	20
3.2	Liste over utstyret brukt til direktivitetmålinger av transduserkonstruksjonen. . . . .	23
4.1	Resonansfrekvens for de indre elementene. . . . .	31
4.2	Lengden for staven når den endimensjonelle modellen er brukt. . . . .	32
4.3	Resonansfrekvens og tykkelse for de indre elementene. Bredden er 2mm for alle . . . . .	33
4.4	Resonansfrekvens og tykkelse for de indre elementene. Bredden er 2mm. . . . .	33
4.5	Antall elementer og plasseringen av disse for simuleringene i fig 4.5-4.8. Elementtypen er beskrevet ved resonansfrekvensen. $r$ står for avstand fra elementene til sentrum. Inne i parenteser står antall elementer i den reelle konstruksjonen og ikke det som er simulert. Effekten av ett element er ubetydelig. . . . .	35
4.6	$\theta_{3dB}$ for de ulike uttynnede stemplene fra figur 4.5, 4.6, 4.7 og 4.8. . . . .	41
4.7	Viser $\theta_{3dB}$ for de ulike sammensetningene i figur 4.9 og B.1-B.2 fra vedlegg B. Parentes betyr at de aktuelle elementene er simulert med halv kildestyrke. . . . .	41
5.1	Utstyrsliste . . . . .	43
5.2	Viser kanalenes resonansfrekvens, $f_{res}$ . Denne er knyttet til elementenes resonansfrekvens. . . . .	49
6.1	Instrumentliste . . . . .	54
6.2	Åpningsvinkel for utplukkede frekvenser der alle kanaler er eksitert. . . . .	55
6.3	Instrumentliste . . . . .	56
6.4	Ekkoregistrering målt med oscilloskop. "m.jord" og "u.ord" betyr henholdsvis at de passive kanalene er jordet og ikke er jordet. Benevnning til de målte verdiene er $mV_{pp}$ . . . . .	58
6.5	Trykkregistrering med hydrofon målt med oscilloskop. Benevnning til de målte verdiene er $mV_{pp}$ . . . . .	58
7.1	Simulert åpningsvinkel til en del hovedkanaler ved hjelp av programmet nirunde.m. . . . .	61
7.2	Simuleringer av åpningsvinkler for Brun, 210 kHz og 190 kHz- kanalene ved hjelp av programmet nirunde.m. "2/3" betyr at den ytterste ringen av eksiterte element har styrke på 2/3 relativt til resten av elementene. . . . .	62
7.3	Punktmålinger av åpningsvinkel . . . . .	62
7.4	Åpningsvinkel for 110, 140 og 145 kHz- kanalene i frekvensområdet 100-150 kHz. . . . .	65
7.5	Åpningsvinkel for 145, 190 og 210 kHz- kanalene i frekvensområdet 140-210 kHz. . . . .	67
7.6	Åpningsvinkel for diverse kanaler og kanalsammensetninger i frekvensområdet 180-240 kHz. . . . .	69
7.7	Åpningsvinkel for diverse kanaler og kanalsammensetninger i frekvensområdet 180-240 kHz. . . . .	71
7.8	Frekvensområde: 100-175 kHz. . . . .	75
7.9	Frekvensområde: 180-250 kHz. . . . .	76
7.10	Frekvensområde: 255- 305 kHz. . . . .	76
7.11	Frekvensområde: 310- 400 kHz. . . . .	76

7.12	Frekvensområde: 320-365 kHz. . . . .	76
8.1	Viser prosentvis usikkerhet i spenningen, $\Delta V_{3dB}$ ved $\theta_{3dB}$ , grunnet fluktuasjoner i oscilloskopet og påfølgende utslag for hydrofonen, $\Delta b_{flukt}$ . . . . .	78
8.2	Viser prosentvis usikkerhet i spenningen, $\Delta V_{3dB}$ grunnet oscilloskopets usikkerhet og påfølgende utslag for hydrofonen, $\Delta b_{osc}$ . . . . .	79
8.3	Viser usikkerheten for punktmålinger av åpningsvinkelen for hovedkanalene. . . . .	79
8.4	Hydrofonbanens avvik fra den kurvede linjen, $r$ , ved $\theta_{3dB}$ . Maksimal prosentvis demping av spenningsamplituden, $V_{demp}$ , og påfølgende maksimal korreksjon for åpningsvinkelen. . . . .	80
8.5	Viser punktmåling av åpningsvinkel og et intervall der den virkelige åpningsvinkelen sannsynligvis ligger i. Intervallet er slått sammen av verdiene fra tabell 8.3 og 8.4. Den virkelige åpningsvinkelen ligger sannsynligvis i øvre halvdel fordi forskyvningen fra tabell 8.4 kun fører til en økning i åpningsvinkelen. . . . .	81
9.1	Oppsummering av simulert og punktmålt åpningsvinkel for hovedkanalene. ”2/3” betyr at den ytterste ringen i kanalen er simulert med 2/3 amplitude i forhold til resten av elementene i kanalen. . . . .	84
C.1	395 kHz- kanal og de to ytre kanalene eksitert sammen. . . . .	C.1
C.2	Alle kanaler eksitert samtidig. . . . .	C.2
C.3	Alle kanaler minus de to ytre kanalene, hvit og brun eksitert. . . . .	C.3
C.4	De to ytre kanalene, hvit og brun eksitert sammen. . . . .	C.4
C.5	190 kHz kanal eksitert alene. . . . .	C.5
C.6	110 og 265 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.5
C.7	110 kHz- kanalen eksitert alene. . . . .	C.5
C.8	Den brune, 210 og 190 kHz- kanalene eksitert samtidig. . . . .	C.6
C.9	Den brune, 210, 230 og 265 kHz- kanalen eksitert samtidig. . . . .	C.6
C.10	140 kHz- kanalen eksitert alene. . . . .	C.7
C.11	210 kHz- kanalen eksitert alene. . . . .	C.7
C.12	210 kHz- kanalen med sine ytre element (brun kanal) eksitert sammen. . . . .	C.8
C.13	145 og 190 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.8
C.14	145, 190 og 210 kHz kanalene eksitert sammen. . . . .	C.9
C.15	145 kHz- kanalen eksitert alene. . . . .	C.9
C.16	265, 290 og 340 kHz- kanalen eksitert sammen. . . . .	C.10
C.17	265 og 290 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.10
C.18	265 kHz- kanalen eksitert alene. . . . .	C.11
C.19	210 og 230 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.11
C.20	110- kHz kanalen fra 70 - 150 kHz. . . . .	C.12
C.21	110 og 140 kHz - kanalene eksitert sammen. . . . .	C.12
C.22	110 og 265 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.13
C.23	110 kHz- kanalen eksitert i frekvensområdet 150-250 kHz. . . . .	C.13
C.24	190 kHz kanalen eksitert alene. . . . .	C.13
C.25	Brun, 210 og 190 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.14
C.26	Brun, 210, 230 og 265 kHz- kanalene eksitert sammen. . . . .	C.14
C.27	140 kHz- kanalen eksitert alene. . . . .	C.15
C.28	Direktivitetsplott for den enkle transduseren . . . . .	C.16

# Kapittel 1

## Innledning

Denne oppgaven tar sikte på å finne en mulig transduserkonstruksjon hvis hensikt er å lette arbeidet ved klassifisering av fiskesorter. Mer vil bli sagt om bakgrunn og motivasjon, men hovedmålet i denne oppgaven er å lage en transduser med konstant åpningsvinkel på syv grader for et stort frekvensområde i fjernfeltet (se definisjoner i kapittel 2). Ved hjelp av målinger, teoretiske betraktninger og simuleringer ble en prototype tegnet. Denne ble så bygget, testet for sine utstrålingsegenskaper og sammenlignet med teorien. Videre er det forsøkt å forklare avviket fra teori og praksis på bakgrunn av kjent teori og ved nye målinger. Dette er et prosjekt i samarbeid mellom Havforskningsinstituttet og Universitetet i Bergen.

Dette kapittelet vil videre handle om motivasjon, dagens metoder for klassifisering av fisk, kort om åpningsvinkler for forskjellige transduserkonstruksjoner, hovedideen i grove trekk og en videre disposisjon av oppgavens innhold.

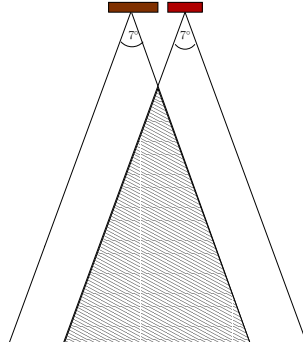
### 1.1 Motivasjon

Fiskeri er en stor næring i Norge og for å forvalte ressursene riktig er det viktig med en god oversikt over de forskjellige bestandene i havet. Klassifisering av fisk og plankton er derfor et viktig felt innenfor fiskeriindustrien. Måten dette har vært gjort på er å plassere flere transduser på en nedsenket kjøll [5, 6]: Hver av transduserene har en åpningsvinkel på syv grader for en spesifikk frekvens. Havforskningsinstituttet i Bergen bruker frekvensene (i kHz) 18, 38, 70, 120, 200, 333, 555, 926, 1543, 2572,  $120 \times 1.6667^n$  ( $n = 7, \dots$ ), et utvalg av disse ”skytes ut” samtidig og for hver frekvens registreres det et ekko som igjen presenteres i et ekkogram. Ved bruk av en frekvens, kan også andre frekvenskomponenter oppstå, f.eks andre og tredje harmoniske. Faktoren 1.6667 er valgt på bakgrunn av at andre og tredjeharmoniske ikke skal komme i konflikt med grunnfrekvensen til en annen transduser. En bestemt fisketype har sin egen frekvensrespons og jo flere frekvenser som tas med jo sikrere blir metoden for klassifisering. Videre må en være sikker på at hvert mål i ekkogrammet korresponderer med det samme målet i et annet ekkogram for en annen frekvens. Da bør også hvert ekkogram representere samme fysiske volum.

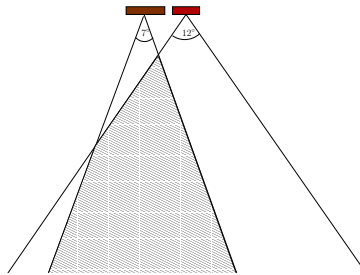
Avstanden mellom transduserne fører til at de aldri kan dekke helt det samme volumsegmentet, se figur 1.1. Åpningsvinkelen er heller ikke alltid syv grader, figur 1.2. Dette er et problem som delvis kan kompenseres for med databehandling, men jo bedre råmaterialet er jo sikrere blir klassifiseringen. Forskjellige mål kan også reflektere signalet svært dårlig for en del frekvenser. Det registrerte ekkoet kan derfor være svakt eller ikke tilstede for en del distinkte frekvenser. Ved å ha muligheten til å bruke et frekvensbånd istedet for distinkte frekvenser (som nevnt ovenfor), vil dette problemet kunne minske.

Figur 1.1-1.2 viser at jo større det skraverte eller overlappende området er, dessto bedre er sammenligningsgrunnlaget for de to transduserene. Dersom en kunne lage en bredbåndet transduser som likevel beholdt en konstant åpningsvinkel ville ikke plasseringen være et problem lenger. Flere frekvenser kunne vært benyttet for å sikre gode ekko fra målene og volumsegmentet for de forskjellige frekvensene ville vært like store. Dette er også hovedmålet i oppgaven. Frekvensområdet som i utgangspunktet vil prøves ut, er 100-350 kHz. Det vil ikke bli lagt særlig vekt på å finne konkrete størrelser som beskriver båndbredde eller utstrålt effekt. Forståelsen av hvordan forskjellige regioner i transduseren svinger i forhold til hverandre vil likevel være knyttet opp mot åpningsvinkelen.





Figur 1.1: Overlappende sone for to forskjellige transdusere med lik åpningsvinkel på syv grader (sterkt overdrevet)



Figur 1.2: Overlappende sone for to forskjellige transdusere med ulik åpningsvinkel på syv og tolv grader (sterkt overdrevet)

## 1.2 Åpningsvinkel for forskjellige transduserkonstruksjoner

En av de enkleste modellene på en lydkilde er et svingende stempel. Hele overflaten beveger seg uniformt slik at det blir generert trykkbølger. Stempelet har bare en svingemodus, men allerede på dette nivået vil åpningsvinkelen variere over frekvensområdet. En annen lydkilde er et enkelt piezoelektrisk element. Det har flere forskjellige svingemodus som i praksis har sin egen direktivitet. Direktiviteten er vinkelavhengighet til en lydkilde eller svingemodus, og er nærmere utdypt i kapittel 2. Simuleringer av åpningsvinkelen til et piezoelektrisk element er gjort i kapittel 3. Tendensen er at åpningsvinkelen synker ved økende frekvens selv om de lokale variasjonene er store. Et problem ved piezoelektriske elementer er at den utstrålte effekten er begrenset til et lite frekvensområde.

En annen transduserkonstruksjon er en såkalt komposittransduser. Disse er bygd opp av både piezokeramisk materiale og fyllmateriale i en arraykonstruksjon. En array er i denne sammenheng elementer plassert i et bestemt mønster. Disse transduserne har ofte god akustisk utstråling for et stort frekvensbånd, men åpningsvinkelen er fortsatt frekvensavhengig. Generelt for transdusere vil bølgeforplantningens natur føre til at åpningsvinkelen synker med økende frekvens.

ME70 og MS70 er navnet på to sonarer som kan innstilles for konstant åpningsvinkel og brukes over store frekvensbånd [7]. Disse er imidlertid svært komplekse, store, tunge, dyre og baserer seg på fokusering av stråler fra arrayen. De krever dessuten en del elektronikk plassert inne i selve transduseren og mye dataprosessering i forbindelse med fokuseringen. Dette gjør at de ikke uten videre kan senkes under vann. Regnekraften som kreves er stor og gjør også dataprosesseringen vanskelig. Konstruksjonen i denne oppgaven vil være langt enklere, billigere og i teorien mer anvendbar.

## 1.3 Ideen i denne oppgaven

I en transduserkonfigurasjon er direktiviteten avhengig av benyttet frekvens og hele den vibrerende overflaten til transduseren. Flere faktorer spiller inn: Det aktive svingende materialet (f.eks. piezoelektriske materialer, oppkuttingen og plasseringen av dette, koblingslag, fyllmateriale, den øvrige transduserkonstruksjonen, oppheng og utstrålingsmedium. Alle variablene gjør det vanskelig å simulere direktiviteten til en transduser.

Hovedideen i oppgaven er veldig kort sagt å få forskjellige områder av en transduseroverflate til å svinge ved forskjellige frekvenser. På denne måten kan transduseren konstrueres for en konstant åpningsvinkel. Ideelt sett bør transduseren kunne sende ut flere frekvenser samtidig for å representere metoden beskrevet i seksjon 1.1. Likevel vil et kort tidsintervall mellom hver frekvens også være gunstig. Hvorvidt transduseren i denne oppgaven er egnet til å sende ut flere frekvenser samtidig, har det ikke vært tid til å se på.

## 1.4 Disposisjon

Drøfting av resultater vil stort sett gjøres underveis for å gjøre tankegangen tydelig. Usikkerhetsbetraktningene er ikke presentert før i kapittel 8 da dette ikke er en kritisk del av oppgaven, men er ment som en indikasjon på hvilken nøyaktighet som er oppnådd i dette oppsettet.

- Kapittel 2 vil ta for seg bakgrunnsteori og definisjoner.
- Kapittel 3 omhandler et forsøk basert på et piezoelektrisk element som ble utført før hovedkonstruksjonen. Dette ble prøvd ut for å se om en svært enkel fremgangsmåte var mulig, og for å bli kjent med eventuelle fallgruver med tanke på hovedkonstruksjonen senere i oppgaven. Simuleringer av konduktans, forskyvning av transduseroverflaten og  $\theta_{3dB}$  ble gjort i dataprogrammet FEMP sammen med direktivitet- og konduktansmålinger.
- Kapittel 4 går gjennom ideen bak hovedkonstruksjonen. Helt fra simuleringer, målinger på leverte piezoelektriske element og plasseringen av disse basert på utregninger.
- Kapittel 5 tar for seg den praktiske konstruksjonen av transduseren. Beskrivelse av tilkoblingsmuligheter, konduktansmålinger og resonansfrekvenser.
- Kapittel 6 beskriver de første direktivitetmålingene, aksetrykkmålinger (samme som i kapittel 3) og ekkoregistrering.
- Kapittel 7 tar for seg direktivitetmålinger som er lettere å analysere utfra teorien enn dem i kapittel 6. En stor del av diskusjonen rundt avvik fra teori og praksis gjøres også her.
- Kapittel 8 går gjennom usikkerhetsanalysen rundt målingene av åpningsvinklene. Andre variabler diskuteres også.
- Kapittel 9 består av en oppsummering og tanker rundt videre arbeid.



# Kapittel 2

## Bakgrunnsteori

I dette kapitlet vil relevant teori for oppgaven gjennomgås.

### 2.1 Åpningsvinkel og direktivitet

Vinkelavhengigheten i lydfeltet utfra en lydkilde kalles direktiviteten og presenteres gjerne i et direktivetsplott. I denne oppgaven vil direktiviteten kun bety direktiviteten i fjernfeltet (se def. fjernfelt i seksjon 2.2). Områder med energi kalles loper. Hovedloben er den loba som gir mest utstrålt energi. Som regel ligger denne rett ut fra symmetriaksen, men kan i visse tilfeller være splittet eller være noe forskjøvet.

$\theta_{3dB}$  er her definert som punktene i hovedloben der intensiteten har sunket til det halve relativt til punktet som har maksimal intensitet. Dersom hovedloben ligger på symmetriaksen, svarer dette til vinkelen utfra symmetriaksen der intensiteten har sunket til det halve.

Begrepet åpningsvinkelen (eller strålebredden) benyttet i denne oppgaven er definert som

$$\text{Åpningsvinkel} = \theta_{3dB}^- + \theta_{3dB}^+ \quad (2.1)$$

og er oppgitt i grader.  $\theta_{3dB}^-$  og  $\theta_{3dB}^+$  er  $\theta_{3dB}$  på hver sin side av hovedloben.

### 2.2 Stempelkilde

Rayleighavstanden,  $r_R = \frac{S}{\lambda}$ , der S er arealet til kilden og  $\lambda$  er bølgelengden, blir ofte sett på som den avstanden der fjernfeltet begynner. For en stempelsvingende kilde kan trykkamplituden i fjernfeltet beskrives ved en vinkeldel og en del som kun er avhengig av avstanden, ligning (2.2) [8]. Denne ligningen baserer seg på en summasjon av monopoler innenfor stempelkilden.

$$|P(r, \theta)| = P_{ax}(r)H(\theta) \quad (2.2)$$

hvor

$$\begin{aligned} H(\theta) &= \left| \frac{2J_1(v)}{v} \right| \\ v &= ka \sin(\theta) \\ P_{ax} &= \frac{1}{2} \rho_0 c U_0 a^2 k \frac{1}{r} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$ .  $r$  er avstand ut til planet,  $\theta$  er vinkel ut fra symmetriaksen,  $k$  er bølgetallet,  $a$  er radius til kilden,  $\rho_0$  og  $c$  er henholdsvis tetthet og lydshastighet til utstrålingsmediet og  $U_0$  er hastighetsamplituden til elementet.

Ligningen viser frekvensavhengighet gjennom  $ka$ - argumentet. Dette resulterer i synkende åpningsvinkel for økende frekvens. Grafisk fremstilling av  $H(\theta)$  kalles et direktivitetsplott, og har maksimalverdi 1.

### 2.2.1 Stempelsvingninger og direktivitet

Trykkamplituden i fjernfeltet for en kilde som svinger som et stempel beskrives av ligning 2.2. Havforskningsinstituttet ønsker seg en transduser med åpningsvinkel konstant syv grader. Det går an å finne dimensjoner for et stempel med åpningsvinkel på syv grader for en gitt frekvens ved å sette opp kriteriet:

$$|P(r, \theta_{3dB} = 3.5^\circ)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |P(r, 0)| \quad (2.4)$$

Det vil senere i oppgaven være aktuelt å se på feltet fra tykkelsessvingende ringer. Dette kan finnes ved å ta differansen mellom en stor og liten skive, se ligning 2.5.

$$|P(r, \theta)| = P_{ax,y}(r)H(\theta)_y - P_{ax,i}(r)H(\theta)_i \quad (2.5)$$

der  $y$  og  $i$  er ytre og indre radius henholdsvis. Dimensjoner for stempelsvingende ringer med åpningsvinkel syv grader kan finnes ved å sette inn i ligning 2.4. Utfra ligning 2.4 og 2.5 er dimensjoner for sirkulære og ringformede stempler med åpningsvinkel på syv grader regnet ut. Frekvensene som er brukt er 120 kHz, 200 kHz og 333 kHz og er frekvenser som tradisjonelt er mye brukt av Havforskningsinstituttet. Resultatene er gitt i tabell 2.1 og 2.2.

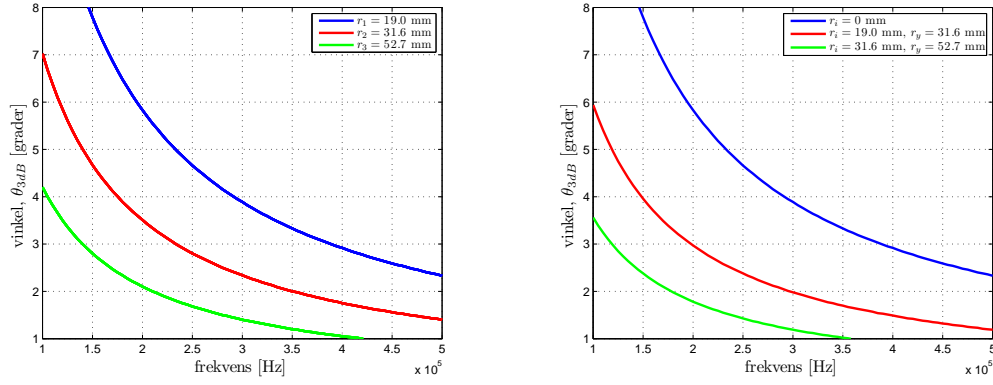
Tabell 2.1: Dimensjon for et sirkulært element med varierende frekvens som skal oppnå åpningsvinkel på syv grader.

Frekvens, $f$	120 kHz	200 kHz	333 kHz
Radius, $a$	5.27 cm	3.16 cm	1.90 cm

Tabell 2.2: Dimensjon for ringer med frekvens som skal oppnå åpningsvinkel på syv grader.

Frekvens, $f$	120 kHz	200 kHz	333 kHz
Ytre radius	4.59 cm	2.46 cm	1.90 cm
Indre radius	2.46 cm	1.90 cm	0

$\theta_{3dB}$  kan regnes ut numerisk i MATLAB for varierende frekvens. I figur 2.1(a) er  $\theta_{3dB}$  regnet ut for elementene i tabell 2.1. I figur 2.1(b) er ikke dimensjonene fra tabell 2.2 brukt. De ytre og indre radiusene i plottet er basert på radiusene fra skivene i tabell 2.1. Frekvenser som fører til at et tykkelsessvingende element får en åpningsvinkel på syv grader vil i denne oppgaven refereres til som senterfrekvenser. Når en senterfrekvens velges til for eksempel 120 kHz, sies transduseren i denne oppgaven til å være ”optimalisert“ for 120 kHz.



(a)  $\theta_{3dB}$  regnet ut for tre forskjellige skiver med hver sin radius. (b)  $\theta_{3dB}$  regnet ut for en skive og to ringer med sine respektive dimensjoner.

Figur 2.1:  $\theta_{3dB}$  regnet ut for skiver og ringer.

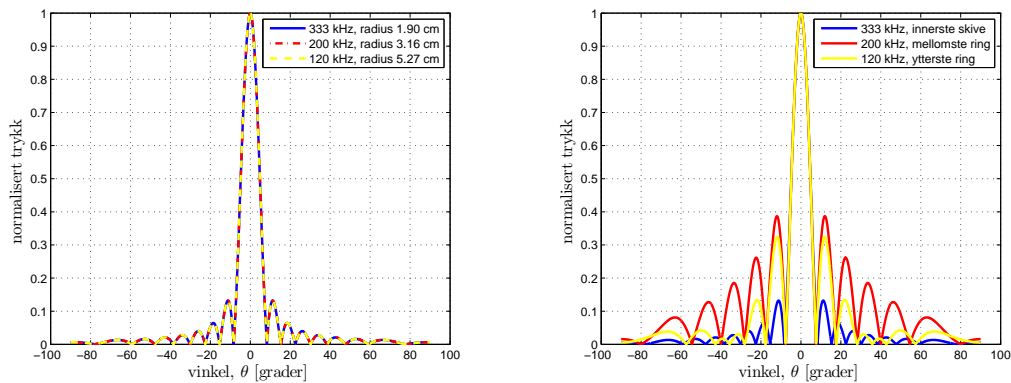
Ut fra figuren er  $\theta_{3dB}$  noe mindre for ringer enn for skiver med lik ytre radius. Ved disse dimensjonene er senterfrekvensene forskjøvet en del. Hvis hver ring eller skive har sitt frekvensområde, kan de til sammen sørge for en noenlunde konstant åpningsvinkel.  $\theta_{3dB}$  varierer fra 2.5 grader til 4.5 grader over frekvensområdet fra 100 kHz til 500 kHz. En fordel med ringer er at de lett kan plasseres med et felles sentrum og på denne måten danne en sirkulær transduser.

### 2.2.2 Sidelobenivå

Figur 2.2 viser direktivhetsplott i fjernfeltet for elementene i tabell 2.1 - 2.2. Hovedloben er like bred for ringer og skiver. Sidelobenivået viser hvor mye energi som utstråles utenfor hovedloben. Et mål på dette er gitt ved forholdet mellom høyeste sidelobe og hovedlobe i desibel:

$$\text{Sidelobenivå} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{største sidelobe}}{\text{hovedlobe}} \right) \quad (2.6)$$

Hvis et ekko fra sidelobene registreres, kan i utgangspunktet dette ikke skilles fra et ekko fra hovedloben uten å registrere faseforskjeller i det motatte signalet. Dette er tidkrevende, trenger mer dataprosessering, og derfor er et lavt sidelobenivå gunstig. For å registrere et tydelig ekko er det også fordelaktig å ha mest mulig av utstrålte energien i hovedloben.



(a) Normalisert felt fra sirkulære stempler.

(b) Normalisert felt fra ringer.

Figur 2.2:  $\theta_{3dB}$  regnet ut for skiver og ringer.

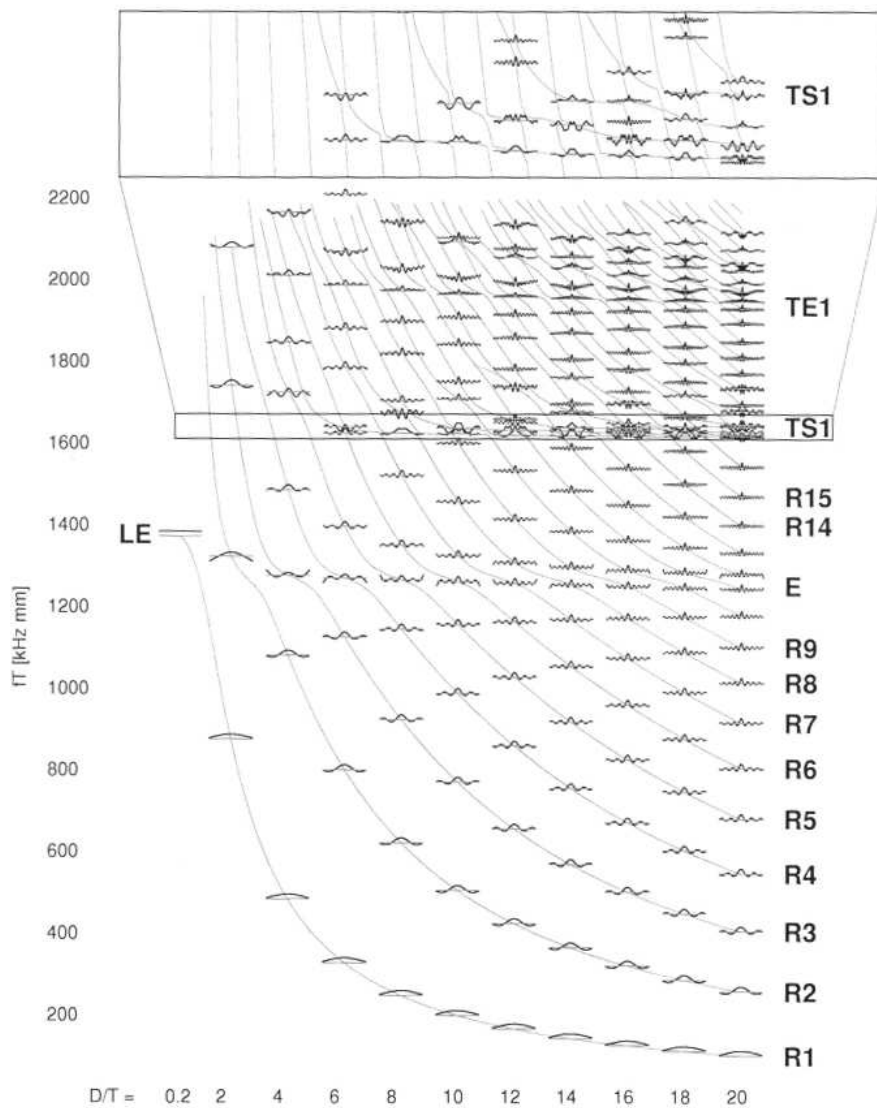
Figuren viser at sidelobenivået er klart større for ringer enn for skiver. Det er konstant for skivene seg imellom mens forskjellig indre og ytre radius hos ringene gir betydelige variasjoner. Når en transduser brukes som sender og mottaker, kvadreres sidelobenivået fordi retningsdiagrammet er gjeldende for det mottatte såvel som det utsendte signalet.

## 2.3 Piezoelektriske element

Når mekanisk spenning virker langs visse retninger i et piezoelektrisk materiale vil elektrisk spenning genereres i materialet. Når et elektrisk felt settes på i visse retninger vil materialet få en deformasjon. Dette er henholdsvis den piezoelektriske og inverse piezoelektriske effekten [9]. Denne effekten beskrives gjennom et sett med ligninger, (2.7-2.14), kjent som de piezoelektriske relasjonene. Polariseringsretningen i et piezoelektrisk materiale bestemmer i hvilke retninger den mekaniske spenningen og det elektriske feltet genereres. For mer presise definisjoner av den piezoelektriske effekten og polarisering refereres til [9].

Figur 2.3 viser egenmoder for en PZT-5A skive der  $f$  er frekvens,  $T$  er tykkelse og  $D$  er diameter og er laget gjennom simuleringsverktøyet FEMP [1]. R1 står for first radial mode", R2 for second radial mode" osv. LE står for length expander"mode og E står for edge mode". TS står for thickness shear mode"og TE1 står for first thickness extensional mode eller første tykkelsesmode (2, 3, 4.... tykkelsesmode finnes høyere i frekvens). Resonansfrekvenser for piezoelektriske element er i denne sammenhengen definert ved å sette ytre krefter og spenning på overflaten lik null [1]. Hver av disse gir opphav til et svingningsmønster eller en egenmode. Når et element eksiteres med en gitt frekvens, vil den registrerte forskyvningen være en superposisjon av modene men akkurat ved egenfrekvensene er det hovedsaklig den aktuelle egenmoden som eksiteres [1].

Siden en påtrykt frekvens eksiterer flere moder i nærheten av hverandre, er det reelle svingemønsteret for store  $D/T$ -forhold ganske komplisert. For lave  $D/T$ -forhold går R1 over i LE som gir en mer og mer uniform deformering av overflaten. Denne moden gir godt samsvar med den endimensjonale piezoelektriske modellen beskrevet i seksjon 2.5.



Figur 2.3: Egenmodediagram for PZT-5A skive med forskjellige  $D/T$ -forhold [1]. For en detaljert beskrivelse av figurens størrelser henvises det til referansen.



## 2.4 Piezoelektriske relasjoner

De piezoelektriske relasjonene kan skrives på forkortet notasjon som nedenfor [9]. Dette er tatt med i teorikapittelet slik at størrelsene i den endimensjonale modellen i seksjon 2.5 er definert.

$$T_p = c_{pq}^E S_q - e_{jp} E_j \quad (2.7)$$

$$D_i = e_{iq} S_q + \epsilon_{ij}^S E_j \quad (2.8)$$

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{jp} E_j \quad (2.9)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \epsilon_{ij}^T E_j \quad (2.10)$$

$$S_p = s_{pq}^D T_q + g_{jp} D_j \quad (2.11)$$

$$E_i = -g_{iq} T_q + \beta_{ij}^T D_j \quad (2.12)$$

$$T_p = c_{pq}^D S_q - h_{jp} D_j \quad (2.13)$$

$$E_i = -h_{iq} S_q + \beta_{ij}^S D_j \quad (2.14)$$

der  $p, q = 1, 2, 3 \dots 6$  og  $i, j = 1, 2, 3$  beskriver retningen. For detaljer beskrivelse, se [9]

Tabell 2.3: Forklaring av variabler og konstanter i lign (2.7 - 2.14).

S :	tøyning
T :	mekanisk spenning [N/m <sup>2</sup> ], [Pa]
E :	elektrisk feltstyrke [V/m]
D :	elektrisk forskyvning [C/m <sup>2</sup> ]
$c^E$ :	elastisk stivhetskonstant ved konstant elektrisk feltstyrke [N/m <sup>2</sup> ]
$c^D$ :	elastisk stivhetskonstant ved konstant elektrisk forskyvning [N/m <sup>2</sup> ]
$s^E$ :	komplianskonstant ved konstant elektrisk feltstyrke [m <sup>2</sup> /N]
$s^D$ :	komplianskonstant ved konstant elektrisk forskyvning [m <sup>2</sup> /N]
$\epsilon^T$ :	permittivitet ved konstant mekanisk spenning [F/m]
$\epsilon^S$ :	permittivitet ved konstant mekanisk tøyning [F/m]
$\beta^T$ :	impermittivitetskonstant ved konstant mekanisk spenning [m/F]
$\beta^S$ :	impermittivitetskonstant ved konstant mekanisk tøyning [m/F]
d, e, g, h :	piezoelektriske materialkonstanter
d :	piezoelektrisk tøyningkonstant [m/V]
e :	piezoelektrisk spenningskonstant [C/m <sup>2</sup> ]

## 2.5 Endimensjonal modell for piezoelektriske staver.

Når en piezoelektrisk stang med polarisasjon og elektrisk felt i lengderetningen blir lang nok i forhold til bredden kan den beskrives med den endimensjonale modellen. Kravene for at modellen skal være gjeldende varierer i litteraturen. IEEE 176/1987 [4], som videre i oppgaven vil bli referert til som Standarden, oppgir at lengde/vidde- forholdet skal være større enn ti, mens Morgan Matroc sier forholdet bør være minst to og en halv [10]. Standarden definerer ulike frekvenser:

$f_1$  = Maksimal admittans for ideelle, tapsfrie materialer. Kalles resonansfrekvens.

$f_2$  = Maksimal impedans for ideelle, tapsfrie materialer. Kalles antiresonansfrekvens.

$f_s$  = Maksimal konduktans for materialer med tap.

$f_p$  = Maksimal resistans for materialer med tap.

Man snakker også om første, andre, tredje... resonansfrekvens og antiresonansfrekvens avhengig av hvor de ligger i forhold til hverandre. For den endimensjonale modellen, tapsfritt tilfelle, er impedansen,  $Z(f)$ , gitt ved [4]:

$$Z(f) = \frac{i\beta_{33}^T l}{2\pi f S(1 - (k_{33}^l)^2)} \left[ 1 - (k_{33}^l)^2 \frac{\tan(\pi f / (2f_2))}{\pi f / (2f_2)} \right] \quad (2.15)$$

der  $S$  er areal av tverrsnittet,  $f_2$  (første antiresonansfrekvens),  $v_b^D$  (lydhastigheten i lengderetning) og  $l$  (lengden til staven), er relatert ved [11]:

$$v_b^D = 2f_2 l = \sqrt{\frac{1}{\rho s_{33}^D}} \quad (2.16)$$

der  $\rho$  er tettheten i materialet. Den elektromekaniske koblingsfaktoren langs polariseringsretningen,  $k_{33}^l$ , er gitt ved [4]

$$k_{33}^l = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^E \epsilon_{33}^T}} \quad (2.17)$$

Ved  $f = f_1$ , er  $Z(f) = 0$  og  $(k_{33}^l)^2$  er gitt ved

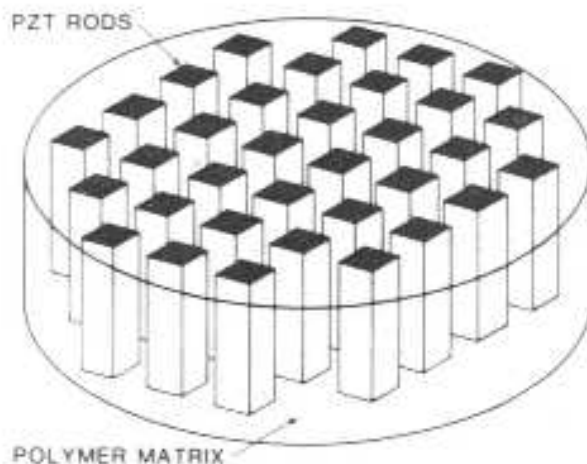
$$(k_{33}^l)^2 = \frac{\pi f_1}{2f_2} \tan\left(\frac{\pi(f_2 - f_1)}{2f_2}\right) \quad (2.18)$$

Videre i oppgaven, vil ”hovedresonansfrekvensen,”  $f_{hres}$  eller hovedresonansen være definert utifra maksimal konduktans ved første tykkelsesmode. Eventuelt maksimal konduktans ved LE- moden når det er snakk om lave D/T- forhold. Dette vil altså svare til  $f_s$  ved første tykkelsesmode. Resonansfrekvenser er en fellesbetegnelse, og er i oppgaven ofte brukt til å beskrive konduktanstopper (som også innbefatter hovedresonansen). Tykkelsesresonans og tykkelsessvingninger vil brukes generelt om frekvenser og moder som fører til tykkelsessvingninger.

Tap kan innkluderes ved å innføre komplekse størrelser.  $f_2$  kan da erstattes med  $f_p$ , og  $f_1$  med  $f_s$ .

## 2.6 Komposittransdusere

En komposittransduser består av mange like store stavformede piezoelektriske element. Lengde/breddeforholdet er ofte så stort at elementene kun svinger i LE- moden (length expander) og kan beskrives av den endimensjonale modellen i avsnitt 2.5. Elementene er spent fast mellom to elektrodeplater med et mellomliggende fyllmateriale. Resultatet er at radielle svingninger undertrykkes og longitudinale svingninger framheves. Dermed har komposittransdusere tykkelsessvingninger over store deler av frekvensområdet. Tykkelsesmode brukes derfor også for svingemønsteret til komposittransdusere. Figur 2.4 viser eksempel på en komposittransduser. For å kvantifisere egenskapene er det vanlig å beregne forskjellige parametre for komposittransduseren. Disse er bestemt gjennom en midling av parametrene for det piezokeramiske materialet og fyllmaterialet [2]. I mange sammenhenger er den midlede koblingskonstanten for tykkelsesmoden,  $k_t$  langt større enn koblingskonstanten for tykkelsesmoden for et vanlig sirkulært piezoelektrisk element [12]. Dette resulterer ofte i økt båndbredde og akustisk utstråling.



Figur 2.4: Komposittransduser med piezoelektriske staver og fyllmateriale. Figuren er hentet fra [2].

## 2.7 Utstrålt effekt

Den effektive forflytningen av utstrålingsmediet er avhengig av hvor mye energi som overføres helt fra spenningskilden til utstrålingsmediet. For god akustisk utstråling kreves derfor

- Elektrisk tilpasning mellom signalgenerator og transduser.
- Svingemode som gir stor amplitude i den aktuelle retningen.
- God elektromekanisk kobling i transduseren.
- God akustisk kobling fra transduseren til utstrålingsmediet.

For å få mest mulig effekt overført fra signalgeneratoren til transduseren må utgangsimpedansen til signalgeneratoren være lik den kompleksskonjungerte til transduseren. Dette kan f.eks. oppnås ved å legge et filter mellom signalgeneratoren og transduseren.

For å få en god elektromekanisk kobling kan en komposittransduser brukes. De stavformede elementenes koblingskoeffisient,  $k_{33}$ , gir generelt en større koblingskonstant enn hva en piezoelektrisk skive gir. Komposittransduseren svinger også stort sett i tykkelsesmode.

Det er ønskelig å ha størst mulig akustisk utstråling fra transduseren. Da må det ikke være refleksjoner fra frontoverflaten og tilbake inn i transduseren. Impedansen transduseren ser bør derfor være lik dens egen karakteristiske impedans. Dette kan oppnås ved å velge et frontlag hvis impedans er lik det geometriske middel av transduserens og utstrålingsmediets impedans. I tillegg må tykkelsen på koblingslaget være lik en kvart bølgelengde (for at fronten også skal svinge maksimalt)

## 2.8 Fouriertransformasjon

Mange lydskilder har ikke formen til en skive. Trykkamplituden kan da beskrives ved å dele overflaten inn i små elementer og beregne feltet fra hvert element som om det er en kulebølge og summere alle bidragene i et gitt punkt i rommet. Hastighetspotensialet i en avstand  $r$  ved tiden  $t$  fra en monopollag er gitt ved [13]

$$d\phi(r, t) = \frac{dQ}{4\pi r} e^{i(kr - \omega t)} \quad (2.19)$$

$k$  er bølgetall og  $Q$  er kildestyrken. Ved å integrere over arealet til kilden når  $Q$  er konstant kan hastighetspotensialet i fjernfeltet skrives som en vinkeldel og en amplitudedel. Når kun en frekvens benyttes, kan hastighetspotensialet overføres til trykk ved å benytte ligningen [8]

$$p = \rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.20)$$

der  $\rho_0$  er tettheten i utstrålingsmediet. Vinkeldelen kan skrives som [13]:

$$\hat{F}(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\sigma_x, \sigma_y) e^{-iu\sigma_x - iv\sigma_y} d\sigma_x d\sigma_y \quad (2.21)$$

$\sigma_x$  og  $\sigma_y$  gir koordinatene til kildepunktet utfra kildens origo.  $\hat{F}$  er den fouriertransformerte av  $F$ , en funksjon som beskriver kildens arealform.  $F = 1$  når  $\sigma$  ligger i kilden og 0 når  $\sigma$  er utenfor kilden.  $u$  og  $v$  kalles romlig frekvens og er definert ved  $u = kx/R$  og  $v = ky/R$  der  $x$ - og  $y$ - retning definerer kildeplanet og  $R$  er avstanden fra kildens sentrum til feltpunktet.

Av dette kan følgende sluttet: Lydfordelingen av en plan monokromatisk lydkilde er i fjernfeltet beskrevet ved den romlige fouriertransformen av kildens arealform [13].

## 2.9 Økt båndbredde

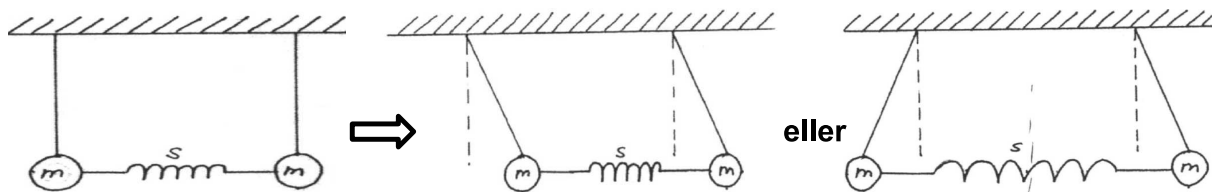
Økt båndbredde inntreffer når kvalitetsfaktoren,  $Q$ , minker. Et generelt uttrykk for kvalitetsfaktoren er [4]:

$$Q = \frac{f_s}{f^+ - f^-} \quad (2.22)$$

der  $f^+$  og  $f^-$  er frekvensen på hver side hvor konduktansen har sunket med tre desibel.  $f_s$  er som nevnt frekvensen som har maksimal konduktans [4].  $f^+ - f^-$  kalles her for båndbredden. (Båndbredden blir også ofte definert utfra kildefølsomheten [14], men det vil ikke være aktuelt i denne oppgaven.) Økt båndbredde kan skje ved:

- Indre tap i transduseren
- Utstråling av lyd
- Nye resonanser som oppstår

I en komposittransduser er flere element koblet med et fyllmateriale. Det er vanskelig å beskrive koblingen mellom flere element kvantitativt men prinsippet kan forklares ved en enkel modell. I figur 2.5 har i utgangspunktet både fjæren og de to massene hver sin egenfrekvens. Når massene kobles sammen, får hele systemet to mulige svingemoder. Systemet får resonanser knyttet til fjærkoblingen. Dette kalles fjærresonanser og er også prinsippet for kobling mellom stavene inne i transduseren. Ekstra tap kan også skje i fjæren eller i fyllmaterialet.



Figur 2.5: Viser mulige svingemoder for to masser med fjærkobling. Figuren er hentet fra [3].



## Kapittel 3

# Preforsøk: Piezoelektrisk element med varierende koblingslag

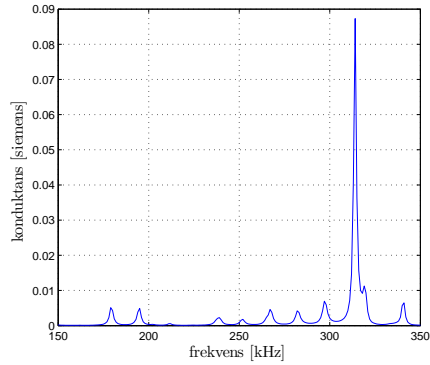
Kapittel 2 viser at det er mulig å få en bestemt åpningsvinkel for flere frekvenser ved å benytte seg av teorien for flere ringformede eller sirkulære lydkilder. Antagelsen er at elementene svinger på samme måte som et stempel.

I dette kapitlet vil et preforsøk gjøres. Motivasjonen for dette er å se om en svært enkel konstruksjon kan virke og for å få oversikt over eventuelle fallgruver før den endelige transduseren skal lages. Tanken bak dette forsøket er kort fortalt å få ulike områder av elementet til å svinge ved ulike frekvenser ved hjelp av et baklag og frontlag. Selv om et piezoelektrisk element ikke analytisk kan beskrives ved hjelp av stempelmodellen, vil tendensen likevel være at åpningsvinkelen minker med økende frekvens. I fig 3.3 er det gjort en FEMP-simulering som underbygger dette. Med bakgrunn i dette er visse sammenligninger gjort i forhold til stempelkildemodellen.

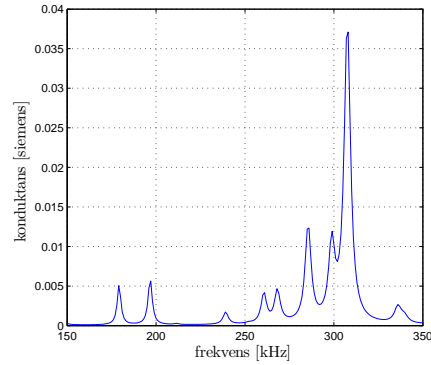
I det følgende vil først tanken bak forsøket utdypes med simuleringer av åpningsvinkelen for en piezoelektrisk skive. Så vil transduserkonfigurasjonen og konduktansmålinger av den presenteres. Videre vil et måleoppsett for direktiviteten presenteres og resultater fra dette legges fram. Dette forsøket hadde vært bedre om direktivetsmålinger også ble gjort kun for det piezoelektriske elementet, men kun simuleringer av åpningsvinkelen ble gjort for elementet alene. Det antas at simuleringene er noenlunde representable.

Eneste tilgjengelige hydrofon hadde flat frekvensrespons opptil 200 kHz, se tabell 5.1. Frekvensområdet som var aktuelt i dette forsøket, var 150-350 kHz. Dette spiller liten rolle da hydrofonen antas å være omnidireksjonell. Usikkerhetsbetraktninger vil gjøres i kapittel 8. Det er uvisst om dette elementet er av typen Pz27 eller PZT-5A, men utfra plassering av resonansfrekvensene i målinger (se fig 3.1) er det trolig et element av typen Pz27. Se [9] for beskrivelse av forskjellige piezoelektriske elementtyper. Elementet som er brukt vil senere i oppgaven refereres til som ”forsøks-elementet.“

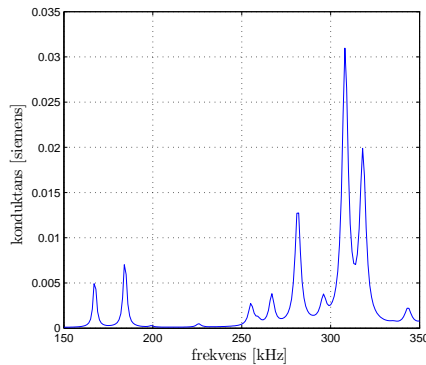
Alle konduktansmålinger er gjort med impedansanalysator (se tabell 5.1 for mer informasjon om modell og styreprogram) og alle konduktanssimuleringer er gjort i FEMP. For FEMP-simuleringene er alle materialparametre gitt i vedlegg E og inn-filer gitt i vedlegg D. Materialparametrene som er brukt er ikke nødvendigvis helt riktige i forhold til forsøks-elementets og dette forklarer noe av forskjellen mellom målinger og simuleringer.



(a) Målt konduktans for element av ukjent type.



(b) Simulert konduktans. Elementtype: PZT-5A.



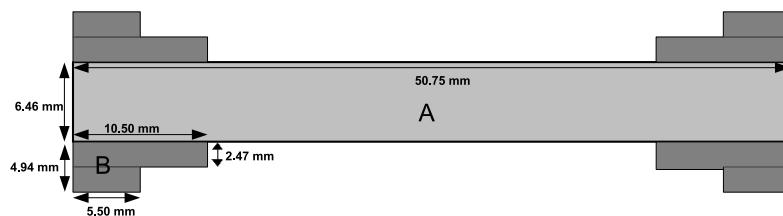
(c) Simulert konduktans. Elementtype: Pz27.

Figur 3.1: Målt og simulert konduktans. Dimensjonene til de simulerte elementene er lik det ukjentes. Utsrålingsmediet for målt og simulert konduktans er henholdsvis luft og vakum, utstrålingen i luft regnes som tilnærmet lik null. Se vedlegg D.3 for oppsett av simuleringen i FEMP.

### 3.1 Tanken bak konstruksjonen

Ved å legge på koblingslag kan resonanseegenskapene til et piezoelektrisk element endres. Resonanstoppe-  
ne forskyves avhengig av størrelsen på koblingslaget og hvilke moder som eksiteres. Dersom koblingslaget  
representerer et tap for elementet, vil resonansfrekvensene også smøres ut. I dette forsøket ble et identisk  
ringformet baklag og frontlag limt på et piezoelektrisk element, se fig 3.2, slik at elementet får tre om-  
råder. En sentral sirkulær skive, en midterste ring med baklag og frontlag ca 2.5 mm og en ytterste ring  
med baklag og frontlag ca 4.9 mm. Grunnen til at frontlaget og baklaget er identisk, er for å opretthol-  
de symmetriplanet i svingningene. Nå innføres den grove antagelsen at forsøks-elementet kan beskrives  
som et stempel som hovedsaklig er aktivt ved hovedresonansfrekvensen. Hovedresonansfrekvensen vil da  
forskyves nedover i frekvens ulikt for de to ytterste ringene og forbli der den er i den innerste delen.  
Siden åpningsvinkelen til en stempelkilde er synkende for økende frekvens, vil den kunne bli noenlunde  
konstant for varierende frekvens.

I første omgang vil det kun sees på hvilken effekt koblingslagene har på hovedresonansen. Den piezo-  
elektriske koblingen i radiell retning vil bli sett bort ifra. Videre vil den piezoelektriske koblingen mellom  
delene forsøkt å bli tatt med. Diverse simuleringer vil gjøres for disse teoretiske tilfellene og sammenlignes  
med målinger for det reelle tilfellet.

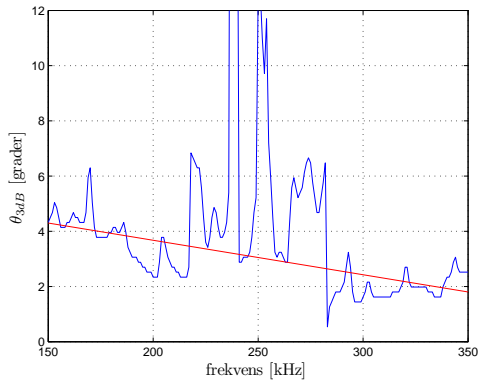


Figur 3.2: Transduserkonfigurasjonen sett fra siden. A: Pz27, B: Aluminium. Både baklag og frontlag består av aluminium.

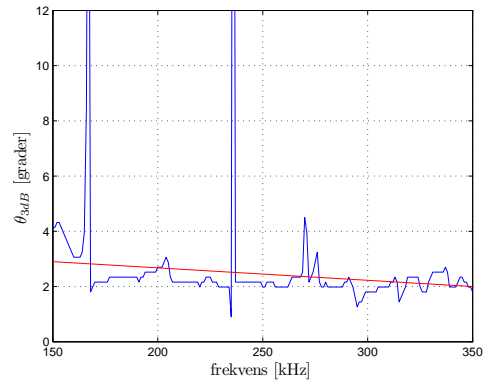
Det vil trolig være en del koblingseffekter som fører til at antagelsene over holder mål. Av denne grunn er størrelsen på forsøks-elementet og koblingslagene vilkårlig valgt. Siden frontlaget også er i kontakt med vann, vil det kunne virke som koblingslag til vannet og føre til (mer) utstråling og utsmøring av resonansfrekvensene. Et raskt estimat gir bølgelengden for 300 kHz i aluminium:  $\frac{6300 \text{ m/s}}{300 \text{ kHz}} = 21 \text{ mm}$ . Et kvartbølge koblingslag skal derfor være  $21/4 \text{ mm} = 5.25 \text{ mm}$ . Dette er ganske nært frontlaget til den ytterste ringen, og selv om den karakteristiske impedansen ikke er det geometriske middelet av vann og Pz27 vil lydutstrålingen muligens påvirkes. Dette kan få innvirkning på direktiviteten. En annen faktor som kommer inn med frontlaget er at transduseroverflaten nå ikke lenger er en plan flate. Fokuserings-effekter kan derfor oppstå og innvirke på feltet.

I fig 3.3 er direktiviteten til forsøks-elementet med og uten baklag simulert. Tendensen er at åpningsvinkelen er synkende for økende frekvens. Resultatene fra simuleringene tyder på at baklaget kan føre til en mer konstant åpningsvinkel.





(a) Forsøks-elementet simulert alene.



(b) Forsøks-elementet med ringformet baklag og frontlag simulert.

Figur 3.3: FEMP-simulering av  $\theta_{3dB}$  for forsøks-elementet. De største utslagene er uinteressante i detalj fordi det her gjerne er en splitting av hovedloben. Den røde linjen viser tendensen i plottet. Utstrålingsmediet er vann.

## 3.2 Transduserkonfigurasjonen

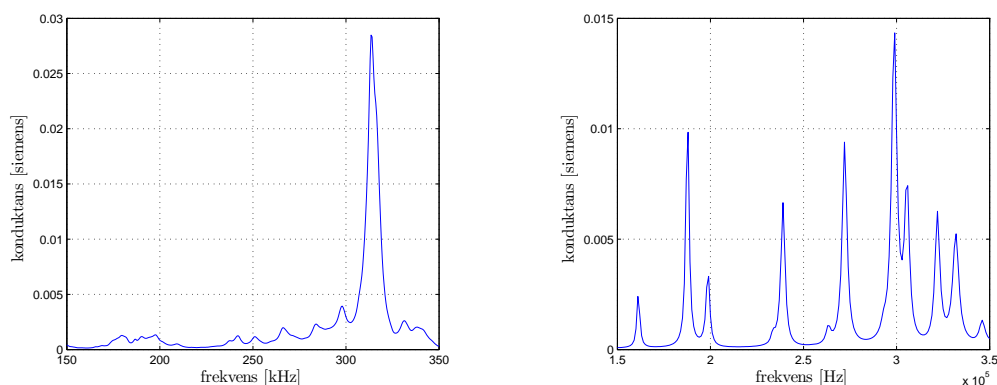
I denne transduserkonfigurasjonen er det tatt utgangspunkt i en piezoelektrisk skive trolig av typen Pz27. Et baklag og frontlag ble dreid ut av aluminium og limt på med superlim. Dimensjoner er gitt i fig 3.2. For å få rettet mest mulig av den utstrålte energien fremover er det hensiktsmessig å ha luft på baksiden av transduseren. Lederen i koaksialkabelen som skulle festes til elementet, ble derfor tredd igjennom en isoporskive og deretter loddet på. Kabelens jord ble værende utenfor isoporskiven. Isoporskiven ble så limt på over baklaget og den lille åpningen rundt ledningen ble tettet igjen med silikon. Hele konstruksjonen ble satt ned i en plastsylander, og jordledningen ble loddet fast på fremsiden av elementet. Flytende voks ble helt oppi slik at hele baklaget var dekket og voksen rant ned i mellom plastsylandereren og elementet. Plastsylandereren og elementet festet seg til hverandre etter avkjøling. Til slutt ble et aluminiumchassis montert utenpå konstruksjonen for å få den til å stå stabilt.



Figur 3.4: Transduseren med både baklag og frontlag. Selve elementet er montert i et metallchassis.

### 3.3 Konduktansmålinger- og simuleringer

Denne seksjonen tar sikte på å få frem resonanseegenskapene til transduseren og derfor er kun konduktansmålinger og konduktanssimuleringer presentert her. Konduktanssimuleringer- og målinger for transduseren er vist i figur 3.5. Forsøks-elementet med koblingslagene, figur 3.5(b), vil videre i oppgaven bli kalt "kjernen." Selv om det er en del forskjell fra kjernen og den reelle transduseren, vil kjernen være basis for alle videre simuleringer. Forskjeller sees også tydelig i simuleringene for forsøks-elementet alene og målinger på forsøks-elementet i 3.1. Av denne grunn antas det at det er forskjell i materialparametre som hovedsaklig gir avviket og ikke metallchassiset, limlag o.l.

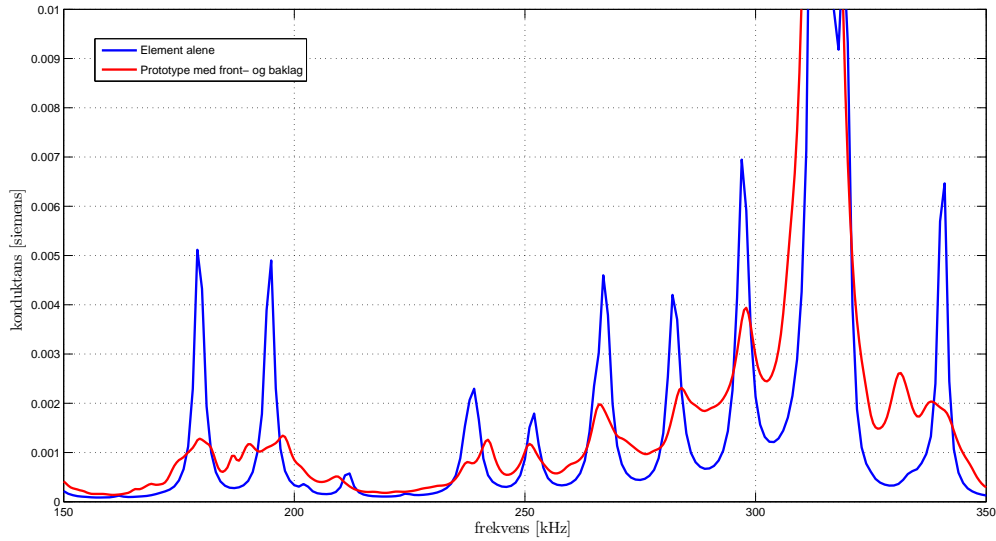


(a) Målt konduktans for transduser med baklag og (b) Simulert konduktans for transduser med baklag og frontlag.

Figur 3.5: Målt og simulert konduktans for transduseren. I den simulerte konduktansen er ikke aluminiumschassis og resten av transduserkonstruksjonen tatt med, kun forsøks-elementet med frontlag og baklag. Simuleringene skjer i vakum, mens målingene i luft. Denne forskjellen antas å være neglisjerbar.

Et viktig forhold er som nevnt hvordan konduktansen til elementet forandrer seg når baklag og frontlag legges på. Det er ikke så lett å sammenligne figur 3.5(a) og 3.1(a) grunnet stor forskjell i konduktans. Fig 3.6 gir et bedre bilde. Konduktansen er dempet, men noen nye resonansfrekvenser kan ikke sees. De forskjellige modene ser ut til å ligge på samme sted.

Utfra tanken om at hovedresonansen skulle forskyves ulikt, skulle en vente å se nye resonanser ved ca 250 kHz og 190 kHz (se tabell 3.1). Det er lite sannsynlig utifra sammenligning av konduktanstopper i figur 3.5 at modene ved disse frekvensene er tykkelsesmoder. Svingemønsteret har muligens fått større komponenter i tykkelsesretning, men det er vanskelig å si utifra figuren.

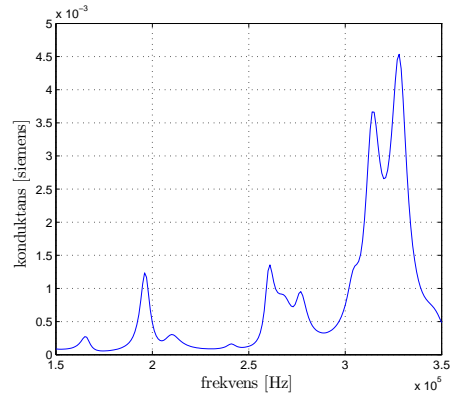
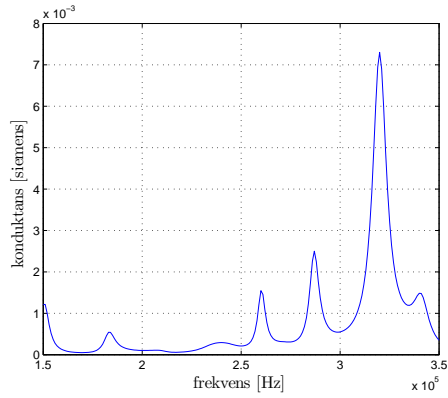


Figur 3.6: Sammenligning av det opprinnelige elementet og prototypen.

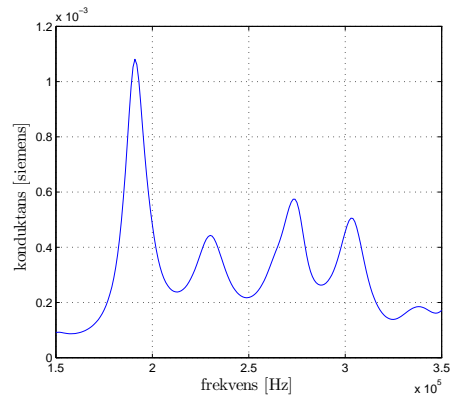
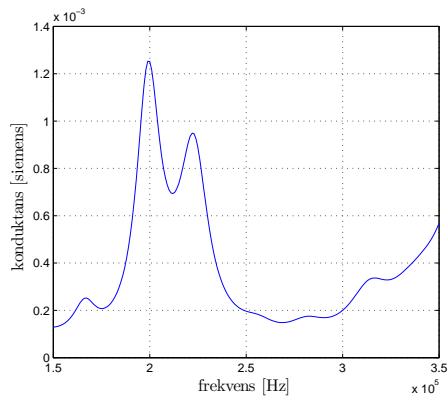
Tabell 3.1: Antatt hovedresonans for forsøkelementet med heldekkende front- og baklag. Hovedresonan- sen er plukket ut ved største konduktanstopp. Se fig 3.1(c) og B.8(a) - B.8(b).

Konfigurasjon	Uten koblingslag	Front og- baklag 2.47 cm	Front og- baklag 4.94 cm
Hovedresonans	308 kHz	247 kHz	187 kHz

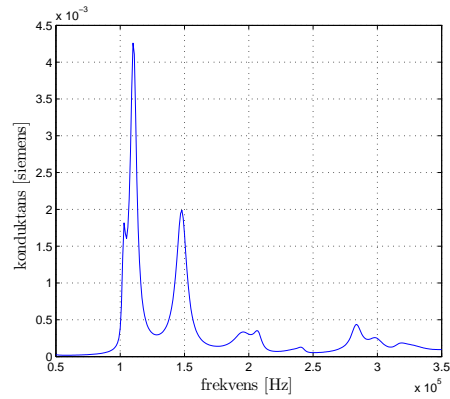
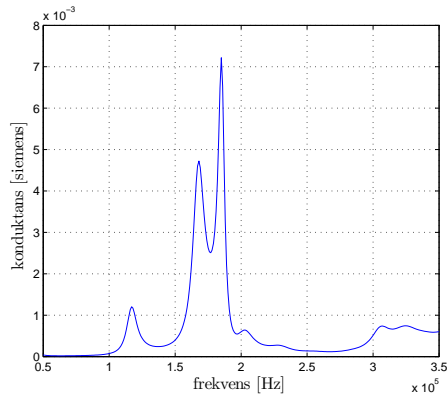
De målingene og simuleringene som er gjort for hele transduseren sier ikke nødvendigvis noe om hvordan konduktansen endrer seg i de tre forskjellige delene. Figur 3.7 viser en simulering der visse deler av elementet er aktivt av gangen. Hos de delene som ikke er aktive er de piezoelektriske materialkonstan- tene fjernet i FEMP-simuleringen. Når f.eks den sentrale delen er aktiv, betyr det at de ytre delene kun ligger som en passiv masse. På denne måten kan de forskjellige delene undersøkes separat. I fig 3.8 er selve elektroden lagt ved de tre forskjellige delene etter tur. På denne måten kan kan også de forskjellige områdene undersøkes separat. Simuleringene er gjort for kun forsøkelementet med og uten koblingslag.



(a) Den sentrale delen er aktiv. UTEN koblingslagene. (b) Den sentrale delen er aktiv. MED koblingslagene.

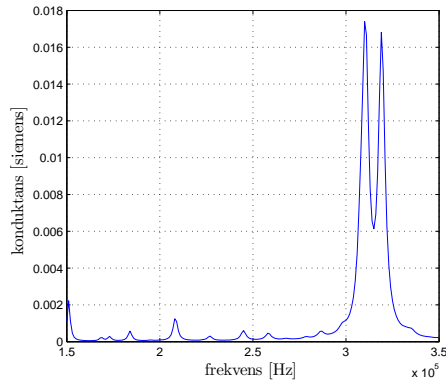


(c) Den mellomste ringen er aktiv. UTEN koblingslagene. (d) Den mellomste ringen er aktiv. MED koblingslagene.

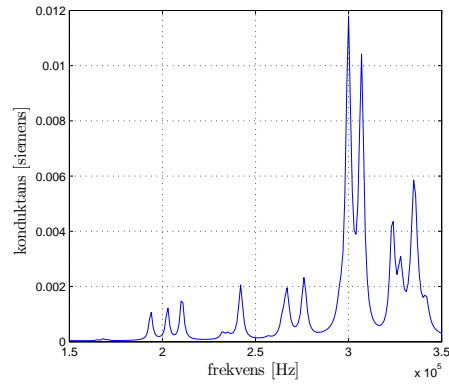


(e) Den ytterste ringen er aktiv. UTEN koblingslagene. (f) Den ytterste ringen er aktiv. MED koblingslagene.

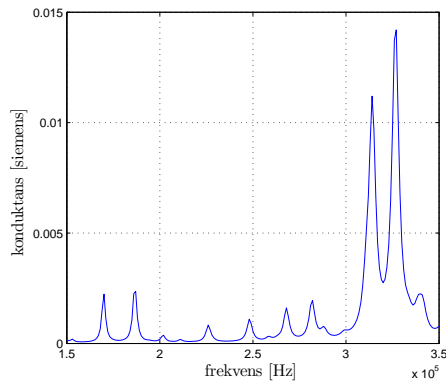
Figur 3.7: Sammenligning av simulert konduktans der forskjellige deler av forsøks-elementet er aktivt av gangen. Simuleringene er gjort for forsøks-elementet alene med og uten koblingslagene. De delene som ikke er aktive, har fått fjernet sine piezoelektriske konstanter i FEMP-simuleringene. Det gjøres oppmerksom på at y-aksen har ulik skala og at x-aksen i figur e og f går ned til 50 kHz.



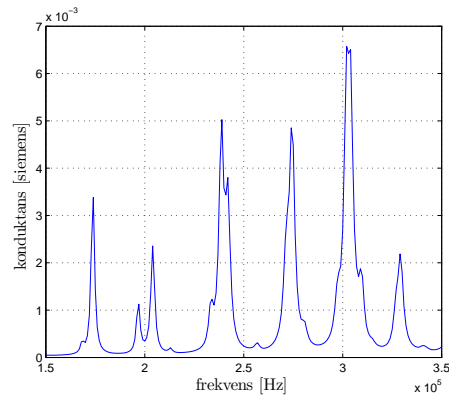
(a) Elektrode plassert ved innerste del av forsøksselementet. UTEN koblingslagene.



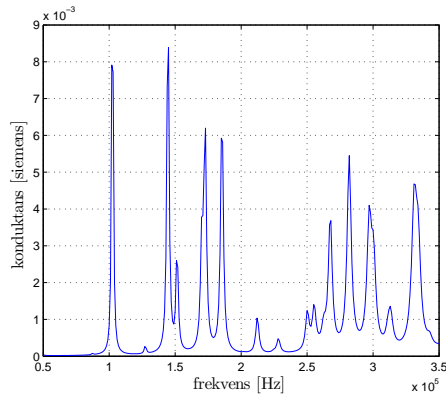
(b) Elektrode plassert ved innerste del av forsøksselementet. MED koblingslagene.



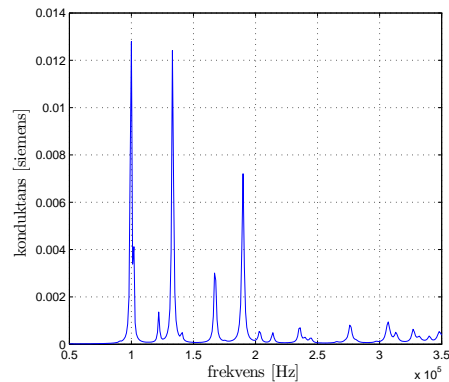
(c) Elektrode plassert ved mellomste ring av forsøksselementet. UTEN koblingslagene.



(d) Elektrode plassert ved mellomste ring av forsøksselementet. MED koblingslagene.



(e) Elektrode plassert ved ytterste ring av forsøksselementet. UTEN koblingslagene.



(f) Elektrode plassert ved ytterste ring av forsøksselementet. MED koblingslagene.

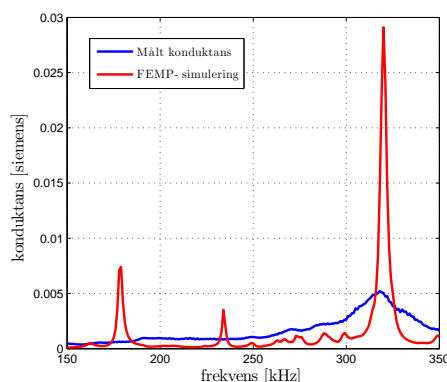
Figur 3.8: Sammenligning av simulert konduktans der elektroden er flyttet over de forskjellige delene av forsøksselementet. Simuleringene er gjort for forsøksselementet alene med og uten koblingslagene. Det gjøres oppmerksom på at y-aksen har ulik skala og at x-aksen i figur e og f går ned til 50 kHz.

Fra figur 3.7(a) og 3.7(b) sees det at koblingslagene fører til en noe utsmøring av hovedresonansen, men ingen forskyving. Dette er også å vente siden det ikke er noe baklag på den sentrale delen. Når den mellomste ringen, uten baklag, er aktiv i figur 3.7(c) er ikke hovedresonansen lenger ved ca 310 kHz. Det antas at at det resonante området ved ca 190-230 kHz innehar tykkelsessvingninger. Konduktansen er noe forsvøvet når koblingslagene legges på. I figur 3.7(e)-3.7(f) ser det ut til at effekten av koblingslagene

er større.

I figur 3.8 kan den samme tendensen sees. Konduktanstoppene forskyves nedover når koblingslagene legges på. Likevel er det i begge figurene det aktive området som i stor grad bestemmer forskyvningen av resonansfrekvensene. Det kan forklares ved at den piezoelektriske koblingen ikke er tilstede mellom delene (muligens noe ved flytting av elektroden). Den aktive delen vil derfor være en ring, eller en skive med betraktelig mindre radius. Den piezoelektriske koblingen innenfor hver del vil da føre til at hovedresonansen ikke lenger ligger på samme sted som den gjør for forsøks-elementet.

Direktivitetmålingene som ble gjort i dette forsøket, skjedde i vann. Derfor er det egentlig konduktansen målt i vann som er gjeldende. Det antas at plasseringen av resonanstoppene er nokså uforandret fra luft til vann. Grunnen til at målinger og simuleringer i luft er viet mest oppmerksomhet er at konduktanstoppene målt i vann er veldig utsmurt og dermed vanskelig å skille.



Figur 3.9: Viser målt og simulert konduktans for prototypen i vann.

## 3.4 Oppsett for direktivitetmålinger

I dette avsnittet er eksperimentet for direktivitetmålingene presentert.

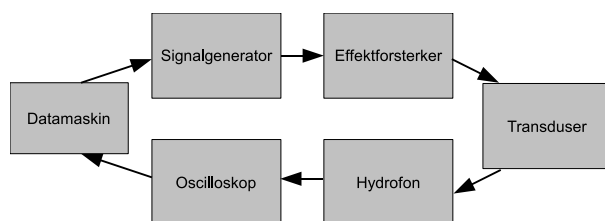
### 3.4.1 Utstyr

Tabell 3.2: Liste over utstyret brukt til direktivitetmålinger av transduserkonstruksjonen.

Instrumenttype	Modell	vedlegg
Spenningsgenerator	Agilent 3220A	-
Transduserkonfigurasjon	Egenprodusert	-
Hydrofon	Brüel & Kjær 8103	Frekvensrespons B.9
Oscilloskop	Agilent DS06012A	
Datamaskin	Hp dx5150 MT Base Model	-
Impedansanalysator	Hewlett Packard 4192A LF	Styreprogram A.3.1

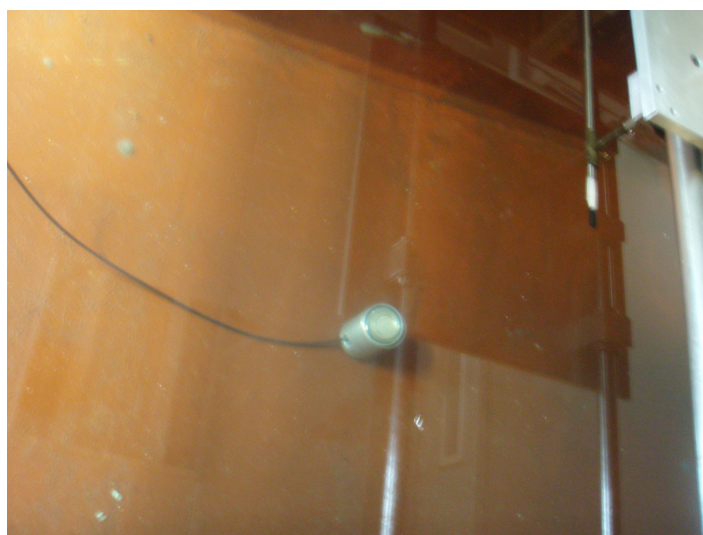
### 3.4.2 Opsett for direktivitetmålinger

I figur 3.10 er det aktuelle utstyret vist i et blokkdiagram for å gi en enkel fremstilling av oppsettet.



Figur 3.10: Viser blokkdiagram for måleoppsettet

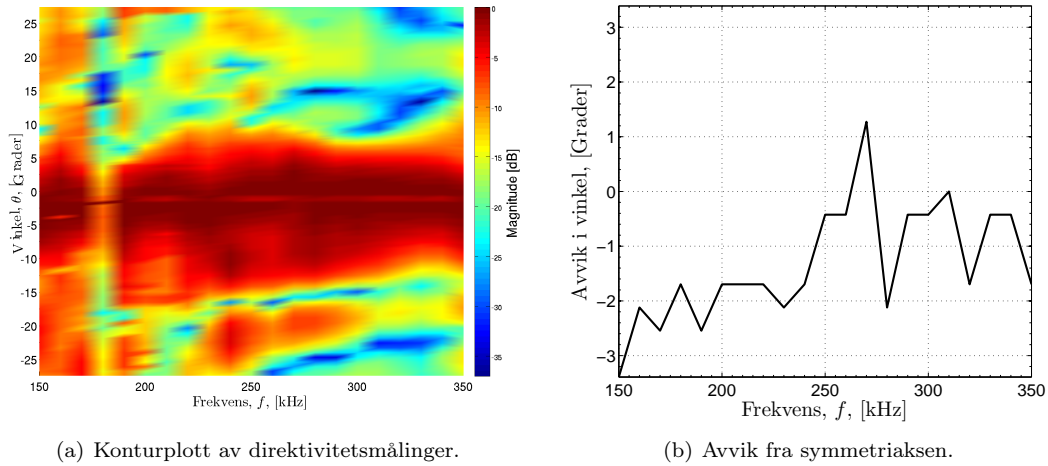
For å gjøre direktivetsmålinger av feltet til transduseren ble oppsettet i fig 3.10 benyttet. Transduseren ble plassert i bunnen av et kar fylt opp med vann (se figur 3.11) og hydrofonen festet i posisjoningsutstyret 67 cm over fronten til transduseren (det var ikke helt likegyldig hvilken vei hydrofonen ble plassert, mer om dette i kapittel 8). Denne avstanden er større enn Rayleighavstanden. Banen som hydrofonen skulle følge, ble satt opp på til å passere symmetriaksen til transduseren. Signalgeneratoren sendte ut en burst på 30 perioder som ble forsterket opp til ca 40 V amplitude. Siden stepper motoren var ute av drift, måtte hydrofonen flyttes manuelt steg for steg. Hvert steg var satt til 1 cm i ytterkantene og 0.5 cm inn mot hovedloben. Dataprogrammet Direktivitet.m (se seksjon A.4) sørget for å steppe gjennom frekvenser på signalgeneratoren og registrere rms- verdi (steady-state verdi) fra oscilloskopet. Måleområdet var fra 150 til 350 kHz med frekvensstep på 10 kHz. Lengden på signalet ble satt til 30 perioder for å skille det fra refleksjoner fra vannoverflaten.



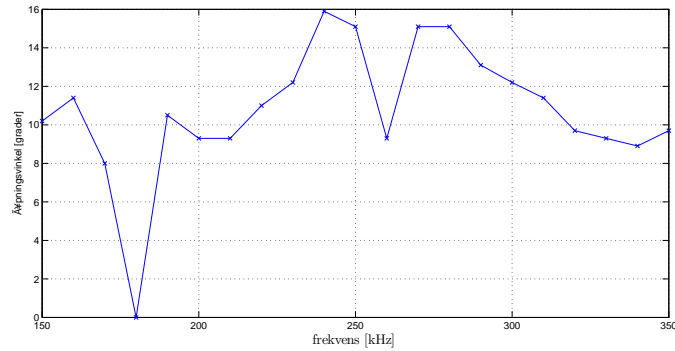
Figur 3.11: Hydrofon festet til posisjoningsutstyret og transduseren er plassert i bunnen av tanken.

### 3.4.3 Resultat

Figuren 3.12(a) viser direktivetsplottet for feltet i en avstand 67 cm fra transduseroverflaten (m- filer er gitt i vedlegg A.4). Figur 3.12(b) viser avviket fra symmetriaksen. Åpningsvinkelen er plottet i figur 3.13. Konturplottet viser at feltet er ganske rotete for lave frekvenser: Store sidelober og en varierende retning på hovedloben. Dette kan også sees i figuren for avviket fra symmetriaksen. Fra ca 310 og ned til 290 kHz observeres det at retningen til hovedloben ligger ca på symmetriaksen. Disse frekvensene svarer også til hovedresonansen til elementet. I konturplottet sees det også at feltet blir mer ryddig i dette frekvensområdet: Lavere sidelober og svakt synkende åpningsvinkelen.



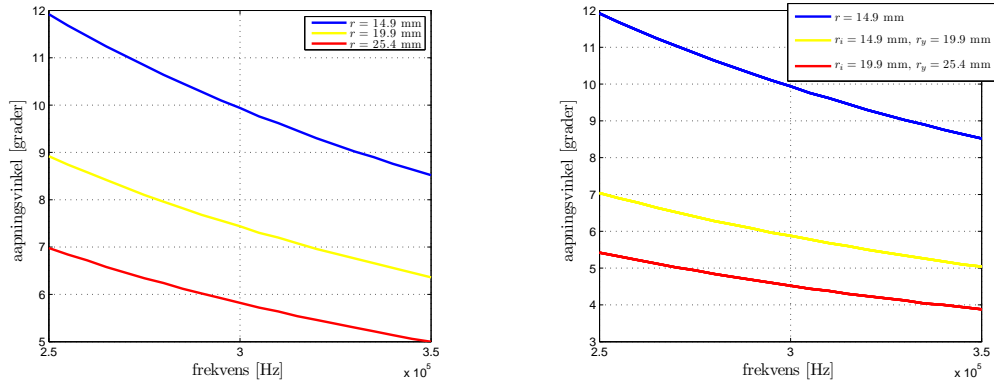
Figur 3.12: Måleresultater av direktivitet og avvik fra symmetriaksen for transduseren. Desibelskalaen er i forhold til maksimalverdien for hver frekvens.



Figur 3.13: Målt åpningsvinkel for transduseren.

Figur 3.13 viser at åpningsvinkelen er jevnt synkende fra 280 til 340 kHz, noe som kan tyde på at i dette frekvensområdet oppfører transduseren seg noenlunde som et stempel. Simuleringer av åpningsvinkelen for tykkelsessvingende ringer og skiver er vist i figur 3.14. For skiven med radius 14.9 mm, går åpningsvinkelen fra 12 til 8.5 grader i simuleringene. Dette er den simuleringen som kommer nærmest transduserens åpningsvinkel. Generelt er gjerne forskyvningen av piezoelektriske element størst mot sentrum ved tykkelsesmoden (se figur 2.3). Dette kan være en forklaring på hvorfor åpningsvinkelen er et stykke unna. I neste avsnitt er det gjort noen simuleringer av forskyvningen for de forskjellige delene.





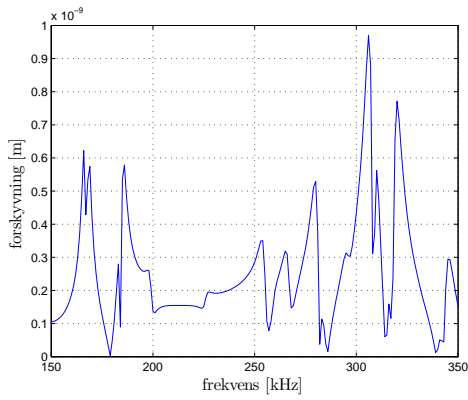
(a) Skiver med radius knyttet til områdene på transdu- (b) Ringer med indre og ytre radius knyttet til de tre serer områdene på transduseren.

Figur 3.14: Simuleringer av åpningsvinkelen for forskjellige skiver og ringer.

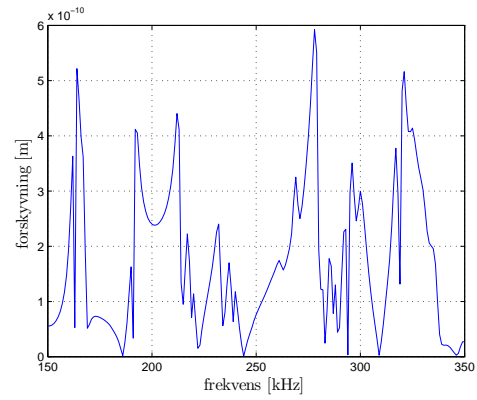
### 3.5 Midlet forskyvning av forsøksselementet med baklag

Her vil først forskyvningen til forsøksselementet simuleres, så forsøksselementet med baklag. Simuleringer for forskyvningen når transduserfronten ikke er plan, er mer tidkrevende og derfor er kun baklaget og ikke frontlaget med i simuleringene. Dersom koblingslagene fører til en større forskyvning ved lave frekvenser, burde dette også gjelde for kun baklaget.

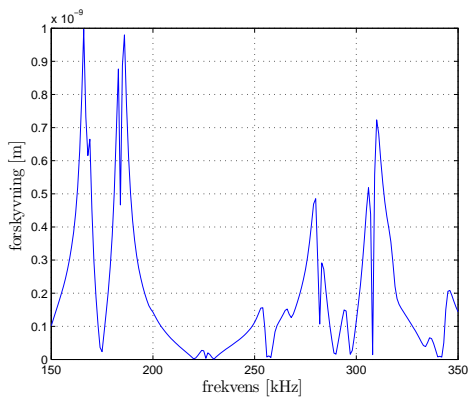
Konkret ble forskyvningen for forsøksselementet med og uten baklag simulert gjennom FEMP. Deretter ble forskyvningen ved de to ytre ringene plukket ut og midlet hver for seg.



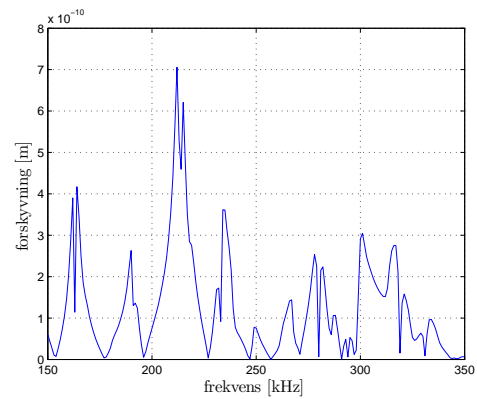
(a) Gjennomsnittlig forskyvning av den midtre ringen UTEN baklag.



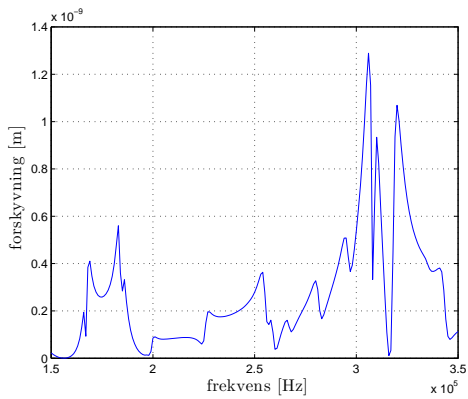
(b) Gjennomsnittlig forskyvning av den midtre ringen MED baklag.



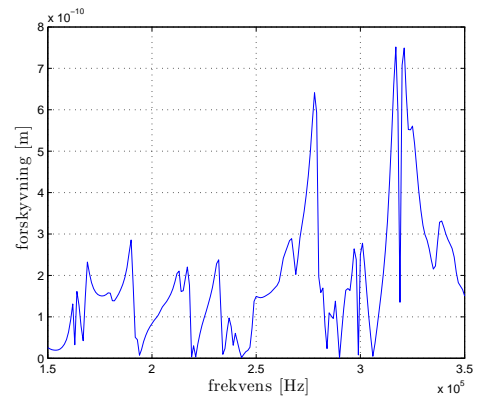
(c) Gjennomsnittlig forskyvning av den ytterste ringen UTEN baklag.



(d) Gjennomsnittlig forskyvning av den ytterste ringen MED baklag.



(e) Gjennomsnittlig forskyvning av hele forsøksselementet UTEN baklag.



(f) Gjennomsnittlig forskyvning av hele forsøksselementet MED baklag.

Figur 3.15: Gjennomsnittlig forskyvning av forsøksselementets overflate med og uten baklag. Regnet ut i vakum i FEMP.

Figur 3.15 viser at: De ytre delene har totalt sett ikke nødvendigvis større gjennomsnittlig forskyvning for lave frekvenser når baklaget legges på, enn før baklaget legges på. De ytre delene har derimot mindre gjennomsnittlig forskyvning for høye frekvenser når baklaget legges på, enn før baklaget legges på. Relativt sett svinger de ytre delene kraftigere for lave frekvenser enn for høye, noe som bør påvirke direktiviteten.

## 3.6 Sammendrag

Målet for dette eksperimentet var å se om det var mulig å lage en transduser med konstant direktivitet og stor båndbredde gjennom en enkel konstruksjon. Et trappeformet baklag og frontlag ble lagt på for å prøve å endre resonanseegenskapene til elementet i de forskjellige regionene. Dette skulle få åpningsvinkelen til å jevnes ut for et gitt frekvensbånd. Ved å se på konduktansmålinger- og simuleringer for hele transduserkonstruksjonen, ble det ikke funnet grunnlag til å hevde dette. Simuleringer av det piezoelektriske elementet, med og uten koblingslag, viste derimot at åpningsvinkelen kunne påvirkes. Videre simuleringer av konduktansen isolert sett i de forskjellige regionene gav også et håp om dette. Den kompliserte koblingen i det piezoelektriske elementet gjør det likevel vanskelig å konkludere.

Forskyvningen av det piezoelektriske elementet ble også simulert. De ytre områdene som var påvirket av baklaget fikk generelt sett en mindre forskyvning. Denne reduksjonen gjorde seg likevel for det meste gjeldene rundt hovedresonansen, eller for høye frekvenser. Utifra dette virket det som at åpningsvinkelen kunne påvirkes med koblingslagene.

Resultatet fra selve direktivitetmålingene ga en ganske varierende åpningsvinkel. Rundt hovedresonansen var den likevel jevnt avtagende. Stempelkildemodellen ga noenlunde samsvar for ett sirkulært stempel med vesentlig mindre radius enn elementets radius. Det må bety at indre deler svinger mer enn ytre. Utifra simuleringene av forskyvningen svinger ytre deler mindre ved nettopp hovedresonansen, men de burde ifølge simuleringene også svingt noe mer ved lavere frekvenser. Dette kan ikke forstås utifra direktivitetmålingene. Ved å se på modediagrammet, figur 2.3, ser det ut til at forskyvningen generelt sett er større i midten. Dette kan være en del av forklaringen på den store åpningsvinkelen.

Avviket mellom hovedlobe og symmetriaksen er påfallende. Særlig utenfor tykkelsesmoden, og det er vanskelig å forklare hva som er grunnen. Loddingen på elementet kan ha ført til at noen områder har fått endret sine piezoelektriske konstanter. Dette kan muligens føre til faseforskjeller i utstrålingen fra transduseren og dermed endre retningen på hovedloben.

Radielle moder kan være dominerende utenfor hovedresonansen. Hvordan disse vekselvirker med koblingslagene er vanskelig å si. Frontlaget har også andre effekter. Det kan føre til faseforskjeller fordi transduseroverflaten ikke er plan. Disse burde egentlig ikke ha innvirkning på selve retningen av hovedloben, men dette kan være et usikkerhetsmoment. Det ser ikke ut til at frontlaget virker som et matchelag ut til mediet. Da skulle lydutstrålingen vært større for de ytre delene og åpningsvinkelen skulle kanskje variert mindre. Spesielt ved hovedresonansen, der frontlaget er ca en kvart bølgelengde.

Det går an gå dypere inn i diskusjonen hvorvidt radielle moder påvirkes av koblingslaget, om koblingslagene er store nok, lagd av riktig materiale, faseforskjeller osv. En del av disse tankene vil tas opp i senere kapitler. Det virker uansett ikke som at denne ideen særlig god. Det er vanskelig å se noe grunnlag i resonanseegenskapene, og direktiviteten blir sannsynligvis ikke konstant over et stort frekvensområde uansett. Fra dette kapitlet vil hovedsaklig en ting tas med videre: Stempelsvingninger ser ut til å ha et ryddig felt med tanke på hovedlobe og sidelober. Dette er noe som vil brukes i hovedkonstruksjonen.

## Kapittel 4

# Teoretisk beskrivelse av transduser med konstant direktivitet over stort frekvensområde

Transduserkonfigurasjonen i kap 3 ble for enkel til å møte kravene i oppgaven. Det var vanskelig å se noen endringer i resonanseegenskapene og en del av resultatene var også vanskelig å forklare. Enkle teoretiske modeller ble satt opp for konstruksjonen, men disse var ikke beskrivende nok. Det så imidlertid ut til at en mest mulig stempelsvingende front kunne være gunstig. I dette kapittelet vil fremdriften mot en ny konstruksjon beskrives stegvis:

1. Ideen bak og innføring av begrepet ”uttynnede stempler.“
2. Finne dimensjoner på enkeltelementene inne i transduseren.
3. Plassere enkeltelementene i henhold til idéen og teoretisk simulere åpningsvinkelen for transduseren.

I dette kapittelet og utover vil hovedresonansfrekvensen stort sett være eneste aktuelle resonansfrekvens. Begrepet resonansfrekvens vil i resten av oppgaven brukes om  $f_s$  ved hovedresonansen dersom ikke noe annet er spesifisert.

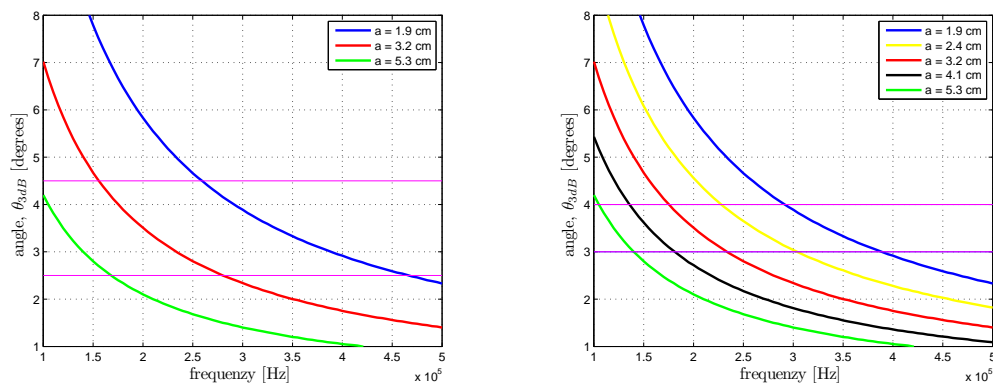
### 4.1 Ideen bak

Tanken bak den nye transduserkonstruksjonen er prinsipielt den samme som i det enkle forsøket i kapittel 3: Å la de ytre områdene svinge for lavere frekvenser enn de indre. Den nye konstruksjonen vil bestå av langt flere enkeltdele og disse vil bli sammensatt utfra teoretiske betraktninger i langt større grad enn i det enklere eksperimentet i kapittel 3. Selv om flere enkeltdele kan føre til større usikkerhet vil en god teoretisk bakgrunn bak konstruksjonen gi muligheter for senere modifikasjoner av transduseren. Det vil bli lettere å analysere resultatene utfra hvilke valg som er tatt under konstruksjonen.

Hvis en tenker seg at flere stempelkilder kan plasseres inne i hverandre, er det mulig utfra teorien presentert i kapittel 2 å få en noenlunde konstant åpningsvinkel. Fig 4.1 viser at det er bedre med fem stempler enn tre. Det går også an å få til en lignende åpningsvinkel ved å plassere ringformede stempelkilder med et felles sentrum. Tabell 2.2 gir dimensjonene for ringer som kunne vært brukt. Problemet med en ringkonstruksjon er at sidelobene er vesentlig høyere, (se figur 2.2) derfor vil konstruksjonen ta utgangspunkt i sirkulære stempler.

Siden fjernfeltet fra et stempel, ligning (2.2), er en summasjon av monopoler, antas det at mange identiske små elementer plassert jevnt utover inne i en sirkel også kan beskrives som et stempel. Ihvertfall hovedloben og de første sidelobene. For at mest mulig av energien skal stråle ut gjennom fronten av transduseren bør elementene svinge i tykkelsesretning. Dette skjer enten når  $D/T$ -forholdet er lite nok eller ved tykkelsesresonansfrekvensen. Bølgene som brer seg gjennom elementene i det første tilfellet, kan da sammenlignes med LE-moden, og den radielle bevegelsen er liten. Når utstrålingsoverflaten er liten nok, kan elementene også sammenlignes med monopoler. Dersom elementene kan betraktes som monopoler

og er helt jevnt fordelt utover inne i en sirkel, vil direktiviteten kunne tilnærmes et stempels. Et slikt tenkt stempel bestående av mange små element vil videre i oppgaven bli kalt for et "uttynnet stempel". Dersom det vibrerende arealet i transuseren varierer som beskrevet og svinger som et stempel for alle frekvenser, vil ikke bare åpningsvinkelen være konstant, men direktiviteten i sin helhet. Både hovedlobe og sidelober vil være lik, se figur 2.1. Dette er noe urealistisk å få til, og derfor blir hovedvekten lagt på åpningsvinkelen.



(a)  $\theta_{3dB}$  for tre forskjellige sirkulære stempler med radius  $a$ . Dersom frekvensområdet deles opp ligger vinkelen mellom 2.5 og 4.5 grader. (b)  $\theta_{3dB}$  for fem forskjellige sirkulære stempler med radius  $a$ . Dersom frekvensområdet deles opp ligger vinkelen mellom 3 og 4 grader.

Figur 4.1: Figurene viser utregnet åpningsvinkel for ulike sirkulærestempler.

Ideen er videre å la ett sett elementer med lik resonansfrekvens danne et uttynnet stempel med dimensjoner tilpasset en åpningsvinkel på syv grader ved nettopp resonansfrekvensen. Et nytt uttynnet stempel med en annen radius legges så oppå det første. De nye elementene har en annen resonansfrekvens og kan dermed også oppnå en åpningsvinkel på syv grader. Hvor mange elementer som brukes, bestemmer hvor mange slike stempler det er plass til.

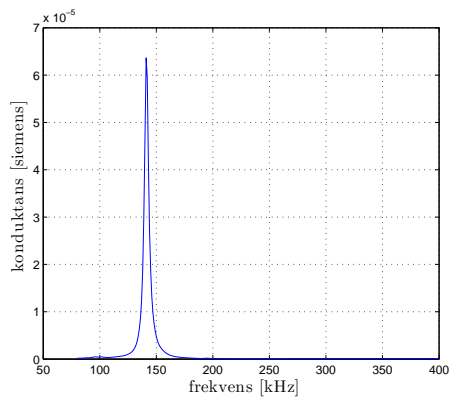
Siden frekvensene 120 kHz, 200 kHz og 333 kHz er mye brukte frekvenser, er det naturlig å ta utgangspunkt i disse og prøve å optimalisere transduseren rundt disse (dvs. ha en konstant åpningsvinkel på syv grader for disse). Figur 4.1 viser at dersom enda to senterfrekvenser (frekvenser som gir konstant åpningsvinkel syv grader) på 155 kHz og 260 kHz legges til, vil  $\theta_{3dB}$  ligge mellom 3 og 4 grader. Dette blir utgangspunktet for resten av konstruksjonen. Neste steg blir å finne passende elementer.

## 4.2 Resonansfrekvenser til indre elementer

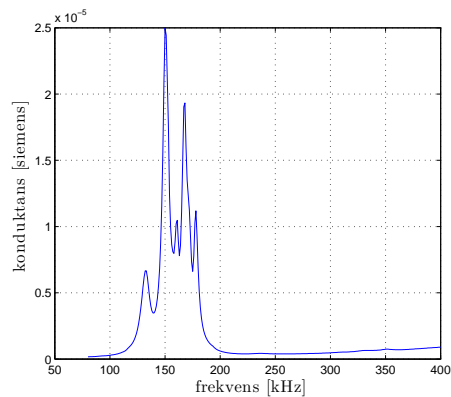
For å dekke de aktuelle senterfrekvensene og områdene rundt kan fem forskjellige elementer brukes. Hver med resonansfrekvens ved en senterfrekvens. En mer konstant åpningsvinkel for et lite frekvensbånd rundt senterfrekvensen kan oppnås ved å la to og to sett av elementer danne hvert uttynnet stempel: en elementtype med resonansfrekvens litt under og en med resonansfrekvens litt over senterfrekvensen. Elementene kan så plasseres slik at noen av de med lavest resonansfrekvens ligger litt utenfor de med høyest. Ved å tenke seg at begge elementtypene svinger med like stor amplitude ved senterfrekvensen, men forskjellig utenfor, vil litt forskjellige områder svinge ved forskjellig frekvens, og åpningsvinkelen kan holdes konstant. Ideelt vil den holdes konstant over et så stort frekvensområde at neste uttynnet stempel (bestående av to elementsett) kan ta over og gjøre det samme i sitt frekvensområde. Det er selvsagt helt avgjørende at hvert uttynnet stempel enten kan eksisteres hver for seg eller at bidraget fra de andre uttynnetede stemplene er neglisjerbart. Tanken å optimalisere transduseren ved de fem opprinnelige senterfrekvensene, ble holdt helt frem leveransen av elementene. Den måtte justeres noe derfra.

Hver elementtype vil ha et frekvensbånd som er avhengig av indre tap, fjærkoblinger grunnet fyllmateriale mellom elementene og lydutstråling. For å få en pekepinn på hvor stort frekvensområde en kan

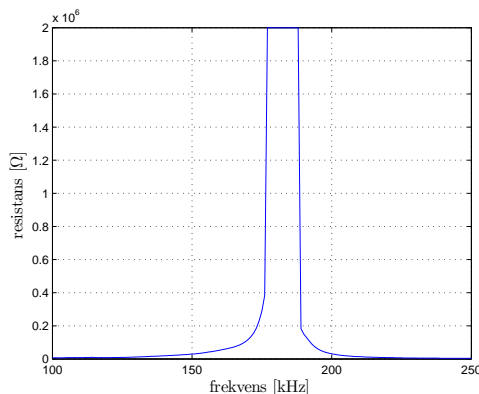
regne med å få utstråling i, ble et lite eksperiment utført. Figur 4.2(a) viser målt konduktans for et stavformet, rektangulært element med høyde 10 mm og bredde 2 mm. Isolert sett er resonanstoppen ganske smal. Videre ble en klasse av 3X4 slike element limt sammen med silikon som også vil være fyllmateriale for noen regioner i den ferdige transduserkonstruksjonen. Konduktansen måles for et av elementene i midten av klasen, se figur 4.2(b). Utstrålingsmediet er luft.



(a) Konduktans for et fritt element.



(b) Konduktans for det midtre elementet i klasse på 12 staver



(c) Resistans for et fritt element.

Figur 4.2: Resistans og konduktansmålinger for en piezoelektrisk stav med høyde og bredde henholdsvis 10 mm og 2 mm.  $f_s = 140$  kHz og  $f_p = 164$  kHz (max resistans [4]). Impedansanalysatoren gikk i metning for verdier større enn 2 M $\Omega$ .

Utfra figur 4.2(b) kan det sees at det har oppstått resonanser rundt den opprinnelige hovedresonansen til det enkle elementet. Dette er grunnet fjærkoblingene som silikonlaget gir. Utslaget er over et frekvensområde på ca 40 kHz fra ca 135-175 kHz. Om de ekstra resonansene er svingemoder som gir god akustisk utstråling er for tidlig å si, men uansett bør konduktansen til de forskjellige elementene overlape noe.

Dersom fjærkoblingene vist i figur 4.2(b) er noelunde representative for alle elementene kan frekvensene fra tabell 4.3 være fornuftige.

Tabell 4.1: Resonansfrekvens for de indre elementene.

Senterfrekvens [kHz]	120	155	200	260	333
Resonansfrekvens for elementene [kHz]	110 og 130	140 og 175	190 og 215	240 og 275	310 og 350

I tillegg til fjærkoblingen vil lydstrålingen, koblingslag og den øvrige transduserkonstruksjonen bestemme hvor utsmurt resonansfrekvensene blir. Dette vil igjen bestemme hvilke element som svinger for hvilke frekvenser og igjen ha innvirkning på direktiviteten. Dette vil diskuteres noe mer i seksjon 4.6.

### 4.3 Dimensjoner av indre element

Ved valg av størrelse på elementene er flere ting viktig. For det første må antall elementer for hver sentrefrekvens være stort nok til å sørge for et representabelt uttynnet stempel. Er det for få elementer vil ikke direktiviteten kunne tilnærmes et stempels. På en annen side er større elementer lettere å hanske med og sette sammen. Blir bredden på elementene stor kan radielle moder få økt betydning.

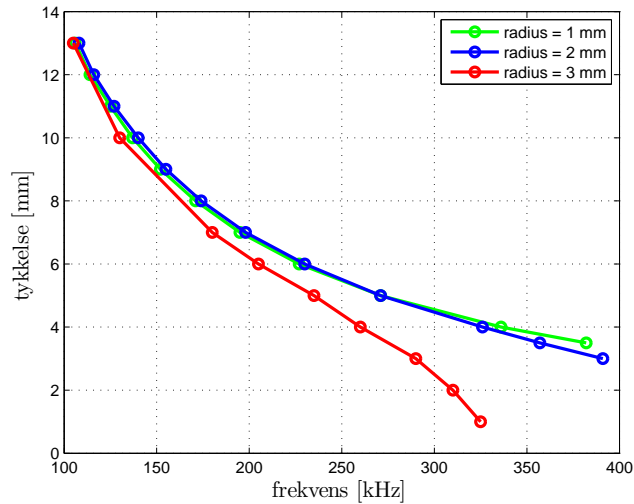
Av praktiske årsaker vil elementene leveres som staver og ikke sylindre. Med gode nok materialparametre og stort nok lengde/bredde-forhold kan den endimensjonelle modellen brukes til å finne lengden på stavene. Ferroperm Piezoceramics A/S oppgir  $k_{33} = 0.7$  og  $s_{33}^D = 12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$  [15]. Disse parametrene satt inn i ligning (2.16)-(2.18) gir  $f_1 = 123 \text{ kHz}$  for elementet fra figur 4.2. Dette stemmer dårlig med den målte verdien,  $f_s = 140 \text{ kHz}$ . Derfor vil materialkonstantene bestemmes eksperimentelt:

Siden impedansanalysatoren gikk i metning, settes  $f_2 = 182 \text{ kHz}$  fra figur 4.2. Koblingskonstanten regnes så ut fra ligning (2.18).  $f_1 = f_s$  og  $f_2 = f_p$  fra figur 4.2 brukes og, dermed blir  $k_{33} = 0.68$ . Ved ligning 2.16, der  $l = 10 \text{ mm}$  regnes kompliansen ut,  $s_{33}^D = 9.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ . Ligning (2.16) og (2.18) kan nå brukes for å finne lengden på stavene. Utregningen er gjort gjennom programmet endimkladdMain.m (se vedlegg A.1.1). Resultatene er gitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Lengden for staven når den endimensjonelle modellen er brukt.

Resonans [kHz]	110	130	140	175	190	215	240	275	310	350
Tykkelse [mm]	12.6	10.7	9.9	7.9	7.3	6.5	5.8	5.1	4.9	4.0

Kravene for at den endimensjonelle modellen skal være gjeldende, varierer i litteraturen. Standarden oppgir at lengde/vidde- forholdet skal være større enn ti, mens Morgan Matroc sier forholdet bør være minst to og en halv [10]. Det vil ikke være aktuelt å bruke en vidde på mindre enn to millimeter, og dermed når de miste stengene ikke opp til det mildeste kravet. For en større innsikt brukes FEMP til å finne lengden. Dette blir også en tilnærming siden FEMP beregner lengden for sylindre og ikke staver. Det antas at disse likevel er sammenlignbare. Konkret ble resonansfrekvensen funnet for vilkårlige lengder. Lengdene ble plottet opp mot hovedresonansfrekvensen, og de ønskede lengdene ble så lest av, se figur 4.3. Forskjellige radiuser ble undersøkt og spesielt for radius tre millimeter var andre moder tydelig tilstede. Dette kan forstås ved å studere figur 2.3. For Pz27 som for PZT-5A vil flere moder eksiteres når  $D/T$ -forholdet øker.



Figur 4.3: Viser tykkelsen til sylindere for en gitt hovedresonans

For de minste radiusene stemmer den endimensjonale modellen godt overens med simuleringene over. Siden de minste staver ikke innfridde det mildeste kravet, ble det likevel tatt utgangspunkt i FEMP-simuleringene.

Det vil helt klart være tettest av elementer i midten av konstruksjonen. For å få representable "uttynnede stempler" er det viktigst at elementene er små her slik at de kan fordeles jevnt utover. Derfor er elementene med radius en millimeter å foretrekke. For elementer som skal plasseres lenger ute i konstruksjonen kan nok større elementer brukes, men å kutte elementene i forskjellige størrelser er også tidkrevende. Radielle svingninger antas også å minske ved tynnere stenger. Det vil derfor bli tatt utgangspunkt i simuleringene med radius en millimeter. Tykkelsen til elementene er funnet ved avlesning i figur 4.3 og er presentert i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Resonansfrekvens og tykkelse for de indre elementene. Bredden er 2mm for alle

Resonans [kHz]	110	130	140	175	190	215	240	275	310	350
Tykkelse [mm]	12.5	10.6	9.8	7.8	7.2	6.4	5.7	4.9	4.4	3.8

$D/T$ - forhold fra 0.2 til 2 gir en kontinuerlig overgang fra LE- moden til den radielle moden [1]. Ut fra tabell 4.3 er det største  $D/T$ -forholdet ca 0.5, og det er naturlig å anta at selv den minste staven i hovedsak eksiteres i LE- moden.

## 4.4 Leverte element

Stavene, som ble kuttet av piezoelektriske element på verkstedet ved IFT, ble levert med noe andre dimensjoner enn utgangspunktet fra tabell 4.3. De reelle dimensjonene og resonansfrekvensene er målt og oppgitt i tabell 4.4. Disse er en middelvei av fire og fire element. Spesielt for de små elementene varierte resonansfrekvensene mye grunnet den relativt store variansen i lengden. Det legges til at ingen andre konduktanstopper ble observert innenfor 100-400 kHz.

Tabell 4.4: Resonansfrekvens og tykkelse for de indre elementene. Bredden er 2mm.

Resonans [kHz]	116	138	144	185	200	222	250	287	315	380
Tykkelse [mm]	12.5	10.5	9.9	7.8	7.2	6.5	5.7	5.0	4.4	3.7



De leverte elementenes resonansfrekvenser varierer såpass fra det teoretiske utgangspunktet at tankegangen må justeres noe. En mer generell fremstilling er bedre egnet: Overlappende frekvensbånd kan sørge for en konstant åpningsvinkel dersom flere av elementsettene eksiteres samtidig. Elementer med resonansfrekvens både over og under den påtrykte frekvensen vil kunne bidra til feltet avhengig av bredden på resonansen. Prinsippet med at ytre områder svinger ved lavere frekvenser enn indre gjelder fortsatt, men begrepet senterfrekvens går ut. Begrepet uttynnet stempel mister også litt av betydningen siden det var to og to elementsett som skulle danne et slikt tenkt stempel. Istedet vil transduseren beskrives ved elementsettene som hver vil settes opp med en åpningsvinkel på syv grader.

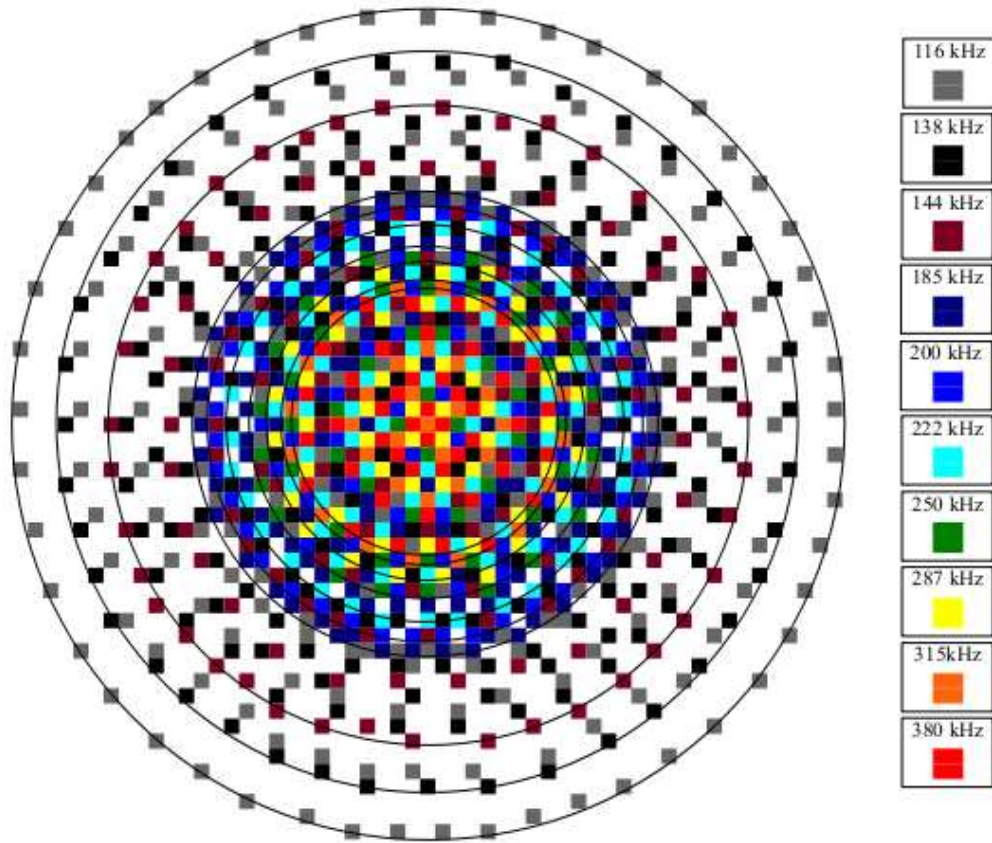
I den ferdige konstruksjonen skal det være mulig å eksitere ett eller flere elementsett samtidig ved å påtrykke signal på de aktuelle settene. Det er kanskje nok å sette strøm på alle settene fordi resonansfrekvensene (eller mangel på resonansfrekvens ved påtrykt frekvens) vil virke som et slags filter i forhold til hvilke elementer og dermed hvilke områder som svinger. Dette tenkte filteret vil videre i oppgaven betegnes som ”mekanisk filter.“

## 4.5 Plassering av elementer

For å finne nøyaktig plassering av elementene ble dataprogrammet `nirunde.m` benyttet (se vedlegg A.2.1). Dette baserer seg på Fouriertransformen av plasseringen av elementene. Det gir strålediagrammet i fjernfeltet, og åpningsvinkelen kan dermed finnes for ulike plasseringer av de ulike elementene. Tidligere utregnede radiuser i 4.1 ble brukt som utgangspunkt for plasseringen av elementene og så justert til en åpningsvinkel på syv grader for hver av de ti elementtypene. Antall elementer i hvert sett må avpasses slik at alle elementtypene får plass til ”sine element“ i midten. På grunn av plassproblemer i det innerste området, ble det relativt sett plassert flere av de store elementene i de ytre delene enn i de indre. Uansett vil `nirunde.m` ha kontroll over feltet. Verdiene i tabell 4.5 måtte settes opp parallelt med plasseringen av elementene i figur 4.4 for å beholde oversikt over arealutnyttelsen. Siden bredden på elementene er to millimeter, er ikke elementer simulert med oddetalls avstand fra sentrum i midten av konstruksjonen.

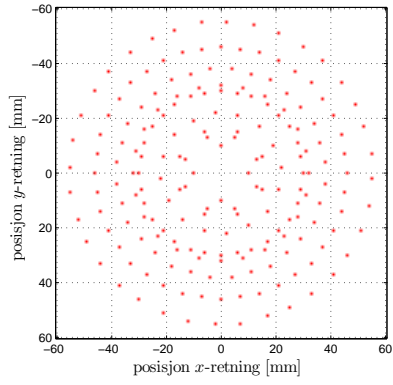
Tabell 4.5: Antall elementer og plasseringen av disse for simuleringene i fig 4.5-4.8. Elementtypen er beskrevet ved resonansfrekvensen.  $r$  står for avstand fra elementene til sentrum. Inne i parantesen står antall elementer i den reelle konstruksjonen og ikke det som er simulert. Effekten av ett element er ubetydelig.

Elementer [kHz] $r$ [mm]	380	315	287	250	222	200	185	144	138	116
0		1								
2	4		4							
4		4		4		4				
6	12				4					
8			12				4		8	
10		12			12			8		4
12	12			12		12	4			
14							16	4	12	8
16	16		16		16			12		8 (7)
18		16		16		16				
20			20		20		20		20	
22				20		16		16		16
24							44			
26					32				32	
28						40		28		
30							48			32
32									32	24
34								28		
36									24	
38										32
40									32	
42								40		
44										
46										40
48									40	
50										
52										
54										
55										36

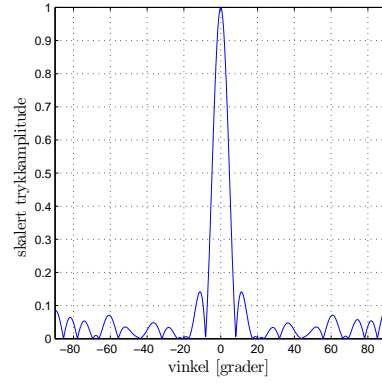


Figur 4.4: Viser plasseringen av de forskjellige elementene med fargekode. Sirklene viser ytterkanten til hvert elementsett.

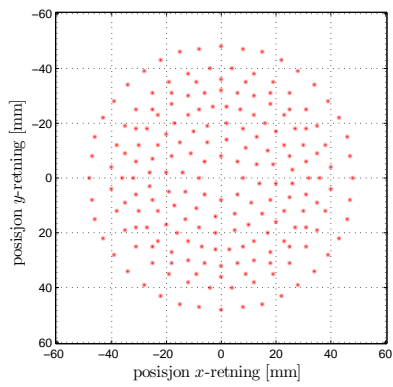
På de følgende sidene finnes figurer av direktivitetsplott i fjernfeltet for aktuelle elementsammensetninger regnet ut med `nirunde.m`.



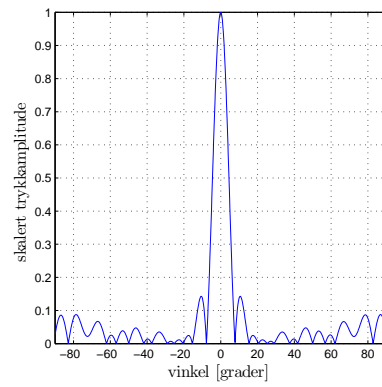
(a) Plasseringen av 116 kHz- elementer.



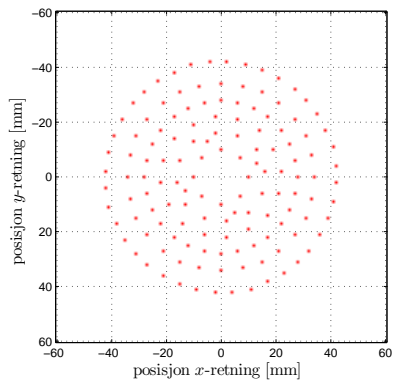
(b) Direktivetsplott i fjernfeltet for 116 kHz- elementer.



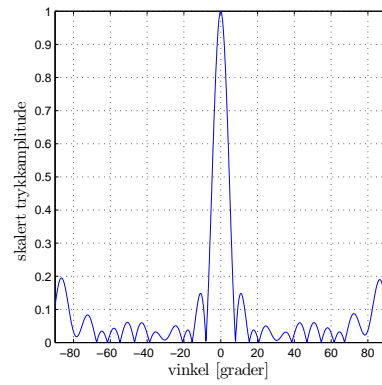
(c) Plasseringen av 138 kHz- elementer.



(d) Direktivetsplott i fjernfeltet for 138 kHz- elementer.

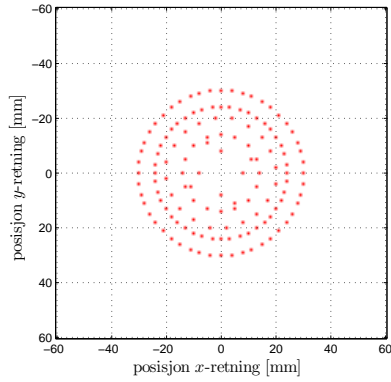


(e) Plasseringen av 144 kHz- elementer.

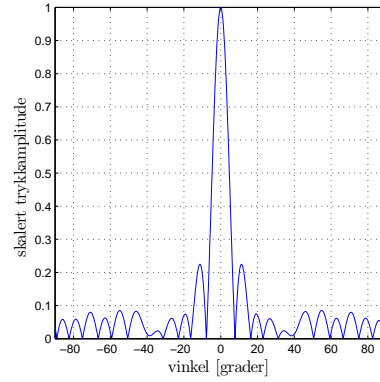


(f) Direktivetsplott i fjernfeltet for 144 kHz- elementer.

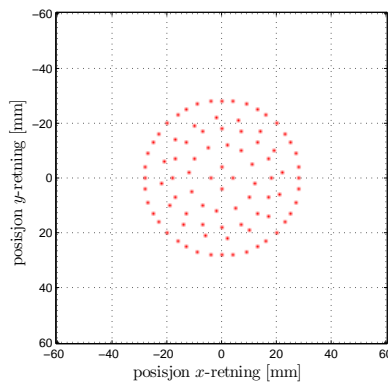
Figur 4.5: Kildesammensetning og direktivetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 116 til 144 kHz.



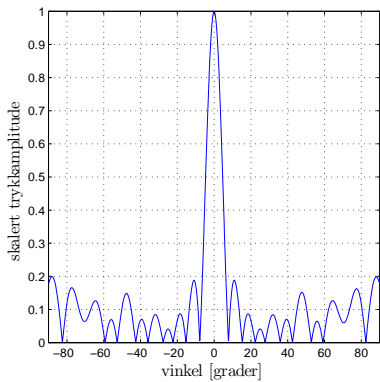
(a) Plasseringen av 185 kHz- elementer.



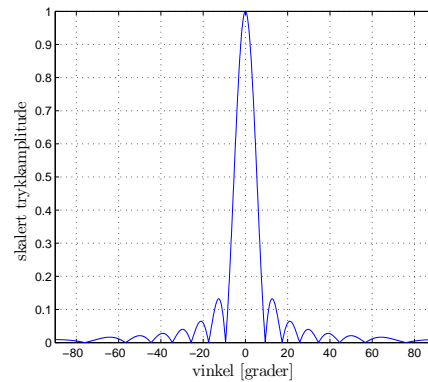
(b) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 185 kHz- elementer.



(c) Plasseringen av 200 kHz- elementer.

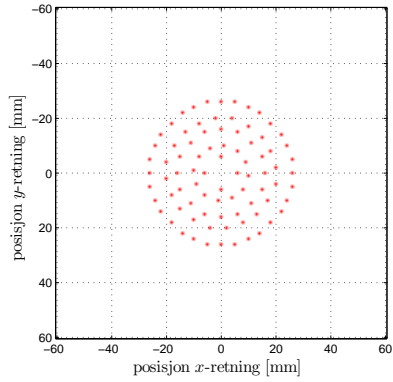


(d) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 200 kHz- elementer.

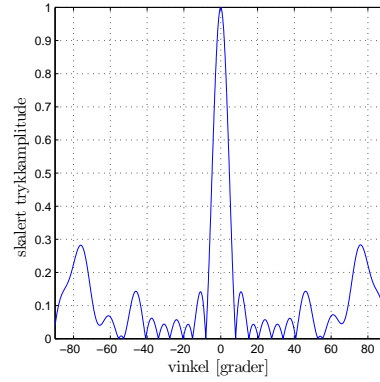


(e) Teoretisk direktivitetsplott i fjernfeltet for et stempel med radius 28 mm og frekvens 200 kHz.  $\theta_{3dB}$  er 4.0 grader.

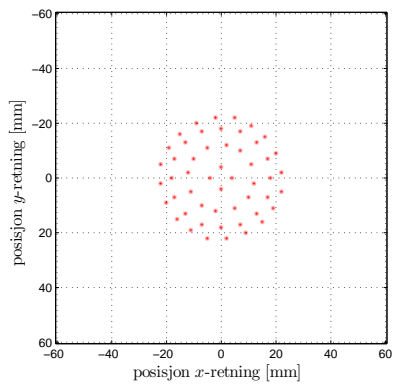
Figur 4.6: Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 185 og 200 kHz. I figur 4.6(e) er tilsvarende direktivitetsplott for et stempel vist.



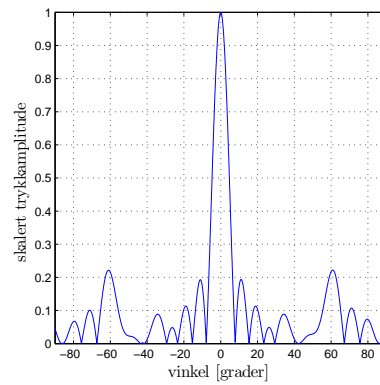
(a) Plasseringen av 222 kHz- elementer.



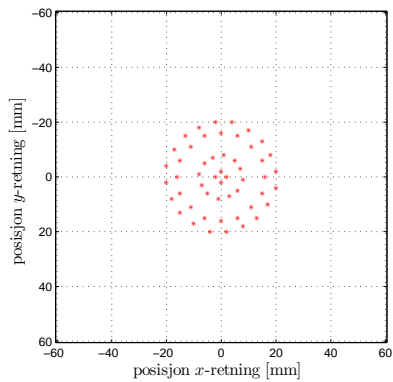
(b) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 222 kHz- elementer.



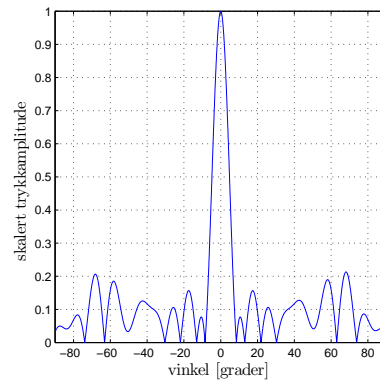
(c) Plasseringen av 250 kHz- elementer.



(d) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 250 kHz- elementer.

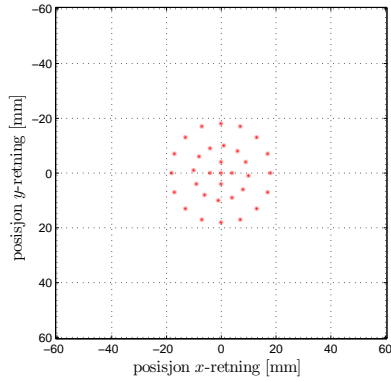


(e) Plasseringen av 287 kHz- elementer.

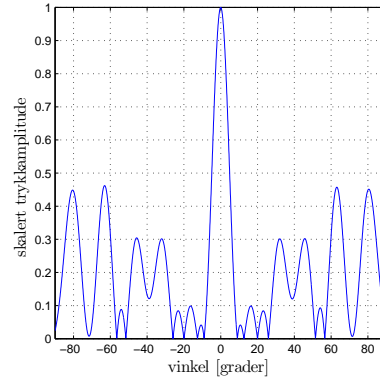


(f) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 287 kHz- elementer.

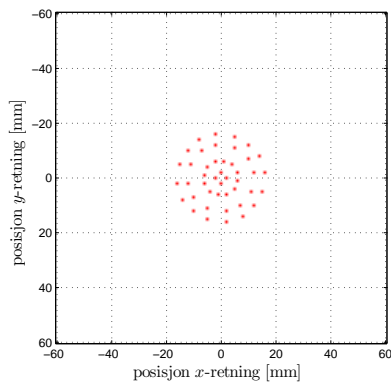
Figur 4.7: Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 222 til 287 kHz.



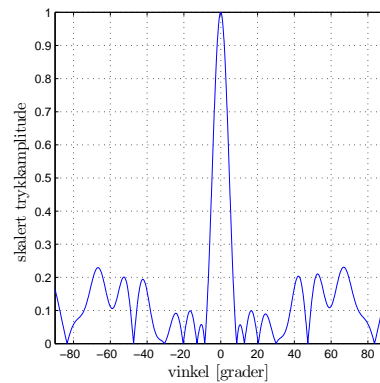
(a) Plasseringen av 315 kHz- elementer.



(b) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 315 kHz- elementer.



(c) Plasseringen av 380 kHz- elementer.



(d) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 380 kHz- elementer.

Figur 4.8: Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for elementer med resonansfrekvens fra 315 og 380 kHz.

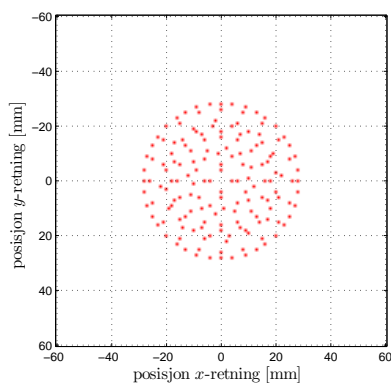
I figur 4.5, 4.6, 4.7 og 4.8 er direktivitetsplott for for de respektive settene av like elementer simulert. Dette er utgangspunktet for transduserkonstruksjonen. I figur 4.6(c), 4.6(d) og 4.6(e) er det gjort en sammenligning av et vanlig sirkulært stempel og et elementsett med samme ytre radius. De tre første sidelobene kan sammenlignes selv om de er noe forskjøvet i forhold til hverandre.  $\theta_{3dB}$  for elementene er regnet ut til å være  $3.44^\circ$  (se tabell 4.6) mens for stempelet er den  $4.0^\circ$ . Dette er fordi det uttynnede stempelet har en større tetthet av elementer ytterst enn innerst og presser åpningsvinkelen innover. Ved større vinkler er ikke sidelobene sammenlignbare fordi selve tettheten av elementene har mye å si. Dette forstås utifra at direktiviteten i fjernfeltet er gitt ved den fourierransformerte av plasseringen av elementene, se ligning 2.21. Eller med andre ord: elementsettet er ikke homogent slik som stempelet er, noe som kommer sterkest til uttrykk ved større vinkler. For elementsett med høy resonansfrekvens er sidelobenivået generelt høyere. Det må komme av at inhomogeniteter vises tydeligere ved liten ytre radius og høy frekvens.

Dersom elementene kan kan svinge separat, vil åpningsvinkelen til transduseren være nokså konstant som vist i tabell 4.6. Usikkerheten i simuleringene kommer an på oppløsningen som programmet `nirunde.m` bruker. Denne kunne vært bedret ved en interpolasjon i MATLAB, men ble ikke gjort fordi andre usikkerheter vil være langt større i den endelige transduserkonfigurasjonen. Usikkerheten i  $\theta_{3dB}$ -vinkelen grunnet oppløsningen er satt til 0.1 grader.

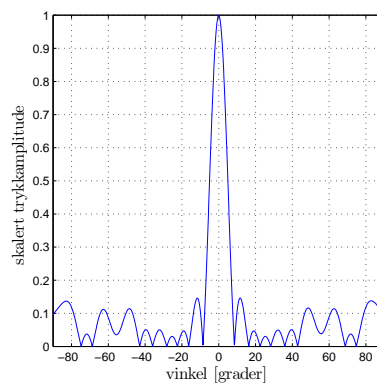
Tabell 4.6:  $\theta_{3dB}$  for de ulike uttynnede stemplene fra figur 4.5, 4.6, 4.7 og 4.8.

Elementtype og frekvens [kHz]	116	138	144	185	200	222	250	287	315	380
$\theta_{3dB}$ [grader]	3.52	3.43	3.44	3.49	3.44	3.49	3.53	3.52	3.55	3.51

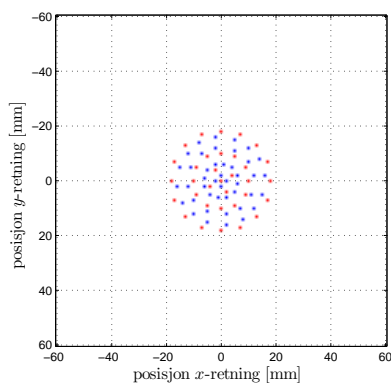
I den neste figuren er noen kombinasjoner av elementer simulert. Dette er relevant fordi elementene eksiteres ikke kun rundt sin resonansfrekvens. 222 kHz- element vil f.eks. derfor også svinge noe ved f.eks. 200 kHz.



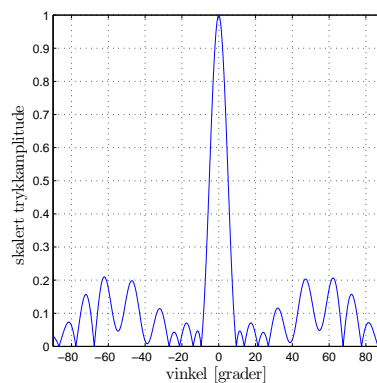
(a) Plasseringen av 222 og 200 kHz- elementer.



(b) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 222 og 200 kHz- elementer eksitert med 200 kHz.



(c) Plasseringen av 380 og 315 kHz- elementer. Blå farge gir kildestyrke halvparten av rød farge.



(d) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 380 og 315 kHz- elementer eksitert med 315 kHz. 380 kHz- elementene har halv kildestyrke i forhold til 315 kHz- elementene.

Figur 4.9: Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for blandede elementer.

Figur 4.9(d) sammenlignet med figur 4.8(b) og figur 4.9(b) sammenlignet med figur 4.6(d) viser tydelig at sidelobene minker når flere element legges til. Åpningsvinkelen for disse og noen andre sammensetninger er gitt i tabell 4.7.

Tabell 4.7: Viser  $\theta_{3dB}$  for de ulike sammensetningene i figur 4.9 og B.1-B.2 fra vedlegg B. Parentes betyr at de aktuelle elementene er simulert med halv kildestyrke.

Elementtyper [kHz]	222 og 200	222 og 200	222 og 200	380 og (315)	315 og (380)	380 315	380 315
Påtrykt frekvens [kHz]	200	222	211	380	315	380	315
$\theta_{3dB}$ [grader]	3.66	3.29	3.57	3.28	3.75	3.22	3.89



Det er tydelig at åpningsvinkelen synker når elementer legges til utenfor eller i de ytre områdene av et elementsett. Tilsvarende øker åpningsvinkelen når elementer legges til i de indre områdene. Den totale åpningsvinkelen vil derfor være avhengig av hvor mange element som legges til i de ytre områdene i forhold til de indre.

## 4.6 Faktisk svingemønster

I disse simuleringene er kun aktive, frie element tatt med. Det interessante i forhold til åpningsvinkelen er hvor mye av transduseroverflaten som faktisk svinger ved de forskjellige frekvensene. For hvert elementsett vil det mellom elementene være andre passive element og annet fyllmateriale. Disse områdene vil også svinge. Det har blitt gjort en del arbeid på å beskrive komposittransdusere med et konstant element/fyllmateriale-forhold [2, 16, 12, 17, 18, 19]. Diverse moder har blitt karakterisert og en del materialparametre bestemt. Dette kan igjen gi teoretisk forståelse av utstrålingsegenskapene.

I denne transduseren er ikke element/fyllmateriale-forholdet konstant og derfor vil en slik beskrivelse være vanskelig. Noen element inne i transduseren vil stå ved siden av store element, andre ved siden av små. Noen element vil være omringet av mye fyllmateriale, andre av lite. Forståelsen av disse forholdene er spesielt viktig for to ting:

- Frekvensbåndet til de aktive elementene vil være avhengig av koblingen til det passive området.
- Det passive området vil svinge avhengig av koblingen til de aktive elementene

Begge disse faktorene vil ha innvirkning på åpningsvinkelen.

Tapet for hvert av elementene er avhengig av indre tap, utstråling til mediet, tap i fyllmaterialet og den øvrige transduserkonstruksjonen. Dette vil føre til en økt båndbredde. Koblingen til omgivelsene rundt kan også føre til at det oppstår nye resonanser og forskyvninger av de opprinnelige konduktanstoppene. Diskusjonen koker ned til hvilke områder som svinger utover de aktive elementene som følge av tap og kobling, og hvilken innvirkning disse ekstra svingende områdene har på direktiviteten. Det antas også at andre svingemønstre enn tykkelsessvingninger kan oppstå, lignende dem som er beskrevet for komposittransdusere. Spesielt dersom flere elementsett eksiteres samtidig. Hvordan disse innvirker på direktiviteten er vanskelig å si og vil bli diskutert nærmere i resultatdelen. Et annet problem kan være at også andre og tredjeharmoniske av den påtrykte frekvensen oppstår og innvirker på utstrålingen.

## Kapittel 5

# Konstruksjon av transduser og konduktansmålinger

Dette kapittelet vil ta for seg selve konstruksjonen av transduseren. Forskjellige eksitasjonsmuligheter oppnås gjennom å ha flere kanaler. Fargekoder for kanalene og konduktansplott presenteres.

### 5.1 Utstyrliste

Tabell 5.1: Utstyrliste

Utstyr	Modell/Type	Tillegg
Løsemiddel	4-Methyl-2-pentanone, ACS, reagent, $\geq 98,5\%$	-
Lim 1	Super Epoxy	-
Lim 2	Araldite	-
Lim 3	Ledende Sølvlim	-
Lim 4	Silikon	-
Messingfolie	75 $\mu\text{m}$ tykkelse	-
Stålløkk	5 mm tykt	-
Hul stålsylinder	Ytre radius = 14.0 cm Indre radius = 12.4 cm Høyde = ca 10 cm	-
Nylonring	-	-
Loddeører	-	-
Gjennomføring	-	-
Lakkerte kobberledninger	Diameter = 0.25 mm	-
Aluminiumsfolie	-	-
Sprøyte	-	-
Koblingsbrett	-	-
Impedansanalysator	Hewlett Packard 4192 A LF	Styreprogram A.3.1
Multimeter	TTi 1604 40000 Count Digital Multimeter	-
Strømforsyning	TTi EL302D Dual Power Supply	-

### 5.2 Konstruksjonen

Transduseren ble satt sammen fra fargekoden i figur 4.4. Elementene ble kuttet opp fra større blokker med dampede elektroder på hver side. Dimensjonene til de oppkuttete elementene er to ganger to millimeter stort tverrsnitt og lengder fra 3.7 - 12.5 mm (se tabell 4.4). Polariseringsretningen til hvert av elementene er gitt av den dampede elektroden på ene siden.

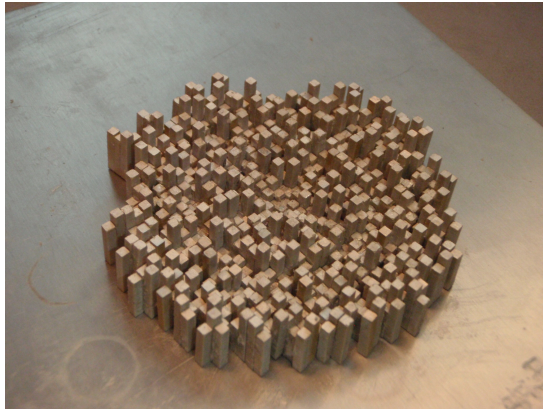
I utgangspunktet skulle elementene limes direkte ned på messingfolien (altså frontelektroden) med elektrisk ledende sølvlim. Sølvlimen som ble benyttet hadde svært dårlig festeevne, derfor ble den midterste delen av transduseren limt sammen med silikon før den ble festet på folien, se fig 5.1. Ujevne kanter og flater på hvert element gjorde sammenlimingen av den midtre delen vanskelig, og førte videre til en ujevn felles overflate. For å sikre god elektrisk kontakt til alle elementene, ble aluminiumsfolie limt på elektrodeflaten. I tillegg ble det smurt epoxy over flaten for å sikre mekanisk kontakt. Aluminiumsfolien ble limt på messingfolien med sølvlim utenfor den midtre delen og dermed oppnås elektrisk kontakt til alle elementene. Ulempen er at epoxyen fungerer som et lite ekstra frontlag. Aluminiumsfolien og noe epoxyrester utenfor den midtre delen gjorde at elementene som skulle være her, måtte forskyves to millimeter utover. Dette gjaldt området 33-40 mm utfra sentrum. Ifølge tabell 4.5 berører dette 116, 138 og 144 kHz- elementsettene. Endring i teoretisk åpningsvinkel som følge av dette er tatt hensyn til i resultatdelen.

De elementene som er utenfor den midtre delen, ble festet enkeltvis eller gruppevis til messingfolien ved hjelp av sølvlimen. Det ble brukt silikon mellom elementene som stod gruppevis. Videre ble det lagt litt epoxy helt nederst ved foten av elementene for å få dem til å stå mer stabilt. Stålsylinderen ble så limt ned på messingfolien rundt elementene med epoxy. Loddeører ble montert på en nylonring lenger oppe på metallsylinderen. Se figur 5.1.

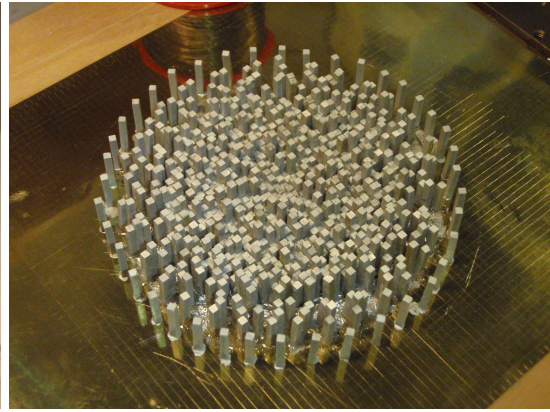
Hvert element må ha en ledning festet til seg. Med over tusen elementer må ledningene festes slik at de ikke kommer i veien for hverandre. Hver kanal har to festepunkt, ett på hver side av transduseren, dermed trenger ingen av ledningene å dras over midten. Ledningene ble festet fra ytterst til innerst.

Ledningene ble først avisolert i ene enden ved å svi bort lakken og pusse vekk sot og et eventuelt oksidert lag på utsiden. Videre ble ledningene loddet på loddeørene og kuttet til passelig lengde. Den andre enden ble så avisolert, og enden ble krøllet sammen i en løkke for å få større festeoverflate. Denne løkken ble så penslet med sølvlim. Da denne var tørket, ble selve ledningen bøyd ned mot det aktuelle elementet slik at den sto med mekanisk spenning ned mot elementet. Deretter ble noen dråper av løsningsmiddelet dryppet ned over sølvlimet som løste seg opp, størknet igjen og festet ledningen til elementelektroden. Da dette igjen var tørket, ble en dråpe epoxy lagt oppå sølvlimet. Først da epoxyen tørket, var festeanordningen rimelig robust.

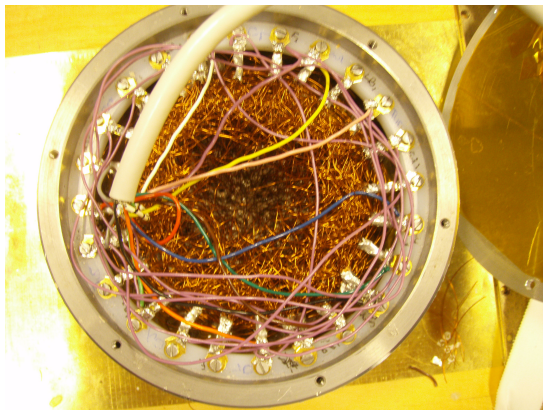
Da alle ledningene var festet, ble hver kanals to festepunkter koblet sammen. Hovedledningen som består av tolv mindre ledninger ble tredd gjennom en vanntett gjennomføring i lokket, og hver av de tolv ledningene ble loddet på sin respektive kanal. For å få elektrisk skjerming ble en ledning loddet fast i frontelektroden på innsiden av transduseren. Skjermen som representerer jordledningen, ble så festet til denne ledningen. Fargekoder på ledningene skiller dem fra hverandre. Til slutt ble lokket og gjennomføringen skrudd fast tett med silikon for å få transduseren vanntett.



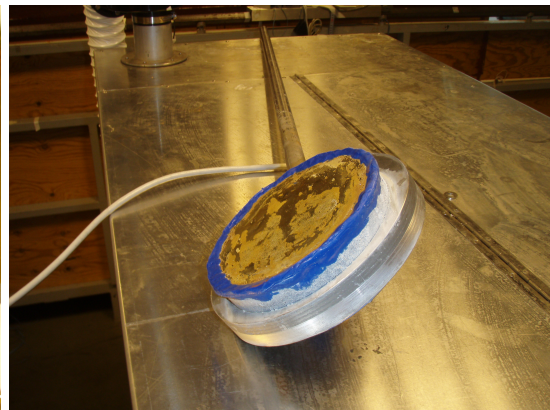
(a) Den midterste delen av transduseren der elementene står tett i tett.



(b) Alle elementer er limt ned på elektrodeflaten.



(c) Ledningene er festet og ordnet i kanaler. Loddeørene er festet på nylonringen.



(d) Den ferdige transduseren med oppheng festet til.

Figur 5.1: Kort bildeserie over produksjonen av transduseren.

### 5.3 Fargekoder på kanalene

Tanken er å eksitere forskjellige elementsett. Hvordan kan dette oppnås? Det enkleste er å påtrykke signal på alle elementene og håpe at resonansfrekvensene bestemmer hvilke regioner som vil svinge. Det er dette som kalles det "mekaniske filteret" i kapittel 4. Likevel ble elementene ordnet i forskjellige kanaler slik at signal kunne påtrykkes bestemte plasser i transduseren. Fargekoder til kanalene er vist i figur 5.2. Det presiseres at fargene ikke har noen sammenheng med dem i arbeidstegningen, figur 4.4.



Figur 5.2: Viser fargekoder for de forskjellige kanalene.

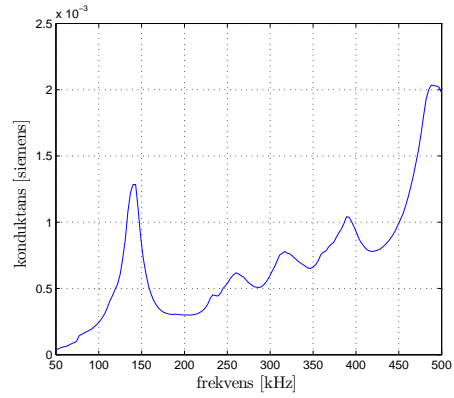
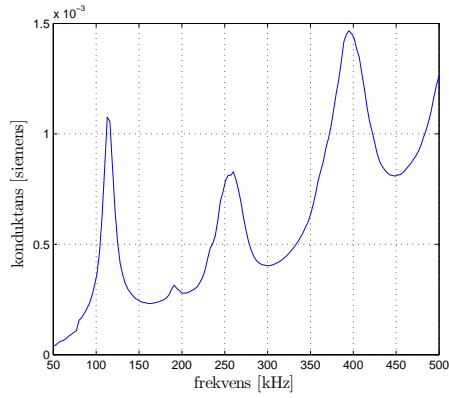
I det følgende er det listet opp ekstakt hvilke element som er koblet til de forskjellige fargeledningene. Den "opprinnelige resonansfrekvensen" er den midlede verdien, hentet fra tabell 4.4). Lilla, svart, grå og hvit kanal er noe modifisert i forhold til arbeidstegningen grunnet forskyvningen av noen element.

RØD: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 380 kHz. Figur 4.8(c) minus ytterste ring.  
 ORANGE: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 315 kHz. Figur 4.8(a) minus ytterste ring.  
 GUL: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 287 kHz. Figur 4.7(e) minus ytterste ring.  
 GRØNN: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 250 kHz. Figur 4.7(c) minus ytterste ring.  
 ROSA: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 222 kHz. Figur 4.7(a) minus ytterste ring.  
 LYSEGRØNN: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 200 kHz. Figur 4.6(c) minus ytterste ring.  
 BLÅ: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 185 kHz. Figur 4.6(a) minus ytterste ring.  
 LILLA: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 144 kHz. Figur 4.5(e) minus ytterste ring.  
 SVART: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 138 kHz. Figur 4.5(c) minus ytterste ring.  
 GRÅ: Elementer med opprinnelig resonansfrekvens 116 kHz. Figur 4.7(a) minus ytterste ring.  
 BRUN: Ytterste ringen i figur 4.6(c), 200 kHz- element.  
 HVIT: Alle de ytterste ringene minus 200 kHz- elementene.

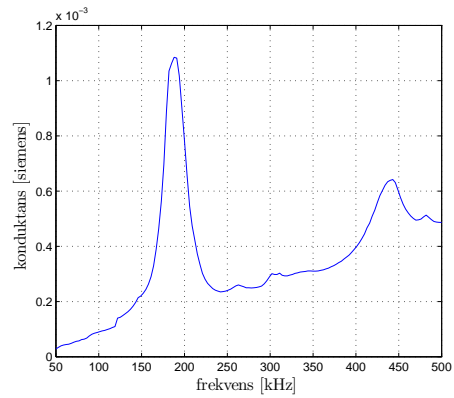
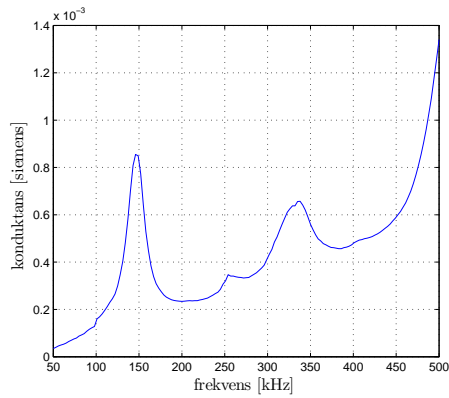
Nå kan hvert av elementsettene eller kombinasjoner eksiteres uten den ytterste ringen. Den kommer imidlertid med dersom hvit kanal eksiteres. Hvor stor betydning de andre elementene i den hvite kanalen har kan da finnes ut. Dette vil fortelle om det mekaniske filteret virker.

## 5.4 Konduktansmålinger

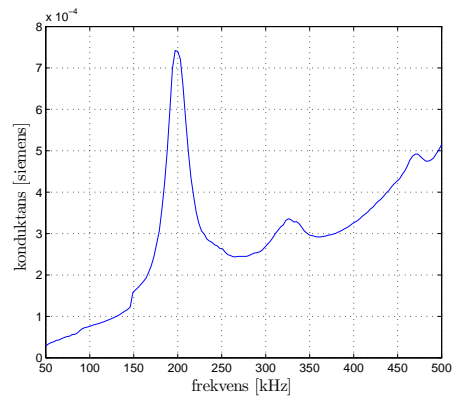
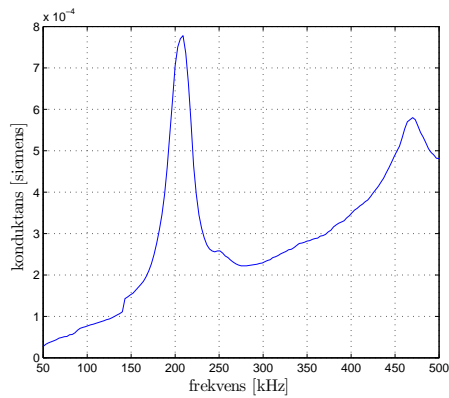
I det følgende presenteres konduktansmålinger for de forskjellige kanalene.



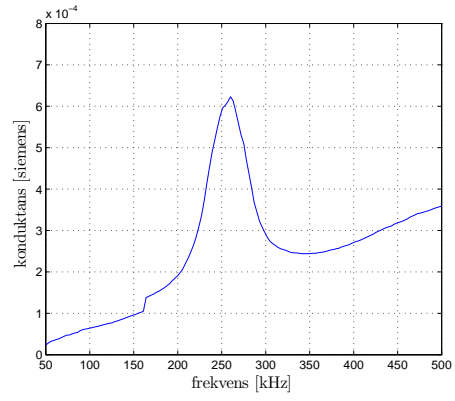
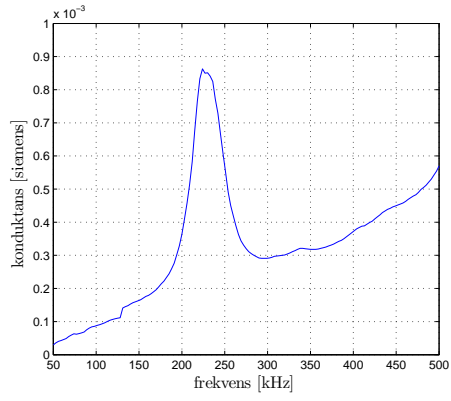
(a) Grå kanal. Opprinnelige 116 kHz- element minus (b) Svart kanal. Opprinnelige 138 kHz- element minus ytterste ring.



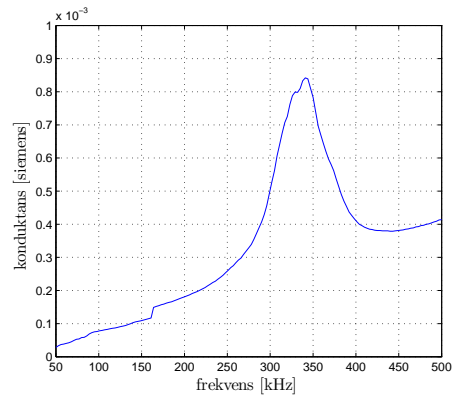
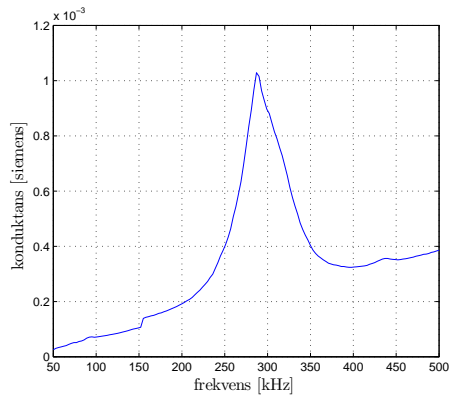
(c) Lilla kanal. Opprinnelige 144 kHz- element minus (d) Blå kanal. Opprinnelige 185 kHz- element minus ytterste ring.



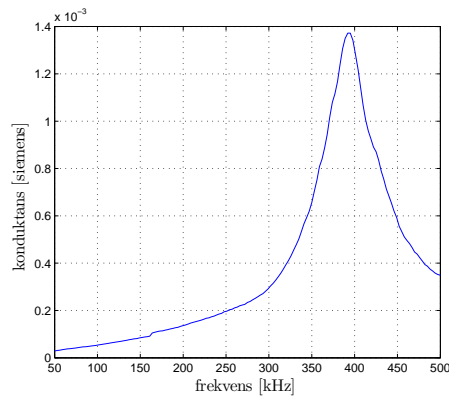
(e) Lysegrønn kanal. Opprinnelige 200 kHz- element minus ytterste ring. (f) Brun kanal. Ytterste ring av opprinnelige 200 kHz- element.



(g) Rosa kanal. Opprinnelige 222 kHz- element minus (h) Grønn kanal. Opprinnelige 250 kHz- element minus ytterste ring.

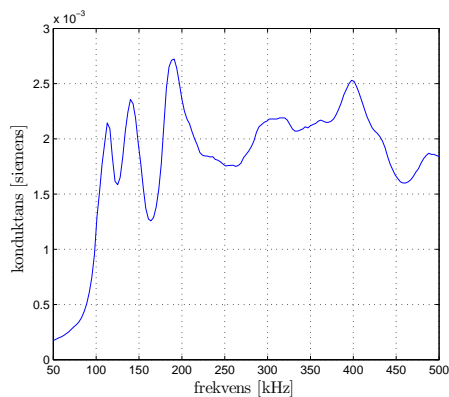


(i) Gul kanal. Opprinnelige 287 kHz- element minus yt- (j) Orange kanal. Opprinnelige 315 kHz- element minus terste ring.

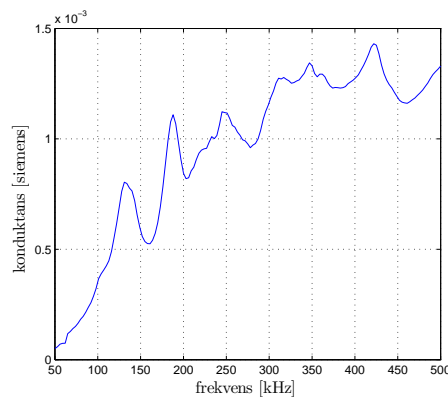


(k) Rød kanal. Opprinnelige 380 kHz- element minus ytterste ring.





(m) Hvit kanal. Den ytterste ringen for alle elementsettene minus de opprinnelige 200 kHz- elementene.



(n) Alle kanaler.

Figur 5.3: Konduktansen målt for de forskjellige kanalene. Det gjøres oppmerksom på det lille hoppet i konduktans ved ca 150 kHz i figur 5.3(g)-5.3(k).

Figur 5.3 viser at hver kanal har en tydelig resonans omkring de opprinnelige målte resonansfrekvensene. Som forventet er de noe forskjøvet grunnet påvirkning fra konstruksjonen rundt. Tabell 5.2 lister opp de nye hovedresonansfrekvensene for kanalene.

Tabell 5.2: Viser kanalenes resonansfrekvens,  $f_{res}$ . Denne er knyttet til elementenes resonansfrekvens.

Kanal	grå	svart	lilla	blå	lysegrønn	rosa	grønn	gul	orange	rød	brun	hvit
$f_{res}$ [kHz]	110	140	145	190	210	230	265	290	340	395	200	110-395

Videre i oppgaven vil den grå kanalen betegnes som "110 kHz kanalen," den svarte "140 kHz kanalen" osv. Den hvite kanalen kalles den "ytre kanalen" og Brun kanal vil av og til refereres til som 210 kHz- kanalens ytre element. Disse to siste kanalene vil ha fellesbetegnelsen "de ytre kanalene." Selv om notasjonen vil variere noe, vil det alltid være entydig utifra sammenhengen hvilke kanaler som blir eksitert. Når 210 kHz- kanalen eksiteres sammen med Brun kanal, vil dette f.eks. skrives som (Brun+210) kHz- kanalen. De ti kanalene med distinkt resonansfrekvens, samt (Brun+210) kHz kanalen vil refereres til som "hovedkanalene." Det registreres at Brun kanal har resonans 10 kHz under kanalen med de andre elementene fra elementsettet (210 kHz- kanalen). Dette kan komme av at elementene som står rundt den brune kanalen generelt er større enn elementene lenger inne i konstruksjonen. Elementene lenger ute opplever derfor en større last enn de innenfor og resonansfrekvensen forskyves noe nedover i frekvensspekteret. Det kan også ha sammenheng med det lille epoxy-laget under den midtre delen. Det ligger trolig mer under de ytterste elementene av den indre delen. Det antas at epoxy- laget er så tynt at det ikke er egnet som et koblingslag for bedret akustisk utstråling.

## 5.5 Diskusjon av konduktansmålinger

Kanaler med lav hovedresonansfrekvens har andre konduktanstopper også. De over 400 kHz vil ikke gås nærmere inn på siden de i utgangspunktet er utenfor det aktuelle frekvensområdet. Ved frekvensene 260-270 kHz og 330-340 kHz er det ved flere av figurene konduktanstopper. Certon beskriver sitt arbeid laterale moder knyttet til avstanden mellom elementene i en komposittransduser [19]. Ved et eksempel finner han første laterale mode ved litt over det dobbelte av tykkelsesresonansen. Avstanden mellom horisontale naboelement er da en elementbredde. Konduktanstoppene ved 260-270 og 330-340 kHz kan være lignende moder selv om denne transduseren ikke har konstant avstand mellom elementene i hver kanal. Hvor mye akustisk utstråling de laterale modene gir er vanskelig å si, men det vil alltid være en viss kobling fra svingninger i lateral retning og over i lengderetning. 110 kHz- kanalen har utslag rett



under 400 kHz. Dette er trolig den tredjeharmoniske til resonansfrekvensen.

Det registreres at konduktansen generelt øker i alle figurene. Forskjellige grunner til dette er: Dielektrisk tap i de piezoelektriske stavene, tap mellom alle ledningene inne i transduseren, i fyllmaterialet og i den øvrige transduserkonstruksjonen, samt utstråling til mediet. Alle slike tapseffekter fører til dissipert effekt som gir utslag i konduktansen. Endel av disse tapseffektene kan også være frekvensavhengig [14].

Konduktansplottene viser at kanalene med høy resonansfrekvens har mer utsmurt konduktanstopp enn de med lav resonansfrekvens. Den mest åpenbare grunnen til dette er at den relative usikkerheten i lengden på disse elementene er større enn for elementene med lav resonansfrekvens. En variasjon i lengde på 0.1 mm slår kraftigere ut i resonansfrekvensen på elementene med lengde 3.7 mm enn de på 12.5 mm. Lave staver kan også, relativt sett, svinge mer i lateral retning i forhold til høye staver. Dette kan føre til større grad av bølgeforplantning i lateral retning og dermed kan tapet også øke.

I figur 5.3(m)-5.3(n) er konduktansen ganske konstant, noe som indikerer utslag for hele frekvensområdet. Dette betyr imidlertid ikke at utstrålt effekt er konstant. Det antas at utstrålt effekt for lave frekvenser er større enn for høye siden det er vesentlig flere element med lav enn høy resonansfrekvens. Av denne grunn er det vanskelig å snakke om båndbredde eller kvalitetsfaktor til transduseren i sin helhet. Dersom disse størrelsene regnes ut for hver kanal, vil man derimot få en forståelse av hvordan de forskjellige kanalene svinger innbyrdes. Kvalitetsfaktor og båndbredde vil ikke regnes ut eller brukes direkte, men forståelse av hvordan kanalene virker i forhold til hverandre er viktig for å beskrive direktiviteten. Mer om dette i kapittel 6.

Mens ledningene enda ikke var festet til elementene i transduseren ble det gjort en del konduktansmålinger for ett og ett element, forskjellige plasser i transduseren. Et eksempel er vist i figur 5.4, der det ble målt på et og et element fra 110 kHz- kanalen. Hovedtrekkene er: Maksimal konduktans ved hovedresonansen er størst for element i midten, nest størst for element i den midtre delen og minst for elementet ytterst. Bredden på hovedresonansen er minst for det innerste elementet, nest minst for det midtre elementet og størst for det ytterste elementet. Det ytre og det midtre element har begge en konduktanstopp ved ca 150-160 kHz. Det ytre og det midtre element har begge en konduktanstopp ved ca 270 kHz. Det ytre og det indre elementet har lik generell frekvensavhengig konduktans, mens det midtre elementet har en konstant lav verdi helt til en voldsom økning opp mot 400 kHz. Målinger på enkeltelement fra andre kanaler viser samme tendens, og er gitt i vedlegg B.2.1.

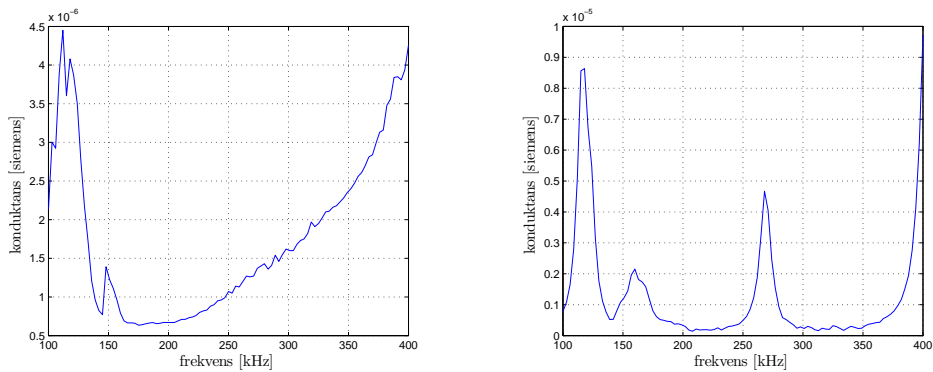
Det ytre og det midtre elementet har en felles konduktanstopp rett over hovedresonansen. Denne toppen kan ikke sees for det indre elementet og regnes derfor for å være et resultat av vekselvirkningen innad i transduserens ytre deler. Den kan være knyttet til avstanden mellom elementene, men også til skjærkoblingen med epoxyen. Det kan muligens være en slags fjærresonans.

Det midtre og det innerste elementet har en felles konduktanstopp ved ca 270 kHz og denne regnes derfor å ha sammenheng med vekselvirkningen i de indre delene. Det kan også sees en konduktanstopp for hele elementsettet ved denne frekvensen i figur 5.3(a). Siden konduktanstoppen ved 270 kHz observeres for et element alene, antas den å være en resonans som settes opp mot andre passive element i de indre områdene.

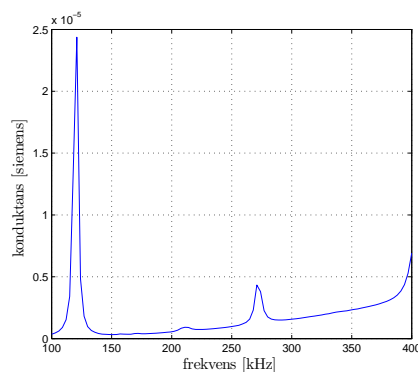
Hovedresonansen er mer dempet jo lenger ut mot epoxy- området elementet står. I det ytterste området er de laterale modene borte også. Det kan også virke som at epoxy demper både laterale- og tykkelsesmoder mer enn silikon og annen passiv piezokeramikk gjør.

For element enkeltvis, som for kanalene, øker konduktansen generelt ved frekvensen. Dette skyldes tap inne transduseren og utstråling til mediet (vann). Den samme økningen i konduktans kan ikke sees for det midterste elementet, noe som er vanskelig å forklare. I skillet mellom epoxyen og den indre delen, kan det være plasser det ikke er epoxy. En eller flere sider av elementet kan da stå helt fritt, noe som kan være forklaringen på at tap ikke er registrert.

Selv om hovedresonansen er mer dempet for de ytre elementene, betyr ikke nødvendigvis at utstrålt effekt er mindre. Skjærkoblingen til epoxy kan føre til at også epoxyen begynner å svinge og kanskje også øke lydutstrålingen. Dette kan få innvirkning på åpningsvinkelen. Hvordan koblingen mellom elementene i lateral retning innvirker på det utstrålte lydfeltet vil diskuteres mer i kapittel 7 og 9.



(a) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet.  
 (b) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra den midtre delen av transduseren. Epoxy, silikon og andre elementer befinner seg ved siden av det elementet som blir undersøkt.



(c) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de indre delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon mellom.

Figur 5.4: Sammenligning av konduktans for elementer i ulike områder av transduseren.

## 5.6 Problemer underveis

Problemer som oppsto under konstruksjonen var spesielt knyttet til at søvlimen rant litt utover og uønsket elektrisk kontakt oppsto mellom to kanaler. Det viste seg vanskelig å unngå dette helt. For å rette på dette ble det prøvd å sende strøm gjennom kanalene som var i kontakt. Dersom kontakten var liten nok brant den opp, men ofte måtte kontakten finnes manuelt ved leting over elementene. Dette var en svært tidkrevende prosess og stadige systematiske sjekker måtte gjøres for å være sikker på at det ikke var kontakt noen steder. I tillegg måtte alle elementene festes med største forsiktighet da søvlimet var svært dårlig. Hver ledning som skulle festes måtte gjennom tre tørkeprosesser. En med søvlimet, en med løsningsmiddel og en med epoxy. Før epoxyen tørket, kunne det å være nok å være borti ledningen for at den skulle falle av.

Denne transduseren har over 1000 elementer og ledninger og tok fire måneder å sette sammen. For at ikke transdusere av denne typen ikke skal bli for dyr bør konstruksjonen delvis automatiseres. Eventuell maskinell festing av ledningene til elementene vil gi størst tidsgevinst.



## Kapittel 6

# Undersøkelse av den hvite, ytre kanalen

I dette kapittelet vil det undersøkes om den ytre kanalen virker. Det innebærer å se hvordan de forskjellige elementene svinger utenfor sin resonansfrekvens. Direktivitetsmålinger ble derfor gjort og sammenlignet mot den teoretiske åpningsvinklen på syv grader.

Transduserens båndbredde blir for komplisert å snakke om siden det avhenger helt av hvilke kanalsammensetninger som brukes. Det ble istedet fastsatt hvilket frekvensområde de forskjellige kanalene gir signal i. Siden hydrofonen som ble benyttet har ukjent mottakerfølsomhet for frekvenser over 200 kHz, ble det i tillegg utført ekkoregistrering. Bruk av hydrofon er ment for sammenligning på tvers av kanalene eksitert med lik frekvens. Ekkoregistreringen er ment for å undersøke hvilke frekvenser innenfor hver kanal som gir størst utstråling. Disse to måleforsøkene er slått sammen i ett forsøk. Dette kan igjen brukes til å si hvordan de forskjellige kanalene påvirker direktiviteten når flere eksiteres av gangen.

Alle målinger ble utført i en tank ca 90 cm dyp, 110 cm bred og 3.5 m lang. Resultater vil bli kommentert omgående og sammenlignet i en felles drøftingsdel til slutt.

Det viste seg at elektromagnetisk kobling førte til vesentlig påvirkning kanalene imellom. Problemet ble løst ved å koble de passive kanalene til jord. Direktivitetsmålingene i dette kapittelet er likevel ikke gjort om igjen med jordede passive kanaler da resultatene gir nok informasjon til å konkludere at den ytre kanalen ikke virker som tiltenkt.

### 6.1 Direktivitetsmålinger

Direktivhetsmålinger ble utført for fire forskjellige kanalsammensetninger.

- Alle kanaler eksitert samtidig for frekvensområdet 50-450 kHz.
- Alle kanaler minus den ytre og den enslige ytre kanalen for frekvensområdet 50-450 kHz.
- Den ytre og den enslige ytre kanalen for frekvensområdet 50-450 kHz.
- 395 kHz- kanalen, den ytre og den enslige ytre kanalen for frekvensområdet 50-450 kHz.

I dette forsøket er flere forskjellige elementsett eksitert samtidig. Dersom det mekaniske filteret (dvs. resonansfrekvensen til de ulike kanalene bestemmer hvilke kanaler som svinger) virker, vil de teoretisk utregnede åpningsvinklene på syv grader være gjeldene i målingene. Når alle kanalene er eksitert, vil jordingsproblemet naturligvis ikke være aktuelt.

### 6.1.1 Utstyr

Tabell 6.1: Instrumentliste

Instrumenttype/Verktøy	Modell	Tillegg
Signalgenerator	Agilent 33220A	-
Oscilloskop	Agilent DS06012A	-
Forsterker	ENI 240L RF	-
Bærbar PC	Dell, Latitude D830	-
Hydrofon	Brüel & Kjær 8103	Frekvensrespons B.9

Hydrofonens frekvensrespons er gitt i vedlegget. Responsen er uvis i store deler av frekvensområdet men antas å være omnidireksjonal for de aktuelle frekvensene (se usikkerhet i kapittel 8).

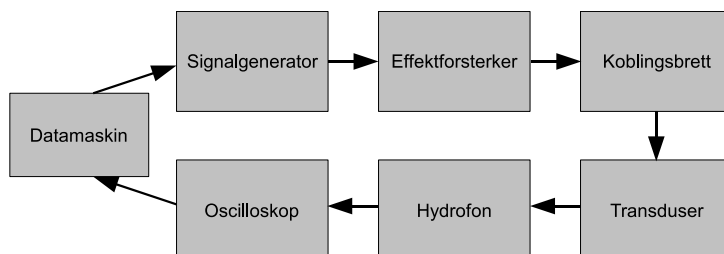
### 6.1.2 Metode og oppsett

Transduseren ble senket halvveis ned i ca midt i tanken på ene kortsiden. Hydrofonen ble så plassert nøyaktig samme sted i tanken som sentrum av transduseren i en avstand 142.3 cm fra transduserenoverflaten. Avstanden er valgt for å sikre fjernfeltmålinger. Et raskt estimat gir den størst tenkelige Rayleighavstanden. Den høyeste frekvensen det er målt på er 450 kHz. Det antas at maksimal radius for den delen som svinger for denne frekvensen, er radius av den indre delen. Dersom 36 mm benyttes, blir Rayleighavstanden da  $r_R = \frac{\pi a^2}{\lambda} \approx 1.2$  m. Dersom områdene lenger ute svinger (f. eks elementer med tredje harmoniske resonansfrekvens ved den påtrykte frekvensen), forventes det uansett ingen sammenheng mellom simuleringene i kapittel 4 og resultatene.

Måleoppsettet er vist i figur 6.1. For at hydrofonen skulle være på symmetriaksen ble transduseren vridd på til oscilloskopet viste maksimalt utslag. Direktivitetsmålinger ble utført ved å flytte hydrofonen på tvers over tanken. For å få en bedre oppløsning ved hovedloben ble steg på fem millimeter valgt tjue centimeter til hver side for symmetriaksen. Steget for området utenfor (24 cm på hver side) ble satt til en centimeter. Omgjøring til vinkler ble gjort senere. Det ble ikke tatt hensyn til kurving av hydrofonbanen i målekapitlene, men en diskusjon rundt temaet er gjort i kapittel 8.

Konkret ble pulser på 30 perioder sendt ut av signalgeneratoren og forsterket opp til ca 30 V amplitude. Signalet ble så styrt inn på de aktuelle kanalene ved hjelp av koblingsbrettet, registrert av hydrofonen lenger ute og vist på oscilloskopet. Dataprogrammet Direktivitet.m sørget for å steppe gjennom frekvensene og avlese representativ rms- verdi. Manuell overvåking sikret at oscilloskopbildet til enhver tid viste steady-state området. Steppermotoren som skulle brukes var ute av drift og hydrofonen måtte derfor flyttes manuelt for hvert steg.

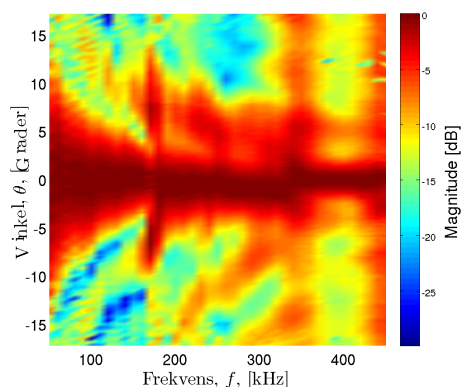
Åpningsvinklene i dette kapittelet er regnet utifra direktivitetsmålingene. Midlingsfunksjonen på oscilloskopet hadde begrenset innvirkning på rms- verdien for svake signal. Dette, sammen med steplengden førte til en del usikkerhet i åpningsvinkelen. Det spiller ikke så stor rolle i dette kapittelet og usikkerhetsbetraktningene er tatt i kapittel 8.



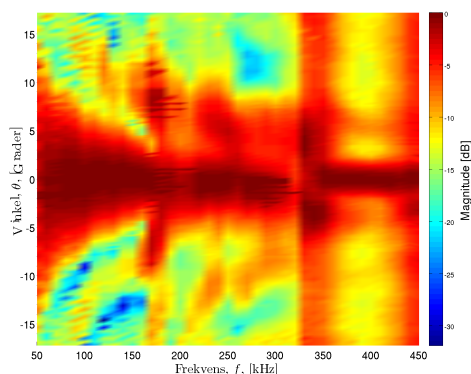
Figur 6.1: Viserblokkdiagram over måleoppsettet.

### 6.1.3 Resultat

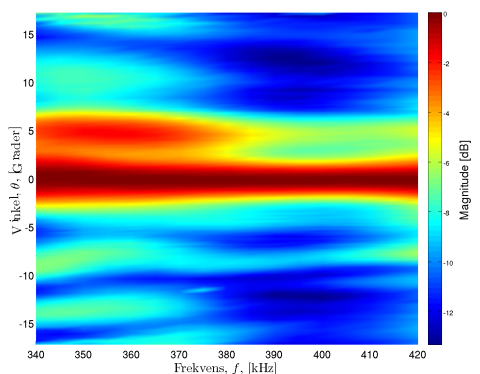
De følgende figurene viser konturplott av målingene som ble utført, (se vedlegg A.4 for m- filer). Tabell 6.2 viser utplukkede åpningsvinkler for figur 6.2(a). Frekvensene er valgt nær kanalenes resonansfrekvenser.



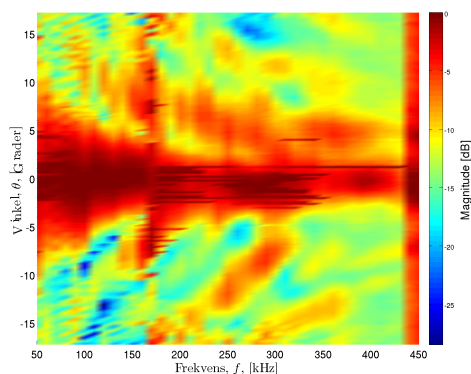
(a) Alle kanalene eksitert samtidig.



(b) Alle kanalene eksitert minus de to ytre kanalene (hvit og brun).



(c) 395 kHz- kanalen pluss de to ytre kanalene (hvit og brun) eksitert.



(d) De to ytre kanalene (hvit og brun) eksitert.

Figur 6.2: Viser konturplott for direktivetsmålinger gjort med kanalsammensetningene fra innledningen. Desibelskalaen er i forhold til maksimalverdien for hver frekvens.

Tabell 6.2: Åpningsvinkel for utplukkede frekvenser der alle kanaler er eksitert.

frekvens [kHz]	110	140	150	190	210	230	270	290	340	400
åpningsvinkel [grader]	7.0	5.4	4.8	5.2	5.0	8.8	3.8	3.8	9.6	2.4

Ifølge figur 6.2(a), 6.2(b) og 6.2(d) er direktiviteten preget av uregelmessigheter og ikke den konstante direktiviteten eller åpningsvinkelen som mekaniske filteret var tenkt å skulle gi. Verdiene fra tabell 6.2 er hentet fra måleresultatene i vedlegg C.1. Figur 6.2(c) forteller at åpningsvinkelen er nokså skarp. Hentet fra tabellene i vedlegg vedlegg C.1, er den 2.6 grader fra 385-410 kHz. Selv om de passive kanalene ikke var jordet, viser resultater i kapittel 7 at forstyrrelser fra de jordete kanalene ikke er nok til å få åpningsvinkelen ned i 2.6 grader. Dette må bety at ytre områder svinger langt mer enn det som var tiltent.

Dersom det mekaniske filteret hadde virket som planlagt, skulle åpningsvinkelen for alle kanaler eksitert samtidig (figur 6.2(a)) vært konstant, se tabell 6.2. Med andre ord liten påvirkning fra kanalene med resonans utenfor den påtrykte frekvensen. I neste seksjon vil derfor virkningen av de forskjellige

kanalene ved forskjellige frekvenser beskrives.

## 6.2 Ekkoregistrering og aksetrykk

I dette avsnittet presenteres ekkoregistreringen og målinger av aksetrykket. Disse vil brukes kvalitativt for å beskrive hvordan elementene og kanalene eksiteres ved forskjellige frekvenser og dermed påvirker åpningsvinkelen.

Strengt tatt kan ikke trykket beskrives av hydrofonen for frekvenser høyere enn 200 kHz grunnet manglende data på mottakerfølsomhet. Hydrofonen ble derfor brukt til å sammenligne trykket på tvers av kanalene ved samme frekvens og ikke innenfor hver kanal med varierende frekvens. Ekkoregistreringen kan imidlertid si noe om dette. Den gir et slags felles mål på kilde- og mottakerfølsomhet innenfor hver kanal.

### 6.2.1 Utstyr

Tabell 6.3: Instrumentliste

Instrumenttype/Verktøy	Modell	Tillegg
Signalgenerator	Agilent 33220A	-
Oscilloskop	Agilent DS06012A	-
Forsterker	ENI 240L RF	-
Reflektor	Metallplate, 30 X 30 cm	-
Filter	-	-
Hydrofon	Brüel & Kjær 8103	Frekvensrespons B.9

### 6.2.2 Metode og oppsett

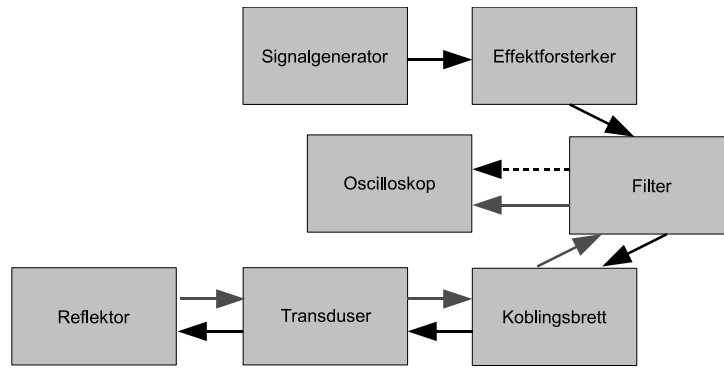
Reflektoren ble hengt opp i rett linje 26 cm ut fra transduseroverflaten. Energien utstråles i denne avstanden hovedsaklig i en sylinder utfra transduseren [20]. Signalgeneratoren sendte ut pulser på 30-60 perioder. Disse ble forsterket opp til ca 40  $V_{pp}$  og sendt til den aktuelle kanalen. Forsterkningen av signalet er oppgitt fra leverandøren til å være uavhengig av lasten. Dette stemmer bra med den målte variasjonen på under tre prosent i det forsterkede signalet. Utsignalet ble derfor satt til konstant for alle frekvenser.

Lyden ble reflektert og registrert av transduseren. Refleksjonskoeffisienten,  $R = \frac{\text{reflektert trykkamplitude}}{\text{innkommende trykkamplitude}}$ , er gitt i ligning (6.1) [13].

$$R = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{m^2-1}{2m}\right)^2 \sin^2(k_r L)}} - 1 \quad (6.1)$$

Der  $m = z_r/z_v$  og  $z_r = 33.5$  Mrayl er karakteristisk impedans for reflektoren (verdi for jern).  $z_v = 1.48$  Mrayl (verdi for ferskvann.) Verdien er hentet fra [8].  $k_r$  er bølgetallet i reflektoren og L er tykkelsen. Refleksjonskoeffisienten regnes ut og varierer fra 0.77 - 0.99 for frekvenser 50 - 450 kHz. og fra 0.93 - 0.99 for frekvenser 110 - 395 kHz.

Siden både det sendte og motatte signalet gikk gjennom samme kanal, fikk oscilloskopet problemer med å skille det signalet fra signalgeneratoren fra det mye svakere reflekterte signalet. Filterets funksjon var å klippe det sterke utsignalet fra forsterkeren til oscilloskopet og gjorde det dermed lettere å registrere ekkot. Steady-state nivået ble så notert. Det var betydelige forskjeller når de passive kanalene var jordet og ikke. Oppsettet er vist i figur 6.3. Målinger med hydrofonen ble gjort etter samme oppsett som i direktivetsmålingene over og maksimalt utslag for hver frekvens ble notert. Denne verdien var ikke nødvendigvis på symmetriaksen.



Figur 6.3: Viserblokkdiagram over måleoppsettet for ekkoregistrering.

### 6.2.3 Resultat

Tabell 6.4 viser hvordan kanalene sender og registrerer signal utenfor sin resonansfrekvens. I praksis blir dette et slags felles mål på både sender- og mottakerfølsomhet. Kanalene gir størst signal rundt sin resonansfrekvens men også noe utenfor. Spesielt de lavfrekvente kanalene gir stor utstråling utenfor sin resonansfrekvens. Det er tydelig forskjell mellom målingene der de passive kanalene er jordet og ikke. Generelt er verdiene størst når de passive kanalene ikke er jordet, men ikke alltid.

For 110 og 140 kHz kanalene kan det ved 230 og 265 kHz sees at signalet blir sterkere når de passive kanalene jordes. Noen ekstrasjekker viste at denne effekten må skyldes elektromagnetisk overføring mellom ledningene inne i transduseren. Når det ble satt spenning på en kanal, viste målinger på en annen passiv kanal et identisk signal med amplitude ca 20 ganger mindre. En ekstra observasjon ble gjort. Når 265 kHz-kanalen legges til 110 kHz-kanalen og disse to eksiteres ved 265 kHz, er signalet svakere enn når kun 110 kHz-kanalen eksiteres. I tillegg forskyves hovedloben noe. Ut fra dette kan det virke som at det er kommet inn en faseforskjell. Akkurat hva som ligger til grunn er vanskelig å si. Gururja antyder i sitt arbeid [2] at transverselle bølger fører til vekselvirkning og at dette kan forstyrre svingemønstret og dermed endre fasen til hvert enkelt element i komposittransdusere. Det muligens denne vekselvirkningen som observeres selv om elementene i denne transduseren ikke er plassert periodisk. Det er ikke utenkelig at den aperiodiske plasseringen av elementer i denne transduseren fører til større forstyrrelser enn i tradisjonelle komposittransdusere.

Etterhvert vil det vise seg at hovedloben kan forskyve seg noe også når kun en kanal eksiteres. Dette vil diskuteres mer i kapittel 7.

I tabell 6.4 er det mottatte signalet presentert med  $V_{pp}$  og verdier lavere enn  $0.4 V_{pp}$  er ikke tatt med. Selv om amplituden varierer kraftig mellom kanalene og frekvensen, er signalet detekterbart i hele frekvensspekteret fra 50-450 kHz.



Tabell 6.4: Ekkoregistrering målt med oscilloskop. ”m.jord“ og ”u.ord“ betyr henholdsvis at de passive kanalene er jordet og ikke er jordet. Benevnning til de målte verdiene er  $mV_{pp}$ .

Kanal \ Frekvens [kHz]	50	110	140	145	190	210	230	265	290	340	395	450
110 kHz kanal m.jord	20.0	282.0	55.3	47.2	3.0	3.0	5.2	20.1	4.0	1.5	2.1	2.0
110 kHz kanal u.jord	30.0	299.0	76.5	76.8	10.0	9.3	4.2	18.1	6.0	3.0	5.0	2.0
140 kHz kanal m.jord	12.0	148.4	201.6	194.0	8.0	3.3	3.5	13.2	5.8	1.2	1.9	0.5
140 kHz kanal u.jord	22.0	230.0	247.0	237.0	11.0	6.0	3.0	7.0	3.0	0.8	2.0	1.5
145 kHz kanal m.jord	2.8	20.7	55.6	62.2	6	3	0.8	2	1.5	1.7	-	-
145 kHz kanal u.jord	10.0	84.1	116.0	108.0	10.3	6.0	2.2	3.4	1.0	0.7	0.9	1.0
190 kHz kanal m.jord	-	1.0	4.0	3.8	41.9	21.0	2.0	0.8	-	-	-	-
190 kHz kanal u.jord	4.0	52.4	32.9	23.4	64.9	30.0	3.0	3.0	2.0	1.5	1.0	-
210 kHz kanal m.jord	-	-	0.5	1.5	7.1	17.5	4.3	0.8	0.5	-	-	-
210 kHz kanal u.jord	5.0	23.0	10.5	8.0	7.0	8.8	4.8	0.6	-	-	-	-
230 kHz kanal m.jord	-	-	-	1	3	4.7	6.0	2.0	1	-	-	-
230 kHz kanal u.jord	3.0	23.0	10.0	7.8	6.3	6.0	7.0	3.0	1.5	0.7	-	-
265 kHz kanal m.jord	-	-	-	0.6	1.1	3.2	7.3	8.5	3.3	0.5	-	-
265 kHz kanal u.jord	3	20.0	8.0	5.0	2.5	0.8	4.0	7.0	3.0	1.0	-	-
290 kHz kanal m.jord	-	-	-	-	-	-	0.8	3.3	6.6	1.0	0.4	-
290 kHz kanal u.jord	2.0	12.4	6.0	6.0	2.0	1.0	1.0	3	7.6	2.0	1.0	0.5
340 kHz kanal m.jord	-	-	-	-	-	-	-	1.0	3.0	-	-	-
340 kHz kanal u.jord	5.0	12.4	7.2	2.0	1.0	1.1	1.0	1.0	3.5	1	-	-
395 kHz kanal m.jord	-	-	-	-	-	0.4	0.5	0.7	0.7	1.3	2.4	0.8
395 kHz kanal u.jord	3.0	32.3	18.2	12.1	4.1	2.5	1.1	0.9	0.9	1.9	2	4.2

I tabell 6.5 er målingene av aksetrykket vist. Hydrofonens mottakerfølsomhet er som sagt ikke kjent, og derfor vil verdier kun sammenlignes på tvers av kanaler. Fra tabellen kan det sees at de lavfrekvente kanalene generelt har lik eller større aksetrykk ved resonansfrekvensene til de høyfrekvente kanalene enn de høyfrekvente kanalene har selv. At de lavfrekvente kanalene har langt flere element er sannsynligvis den viktigste årsaken.

Tabell 6.5: Trykkregistrering med hydrofon målt med oscilloskop. Benevnning til de målte verdiene er  $mV_{pp}$ .

Kanal \ Frekvens [kHz]	50	110	140	145	190	210	230	265	290	340	395	450
110 kHz kanal	1.6	36.9	9.1	7.8	2.3	2.2	6.5	22.1	11.7	4.5	4.4	1.6
140 kHz kanal	1.5	18.9	21.1	20.4	2.0	2.1	1.6	14	10.3	1.1	2.0	2.2
145 kHz kanal	0.5	5.9	9.5	9.6	1.5	1.6	1.7	6.1	5.8	2.7	1.3	1.1
190 kHz kanal	-	1.2	1.9	1.8	3.8	2.8	2.3	2.8	1.5	1	0.6	-
210 kHz kanal	-	0.5	0.8	0.9	1.5	2.2	2.3	2.1	1.3	0.6	-	-
230 kHz kanal	-	0.6	0.8	0.9	1.0	2.1	4.0	4.1	2.1	0.7	-	-
265 kHz kanal	-	0.6	0.6	0.7	0.6	1.1	3.7	7.7	4.2	-	-	-
290 kHz kanal	-	-	-	-	-	0.8	1.6	6.6	6.3	1.2	0.5	-
340 kHz kanal	-	-	-	-	-	-	0.6	1.9	2.3	1.1	0.4	-
395 kHz kanal	-	-	-	-	-	0.5	1.0	2.4	2.5	1.4	1.2	0.5
Brun kanal	-	1.0	1.5	1.6	2.1	3.0	2.7	3.5	1.8	1.5	0.6	0.7

## 6.3 Oppsummering

Utfra tabell 6.2 er ikke åpningsvinkelen syv grader som utregnet i kapittel 4. Dette sammen med ekkoregistreringen og de målte verdiene for aksetrykket tilsier at den hvite, ytre kanalen ikke fungerer som planlagt. Utslagene er rett og slett for store i de andre kanalene relativt til kanalen som er ment å utgjøre hoveddelen av feltet. Usikkerhetsanalyse for åpningsvinklene i dette kapitlet gjøres derfor ikke. Dersom elementene fra 110 kHz kanalen også er med å svinge ved 395 kHz, vil hydrofonen heller ikke være utenfor Rayleighavstanden.

Ekkoregistreringen viser at signalet er detekterbart i frekvensområdet 50-450 kHz. Ideelt sett kunne det tenkes at transduserens mottaker- og kildefølsomhet var lik, refleksjonskoeffisienten lik for alle frekvenser (vist i ligning (6.1)) og all energien ble strålt ut i en sylinder ut fra transduseren. Siden signalet først skal sendes ut av transduseren og så registreres igjen, ville kvadratrotten av det registrerte signalet sagt noe om utstrålingen også på tvers av kanalene. Dette er drøye antagelser og derfor hevdes det kun her at tabell 6.4 viser hvilke frekvenser som gir størst utslag innenfor hver kanal. Maksimalt utslag for hovedloben ble målt for hver frekvens, men dette lå ikke nødvendigvis på symmetriaksen. Generelt, (men ikke alltid) viser tabellen at det målte trykket er størst når de passive elementene ikke er jordet. Dette skyldes elektromagnetisk overføring mellom ledningene, noe som fører til at flere elementer svinger. Ved enkelte frekvenser har noen av kanalene mindre spenning når de passive elementene ikke er jordet. Noen ekstrasjekker tydet på at faseforskjeller fra ulike deler av transduseren er grunnen. Dette vil diskuteres mer i neste kapittel.

Det er interessant å se at 110 kHz, 140 kHz og 145 kHz- kanalene har en ekstra topp omkring 265 kHz fra ekkoregistreringen. Det virker sannsynlig at dette er utslaget fra en lateral mode. Hvordan direktiviteten fra slike moder er og hvorvidt slike moder kan være med å forstyrre naboelement dersom de også er eksitert vil, diskuteres nærmere i neste kapittel. Fra ekkoregistreringen sees det også at de store utslagene i konduktans ved høye frekvenser (se figur 5.3), ikke gir utslag i akustisk utstrålt energi. Konduktansutslagene for høye frekvenser må derfor gi uttrykk for tapseffekter.



# Kapittel 7

## Åpningsvinkel kanalvis

Siden det fungerte dårlig å eksitere alle kanaler samtidig, vil transduseren testes under mer kontrollerte forhold. En og en kanal vil undersøkes av gangen samt en del kombinasjoner.

Nye teoretiske åpningsvinkeler ble regnet ut for hver av kanalene ved hjelp av nirunde.m. Utregningene er forskjellige fra de i kapittel 4 ved at kanalens resonansfrekvens og ikke elementenes resonansfrekvens er brukt. I tillegg er det tatt hensyn til den lille forskyvningen for visse element ytterst i konstruksjonen. Den ytterste ringen i hvert elementsett er naturligvis heller ikke med, da disse tilhører Hvit kanal. De teoretiske verdiene er sammenlignet med de målte. En videre diskusjon finnes i kapittel 9.

Å lage direktivetsplott for hver av kanalene for et gitt frekvensbånd er tidkrevende, og derfor er det gjort en del punktmålinger av åpningsvinkelen i tillegg. Punktmålingene av åpningsvinkelen er mer nøyaktig siden avlesningen av posisjonen til hydrofonen kun er gjort ved  $\theta_{3dB}$ . Fremgangsmåten for direktivetsplottene er den samme som i forrige kapittel. Direktivetsmålingenes viktigste funksjon er å gi en oversikt over feltet og derfor er åpningsvinklene funnet fra disse noe mer usikre enn punktmålingene. Usikkerhetsanalyse og diskusjonen av at hydrofonen ikke følger en kurvet bane tas i kapittel 8.

Til slutt i kapittelet vil det gjøres et forsøk på å holde en konstant åpningsvinkel så nært syv grader som mulig i frekvensområdet 100-400 kHz. Form på hovedlobe og sidelover vil da ikke tas hensyn til.

For leselighetens skyld er kanalene i tabellene referert til som f.eks "110" og ikke 110 kHz- kanalen.

### 7.1 Simuleringer og sammenligning

I de nye simuleringene er kanalenes åpningsvinkler regnet ut. De ytre kanalene er ikke simulert for seg selv men 210 kHz- kanalen er forsøkt simulert sammen med sine tilhørende ytre element i Brune kanalen. Virkningen av en ytre kanal kun bestående av en elementtype gir gode analysemuligheter.

Tabell 7.1: Simulert åpningsvinkel til en del hovedkanaler ved hjelp av programmet nirunde.m.

Kanal	110	140	145	190	230	265	290	340	395
Åpningsvinkel [grader]	8.2	7.3	8.0	7.9	8.6	8.0	8.9	10.8	8.9

Simuleringer for Brun kanal, 210 kHz og 190 kHz- kanalene er vist i tabell 7.6. Den ene simuleringen er med forskjellig styrkeforhold på de to kanalene. Figur 5.3(e) og 5.3(f) i kapittel 5 viser at resonansfrekvensen ikke inntreffer ved samme frekvens. Av denne grunn er konduktansforholdet mellom 210 kHz-kanalen og Brun kanal ved frekvensen 210 kHz ca 2/3. Dette er grunnlaget for styrkeforholdet i simuleringen. Det samme styrkeforholdet antas å gjelde for den ytterste ringen i 190 kHz- kanalen og de indre elementene siden de ytterste elementene i 190 kHz- kanalen og elementene Brune kanal ligger rett ved hverandre.

Tabell 7.2: Simuleringer av åpningsvinkler for Brun, 210 kHz og 190 kHz- kanalene ved hjelp av programmet nirunde.m. "2/3" betyr at den ytterste ringen av eksiterte element har styrke på 2/3 relativt til resten av elementene.

Kanalopsett	210	210+Brun	210+Brun, "2/3"	190	190, "2/3"
Åpningsvinkel [grader]	8.4	6.6	7.0	7.9	8.6

I den følgende tabellen er målte åpningsvinkler for alle kanalene og noen kanalsammensetninger vist. Disse er gjort ved punktmålinger og ikke tatt ut fra direktivitetmålingene.

Tabell 7.3: Punktmålinger av åpningsvinkel når de passive elementene både er jordet og når de ikke er det. Brun = 210 kHz- kanalens tilhørende ytre element. Hvit = Den ytre kanalen. Benevningen er sløyfet i kanalbeskrivelsen.

Kanal(er)	Påtrykt frekvens [kHz]	Åpningsvinkel u. jord [grader]	Åpningsvinkel m. jord [grader]
110 + Hvit	110	6.6	6.6
110	110	6.8	6.8
110 + 140	110	7.0	7.2
alle - (Hvit og Brun)	110	7.4	7.4
140 + 110	140	6.0	6.6
140	140	6.2	6.8
145	145	6.0	6.7
190	190	8.0	8.6
(210+Brun)	210	6.2	7.0
210	210	9.6	15.8
210 + 230	210	8.6	14.2
(210+Brun) + 230	210	6.9	7.8
230 + 210	230	8.0	15.3
230	230	13.8	20.2
265	265	8.4	9.9
265 + 290	265	9.5	11
290 + 265	290	7.1	9.5
290	290	8.0	10.0
340 + 395	395	9.7	13.3
340	340	10.4	18.5
395 + (Hvit og Brun)	395	2.6	4.5
alle - (Hvit og Brun)	390	2.4	2.7
395 + 340	395	7.2	15.4
395	395	9.4	19

For kanalene med lav resonansfrekvens ligger åpningsvinkelen generelt lavere enn den teoretiske og visa versa hos kanalene med høy resonansfrekvens. Når (Brun+210) kHz- kanalen eksiteres (med styrkeforholdet 2/3), er simuleringene sammenfallende med målingene. Dette gjelder også i 190 kHz- kanalen. Hva er spesielt med disse to elementssettene? I figur 4.6(c) og 4.6(a), kapittel 4 er plasseringen av elementene vist. Dersom den ytterste ringen i figur 4.6(a) tas bort er elementsettene ganske like. Elementene er noenlunde jevnt fordelt men med en tydelig avgrensende ytterste ring. Den samme type plassering av elementene kan sees i figur 4.6(a) når den ytterste ringen tas bort. Dette representerer 190 kHz kanalen. Ingen av de andre kanalene med høyere resonansfrekvens har et slikt tydelig avgrenset ytterområde fordi den ytterste ringen er koblet i Hvit kanal.

Kanaler med resonansfrekvens lavere enn 190 kHz viser en motsatt tendens enn for de med høy resonansfrekvens. Den målte åpningsvinkelen er skarpere enn den teoretiske. Hva skiller disse kanalene fra de andre? Alle disse tre kanalene har større elementtetthet ytterst enn innerst og de ytterste elementene

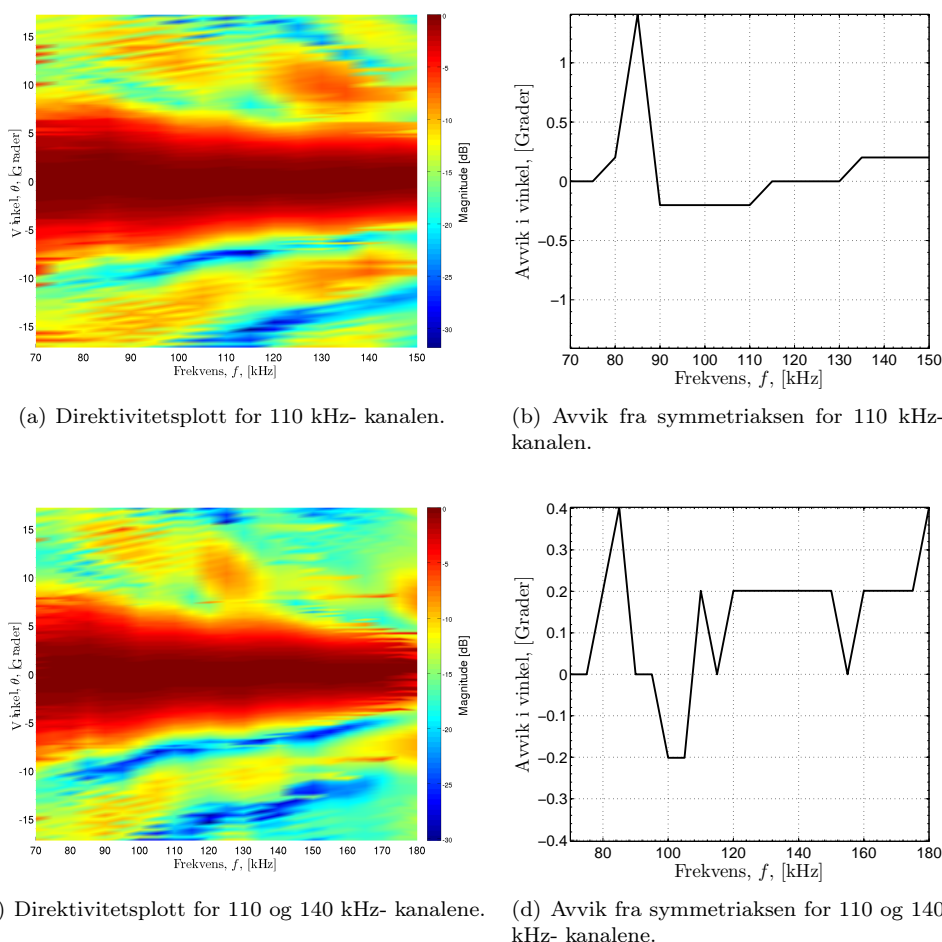
har epoxy rundt seg.

I tabell 7.3 er det flere eksempler på to kanaler som eksiteres sammen. 110 kHz kanalen har åpningsvinkel på 6.8 grader ved 110 kHz. Når 140 kHz kanalen legges til øker åpningsvinkelen noe. På samme måte synker åpningsvinkelen når 110 kHz kanalen legges til 140 kHz kanalen. Dette kan også sees i simuleringer. Kanaler med høyere resonansfrekvens viser ikke denne sammenhengen. Når en kanal med liten effektiv radius (avstand fra sentrum til den ytterste ringen) legges til en kanal med større effektiv radius, synker fremdeles åpningsvinkelen. Utifra betraktningene med 110 kHz og 140 kHz kanalen skulle åpningsvinkelen økt noe. Det kan virke som antall elementer i hver kanal har betydning for om den målte åpningsvinkelen samsvarer med den teoretiske. Spesielt antall elementer i de ytre områdene ser ut til å ha betydning. En diskusjon av mulige årsaker til avvikene mellom teori og målingene, gjøres i kapittel 9.

## 7.2 Direktivitetsmålinger

For å få oversikt over direktiviteten, er en rekke direktivetsplott presentert. Målemetoden er identisk med den fra kapittel 3 og 6. Måledata er også hentet fra vedlegg C.2 og presentert i tabeller. I tillegg er mer nøyaktige punktmålinger utført for forskjellige kanaler og kanalsammensetninger. Disse vil stå under dobbelstreken i enhver tabell i denne seksjonen.

### Frekvensbånd: 100-150 kHz



Figur 7.1: Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben. De passive kanalene er ikke jordet.

Figur 7.1 viser konturplott av 110 kHz- kanalen og effektene av å legge til 140 kHz- kanalen. Ujevne sidelobes forklars med refleksjoner i kantene av tanken fordi steady-state området dermed er vanskeligere å finne. Denne figuren er den eneste i dette kapitlet der de passive elementene ikke er tilkoblet jord. Figuren regnes likevel som representativ fordi den elektromagnetiske koblingen relativt sett har lite å si for disse to kanalene (se tabell 6.4). Åpningsvinkelen er vist i tabell 7.4 og er hentet fra tabell C.20-C.20 i vedlegget. Punktmålinger er tatt når 145 kHz- kanalen er lagt til.

Det synes klart at effektene ved å legge til 140 og 145 kHz- kanalene fører til en større åpningsvinkel. Ifølge tabellen varierer åpningsvinkelen mindre også, spesielt i området 110-140 kHz. Det er interessant at for alle tre kanalene eksitert samtidig, gjør åpningsvinkelen et hopp ved 130 kHz. Ved denne frekvensen kan det tyde på at 140 og 145 kHz- kanalene begynner å dominere fremfor 110 kHz- kanalen. Utfra figur 7.1(a) og 7.1(c) viser elementsettene et svingemønster som kan sammenlignes med stempelkildemodellen,

med en tydelig hovedlobe som krymper inn og sidelober som følger etter.

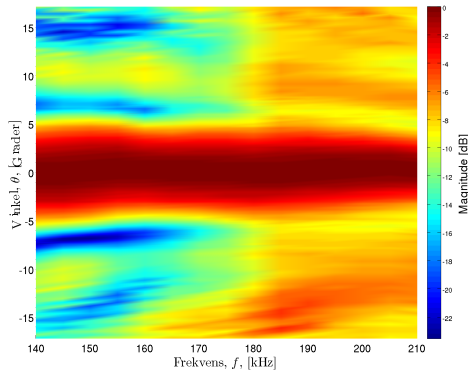
Siden steget til hydrofonen ved hovedloben utgjør ca 0.2 grader regnes avviket mellom hovedlobe og symmetriakse i figur 7.1 som ubetydelig i det aktuelle frekvensområdet.

Tabell 7.4: Åpningsvinkel for 110, 140 og 145 kHz- kanalene i frekvensområdet 100-150 kHz.

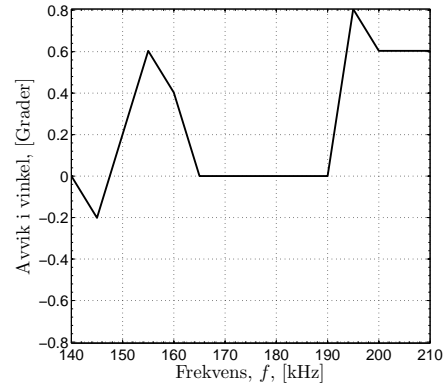
Frekvens [kHz]	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
Kanal(er)											
110 [°]	7.6	7.0	6.8	6.4	6.2	6.0	6.2	6.0	5.6	5.6	5.4
110, 140 [°]	7.6	7.2	7.0	6.6	6.4	6.6	6.4	6.2	6.0	5.8	5.4
110, 140, 145 [°]	8.1	7.7	7.4	7.1	6.9	6.9	7.6	7.0	6.9	6.5	6.1



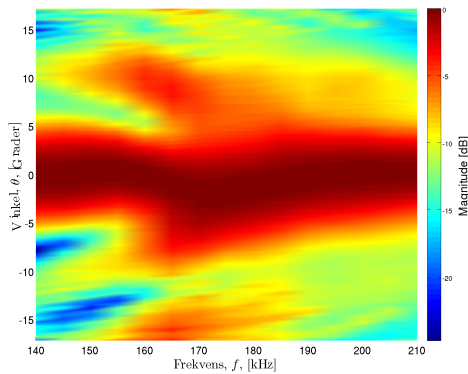
## Frekvensbånd: 140 -210 kHz



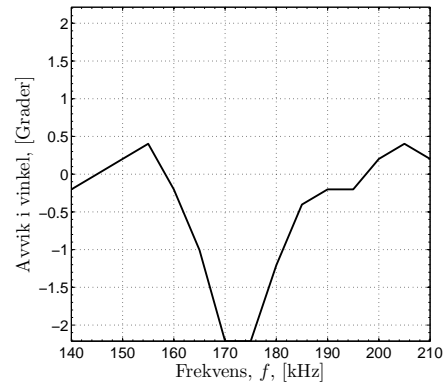
(a) Direktivetsplott for 145 kHz- kanalen.



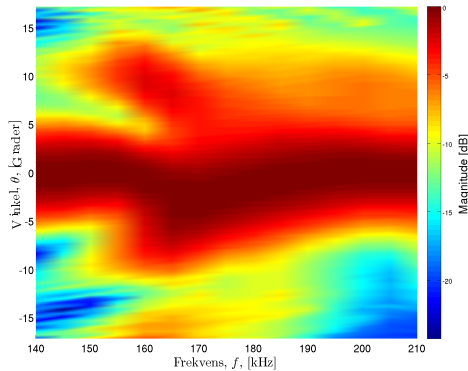
(b) Avvik fra symmetriaksen for 145 kHz- kanalen.



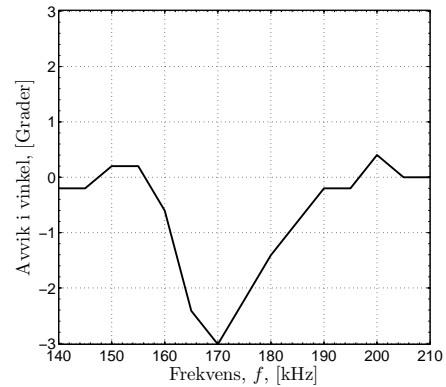
(c) Direktivetsplott for 140 og 190 kHz- kanalene.



(d) Avvik fra symmetriaksen for 145 og 190 kHz- kanalene.



(e) Direktivetsplott for 145 og 190 og 210 kHz- kanalene.



(f) Avvik fra symmetriaksen for 145 og 190 og 210 kHz- kanalene.

Figur 7.2: Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben.

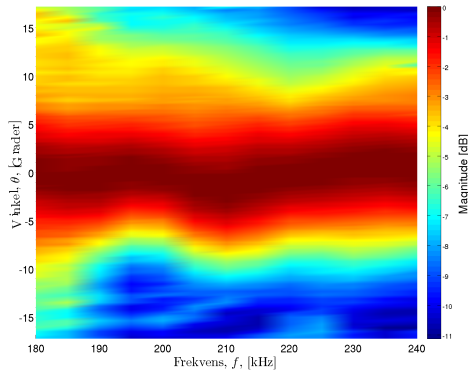
Når 145 kHz- kanalen eksiteres alene er feltet ganske ryddig, selv om oscilloskopet har problemer med å registrere signalet ved høye frekvenser. Hovedloben er tydelig og sidelobene og smaler inn med frekvensen. Symmetriaksen er også noenlunde konstant. Ved å legge på 190 og 210 kHz kanalene endrer dette seg. Ved 165 kHz oppstår det store sidelobes, hovedloben styres tydelig og strålebredden øker. Dette skyldes

trolig både faseforskjeller og at 190 kHz kanalen begynner å få innvirkning ved denne frekvensen. Ved høyere frekvenser rettes hovedloben inn igjen. Effekten synes enda tydeligere når 210 kHz- kanalen er med enn når den ikke er det. Det bemerkes at uregelmessighetene i feltet hovedsaklig skjer mellom kanalenes resonansfrekvenser. I dette området er lydutstrålingen liten, noe som kan være en del av forklaringen.

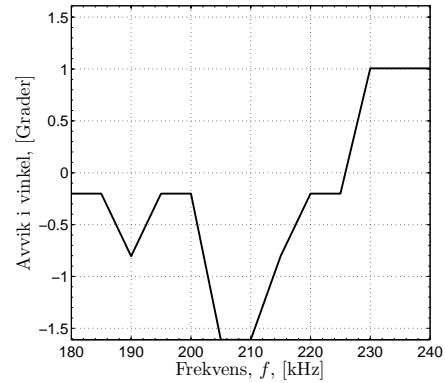
Tabell 7.5: Åpningsvinkel for 145, 190 og 210 kHz- kanalene i frekvensområdet 140-210 kHz.

Kanal(er) \ Frekvens [kHz]	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
145 [°]	6.2	6.4	6.4	6.2	5.6	5.8	5.8	6.0	5.8	6.0	5.8	5.6	5.2	4.8	4.4
145, 190 [°]	6.6	6.6	6.4	5.8	5.8	8.8	9.0	8.4	8.2	8.4	7.8	7.4	6.8	6.6	6.0
145, 190, 210 [°]	6.8	6.8	6.4	6.0	18.3	17.6	10.2	9.6	9.4	9.0	8.4	7.8	7.2	7.0	6.8

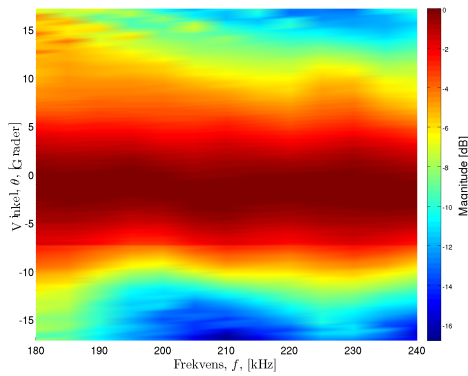
## Frekvensbånd: 180 - 240 kHz



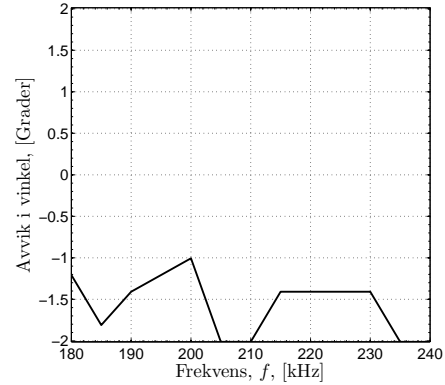
(a) Direktivitetsplott for 210 kHz- kanalen.



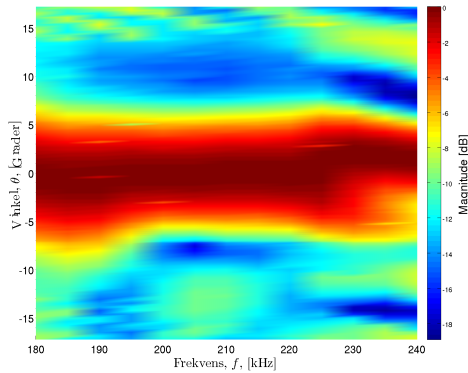
(b) Avvik fra symmetriaksen for 210 kHz-kanalen.



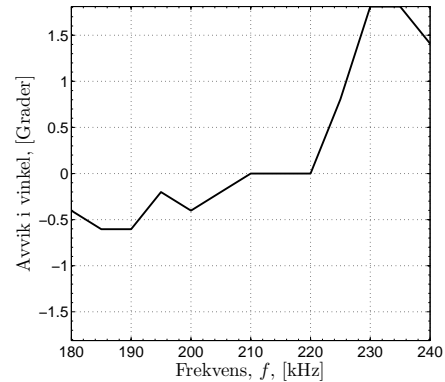
(c) Direktivitetsplott for 210 kHz og 230 kHz kanalene.



(d) Avvik fra symmetriaksen for 210 kHz og 230 kHz kanalene.



(e) Direktivitetsplott for (210+Brun) kanalen.



(f) Avvik fra symmetriaksen for (210+Brun) kanalen.

Figur 7.3: Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben.

Tabell 7.6 og figur 7.3 viser at 210 kHz kanalen har en synkende åpningsvinkel frem til 205 kHz før den stiger igjen. Hovedloben forandrer tydelig retning. Dersom 230 kHz- kanalen legges til, synker faktisk åpningsvinkelen noe relativt til 210 kHz- kanalen alene. Dette er noe rart, siden 230 kHz- kanalen består av elementer lenger inn mot sentrum. Bredden på hovedloben stiger fremdeles ved ca 205 kHz.

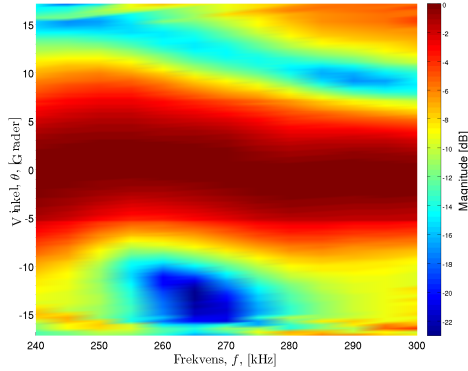
Når (Brun+210)- kanalen eksiteres synker åpningsvinkelen tydelig, men stiger igjen ved ca 220 kHz. Av de kanalsammensetningene som er vist her, er svingemønsteret til (Brun+210)- kanalen det som har tydeligst hovedlobe. Avviket fra symmetriaksen er fremtredende i alle figurene, men det er verdt å merke seg en ting. Ved eksitasjon av (Brun+210)- kanalen, ligger hovedloben ca ved symmetriaksen helt frem til 225 kHz. Dette er også den kanalsammensetningen som gir mest utstrålt lyd og har en tettest konsentrasjon av elementer ytterst.

Det er vanskelig å forstå økningen i åpningsvinkelen ved 215-235 kHz, og derfor er det gjort noen punktmålinger av åpningsvinkelen for andre kanaler også. Alle kanalene fra tabell 7.6 får større strlebredde i dette frekvensområdet. Forklaringen må derfor være en effekt som gjelder alle kanalene i tabellen. Kanskje er det en lateral mode i dette området som gjelder alle kanalene. En slik mode burde da vært sett i konduktansplottene i kapittel 5, noe den ikke kan.

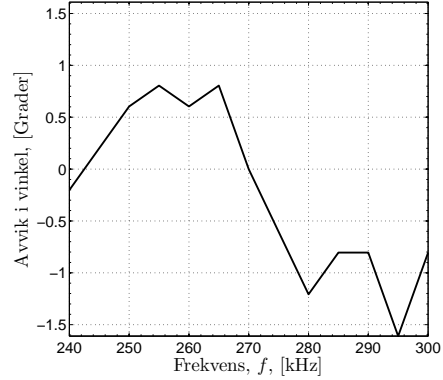
Tabell 7.6: Åpningsvinkel for diverse kanaler og kanalsammensetninger i frekvensområdet 180-240 kHz.

Kanal(er) \ Frekvens [kHz]	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240
210 [°]	14.4	13.2	12.8	11.8	12.2	13.4	14.0	13.4	12.0	12.4	12.8	12.8	13.4
(210+Brun) [°]	8.6	8.6	8.6	7.6	7.0	7.0	7.2	7.2	7.6	9.2	8.8	5.2	4.8
210, 230 [°]	13.4	12.8	12.8	12.8	12.2	12.4	13.0	12.4	11.6	12.6	13.4	12.2	11.2
(210+Brun), 230 [°]	9.7	9.5	9.1	8.1	7.6	7.9	8.2	8.2	8.8	10.4	10.5	9.6	7.7
Brun [°]	-	-	-	-	-	-	-	6.1	6.8	8.8	5.1	4.7	-
230 [°]	-	-	-	-	-	-	-	12.4	12.4	13.7	13.9	12.9	-
265 [°]	-	-	-	-	-	-	-	16.4	16.2	17.5	12.6	12.2	-

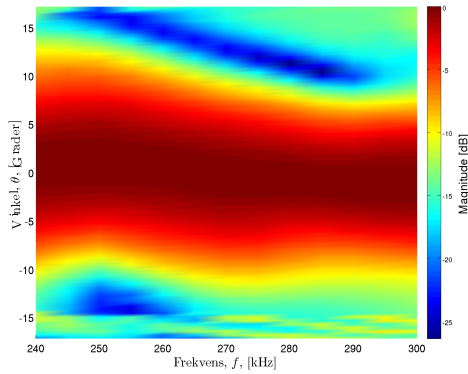
Frekvensbånd: 240 - 300 kHz



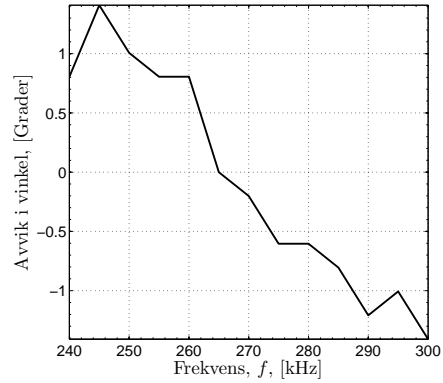
(a) Direktivetsplott for 265 kHz- kanalen.



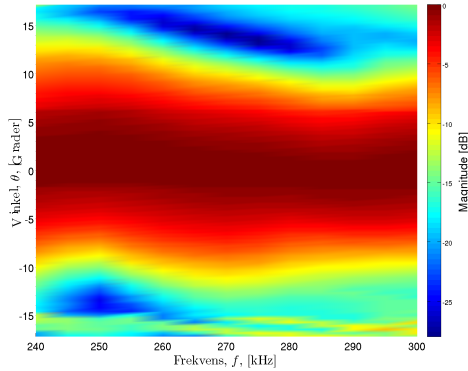
(b) Avvik fra symmetriaksen for 265 kHz-kanalen.



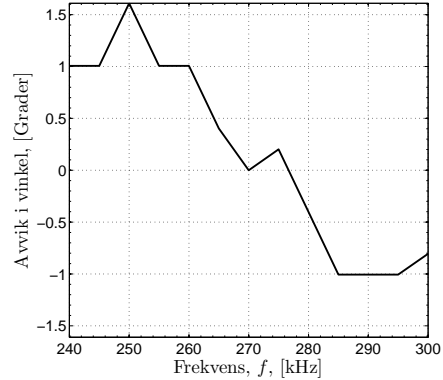
(c) Direktivetsplott for 265 og 290 kHz- kanalene.



(d) Avvik fra symmetriaksen for 265 og 290 kHz- kanalene.



(e) Direktivetsplott for 265, 290 og 340 kHz- kanalene.



(f) Avvik fra symmetriaksen for 265, 290 og 340 kHz- kanalene.

Figur 7.4: Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben.

Tabell 7.7 viser at åpningsvinkelen for 265 kHz- kanalen synker ved stigende frekvens. Når 290 kHz- kanalen legges til, jevnes åpningsvinkelen, men enda mer når 340 kHz- kanalen legges til oppå der igjen. Det kan virke som at jo flere kanaler som legges til 265 kHz- kanalen, danner det seg mer tydelig to platånivåer. Ett ved 240-270 kHz og ett fra 275-300 kHz. De kanalene med høyest resonansfrekvens vir-

ker best ved høye frekvenser og kompenserer for at 265 kHz- kanalen egentlige synkende åpningsvinkel.

Det er interessant å se at for frekvenser lavere enn resonansfrekvensen, 265 kHz, synker åpningsvinkelen når elementer legges til innenfor den ytre radiusen. Dette er ikke tilfellet ved resonansfrekvensen.

Avviket fra symmetriaksen varierer i alle figurene, men ved 265-270 kHz er hovedloben ca på symmetriaksen.

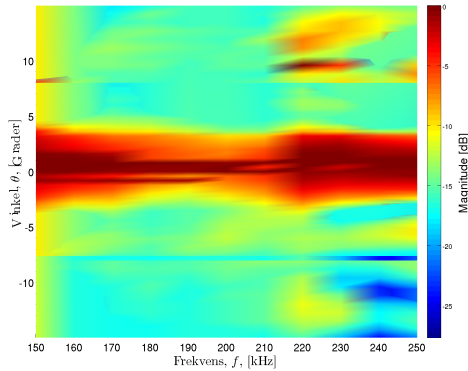
Tabell 7.7: Åpningsvinkel for diverse kanaler og kanalsammensetninger i frekvensområdet 180-240 kHz.

Kanal(er) \ Frekvens [kHz]	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
265 [°]	12.2	12.0	12.4	11.6	11.0	10.8	10.8	10.2	10.0	9.8	9.4	9.2	8.8
265, 290 [°]	11.8	11.8	11.8	11.6	11.6	11.4	11.2	10.6	9.6	9.0	9.0	9.8	10.0
265, 290 340 [°]	11.0	11.4	11.4	11.6	11.2	11.6	11.4	10.8	9.8	9.4	9.8	10.2	10.6
265, 290, 340, 395 [°]	12.8	13.0	12.8	13.3	12.8	12.5	12.0	11.2	10.4	10.0	10.4	11.1	11.2

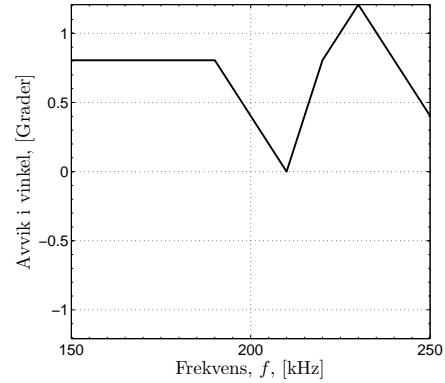
### 7.3 Direktivitetsmålinger med større steplengde

De neste målingene er gjort for å finne svar på noen spørsmål: I hvilken grad forandrer hovedloben seg i de lavfrekvente kanalene utenfor (110 kHz og 140 kHz- kanalene) resonansfrekvensen? I kapittel 6 ble det sannsynliggjort at 110 kHz- kanalen og 265 kHz- kanalen forstyrrer hverandre. Hvordan ser feltet ut? Hva skjer når to geometrisk like kanaler (Brun+210 kHz og 190 kHz kanalene) eksiteres sammen og hvordan ser feltet ut når mange kanaler eksiteres samtidig?

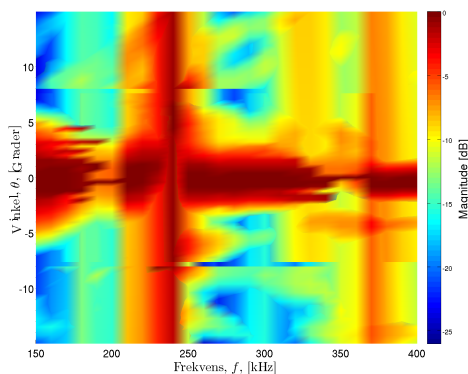
Disse spørsmålene er såpass generelle at det settes lavere krav til nøyaktighet. Målingene presentert i Figur 7.1-7.4 er derfor gjort med dårligere oppløsning enn de andre målingene i kapittelet. Steplengden er på 10 mm ved hovedloben og 20 mm lenger ute. Dette kommer til uttrykk ved skarpe kanter i direktivplotsene.



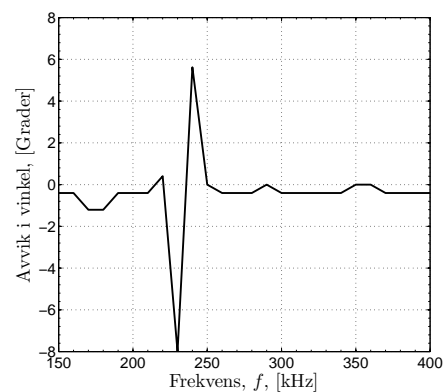
(a) Direktivetsplott for 110 kHz- kanalen.



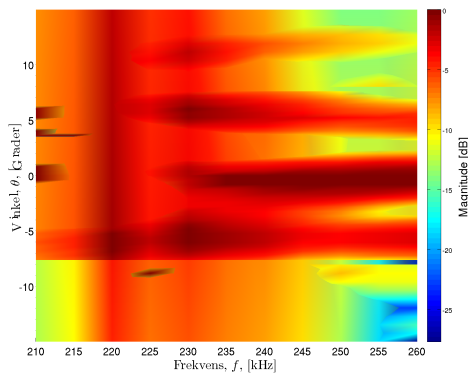
(b) Avvik fra symmetriaksen for 110 kHz-kanalen.



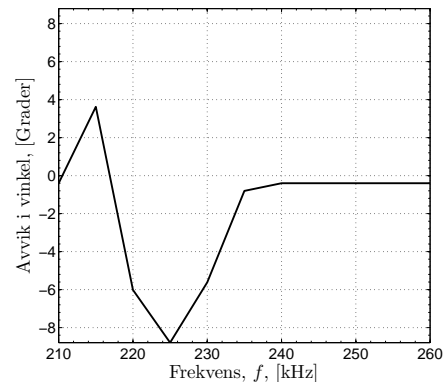
(c) Direktivetsplott for 140 kHz- kanalen.



(d) Avvik fra symmetriaksen for 140 kHz-kanalen.



(e) Direktivetsplott for 110 og 265 kHz- kanalene.



(f) Avvik fra symmetriaksen for 110 og 265 kHz- kanalene.

Figur 7.5: Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben.

**I hvilken grad forandrer hovedloben seg i de lavfrekvente kanalene utenfor (110 kHz og 140 kHz- kanalene) resonansfrekvensen?**

I 7.5(c)-7.5(b) observeres det at hovedloben kan få en retningsendring. For 140 kHz- kanalen skjer dette hovedsaklig ved ca 240 kHz, men her er trykkamplituden veldig svak og på den måten ikke representabel. Måleutstyret ble flyttet på før målingene på 110 kHz- kanalen fant sted, og derfor er ikke

den eksakte verdien fo avviket til å stole på, variasjonen derimot blir ikke påvirket av dette. Det er også interessant å se hvordan åpningsvinkelen i begge figurene gjør et hopp ved visse frekvenser. Det kan virke som om den vibrerende delen av overflaten plutselig består av et langt mindre område. Det kan muligens være en lateral mode, som ikke eksisterer i de delene av transduseren der epoxy er fyllmaterialet.

Det gjøres oppmerksom på at for 140 kHz- kanalen er avstanden fra transduser til hydrofonen kortere enn Rayleighavstanden for frekvenser høyere enn 300 kHz.

### **I kapittel 6 ble det sannsynliggjort at 110 kHz- kanalen og 265 kHz- kanalen forstyrrer hverandre. Hvordan ser feltet ut?**

110 og 265 kHz- kanalene fungerer dårlig sammen. Om hovedloben er splittet eller sidelobene er svært høye er vanskelig å si. Feltet er også i stor grad asymmetrisk. Retningsendring av hovedloben skyldes trolig faseforskjeller.

### **Hva skjer når to geometrisk like kanaler (Brun+210 kHz og 190 kHz kanalene) eksiteres sammen?**

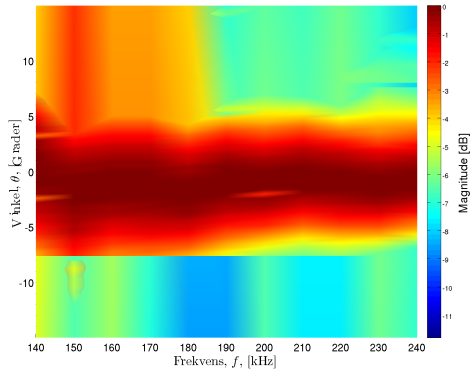
Ved å se på feltet i figur 7.6(a), kan det forstås hvorfor feltet forandres fra figur 7.2(a) til figur 7.2(c). Figur 7.6(a) er asymmetrisk for frekvenser lavere enn 190 kHz og dette kan også sees i figur 7.2(c).

Tanken er at to geometrisk like kanaler som eksiteres sammen, ikke vil ha forskjellig åpningsvinkel enn hver av de to kanalene alene. Utfra direktivitetsplottene for kanalene, er ikke dette helt riktig. Forskjellen er likevel ikke veldig stor.

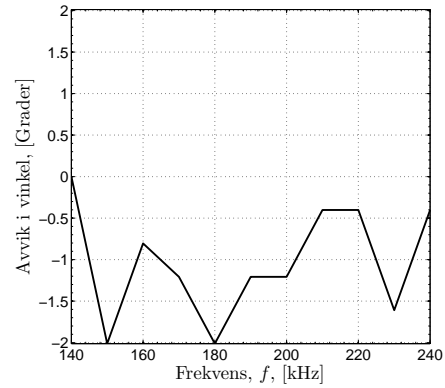
### **Hvordan ser feltet ut når mange kanaler eksiteres samtidig?**

I figur 7.6(e) er hovedloben nokså konstant. Åpningsvinkelen er senere målt og listet opp i tabell 7.10. Et problem er likevel den gausiske formen på hovedloben. Innenfor måleområdet, synker ikke trykket mer enn ca 10 dB og retningsendringen til hovedloben er relativt liten innenfor frekvesområdet. Feltet fra denne kanalkombinasjonen virker ganske ryddig, selv om den dårlige oppløsningen gir store usikkerheter.

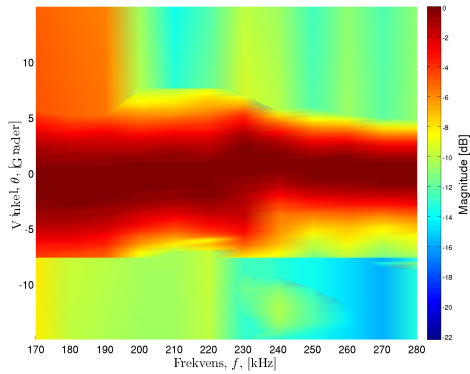




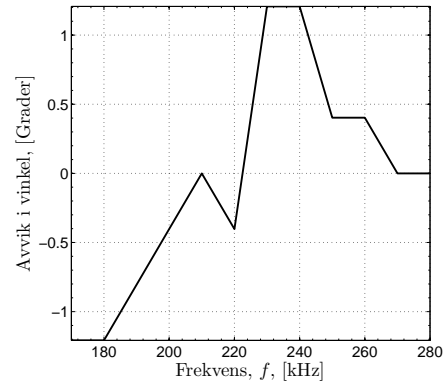
(a) 190 kHz- kanalen.



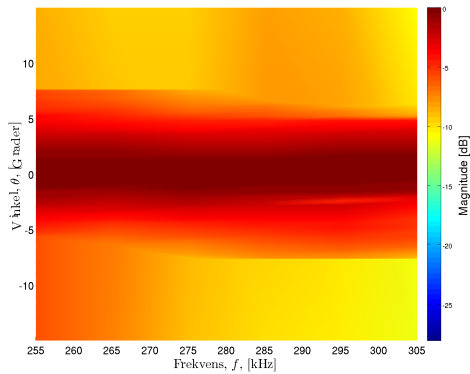
(b) 190 kHz- kanalen.



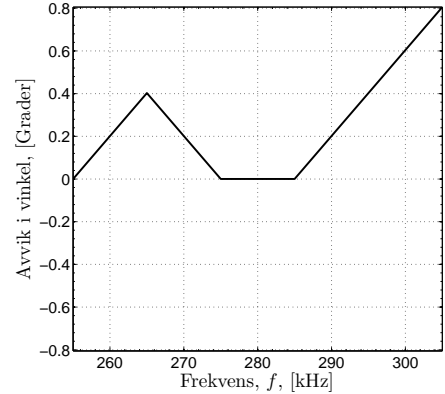
(c) Brun, 210 og 190 kHz- kanalene.



(d) Brun, 210 og 190 kHz- kanalene.



(e) Brun, 210, 230 og 265 kHz- kanalene.



(f) Brun, 210, 230 og 265 kHz- kanalene.

Figur 7.6: Konturplott over direktiviteten og avvik i grader mellom geometrisk symmetriakse for transduseren og maksimalverdien til hovedloben.

## 7.4 Drøfting

I de foregående figurene ble det sett at hovedloben forandret retning for forskjellige frekvenser. Dette kan skyldes to ting. Asymetri i konstruksjonen og faseforskjeller. Ved asymetri kan en tenke seg at noen elementer ikke virker, og de som virker har litt forskjellig innbyrdes resonans. Dette vil føre til en forskyvning av kildepunktet, men denne forskyvningen vil til enhver tid være mindre enn radiusen til den delen som svinger. Dersom forskyvningen av kildepunktet er så mye som 3.5 cm, vil retningsendringen av

hovedloben relativt til transduserens symmetriakse kun være 1.4 grader. For 265 kHz- kanalene vil det være usannsynlig at forskyvningen av kildepunktet kan være mer enn 1 cm, siden de ytterste elementenes avstand fra sentrum er ca 2 cm. I dette tilfellet vil forskyvningen av hovedloben da bli 0.4 grader, noe som ikke er nok til å forklare den målte retningsendringen i hovedloben. Faseforskjeller må derfor ha innvirkning på feltet. Asymetri i transduseren vil trolig føre til at forstyrrelsene elementene imellom får enda større utslag i lydfeltet.

Fra figurene 7.1-7.4 kan det sees at retningsendringen til hovedloben generelt er størst for de kanalene med høyest resonansfrekvens. Disse kanalene har færrest elementer og alle elementer er plassert i den indre delen hvor silikon er fyllmaterialet. Lavfrekvenskanalene kan ha en betydelig retningsendring i hovedloben utenfor resonansfrekvensen. Dette er vist i figur 7.5. Diskusjonen i kapittel 9 vil gå dypere inn i grunner for faseforskjeller.

Ved kanalkombinasjoner kan feltet forandres spesielt. Gode eksempler på dette er figur 7.5(e) og 7.2. 265 kHz kanalen og 110 kHz- kanalen passer dårlig sammen. I observasjonene gjort i kapittel 6 sank det registrerte trykket ved 265 kHz når 265 kHz- kanalen ble lagt til 110 kHz- kanalen. At 110 kHz- kanalen ble eksitert i en lateral mode er en mulig forklaring. Denne mistanken forsterkes ved å betrakte figur 7.5(a). Plutselig øker åpningsvinkelen kraftig. Det kan tyde på at kun den indre delen svinger. Fra konduktansplottene i kapittel 5 kan det sees en mode i dette frekvensområdet. Denne finnes kun for de indre elementene og er sannsynligvis en lateral mode. Bølger med forplantingsretning lateralt i transduseren kan forstyrre svingningene til andre element. Det er muligens dette som skjer når 265 og 110 kHz- kanalene eksiteres sammen. Generelt er det vanskelig å knytte modene fra konduktansmålingene konkret til faseendringer.

Det ble også prøvd å eksitere to kanaler som er veldig like i geometrien. (Brun+210) kanalen med ble eksitert sammen med 190 kHz- kanalen, se figur 7.6(c). Observasjoner viste at trykket var ca 20 prosent større når alle kanalene var eksitert enn når kun en var eksitert. Tanken var at styrken i signalet skulle bli større, og at åpningsvinkelen skulle være upåvirket. Ved å studere tabeller fra vedlegg C og figur 7.6(c), viste det seg at dette ikke var tilfelle. Kanalene må derfor vekselvirke på en måte som endrer på strålebredden.

## 7.5 Kanalsammensetninger som gir åpningsvinkel syv grader

I det følgende er det forsøkt å sette opp en kanalsammensetning som gir åpningsvinkel på syv grader fra 100-400 kHz. Det er tatt begrenset hensyn til feltet utenfor  $\theta_{3dB}$ .

Fra 100 kHz tas det utgangspunkt i 110 kHz- kanalen. Åpningsvinkelen synker fort med frekvensen og 140 kHz- kanalen legges så til for å holde den oppe (tabell 7.8). I frekvensområdet 145-175 kHz benyttes 145 kHz- kanalen alene. Det antas at det eksisterer en kanalkombinasjon som gir en åpningsvinkel nærmere syv grader her, men hovedloben hadde en tendens til å forskyve seg med diverse kanaler i kombinasjon med 145 kHz.

Tabell 7.8: Frekvensområde: 100-175 kHz.

Frekvens [kHz]	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
Åpnvinkel [grader]	7.6	7.0	7.0	7.1	6.9	6.9	7.6	7.0	6.9	6.4	6.4	6.2	5.6	5.8	5.8	6.0
Kanal(er)	110		110, 140							145						

Først ved frekvensen 180 kHz er 190 kHz- kanalen benyttet sammen med 145 kHz- kanalen (tabell 7.9). Utfra figur 7.2(c) begynner feltet å oppføre seg normalt her igjen. Fra frekvensen 200 kHz er (210+Brun) kanal benyttet, men ved fra 225 kHz oppstår det uregelmessigheter. Det viste seg vanskelig å holde åpningsvinkelen konstant her, og 110 kHz- kanalen ble derfor tatt med. Hovedloben ble observert til å ha en gausisk form for denne kanalsammensetningen. Fra 145 kHz benyttes (Brun+210) kanalen igjen sammen med 230 kHz kanalen.

Tabell 7.9: Frekvensområde: 180-250 kHz.

Frekvens [kHz]	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
Åpnvinkel [grader]	8.2	8.4	7.8	7.4	7.0	7.0	7.2	7.2	7.6	7.3	6.8	6.6	7.7	6.6	6.0
Kanaler	145, 190				Brun, 210					Brun, 210 230, 110 ..+265				Brun, 230 210	

I tabell 7.10 er det interessant å se hvordan det akustiske filteret fungerer. Åpningsvinkelen er synkende frem til 265 kHz, som også er 265 kHz- kanalens resonansfrekvens. Her gjør den et hopp og synker så igjen helt til den gjør et nytt hopp ved neste kanals resonansfrekvens, nemlig 290 kHz. Herfra synker åpningsvinkelen igjen. Samme resonement kan brukes i tabell 7.11. Åpningsvinkelen er synkende fra 310 kHz men ved 340 kHz er ikke hoppet så distinkt. Dette kan komme av at 340 kHz kanalen er den antatt svakeste og de andre kanalene bidrar fremdeles mye til feltet. Det ser ut til at åpningsvinkelen stabiliserer seg ved 390 kHz. som er ca ved siste resonansfrekvens.

Tabell 7.10: Frekvensområde: 255- 305 kHz.

Frekvens [kHz]	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305
Åpnvinkel [grader]	7.2	6.9	7.4	7.1	7.2	7.2	6.9	7.1	7.1	7.0	6.3
Kanaler	Brun, 210, 230, 265										

Tabell 7.11: Frekvensområde: 310- 400 kHz.

Frekvens [kHz]	310	315	320	325	330	335	340	345	350	355	355	360	365	370	375	380	385	390	395	400
Åpnvinkel [grader]	6.9	6.3	5.9	5.8	5.7	5.7	5.5	5.5	5.7	5.7	5.7	6.1	6.3	6.4	6.6	6.9	7.2	7.1	7.1	7.1
Kanaler	Brun, 265, 290, 340, 395																			

Siden åpningsvinkelen ble vel skarp i tabell 7.11 ble en annen kanalsammensetning som gir åpningsvinkel ca syv grader prøvd. Kanalene i tabell 7.12 er ikke "nabokanaler" og gir en litt mer gausisk hovedlobe.

Tabell 7.12: Frekvensområde: 320-365 kHz.

Frekvens [kHz]	320	325	335	345	355	365
Åpnvinkel [grader]	7.5	7.1	7.2	7.0	7.1	7.0
Kanaler	190, 265					

# Kapittel 8

## Usikkerhetsanalyse

I oppgaven har målinger av åpningsvinkelen blitt gjort i kapittel 3, 6 og 7. Et stort antall åpningsvinkler har blitt presentert, men alle disse vil ikke regnes distinkt på. Kun punktmålingene fra kapittel 7 vil bestemmes i et konkret intervall.

Direktivitetsmålingene (som er presentert i konturplott) ble gjort ved at oscilloskopet tok rms-verdien av bursten. Problemet var at skjermbildet til oscilloskopet, når midlefunksjonen ble brukt, ikke var konsistent med oscilloskopets utregnede rms-verdi. Dette gjaldt verdier på under  $2 mV_{pp}$ . Dersom midlefunksjonen ble slått av, var signalets ytterkanter konsistent med rms-verdien. Siden forskjellen kun var fremtredende ved svake signal, er ikke hovedloben særlig affisert av dette. Sidelobene er i noen konturplott ikke tilstede i det hele tatt, noe som ikke nødvendigvis betyr at de ikke eksisterer, men er veldig små. I tillegg forekommer det refleksjoner i ytterkantene, noe som betyr at usikkerhetsanalyse er vanskelig å utføre for hele feltet. Usikkerhetsanalyse i målingene fra kapittel 3 vil ikke gjøres. Essensen i dette kapittelet var at åpningsvinkelen var jevnt synkende for økende frekvens ved tykkelsesresonansen. Selv om verdien av åpningsvinkelen kan ha en viss usikkerhet, antas reduksjonen i åpningsvinkelen å være riktig.

### 8.1 Generelt uttrykk for usikkerhet

Et estimat for usikkerheten i vinkelen til et målepunkt er gitt ved [21]:

$$\Delta\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta}{\partial a}\right)^2(\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial b}\right)^2(\Delta b)^2} \quad (8.1)$$

der  $\theta$  er vinkelen utfra symmetriaksen,  $a$  er avstanden fra transduserflaten til måleplanet og  $b$  er avstanden fra symmetriaksen og ut til målepunktet. Vinkelen og den deriverte av vinkelen blir da:

$$\theta = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \quad (8.2)$$

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial a}\right)^2 = \frac{a^2}{(a^2 + b^2)^2} \quad (8.3)$$

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial b}\right)^2 = \frac{b^2}{(a^2 + b^2)^2} \quad (8.4)$$

Usikkerheten i  $a$  er:

$$\Delta a = \sqrt{(\Delta a_{mal})^2 + (\Delta a_{avl})^2} \quad (8.5)$$

der ”mal“ står for usikkerheten i måleutstyret (i dette målebåndet) og ”avl“ er usikkerheten i selve avlesningen.  $\Delta a_{mal}$  kan neglisjeres her sammenlignet med  $\Delta a_{avl}$  som settes til 0.5 cm.

$\Delta b$  er mer komplisert å finne gode tall på. I tillegg til avlesningsusikkerhet og påliteligheten til målebåndet er størrelsen knyttet til usikkerheten fra oscilloskopet. Usikkerheten i oscilloskopet fra Agilent er oppgitt til å være to prosent av fullskala utslag. I tillegg er det fluktuasjoner som gjør det vanskelig å

bestemme en verdi. I punktmålingene er det prøvd å ta verdien i midten av fluktuasjonen.

I databladet for hydrofonen som er brukt hevdes det at hydrofonen er omnidireksjonal i x-y- retning for visse frekvenser og derfor er ikke dette forholdet regnet på. En diskusjon rundt neglisjerte faktorer gjøres i seksjon 8.5.

Hvordan knytte usikkerheten i målt spenning opp mot posisjonen av hydrofonen? Formelt sett skulle  $b$  og målt spenning vært knyttet til hverandre gjennom en relasjon slik som  $\theta$ ,  $a$  og  $b$  er. Dette er vanskelig å gjøre. Styrken på signalet og formen på hovedloben vil variere fra kanal til kanal, dermed vil usikkerheten variere også. Variasjonen av spenningen knyttet til usikkerheten vil her derfor knyttes direkte opp mot plasseringen av hydrofonen ved observasjoner.

Usikkerheten i  $\Delta b$  kan da settes opp:

$$\Delta b = \sqrt{(\Delta b_{mal})^2 + (\Delta b_{avl})^2 + (\Delta b_{osc})^2 + (\Delta b_{flukt})^2} \quad (8.6)$$

der  $\Delta b_{osc}$  står for korreksjonen grunnet usikkerhet i oscilloskopet og  $\Delta b_{flukt}$  står for korreksjonen knyttet til oscilloskopets fluktuasjoner. Disse er bestemmes ved å observere hvor mye hovedloben forandrer seg ved  $\theta_{3dB}$  for en gitt spenningsvariasjon.  $\Delta b_{osc}$  og  $\Delta b_{flukt}$  blir da usikkerhetsestimater for avlesningen rundt  $\theta_{3dB}$ . Dersom det antas at samme usikkerheten gjelder på begge sider av hovedloben, kan usikkerheten i åpningsvinkelen,  $\Delta\phi$ , finnes ved:

$$\Delta\phi = \sqrt{(\Delta\theta_{+3dB})^2 + (\Delta\theta_{-3dB})^2} = \Delta\theta_{3dB}\sqrt{2} \quad (8.7)$$

## 8.2 Punktmålinger

Punktmålinger er gjort med tanke på best mulig avlesningsnøyaktighet. Målebåndet som ble brukt bulket seg noe da posisjoneringsutstyret ble flyttet på, og usikkerheten ble satt til  $\Delta b_{mal} = 1$  mm. Selve avlesningen ble satt med samme usikkerhet,  $\Delta b_{avl} = 1$  mm.

Oscilloskopet viste en konstant fluktuasjon på  $\pm 0.03$  mV i signalet. Tabell 8.1 viser  $\Delta b_{flukt}$  som følger av disse fluktuasjonene. Usikkerheten i spenningen ved  $\theta_{3dB}$  kalles  $\Delta_{V3dB}$ .

Tabell 8.1: Viser prosentvis usikkerhet i spenningen,  $\Delta_{V3dB}$  ved  $\theta_{3dB}$ , grunnet fluktuasjoner i oscilloskopet og påfølgende utslag for hydrofonen,  $\Delta b_{flukt}$ .

Kanal	$\pm\Delta_{V3dB}$ [%]	$\pm\Delta b_{flukt}$ [mm]
110	0.1	-
140	0.1	-
145	0.3	-
190	0.7	1
(210+Brun)	0.5	1
210	1.3	3
230	0.6	3
265	0.4	2
290	0.5	2
340	2.6	4
395	2.4	4

Usikkerheten i oscilloskopet er satt til å være to prosent av fullskalautslag. Hvor stor del av skjermbildet som blir dekket av signalet er derfor avgjørende. Dersom signalet f.eks. dekker halve skjermbildet, settes usikkerheten til fire prosent. Dette blir representert gjennom  $\Delta b_{osc}$ , vist i tabell 8.2.

Tabell 8.2: Viser prosentvis usikkerhet i spenningen,  $\Delta_{V_{3dB}}$  grunnet oscilloskopets usikkerhet og påfølgende utslag for hydrofonen,  $\Delta b_{osc}$ .

Kanal	$\pm\Delta_{V_{3dB}}$ [%]	$\pm\Delta b_{osc}$ [mm]
110	3	3
140	3	3
145	3	3
190	3	4
(210+Brun)	3	3
210	4	8
230	4	12
265	4	6
290	4	6
340	6	14
395	6	14

Verdiene som er brukt til nå gjelder for et målepunkt. Ved å sette dem direkte inn i ligning (8.1), gis et estimat på usikkerheten i  $\theta_{3dB}$ . Hovedloben er ikke nødvendigvis symmetrisk, men usikkerheten i åpningsvinkelen,  $\Delta\phi$  fra tabell 8.3 er likevel estimert utfra ligning 8.7.

Tabell 8.3: Viser usikkerheten for punktmålinger av åpningsvinkelen for hovedkanalene.

Kanal	110	140	145	190	Brun, 210	210	230	265	290	340	395
Usikkerhet [°]	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 0.7$	$\pm 0.3$	$\pm 0.3$	$\pm 0.8$	$\pm 0.8$

### 8.3 Åpningsvinkelen tatt utfra direktivitetmålinger

Meningen med direktivitetmålingene var å få oversikt over hovedlobe og de første sidelobene. Dataprogrammet Full.m regner ut åpningsvinkelen ved å finne de to siste punktene før  $\theta_{3dB}$ . Åpningsvinkelen blir dermed for skarp når usikkerheten er knyttet opp mot steplengden til hydrofonen. I kapittel 3, 4 og 7 ble det gjort direktivitetmålinger med steplengde 10 og 5 mm. Aksene er diskretisert med konstant steplengde rundt og innenfor åpningsvinkelen.

Et annet usikkerhetsmoment i direktivitetmålingene er hvor mye av oscilloskopskjermbildet signalet dekker. Siden programmet Direktivitet.m får signalgeneratoren til å steppe gjennom frekvenser og leser inn rms-verdi er det ingen kontroll hvor mye av skjermbildet signalet dekker. Usikkerheten for oscilloskopet blir da uviss.

Det går an å finne en verdi for usikkerheten ved å gå inn i tabellene i vedlegg C. Et usikkerhetsintervall over og under den målte verdien kan estimeres. Siden meningen med disse målingene var å få oversikt over direktiviteten for mange frekvenser og hvordan åpningsvinkelen varierte, vil ikke usikkerhetsanalyse fra disse målingene prioriteres. Direktivitetmålingene er også i mange tilfeller gjort med flere kanaler eksitert samtidig. En følge av dette er at oscilloskopet viser en større verdi, noe som igjen fører til at usikkerheten fra oscilloskopet reduseres. Ved å f.eks. se på åpningsvinkelen for 265 kHz-kanalen i tabell 7.7 kan det sees at den er stabilt synkende. Dersom usikkerheten var stor innenfor hver måleserie skulle en tro at noe mer fluktasjoner var å se i åpningsvinkelen. Det antas derfor at den observerte økningen eller reduksjonen i åpningsvinkelen er riktig selv om verdien på åpningsvinkelen kan være noe usikker. En idè hadde vært å legge inn usikkerhetsberegninger i dataprogrammet og interpolere mellom punktene.

I praksis er det å innføre en diskretisering, uten å interpolere mellom punktene, det samme som å innføre en stor avlesningsunøyaktighet. Et grovt estimat for usikkerhet kan finnes ved å sette  $\Delta b_{avl} = 10$  mm. Usikkerheten for 110, 140, 145 og (Brun+210) kHz-kanalene blir da  $\pm 0.6^\circ$ . Nå er det ikke tatt hensyn til at oscilloskopets usikkerhet kan være større eller mindre eller at feilen innført med steplengden fører til at den målte åpningsvinkelen kun blir mindre.

## 8.4 Usikkerhet knyttet til hydrofonens avvik fra en kurvet bane

En faktor som ikke er tatt høyde for enda er at målebanen til hydrofonen ikke er kurvet. Den geometriske spredningen i vannet gjør at den virkelige åpningsvinkelen kan være noe større enn den målte. Forskjell i avstanden ut til hydrofonen er større for store åpningsvinkler enn små og dermed er feilen i åpningsvinkelen det også. I tabell 8.4 er lengdeforskjellen mellom hydrofonen og den kurvede banen regnet ut ved den tidligere målte åpningsvinkelen fra tabell 7.3. Et estimat for den geometriske spredningen ble funnet ved å måle prosentvis endring i trykk ved hovedloben for avviket mellom de to banene. Videre ble hydrofonen flyttet til 3dB- vinkelen og enda et lite intervall til for å kompensere for den målte spenningsforskjellen. Dette intervallet ble regnet om til et vinkelintervall. Resultatet er gitt i tabell 8.4. Fluktuering i registrert spenning gjorde intervallene noe vanskelig å bestemme, spesielt kanaler med svak styrke. Av denne grunn er kun en maksimalverdi bestemt i tabellen.

Tabell 8.4: Hydrofonbanens avvik fra den kurvede linjen,  $r$ , ved  $\theta_{3dB}$ . Maksimal prosentvis demping av spenningsamplituden,  $V_{demp}$ , og påfølgende maksimal korreksjon for åpningsvinkelen.

Kanal	$r$ [mm]	$V_{demp}$ [%]	Korreksjon[°]
110	3	<1	<0.1
140	3	<1	<0.1
145	3	<1	<0.1
190	4	<1	<0.2
(210+Brun)	3	<1	<0.1
210	14	<2	<0.4
230	22	<3	<0.5
265	5	< 1	<0.2
290	5	< 1	<0.2
340	19	< 3	<0.5
395	20	< 3	<0.5

## 8.5 Intervall for åpningsvinkel og andre usikkerheter

Hvilke flere usikkerhetsfaktorer kan spille inn på åpningsvinkelen? Fra kapittel 7 ble det sett at hovedloben ikke nødvendigvis er symmetrisk. Dersom transdueren vris (rundt sin symmetriakse), kan en annen åpningsvinkel derfor være gjeldende. Avviket mellom hovedlobe og symmetriakse ble i stor grad forklart med faseforskjeller i kapittel 7. Transduseren kan ha stått noe skjevt også. Dette skulle ikke ha veldig stor betydning på åpningsvinkelen siden en økning i trykkamplituden på ene siden av hovedloben må føre til en reduksjon på andre siden. Det har også vært antatt i oppgaven at transduseren ikke endrer karakteristikk med tiden. Dette er ikke nødvendigvis riktig.

Det er ikke likegyldig hvilken retning hydrofonen står i måleopsettet. Direktivitetsdiagrammet i vedlegg B.3 viser at mottakerfølsomheten ikke er konstant i alle retninger i  $x$ - $z$ - planet. Hydrofonen er som sagt oppgitt til å være omnidireksjonal om  $x$ - $y$ -aksen, men hvorvidt dette er riktig for alle frekvenser er uvisst.

Selv om disse faktorene kan spille inn på åpningsvinkelen, er det vanskelig å få noe tallmessig uttrykk for dette. Flere sjekker av åpningsvinkelen til hver kanal (også når transduseren var tatt opp og ned av vannet) ga likevel en såpass stabil verdi at usikkerhetsintervallene fra tabell 8.3 virker representable.

Det var vanskelig å bestemme en fast verdi for avviket fra den kurvede banen. I tabell 8.5 er den maksimale forskyvningen likevel innlemmet i det totale usikkerhetsintervallet. Den reelle åpningsvinkelen ligger sannsynligvis i øvre halvdel av intervallet.

Tabell 8.5: Viser punktmåling av åpningsvinkel og et intervall der den virkelige åpningsvinkelen sannsynligvis ligger i. Intervallet er slått sammen av verdiene fra tabell 8.3 og 8.4. Den virkelige åpningsvinkelen ligger sannsynligvis i øvre halvdel fordi forskyvningen fra tabell 8.4 kun fører til en økning i åpningsvinkelen.

Kanal	Målt åpningsvinkel [°]	Intervall for åpningsvinkel [°]
110	6.8	6.6 - 7.1
140	6.8	6.6 - 7.1
145	6.7	6.5 - 7.0
190	8.6	8.3 - 9.1
(210+Brun)	7.0	6.8 - 7.3
210	15.8	15.2 - 16.8
230	20.2	19 - 21.4
265	9.9	9.5 - 10.5
290	10.0	9.6 - 10.6
340	18.5	17.7 - 19.8
395	19	18.2 - 20.3





## Kapittel 9

# Oppsummering og videre arbeid

I dette kapitlet vil først ta for seg en liten oppsummering av hva selve oppgaven. Videre vil en forlæringsmodell for avviket mellom simulerte og målte åpningsvinkler settes opp. Om denne er helt riktig er uvisst, men den forklarer en del av avvikene i åpningsvinkel og hovedlobens retningsforandring. Det er gjort for mange forskjellige direktivetsmålinger til å oppsummere dem her. I kapittel 7, er det langt på vei antydnet hva som kan være årsaken til det som blir registrert i målingene. Det henvises derfor til resultatkapitlet 7 for detaljer. Noen eksempler er likevel gitt for å vise den direkte sammenhengen med forklaringsmodellen. Til slutt er det nevnt noen nye problemstillinger og forslag til nytt oppsett.

### 9.1 Oppsummering

I kapittel 3 ble en enkel konstruksjon utprøvd basert på et piezoelektrisk element med bak- og frontlag. Hensikten var å endre resonanseegenskapene i forskjellige områder av elementet og dermed oppnå en konstant åpningsvinkel på syv grader. Resultatet var en svært varierende åpningsvinkel over det aktuelle frekvensområdet og det så ut til at koblingen mellom regionene var for store til å påvirke resonanseegenskapene til elementet i nevneverdig grad. Rundt hovedresonanzen til elementet var åpningsvinkelen jevnt avtakende for økende frekvens. Hovedloben var tydelig definert og sidelobenivået relativt lavt. Dette ble forsøkt utnyttet i hovedkonstruksjonen.

Tanken bak hovedkonstruksjonen var å eksitere forskjellige sirkulære områder inne i transduseren ved forskjellige frekvenser. En komposittlignende transduser ble designet av forskjellige elementsett med muligheter for å påtrykke signal på hvert av de enkelte settene. Et stort lengde/bredde- forhold og fyllmateriale mellom elementene skulle sørge for god akustisk utstråling, liten kobling i lateral retning og muligheter for å beskrive åpningsvinkelen ved hjelp av stempelkildemodellen.

Først ble det prøvd å påtrykke et signal på alle elementene samtidig. Selv om visse elementer hadde resonansfrekvens langt unna den påtrykte frekvensen, var det tydelig gjennom trykkregistrering, ekkomålinger og direktivetsmålinger at disse elementene også bidro til feltet. Dette fikk store konsekvenser for åpningsvinkelen.

Videre ble det forsøkt å sende signal inn på bestemte elementer av gangen. Elementsettene var ordnet i kanaler og kanalens teoretiske åpningsvinkel ble sammenlignet med den målte, se tabell 9.1. Flere direktivetsmålinger ble gjort for å få oversikt på hovedlobens form og retning.

Tabell 9.1: Oppsummering av simulert og punktmålt åpningsvinkel for hovedkanalene. ”2/3” betyr at den ytterste ringen i kanalen er simulert med 2/3 amplitude i forhold til resten av elementene i aknaalen.

Kanal	Punktmålt åpningsvinkel [°]	Simulert åpningsvinkel [°]
110	6.8	8.2
140	6.8	7.3
145	6.7	8.0
190 ”2/3”	8.6	8.6
(210+Brun) ”2/3”	7.0	7.0
210	15.8	8.4
230	20.2	8.6
265	9.9	8.0
290	10.0	8.9
340	18.5	10.8
395	19	8.9

## 9.2 Diskusjon av avviket fra teoretisk og målt åpningsvinkel

### Observasjon:

Tendensen i tabell 9.1 er at kanalene med lav resonansfrekvens (110, 140 og 145 kHz- kanalene) har åpningsvinkel noe under den teoretiske, kanaler med mellomhøy resonansfrekvens ((Brun+210)- kanalen og 190 kHz- kanalen) har sammenlignbar teoretisk og målt åpningsvinkel og kanaler med høyest resonansfrekvens (210, 230, 265, 290, 340 og 395 kHz- kanalene) har åpningsvinkel større enn den teoretiske. Elementene med mellomhøy og høy resonansfrekvens er kun limt sammen med silikon.

For kanalene med mellomhøy og høy resonansfrekvens gjelder:

- Kanaler med høy resonansfrekvens dekker et lite areal og har spesielt få elementer i sin ytterste ring. Kanaler med mellomhøy resonansfrekvens dekker et større areal og har spesielt mange elementer i sin ytterste ring.

Utifra disse faktaopplysningene vil det diskuteres hvorfor kanaler med mellomhøy resonansfrekvens har en åpningsvinkel som stemmer med den teoretiske, mens kanaler med høy resonansfrekvens ikke har det. De lavfrekvente kanalene vil ikke diskuteres før helt i slutten av seksjon 9.3.

Gururja nevner som sagt vekselvirkninger i sitt arbeid som forklaring på hvorfor koblingskoeffisienten,  $k_t$ , varierer for kompositransdusere med forskjellig prosentandel piezokeramisk materiale [2]. Han sier: ”Effectiveness of the interaction depends on the amplitude and phase of the transverse wave relative to that of the PZT-rods.“ Videre antyder han at reduksjonen i  $k_t$  er et resultat av vekselvirkning mellom elementene. Dersom avstanden mellom elementene er konstant, slik den er i en 1-3 komposittransduser, skulle vekselvirkningen virke likt på alle element og dermed ikke endre åpningsvinkelen. Transduseren i denne oppgaven har Pz27 staver istedet for PZT- staver og *ikke* lik avstand mellom elementene. Utfra målingene avviker åpningsvinkelen minst fra den teoretiske for kanaler hvis ytterste ring har spesielt mange elementer. En skulle kanskje tro at når elementer står nært hverandre ville vekselvirkningen vært større og ført til en lavere amplitude på de ytterste elementene. I såfall skulle åpningsvinkelen økt. Målinger av åpningsvinkelen gir uttrykk for det motsatte, derfor må andre effekter spille inn. Akkurat hva som er grunnen til dette er vanskelig å si, men en mulig forklaring er gitt under.

## 9.3 Forklaringsmodell for avvik mellom målt og simulert åpningsvinkel

Kanaler med mellomhøy resonansfrekvens:

På grunn av koblingseffekter vil områder mellom de aktive elementene også bli noe eksitert i tykkelsesretning. Det er muligens disse mellomliggende områdene som gir svaret på observasjonen over. Det antas

at svingemønsteret til fyllmaterialet (dvs. silikon og andre passive element) bestemmes av de nærmeste aktive elementene. Når de aktive elementene står med en fast avstand fra hverandre, vil fase og amplitude til de passive områdene være lik. Dette er tilfellet for den ytterste ringen i (210+Brun)- kanalen og 190 kHz- kanalen. *De passive områdene mellom de aktive elementene i den ytterste ringen i (210+Brun) kanalen vil derfor ha noenlunde lik amplitude og fase. Det samme gjelder for de passive områdene i den ytterste ringen for 190 kHz- kanalen.*

Stikk motsatt argument brukes for de innerste elementene i (210+Brun)- kanalen og 190 kHz- kanalen: *De passive områdene mellom de aktive indre elementene vil ikke ha samme amplitude og fase fordi de aktive elementene står med forskjellig avstand fra hverandre. Dette kan føre både dårligere utstrålt effekt og en retningsforandring av utstrålt lyd fra de innerste områdene.*

Kanaler med høy resonansfrekvens:

For kanaler med høy resonansfrekvens, gjelder motsatt argumentasjon for den ytterste ringen i forhold til elementene inn mot midten. Den ytterste ringen i alle kanalene er ikke særlig definert og dermed er det dette området som får størst amplitude- og faseforskjeller i det mellomliggende passive fyllmaterialet. Dette kan igjen føre til både dårligere utstrålt effekt og en retningsforandring av utstrålt lyd.

Avstanden mellom de innerste elementene er mer konstant og derfor er det i dette området det passive fyllmaterialet mellom de aktive elementene svinger i fase.

Følgen av dette resonnementet vil være: *Åpningsvinkelen til en kanal med et godt definert ytterområde, vil få en åpningsvinkel som er nærmere den teoretiske (basert på fouriertransformen av frie element) enn hva som gjelder for en kanal med få elementer i sitt ytterområde. Et godt definert ytterområde betyr i denne sammenhengen mange elementer i samme avstand fra hverandre.*

Kanaler med lav resonansfrekvens:

Det som skiller de lavfrekvente kanalene med de som har høy og mellomhøy resonansfrekvens, er epoxy som fyllmateriale. Som vist i konduktansplottene i kapittel 5, er transversale svingninger kraftig dempet i epoxyen. De indre områdene der passiv piezokeramikk og silikon er fyllmateriale vil derfor være langt mer utsatt for faseforskjeller. Mindre utstrålt lyd fra dette området fører til skarpere målt åpningsvinkel enn den simulerte. Det er også en mulighet for at epoxy generelt bedre egnet som fyllmateriale. Åpningsvinkelen er avhengig av hvordan hele transduseroverflaten vibrerer. Epoxy kan kanskje være lettere å eksitere i tykkelsesretning enn silikon og passiv piezokeramikk. Dette vil også kunne føre til en mindre åpningsvinkel.

Koblingseffektene det er snakk om, kommer fra transversale bølger, men også skjærkoblinger mellom aktive element og passivt fyllmateriale. Det går an å trekke en parallell til et piezoelektrisk element. I figur 2.3 er svingemøsteret til et piezoelektrisk element med varierende  $D/T$ - forhold vist. Selv om elementet eksiteres i tykkelsesmode, kan deler av elementet være ute av fase. Likevel er faseforskjellene symmetriske om midten på elementet. Denne symmetrien ser det ikke ut som transduseren i denne oppgaven innehar.

Målinger i kapittel 7 viser ved flere anledninger at åpningsvinkelen kan minke ved å eksitere elementer innenfor den ytre radiusen (f.eks. når 340 og 395 kHz- kanalen er eksitert sammen. Se tabell 7.3). Ifølge simuleringer skulle åpningsvinkelen egentlig økt. Etter forklaringsmodellen kan dette skje dersom elementavstanden i de ytterste områdene blir mer konstant. Ved å studere nøyaktig hvordan elementene er plassert i arbeidstegningen, figur 4.4, kan forklaringsmodellen undersøkes nærmere. Dette vil ikke gjøres her. Budskapet er uansett at et godt definert ytterområde er viktig for å hindre vekselvirkninger med andre aktive element.

Når elementene står i epoxy, virker det som om dempingen av transverselle bølger er så stor at vekselvirkninger kan sees bort ifra. Når 140 kHz- kanalen legges til 110 kHz kanalen, og det påtrykte signalet er rundt 110 kHz, øker åpningsvinkelen relativt til når kun 110 kHz- kanalen eksiteres. Vekselvirkningen kan også forstås ved å studere hovedlobens retningsforandring fra symmetriaksen. For de lavfrekvente kanalene er retningsendringen svært liten mens for kanalene med høyere resonansfrekvens er retningsforandringen betydelig.

Dersom to kanaler eksiteres samtidig, kan hovedlobens avvik fra symmetriaksen være spesielt stort, se f.eks. 145 kHz- kanalen, figur 7.2. Når to kanaler eksiteres samtidig, vil de aktive elementene gjerne

stå mer tilfeldig enn når kun en kanal eksiteres. Den tilfeldige avstanden kan føre til faseforskjeller i de passive, mellomliggende områdene og dermed endre både åpningsvinkel og retning på hovedloben. Et annet eksempel er når 110 kHz- kanalene eksiteres sammen med 265 kHz- kanalen med påtrykt frekvens ca 265 kHz. Stor retningsendring i hovedloben, uryddig felt, store sidelobes, totalt utstrålt effekt tydelig lavere enn når kun 110 kHz- kanalen eksiteres ved 265 kHz. Konduktansmålingene sannsynliggjør en lateral mode for 110 kHz- kanalen ved 265 kHz. Det virker som at en slik lateral mode fører til kraftigere transverselle bølger og dermed store vekselvirkninger og forstyrrelser elementene imellom.

## 9.4 Videre arbeid

I direktivitetmålingene fra kapittel 7, tabell 7.8 - 7.12, er det prøvd å få en konstant åpningsvinkel syv grader fra 100 - 400 kHz, som også var hovedmålet i oppgaven. Selv om de fleste av hovedkanalene ikke ga en åpningsvinkel på syv grader hver for seg, viste det seg at forskjellige kanalkombinasjoner kunne gjøre det. Det ble gjort en rekke undersøkelser av ulike kanalkombinasjoner og tanken bak å eksitere et utvalg av kanaler ser ut til å virke med tanke på en stabil åpningsvinkel. Det mekaniske filteret som ble introdusert i kapittel 4, var ment for å gjelde eksitasjon av alle kanalene samtidig. En konstant åpningsvinkel var da umulig. Dersom det mekaniske filteret relateres til et utvalg av kanaler, ser det ut til å virke.

Viktige problemstillinger for videre arbeid er: Hvor stor retningsendring i hovedloben er akseptabel og i hvilken grad er det akseptabelt at hovedloben har en gaussisk form. Sidelobenivået er også en viktig faktor, men dårlig måleutstyr gjorde at disse ikke ble undersøkt skikkelig.

Fra resultatdelen var det de lavfrekvente kanalene som fungerte best. Kanalene med mellomhøy resonansfrekvens hadde også en definert hovedlobe med liten retningsendring (spesielt (Brun+210)- kanalen). Dersom en ny konstruksjon skal prøves ut, vil dette være en fin start. Frekvensområdet bør kanskje kortes noe ned, og en god idé er å finne ut hvor mye epoxy som skal til mellom de aktive elementene for at ikke vesentlige vekselvirkninger skal forekomme. Det bør prøves å sette elementer som er ment for å eksiteres sammen i mest mulig konstant avstand fra hverandre.

For å hindre gaussisk form på hovedloben, bør amplituden til de ytterste eksiterte elementene minst være lik amplituden til de indre elementene. Dersom ett elementsett legges oppå et annet, slik som er gjort i denne oppgaven, vil åpningsvinkelen kanskje være konstant, men mer energi vil ligge utenfor  $\theta_{3dB}$ . En måte å løse dette på er å konstruere alle kanaler på samme måte som (210+Brun)- kanalen er blitt gjort. Dersom en lignende kanal med mindre effektiv radius skulle eksiteres, kunne den indre delen av (210+Brun) kanal eksiteres alene sammen med den nye kanalen. Dersom elementene i i de to kanalene i tillegg var plassert med hensyn til en konstant avstand, kunne en definert hovedlobe med åpningsvinkel syv grader vært oppnådd. Det var dette som ble prøvd når (210+Brun)-kanalen ble eksitert sammen med 190 kHz- kanalen. Dette var bare en delvis suksess og det hadde vært interessant å se hvordan direktiviteten hadde sett ut med epoxy som fyllmateriale.

Det er hele tiden koblingen i transduseren som er problemet. Koblingen trengs for å skaffe nødvendig båndbredde, men den kan også føre til vekselvirkninger og forstyrrelser mellom områdene i transduseren. Det har ikke vært tid eller mulighet i denne oppgaven til å se på simuleringsverktøy i forbindelse med hele konstruksjonen. Den versjonen av FEMP som er brukt, er kun laget for aksesymmetriske tilfeller. For å hindre vekselvirkning kan epoxy legges imellom elementene, men dette tar også plass og færre piezoelektriske element kan da benyttes. Dette vil også bli et spørsmål rundt hvor stor utstrålt effekt en bør ha.

Dersom det finnes et komposittmateriale som kan deles opp og likevel ha stor utstrålt effekt, kunne en annen vinkling til problemet vært brukt. Spenningen kunne vært påtrykt forskjellige deler av komposittmaterialet ved å dele opp elektroden. På denne måten kunne åpningsvinkelen holdes konstant over et stort frekvensområde.

# Bibliografi

- [1] J. Kochbach, "Finite element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers," Ph.D. dissertation, Universitetet i Bergen, September 2000.
- [2] T. Gururja, A. Walter, A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld, and Y. J. Wang, "Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. part 1." *IEEE Transactions on sonics and ultrasonics*, vol. su-32, no. 4, pp. 481–498, July 1985.
- [3] A. French, *Vibrations and Waves*. Nelson, 1971.
- [4] Engingeers, *IEEE Standard on Piezoelectricity 176-1987*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA, 1988.
- [5] R. J. Korneliussen and E. Ona, "An operational system for processing and cisualizing multi-frekuensi acoustic data," *ICES Journal of Marine Science*, 2002.
- [6] —, "Synthetic echograms generated from the relative frekuensi response," *ICES Journal of Marine Science*, 2003.
- [7] (2006, November) Datablad for simrad ms70 og me70- transdusere. [Online]. Available: <http://www.simrad.com>
- [8] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition*. John Wiley and Sons, Inc, 2000.
- [9] M. Vestrheim, "Phys 272 - akustiske transduserar - forelesningsnotater," Høst 2007, kurs ved IFT, Universitetet i Bergen.
- [10] F. Atterås, "Materialkonstantar for piezokeramiske elementer," Master's thesis, Universitetet i Bergen, Mai 1998.
- [11] D. A. Berlincourt, D. R. Curran, H. Jaffe, W. P. Mason, J. E. May Jr., H. J. McSkimin, T. Meeker, A. H. Meitzler, and R. N. Thurston, *Physical Acoustics*, W. P. Mason, Ed. Academic Press Inc., 1964, vol. 1 A.
- [12] *Tailoring the Properties of Composite Piezoelectric Materials for Medical Ultrasonic Transducers*. IEEE Ultrasonic Symposium, 1985.
- [13] H. Hobæk, "Phys 271 - akustikk - div forelesningsnotater," Vår 2007, kurs ved IFT, Universitetet i Bergen.
- [14] M. Vestrheim, "Phys 373 - akustiske målesystemer - forelesningsnotater," Vår 2008, kurs ved IFT, Universitetet i Bergen.
- [15] (2009, Mai) Ferroperm piezoceramics a/s. [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/7060380/Ferroperm-Catalogue>
- [16] G. Hayward and J. A. Hossack, "Undimensional modeling of 1-3 composite transducers," *Acoustical Society of America*, vol. 88, no. 2, pp. 599–608, August 1990.
- [17] *Influence of Elastic Characteristics of the Polymer/Resin in Lateral Resonances of Piezocomposites(1-3)*. IEEE Ultrasonic Symposium, 1996.

- [18] A. Gachagan and G. Hayward, "Improving the bandwidth of 1-3 connectivity composite receivers using coupling," *Acoustical Society of America*, vol. 103, no. 6, pp. 3344–3352, June 1998.
- [19] D. Certon, O. Casula, F. Patat, and D. Royer, "Theoretical and experimental investigations of lateral modes in 1-3 piezocomposites," *IEEE Transactions on sonics and ultrasonics*, vol. 44, no. 3, pp. 643–650, May 1997.
- [20] H. Hobæk, "On the acoustical near field of a circular piston source. results from numerical investigations." University of Bergen, Tech. Rep. 32, 1970.
- [21] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 4th ed. Person Education Limited, 2005.

# Vedlegg A

## m-filer

I dette kapittelet er m-filene benyttet i dette arbeidet lagt ved.

### A.1 m-filer beregnet for teoretiske utregninger.

#### A.1.1 endimkladdMain.m

```
%styrefil for endimkladd.m Sender frekvenser f_1 og mottar frekvenser f_2, regner så ut lengden,
%l, for endimensjonelle staver.
f_2=[]
f_1 = [110 130 140 175 190 215 240 275 310 350]*1000;
for i = 1:10
    f_2(i) = endimkladd(f_1(i))
end

rho = 7700;
s_33 = 9.8*10^-12;           %komplians
l= 1./(sqrt(rho*s_33)*f_2*2)*1000
```

#### A.1.2 endimkladd.m

```
%mottar f_1 og regner ut tilhørende f_2 ved hjelp av den endimensjonale modellen.
%0.68 = koblingskoeffisient i 33 retning. for-løkken for å løse problemer knyttet til tan-funksjon
function f2 = endimkladd(f_1)
f_2 = (100:2:500)*1000;
k_33E2 = 0.68^2
U = tan(pi*(f_2-f_1)./(2*f_2))*pi.*f_1./(2*f_2);

Z= U>k_33E2;
aktInd=[]
telle=1
for j = 2:length(f_2)
if Z(j)==1 & Z(j-1)==0
    aktInd(telle)=j
    telle = telle+1
end
end

plot(U)
n=max(aktInd)
f2=f_2(n)
```



### A.1.3 direkt\_femp.m

```
function res = direkt_femp(directionality,directionality_theta)
%tar inn vektorer fra FEMP med direktiviteten
figure
midt=(length(directionality_theta)+1)/2;
interpolvektor_gammel=1:length(directionality_theta);
interpolvektor_ny = linspace(min(interpolvektor_gammel),max(interpolvektor_gammel),1001);
vinkler_ny_rad = linspace(min(directionality_theta),max(directionality_theta),length(interpolvektor_ny));
vinkler_ny_grad=vinkler_ny_rad/2/pi*360;
midt_ny=(length(interpolvektor_ny)+1)/2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%sette sammen ny vektor fordi FEMP- vektoren er veldig rar

ny_direkt_matrise=[];
for i=1:length(directionality)
    ny_direkt = directionality(:,i);
    ny_direkt = [ny_direkt(midt+1:length(ny_direkt)); ny_direkt(1:midt)];
    ny_direkt_matrise = [ny_direkt_matrise ny_direkt];
    %dir_spline = spline(interpolvektor_gammel,directionality(:,i),interpolvektor_ny);
end

%kan nå plote direktiviteten for en frekvens
plot(ny_direkt_matrise(:,150));
title('utdrag')
xlabel('vinkel')
ylabel('felt')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Interpolerer vektoren fra FEMP, og finner åpningsvinkelen med metoden
%'finn første verdi under 3dB av maksimalverdien''
for i=1:length(directionality)
    dir_spline = spline(interpolvektor_gammel,directionality(:,i),interpolvektor_ny);

    treDBindexer = find(dir_spline < dir_spline(1)/sqrt(2));

    vinkel_index = treDBindexer(1)+midt_ny;

    treDB_vinkel(i) = vinkler_ny_grad(vinkel_index);
end

frek=150:350;
figure
plot(frek,treDB_vinkel)
xlabel('frekvens [kHz]', 'Interpreter', 'Latex', 'FontSize', 14)
ylabel('$\theta_{3dB}$ [grader]', 'Interpreter', 'Latex', 'FontSize', 14)
```

### A.1.4 finn\_3dB\_main.m

```
f = [250:5:350]*1000;
%plotte åpn_vinkel/3dB vinkel for en ring/skive
o=1;
a_ytre = 14.875/1000;
```

```

a_indre = 0.00001/100;
a_indre = 1/1000000;
for i = f
    res = finn_3dB(i,a_ytre,a_indre) %finner åpn_vinkel/3dB vinkel
    tredB_vinkler(o)=res;
o = o+1;
end
o
tredB_vinkler;
fre=length(f)
vink=length(tredB_vinkler)
plot(f,tredB_vinkler,'Linewidth',2) %plotte åpn_vinkel vinkel for ring/skive
xlabel('frekvens [Hz]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
ylabel('vinkel,  $\theta_{3dB}$  [grader]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
grid

hold on
a_ytre = 19.875/1000;
a_indre = 0.00001/1000;
% a_indre = 1/1000000;
o=1;
for i = f
    res = finn_3dB(i,a_ytre,a_indre); %finner åpn_vinkel/3dB vinkel
    tredB_vinkler(o)=res;
o = o+1;
end

plot(f,tredB_vinkler,'y','Linewidth',2) %plotte åpn_vinkel/3dB vinkel for en ring/skive
xlabel('frekvens [Hz]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
ylabel('vinkel,  $\theta_{3dB}$  [grader]','Interpreter','Latex','FontSize',14)

grid on

hold on
a_ytre = 25.375/1000;
a_indre = 19.875/1000;
a_indre = 1/1000000;
o=1;
for i = f
    res = finn_3dB(i,a_ytre,a_indre); %finner åpn_vinkel/3dB vinkel
    tredB_vinkler(o)=res;
o = o+1;
end

plot(f,tredB_vinkler,'r','Linewidth',2)
xlabel('frekvens [Hz]','Interpreter','Latex','FontSize',14) %plotte åpn_vinkel/3dB vinkel for en
ylabel('åpningsvinkel [grader]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
grid

% Sette forklaringsboks på figuren
%legend('$r$ = 14.9 mm','$r$ = 19.9 mm','$r$ = 25.4 mm','Interpreter','Latex')
grid
h=legend('$r$ = 14.9 mm','$r$ = 19.9 mm','$r$ = 25.4 mm');
% h=legend('$r =14.9$ mm ','$r_i=14.9$ mm, $r_y=19.9$ mm','$r_i=19.9$ mm, $r_y=25.4$ mm');
set(h,'Interpreter','LaTeX')

```

```

\subsection{finn\_3dB.m}
function res = finn_3dB(f,a_ytre,a_indre)
%input=frekvens fra finn_3dB_main.m . Regner ut 3dB- vinkel eller åpningsvinkel

c = 1500;
vinkel = 0:0.01:40;
k = 2*pi/c*f;
v_ytre = k*a_ytre*sind(vinkel);
v_indre = k*a_indre*sind(vinkel);
%P(r,theta) = 1/sqrt(2) *P(r,0) gir:
G = 2*(a_ytre^2*besselj(1,v_ytre)./v_ytre - a_indre^2*besselj(1,v_indre)./v_indre);
G(1)=2*(a_ytre^2*0.5 - a_indre^2*0.5);
F = 1/sqrt(2)*(a_ytre^2-a_indre^2);

svar_index = find(G<F);
kritisk_index = svar_index(1);
res = vinkel(kritisk_index)*2;

```

## A.2 m- filer fra kapittel 4

### A.2.1 nirunde.m

```

%Regner ut åpningsvinkelen for hovedloben i fjernfeltet i vann for en gitt plassering av monopoler.
% Setter opp en matrise A med plasseringen, tar fouriertransformen, fftshift og skalerer.
%Fjernfeltet ligger så i matrisen Cs. Informasjon hentes ut av Cs.
%close all
%function res = kladd(a);
c = 1500;
f = 110*1000; % i Hz
lambda = c/f;
k = 2*pi/lambda;
samples = 4001;
benevning = 10^-3; %mmco
vektor = (-(samples-1)/2 : 1:(samples-1)/2); %hjelpevektor
A = zeros(samples);

%A beskriver kilden
%plasseringsradius betyr radius der en del monopoler skal plasseres;

A( (samples-1)/2+1, (samples-1)/2+1 ) = 0; % Styrken max 64 til midtpunktet i kilden

plasseringsradius_1 = 10;
antall_element_1 = 4*1; %1antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_2 = 14;
antall_element_2 = 4*2; %3% antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_3 = 16;
antall_element_3 = 4*2; %4% antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_4 = 22;
antall_element_4 = 4*4; %4% antall kvadranter*element pr kvadrant

```

```

plasseringsradius_5 = 30;
antall_element_5 = 4*8; %8 %antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_6 =33;
antall_element_6 = 4*6; %5 %antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_7 = 40;
antall_element_7 = 4*8; %9antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_8 = 48;
antall_element_8 = 4*10; %5antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_9 = 52;
antall_element_9 = 4*8; %9antall kvadranter*element pr kvadrant

plasseringsradius_10 = 44;
antall_element_10 = 4*8; %ekstra antall kvadranter*element pr kvadrant

%Sørger for jevn fordeling av monopolene
%ved å plassere dem litt 'random' innenfor plasseringsradiusen
el_pr_kvadr2 = 1;
forskyvning2 = 1/4;
fase2 = pi/2/ el_pr_kvadr2 * forskyvning2;

el_pr_kvadr3 = 1;
forskyvning3 = -1/4;
fase3 = pi/2/ el_pr_kvadr3 * forskyvning3;

el_pr_kvadr4 = 3;c
forskyvning4 = 1/5;
fase4 = pi/2/ el_pr_kvadr4 * forskyvning4;

el_pr_kvadr7 = 4;
forskyvning7 = 1/4;
fase7 = pi/2/ el_pr_kvadr7 * forskyvning7;

el_pr_kvadr9 = 4;
forskyvning9 = 1/3;
fase9 = pi/2/ el_pr_kvadr9 * forskyvning9;

%vinkel mellom monopolene
angle1 = linspace(0,2*pi,antall_element_1+1); %Det siste ekstra elementet ligger oppå det første
angle2 = linspace(0+fase2,2*pi+fase2,antall_element_2+1);
angle3 = linspace(0+fase3,2*pi+fase3,antall_element_3+1);
angle4 = linspace(0+fase4,2*pi+fase4,antall_element_4+1);
angle5 = linspace(0+fase2,2*pi+fase2,antall_element_5+1);
angle6 = linspace(0,2*pi,antall_element_6+1);
angle7 = linspace(0+fase3,2*pi+fase3,antall_element_7+1);
angle8 = linspace(0,2*pi,antall_element_8+1);
angle9 = linspace(0+fase3,2*pi+fase3,antall_element_9+1);
angle10 = linspace(0,2*pi,antall_element_9+1);

%styrken til monopolene i hver plasseringsradius
for i = 1 : length(angle1)-1 %Tar ikke med det siste elementet
    x1 = round(cos(angle1(i)) * plasseringsradius_1);
    y1 = round(sin(angle1(i)) * plasseringsradius_1);

```

```

    A( (samples-1)/2+1 + x1, (samples-1)/2+1 + y1 ) = 64;
end

for i = 1:length(angle2)-1
    x2 = round(cos(angle2(i)) * plasseringsradius_2);
    y2 = round(sin(angle2(i)) * plasseringsradius_2);
    A( (samples-1)/2+1 + x2, (samples-1)/2+1 + y2 ) = 64;
end

for i = 1:length(angle3)-1
    x3 = round(cos(angle3(i)) * plasseringsradius_3);
    y3 = round(sin(angle3(i)) * plasseringsradius_3);
    A( (samples-1)/2+1 + x3, (samples-1)/2+1 + y3 ) = 64;
end

for i = 1:length(angle4)-1
    x4 = round(cos(angle4(i)) * plasseringsradius_4);
    y4 = round(sin(angle4(i)) * plasseringsradius_4);
    A( (samples-1)/2+1 + x4, (samples-1)/2+1 + y4 ) = 14;
end

for i = 1:length(angle5)-1
    x5 = round(cos(angle5(i)) * plasseringsradius_5);
    y5 = round(sin(angle5(i)) * plasseringsradius_5);
    A( (samples-1)/2+1 + x5, (samples-1)/2+1 + y5 ) = 2;
end

for i = 1:length(angle6)-1
    x6 = round(cos(angle6(i)) * plasseringsradius_6);
    y6 = round(sin(angle6(i)) * plasseringsradius_6);
    A( (samples-1)/2+1 + x6, (samples-1)/2+1 + y6 ) = 64;
end

for i = 1:length(angle7)-1
    x7 = round(cos(angle7(i)) * plasseringsradius_7);
    y7 = round(sin(angle7(i)) * plasseringsradius_7);
    A( (samples-1)/2+1 + x7, (samples-1)/2+1 + y7 ) = 100;
end

for i = 1:length(angle8)-1
    x8 = round(cos(angle8(i)) * plasseringsradius_8);
    y8 = round(sin(angle8(i)) * plasseringsradius_8);
    A( (samples-1)/2+1 + x8, (samples-1)/2+1 + y8 ) = 100;
end

for i = 1:length(angle9)-1
    x9 = round(cos(angle9(i)) * plasseringsradius_9);
    y9 = round(sin(angle9(i)) * plasseringsradius_9);
    A( (samples-1)/2+1 + x9, (samples-1)/2+1 + y9 ) = 32;
end

for i = 1:length(angle10)-1
    x10 = round(cos(angle10(i)) * plasseringsradius_10);
    y10 = round(sin(angle10(i)) * plasseringsradius_10);
    A( (samples-1)/2+1 + x10, (samples-1)/2+1 + y10 ) = 32;
end

```

```

%plotte kilden
imagevektor = ((length(vektor)-1)/2-60+1):((length(vektor)-1)/2+60+1);
plottevektor = -60:60;
figure
load Farge
image(plottevektor,plottevektor,A(imagevektor,imagevektor))
aa =(gcf);
%colorbar
set(aa,'Colormap',Mathias);
xlabel('posisjon $x$-retning [mm]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
ylabel('posisjon $y$-retning [mm]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
grid
axis square

%fouriertransform av kilden
B = abs(fft2(A,samples,samples));
Bs = 64* B / max(max(B));
Cs = fftshift(Bs);

Akse = (samples-1)/2/(samples-1)/benevning;      %fra fft får vi max-verdi på aksene
ux = linspace(-Akse,Akse,samples);
uy = linspace(-Akse,Akse,samples);

%plotting av feltet
figure
image(ux,uy,Cs)
xlabel('1/$m$','Interpreter','Latex','FontSize',14)
ylabel('1/$m$','Interpreter','Latex','FontSize',14)
axis square

%tar ut 3db vinkel fra u-rommet
for j = (samples-1)/2+1 : samples
    if Cs((samples-1)/2+1,j) < 64/sqrt(2)
        index_treDBu=j;
        break
    end
end

U_verdi_3dB = ux(index_treDBu)
tredbvinkel_gradx = asind(U_verdi_3dB*lambda)
apnVinkel = tredbvinkel_gradx *2

synsvinkel = 90/tredbvinkel_gradx*U_verdi_3dB
%synsvinkel = 1/lambda

nedre_indexer = find(ux < -synsvinkel);
ovre_indexer = find(ux > synsvinkel);
start_index = nedre_indexer(length(nedre_indexer));
slutt_index = ovre_indexer(1);

%diaktivitetsplott
figure

```

```

synsfelt = Cs((samples-1)/2,start_index:slutt_index);
synsfelt_skal = synsfelt./max(synsfelt);
vinkel=linspace(-90,90,length(ux(start_index:slutt_index)));
plot(vinkel,synsfelt_skal);
xlabel('vinkel [grader]','Interpreter','Latex','FontSize',14)
ylabel('skalert trykkamplitude','Interpreter','Latex','FontSize',14)
xlim([-90,90])
grid
axis square

```

## A.3 Generelle m- filer

### A.3.1 impanal1.m

```

%impanal1
%skriptfil for henting av data fra impedansanalysatoren
%modifisert for bruk med USB-gpib enheten fra National
% forutsetter tilgang til gpib.dll
% det er bare i frekvensområdet man trenger å gjøre endringer
%resultatet ender i vektorene g, b, og fr

ud=gpib('dev',0,17,0,10,0,0);

%ud=gpib('find','HP4192');% finn håndtak til impedansanalysatoren
gpib('wrt',ud,'A2C3F1'); % sett analysatoren i rett mode for admittans
pause(1)
j=1;
tic;
for frekv=200:3:700 % i kHz
s=sprintf('%3.3f',frekv);
gpib('wrt',ud,['FR' s 'ENEX']);
disp(frekv)
pause(0.4)
t=(gpib('rd',ud));
d=sscanf(t,'%4c%f,%4c%f,%2c%f');
g(j)=d(5);b(j)=d(10);fr(j)=d(13);
j=j+1;
end
disp(toc)
save('maaling','g','b','fr')

```

## A.4 m-filer for direktivitetmålinger

m- filene i denne seksjonen er laget av Espen Storheim Her listes nødvendige styre- og databehandlingsprogram for direktivitetmålinger opp

### A.4.1 Direktivitet.m

```
% Program for direktivitetmålinger.
```

```

Start = 170e3;
Step = 10e3;
Stop = 280e3;

```

```

n = 7; % Antal periodar inn i signalet
tss = 980e-6; % Tilnærma start på signalet

Frek = Start:Step:Stop;

for i = 1:length(Frek)

system(['./gpibout-t 33220A " ' ':APPL:SIN ' num2str(Frek(i)) 'Hz,.17VPP' "'']);
system(['./gpibout-t 33220A " ' ':BURS:MODE TRIG' "' ' '']);
system(['./gpibout-t 33220A " ' ':BURS:NCYC 30' "' ' '']);
system(['./gpibout-t 33220A " ' ':BURS:STAT ON' "' ' '']);
system(['./gpibout-t 33220A " ' ':OUTP:TRIG:SLOP POS' "' ' '']);
system(['./gpibout-t 33220A " ' ':OUTP:TRIG ON' "' ' '']);
%system(['./gpibout-t 33220A " ' ':OUTP ON' "' ' '']);

system(['./gpibout-t 6012 " ' ':TIM:REF LEFT' "' ' '']);
system(['./gpibout-t 6012 " ' ':TIM:POS ' num2str(tss + n/Frek(i) + 1.4/Frek(i)) ' ' "' ' '']);
system(['./gpibout-t 6012 " ' ':TIM:RANG ' num2str(12/Frek(i)) ' ' "' ' '']);

pause(0.2)

system(['./gpibenter-t2 6012 " ' ':MEAS:VRMS?' "' ' '']);
A(i) = load 'data-lest';

%pause(2)
end

filnamn = input('Step nr:')
save(eval("['MathiasStep' num2str(filnamn) '.mat']"),'A','Frek');

```

## A.4.2 Innlasting.m

% Innlasting.m: Leser inn og samlar resultata frå éin måleserie.

```

AA = input('Oppgi antal filer som skal lesast inn:');
C = [];
for xxx = 1:AA
load(['MathiasStep' num2str(xxx)])
C = [B;A];
end

clear B

C = B;

```

## A.4.3 Full.m

```

function WV = Full(Fil)

load(Fil);

[a,b] = size(B);

% Skriv ut data i LaTeX-format.
disp('\begin{table}[H]')

```



```

disp('\centering')
disp(['\caption[ ]{' Fil '}'])
disp('\begin{tabular}{c c c c}')
disp('\toprule\midrule')
disp('Frekvens [kHz] & Venstre vinkel [^\circ] & Høyre vinkel [^\circ] & Åpningsvinkel [^\circ] \\')
disp('\midrule')
for i = 1:b
VV(i,:) = Minus3dB(B(:,i),Frek(i));
D(:,i) = 20*log10(B(:,i)/max(B(:,i)));
disp([num2str(Frek(i)/1000) ' & ' num2str(VV(i,2)) ' & ' num2str(VV(i,3)) '
& ' num2str(VV(i,4)) ' \\']);
end
disp('\midrule\bottomrule')
disp('\end{tabular}')
disp('\label{tab:}')
disp('\end{table}')

load 'Vinkel'

system('mkdir Figurar');

[Frekvens,Vinkel] = meshgrid(Frek/1000,Vg);

Plott
PlottAvvik

Fil = [Fil 'Mod.mat'];
save('-mat',Fil,'B','Frek','VV','D','Frekvens','Vinkel','Vg')

close all

```

#### A.4.4 Minus3dB.m

```

% Innlasting av data og berekning av -3 dB vinkel.
% Espen Storheim, 19. juni 2009

% Del 1: Innlasting av datafiler.

function tC = Minus3dB(C,fr)

% Del 1: Gjer verdiane om til dB.

tA = 20*log10(C/max(C)); % Verdier i dB.

% Del 2: Oppsett av step-vektor. Dette er ei geometrisk
% beskriving av måleoppstillinga.

%% Direktivitetsmålingar; ekkolodd.
%x1 = 90:1:114;
%x2 = 50.5:0.5:89.5;
%x3 = 26:1:50;

%x = [x3 x2 x1];

```

```

%xs = [70]; % Sentrum.

%% Direktivitetsmålinger; transduserkonstruksjon
xs = 193;
x1 = 158:1:183;
x2 = 183.5:0.5:203;
x3 = 204:1:228;
x = [x1 x2 x3];

%Ls = 142.3; % Hydrofonavstand; ekkolodd
Ls = 67.5; % Hydrofonavstand; transduserkonstruksjon

% Del 4: Oppsett av vinkelvektoren.
V = atan((x-xs)/Ls);
Vg = V*180/pi;

% Del 5: Finn vinklane.

tC = find(tA > -3);

tC1 = 180*V(tC(1))/pi; % Venstre vinkel
tC2 = 180*V(tC(end))/pi; % Høgre vinkel

tC3 = tC2 - tC1; % Åpningsvinkel

clear tC

tC = [fr' tC1 tC2 tC3];

% Lagrar det geometriske oppsettet.
save('-mat','Vinkel.mat','Vg','tC')

```

## A.5 Plott.m

```

% Plott.m: Plottar konturen av direktivitetsmålingane.

fig = figure('units','normalized','position',[0 0 1 1]);
surface(Frekvens,Vinkel,D)
ylim([min(Vg) max(Vg)])
xlabel('Frekvens, $$$, [kHz]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
ylabel('Vinkel, $\theta$, [Grader]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
set(gca,'FontSize',16)
shading interp
hc = colorbar('peer',gca);
set(get(hc,'ylabel'),'String','Magnitude [dB]','FontSize',18);
xlim([min(Frek)/1000 max(Frek)/1000])
set(gca,'XMinorTick','On')
set(gca,'YMinorTick','On')
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
print(['Figurar/' Fil '-Farge-Stor.png'],'-dpng')

pause(2)

```

```

fig = figure('units','pixels','position',[0 0 1020 840]);
surface(Frekvens,Vinkel,D)
ylim([min(Vg) max(Vg)])
xlabel('Frekvens, $f$, [kHz]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
ylabel('Vinkel, $\theta$, [Grader]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
set(gca,'FontSize',16)
shading interp
hc = colorbar('peer',gca);
set(get(hc,'ylabel'),'String','Magnitude [dB]','FontSize',18);
xlim([min(Frek)/1000 max(Frek)/1000])
set(gca,'XMinorTick','On')
set(gca,'YMinorTick','On')
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
print(['Figurar/' Fil '-Farge-Liten.png'],'-dpng')

```

### A.5.1 PlottAvvik.m

```

% PlottAvvik: Plottar vinkelen mellom teoretisk sentrum og
% hovudlobe som funksjon av frekvens.

```

```

[a,b] = max(D);

if max(abs(Vg(b)))>min(abs(Vg(b)))
    c = max(abs(Vg(b)));
else
    c = min(abs(Vg(b)));
end

fig = figure('units','normalized','position',[0 0 1 1]);
plot(Frek/1000,Vg(b),'-k','LineWidth',2)
xlabel('Frekvens, $f$, [kHz]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
ylabel('Avvik i vinkel, [Grader]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
set(gca,'FontSize',16)
grid on
box on
ylim([-c c])
xlim([min(Frek)/1000 max(Frek)/1000])
set(gca,'XMinorTick','On')
set(gca,'YMinorTick','On')
print(['Figurar/' Fil '-Avvik-Stor.eps'],'-deps')

set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
fig = figure('units','pixels','position',[0 0 1020 840]);
plot(Frek/1000,Vg(b),'-k','LineWidth',2)
xlabel('Frekvens, $f$, [kHz]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
ylabel('Avvik i vinkel, [Grader]','FontSize',20,'Interpreter','LaTeX')
set(gca,'FontSize',16)
grid on
box on
ylim([-c c])
xlim([min(Frek)/1000 max(Frek)/1000])
set(gca,'XMinorTick','On')
set(gca,'YMinorTick','On')
print(['Figurar/' Fil '-Avvik-Liten.eps'],'-deps')

```

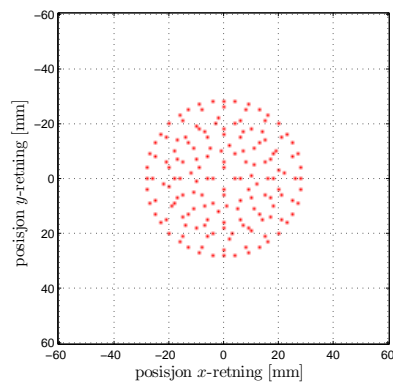
# Vedlegg B

## Figurer

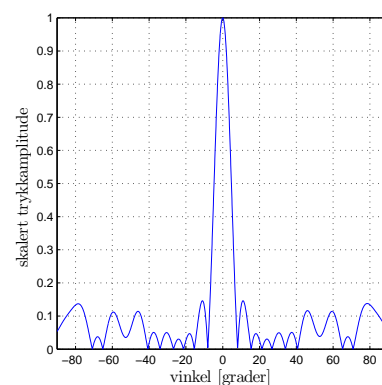
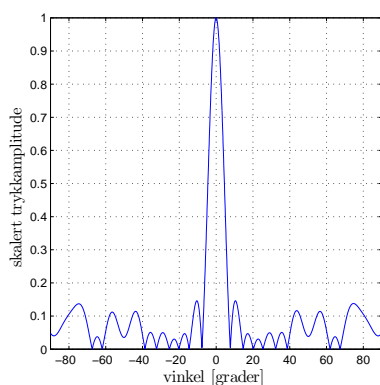
### B.1 Direktivitetssimuleringer og kildesammensetninger

I denne seksjonen er det tatt med noen ekstra figurer angående kapittel 4.

#### B.1.1 Simulerte 200 og 222 kHz element.



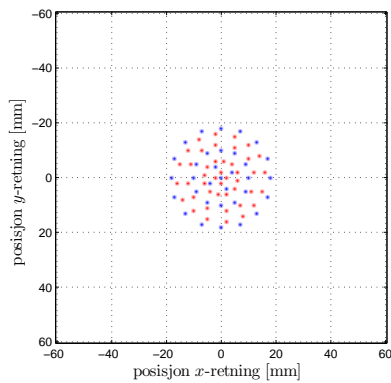
(a) Plasseringen av 222 og 200 kHz- elementer.



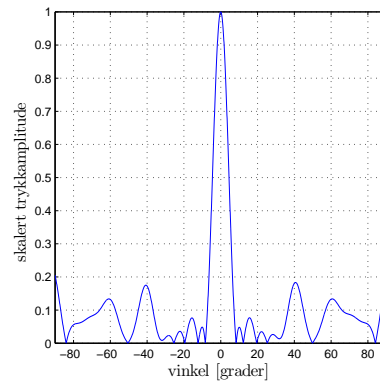
(b) Direktivetsplott i fjernfeltet for 222 og 200 kHz- (c) Direktivetsplott i fjernfeltet for 222 og 200 kHz- elementer eksitert med 222 kHz. elementer eksitert med 211 kHz.

Figur B.1: Viser kildesammensetning og direktivetsplott i fjernfeltet for blandede elementer med resonansfrekvens 315 og 380 kHz.

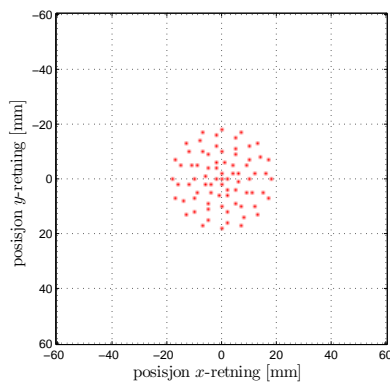
### B.1.2 Simulerte 315 og 350 kHz element.



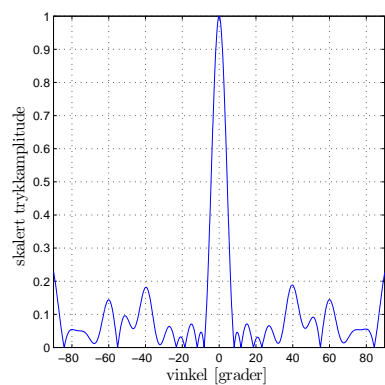
(a) Plasseringen av 380 og 315 kHz- elementer. Blå farge betyr halv styrke rel. rød.



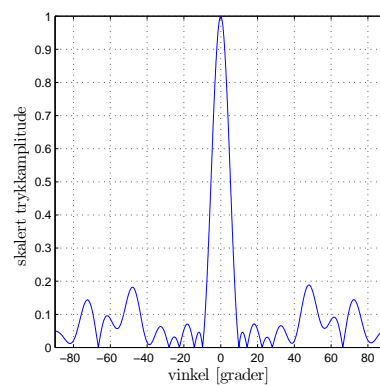
(b) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 380 og 315 kHz- elementer eksitert med 380 kHz. 315 kHz- elementene har halv kildestyrke i forhold til 380 kHz- elementene.



(c) Plasseringen av 380 og 315 kHz- elementer.



(d) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 380 og 315 kHz- elementer eksitert med 380 kHz.

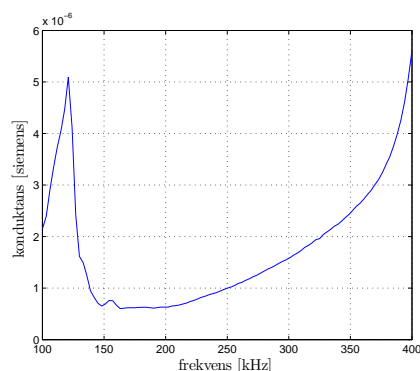
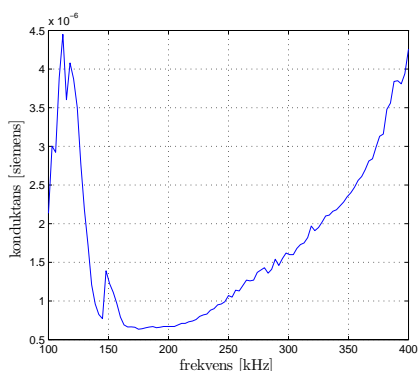


(e) Direktivitetsplott i fjernfeltet for 380 og 315 kHz- elementer eksitert med 315 kHz.

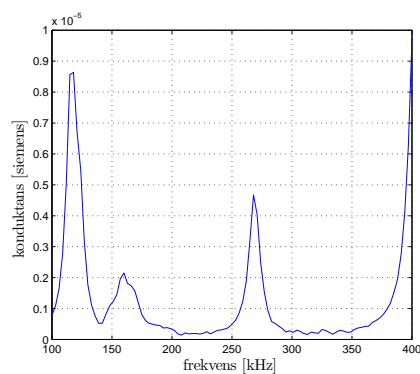
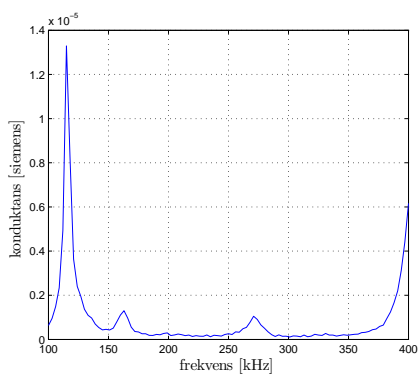
Figur B.2: Viser kildesammensetning og direktivitetsplott i fjernfeltet for blandede elementer med resonansfrekvens 315 og 380 kHz.

## B.2 Ekstra konduktansmålinger

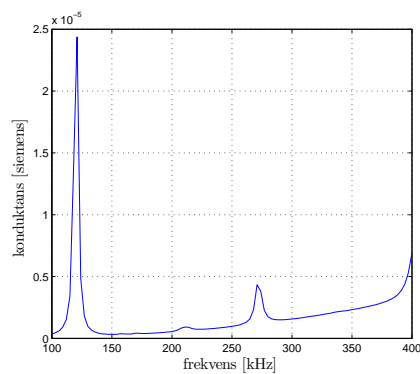
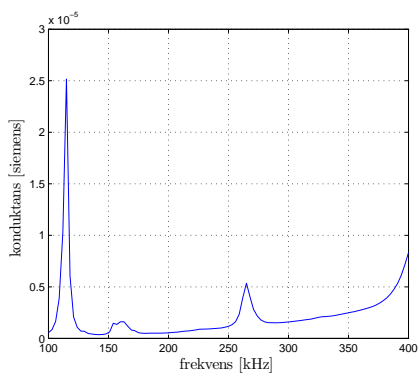
### B.2.1 Konduktansmålinger på diverse frie element før ledningene ble festet.



(a) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet. (b) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet.

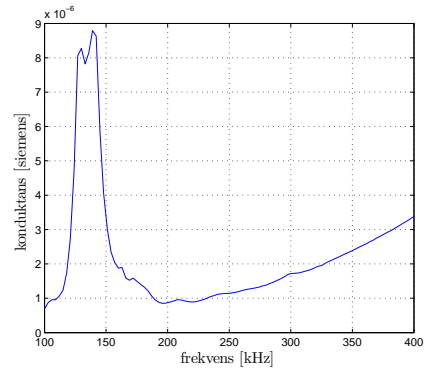
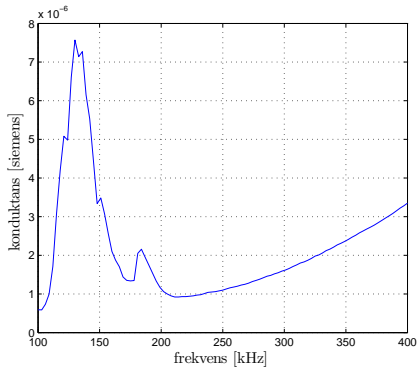


(c) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de mellomste delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet, men ett element står tett inntil. (d) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de mellomste delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet, men to elementer står tett inntil.

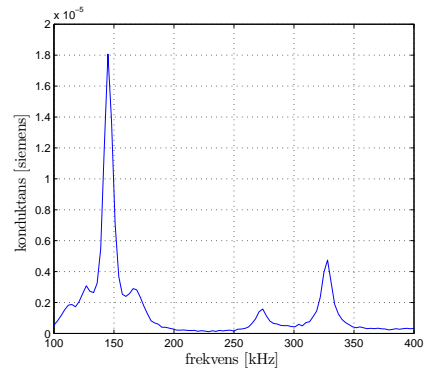
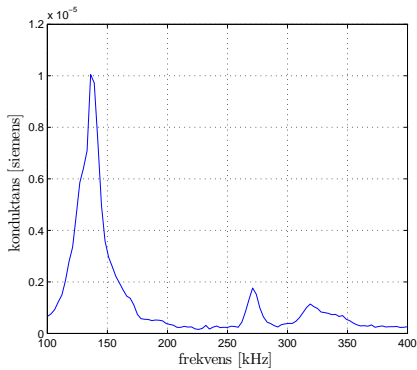


(e) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom. (f) Konduktansplott av ett enkelt element fra 110 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

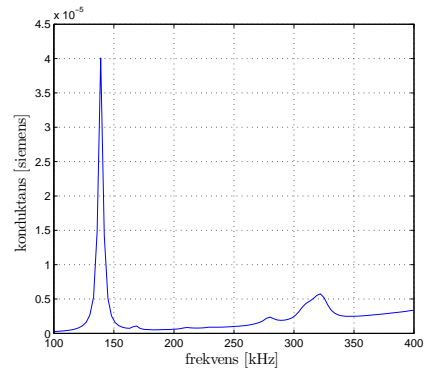
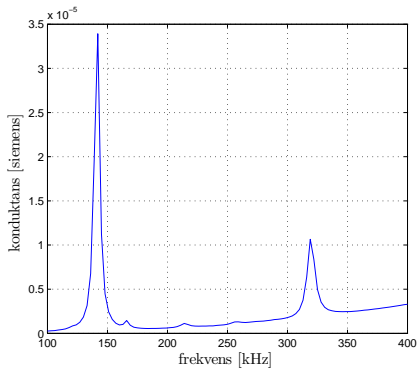
Figur B.3: Konduktansen målt for et enkelt element for 110 kHz- kanalen.



(a) Konduktansplott av ett enkelt element fra 140 kHz-kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet. (b) Konduktansplott av ett enkelt element fra 140 kHz-kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet.

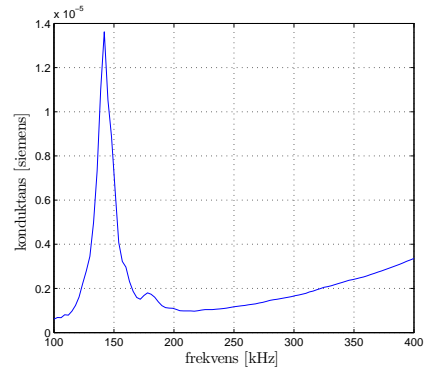
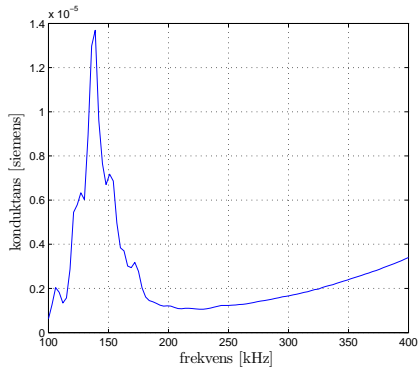


(c) Konduktansplott av ett enkelt element fra 140 kHz-kanalen fra de mellomste delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet, men ett element står tett inntil. (d) Konduktansplott av ett enkelt element fra 140 kHz-kanalen fra de mellomste delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet, men to elementer står tett inntil.

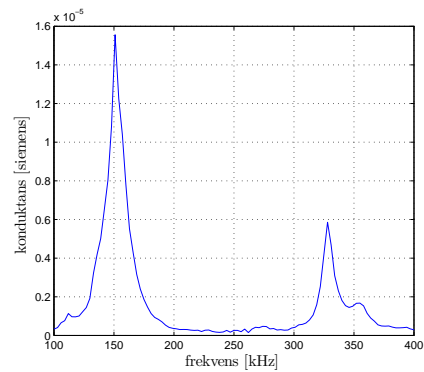
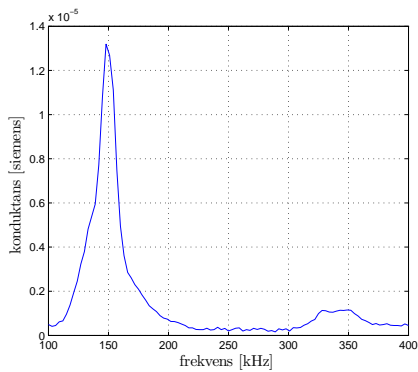


(e) Konduktansplott av ett enkelt element fra 140 kHz-kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom. (f) Konduktansplott av ett enkelt element fra 140 kHz-kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

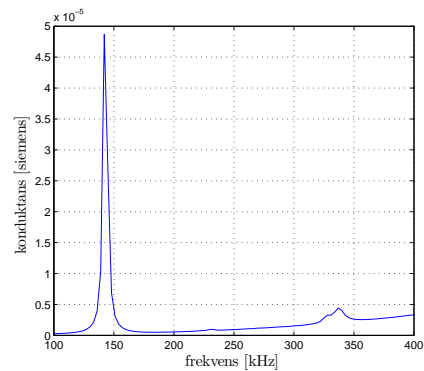
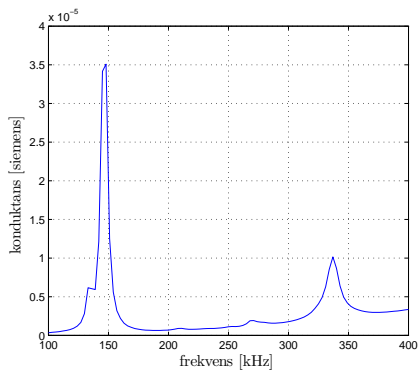
Figur B.4: Konduktansen målt for et enkelt element for 140 kHz-kanalen.



(a) Konduktansplott av ett enkelt element fra 145 kHz- kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet. (b) Konduktansplott av ett enkelt element fra 145 kHz- kanalen fra de ytre delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet.



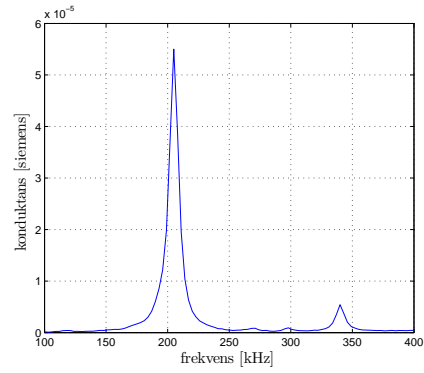
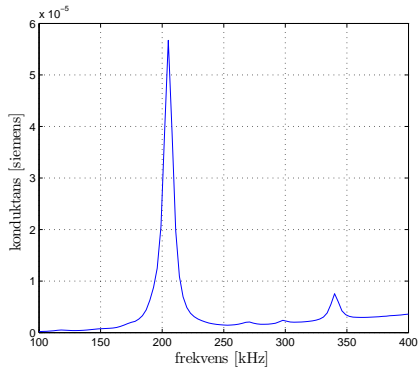
(c) Konduktansplott av ett enkelt element fra 145 kHz- kanalen fra de mellomste delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet, men ett element står tett inntil. (d) Konduktansplott av ett enkelt element fra 145 kHz- kanalen fra de mellomste delene i transduseren. Epoxy er fyllmaterialet, men to elementer står tett inntil.



(e) Konduktansplott av ett enkelt element fra 145 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom. (f) Konduktansplott av ett enkelt element fra 145 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

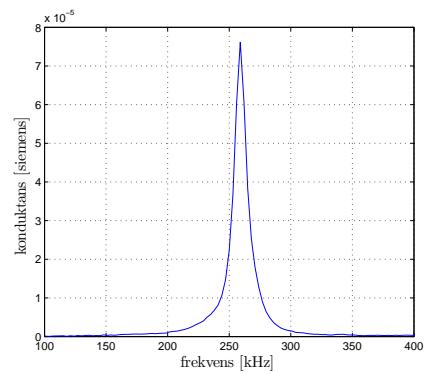
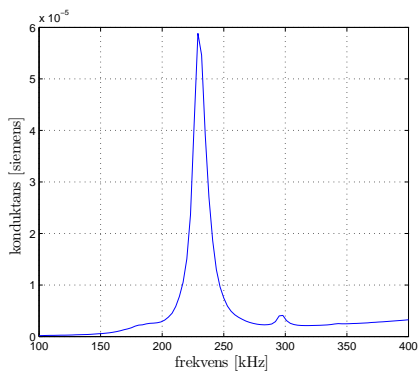
Figur B.5: Konduktansen målt for et enkelt element for 145 kHz- kanalen.





(a) Konduktansplott av ett enkelt element fra 190 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

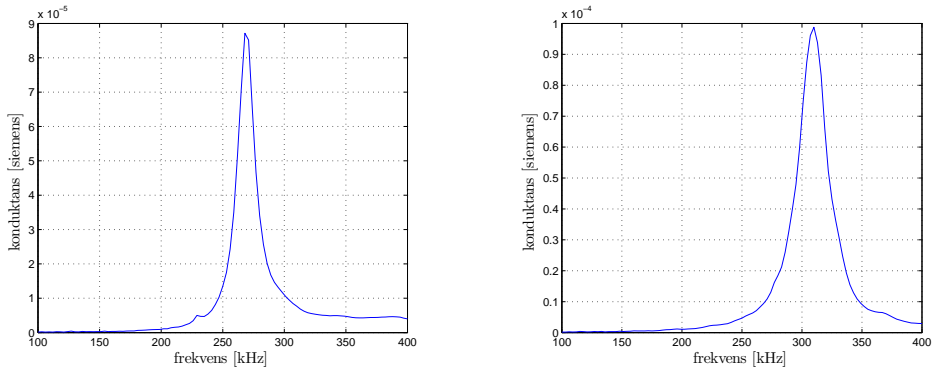
(b) Konduktansplott av ett enkelt element fra 210 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.



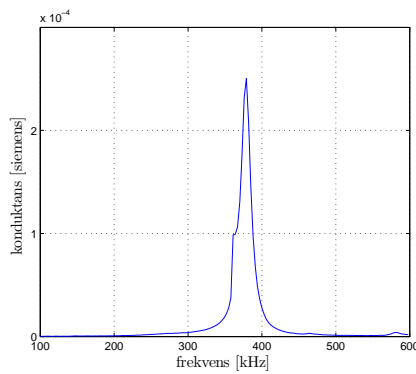
(c) Konduktansplott av ett enkelt element fra 230 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

(d) Konduktansplott av ett enkelt element fra 265 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

Figur B.6: Konduktansen målt for et enkelt element for kanalene 190-265 kHz.



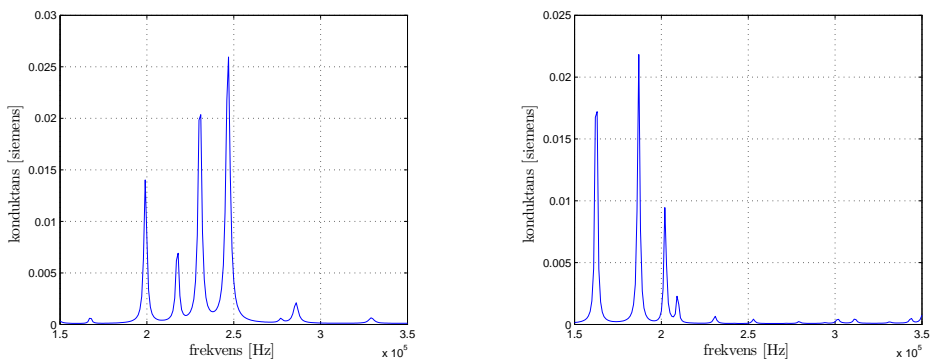
(a) Konduktansplott av ett enkelt element fra 290 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom. (b) Konduktansplott av ett enkelt element fra 340 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.



(c) Konduktansplott av ett enkelt element fra 395 kHz- kanalen fra de innerste delene i transduseren. Elementene står tett i tett med et tynt lag silikon imellom.

Figur B.7: Konduktansen målt for et enkelt element for kanalene 290-395 kHz.

## B.2.2 Konduktansen simulert for forsøks-elementet med heldekkende koblingslag.



(a) Simulering av forsøks-elementet med fronlag og (b) Simulering av forsøks-elementet med fronlag og baklag av aluminium 4.94cm.

Figur B.8: Konduktansen simulert for forsøks-elementet med heldekkende koblingslag.

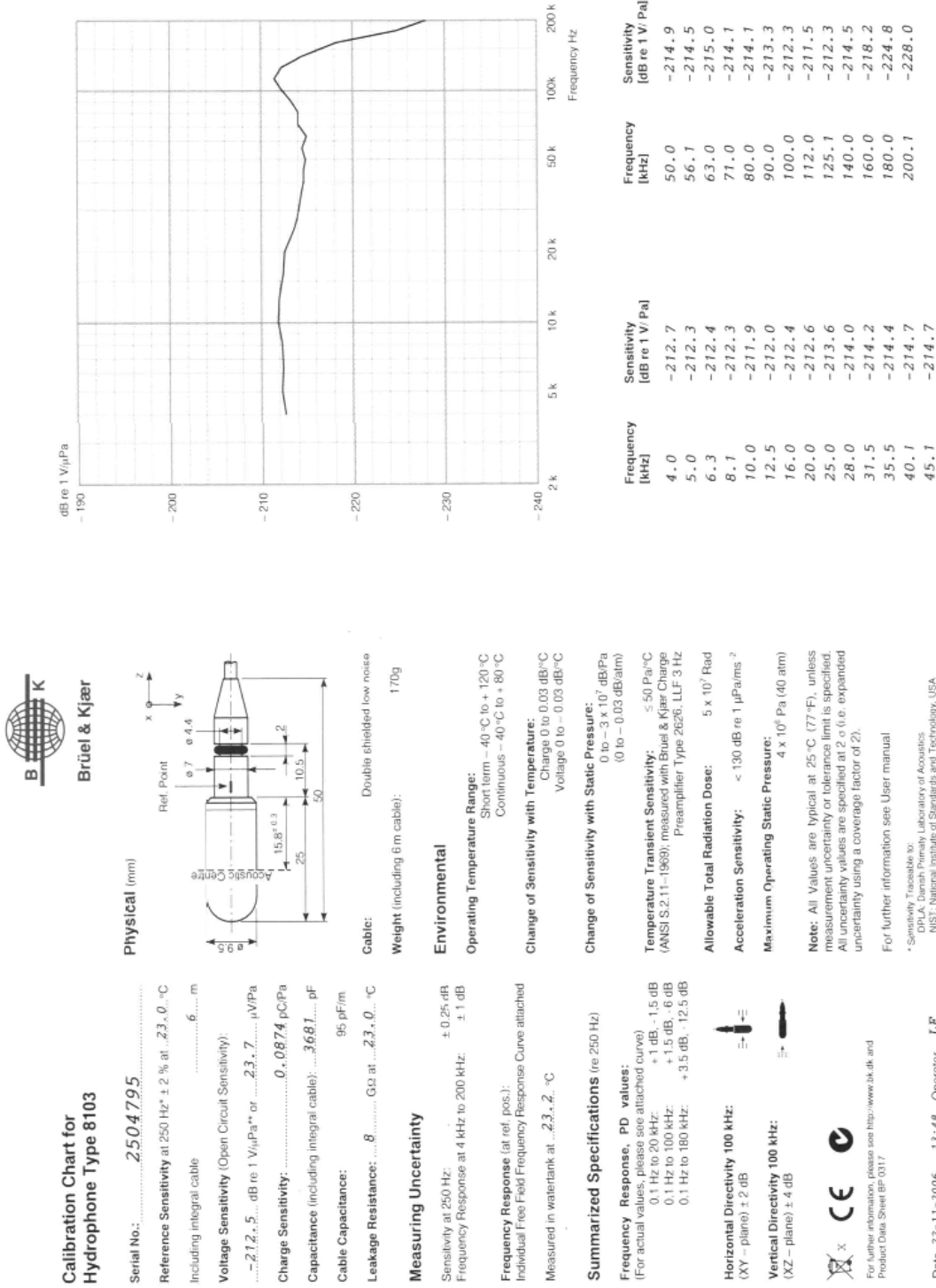
# B.3 Hydrofon Brüel & Kjær 8103

## B.3.1 Datablad

### Calibration Chart for Hydrophone Type 8103

Serial No.: 2504795

RIC 0004-16



**Brüel & Kjær**

**Cable:** Double shielded low noise  
**Weight (including 6 m cable):** 170g

**Environmental**

**Operating Temperature Range:**  
 Short term: -40 °C to +120 °C  
 Continuous: -40 °C to +80 °C

**Change of Sensitivity with Temperature:**  
 Charge 0 to 0.03 dB/°C  
 Voltage 0 to -0.03 dB/°C

**Change of Sensitivity with Static Pressure:**  
 0 to -3 x 10<sup>7</sup> dB/Pa  
 (0 to -0.03 dB/atm)

**Temperature Transient Sensitivity:** ≤ 50 Pa/°C  
 (ANSI S2.11-1988); measured with Brüel & Kjær Charge Pre-amplifier Type 2626, LLF 3 Hz

**Allowable Total Radiation Dose:** 5 x 10<sup>7</sup> Rad

**Acceleration Sensitivity:** < 130 dB re 1 μPa/m/s<sup>2</sup>

**Maximum Operating Static Pressure:**  
 4 x 10<sup>6</sup> Pa (40 atm)

**Note:** All Values are typical at 25 °C (77°F), unless measurement uncertainty or tolerance limit is specified. All uncertainty values are specified at 2 σ (i.e. expanded uncertainty using a coverage factor of 2).

For further information see User manual

\* Sensitivity Traceable to:  
 NIST, National Institute of Standards and Technology, USA  
 \*\* 1 Pascal = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> = 10 uBar

### Calibration Chart for Hydrophone Type 8103

**Serial No.:** 2504795

**Reference Sensitivity at 250 Hz ± 2 % at 23.0 °C**  
 Including integral cable: 6 m

**Voltage Sensitivity (Open Circuit Sensitivity):**  
 212.5 dB re 1 V/μPa\*\* or 23.7 μV/Pa

**Charge Sensitivity:** 0.0874 pC/Pa

**Capacitance (including integral cable):** 3681 pF

**Cable Capacitance:** 95 pF/m

**Leakage Resistance:** 8 GΩ at 23.0 °C

**Measuring Uncertainty**

Sensitivity at 250 Hz: ± 0.25 dB  
 Frequency Response at 4 kHz to 200 kHz: ± 1 dB

**Frequency Response (at ref. pos.):**  
 Individual Free Field Frequency Response Curve attached  
 Measured in watertank at 23.0 ± 2.0 °C

**Summarized Specifications (re 250 Hz)**

**Frequency Response, PD values:**  
 (For actual values, please see attached curve)  
 0.1 Hz to 20 kHz: +1 dB, -1.5 dB  
 0.1 Hz to 100 kHz: +1.5 dB, -6 dB  
 0.1 Hz to 180 kHz: +3.5 dB, -12.5 dB

**Horizontal Directivity 100 kHz:** ± 2 dB  
 (XY - plane)

**Vertical Directivity 100 kHz:** ± 4 dB  
 (XZ - plane)

For further information, please see <http://www.bk.dk> and Product Data Sheet BP 0317

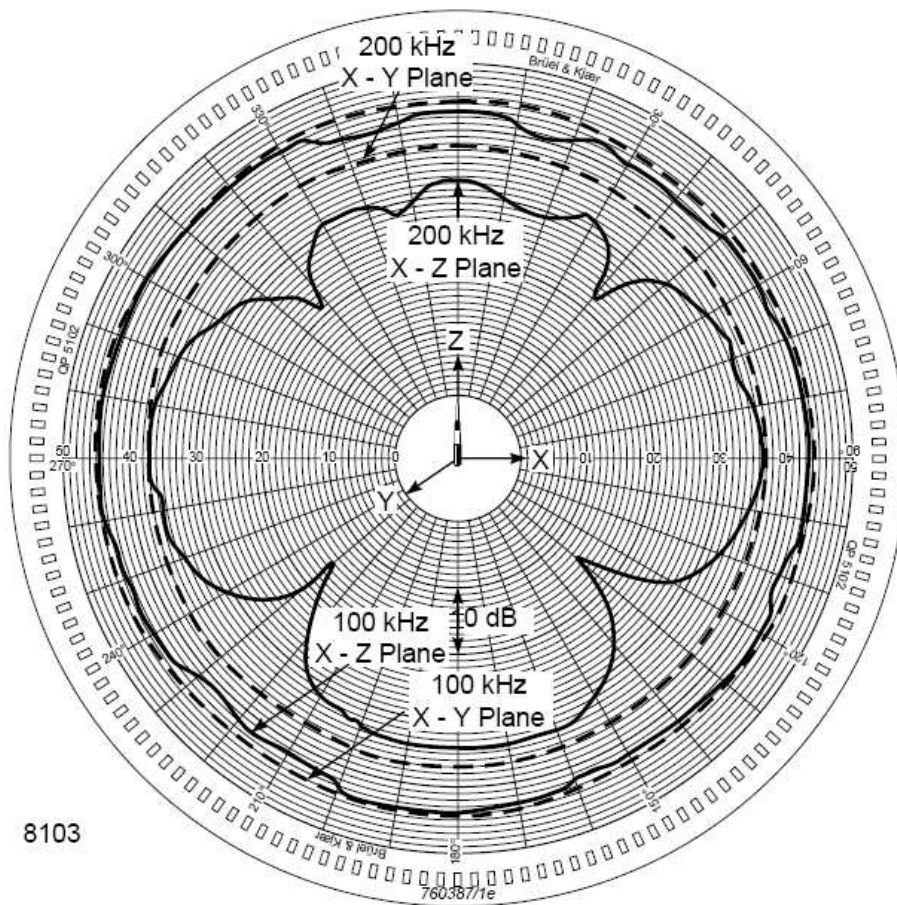
**CE**

**Date:** 22.11.2006 13:48 Operator: LF

9511455

Figur B.9: Viser databladet for Brüel & Kjær 8103.

### B.3.2 Direktivitetsplott for Brüel & Kjær 8103.



Figur B.10: Direktivitetsplott for Brüel & Kjær 8103.



## Vedlegg C

# Resultater fra direktivitetmålinger

### C.1 Målinger m.t.p mekanisk filter i kapittel 6

Tabell C.1: 395 kHz- kanal og de to ytre kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
340	-2.0124	5.4194	7.4318
345	-2.0124	5.8182	7.8306
350	-1.8113	5.8182	7.6295
355	-1.8113	5.8182	7.6295
360	-1.8113	5.6189	7.4302
365	-1.8113	5.4194	7.2307
370	-1.6101	5.2198	6.83
375	-1.6101	1.409	3.0191
380	-1.6101	1.409	3.0191
385	-1.409	1.2077	2.6167
390	-1.409	1.2077	2.6167
395	-1.409	1.2077	2.6167
400	-1.409	1.2077	2.6167
405	-1.409	1.2077	2.6167
410	-1.409	1.2077	2.6167
415	-1.409	1.409	2.8179
420	-1.6101	1.409	3.0191

Tabell C.2: Alle kanaler eksitert samtidig.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
50	-8.3949	6.4153	14.8102
60	-6.0174	7.011	13.0284
70	-4.8203	4.8203	9.6406
80	-4.4203	4.4203	8.8405
90	-4.6203	4.2201	8.8404
100	-4.4203	3.4184	7.8386
110	-3.4184	3.6189	7.0373
120	-3.017	3.2177	6.2348
130	-3.017	2.8162	5.8332
140	-2.4144	3.017	5.4314
150	-2.2134	2.6153	4.8288
160	-2.0124	2.2134	4.2258
170	-8.0004	8.3949	16.3953
180	-5.6189	2.6153	8.2342
190	-3.2177	2.0124	5.2301
200	-3.2177	1.8113	5.029
210	-3.2177	1.8113	5.029
220	-2.8162	1.8113	4.6275
230	-2.6153	6.2164	8.8318
240	-2.8162	1.6101	4.4264
250	-2.4144	5.4194	7.8338
260	-2.6153	1.8113	4.4266
270	-2.6153	1.2077	3.8231
280	-2.6153	1.0065	3.6218
290	-2.8162	1.0065	3.8227
300	-3.017	1.409	4.426
310	-3.017	2.6153	5.6324
320	-3.017	2.8162	5.8332
330	-3.2177	3.6189	6.8367
340	-3.8194	5.8182	9.6376
350	-3.6189	5.8182	9.4372
360	-1.6101	1.6101	3.2203
370	-1.409	1.409	2.8179
380	-1.2077	1.2077	2.4155
390	-1.2077	1.2077	2.4155
400	-1.2077	1.2077	2.4155
410	-1.2077	1.2077	2.4155
420	-1.409	1.2077	2.6167
430	-1.8113	1.409	3.2202
440	-3.6189	1.6101	5.2291
450	-3.4184	1.409	4.8273

Tabell C.3: Alle kanaler minus de to ytre kanalene, hvit og brun eksitert.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
50	-6.2164	4.6203	10.8368
60	-6.2164	5.8182	12.0346
70	-5.0201	5.0201	10.0402
80	-5.0201	5.4194	10.4396
90	-4.8203	4.8203	9.6406
100	-4.4203	3.6189	8.0392
110	-3.6189	3.8194	7.4384
120	-3.2177	3.4184	6.6361
130	-3.2177	3.2177	6.4355
140	-2.6153	3.2177	5.8331
150	-2.6153	2.8162	5.4316
160	-2.2134	2.4144	4.6278
170	-8.7885	11.1317	19.9202
180	-5.2198	9.1813	14.4012
190	-3.017	1.6101	4.6272
200	-2.6153	7.8029	10.4182
210	-2.6153	1.2077	3.8231
220	-2.8162	1.8113	4.6275
230	-2.4144	1.8113	4.2257
240	-2.6153	6.0174	8.6327
250	-2.4144	5.8182	8.2326
260	-2.2134	2.6153	4.8288
270	-2.8162	1.409	4.2252
280	-2.6153	1.2077	3.8231
290	-3.017	0.80523	3.8222
300	-2.6153	0.60394	3.2193
310	-2.2134	0	2.2134
320	-1.409	-1.409	0
330	-5.8182	6.614	12.4322
340	-5.6189	6.2164	11.8353
350	-5.2198	5.4194	10.6393
360	-3.6189	1.409	5.0279
370	-1.2077	1.2077	2.4155
380	-1.2077	1.2077	2.4155
390	-1.2077	1.2077	2.4155
400	-1.2077	1.0065	2.2142
410	-1.2077	1.0065	2.2142
420	-1.409	1.0065	2.4155
430	-1.409	1.2077	2.6167
440	-3.8194	1.409	5.2284
450	-3.8194	1.6101	5.4296



Tabell C.4: De to ytre kanalene, hvit og brun eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
50	-7.6052	4.8203	12.4255
60	-2.4144	4.4203	6.8347
70	-3.2177	4.4203	7.638
80	-4.0198	4.4203	8.4401
90	-4.4203	4.0198	8.4401
100	-4.4203	3.2177	7.638
110	-3.017	3.6189	6.636
120	-2.8162	3.2177	6.034
130	-2.8162	2.6153	5.4316
140	-2.2134	3.017	5.2304
150	-2.0124	2.8162	4.8286
160	-1.8113	2.4144	4.2257
170	-8.0004	16.8137	24.8141
180	-6.4153	1.2077	7.6231
190	-2.6153	1.2077	3.8231
200	-2.4144	1.2077	3.6222
210	-2.4144	1.2077	3.6222
220	-2.4144	1.2077	3.6222
230	-2.4144	1.2077	3.6222
240	-2.0124	1.2077	3.2201
250	-2.0124	1.2077	3.2201
260	-2.6153	1.2077	3.8231
270	-2.6153	0.60394	3.2193
280	-2.6153	0.60394	3.2193
290	-2.6153	1.2077	3.8231
300	-3.017	1.2077	4.2248
310	-3.017	4.0198	7.0368
320	-3.017	4.0198	7.0368
330	-2.6153	4.0198	6.6351
340	-2.6153	4.0198	6.6351
350	-2.0124	1.2077	3.2201
360	1.2077	1.2077	0
370	-0.40263	1.2077	1.6104
380	-0.80523	1.2077	2.013
390	-1.0065	1.2077	2.2142
400	-1.0065	1.2077	2.2142
410	-0.60394	1.2077	1.8117
420	1.2077	1.2077	0
430	1.2077	1.2077	0
440	-2.8162	5.0201	7.8363
450	-7.2092	7.2092	14.4185

## C.2 Målinger av direktivitet fra kapittel 7

Tabell C.5: 190 kHz kanal eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
140	-6.8126	6.4153	13.2279
150	14.1972	4.4203	-9.7769
160	-7.2092	4.8203	12.0295
170	-7.2092	4.4203	11.6295
180	-6.8126	3.2177	10.0303
190	-6.0174	4.0198	10.0372
200	-5.2198	3.6189	8.8388
210	-4.8203	4.0198	8.8401
220	-5.2198	3.6189	8.8388
230	-5.2198	3.2177	8.4376
240	-4.4203	3.6189	8.0392

Tabell C.6: 110 og 265 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
210	-0.40263	6.0174	6.42
215	3.6189	3.6189	0
220	10.3544	7.2092	-3.1452
225	-6.8126	-8.7885	-1.9759
230	10.3544	7.2092	-3.1452
235	-6.8126	6.4153	13.2279
240	-6.4153	6.0174	12.4327
245	-2.0124	5.2198	7.2322
250	-2.0124	0.80523	2.8176
255	-1.6101	0.80523	2.4154
260	-6.0174	0.80523	6.8226

Tabell C.7: 110 kHz- kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
150	-1.2077	2.8162	4.024
160	-0.80523	2.0124	2.8176
170	-0.80523	1.6101	2.4154
180	-0.80523	0.80523	1.6105
190	-0.80523	0.80523	1.6105
200	0	0.80523	0.80523
210	0	0.80523	0.80523
220	9.5733	2.8162	-6.7571
230	-0.80523	2.8162	3.6214
240	-0.80523	2.4144	3.2196
250	-0.80523	2.0124	2.8176

Tabell C.8: Den brune, 210 og 190 kHz- kanalene eksitert samtidig.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
170	-6.0174	4.0198	10.0372
180	-6.0174	3.6189	9.6363
190	-5.6189	3.6189	9.2378
200	-4.4203	3.2177	7.638
210	-4.0198	3.6189	7.6387
220	-4.4203	3.6189	8.0392
230	-5.2198	4.4203	9.6401
240	-2.0124	3.6189	5.6313
250	-2.4144	2.8162	5.2306
260	-2.4144	2.8162	5.2306
270	-2.4144	2.4144	4.8288
280	-2.4144	2.4144	4.8288

Tabell C.9: Den brune, 210, 230 og 265 kHz- kanalen eksitert samtidig.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
255	-3.2177	4.0198	7.2375
265	-2.8162	3.6189	6.4352
275	-3.2177	3.2177	6.4355
285	-3.2177	3.6189	6.8367
295	-3.2177	3.6189	6.8367
305	-2.0124	3.6189	5.6313

Tabell C.10: 140 kHz- kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
150	-2.8162	2.8162	5.6324
160	-2.8162	2.4144	5.2306
170	-1.6101	3.2177	4.8279
180	-2.0124	4.4203	6.4326
190	-0.40263	3.2177	3.6204
200	-0.40263	-0.40263	0
210	-2.0124	2.4144	4.4268
220	-2.0124	2.8162	4.8286
230	13.4379	-8.0004	-21.4383
240	8.0004	-8.0004	-16.0008
250	8.0004	2.0124	-5.988
260	-2.0124	1.6101	3.6225
270	-2.0124	1.6101	3.6225
280	-2.0124	1.6101	3.6225
290	-1.6101	1.6101	3.2203
300	-1.6101	1.6101	3.2203
310	-2.0124	1.6101	3.6225
320	-2.0124	1.6101	3.6225
330	-2.0124	0.80523	2.8176
340	-2.0124	0	2.0124
350	0	0	0
360	0	0	0
370	-1.6101	0.80523	2.4154
380	-1.6101	0.40263	2.0128
390	-1.2077	0.40263	1.6104
400	-1.2077	0.80523	2.013

Tabell C.11: 210 kHz- kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
180	-7.4073	7.011	14.4183
185	-6.8126	6.4153	13.2279
190	-6.0174	6.8126	12.83
195	-5.0201	6.8126	11.8327
200	-5.2198	7.011	12.2309
205	-6.614	6.8126	13.4266
210	-7.2092	6.8126	14.0219
215	-6.614	6.8126	13.4266
220	-5.8182	6.2164	12.0346
225	-5.6189	6.8126	12.4315
230	-5.6189	7.2092	12.8281
235	-5.4194	7.4073	12.8267
240	-5.4194	8.0004	13.4198

Tabell C.12: 210 kHz- kanalen med sine ytre element (brun kanal) eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
180	-4.8203	3.8194	8.6397
185	-5.2198	3.4184	8.6382
190	-5.0201	3.6189	8.6391
195	-4.0198	3.6189	7.6387
200	-3.6189	3.4184	7.0373
205	-3.6189	3.4184	7.0373
210	-3.6189	3.6189	7.2379
215	-3.6189	3.6189	7.2379
220	-3.8194	3.8194	7.6388
225	-4.6203	4.6203	9.2407
230	-4.2201	4.6203	8.8404
235	-1.0065	4.2201	5.2266
240	-1.0065	3.8194	4.8259

Tabell C.13: 145 og 190 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
140	-3.4184	3.2177	6.6361
145	-3.2177	3.4184	6.6361
150	-3.017	3.4184	6.4354
155	-2.6153	3.2177	5.8331
160	-3.2177	2.6153	5.8331
165	-6.8126	2.0124	8.825
170	-6.8126	2.2134	9.026
175	-6.0174	2.4144	8.4318
180	-5.4194	2.8162	8.2356
185	-4.8203	3.6189	8.4392
190	-4.2201	3.6189	7.839
195	-3.8194	3.6189	7.4384
200	-3.4184	3.4184	6.8368
205	-3.2177	3.4184	6.6361
210	-2.8162	3.2177	6.034

Tabell C.14: 145, 190 og 210 kHz kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
140	-3.6189	3.2177	6.8367
145	-3.4184	3.4184	6.8368
150	-3.017	3.4184	6.4354
155	-3.017	3.017	6.034
160	-7.6052	10.7436	18.3488
165	-8.3949	9.1813	17.5762
170	-7.4073	2.8162	10.2235
175	-6.4153	3.2177	9.633
180	-5.8182	3.6189	9.4372
185	-5.0201	4.0198	9.0399
190	-4.4203	4.0198	8.4401
195	-3.8194	4.0198	7.8392
200	-3.4184	3.8194	7.2378
205	-3.4184	3.6189	7.0373
210	-3.4184	3.4184	6.8368

Tabell C.15: 145 kHz- kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
140	-3.2177	3.017	6.2348
145	-3.2177	3.2177	6.4355
150	-3.017	3.4184	6.4354
155	-2.8162	3.4184	6.2346
160	-2.6153	3.017	5.6324
165	-2.8162	3.017	5.8332
170	-2.8162	3.017	5.8332
175	-3.017	3.017	6.034
180	-3.017	2.8162	5.8332
185	-3.017	3.017	6.034
190	-2.6153	3.2177	5.8331
195	-2.6153	3.017	5.6324
200	-2.2134	3.017	5.2304
205	-2.0124	2.8162	4.8286
210	-1.8113	2.6153	4.4266

Tabell C.16: 265, 290 og 340 kHz- kanalen eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
240	-4.6203	6.4153	11.0356
245	-4.4203	7.011	11.4313
250	-4.2201	7.2092	11.4293
255	-4.6203	7.011	11.6313
260	-5.0201	6.2164	11.2365
265	-5.4194	6.2164	11.6359
270	-5.6189	5.8182	11.4371
275	-5.4194	5.4194	10.8389
280	-5.0201	4.8203	9.8404
285	-5.0201	4.4203	9.4404
290	-5.2198	4.6203	9.8402
295	-5.2198	5.0201	10.24
300	-5.0201	5.6189	10.639

Tabell C.17: 265 og 290 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
240	-5.2198	6.614	11.8339
245	-4.8203	7.011	11.8313
250	-4.6203	7.2092	11.8296
255	-4.8203	6.8126	11.6329
260	-5.4194	6.2164	11.6359
265	-5.8182	5.6189	11.4371
270	-6.2164	5.0201	11.2365
275	-6.0174	4.6203	10.6377
280	-5.6189	4.0198	9.6387
285	-5.4194	3.6189	9.0384
290	-5.6189	3.4184	9.0373
295	-6.0174	3.8194	9.8368
300	-6.2164	3.8194	10.0358

Tabell C.18: 265 kHz- kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
240	-6.2164	6.0174	12.2338
245	-5.4194	6.614	12.0335
250	-5.2198	7.2092	12.4291
255	-4.4203	7.2092	11.6295
260	-4.4203	6.614	11.0343
265	-4.8203	6.0174	10.8377
270	-5.2198	5.6189	10.8387
275	-5.4194	4.8203	10.2397
280	-5.8182	4.2201	10.0383
285	-5.8182	4.0198	9.838
290	-5.4194	4.0198	9.4392
295	-5.4194	3.8194	9.2388
300	-5.2198	3.6189	8.8388

Tabell C.19: 210 og 230 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
180	-7.8029	5.6189	13.4218
185	-7.4073	5.4194	12.8267
190	-7.2092	5.6189	12.8281
195	-7.2092	5.6189	12.8281
200	-7.011	5.2198	12.2309
205	-7.2092	5.2198	12.4291
210	-7.6052	5.4194	13.0246
215	-7.4073	5.0201	12.4274
220	-7.2092	4.4203	11.6295
225	-7.6052	5.0201	12.6253
230	-8.0004	5.4194	13.4198
235	-7.6052	4.6203	12.2255
240	-7.2092	4.0198	11.229



Tabell C.20: 110- kHz kanalen fra 70 - 150 kHz.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
70	-4.4203	6.0174	10.4376
75	-4.2201	5.6189	9.839
80	-4.2201	5.0201	9.2402
85	-4.0198	5.0201	9.0399
90	-4.0198	4.6203	8.6401
95	-4.4203	4.0198	8.4401
100	-4.0198	3.6189	7.6387
105	-3.6189	3.4184	7.0373
110	-3.2177	3.6189	6.8367
115	-3.2177	3.2177	6.4355
120	-3.017	3.2177	6.2348
125	-3.017	3.017	6.034
130	-3.017	3.2177	6.2348
135	-2.8162	3.2177	6.034
140	-2.6153	3.017	5.6324
145	-2.4144	3.2177	5.6322
150	-2.4144	3.017	5.4314

Tabell C.21: 110 og 140 kHz - kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
70	-4.6203	4.4203	9.0406
75	-5.4194	4.8203	10.2397
80	-4.6203	4.4203	9.0406
85	-4.0198	5.2198	9.2396
90	-4.6203	4.4203	9.0406
95	-4.4203	4.2201	8.6403
100	-4.0198	3.6189	7.6387
105	-3.6189	3.6189	7.2379
110	-3.4184	3.6189	7.0373
115	-3.2177	3.4184	6.6361
120	-3.2177	3.2177	6.4355
125	-3.4184	3.2177	6.6361
130	-3.2177	3.2177	6.4355
135	-3.017	3.2177	6.2348
140	-2.8162	3.2177	6.034
145	-2.6153	3.2177	5.8331
150	-2.6153	2.8162	5.4316
155	-2.6153	2.6153	5.2307
160	-2.4144	2.6153	5.0298
165	-2.2134	2.6153	4.8288
170	-2.2134	2.8162	5.0296
175	-2.6153	3.017	5.6324
180	-2.2134	4.2201	6.4335

Tabell C.22: 110 og 265 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
210	-0.40263	6.0174	6.42
215	3.6189	3.6189	0
220	10.3544	7.2092	-3.1452
225	-6.8126	-8.7885	-1.9759
230	10.3544	7.2092	-3.1452
235	-6.8126	6.4153	13.2279
240	-6.4153	6.0174	12.4327
245	-2.0124	5.2198	7.2322
250	-2.0124	0.80523	2.8176
255	-1.6101	0.80523	2.4154
260	-6.0174	0.80523	6.8226

Tabell C.23: 110 kHz- kanalen eksitert i frekvensområdet 150-250 kHz.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
150	-1.2077	2.8162	4.024
160	-0.80523	2.0124	2.8176
170	-0.80523	1.6101	2.4154
180	-0.80523	0.80523	1.6105
190	-0.80523	0.80523	1.6105
200	0	0.80523	0.80523
210	0	0.80523	0.80523
220	9.5733	2.8162	-6.7571
230	-0.80523	2.8162	3.6214
240	-0.80523	2.4144	3.2196
250	-0.80523	2.0124	2.8176

Tabell C.24: 190 kHz kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
140	-6.8126	6.4153	13.2279
150	14.1972	4.4203	-9.7769
160	-7.2092	4.8203	12.0295
170	-7.2092	4.4203	11.6295
180	-6.8126	3.2177	10.0303
190	-5.2198	3.6189	8.8388
200	-5.2198	3.6189	8.8388
210	-4.8203	4.0198	8.8401
220	-5.2198	3.6189	8.8388
230	-5.2198	3.2177	8.4376
240	-4.4203	3.6189	8.0392

Tabell C.25: Brun, 210 og 190 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
170	-6.0174	4.0198	10.0372
180	-6.0174	3.6189	9.6363
190	-5.6189	3.6189	9.2378
200	-4.4203	3.2177	7.638
210	-4.0198	3.6189	7.6387
220	-4.4203	3.6189	8.0392
230	-5.2198	4.4203	9.6401
240	-2.0124	3.6189	5.6313
250	-2.4144	2.8162	5.2306
260	-2.4144	2.8162	5.2306
270	-2.4144	2.4144	4.8288
280	-2.4144	2.4144	4.8288

Tabell C.26: Brun, 210, 230 og 265 kHz- kanalene eksitert sammen.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
255	-3.2177	4.0198	7.2375
265	-2.8162	3.6189	6.4352
275	-3.2177	3.2177	6.4355
285	-3.2177	3.6189	6.8367
295	-3.2177	3.6189	6.8367
305	-2.0124	3.6189	5.6313

Tabell C.27: 140 kHz- kanalen eksitert alene.

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
150	-2.8162	2.8162	5.6324
160	-2.8162	2.4144	5.2306
170	-1.6101	3.2177	4.8279
180	-2.0124	4.4203	6.4326
190	-0.40263	3.2177	3.6204
200	-0.40263	-0.40263	0
210	-2.0124	2.4144	4.4268
220	-2.0124	2.8162	4.8286
230	13.4379	-8.0004	-21.4383
240	8.0004	-8.0004	-16.0008
250	8.0004	2.0124	-5.988
260	-2.0124	1.6101	3.6225
270	-2.0124	1.6101	3.6225
280	-2.0124	1.6101	3.6225
290	-1.6101	1.6101	3.2203
300	-1.6101	1.6101	3.2203
310	-2.0124	1.6101	3.6225
320	-2.0124	1.6101	3.6225
330	-2.0124	0.80523	2.8176
340	-2.0124	0	2.0124
350	0	0	0
360	0	0	0
370	-1.6101	0.80523	2.4154
380	-1.6101	0.40263	2.0128
390	-1.2077	0.40263	1.6104
400	-1.2077	0.80523	2.013

Tabell C.28: Direktivitetsplott for den enkle transduseren

Frekvens [kHz]	Venstre vinkel [grader]	Høgre vinkel [grader]	Åpningsvinkel [grader]
150	-8.427	1.6972	10.1241
160	-8.0112	3.3913	11.4026
170	-6.3402	1.6972	8.0373
180	-1.6972	-1.6972	0
190	-9.2557	1.273	10.5288
200	-6.7591	2.5448	9.3039
210	-5.5004	3.8141	9.3145
220	-8.0112	2.9682	10.9795
230	-10.0806	2.1211	12.2017
240	-12.5288	3.3913	15.9201
250	-10.9013	4.2364	15.1377
260	-5.5004	3.8141	9.3145
270	-10.0806	5.0796	15.1602
280	-10.9013	4.2364	15.1377
290	-9.2557	3.8141	13.0698
300	-8.427	3.8141	12.241
310	-7.5946	3.8141	11.4087
320	-6.3402	3.3913	9.7315
330	-5.9206	3.3913	9.312
340	-5.9206	2.9682	8.8889
350	-7.5946	2.1211	9.7157

## Vedlegg D

# Innfiler og modifikasjoner gjort av m-filen read.inn fra FEMP

### D.1 read\_inn\_mfront.m (utrag)

%Systemfil med modifikasjoner fra FEMP. Leser først inn en del verdier fra en inn- fil

```
if ~isempty(read.piezodiskfrontringfluid)
    radEl=read.piezodiskfrontringfluid(1,1,:);
    tykkEl=read.piezodiskfrontringfluid(1,2,:);
    kobl_i=read.piezodiskfrontringfluid(1,3,:);
    elr=read.piezodiskfrontringfluid(1,4,:);
    elt=read.piezodiskfrontringfluid(1,5,:);
    eltkobl=read.piezodiskfrontringfluid(1,6,:);
    matnum_el=read.piezodiskfrontringfluid(1,7,:);
    matnum_kobl=read.piezodiskfrontringfluid(1,8,:);
    rfluid=read.piezodiskfrontringfluid(1,9,:);
    rinffluid=rfluid*2;
    elfluid=read.piezodiskfrontringfluid(1,10,:);
    elfluidout=read.piezodiskfrontringfluid(1,11,:);
    matnumfluid=read.piezodiskfrontringfluid(1,12,:);
    radInnerst=read.piezodiskfrontringfluid(1,13,:);
    radRinger=read.piezodiskfrontringfluid(1,14,:);
    kobl_y=read.piezodiskfrontringfluid(1,15,:);
    kobl_tit=read.piezodiskfrontringfluid(1,16,:);
    %theta=read.piezodiskfrontringfluid(1,13,:);
    % Theta not needed anymore!

    for s=1:size(radEl,3)
        tny=tykkEl/2;
%definerer noen vinkler

        mtheta1=atan((radInnerst)/(tny+kobl_y));
        mtheta2=atan(radRinger/(tny+kobl_y));
        mtheta3=atan(radEl/(tny+kobl_y));
        mtheta4=atan(radEl/(tny+kobl_i));
        mtheta5=atan(radEl/(tny));

%Definerer punkt
        read.points(:,s)=[
```

```

1 0 tny+kobl_y;
2 0 tny+kobl_i;
3 0 tny;
4 0 -tny;
5 0 -tny-kobl_i;
6 0 -tny-kobl_y;
11 radInnerst tny+kobl_y;
12 radInnerst tny+kobl_i;
13 radInnerst tny;
14 radInnerst -tny;
15 radInnerst -tny-kobl_i;
16 radInnerst -tny-kobl_y;
21 radRinger tny+kobl_y;
22 radRinger tny+kobl_i;
23 radRinger tny;
24 radRinger -tny;
25 radRinger -tny-kobl_i;
26 radRinger -tny-kobl_y;
31 radEl tny+kobl_y;
32 radEl tny+kobl_i;
33 radEl tny;
34 radEl -tny;
35 radEl -tny-kobl_i;
36 radEl -tny-kobl_y;
41 0 rfluid(s);
42 rfluid(s)*sin(mtheta1) rfluid(s)*cos(mtheta1);
43 rfluid(s)*sin(mtheta2) rfluid(s)*cos(mtheta2);
44 rfluid(s)*sin(mtheta3) rfluid(s)*cos(mtheta3);
45 rfluid(s)*sin(mtheta4) rfluid(s)*cos(mtheta4);
46 rfluid(s)*sin(mtheta5) rfluid(s)*cos(mtheta5);
47 rfluid(s)*sin(mtheta5) -rfluid(s)*cos(mtheta5);
48 rfluid(s)*sin(mtheta4) -rfluid(s)*cos(mtheta4);
49 rfluid(s)*sin(mtheta3) -rfluid(s)*cos(mtheta3);
50 rfluid(s)*sin(mtheta2) -rfluid(s)*cos(mtheta2);
51 rfluid(s)*sin(mtheta1) -rfluid(s)*cos(mtheta1);
52 0 -rfluid(s);
61 0 rinffluid(s);
62 rinffluid(s)*sin(mtheta1) rinffluid(s)*cos(mtheta1);
63 rinffluid(s)*sin(mtheta2) rinffluid(s)*cos(mtheta2);
64 rinffluid(s)*sin(mtheta3) rinffluid(s)*cos(mtheta3);
65 rinffluid(s)*sin(mtheta4) rinffluid(s)*cos(mtheta4);
66 rinffluid(s)*sin(mtheta5) rinffluid(s)*cos(mtheta5);
67 rinffluid(s)*sin(mtheta5) -rinffluid(s)*cos(mtheta5);
68 rinffluid(s)*sin(mtheta4) -rinffluid(s)*cos(mtheta4);
69 rinffluid(s)*sin(mtheta3) -rinffluid(s)*cos(mtheta3);
70 rinffluid(s)*sin(mtheta2) -rinffluid(s)*cos(mtheta2);
71 rinffluid(s)*sin(mtheta1) -rinffluid(s)*cos(mtheta1);
72 0 -rinffluid(s);
80 0 0;
100 radEl+5e-3 -tny;
101 radEl+5e-3 -tny-2.47e-3];

```

```

%Definerer områder
% This should be changed if direct method!!
read.areas(:, :, s)=[
    1,4,14,13,3,elr(s),elt(s),0,0;

```

```

    1,14,24,23,13,elr(s),elt(s),0,0;
1,24,34,33,23, elr(s), elfluid(s),0,0;
    2,3,13,12,2,elr(s),elfluid(s),0,0; %
    2,2,12,11,1,elr(s),elfluid(s),0,0; %
    2,12,22,21,11,elr(s),elfluid(s),0,0;
    2,14,4,5,15,elr(s),elfluid(s),0,0;
2,15,5,6,16,elr(s),elfluid(s),0,0;
    2,25,15,16,26,elr(s),elfluid(s),0,0;
    4,13,23,22,12,elr(s),elfluid(s),0,0; %4
    4,23,33,32,22,elr,elfluid,0,0; % 4
    4,22,32,31,21,elr,elfluid,0,0;%4
    4,24,14,15,25,elr,elfluid,0,0;%4
4,34,24,25,35,elr,elfluid,0,0;%4
    4,35,25,26,36,elr,elfluid,0,0;%4
    2,1,11,42,41,1,1,0,80;
    2,11,21,43,42,1,1,0,80;
    2,21,31,44,43,1,1,0,80;
    2,31,32,45,44,1,1,0,80;
    2,32,33,46,45,1,1,0,80;
    2,33,34,47,46,1,1,0,80;
    2,34,35,48,47,1,1,0,80;
    2,35,36,49,48,1,1,0,80;
    2,36,26,50,49,1,1,0,80;
    2,26,16,51,50,1,1,0,80;
    2,16,6,52,51,1,1,0,80;
    3,41,42,62,61,1,1,80,80;
    3,42,43,63,62,1,1,80,80;
    3,43,44,64,63,1,1,80,80;
    3,44,45,65,64,1,1,80,80;
    3,45,46,66,65,1,1,80,80;
    3,46,47,67,66,1,1,80,80;
    3,47,48,68,67,1,1,80,80;
    3,48,49,69,68,1,1,80,80;
    3,49,50,70,69,1,1,80,80;
    3,50,51,71,70,1,1,80,80;
    3,51,52,72,71,1,1,80,80];

%Definerer materialparametre
read.materials(:,s)=[1 glob.globvariables.piezo matnum_el(s);
                    2 glob.globvariables.fluid matnumfluid(s);
                    3 glob.globvariables.infinitefluid matnumfluid(s);
                    4 glob.globvariables.mechanic matnum_kobl(s);
                    5 glob.globvariables.mechanic kobl_tit(s)];
read.dof(:,s)=[-1 1 -tny-1e-9 -tny+1e-9 glob.free.ep];
read.restraints(:,s)=[-1 1 tny-1e-9 tny+1e-9 glob.free.ep 1];
glob.tykkEl=tykkEl;

end
end

```

## D.2 disk\_ front\_ back\_ vacuum\_ direct.inn

```

% (Dette er en eksempelfil som er tilpasset for simulering av prototypen i kapittel 3.)
% Gir størrelser som systemfilen ''read_inn_Mfront.m'' trenger.

```



```

materialfile
9
end

set
radEl,25.375e-3
tykkEl,6.46e-3
kobl1,2.47e-3
kobl2,4.94e-3
elr,5
elT,5
eltprob,2
eltback,5
matnrpiezo,2
matnrfront,3
matnrback,3
radInnerst,14.875e-3
radRinger,19.875e-3
matnr_piezopass,533
lim,28e-3
plastrad,31.5e-3
chassrad,35e-3
plasttykk,25e-3
chasstykk,35e-3
matnr_lim,711
matnr_plast,990
chasstykk2,120e-3
end

meshingtype
elementsperwavelength,0.4e6
end

# Show mesh
viewmesh
1
end

# The order of the finite elements is 2 - i.e. 8 node isoparametric elements are applied
order
2
end

piezodiskfrontback
radEl,tykkEl,kobl1,kobl2,elr,elT,eltprob,eltback,matnrpiezo,matnrfront,matnrback,
radInnerst,radRinger,matnr_piezopass,lim,plastrad,chassrad,plasttykk,chasstykk,
matnr_lim,matnr_plast,chasstykk2
end

directharmonicanalysis
150e3,1000,350e3,complex_loss
end

# Calculate vibration of the transducer structure for each frequency
# in the analysis.

```

```

displacement
0,0,0,-1,1,-1,1
end

# Calculate admittance for the frequencies used in the time-harmonic analysis
admittance
0,0,0
end

# Calculate sensitivity for the frequencies used in the time-harmonic analysis
# using the hybrid FE/Rayleigh integral method.
sensitivityunloaded
0,0,0
end

# Save admittance, displacement and sensitivity to
# matlab-file 'disk_front_back_vacuum_direct_result.mat'.
save
admittance,admittance_f,sensitivity,sensitivity_f,displacement,displacement_coord,
displacement_elements,displacement_f,displacement_elementtype
end

```

### D.3 element.inn

```

#generell inn-fil som kan gir informasjon om piezoelektriske element og dens koblingslag
materialfile
9
end

set
tykkE1,6.46e-3
baklag,-2.47e-3-1e-9
frontlag,6.46e-3+1e-9
radE1,25.375e-3
spenningTI,6.46e-3-1e-9
spenningTY,6.46e-3+1e-9
spenningRI,-1e-9
spenningRY,25.375e-3+1e-9
materialnumber,2
backingnumber,3
water,1001
end

viewmesh
1
end

meshingtype
elementsperwavelength,0.3e6
end

order

```

```

2
end

points
1,0,frontlag
2,0,tykkEl
3,0,0
4,0,baklag
11,radEl,frontlag
12,radEl,tykkEl
13,radEl,0
14,radEl,baklag
end

areas
1,3,13,12,2,3,3,0,0
2,2,12,11,1,3,3,0,0
3,4,14,13,3,3,3,0,0
end

materials
1,piezo,materialnumber
2,mechanic,backingnumber
3,mechanic,backingnumber
end

dof
spenningRI,spenningRY,spenningTI,spenningTY,ep
end

restraints
spenningRI,spenningRY,-1e-9,1e-9,ep,1
end

directharmonicanalysis
100e3,1000,350e3,complex_loss
end

admittance
0,0,0,complex_loss
end

displacement
0,0,0,-100,100,-100,100
end

save
admittance,admittance_f,displacement,displacement_coord,
displacement_elements,displacement_elementtype,displacement_f
end

```

# Vedlegg E

## Materialfil

```
# filnavn: material9.dat
```

```
      1      piezo PZT-5A
# mechanical terms
1.21000E+11 7.54000E+10 7.52000E+10 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.54000E+10 1.21000E+11 7.52000E+10 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.52000E+10 7.52000E+10 1.11000E+11 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.11000E+10 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.11000E+10 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.26000E+10
# coupling terms
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.23000E+01 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.23000E+01 0.00000E+00 0.00000E+00
-5.40000E+00 -5.40000E+00 1.58000E+01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
# dielectric terms
8.11026e-09 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 8.11026e-09 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 7.34882e-09
# density and damping coefficients
7.75000E+03 7.50000E+01 2.00000E-02
# end of material data
      2      piezo Pz27 - Ferroperm
# mechanical terms
1.47000e+11 1.05000e+11 9.37000e+10 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
1.05000e+11 1.47000e+11 9.37000e+10 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
9.37000e+10 9.37000e+10 1.13000e+11 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.30000e+10 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.30000e+10 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.12000e+10
# coupling terms
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 1.16000e+01 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 1.16000e+01 0.00000e+00 0.00000e+00
-3.09000e+00 -3.09000e+00 1.60000e+01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
# dielectric terms
1.00050e-08 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 1.00050e-08 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 8.09256e-09
# density and damping coefficients
7.70000e+03 8.00000e+01 1.70000e-02
# end of material data
      3      piezo Aluminium
```

```

# mechanical terms
1.06585e+11 5.24924e+10 5.24924e+10 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
5.24924e+10 1.06585e+11 5.24924e+10 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
5.24924e+10 5.24924e+10 1.06585e+11 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.70465e+10 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.70465e+10 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.70465e+10
# coupling terms
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
# dielectric terms
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
# density and damping coefficients
2.70000e+03 9.99000e+02 0.00000e+00
# end of material data
1001 fluid water1
1.00000e+03 2.25000e+09 0.00000e+00 0.00000e+00
533 piezopassivt_eget_6085.6_032_4486_25
# mechanical terms
1.47000e+11 1.05000e+11 9.37000e+10 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
1.05000e+11 1.47000e+11 9.37000e+10 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
9.37000e+10 9.37000e+10 1.13000e+11 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.30000e+10 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.30000e+10 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.12000e+10
# coupling terms
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
# dielectric terms
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
# density and damping coefficients
4.48600e+03 1.00000e+01 0.00000e+00
# end of material data

```