

# ”Bestemmelse av egenskaper til piezoelektriske skiver med lavt diameter/tykkelse forhold”

Masteroppgave i akustikk

av

Odd Sverre Oma



Institutt for Fysikk og Teknologi

Universitetet i Bergen

November 2009



## Forord

Denne masteroppgaven er resultatet av en lang periode med deltidsstudier ved Institutt for fysikk og Teknologi ved Universitetet i Bergen fra 1999 frem til i dag. Parallelt med arbeid som yrkesoffiser i Sjøforsvaret brukte jeg fritiden til å fordype meg i fagområder jeg fant interessante og relevante for mitt daglige virke.

At disse studiene har endt i et masterstudium må i stor grad krediteres min faglige veileder førsteamanuensis Magne Vestrheim. Samarbeidet med han gjorde at interessen for faget bare økte, og det var på direkte spørsmål og oppfordring fra Magne våren 2004 at jeg besluttet å søke opptak til masterstudiene. Han har vært særdeles imøtekommende og fleksibel. Uten Magne ville det ikke være mulig å holde oppe iveren og interessen for faget gjennom en lang studietid avbrutt av lengre perioder med utenlandsopphold i Sjøforsvaret tre familieførøkelser, samt et husprosjekt.

En stor takk må også rettes til studieveilederne Kjartan Olafson og Hanne Israelsen som på fleksibelt vis har gjort det mulig å være deltidsstudent med lengre studieavbrudd – selv med kvalitetsreformen sine rammer for normert studieprogresjon.

Til sist fortjener min familie; min kone Ingrid og våre tre barn Solveig, Guro og Magnus den aller største takk! Uten støtte og forståelse fra dere ville det være umulig å bruke så store deler av en begrenset fritid til studier. Jeg tror dere er de eneste som fullt ut forstår hva det medfører å være student ved siden av arbeid og familieliv. Vår datter på 3 år er den som uttrykte dette klarest:

”Kan vi ikke bare gå på butikken og kjøpe en bok til pappa slik at han slipper å bruke all ”voksentiden” på å skrive en selv? Gjerne en bok om ponnier!”

Bergen, november 2009

Odd Sverre Oma



# Innhold

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INNLEDNING</b>   | <b>7</b>  |
| 1.1      | BAKGRUNN FOR OPPGAVEN                                       | 7         |
| 1.2      | PROBLEMSTILLING   | 7         |
| 1.3      | OPPBYGGING AV OPPGAVEN                                      | 7         |
| <b>2</b> | <b>TIDLIGERE ARBEID</b>                                     | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>TEORI/METODE</b>   | <b>8</b>  |
| 3.1      | MATERIALBESKRIVELSE   | 8         |
| 3.1.1    | <i>Piezoelektrisitet</i>                                    | 9         |
| 3.2      | TEORETISKE MODELLER   | 13        |
| 3.2.1    | <i>Endimensjonale modeller</i>                              | 13        |
| 3.2.2    | <i>Finite element simulering</i>                            | 16        |
| 3.2.3    | <i>Sammenheng mellom materialkonstanter</i>                 | 20        |
| 3.3      | KARAKTERISERING AV EGENSKAPER FOR PIEZOELEKTRISK ELEMENT    | 25        |
| 3.4      | ELEKTRISKE, AKUSTISKE OG MEKANISKE MÅLINGER                 | 26        |
| 3.4.1    | <i>Elektriske målemetoder</i>                               | 26        |
| 3.4.2    | <i>Akustiske målemetoder</i>                                | 26        |
| 3.5      | VURDERING AV METODER  | 28        |
| 3.6      | USIKKERHETER OG NØYAKTIGHET                                 | 29        |
| <b>4</b> | <b>GJENNOMFØRING AV MÅLINGER OG SIMULERINGER</b>            | <b>30</b> |
| 4.1      | FYSISKE OG MEKANISKE MÅLINGER                               | 30        |
| 4.2      | ELEKTRISKE MÅLINGER AV ELEMENTET                            | 31        |
| 4.2.1    | <i>Fysisk tilkobling og oppstilling</i>                     | 32        |
| 4.2.2    | <i>Elektrisk tilkobling</i>                                 | 32        |
| 4.3      | AKUSTISKE MÅLINGER  | 33        |
| 4.3.1    | <i>Instrumentering ved akustiske målinger i luft</i>        | 34        |
| 4.3.2    | <i>Fysiske forhold ved måleoppstilling i luft</i>           | 35        |
| 4.4      | SIMULERINGER AV PIEZOELEKTRISKE ELEMENTER                   | 39        |
| 4.4.1    | <i>FEMP og Matlab</i>                                       | 39        |
| 4.4.2    | <i>Begrensninger i maskinvare</i>                           | 40        |
| 4.5      | NØYAKTIGHET TIL MATERIALKONSTANTER                          | 43        |
| <b>5</b> | <b>RESULTATER</b>   | <b>44</b> |
| 5.1      | MÅLTE FYSISKE EGENSKAPER                                    | 44        |
| 5.2      | MÅLTE ELEKTRISKE EGENSKAPER                                 | 46        |
| 5.2.1    | <i>Nøyaktighet ved bestemmelse av elektriske egenskaper</i> | 49        |
| 5.3      | FEMP SIMULERINGER   | 56        |
| 5.3.1    | <i>Innledende sammenligning</i>                             | 56        |
| 5.3.2    | <i>Fysiske størrelser sin innvirkning</i>                   | 59        |
| 5.4      | BESTEMMELSE AV MATERIALKONSTANTER                           | 60        |
| 5.4.1    | <i>Materialkonstanter fra elektriske målinger</i>           | 60        |
| 5.4.2    | <i>Materialkonstanter fra FEMP kjøring</i>                  | 65        |
| 5.5      | SIMULERING MED ENDIMENSJONALE MODELLER                      | 80        |
| 5.5.1    | <i>MASON Tykkelsesmodemodell</i>                            | 80        |
| 5.5.2    | <i>Radiellmodemodellen</i>                                  | 82        |
| 5.6      | GYLDIGHET TIL DE ULIKE SIMULERINGSMODELLENE                 | 84        |
| 5.6.1    | <i>Endimensjonale modeller</i>                              | 84        |
| 5.6.2    | <i>FEMP simuleringer</i>                                    | 87        |
| 5.7      | AKUSTISKE EGENSKAPER  | 93        |
| 5.7.1    | <i>Måling i målebur</i>                                     | 93        |
| 5.7.2    | <i>Simulering i FEMP</i>                                    | 93        |
| <b>6</b> | <b>DISKUSJON AV RESULTATER</b>                              | <b>97</b> |
| 6.1      | MÅLTE FYSISKE EGENSKAPER                                    | 97        |
| 6.2      | MÅLTE ELEKTRISKE EGENSKAPER                                 | 97        |
| 6.2.1    | <i>Nøyaktigheten til målingene</i>                          | 98        |

|                   |  |            |
|-------------------|--|------------|
| 6.2.2             | <i>Metodiske svakheter i elektriske målinger</i>               | 99         |
| 6.3               | FEMP SIMULERINGER  | 100        |
| 6.4               | BESTEMMELSE AV MATERIALKONSTANTER                              | 101        |
| 6.4.1             | <i>Metodiske svakheter i bestemmelse av materialkonstanter</i> | 102        |
| 6.5               | SIMULERING MED ENDIMENSJONALE MODELLER                         | 103        |
| 6.6               | GYLDIGHET TIL SIMULERINGSMODELLENE                             | 103        |
| 6.6.1             | <i>Endimensjonale modeller</i>                                 | 103        |
| 6.6.2             | <i>FEMP simuleringer</i>                                       | 104        |
| 6.7               | AKUSTISKE EGENSKAPER   | 106        |
| 6.7.1             | <i>Instrumentering ved akustiske målinger</i>                  | 106        |
| <b>7</b>          | <b>KONKLUSJON</b>  | <b>109</b> |
| 7.1               | VIDERE ARBEID  | 110        |
| <b>REFERANSER</b> |  | <b>111</b> |
| <b>VEDLEGG 1</b>  |  | <b>113</b> |
|                   | INSTRUMENTERING BRUKT I ARBEIDENE                              | 113        |
|                   | PC-VERKTØY BENYTTET  | 113        |
| <b>VEDLEGG 2</b>  |  | <b>114</b> |
|                   | PROGRAMFILER BRUKT TIL ELEKTRISKE MÅLINGER                     | 114        |
|                   | <i>Impanal.m</i>   | 114        |
|                   | PROGRAMFILER BRUKT TIL AKUSTISKE MÅLINGER                      | 114        |
|                   | <i>main.m</i>  | 114        |
|                   | <i>kildef.m</i>  | 116        |
|                   | <i>absorbsjon.m</i>  | 120        |
|                   | <i>leclesCh2.m</i>   | 121        |
|                   | <i>frekrespons.m</i>   | 121        |
|                   | <i>hpset.m</i>   | 122        |
|                   | <i>lecskalering.m</i>  | 122        |
|                   | PROGRAMFILER FOR ENDIMENSJONALE MODELLER                       | 123        |
|                   | <i>radiellmodellen.m</i>                                       | 123        |
|                   | <i>tykkelsesmodellen.m</i>                                     | 124        |
|                   | PROGRAMFILER FOR MATERIALBESEMMELSER                           | 125        |
|                   | <i>Bestemme FEMP konstanter_min.m</i>                          | 125        |
|                   | <i>kpbestemmelse_min.m</i>                                     | 126        |
|                   | <i>k33bestemmelse_min.m</i>                                    | 127        |
|                   | PROGRAMFILER BRUKT I FEMP U3.1                                 | 129        |
|                   | <i>femp-__inn</i>  | 129        |
| <b>VEDLEGG 3</b>  |  | <b>131</b> |
|                   | MATERIALFILER BRUKT I FEMP                                     | 131        |
|                   | <i>material.mat</i>  | 131        |

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn for oppgaven

Piezoelektriske transdusere har anvendelsesområder som spenner vidt. Alt fra målesystemer hvor kravene til nøyaktighet er svært store til enklere deteksjonssystemer hvor nøyaktigheten er underordnet evnen til å detektere. Felles for hele spekteret av anvendelsesområder er behovet for en forståelse av transduserenes virkemåte og vekselvirkning med mediet de opererer i.

En felles utfordring for bruk av piezoelektriske transducere synes å være mangelen på en nøyaktig beskrivelse av egenskapene. Produsenter av piezoelektriske materialer oppgir materialkonstanter med store feilmarginer, gjerne så mye som 10%. Produsenter av transducere er lite spesifikke på egenskapene til transduceren utover egenskapene innenfor den snevre anvendelsen den er tiltenkt i en konkret bruk.

Denne erkjennelsen gjør at det er et stort behov for å kunne fastsette egenskapene til piezoelektriske materialer på en teoretisk måte. Beskrivelsen må representere egenskapene til de piezoelektriske materialene med en tilstrekkelig grad av nøyaktighet.

Hovedmotivasjonen for denne oppgaven var å se på piezoelektriske elementer som hadde egenskaper anvendbare til måleoppstillinger i vann. Dette resulterte i fokus på piezoelektriske skiver med fysiske størrelsesforhold hvor forholdet mellom diameter og tykkelse gav en hensiktsmessig frekvensrespons og utstråling ved anvendelse i vann.

## 1.2 Problemstilling

Hvordan kan egenskapene til piezoelektriske skiver med lavt diameter / tykkelse forhold bestemmes?

Er det mulig å simulere egenskapene til piezoelektriske skiver med lavt diameter / tykkelse forhold på en teoretisk måte som gir tilstrekkelig grad av samsvar med faktiske målinger?

Disse to spørsmålene fremstod som hovedobjekt for oppgaven. Ved å finne svar på disse spørsmålene ville forståelsen av egenskapene til de piezoelektriske elementene betydelig og gjøre det mulig å beregne egenskaper og ytelser for ulike anvendelser av slike piezoelektriske skiver.

## 1.3 Oppbygging av oppgaven

I oppgaven skilles metodikk, resultat og vurderinger. Basert på erkjennelsen av at både valgt metodikk og vurderinger av resultater kan være subjektive og derfor ikke av generell gyldighet, har det vært viktig å skille ut resultatene. Disse vil alltid være gyldige for de målinger og simuleringer som ble gjort gitt den beskrevne metoden.

Denne presentasjonsformen har medført at noen deler av fremstillingen kan oppleves som repetert i flere kapitler. Samtidig gjør det at hvert enkelt av kapitlene har en isolert gyldighet.

## 2 Tidligere arbeid

Analyse og bestemmelse av egenskapene til piezoelektriske skiver er et arbeid som har pågått i lang tid og som i prinsippet vil fortsette så lenge nye materialer blir produsert. En av de viktigste kildene til forståelse av slike materialer sine egenskaper de senere årene har vært Jan Kocbach sin doktoravhandling [1]. Flere etterfølgende master og hovedfagsoppgaver har undersøkt egenskapene til piezoelektriske skiver og i den sammenhengen benyttet Kocbach sine resultater som sammenligning og referanse. Oppgavene til Atterås [2] og Fardal [3] har vært to viktige kilder i arbeidet med denne oppgaven på områdene bestemmelse og tilpassing av materialkonstanter for de piezoelektriske skivene.

Arbeidene til Lohne [4], Knappskog [5] og Aanes [6] har alle vært gode referanser og sammenligningsgrunnlag til den metodiske tilnærmingen ved undersøkelsene. Likevel har det vært en utfordring at ingen av de refererte arbeidene omhandler piezoelektriske skiver hvor de fysiske størrelsene er sammenlignbare med skivene i arbeidene med denne oppgaven.

## 3 Teori/metode

Studiene som ligger til grunn for denne oppgaven baserte seg på undersøkelse av piezoelektriske skiver. De konkrete skivene som ble benyttet har ikke vært gjenstand for tilsvarende undersøkelser i tidligere arbeider. Grunnleggende undersøkelser av både fysiske, elektriske og akustiske egenskaper til skivene måtte derfor gjennomføres for å underbygge målsetningen med oppgaven. I det følgende kapittelet vil teorien og metoden som ble benyttet i, og som var bakgrunn for undersøkelsene beskrives. De faktiske undersøkelsene vil bli presentert i det påfølgende kapittelet. Kildehenvisning, markert med [ ], er tatt med fortløpende i kapittelet. Der hvor kildehenvisning ikke er gitt, er bakgrunnsmateriale og teori hentet fra forelesingsnotater til PHYS272 "Akustiske transdusere" ved Fysisk institutt, Universitetet i Bergen (2003) [7]

### 3.1 Materialbeskrivelse

Materialet i de undersøkte skivene er blyzirkonattitanat,  $Pb(ZrTi)O_3$ . Blyzirkonattitanat består av et blandingsforhold blyzirkonat og blytitanat, oftest ca 50%. Blyzirkonattitanat er et sterkt piezoelektrisk material med høye verdier for koblingsfaktorer,  $k$ , og piezoelektriske konstanter,  $d$ . Curie temperaturen for materialet er høyt, noe som gjør det anvendbart over et stort temperaturområde uten degradering av piezoelektrisk effekt. Materialet tillater dessuten tilsetningsstoffer og mindre endringer for å fremheve bestemte egenskaper uten at det går ut over den piezoelektriske effekten i og med den piezoelektriske effekten er svært sterk.

Blyzirkonattitanat blir levert i en rekke varianter og utførelser fra ulike produsenter. Skivene som ble benyttet i arbeidene med denne oppgaven var av typen Vernitron PZT-5A<sup>1</sup>, levert av Morgan Technical Ceramics, Electroceramics, UK. PZT brukes som produktnavn for

---

<sup>1</sup> PZT er et registrert varemerke for blyzirkonattitanat fra Vernitron Ltd, Southampton, UK. Vernitron er i dag en divisjon av Morgan Technical Ceramics (tidligere Morgan-matroc).



blyzikonattitanat materialer, og finnes i flere typer. (f. eks PZT-2, PZT-4, PZT-4D, PZT-7A, PZT-8) Alle disse har ulike egenskaper selv om de stammer fra samme sammensetning.

PZT-5A anbefales bruk til hydrofoner eller instrumentering på grunn av høy resistivitet ved høye temperaturer, høy følsomhet og god stabilitet.[8]

### 3.1.1 Piezoelektrisitet

Piezoelektrisk effekt er fenomenet som oppstår når dielektriske krystaller blir utsatt for mekanisk spenning. På grunn av de ladede partiklenes usymmetriske ordning i disse krystallene genereres elektrisitet eller elektrisk polarisering. Den omvendte piezoelektriske effekten er generering av mekanisk tøyning eller spenning når krystallet påvirkes av elektrisk felt.

Relasjonene mellom elektriske og mekaniske størrelser kan uttrykkes på flere former. Alle formene uttrykker koblingen mellom elastiske og elektriske egenskaper. Hvilken form som foretrekkes å bruke, vil avhenge av anvendelsen og formen produsenten oppgir materialeegenskapene. Eksempler på dette vil bli gitt i senere avsnitt.

#### 3.1.1.1 Piezoelektriske relasjoner

Nedenfor vises fire vanlige notasjoner for de piezoelektriske relasjonene:

Tøyning – elektrisk forskyvning

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{jp} E_j \quad (1.1)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ij}^T E_j \quad (1.2)$$

Tøyning – elektrisk feltstyrke

$$S_p = s_{pq}^D T_q + g_{jp} D_j \quad (1.3)$$

$$E_i = -g_{iq} T_q + \beta_{ij}^T D_j \quad (1.4)$$

Mekanisk spenning – elektrisk forskyvning

$$T_p = c_{pq}^E S_q - e_{jp} E_j \quad (1.5)$$

$$D_i = e_{iq} S_q + \varepsilon_{ij}^S E_j \quad (1.6)$$

Mekanisk spenning – elektrisk feltstyrke

$$T_p = c_{pq}^D S_q - h_{jp} D_j \quad (1.7)$$

$$E_i = -h_{iq} S_q + \beta_{ij}^S D_j \quad (1.8)$$

der  $i, j = 1, 2, 3$  og  $p, q = 1, 2, \dots, 6$

På grunn av krystallenes symmetriske natur kan notasjonen i relasjonene ovenfor uttrykkes i forkortet notasjon med  $i, j, p$  og  $q$ , dvs til sammen 36 konstanter. (i motsetning til komplett notasjon som gir totalt 81 konstanter)

Her er:

- $S$ : Mekanisk tøyning
- $T$ : mekanisk spenning [ $\text{N/m}^2$ ], [ $\text{Pa}$ ]
- $E$ : elektrisk feltstyrke [ $\text{V/m}$ ]
- $D$ : elektrisk forskyvning [ $\text{C/m}^2$ ]
- $c^E$ : elektrisk stivhetskonstant ved konstant elektrisk feltstyrke [ $\text{N/m}^2$ ]
- $c^D$ : elektrisk stivhetskonstant ved konstant elektrisk forskyvning [ $\text{N/m}^2$ ]
- $s^E$ : komplianskonstant ved konstant elektrisk feltstyrke [ $\text{m}^2/\text{N}$ ]
- $s^D$ : komplianskonstant ved konstant elektrisk forskyvning [ $\text{m}^2/\text{N}$ ]
- $\varepsilon^T$ : permittivitet (dielektrisitetskonstant) ved konstant mekanisk spenning [ $\text{F/m}$ ]  
(fri dielektrisitetskonstant)
- $\varepsilon^S$ : permittivitet (dielektrisitetskonstant) ved konstant mekanisk tøyning [ $\text{F/m}$ ]  
(blokkert dielektrisitetskonstant)
- $\beta^T$ : imermittivitetskonstant ved konstant mekanisk spenning
- $\beta^S$ : imermittivitetskonstant ved konstant mekanisk tøyning
- $d, e, g, h$ : piezoelektriske materialkonstanter
- $d$ : piezoelektrisk tøyingskonstant [ $\text{m/V}$ ]
- $e$ : piezoelektrisk spenningskonstant [ $\text{C/m}^2$ ]

Piezoelektriske elementer av Blyzirkonattitanat som arbeidene i denne oppgaven tar for seg har en symmetri som gjør at forkortet notasjon på 36 konstanter ytterligere kan reduseres til totalt 10 konstanter:

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$c_{66}^E = \frac{1}{2}(c_{11}^E - c_{12}^E)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Slik det fremgår av matrisene ovenfor er 10 uavhengige konstanter tilstrekkelig for å beskrive det piezoelektriske materialet PZT-5A. Disse 10 konstantene var utgangspunktet for undersøkelsene som ligger til grunn for denne oppgaven. Det vil senere bli vist hvordan det var nødvendig å rekne om fra dette settet på 10 uavhengige konstanter til sett med andre konstanter. I kapittel 3.2 vil ulike teoretiske modeller bli presentert, og disse modellene forholder seg til materialkonstantene på ulike former.

### 3.1.1.2 Tapseffekter i piezoelektriske materialer

Piezoelektriske relasjoner slik de er fremstilt i ligningene (1.1) til (1.8), med tilhørende materialkonstanter i matrisene (1.9) til (1.11) ovenfor, tar ikke hensyn til tapseffekter i de piezoelektriske materialene. Tapseffekter i materialene fremstilles i litteraturen på ulike måter. Felles for tilnærmingene er imidlertid at tapene kan knyttes til mekaniske og dielektriske forhold. Disse tapene kan uttrykkes ved at materialkonstantene gis et komplekst ledd som representerer tapet. I [9] er det vist at det også kan uttrykkes et piezoelektrisk tap på tilsvarende måte. Dette gir en konsistent fremstilling hvor alle materialkonstantene kan uttrykkes med et reelt og et komplekst ledd på formen

$$\hat{A} = A' \pm A'' \quad (1.12)$$

hvor  $A'$  angir reell del og  $A''$  den komplekse (taps-)delen. For entydig forståelse noteres komplekse konstanter med  $\hat{\phantom{A}}$ . Notasjonen i (1.12) kan videre omformes til

$$\hat{A} = A \left( 1 \pm \frac{i}{Q_A} \right) \quad (1.13)$$

der  $Q_A$  er tilhørende tapskonstant til  $A$ .

Tapseffekter i de piezoelektriske materialene blir ofte oppgitt av produsenter med en mekanisk tapsfaktor  $Q_M$ , samt en dissipasjonsfaktor  $\tan \delta = \frac{1}{Q_E}$ .

For et komplett sett med materialkonstanter og tilhørende tap er det likevel hensiktsmessig å definere en tilhørende tapsverdi for samtlige av de ti uavhengige materialkonstantene ovenfor. Dette vil være i tråd med [9], og gi en entydig og ryddig håndtering av materialkonstantene. Det er i tidligere arbeider [10], [11], [12], [13], [14], [15] og [16] vist ulike metoder for bestemmelse av materialkonstanter. Alle disse metodene harmonerer med å fremstille tapskonstanter for hver enkelt materialkonstant.

Dette gir følgende relasjoner for å fremstille tap i de piezoelektriske relasjonene ovenfor:

$$\text{Mekaniske tap:} \quad \hat{c}^E = c^E \left( 1 + \frac{i}{Q^{c^E}} \right) \quad (1.14)$$

Piezoelektriske tap:  $\hat{e} = e(1 - \frac{i}{Q^e})$  (1.15)

Dielektriske tap:  $\hat{\epsilon}^S = \epsilon^S(1 - \frac{i}{Q^{\epsilon^S}})$  (1.16)

Fortegnskonvensjonen er valgt ut ifra kravet om at et passivt material alltid må ha et reelt tap knyttet til Q-verdien. Det tilsier at Q-verdien alltid skal være positiv.

## 3.2 Teoretiske modeller

Fremstilling av et fysisk fenomen med hjelp av en teoretisk tilnærming, er en nødvendighet i de fleste disipliner av naturvitenskapen. Dels utvikles og benyttes teoretiske modeller for å danne et grunnlag for forståelse av fysiske fenomen, dels benyttes de for å være et hjelpemiddel og supplement for å planlegge bruken av fysiske egenskaper til et materiale. I begge tilfellene er det avgjørende at den teoretiske fremstillingen representerer den faktiske egenskapen med en tilstrekkelig grad av korrekt resultat.

I arbeidet med denne oppgaven ble to ulike tilnærminger valgt for å beskrive egenskapene til det piezoelektriske materialet. De endimensjonale modellene (MASON-modellen for piezoelektriske skiver som svinger i radiell mode, og MASON-modellen for piezoelektriske skiver som svinger i tykkelsesmode) gir hver for seg et bilde av et utdrag av egenskapene til de piezoelektriske skivene. Finite element simulering (utført med FEMP U3.1<sup>1</sup>) gir en teoretisk fremstilling av egenskapene til de piezoelektriske skivene gjennom hele frekvensområdet, og fremstiller således et mer komplett teoretisk sammenligningsgrunnlag enn de endimensjonale modellene. I presentasjonen vil benevnelsen FEMP benyttes når det refereres til FEMP U3.1.

### 3.2.1 Endimensjonale modeller

Det meste av de fysiske fenomenene vi daglig omgir oss med er forsøkt fremstilt på en teoretisk måte for å forklare fenomenene. Ofte søkes det å fremstille en problemstilling så enkel som mulig, for dermed å gi et mest mulig lettfattelig resultat. De endimensjonale modellene som ble benyttet i arbeidene med denne oppgaven fremstiller på teoretisk grunnlag hvordan svingningene i det piezoelektriske materialet foregår isolert sett i radiell retning (radiellmodemodellen) og i tykkelsesretning (tykkelsesmodemodellen). Felles for begge modellene er at de teoretisk beskriver en isolert svingemodus uten kobling til andre moduser og effekter, for en piezoelektrisk skive som er polarisert i tykkelsesretningen, har begge de største flatene dekket av elektroder og som påtrykkes en alternerende spenning over elektrodene.

---

<sup>1</sup> FEMP-“Finite Element Modeling of Piezoelectric structures” er utviklet av Jan Kocbach som en del av doktorgradsarbeidet ”Finite Element Modeling of Ultrasonic Piezoelectric Transducers” ved Universitetet i Bergen, 2000. Utviklingen var et samarbeid mellom Universitetet i Bergen og Christian Michelsen Research. Programmet kjører i Matlab® og er tilgjengelig som gratisprogramvare under vilkår definert av ”GNU general public license”

### 3.2.1.1 Radiellmodemodellen

Modellen beskriver de elektriske egenskapene til den piezoelektriske skiven rundt de radielle modene. For disse modene isolert sett kan admittansen til skiven uttrykkes på følgende måte [17]:

$$Y(f) = i2\pi f \varepsilon_{33}^p \frac{\pi a^2}{T} \left[ \frac{2(k^p)^2}{1 - \sigma^p - \mathfrak{Z}(\eta)} - 1 \right] \quad (1.17)$$

Her er:

- a: Radius til skiven
- t: Tykkelsen til skiven
- $\varepsilon_{33}^p$ : Planar permittivitetskonstant i 33-retninga
- $k^p$ : Planar koplingsfaktor
- $\sigma^p$ : Poissons forhold

$\mathfrak{Z}$  er Onos funksjon, definert som:

$$\mathfrak{Z}(\eta) = \frac{\eta J_0(\eta)}{J_1(\eta)}, \eta = \frac{2\pi fa}{v^p} \quad (1.18)$$

$J_0$  og  $J_1$  er Besselfunksjoner av første type og henholdsvis nulte og første orden.

$v^p$  er planar lydshastighet til elementet

Ved hjelp av beskrivelsen ovenfor kan de isolerte svingningene til elementet i radiell mode uttrykkes og simuleres forutsatt at materialkonstantene er kjent. Imidlertid er den anvendte bruken av beskrivelsen oftest det motsatte. Ved hjelp av elektriske målinger på et faktisk element, kan materialkonstantene som inngår i den teoretiske beskrivelsen ovenfor bestemmes. Flere arbeider hvor metode for bestemmelse av materialkonstanter er publisert. [10], [11], [12], [13], [14], [26], [15] og [16].

I arbeidene som ligger til grunn for denne oppgaven er metoden beskrevet i [10] benyttet, da denne gir materialkonstanter med tapsverdier. Resonnansfrekvensene til elementet måles og brukes for å løse (1.18) med hensyn på materialkonstantene. På denne måten kan en bestemme  $k^p$  og  $c_p^{11}$  med tilhørende tapskonstant, samt  $\sigma^p$ .

### 3.2.1.2 Tykkelsesmodemodellen

Tykkelsesmodemodellen<sup>1</sup> beskriver de isolerte svingningene i elementet i tykkelsesretningen. Tilsvarende som for radiellmodemodellen beskriver denne et teoretisk uttrykk for de elektriske egenskapene til det piezoelektriske elementet for denne moden isolert. Vi har fra [17] at:

---

<sup>1</sup> Oftest benevnt MASON-modellen, eller MASON TE-modell (eng. "thickness extension") da den beskriver svingninger i tykkelsesretningen (TE-mode), ikke til forveksling med tykkelses-skjær svingninger (TS-moden)

$$Z(f) = \frac{1}{i2\pi f C_0^S} \left( 1 - (k_t)^2 \frac{\tan(x)}{x} \right) \quad (1.19)$$

$$x = \frac{\pi f t}{v^d} \quad (1.20)$$

$$C_0^S = \frac{\epsilon_{33}^S \pi a^2}{t} \quad (1.21)$$

$$v^D = \sqrt{c_{33}^D / \rho} \quad (1.22)$$

Her er:

- $C_0^S$ : kapasitans for ideelt mekanisk blokkert element
- $c_{33}^D$ : stivhetskonstant i 33-retningen ved konstant elektrisk forskyvning
- $\epsilon_{33}^S$ : permittivitet i 33-retningen ved konstant mekanisk tøyning
- $a$ : radius til skiven
- $t$ : tykkelsen til skiven
- $\rho$ : tettheten til skiven

Materialkonstanter for det piezoelektriske materialet kan bestemmes ut fra elektriske målinger på elementet i Tykkelsesmoden tilsvarende som for radiellmoden. I [11] fremkommer hvordan  $\epsilon_{33}^S$  og  $k_t$  kan bestemmes.

### 3.2.1.3 Materialkonstantbestemmelse fra endimensjonale modeller

Avsnittene ovenfor refererer hvordan noen av materialkonstantene til det piezoelektriske materialet kan finnes basert på antagelsen om at de elektriske egenskapene for materialet rundt henholdsvis de radielle- og tykkelses-resonnansene kan beskrives teoretisk. I [2] er disse metodene sett i sammenheng og brukt for å analysere et piezoelektrisk material. Fra dette arbeidet fremkommer beskrivelse av målinger og relasjoner som til sammen bestemmer følgende materialkonstanter:

|                  |   |  |
|------------------|---|--|
| Elastiske:       | : | $s_{11}^D, s_{12}^D, s_{11}^E, s_{12}^E, c_{33}^D, c_{33}^E$   |
| Dielektriske     | : | $\epsilon_{33}^T, \epsilon_{33}^S, \beta_{33}^T, \beta_{33}^S$ |
| Piezoelektriske  | : | $d_{31}, g_{31}, h_{33}, e_{33}$                               |
| Elektromekaniske | : | $k_{31}^l, k_{33}^l, k_p$                                      |
| Planare          | : | $c_{11}^P, c_{12}^P, e_{13}^P, \epsilon_{33}^P, k^P, \sigma^P$ |

### 3.2.2 Finite element simulering

Raske datamaskiner med stor reknekapasitet har de siste årene gjort det mulig å benytte numeriske modeller for å simulere piezoelektriske elementer sine egenskaper. Dette har åpnet en ny dimensjon av forståelse for de pezoelektriske materialene sine egenskaper. Finite element simulering som metodikk har vist seg å være et kraftfullt verktøy for å beskrive en rekke fysiske problemstillinger. Metoden som prinsipp går ut på å dele en fysisk struktur i et stort antall mindre endelige elementer, for så å fastsette egenskapene til den totale strukturen som en sum av egenskapene til et enkeltelement<sup>1</sup>. I arbeidene til grunn for denne oppgaven er endelig element metoden benyttet slik den fremkommer i [1], og slik den er implementert i programvaren FEMP<sup>2</sup>. Fremstillingen nedenfor er i sin helhet hentet fra [1], og det henvises til denne referansen for utfyllende detaljer.

For et piezoelektrisk objekt  $\Omega_p$  med overflate  $\Gamma_p$  antas det at overflaten kan ha følgende tilstander:

- $\Gamma_T$  Delen av overflaten som er påtrykt tøyningen  $\bar{t}_i$
- $\Gamma_u$  Delen av overflaten som er påtrykt forskyvningen  $\bar{u}_i$
- $\Gamma_\phi$  Delen av overflaten med fast potensial lik  $\bar{\phi}$
- $\Gamma_\sigma$  Delen av overflaten med påført ladningstetthet  $\bar{\sigma}_p$

Det antas at  $\Gamma_T$  og  $\Gamma_u$  til sammen er lik  $\Gamma_p$ , og tilsvarende  $\Gamma_\phi$  og  $\Gamma_\sigma$  er lik  $\Gamma_p$

Her er:

$\rho_p$ : Tettheten til objektet

Sett sammen med de piezoelektriske relasjonene i avsnitt 3.1.1.1 kan det piezoelektriske objektet fremstilles med en tidsharmonisk tilnærming på følgende måte:

$$-\omega^2 \rho_p u_i = T_{ij,j} \quad (1.23)$$

$$D_{i,i} = 0 \quad (1.24)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1.25)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (1.26)$$

Grensebetingelsene for disse ligningene fremkommer utledet av den fysiske beskrivelsen til objektet, sammen med forståelsen av hvordan objektet har festet elektroder på to av sidene.

<sup>1</sup> Som eksempel kan nevnes skipsbygging hvor hele skrogstrukturer blir styrkemessig betraktet ved å komponere skroget av endelige elementer med kjente fysiske egenskaper. Dette gir muligheter til å berekne fysiske egenskaper til skroget svært detaljert, og dessuten enkelt evaluere virkningen av endringer.

<sup>2</sup> FEMP har siden første utgave blitt oppdatert og endret i flere versjoner. Versjonsnummer som starter med "U" indikerer at det er en versjon som distribueres som gratisprogramvare. I dette arbeidet er versjon U3.1 benyttet, etter noen endringer av koden for å få den kjørbar på Matlab 2007b.



Grensebetingelsene kan i korthet oppsummeres:

- $\Gamma_T$  er den delen av overflaten  $\Gamma_p$  hvor den påtrykte kraften  $\bar{t}_i$  virker. For en piezoelektrisk skive som vibrerer i vakum er denne kraften null på alle overflater, slik at  $\Gamma_T = \Gamma_p$
- $\Gamma_u$  er den delen av overflaten  $\Gamma_p$  som er gitt en forskyvning lik  $\bar{u}_i$ . For de fleste problemstillingene antar man at der ikke er noen forskyvning, slik at  $\Gamma_u$  er et tomt område.
- $\Gamma_\phi$  er den delen av overflaten  $\Gamma_p$  hvor det elektriske potensialet er fast, satt til  $\bar{\phi}$ . I egenverdianalysen av problemet er potensialet til begge elektrodene satt til null. Dette gir at  $\Gamma_\phi$  tilsvarer arealet av elektrodene. For tidsharmonisk analyse er  $\Gamma_\phi$  lik arealet av en eller begge elektrodene i samsvar med hvor potensialet er fast.
- $\Gamma_\sigma$  er den delen av overflaten  $\Gamma_p$  som er påtrykt en ladningstetthet  $\bar{\sigma}$ . Ladningstettheten er null på de delene av overflaten som ikke har elektroder ( $D_i n_i = 0$ ). I tidsharmonisk analyse kan ladninger påtrykkes på den ikke-jordede elektroden. I denne betraktningen er det antatt at det ikke eksisterer elektriske felt på utsiden av det piezoelektriske mediet.

Matematisk kan grensebetingelsene oppsummeres:

$$u_i = \bar{u}_i \text{ på } \Gamma_u \quad (1.27)$$

$$T_{ij} n_j = \bar{t}_i \text{ på } \Gamma_T \quad (1.28)$$

$$-D_i n_i = \bar{\sigma} \text{ på } \Gamma_\sigma \quad (1.29)$$

$$\phi = \bar{\phi} \text{ på } \Gamma_\phi \quad (1.30)$$

De matematiske beskrivelsene av problemstillingen samt grensebetingelsene er definert i ligningene (1.23) til (1.30). Svak formulering benyttes på ligningene (1.23) og (1.24) ved at ligningene multipliseres med tilfeldig valgte vektfunksjoner  $v_i$  og  $w$ , for deretter å integreres over hele volumet til den piezoelektriske strukturen  $\Omega_p$ . Begrensningen i valg av vektfunksjoner er at  $v_i = 0$  på  $\Gamma_u$ , og  $w = 0$  på  $\Gamma_\phi$

Dette fører til at problemstillingen nå kan formuleres som

$$-\omega^2 \int_{\Omega_p} \rho_p v_i u_i d\Omega = \int_{\Omega_p} v_i T_{ij,j} d\Omega \quad (1.31)$$

$$\int_{\Omega_p} w D_{i,i} d\Omega = 0 \quad (1.32)$$

Grensebetingelsene som definert ovenfor kan settes inn, og ved hjelp av Green's formel kan leddene skrives om og løses.

Symmetrien til elementet som omhandles antas å være aksesymmetrisk, slik at det fysisk kan uttrykkes ved to variabler, z og r. I denne antagelsen ekskluderes alle svingninger som ikke er symmetriske om z-aksen. Siden de piezoelektriske materialene som studeres er fysisk symmetriske om z-aksen antas denne tilnærmingen å være dekkende.

Løsningen som fremkommer kan sammen med symmetriegenskapene benyttes til å sette opp problemstillingen i matrisform. Det siste som gjøres er å innføre endelige elementer som indikert i innledningen. Hele strukturen deles i et antall elementer med tilhørende noder.

Dette medfører at en piezoelektrisk struktur, delt i endelige elementer, som svinger i vakum kan formuleres som

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{\phi u} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ -Q \end{Bmatrix} \quad (1.33)$$

Her er

|                                |                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| $[M_{uu}]$ :                   | Global massematrise                  |
| $\{\hat{u}\}$ :                | forskyvningsvektor                   |
| $\{\hat{\phi}\}$ :             | elektrisk potensialvektor            |
| $[K_{uu}]$ :                   | Global stivhetsmatrise               |
| $[K_{u\phi}] = [K_{\phi u}]$ : | Global pezoelektrisk stivhetsmatrise |
| $[K_{\phi\phi}]$ :             | Global dielektrisk stivhetsmatrise   |
| $\{F\}$ :                      | Global kraftvektor                   |
| $\{Q\}$ :                      | Global ladningsvektor                |

Med global menes i denne sammenhengen at koordinater er gitt som funksjoner av z og r.

Ligning (1.33) tar for seg tilfellet når den piezoelektriske strukturen vibrerer i vakum. Om en antar at strukturen omkranses av en væske med endelig radius og hastighetspotensiale  $\psi$  i væsken kan en med tilsvarende utledning som ovenfor komme frem til følgende form:

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{uu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{\phi} \\ \bar{\psi} \end{Bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_{u\psi} \\ 0 & 0 & 0 \\ C_{\psi u} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{\phi} \\ \bar{\psi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} & \\ K_{\phi u} & K_{\phi\phi} & \\ & & -K_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{\phi} \\ \bar{\psi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -Q \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1.34)$$

### 3.2.2.1 Modalanalyse

En av de to løsningsmetodene som er beskrevet for formuleringene ovenfor er modalanalyse ved hjelp av modesuperposisjonsmetoden. Dette gjøres ved å introdusere spenning og strøm i stedet for elektrisk potensial og ladning. Matrisene skrives dessuten om til H-form. H-formen gjør ligningssettene lettere å beregne rekneteknisk enn K-formen. Modalanalyse slik den er

presentert kan kun nyttes for å løse ligningssettet for vibrasjoner i vakuum. Kraftvektoren  $\{F\}$  settes til null siden vakuum ikke kan belaste strukturen. Dette gir at første ligningen i (1.33) etter omforming kan skrives som:

$$\left([\Omega_r^2] - \omega^2 [I]\right)\{z\} = -[\psi_r]^T \{H_{u\phi}\} V \quad (1.35)$$

Her er

- $r$ : Generalisert koordinat, (innført ved transformasjonsmatrise fra koordinaten  $\hat{u}$ )
- $[\Omega_r]$ : Egenverdier/frekvenser til ligningssettet
- $[\psi_r]$ : Egenvektorer til ligningssettet

Fra dette kan forskyvningen for strukturen beregnes og dermed settes inn for å gi følgende uttrykk for admittansen:

$$Y(\omega) = i\omega \sum_{i=1}^{2N} \frac{\{H_{u\phi}\}^T \{\psi_{r,i}\} \{\psi_{r,i}\}^T \{H_{u\phi}\}}{\omega_{r,i}^2 - \omega^2} - H_{\phi\phi} \quad (1.36)$$

Admittansen er dermed gitt som summen av bidrag fra de ulike egenmodene. Tilsvarende gjelder for forskyvningen. Modalanalysen har dermed den fordel at den direkte gir svar på hvor mye de ulike modene og resonansfrekvensene bidrar i det totale bildet av admittans eller forskyvning. Klassifisering av de ulike svingemodene kan derfor understøttes av denne løsningsmetoden.

### 3.2.2.2 Direkteharmonisk analyse

Den andre løsningsmetoden som er beskrevet er direkteharmonisk løsningsmetode. Dette gjøres ved å løse ligningssettet for hver enkelt frekvens direkte. I motsetning til modalanalyse vil dette gi svaret direkte for en aktuell frekvens uten å gå veien om å summere bidrag fra ulike egenvektorer og egenmoder. Denne løsningen er derfor rekneteknisk en lettere metode. Første ligningen i (1.33) kan skrives

$$[D]\{\hat{u}\} = -\{H_{u\phi}\} V \quad (1.37)$$

Her er  $[D] = [H_{uu}] - \omega^2 [M_{uu}]$ . Med dette får vi at dersom strukturen eksiteres av en harmonisk varierende spenning kan forskyvningen uttrykkes

$$\{\hat{u}\} = -[D]^{-1} \{H_{u\phi}\} V \quad (1.38)$$

Innsatt i andre ligning i (1.33) gir dette at admittansen kan uttrykkes

$$Y = i\omega \left[ \{H_{u\phi}\}^T [D]^{-1} \{H_{u\phi}\} - H_{\phi\phi} \right] \quad (1.39)$$

Det påpekes at inverteringen av matrisen  $[D]$  må gjøres for hver enkelt frekvens. Reknemengden og tiden vil derfor øke betraktelig om frekvensområdet i analysen økes.

### **3.2.2.3 Kildefølsomhet i FEMP**

I modalanalyse blir kildefølsomheten beregnet ved Hybrid FE/Rayleigh integral metode. Dette er en alternativ og forenklet metode for å beregne utstråling i luft. Metoden baseres som navnet tilsier på Rayleigh integral, og er langt mindre matematisk krevende enn en mer eksakt tilnærming. Eksakt utstråling i mediet kan utføres i direkteharmonisk analyse ved å definere et område med elementer utenfor den piezoelektriske strukturen. Dette området genererer en vesentlig matematisk økning av problemstillingens størrelse basert på at bølgelengden i luft er liten sammenlignet med i tettere medier. Antallet elementer som behøves for å angi et område i tilstrekkelig detaljeringsgrad blir derfor stort, og medfører problemer med reknekapasitet.

### **3.2.3 Sammenheng mellom materialkonstanter**

I avsnitt 3.1.1.1 vises hvordan ett komplett sett med materialkonstanter for et piezoelektrisk materiale ser ut. Dette settet sammenfaller med konstantmatrisene som er brukt ved implementering av finite element metode i programvaren FEMP. For å kunne sammenligne inngangsverdier og resultater fra de ulike teoretiske modellene beskrevet ovenfor var det nødvendig å kunne rekne om til ulike sett med materialkonstanter. Relasjonene mellom de ulike konstantene er hentet fra [18] og [19]. Noen av relasjonene anses som trivielle. Likevel var det viktig å ha en etablert formalisme for dette i arbeidene. Poenget var å redusere antall ukjente variabler til et minimum når materialkonstanter skulle bestemmes og evalueres.

Konstantene som inngår i de ulike modellene presentert ovenfor kan sammenstilt oppsummeres

Tabell 3.1: Konstanter som inngår i FEMP, radiellmodemodellen og tykkelsesmodemodellen. Elastiske konstanter er  $c$  og  $s$ , mens  $\epsilon$  og  $\beta$  er dielektriske konstanter,  $d$ ,  $g$ ,  $h$ , og  $e$  er piezoelektriske konstanter,  $k$  er elektromekanisk konstant og  $\sigma$  er poissons forhold.

|  | FEMP              | Radiellmodemodellen | Tykkelsesmodemodellen |
|--|-------------------|---------------------|-----------------------|
|  | $c_{11}^E$        | $\epsilon_{33}^P$   | $c_{33}^D$            |
|  | $c_{12}^E$        | $k^P$               | $\epsilon_{33}^S$     |
|  | $c_{13}^E$        | $\sigma_p$          | $k_{33}^I$            |
|  | $c_{33}^E$        | $c_{11}^P$          |                       |
|  | $c_{44}^E$        |                     |                       |
|  | $e_{31}$          |                     |                       |
|  | $e_{15}$          |                     |                       |
|  | $e_{33}$          |                     |                       |
|  | $\epsilon_{11}^S$ |                     |                       |
|  | $\epsilon_{33}^S$ |                     |                       |

Materialkonstanter som kan finnes eksperimentelt ved hjelp av de teoretiske endimensjonale modellene er tidligere presentert. Samlet kan de oppsummeres slik:

Tabell 3.2: Materialkonstanter som kan finnes fra radiellmodemodellen og tykkelsesmodemodellen

| Elastiske  | Dielektriske      | Piezoelektriske | Elektromekaniske | Planare    |
|------------|-------------------|-----------------|------------------|------------|
| $s_{11}^D$ | $\epsilon_{33}^T$ | $d_{31}$        | $k_{31}^I$       | $c_{11}^P$ |
| $s_{12}^D$ | $\epsilon_{33}^S$ | $g_{31}$        | $k_{33}^I$       | $c_{12}^P$ |
| $s_{11}^E$ | $\beta_{33}^T$    | $h_{33}$        | $k_p$            | $c_{31}^P$ |
| $s_{12}^E$ | $\beta_{33}^S$    | $e_{33}$        |                  | $c_{33}^P$ |
| $c_{33}^D$ |                   |                 |                  | $k^P$      |
| $c_{33}^E$ |                   |                 |                  | $\sigma^P$ |

Et komplett sett med konstanter slik det benyttes i FEMP er utvetydig, og beskriver egenskapene til det piezoelektriske materialet. De endimensjonale modellene har færre materialkonstanter, og samtlige av disse kan utledes av det komplette settet som benyttes i FEMP.

Tabell 3.3: Materialkonstanter og inngangsparametere til tykkelsesmodellen. Omrekning vist fra konstantsett benyttet i FEMP

|  |   |
|--|---|
| Elastisk stivhetskonstant ved konstant elektrisk forskyvning | $c_{33}^D = c_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^s}$      |
| Elektromekanisk koblingskonstant                             | $k_{33}^t = \sqrt{\frac{e_{33}^2}{c_{33}^D \epsilon_{33}^s}}$ |
| Permittivitetskonstant ved konstant mekanisk tøyning         | $\epsilon_{33}^s$   |
| Materialtetthet  | $\rho$  |
| Tykkelsen til skiven   | T   |
| Radius til skiven  | a   |

Tabell 3.4: Materialkonstanter og inngangsparametere til radiellmodemodellen. Omrekning vist fra konstantsett benyttet i FEMP

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Planar elastisk konstant       | $c_{11}^p = c_{11}^E - \frac{(c_{13}^E)^2}{c_{33}^E}$                                    |
| Planar piezoelektrisk konstant | $e_{31}^p = e_{31} - \frac{e_{33}c_{13}^E}{c_{33}^E}$                                    |
| Planar permittivitetskonstant  | $\epsilon_{33}^p = \epsilon_{33}^s + \frac{(e_{33})^2}{c_{33}^E}$                        |
| Planar koblingsfaktor          | $k^p = \sqrt{\frac{(e_{31}^p)^2}{c_{11}^p \epsilon_{33}^p}}$                             |
| Poissons forhold               | $\sigma^p = -\frac{-c_{12}^E c_{33}^E + (c_{13}^E)^2}{c_{11}^E c_{33}^E - (c_{13}^E)^2}$ |
| Tykkelsen til skiven           | T  |
| Radius til skiven              | a  |

Tabell 3.5: Materialkonstanter som inngår i FEMP. Med unntak av ubestemte konstanter kan øvrige konstanter i omrekningen finnes fra målinger på elementene og bruk av endimensjonale modeller som referert i kap 3.2.1.

| Materialkonstant           | Omrekning til konstanter i FEMP  | Ubestemte konstanter      |
|----------------------------|--|---------------------------|
| Elastiske konstanter       | $c_{11}^E = \frac{s_{11}^E}{(s_{11}^E)^2 - (s_{12}^E)^2} + \frac{(s_{13}^E)^2}{(s_{11}^E + s_{12}^E)(s_{33}^E(s_{11}^E + s_{12}^E) - 2(s_{13}^E)^2)}$  | $s_{13}^E, s_{33}^E$      |
|                            | $c_{12}^E = -\frac{s_{12}^E}{(s_{11}^E)^2 - (s_{12}^E)^2} + \frac{(s_{13}^E)^2}{(s_{11}^E + s_{12}^E)(s_{33}^E(s_{11}^E + s_{12}^E) - 2(s_{13}^E)^2)}$ | $s_{13}^E, s_{33}^E$      |
|                            | $c_{13}^E = -\frac{s_{13}^E}{s_{33}^E(s_{11}^E + s_{12}^E) - 2(s_{13}^E)^2}$   | $s_{13}^E, s_{33}^E$      |
|                            | $c_{33}^E = \frac{s_{11}^E + s_{12}^E}{s_{33}^E(s_{11}^E + s_{12}^E) - 2(s_{13}^E)^2}$   | $s_{13}^E, s_{33}^E$      |
|                            | $c_{44}^E = \frac{1}{s_{44}^E}$  | $s_{44}^E$                |
| Permittivitetskonstanter   | $\epsilon_{11}^S = \epsilon_{11}^T - d_{15}^2 c_{44}^E$  | $\epsilon_{11}^T, d_{15}$ |
|                            | $\epsilon_{33}^S = \epsilon_{33}^T (1 - k_p^2) (1 - (k_{33}^t)^2)$   |                           |
| Piezoelektriske konstanter | $e_{31} = d_{31} (c_{11}^E + c_{12}^E) + d_{33} c_{13}^E$  | $d_{33}$                  |
|                            | $e_{33} = \epsilon_{33}^S h_{33}$  |                           |
|                            | $e_{15} = d_{15} c_{44}^E$   | $d_{15}, s_{44}^E$        |



### 3.3 Karakterisering av egenskaper for piezoelektrisk element

Egenskapene til det piezoelektriske elementet må kvantifiseres i sammenlignbare størrelser for å evaluere hvor godt de ulike modellene fremstiller elementet. Grafiske fremstillinger vil lett kunne avsløre avvik i elektriske størrelser når de plottes som funksjon av frekvens over et gitt område, men vil ikke gi kvantifiserte og dermed sammenlignbare størrelser. Ulike metoder kan benyttes for å tallfeste egenskapene til et element når det fremstilles enten med elektriske målinger eller ved hjelp av en teoretisk modell. Karakterisering av resonansfrekvenser for de to første radiale modene (R1 og R2), samt for første tykkelsesmode (TE1) har blitt brukt i denne oppgaven.

Resonansfrekvensene i denne sammenhengen henspeiler på serieresonans og parallellresonans funnet ved hhv maksimum konduktans og maksimum resistans for elementet. Båndbredden til resonansene har i tillegg blitt tallfestet som differansen mellom frekvensene hvor hhv susceptansen og reaktansen har sine maksima og minima. Denne klassifiseringsmetoden samsvarer med fremgangsmåten brukt i [2]. Det blir senere i oppgaven presentert resultater fra tilpassinger av materialkonstanter og sammenligninger med tilsvarende arbeid utført i [2]. Likheter i klassifiseringsmetode og definisjoner ble derfor ansett som hensiktsmessig.

Det er i [10] beskrevet en metode som matematisk er ansett som mer korrekt for bestemmelse av resonansfrekvenser. Det er påpekt i samme referanse at avvikene mellom disse metodene er neglisjerbare. Metoden fra [10] er blant annet benyttet i [6], og i flere arbeider og rapporter.

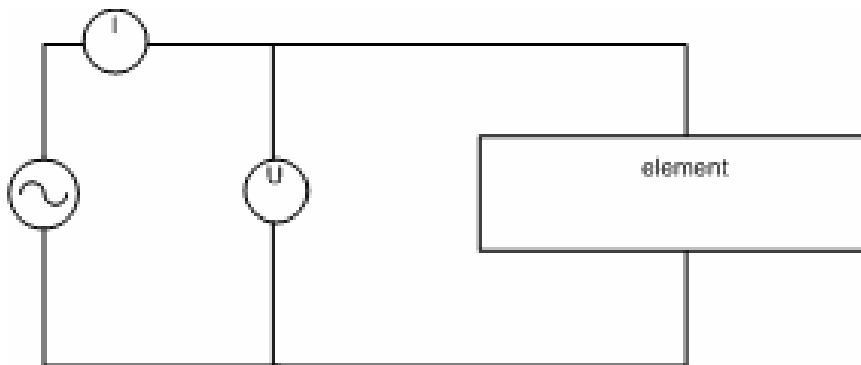
I forbindelse med de relativt omfattende arbeidene som ble gjort for tilpassing av materialkonstanter (presenteres i kapittel 5) var det arbeidsbesparende å benytte metoden fra [2] sammenlignet med metoden beskrevet i [10]. Feilene som eventuelt ble introdusert ved denne fremgangsmåten ble dessuten gjort neglisjerbare i det at klassifiseringen ble benyttet til relative sammenligninger mellom målinger og simuleringer. Det ble derfor antatt at en eventuell unøyaktighet ville bli likt introdusert på begge datasettene og ikke påvirke den relative sammenligningen.

### 3.4 Elektriske, akustiske og mekaniske målinger

Fysiske målinger av et material sine egenskaper vil rent metodisk ofte fremstilles som fasit i sammenligning med teoretiske betraktninger av de fysiske egenskapene materialet representerer. Det er mange tilnærminger for å bestemme et piezoelektrisk material sine egenskaper ved hjelp av analytiske målemetoder.

#### 3.4.1 Elektriske målemetoder

Som det fremgår i avsnittene ovenfor er de endimensjonale modellene og FEMP alle uttrykk for elektriske egenskaper til det piezoelektriske elementet i form av admittans eller impedans. Målinger av admittans/impedans til det piezoelektriske elementet er derfor en nødvendig handling for å bestemme samsvar mellom teoretiske modeller og det virkelige elementets egenskaper. Metodisk kan elektriske målinger utføres ved å påtrykke en varierende spenning over elektrodene, mens strøm, spenning og fasevinkel måles (se fig 3.1).



Figur 3.1: Skjematisk oppsett for impedansmåling av et piezoelektrisk element. En kontrollert påtrykt oscillerende spenning påtrykkes elementet. Strøm, spenning og fasevinkel mellom disse måles. Sammen gir dette impedans og fasevinkel for elementet som funksjon av frekvens.

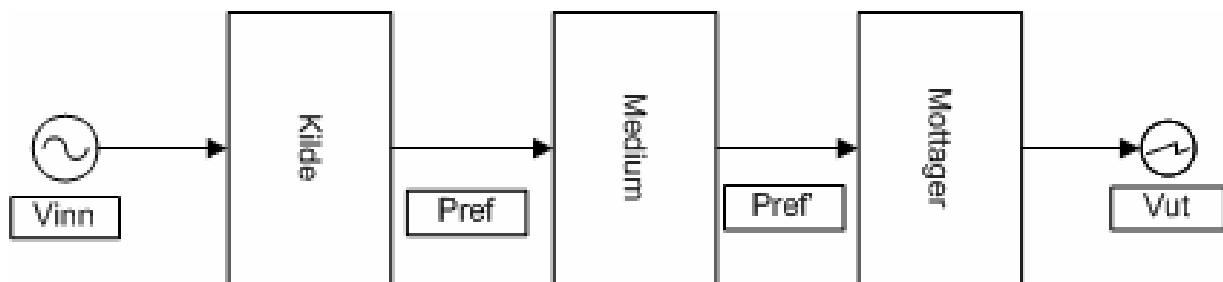
---

Elektrisk karakteristikk for utgangen til oscillator, samt måleprober for strøm og spenning vil sammen med transmisjonslinjen (målekablene) kunne påvirke målingene. Spesielt kapasitive og induktive effekter vil kunne forskyve måleresultatet. Nøyaktige data for måleoppstillingen er derfor viktig for å korrigere for eventuelle feil som innføres som følge av utstyr og metodikk. Målinger av elektriske egenskaper til et element i luft blir ofte brukt som referanse for simuleringer av egenskaper i vakuum. Elementet vil alltid ha kobling til luft og følgelig en belastning som følge av dette. I tillegg vil måleledningene sin innfesting i elektrodene ha en påvirkning på det elektriske resultatet. Påvirkning fra underlaget ved at elementet fysisk må støttes eller festes under målingene kan også medføre endringer i de målte resultatene. I [20] er både kobling til luft og virkningen av elektroder diskutert.

#### 3.4.2 Akustiske målemetoder

Målinger av de akustiske egenskapene til det piezoelektriske materialet er viktig for å vurdere og eventuelt verifisere hvordan teoretiske modeller uttrykker de elektro-akustiske egenskapene til det piezoelektriske materialet. Den akustiske utstrålingen eller følsomheten er hovedegenskapen til materialet i de fleste sammenhenger. Akustiske målinger under kontrollerte former er helt nødvendige for å vurdere egenskaper og om mulig fremskaffe kalibreringsdata for materialet. Metodisk vil det måtte antas at ytre påvirkninger enten kan elimineres, korrigeres for eller ses bort fra. I utgangspunktet er det to typer målinger som kan

foretas akustisk. Følsomhet i lydaksen som funksjon av frekvens, eller følsomhet på en gitt frekvens som funksjon av vinkel ut fra lydaksen. Avhengig av symmetri vil denne siste målingen ha en eller flere dimensjoner. Begge målingene kan utføres for elementet sin kildefølsomhet og mottakerfølsomhet, avhengig av om elementet er tenkt nyttet som sender, mottager eller begge deler.



Figur 3.2: Basert på kjente karakteristikk for referansekilde eller referansemottager kan en fritt valgt mottager eller kilde måles med hensyn på følsomhet. Med kjent Pref/Vinn kan det finnes teoretisk Pref/Vinn etter at mediets påvirkning er beregnet. Ved å måle Vut/Vinn og sette inn for uttrykket ovenfor kan dermed Vut/Pref finnes for en tilfeldig valgt mottager. Motsatt vil det være identisk (resiprok) fremgangsmåte for å finne Pref/Vinn for en fritt valgt kilde.

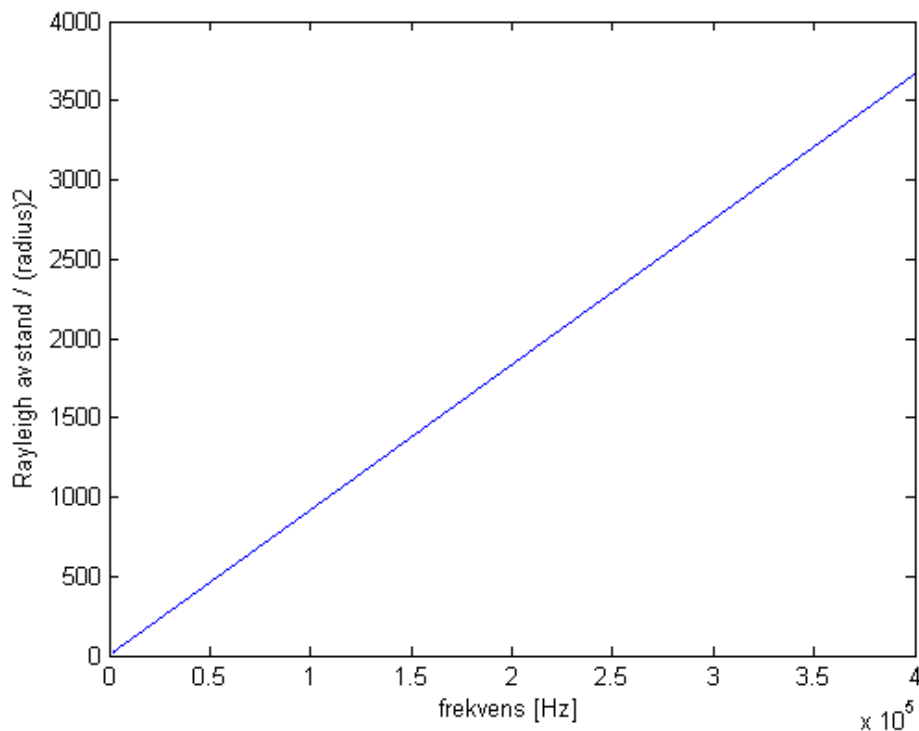
Før målinger av kildefølsomhet foretas må mottakermikrofonen med tilhørende måleelektronikk kalibreres ved bruk av en kjent referansekilde. Metodisk må tilsvarende kalibrering foretas for kilden ved måling av mottagerfølsomhet. Disse kalibreringene kan i seg selv være kilder til unøyaktigheter all den tid miljøpåvirkninger har innvirkning allerede på kalibreringsmålingene. En av de største utfordringene kan være ytre påvirkninger som ikke lar seg kvantifisere i måleresultatene, f. eks omgivelsesstøy.

Vinkelfordelingen til en kilde eller mottager kan bestemmes ved at kilde eller mottager i en måleoppstilling som vist i figur 3.2 dreies kontrollert rundt sin egen akse. Elementets form og symmetri bestemmer om dreieingen må foretas i flere omganger i to akser

#### 3.4.2.1 Geometri ved måleoppstilling

Måleoppstilling for akustiske egenskaper til elementet er avhengig av elementets egne fysiske egenskaper. Kildefølsomhet kan lettest måles i fjernfeltet til det utstrålende elementet. Årsaken til dette er at trykket langs lydaksen vil variere mellom lokale maksima og minima ut til fjernfeltet. Fjernfeltet tar til i en avstand  $r$  fra et element med radius  $a$ , når  $r/a \gg 1$ . Dette anses ivaretatt dersom målingene foregår i en avstand fra elementet som er lik eller større enn Rayleigh avstanden [21]. Rayleigh avstanden er gitt som

$$r_R \equiv \frac{\pi a^2}{\lambda} \quad (1.40)$$



Figur 3.3: Rayleigh avstand som funksjon av frekvens for en sirkulær stempelkilde. Gitt som Rayleigh avstand / radius<sup>2</sup>. Simulert for luft med lydshastighet 343m/s. (Tilsvare 20°C)

### 3.5 Vurdering av metoder

De endimensjonale modellene er i følge [17] gyldige for piezoelektriske skiver hvor diameter ( $d$ ) er tilstrekkelig mye større enn tykkelsen ( $t$ ). Dette er kvantifisert i et forhold  $d/t$  på mer enn 10. En rekke arbeider har vist at nøyaktigheten bedres med økende forhold, og at  $d/t$  på 10 i mange henseende er i knappeste laget. Når de piezoelektriske skivene påtrykkes en oscillerende spenning vil det svinge med flere ulike svingemoder. Når  $d/t$  øker blir det mindre avhengighet mellom svingemodene. Siden de endimensjonale modellene kun tar for seg en svingemode, vil ikke påvirkning mellom modene bli tatt hensyn til. Denne forenklingen blir mer unøyaktig for lave  $d/t$ -forhold enn for høye.

FEMP tar på sin side hensyn til større deler av egenskapene til det piezoelektriske materialet. Likevel er det en usikkerhet knyttet til bruk av FEMP i forhold til materialkonstanter som brukes. FEMP krever et komplett sett med konstanter. Konstantene som oppgis av produsentene er ofte mangelfullt dokumentert, og har store variasjoner. Sensitivitetsanalyser utført blant annet i [20] viser at den usikkerheten materialkonstanter oppgis med av produsent representerer til dels betydelige forskjeller i elektriske og akustiske egenskaper til materialene når de modelleres i FEMP. Flere arbeider [6],[5] og [2] har påpekt at materialkonstantene er en stor feilkilde ved bruk av FEMP, og leder til en foreløpig tese om at FEMP fremstiller piezoelektriske materialer på en måte som i stor grad representerer materialenes egenskaper, forutsatt at inngangsparametrene er riktige.

### 3.6 Usikkerheter og nøyaktighet

I praktiske arbeider er det en nødvendighet å ha kontroll på usikkerheter i så vel målemetoder som teoretiske tilnærminger. I undersøkelsene som ligger til grunn for denne oppgaven, både teoretiske og praktiske, ble usikkerhetene forsøkt dokumentert underveis. Dette er presentert som måleusikkerheter oppgitt i standardavvik [27] der hvor det er ansett hensiktsmessig og nødvendig. Andre steder er usikkerheten vurdert mer analytisk og presentert som en vurdering.

Standardavvik på additivform:

$$Z = ak^{(1)} + bk^{(2)} - ck^{(3)} + \dots \quad (1.41)$$

$$\sigma_z^2 = a^2 \sigma_{k^{(1)}}^2 + b^2 \sigma_{k^{(2)}}^2 + c^2 \sigma_{k^{(3)}}^2 + \dots \quad (1.42)$$

Standardavvik på produktform:

$$Z = a \frac{k^b \sqrt[l]{l}}{m^d} \quad (1.43)$$

$$\left(\frac{\sigma_z}{Z}\right)^2 \approx \left(b \frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{1}{c} \frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(d \frac{\sigma_m}{m}\right)^2 \quad (1.44)$$

## 4 Gjennomføring av målinger og simuleringer

Målinger brukt som grunnlag for disse arbeidene ble utført på laboratoriet til akustikkgruppen gruppen ved Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen.

Miljøforholdene som temperatur, luftfuktighet og tidvis lufttrykk er dokumenterte ved målinger hvor dette kan ha betydning for resultatene. Dette er ikke presisert i målingene, men fremgår av resultatene og beregningene der det er tatt hensyn til

For detaljert informasjon om instrumentering og utstyr som ble benyttet henvises til opplisting i Vedlegg 1.

### 4.1 Fysiske og mekaniske målinger

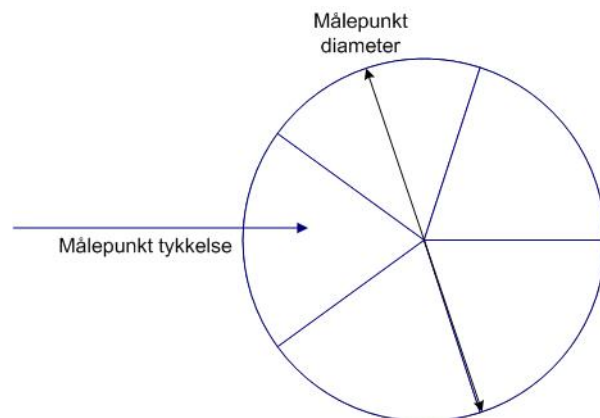
Diameteren til skivene ble målt på fem punkter jevnt fordelt rundt skivene. TESA digitalt skyvelære ble benyttet til dette.

Tykkelsen ble målt på fem tilfeldig valgte punkter på skivene med TESA mikrometerskrue.

Vekten av skivene ble målt med digital vekt type AND GF-3000. Denne ble lånt på elektronikk-laben ved Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen.

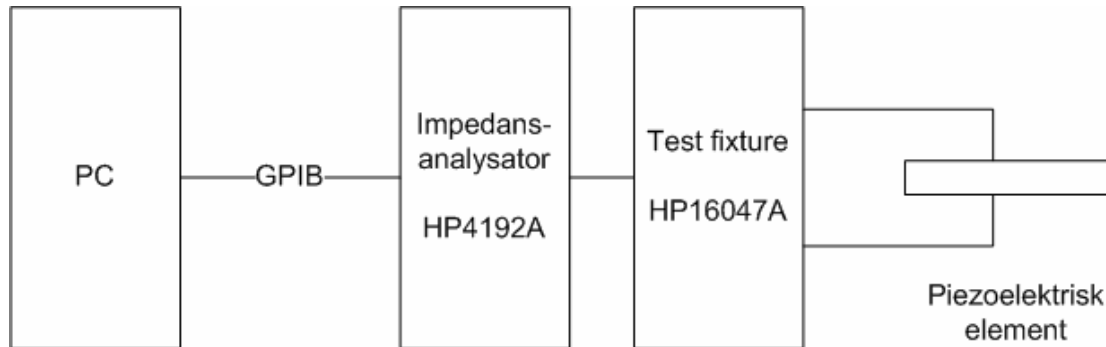
---

Figur 4.1: Eksempel på fordeling av målepunkter ved måling av tykkelse og diameter til elementene



## 4.2 Elektriske målinger av elementet

Elektriske egenskaper til de piezoelektriske skivene ble bestemt ved impedansanalyse over det aktuelle frekvensområdet. Målingene ble utført ved at impedansanalysatoren ble styrt i Matlab fra datamaskin tilkoblet med GPIB-kabel<sup>1</sup>. Eksempel på Matlab-fil for styring av en måleserie finnes i vedlegg 2.



Figur 4.2: Måleoppsett for impedansmålinger av piezoelektrisk element. Kontroll av impedansanalysatoren gjøres fra Matlab på PC ved å opprette et "håndtak" mot GPIB interface. Test Fixture er fysisk festet til impedansanalysatoren, men er funksjonsmessig en egen enhet.

---

Usikkerheter og feil kan prinsipielt bli introdusert i alle ledd i en måleoppstilling. I målingene som ble utført i forbindelse med denne oppgaven ble de enkelte usikkerhetene i forbindelse med målingene forsøkt vurdert isolert. Metodikk som ble valgt ved utførelse av målingene kunne derfor velges for å minimere eventuelle usikkerheter. Der hvor usikkerhetene ble vurdert til å være av signifikant betydning ble de kvantifisert og presentert som standardavvik i målingene.

Måleteknisk er det viktig at måleinstrumentene har god nok oppvarmingstid før målingene starter. Noen måleinstrumenter har erfaringsmessig en oppvarmingstid for interne referansekrystaller på opp mot 45 minutter avhengig av hvilken teknologi som benyttes for frekvensstabilisering av krystallene. Samtaler med kalibreringsverksteder for måleinstrumentering har underbygget denne problemstillingen. I arbeidene ble det derfor påsett at all måleinstrumentering sto på i tilstrekkelig tid før målinger tok til. Dokumentering av denne problemstillingen kan gjøres analytisk, og vil tydeligst fremtre ved kontroll opp mot en kalibrert frekvensreferanse.

Frekvensoppløsning som ble brukt i målingene var i hovedsak 100Hz og 50Hz. Måletiden var i mange tilfeller avgjørende for valget, mens kravet til nøyaktighet ble dominerende i andre tilfeller. Noen målinger ble dessuten utført med en oppløsning på 5Hz i de tilfellene hvor kravet til oppløsning var spesielt store i forbindelse med bestemmelse av materialkonstanter.

---

<sup>1</sup> Tilkoblingsmåten har blitt benevnt GPIB (General Purpose Interface Bus) i tidligere arbeider og i dagligtale under arbeider ved akustikk gruppen ved Universitetet i Bergen. GPIB er en parallell databus som tillater seriekobling og individuell adressering av flere enheter med maksimal avstand inntil 20 meter. Databusen er utviklet og benyttet i hovedsak for kontroll av instrumentering ved måleoppstillinger. I henhold til gjeldende standarder er korrekt betegnelse IEEE/IEC 60488. (Gyldig fra 2004). Frem til 2004 var gjeldende standard IEEE-488. Ulike produsenter av måleutstyr har utviklet egne bidrag til standarden som alle er mer eller mindre kompatible. Eksempler er HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus), og HS-488 (Texas Instruments ekvivalent databus)

#### 4.2.1 Fysisk tilkobling og oppstilling

Det piezoelektriske elementet måtte kobles til måleledningene for å kunne gjennomføre målinger. Fastlodning av ledninger til elektrodene ble vurdert som en stor usikkerhet med tanke på den påvirkningen det kan ha på målingene [5]. Basert på tidligere arbeider [4] ble det valgt å benytte en holder. Kontakt med elementet ble oppnådd ved hjelp av stive kobberledninger som lå an mot elementet ved hjelp av fjærspennet i kobberledningene. Teoretisk skulle elementet ideelt vært upåvirket fra omgivelsene, inkludert kobberledningene, under målingene. For å få en minimal fysisk påvirkning på elementet, ble det valgt å la elementet stå på høykant for å gi minst kontaktflate mot underlaget. Isopor ble valgt som materiale for denne understøttingen. For å få elementet til å være mest mulig akustisk upåvirket under målingene, ble det forsøkt å la elementet ha størst mulig avstand til reflekterende og støyende flater. Imidlertid måtte dette ønsket veies opp mot ønsket om å ha kortest mulig måleledninger for å unngå elektriske effekter fra disse.



Figur 4.3: Måleoppstilling for elektrisk måling av elementene med impedansanalysator

#### 4.2.2 Elektrisk tilkobling

Frekvenskarakteristikken til impedansanalysatoren skulle i en ideell situasjon være flat. I så fall skulle ikke målingene bli påvirket av frekvensavhengige effekter som følge av analysatoren. Imidlertid er dette en tilnærmet umulig ønskesituasjon for all måleapparatur. Analysatoren med test fixture har en dokumentert frekvenskarakteristikk [23]. Rutiner for å kompensere for frekvensavhengigheten i måleresultatene når analysatoren er benyttet sammen med test fixture er også dokumentert. Rutinene ble fulgt i arbeidene. Angivelse av verdier for impedans ved kortsluttet og åpen krets er inngangsverdier som impedansanalysatoren benytter for å beregne kompensasjonen for eventuelle frekvensavhengigheter i oppstillingen. Frekvensområdet det skulle måles over var med å bestemme hvilke frekvenser som skulle benyttes til denne 0-justeringen. I noen tilfeller var måleområdet større enn det analysatoren kan behandle med en justering. I disse tilfellene måtte målingene gjennomføres i flere omganger for mindre frekvensområder om gangen.



Tabell 4.1: Frekvensområder for angivelse av kalibreringsdata til impedansanalysator HP4192A med Test Fixture HP16047A

| Frekvensområder (Hz) | Kalibrering for kortsluttet krets  | Kalibrering for åpen krets  |
|----------------------|--|---|
| 5 - 500              | Kalibrering må utføres for hver enkeltfrekvens   |   |
| 500 - 100k           | Kortsluttet krets ved 100kHz gyldig for hele frekvensområdet   | Åpen krets ved 1MHz gyldig for hele frekvensområdet   |
| 100k - 1M            | Kortsluttet krets ved valgt frekvens gyldig for aktuell frekvens og alle lavere frekvenser i frekvensområdet |   |
| 1M – 10M             |  | Åpen krets ved valgt frekvens gyldig for aktuell frekvens og alle lavere frekvenser i frekvensområdet |
| 10M – 13M            | Kortsluttet krets ved 10MHz gyldig for hele frekvensområdet  | Åpen krets ved 10MHz gyldig for hele frekvensområdet  |

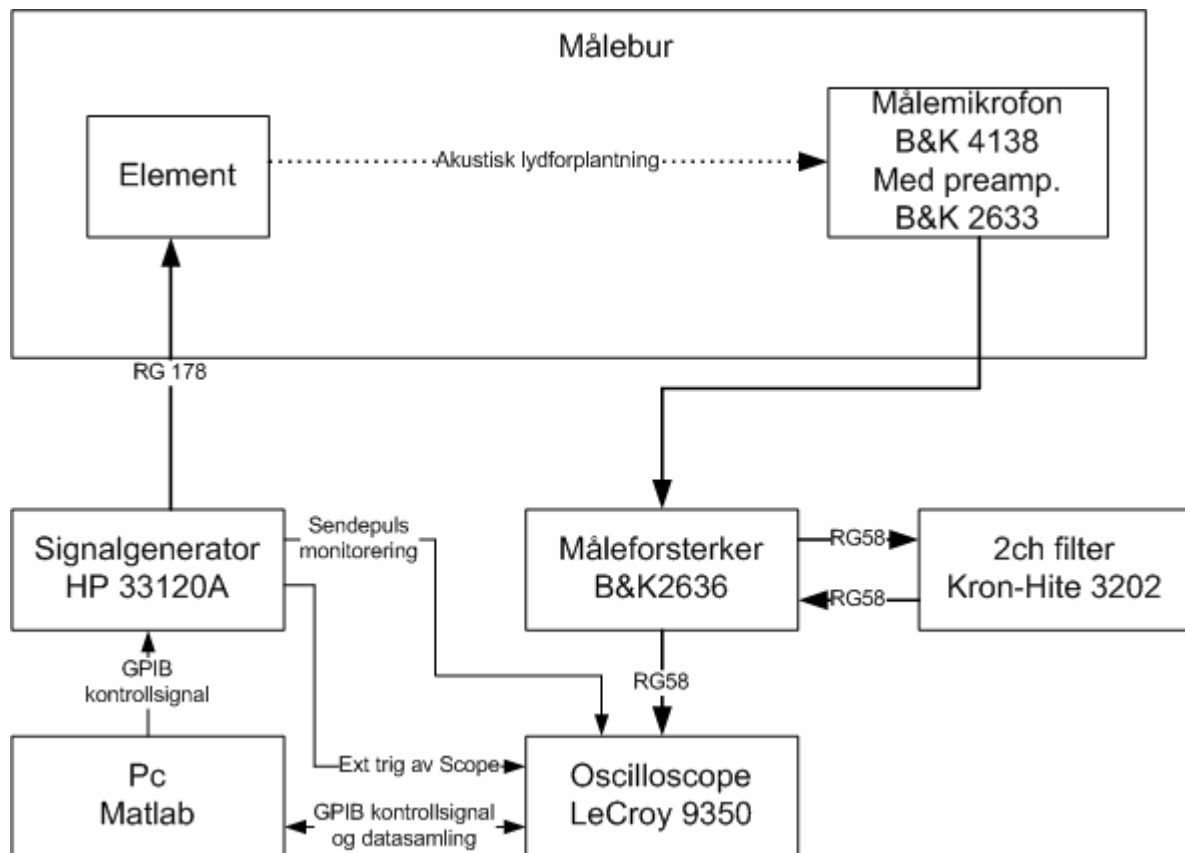
Kalibrering i henhold til tabell 4.1 slik det er beskrevet i [23] tok hensyn til ulineære effekter i måleutstyret. Måleledninger og stive kobberledninger som beskrevet i avsnitt 4.2.1 blir ikke tatt hensyn til i prosedyren slik den er beskrevet. Kortslutningspunktet og følgelig også punktet for åpne terminaler, er i følge prosedyren definert til å være terminalene til test fixturen. Denne prosedyren ble modifisert til at kortslutningen (og følgelig angivelse av åpen krets) ble gjort i enden av kobberledningene hvor elementet normalt ble festet. Impedansanalysatoren vil på den måten også kompensere for eventuell elektrisk påvirkning holderen sine ledninger har på måleresultatene. Kortslutning ble utført med krokodilleklemme over endene på kobberledningene.

### 4.3 Akustiske målinger

Akustiske målinger i luft ble utført med en måleoppstilling som tidligere har blitt benyttet tilsvarende i flere arbeider ved Fysisk institutt. Både programkode for styring av måleapparaturen og den fysiske oppstillingen i måleburet er opprinnelig satt sammen av Knappskog i forbindelse med hans Mastergrad [5]. Tilsvarende også for programkode for akustisk kalibrering av måleapparaturen og utrekning av kildefølsomhet til elementet. Programkoden er siden brukt og delvis modifisert og videreutviklet i arbeidene til Aanes [6]. Målingene i arbeidene som ligger til grunn for denne oppgaven har stort sett fulgt programkode slik den framkom av Aanes sine arbeider. Programkoden listet i Vedlegg 2 viser opphav der hvor den er utviklet eller kodet av andre.

Frekvensoppløsningen i målingene ble valgt til 100Hz som et kompromiss mellom måletid og kravet til nøyaktighet. Hver frekvensmåling tok rundt 5 sekunder slik målingene var satt opp. Tidsforbruket ble derfor urimelig høyt ved større oppløsning i frekvens, sett i forhold til nøyaktigheten som kunne tenkes oppnådd.

#### 4.3.1 Instrumentering ved akustiske målinger i luft



Figur 4.4: Skjematisk oppstilling av måleutrustning for akustiske målinger. Kontroll med apparaturen og innsamling av data foregår fra programkode i Matlab på tilkoblet PC. 2ch filter står funksjonelt mellom målemikrofonens forforsterker og måleforsterkeren, men er fysisk koblet til dedikert filter inn- og utgang på måleforsterkeren. Filteret er satt som båndpassfilter med en kanal satt til høypassfilter og en til lavpassfilter. Kanalene er internt i filteret seriekoblet.

I forkant av målingene ble måleoppstillingen kalibrert. Dette ble gjort ved å påtrykke målemikrofonen et kjent lydtrykk. Pistonfon av typen B&K 4228 ble benyttet til dette. Pistonfongen genererer et kjent lydtrykk ved en kjent frekvens. Spenningen dette lydtrykket genererte gav et uttrykk for mottagerfølsomheten til målemikrofonen og måleinstrumenteringen helt frem til avlesningspunktet.

Spenningen ble avlest på oscilloscopet, og måleforsterkeren sine innstillinger har derfor bare en relativ betydning. Måleforsterkeren ble justert til å gi best mulig avlesning på oscilloscopet, og ikke til å gi riktig avlesning på sin egen skala.

Under målingene ble signalgeneratoren satt til å gi en burst på gitt frekvens med en fast lengde i tid. For å få stabile målinger ble scopet trigget av sendepulsen. Til sammen medførte dette at målingene fra målemikrofonen relativt sett ble likt plassert på tidsaksen, og var like lange i tid. Scriptet som hentet data fra oscilloscopet ville dermed alltid detektere datasettet innenfor en gitt posisjon på tidsaksen. Oscilloscopet ble satt til å midle et valgt antall målinger, slik at Matlab fikk data ferdig midlet.

Scopet måtte justeres i følsomhet på spenningsaksen gjennom måleserien på grunn av variasjoner i frekvensrespons til elementet. Dette ble gjort ved at et utvalg av frekvenser i måleserien ble manuelt målt i forkant for å bestemme best mulig oppløsning, gitt i Volt/delestrek. Dette ble så lagt inn i Matlab-filen for styring av målingene slik at scopet endret skala underveis.

På grunn av frekvenskarakteristikken til elementet, ble pulsformen til det mottatte signalet svært forskjellig over frekvensområdet. På en ideell transmisjonslinje ville mottatt signal være likt som utsendt signal, bare dempet av transmisjonsmediet. Elementet hadde derimot en bestemt frekvenskarakteristikk som gjorde at dette ikke var tilfellet. I tillegg kom akustiske effekter fra refleksjoner som inntraff i måleburet, og som gjorde at mottatt signal på målemikrofonen kunne være en blanding av flere ulike lydforplantingsveier mellom elementet og målemikrofonen. Dette kunne gi seg utslag i en mottatt puls lengre enn utsendt puls i særlige tilfeller.

For å klare å analysere riktig mottatt puls, måtte et stabilt måleområde defineres. Den mottatte pulsen kunne variere mye fra startpunkt til endepunkt, men i prinsippet hadde den et område midt på pulsen hvor senderelementet hadde hatt nok tid til å innta en stabil svingetilstand. Dette området hvor elementet er i stabil svingetilstand (eng. Steady state) ble definert ved manuelle undersøkelser av utvalgte punktfrekvenser i måleserien. Deretter ble beskrivelsen av området for stabil svingetilstand satt inn i skript-filen som beregner kildefølsomheten.

Tilsvarende måtte også svingetilstanden til elementet sett fra den elektriske terminalen defineres. Hele måleoppstillingen skulle gi et svar på hva spenningen ble ut av måleforsterkeren med en kjent spenning inn på elementet. Påtrykt spenning på elementet fra generatoren som funksjon av frekvens varierte, fordi signalgeneratoren ikke er en 100% ideell spenningskilde. Ved å måle spenning inn på generatoren over hele frekvensområdet, kunne spenningen inn til elementet fastsettes som et definert stabilt svingeområde tilsvarende som for spenningen ut av måleforsterkeren.

Til sammen gav dette informasjon om spenning ut av måleforsterkeren og spenning inn til elementet som funksjon av frekvens. Sammenholdt med en bestemt mottagerfølsomhet for målemikrofonen med måleforsterker og filter, gav dette mulighet til å bestemme kildefølsomhet for elementet.

#### **4.3.2 Fysiske forhold ved måleoppstilling i luft**

Elementet måtte orienteres fysisk slik at påvirkningene fra omgivelsene ble minimalisert ved akustiske målinger. Den fysiske plasseringen av elementet var en av de viktige parametrene. All den tid elementet var symmetrisk og ikke hadde noen definert frem- eller bakside og følgelig ble antatt å stråle like mye i begge retninger var det viktig å ha en holder for å støtte opp elementet som ikke kunne gi forstyrrende akustiske refleksjoner. Det ble derfor besluttet å lage en holder som ivaretok behovet for en stabil retningsbestemt innretting av elementet, minimerte mulige reflekser i utstrålingsretningen til elementet, samt ivaretok behovet for tilkobling av måleledninger til elektrodene uten å måtte lodde på disse. Holderen ble konseptuelt skissert i samarbeid med førsteamanuensis Magne Vestrheim. Mekanisk bearbeiding av nylonskiven som utgjorde fundamentet til holderen ble utført på mekanisk verksted ved Fysisk Institutt etter arbeidstegninger som ble utarbeidet. Resterende deler av holderen, inkludert bøyler for mekanisk støtte av elementet og elektriske tilkoblinger ble utført som en del av arbeidene med forberedelser til målingene.

Elementholderen sin uforming var tilpasset for å passe enten i dreiemotor av typen MICOSSTEP, eller i holder produsert ved mekanisk verksted ved Fysisk Institutt. Begge holderene ble plassert til endes for mikrofonholderen med aksejustering i måleburet. Dette gav totalt sett mulighet for å justere oppstillingen i tre akser, samt dreie elementet rundt sin egen akse uten å fysisk flytte elementet eller mikrofonen fra sine holdere.

Basert på teorien antas det at et element av den typen som ble undersøkt i arbeidene, stråler mest i lydaksen som ligger vinkelrett på elektrodene og som er plassert i skivens origo. For å innrette elementet slik at målemikrofonen var plassert midt i aksen, ble elementet og mikrofonen justert til et relativt maksimum ved å endre mikrofonens plassering i to akser, parallelt med elementets elektroder. For å sikre at elementet og mikrofonen var parallelle, ble deretter mikrofonen justert langs lydaksen (slik at avstanden mellom element og mikrofon ble endret) mens det ble finjustert for å verifisere at mikrofonen fremdeles lå midt i lydaksen. Når mikrofonen kunne flyttes langs lydaksen og relative avlesninger hele tiden lå på et maksimum i forhold til justeringer på de vinkelrette aksene, var element og mikrofon justert så optimalt som måleoppstillingen kunne få til. Disse inntretningene måtte foregå ved at frekvens og avstand var avstemt slik at målingene hele tiden ble utført i fjernfeltet til elementet. I tillegg måtte de foregå på en frekvens som hadde stor nok akustisk utstråling til at de relative avlesningene gav et signifikant og lesbart utslag for variasjoner på og litt utenfor lydaksen. Som resultatene i neste kapittel viser, ble det operert med at serieresonnansfrekvens for første og andre radiale mode lå på henholdsvis 26.7kHz og 66.7kHz. Serieresonnansfrekvens for tykkelsesmoden lå på 200.0kHz. Teoretisk skulle kildefølsomheten til elementet være størst rundt disse frekvensene.

Definisjonsmessig blir kildefølsomhet oppgitt med avstand til kilden på 1meter. Måleburet som ble benyttet i arbeidene har en total lengde på 1.25meter. For å måle i fjernfeltet til elementet gav størrelsen på måleburet en praktisk begrensning på hvor høye frekvenser som kunne måles. For å teoretisk kunne måle over et så stort frekvensområde som mulig uten å havne i nærfeltet, ble avstand mellom målemikrofon og elementet satt til 1meter. Et annet forhold var at lydutbredelsen til elementet langs lydaksen var relativt smal i utstrekning. Fra teorien har vi definert -3dB, -6dB og første 0-punkt som de vinklene ut fra lydaksen hvor lydtrykket her redusert med henholdsvis 3dB, 6dB og hvor det har sitt første 0-punkt. Formel for dette finnes i [21] og [7].

Totalt gav disse fysiske betraktningene resultater som oppsummert i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Teoretiske fysiske størrelser for utstrålingen til en ideell stempelkilde med radius 37.523mm som stråler i luft temperatur 20°Celsius, tetthet 1.21kg/m<sup>3</sup> og lydastighet 343m/s. Angitte verdier er vinkel ut fra lydaksen, samt radius til lyd kjeglen i et snitt en meter fra den piezoelektriske skiven.

| Frekvens          | Rayleigh avstand | -3dB vinkel  | -6dB vinkel  | Nullpunkt vinkel |
|-------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|
| R1 fs (26.7kHz)   | 0,344m           | 5,05°/0.088m | 6,93°/0.121m | 12,04°/0.213m    |
| R2 fs (67.7kHz)   | 0,861m           | 2,01°/0.035m | 2,77°/0.048m | 4,79°/0.084m     |
| TE1 fs (200.0kHz) | 2,579m           | 0,67°/0.012m | 0,92°/0.016m | 1,60°/0.028m     |

Måleburet benyttet i arbeidene gav ikke fysisk rom for måling av akustisk utstråling til elementet i fjernfeltet for tykkelsesresonansmoden. Måleoppstilling med en avstand mellom målemikrofon og element på mer enn Rayleigh avstand for tykkelsesmoden (2,58m ref tabell 4.2) krevde derfor en oppstilling utenfor måleburet. Denne oppstillingen ble gjennomført ved at målemikrofonen ble plassert i måleburet mens elementet ble flyttet ut på en tralle. Størrelsen på lydstrålen var etter teorien svært liten på frekvenser rundt tykkelsesmoden, og kravet til innretning av måleoppstillingen ble derfor stort. Elementet ble plassert på en tralle med hjul for å eliminere avvik i høyde når avstanden ble endret. Justering ble foretatt ved å sette trallen med elementet mindre enn én meter fra mikrofonen. Elementet og mikrofonen ble plassert med senter i samme høyde referert til gulvet. Vertikal vinkel på elementet i holderen ble så justert til maksimalt utslag. Det viktigste var å få elementet til å stå loddrett slik at ikke lyd kjeglen bommet på mikrofonen når avstanden ble økt. Med andre ord måtte lydaksen være mest mulig horisontal. Sideveis var justeringen svært enkel all den tid mikrofonholderen var montert på en travers i måleriggen.

Etter innretning på mindre enn en meter, kunne trallen med elementet rulles bakover til større avstand, og maksima deretter gjenfinnes med justering av mikrofonen sideveis, eller alternativt ved dreining av elementet rundt egen akse. Dermed var det så godt som mulig bevist at lydaksen var horisontal. Mikrofonen ble forsøkt justert i høyden ved hjelp av justeringsskrue på måleriggen, men dette gav liten effekt, og understreket dermed at elementet var loddrett oppstilt innenfor den nøyaktigheten som måleoppstillingen kunne gi.

Forstyrrelser i rommet under målingene var vanskelig å bestemme. Akustisk antas det at lite eller ingen av støyen fra støykilder i rommet påvirket frekvensområdet det ble målt på. Likevel er dette noe som i fremtiden bør evalueres nærmere ved at det etableres metoder for å fastsette bakgrunnstøyen. Luftstrømninger vil det dessuten være en del av rundt en slik åpen måleoppstilling, noe som i tidligere arbeider har vist seg å gi store påvirkninger på akustiske måleresultater. Sammenlignet med en helt åpen oppstilling gav målemikrofonens plassering inne i buret dessuten dempning av både akustiske- og strømningseffekter. Ytterligere innkledning av målemikrofonen ville muligens gi bedre resultater uten at dette er vurdert i dette arbeidet grunnet fysisk begrenset plass på akustikklaboratoriet.



Figur 4.5: Måleoppstilling i luft for akustiske målinger. Avstand mellom element og målemikrofon er 269,5cm. Mikrofonen står på måleriggen i måleburet med justeringsmuligheter i 3 akseretninger, mens elementet står i en holder hvor det kan dreies rundt egen akse uten å påvirke avstand til målemikrofon.

Det var hele tiden under arbeidene et ønske om å benytte elementene i en måleoppstilling i vann. Selv om arbeidene i luft ble for tidkrevende til at det ble rom for eksperimenter i vann ble det gjort en del betraktninger på de fysiske forholdene i vann kontra i luft. Til sammenligning tas noen av disse betraktningene med i tabell 4.3

Tabell 4.3: Teoretiske fysiske størrelser for utstrålingen til en ideell stempelkilde med radius 37.523mm som stråler i ferskvann med temperatur 20°Celsius og lydhastighet 1481m/s

| Frekvens          | Rayleigh avstand | -3dB vinkel   | -6dB vinkel    | Nullpunkt vinkel |
|-------------------|------------------|---------------|----------------|------------------|
| R1 fs (26.7kHz)   | 0.080m           | 22,34°/0.411m | 31.401°/0.610m | 64.28°/2.076m    |
| R2 fs (67.7kHz)   | 0.200m           | 8.74°/0.154m  | 12.03°/0.213m  | 21.12°/0.386m    |
| TE1 fs (200.0kHz) | 0.597m           | 2.91°/0.051m  | 3.99°/0.070m   | 6.91°/0.121m     |

## 4.4 Simuleringer av piezoelektriske elementer

Simuleringsmodellene som er benyttet i arbeidene er teoretisk beskrevet i kapittel 3. Metodisk har bruken av disse basert seg på implementering i Matlab. De endimensjonale modellene som er forholdsvis enkle rent matematisk har blitt skriptet direkte i Matlab. Eksempel på Matlab filer som har blitt benyttet til dette ligger vedlagt i vedlegg 2. Enkelte av disse filene er satt opp av Aanes i forbindelse med hans mastergradsarbeid [6] og er velvillig meddelt. Egen implementering i Matlab har blitt sammenlignet med Aanes sitt arbeide for å sikre at to uavhengige arbeider har gitt samme resultat. Eksempelfilene i vedlegg 2 vil derfor kunne stamme både fra egne arbeider og fra Aanes sine arbeider. Der hvor filene ikke er egenutviklet er dette angitt i selve filen.

Simuleringer utført i FEMP er utført med støtte av programmet sin vedlagte brukerveiledning, samt [1] der hvor en dypere forståelse av problemstillingene var nødvendig. Kjetil D. Lohne var også til stor hjelp i starten av arbeidene med å gi en innføring i bruk av FEMP basert på egne erfaringer med programvaren i forbindelse med sitt mastergradsarbeide. Eksempelfiler fra FEMP kjøring i Matlab er vedlagt i vedlegg 2.

I hovedsak ble alle simuleringer utført med enten 50Hz eller 100Hz oppløsning i frekvens. Dette ble valgt som et kompromiss mellom simuleringstid og nøyaktighet. Dobling av nøyaktigheten doblet simuleringstiden i Matlab, noe som gav urimelig lange simuleringstider sammenlignet med nøyaktigheten det medførte. Spesielle tilfeller hvor kravet til nøyaktighet var stort, f. eks ved bestemmelse av enkelte konstanter, ble en større oppløsning i noen tilfeller benyttet over snevrere frekvensområde.

Den viktigste parameteren i forhold til nøyaktighet, har imidlertid vist seg å være detaljeringsgraden på elementinndelingen når det fysiske elementet skal defineres. Denne inndelingen er gitt i FEMP av antall elementer pr. bølgelengde ved en selvvalgt frekvens. Dersom denne frekvensen defineres til høyeste frekvensen i simuleringen vil nøyaktigheten følgelig være bedre for alle lavere frekvenser i simuleringen.

Kravene til nøyaktighet i forhold til elementer pr bølgelengde ble vurdert ut i fra tidligere arbeider. Fra [1] fremgår 5 elementer pr bølgelengde som hensiktsmessig for å gi en god nøyaktighet når dette er valgt for høyeste frekvens i simuleringene. 6 elementer pr bølgelengde ble valgt som utgangspunkt for simuleringene i arbeidene med denne oppgaven. Datamengden som må prosesseres øker drastisk ved flere elementer, og en økning gjorde at maskinvarekapasitet ikke tillot simulering over det ønskelige frekvensområdet. Av samme grunn er antallet elementer pr. bølgelengde redusert for enkelte av simuleringene i et forsøk på å øke frekvensområdet. For ytterligere vurderinger av nøyaktigheter til FEMP vises det til tidligere arbeider [1], [2], og [6].

### 4.4.1 FEMP og Matlab

Versjon 6.5 (Release 13) Student Edition av Matlab ble benyttet initielt i arbeidene med denne oppgaven, sammen med FEMP U3.0. Begrensningene i funksjonaliteten til studentversjonen fordret imidlertid at en annen programvareversjon av Matlab burde benyttes. Særlig på grunn av liten fleksibilitet i filformater for eksport av både bilder og data. Matlab opererer med en påstått bakoverkompatibilitet på nye utgaver av programvaren. Dette viser seg i praksis ikke å være tilfellet, og FEMP U3.0 har i tidligere arbeider vist seg å fungere dårlig på Versjon 7.0 og nyere av Matlab. FEMP U3.0 ble korrigert for dette forholdet, og kjører etter dette på Matlab versjon 7.0 (Release 14). Etter disse endringene er programmet gitt versjonsnummer FEMP. I senere arbeider [6] er det benyttet en nyere versjon av FEMP kalt U3.2. Felles for alle disse endringene er at de ikke griper inn i de matematiske beregningene i koden, men bare tilpasser denne til nye og oppdaterte funksjoner i Matlab. Matlab utfaser ofte

funksjoner og erstatter disse med andre funksjoner ved oppdateringer. De nye funksjonene har gjerne har nye og utvidede bruksområder samtidig som de dekker funksjonaliteten til de utfasede funksjonene.

De fleste simuleringene som har blitt gjort i arbeidet med denne oppgaven har blitt gjort i Matlab Versjon 7.5.0.342 (Release2007b). Da en lisensiert fullversjon av Matlab var stilt til rådighet i arbeidene var det ønskelig å benytte en så ny versjon av Matlab som mulig.

Matlab har betydelig øket reknepapasiteten i nyere versjoner, dvs gjort de mindre minne- og prosessorkrevende. Dette var ønskelig å utnytte i arbeidene siden minne- og prosessorkapasitet har vist seg å være begrensningen i simulering av større piezoelektriske strukturer i FEMP.

Det ble forsøkt å kjøre FEMP U3.1 med Matlab R2009a som var nyeste lanserte versjon høsten 2009. Til dels mange og graverende feilmeldinger gjorde bruken av R2009a vanskelig. Det ville kreve mye mer innsikt i kodestrukturen i FEMP å rette kommandoer og syntaxer i FEMP U3.1 slik at den lot seg kjøre på R2009b. Selv om Matlab i stor grad lister hvilke kommandoer i programkoden til FEMP U3.1 som ikke er gyldige i gjeldende Matlab versjon og dertil foreslår alternative kommandoer som *kan* erstatte den ukurante kommandoen, er det ikke alltid trivielt å foreta et bytte.

Etter noe empirisk testing av Matlab 2009 og 2008 versjoner ble det landet på R2007b. Denne tillot vesentlig større deler av FEMP U3.1 sin programkode å kjøre før feilmeldinger dukket opp. De feilene som dukket opp ble håndtert ved at enkelte av funksjonene i programkoden til FEMP U3.1 ble endret, delvis etter forslag fra Matlab, og delvis etter egen vurdering. Dette resulterte i en modifisert versjon av FEMP U3.1<sup>1</sup> som ble brukt i arbeidene. Det er fremdeles noen funksjoner i denne modifiserte versjonen av FEMP som ikke kjører feilfritt på Matlab R2007b, men disse feilene dukker opp i forbindelse med plotting av resultater og er således ikke av betydning for utrekningene av den piezoelektriske problemstillingen FEMP er satt til å løse.

#### **4.4.2 Begrensninger i maskinvare**

Hvor nøyaktig simuleringen i FEMP skal være og hvor stort frekvensområde denne nøyaktigheten skal være gyldig, bestemmes av det piezoelektriske elementet sin oppdeling i endelige elementer. Disse valgene bestemmer hvor stor problemstillingen blir i form av reknekraft og minne. Som et talleksempel viser det seg at en inndeling i rundt 1000 endelige elementer i strukturen gir rundt 10.000 frihetsgrader i løsningen. Dette er særdeles minnekrevende. Om simuleringen blir for stor vil maskinvaren ikke klare å allokere nok minneressurser og Matlab vil stanse utrekningen og gi feilmelding. Ofte vil dette skje etter at store deler av den programmerte simuleringen er løst, gjerne etter flere timer med rekning. Arbeidsmetodisk har dette gitt store utfordringer med mye tapt arbeidstid i simuleringer som ikke har gitt resultat.

##### **4.4.2.1 Erfaringslæring med ulik maskinvare**

Generelt har det vist seg at tilgjengelig minne er den egentlige begrensningen for størrelsen på problemstillingene som kan løses med FEMP. Prosessorkraft har vist seg å spille en stor rolle når det gjelder tiden utrekningene tar. Imidlertid har ikke mangel på prosessorkraft stanset utrekningene. Minne har derimot vist seg å være den vanligste feilen. Med raskere prosessor har det likevel tatt kortere tid før minneproblemene har vist seg, og dermed har simuleringen kunne blitt omdefinert uten å tape så mye reknetid.

---

<sup>1</sup> I ettertid har FEMP U3.2 blitt tilgjengelig. Endringsloggen fra U3.1 til U3.2 indikerer at forskjellene i programwareversjonene tilsvarer de endringene som ble gjort i dette arbeidet. FEMP U3.1-modifisert her tilsvarer dermed FEMP U3.2.



I arbeidene har tre ulike datamaskiner med til sammen fem ulike maskinvarekonfigurasjoner blitt testet. Alle maskinkonfigurasjonene har kjørt 32 bits operativsystem fra Microsoft. En konfigurasjon er kjørt med Microsoft Vista mens de fire andre har kjørt Microsoft XP. Begrensningen i et 32bits operativsystem er at det største fysiske minneområdet som kan adresseres er på 4GB. Mer RAM enn 4GB kan derfor ikke nyttes og er bortkastet. Dette gjelder også for virtuelt minne som settes opp på harddisk, slik at total mengde minne som kan nyttegjøres likevel bare er 4GB uavhengig av fordeling mellom fysisk og virtuelt minne. I tillegg vil alltid operativsystemet reservere 2GB minne til eget bruk. Tilgjengelig minne for andre applikasjoner er derfor i utgangspunktet maksimalt 2GB (på deling mellom alle applikasjonene)

Hovedtyngden av arbeidene ble utført på en maskin med 1GB fysisk minne. Dette ble senere utvidet til 2GB for å klare simuleringer over et større frekvensområde. Erfaringsmessig klarer ikke Matlab å utnytte virtuelt minne likeverdig som fysisk minne. Dette gav seg utslag i at maskinkonfigurasjonen med 2GB fysisk minne og 2GB virtuelt minne kunne modellere en større problemstilling enn samme maskinen konfigurert med 1GB fysisk minne og 3GB virtuelt minne.

De største problemstillingene (kildedefølsomhet i luft) ble forsøkt simulert på to ulike maskiner med 4GB fysisk minne. En maskin kjørte med Microsoft XP operativsystem og 4GB fysisk minne. Denne maskinen gav overraskende lite ekstra kapasitet sammenlignet med maskinen med 2GB fysisk minne. Grunnen var trolig at maskinen kjørte mange minne-intense applikasjoner i bakgrunnen. Denne maskinen ble derfor ikke benyttet i arbeidene. Størst kapasitet til store problemstillinger gav maskinen med 4GB fysisk minne og Microsoft Vista operativsystem. Denne var helt ny, og hadde ingen tilleggsprogrammer installert utover operativsystemet, nettleser og Matlab. Denne maskinen var bare tilgjengelig i en kort periode, og ble benyttet til å modellere de største problemene med utstråling i luft.

Store problemstillinger i modalanalyse ble likevel vanskelig å løse da FEMP ikke klarte å konvergere løsningen med det antall egenvektorer som er tilgjengelig. Selv om antallet egenvektorer settes til 800 som er det meste FEMP kan ha, viste det seg at enkelte problemstillinger ikke ville la seg løse. Dette gav seg utslag i at etter 800 egenvektorer var utreknet uten at løsningen var konvergere mot et resultat, startet utrekningen på nytt for de siste 3-400 egenvektorene. Slik fortsatte løsningen å gå i sirkler. Denne sirkelen ble til slutt brutt av at fysisk minne tok slutt. Om dette skyldes måten FEMP og Matlab håndterer minne på i denne prosessen eller minnelekkasje er uvisst. Uansett medførte det at problemet var uløslig. Eksempel på en problemstilling som ikke lot seg løse, men som gav dette symptomet er som følger:

- Modalanalyse fra 0-1200kHz med 500Hz oppløsning for element 1.
- 4 elementer pr bølgelengde ved 800kHz
- 800 egenvektorer

Denne problemstillingen gikk i sirkel i totalt nesten syv timer før utrekningen stanset på grunn av feilmelding om for lite minne. I løpet av denne tiden hadde anslagsvis 5500 egenvektorer blitt utreknet. Simuleringen ble forsøkt på maskinen med 3GB fysisk minne.

Operativsystemene Vista og XP har begge muligheter til å konfigurere redusert minnebruk, slik at 1GB reserveres operativsystemet mens resterende (inntil 3GB) fristilles til applikasjoner<sup>1</sup>. Erfaringen med denne settingen var at det ikke var forenlig med kjøring av Matlab. Operativsystemet ble så tregt i seg selv at maskinen fikk tendens til å ville låse seg.

---

<sup>1</sup> Denne funksjonen kalles "3GB switch" og settes som en oppstartsparemeter i boot.ini filen i operativsystemet.

Dette gjaldt både Vista og XP. Til og med maskinen som bare hadde Vista og nettleser installert utover Matlab hadde store problemer med grunnleggende funksjoner i med bare 1GB minne allokert. Med en prosessorintensiv problemstilling i FEMP på toppen av et operativsystem som har begrenset med ressurser til egen bruk låste begge maskinene seg i denne situasjonen. Det kan hende maskinen ville ha klart å løse problemet med nok tid til rådighet, men dette var utenfor rimelighetens grense. Fra før viste erfaringsdata at en utrekning i FEMP med 2GB fysisk minne og tilnærmet 100% bruk av tilgjengelige ressurser på maskinen tok en utrekning inntil 6 timer.

Som en konklusjon på erfaringene kan nevnes at problemstillinger i FEMP ble lettest kjørt på maskinvare med mest mulig fysisk minne tilgjengelig, og med en minimal mengde programmer installert. Allokering av kun 1GB fysisk minne til operativsystemet gav ingen effekt da det medførte at operativsystemene gikk så sakte at utrekningene ikke lot seg gjennomføre.

#### 4.5 Nøyaktighet til materialkonstanter

I tidligere arbeid av Fardal [3] ble materialkonstanter oppgitt med seks siffer etter komma for å ha en nøyaktighet på 1ppm i sensitivitetsanalysene av FEMP. Disse materialkonstantene ble flere steder i arbeidene med denne oppgaven benyttet både som inngangsverdier til simuleringer og som referanse for sammenligninger. Omrekning mellom ulike sett med materialkonstanter for de ulike simuleringsmodellene medførte at flere konstanter indirekte kunne inngå i en konstant på den formen den ble brukt. Antallet desimaler vil flere steder bære preg av antall desimaler i Fardal sine arbeider.

Frekvensoppløsning på 50Hz i elektriske målinger bestemmer nøyaktigheten for de konstantene som ble funnet fra målinger i arbeidene med denne oppgaven. Konstanter fra produsent er ofte oppgitt uten nøyaktighet direkte, men produsentene opererer ofte med til dels store usikkerheter i størrelsesorden flere %. Dette er belyst mer i [2]. I arbeidene med denne oppgaven var konstantene ofte et produkt av flere inngangsverdier, satt sammen av alle kildene ovenfor i omrekningene. Nøyaktigheten ble derfor ofte bestemt av den udokumenterte nøyaktigheten til produsentdata. Sammenligning med konstanter fra målinger eller produsent gav imidlertid et urimelig forhold mellom antall desimaler. Bruken av desimaler i presentasjonene er ikke helt konsekvent, men baserer seg på en tilpassing av nøyaktigheten uten at denne er tallfestet for hver enkelt konstant. Imidlertid er nøyaktigheten til materialdataene som ble konkludert som beste tilpassing basert på relative endringer av materialkonstanter fra Fardal sine arbeider [3]. Konstantene har derfor mange siffer etter komma, selv om de flere steder er avkortet for mer hensiktsmessig presentasjon.

## 5 Resultater

Resultatene fra arbeidene er hovedsakelig presentert uten detaljert henvisning til fremgangsmåte, da denne fremkommer av kapitlene ovenfor. Vurdering og diskusjon av resultatene er samlet i senere kapittel, bortsett fra i de tilfellene hvor resultatene krever forklaring fortløpende for å gi mening eller sammenheng.

I arbeidene er det tatt utgangspunkt i fem tilgjengelige piezoelektriske skiver av typen PZT-5A. Det er ikke kjent at disse eller tilsvarende skiver har blitt undersøkt i tidligere arbeider. Sammenlignbare arbeider i nær fortid ved Institutt for fysikk og teknologi [5], [2], [6], [4] og [3] har alle benyttet piezoelektriske skiver med mindre fysiske størrelser og høyere diameter/tykkelseforhold enn i dette arbeidet. Mangelen på direkte relevant sammenligningsgrunnlag fra de ovenfornevnte arbeidene har derfor vært styrende for dokumentasjon av resultatene i dette arbeidet.

### 5.1 Målte fysiske egenskaper

I tabellene nedenfor presenteres elementenes fysiske mål og størrelser slik de fremkommer fra målinger.

---

Tabell 5.1: Tykkelse [mm] på hvert av de fem PZT-5A elementene i arbeidene

|           | Målepunkt 1 | Målepunkt 2 | Målepunkt 3 | Målepunkt 4 | Målepunkt 5 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Element 1 | 10,014      | 10,022      | 10,028      | 10,027      | 10,018      |
| Element 2 | 10,008      | 10,004      | 10,008      | 10,016      | 10,022      |
| Element 3 | 10,042      | 10,034      | 10,026      | 10,039      | 10,040      |
| Element 4 | 10,018      | 10,029      | 10,039      | 10,024      | 10,022      |
| Element 5 | 10,038      | 10,017      | 10,036      | 10,026      | 10,029      |

---

For å få et tilfeldig utvalg er målepunkt valgt tilfeldig fordelt rundt elementene.

---

Tabell 5.2: Diameter [mm] på hvert av de fem PZT-5A elementene i arbeidene

|           | Målepunkt 1 | Målepunkt 2 | Målepunkt 3 | Målepunkt 4 | Målepunkt 5 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Element 1 | 75,05       | 75,05       | 75,04       | 75,04       | 75,05       |
| Element 2 | 75,09       | 75,09       | 75,05       | 75,04       | 75,08       |
| Element 3 | 75,07       | 75,05       | 75,06       | 75,03       | 75,08       |
| Element 4 | 75,08       | 75,12       | 75,08       | 75,08       | 75,16       |
| Element 5 | 75,03       | 75,04       | 75,11       | 75,05       | 75,02       |

---

Tabell 5.3: Vekt [g] til hvert av de fem PZT-5A elementene i arbeidene

|           | Vekt   |
|-----------|--------|
| Element 1 | 341,55 |
| Element 2 | 341,22 |
| Element 3 | 342,90 |
| Element 4 | 343,06 |
| Element 5 | 341,58 |

Tabell 5.4: Fysiske størrelser til de fem PZT-5A elementene i arbeidene. Standardavvik for måleserier samt usikkerhet for måleinstrumentene er inkludert i oppgitte usikkerheter

|           | Tykkelse [mm]        | Diameter [mm]      | Vekt [g]          | Tetthet [ $\text{kg/m}^3$ ] |
|-----------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| Element 1 | $10,0218 \pm 0,0055$ | $75,046 \pm 0,005$ | $341,55 \pm 0,01$ | $7704,8 \pm 8,7$            |
| Element 2 | $10,0116 \pm 0,0069$ | $75,070 \pm 0,023$ | $341,22 \pm 0,01$ | $7700,3 \pm 10,3$           |
| Element 3 | $10,0362 \pm 0,0060$ | $75,058 \pm 0,019$ | $342,90 \pm 0,01$ | $7721,7 \pm 9,6$            |
| Element 4 | $10,0264 \pm 0,0078$ | $75,104 \pm 0,036$ | $343,06 \pm 0,01$ | $7723,4 \pm 12,1$           |
| Element 5 | $10,0292 \pm 0,0081$ | $75,050 \pm 0,035$ | $341,58 \pm 0,01$ | $7699,0 \pm 12,1$           |

I følge produsent [24] er tettheten til materialet PZT-5A oppgitt til  $7750 \text{ kg/m}^3$ . Dette gir umiddelbart et avvik i materialegenskaper i forhold til den målte og oppgitte tettheten. I disse betraktningene er ikke elektrodene tatt hensyn til. Slik det fremkommer i [2] vil elektrodene ha en tetthet på  $7000 \pm 2000 \text{ kg/m}^3$  og ha en tykkelse på  $7\text{-}15 \mu\text{m}$ . Elektrodene vil dermed utgjøre maksimalt 0,30% av tykkelsen til elementet. Tettheten til elementet vil tilsvarende bli påvirket med maksimalt 0,002% om elektrodene tas hensyn til. Til sammenligning er usikkerheten i målingene av tettheten til elementet 0,11% når elektrodene neglisjeres.

Tabell 5.5: Relativt avvik i tetthet mellom målte verdier og verdier oppgitt av produsent for de fem PZT-5A elementene i arbeidene

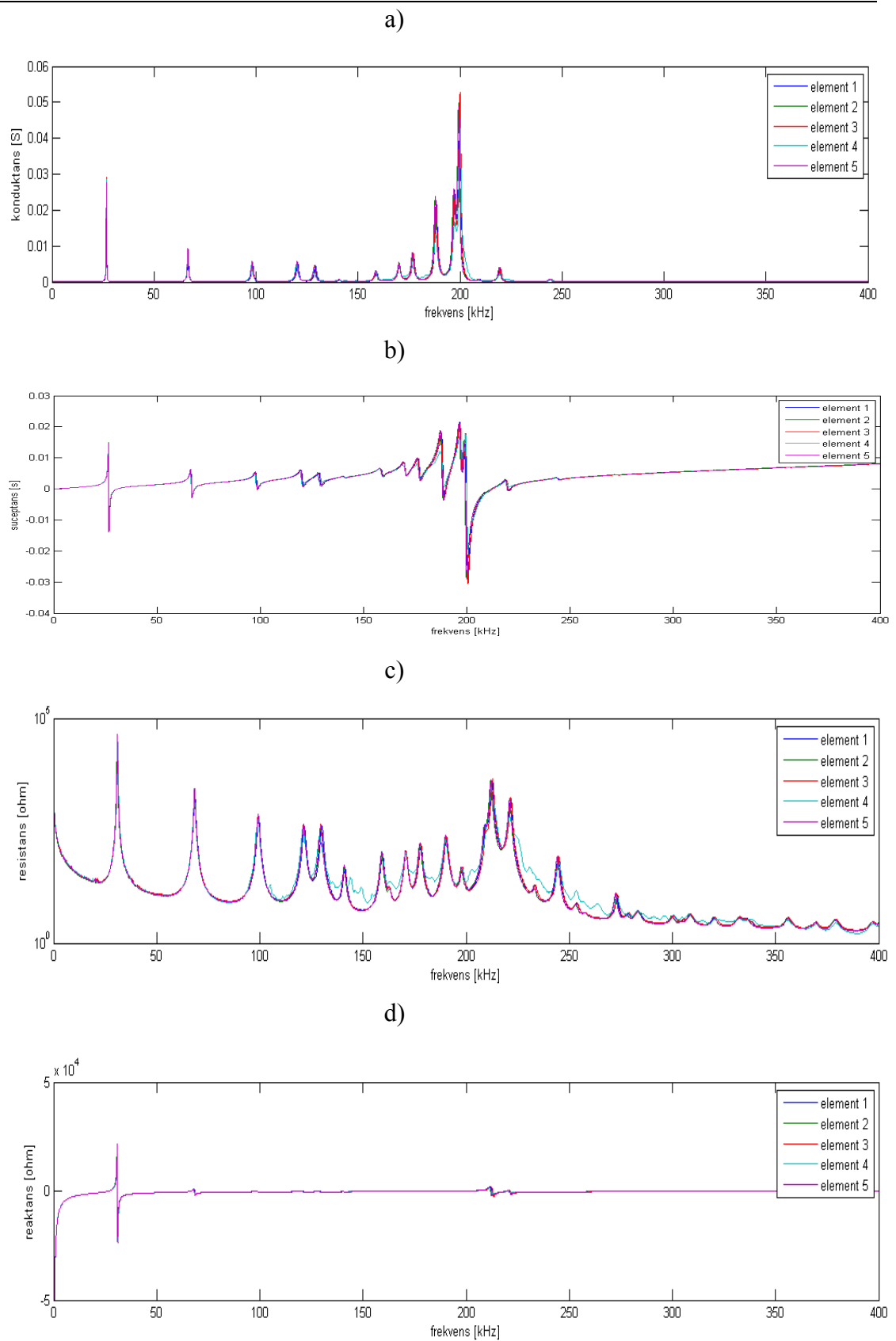
|           | Tetthet [ $\text{kg/m}^3$ ] (fra produsent) | Tetthet [ $\text{kg/m}^3$ ] (målt) | Relativt avvik [%] |
|-----------|---|------------------------------------|--------------------|
| Element 1 | 7750  | 7704,8±8,7                         | 0,583              |
| Element 2 | 7750  | 7700,3±10,3                        | 0,641              |
| Element 3 | 7750  | 7721,7±9,6                         | 0,365              |
| Element 4 | 7750  | 7723,4±12,1                        | 0,343              |
| Element 5 | 7750  | 7699,0±12,1                        | 0,658              |

Tabell 5.6: Relative usikkerheter for de fysiske størrelsene til de fem PZT-5A elementene i arbeidene. Både måleusikkerheter og usikkerheter i måleinstrumentene er medregnet

|           | Usikkerhet tetthet [%] | Usikkerhet tykkelse [%] | Usikkerhet diameter [%] | Usikkerhet vekt [%] |
|-----------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Element 1 | 0,112                  | 0,077                   | 0,041                   | 0,003               |
| Element 2 | 0,134                  | 0,088                   | 0,051                   | 0,003               |
| Element 3 | 0,125                  | 0,081                   | 0,047                   | 0,003               |
| Element 4 | 0,156                  | 0,095                   | 0,062                   | 0,003               |
| Element 5 | 0,157                  | 0,098                   | 0,062                   | 0,003               |

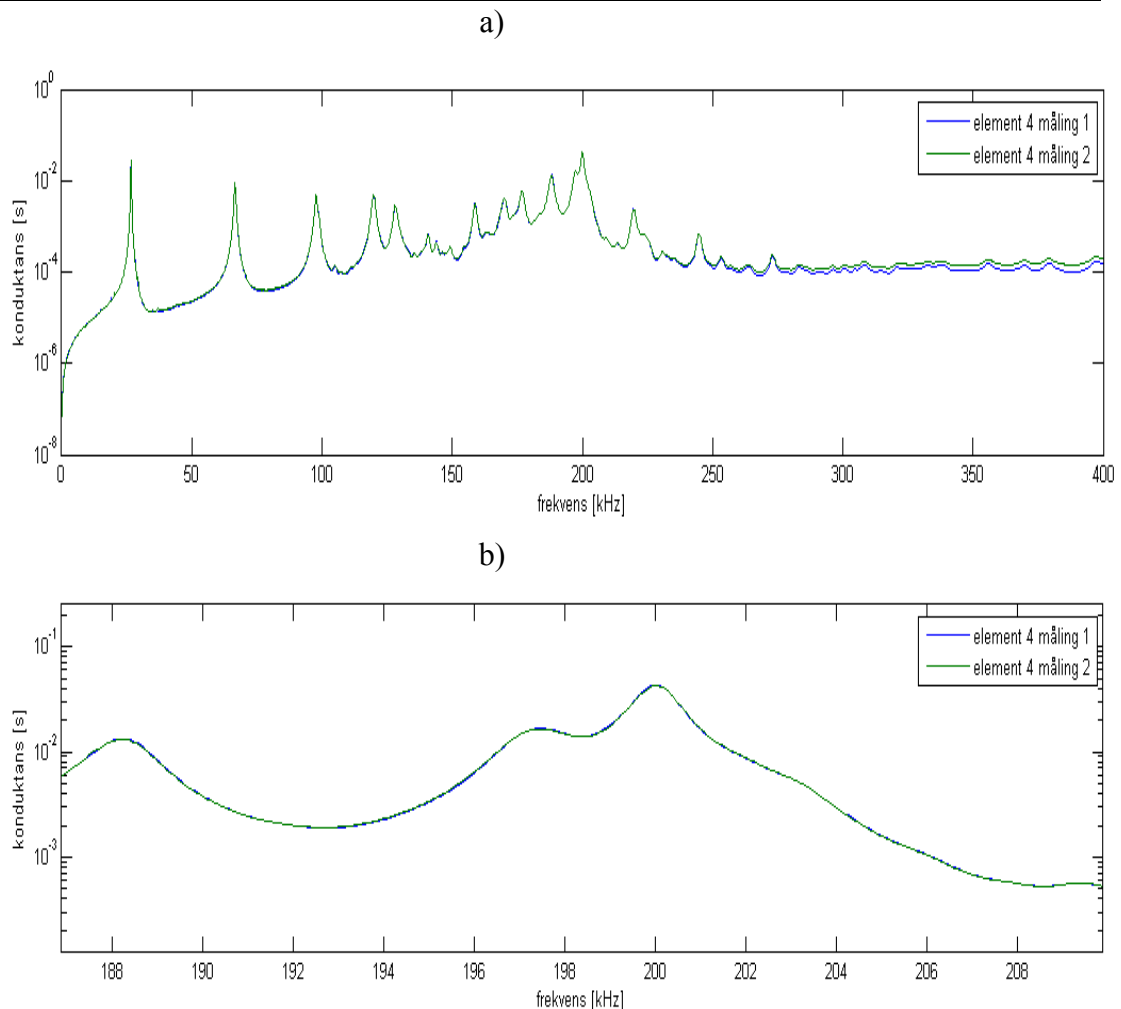
## 5.2 Målte elektriske egenskaper

Innledningsvis ble de elektriske egenskapene til elementene målt, for å etablere en forståelse for egenskapene disse hadde. I det følgende vises de initielle måleresultatene som ble brukt for å velge ut elementer og arbeidsmetodikk for videre arbeider.



Figur 5.1: Målt a) konduktans, b) suceptans, c) resistans, og d) reaktans for de fem PZT-5A elementene

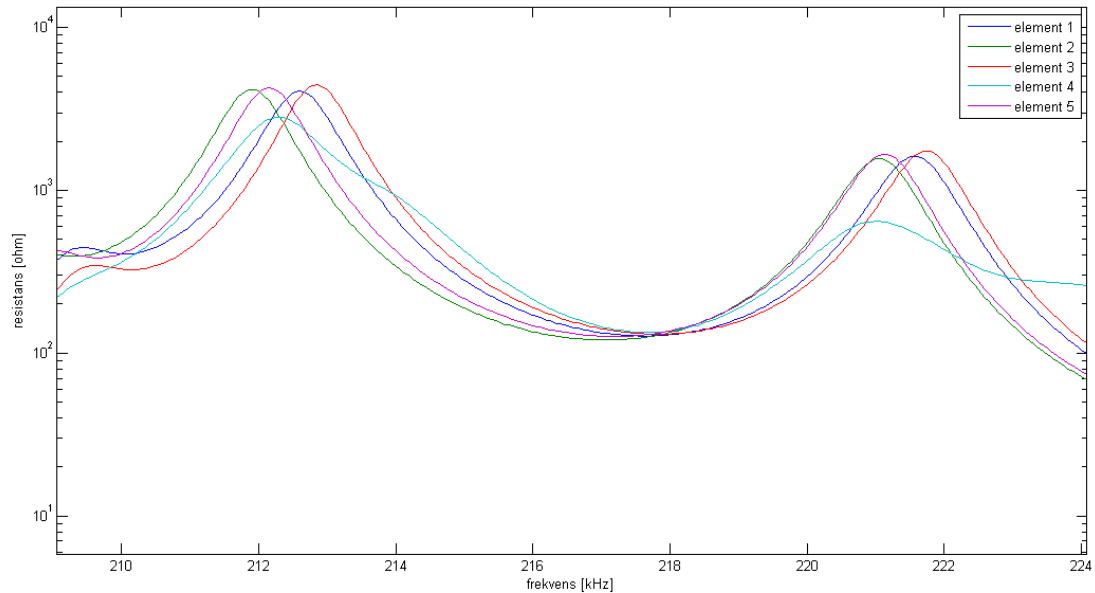
Måleresultatene viser et tydelig avvik for element 4 i forhold til de øvrige elementene. Alle målingene ble foretatt med samme fysiske oppstilling og uten vesentlige endringer i miljøparametere. Temperaturen varierte mellom 22,1°C og 25,6°C under målingene. Relativ luftfuktighet varierte tilsvarende mellom 36% og 46,3%. Effekt av disse variasjonene ble analytisk vurdert ved å repetere målingene. Resultater av repetering for element 4 presenteres som eksempel.



Figur 5.2: Repeterte målinger av element 4. Målingene foretatt to ulike dager med naturlig variasjon i miljøparametere. a) viser konduktans for hele frekvensområdet. b) viser et utdrag av samme måling rundt tykkelsesresonans mode (TE1-mode) Måling 1 har temperatur 25,4°C, og 41,7%RH. Måling 2 har temperatur 24,6°C og 47,3%RH. Måling 1 er delvis maskert av måling 2 i figuren på grunn av formlighet.

Eksempelet fra element 4 viser at to ulike målinger gav små eller neglisjerbare avvik for frekvensområdet opp til og med tykkelsesresonans for elementet. Repetering av måling på element 4 viste dessuten at element 4 har en repeterbarhet i resultatene, og at måletekniske forhold kan utelukkes som årsak til avvikene som fremkom i figur 5.1. Avvikene som fremkommer mellom de resterende fire elementene viser at de grupperer seg med to og to elementer hvor innbyrdes avvik i elektriske egenskaper er mindre enn avvikene til de øvrige elementene.





Figur 5.3: Utdrag fra figur 5.1c Resistans for de fem PZT-5A elementene i arbeidene. Element 1 og 3 viser en innbyrdes likhet. Tilsvarende for element 2 og 5. Element 4 viser avvikende egenskaper i forhold til de andre elementene.

Element 1 ble benyttet i det alt vesentlige av videre arbeider. Resultater som presenteres er derfor gitt med utgangspunkt i dette. For simuleringer betyr dette at fysiske størrelser er hentet fra element 1. Element 4 ble i sin helhet sett bort fra, da dette viste egenskaper som var så avvikende at det ble vurdert til å stamme fra produksjonstekniske forhold som ikke lot seg forklare av analysemetoder som inngikk i arbeidene med denne oppgaven.

Kvantifisert var de relative avvikene mellom ekstremalverdiene til målingene målingene 0.18% for frekvens og 1.5% for konduktans til til 1.radiellmoderesonans. For 2.radiellmoderesonans var tilsvarende tall 0.22% for frekvensen og 2.72% for konduktansen. For 1.tykkelsesmoderesonans var tallene 0.35% for frekvens og 8.53% for konduktans. I disse tallfestingene ble element 4 sett bort fra på bakgrunn av resultatene presentert ovenfor.

### 5.2.1 Nøyaktighet ved bestemmelse av elektriske egenskaper

Nøyaktigheten til egenskapene ble vurdert til å ha tre kilder: Impedansanalysatoren, miljøparametre og koblingen mellom analysatoren og elementet.

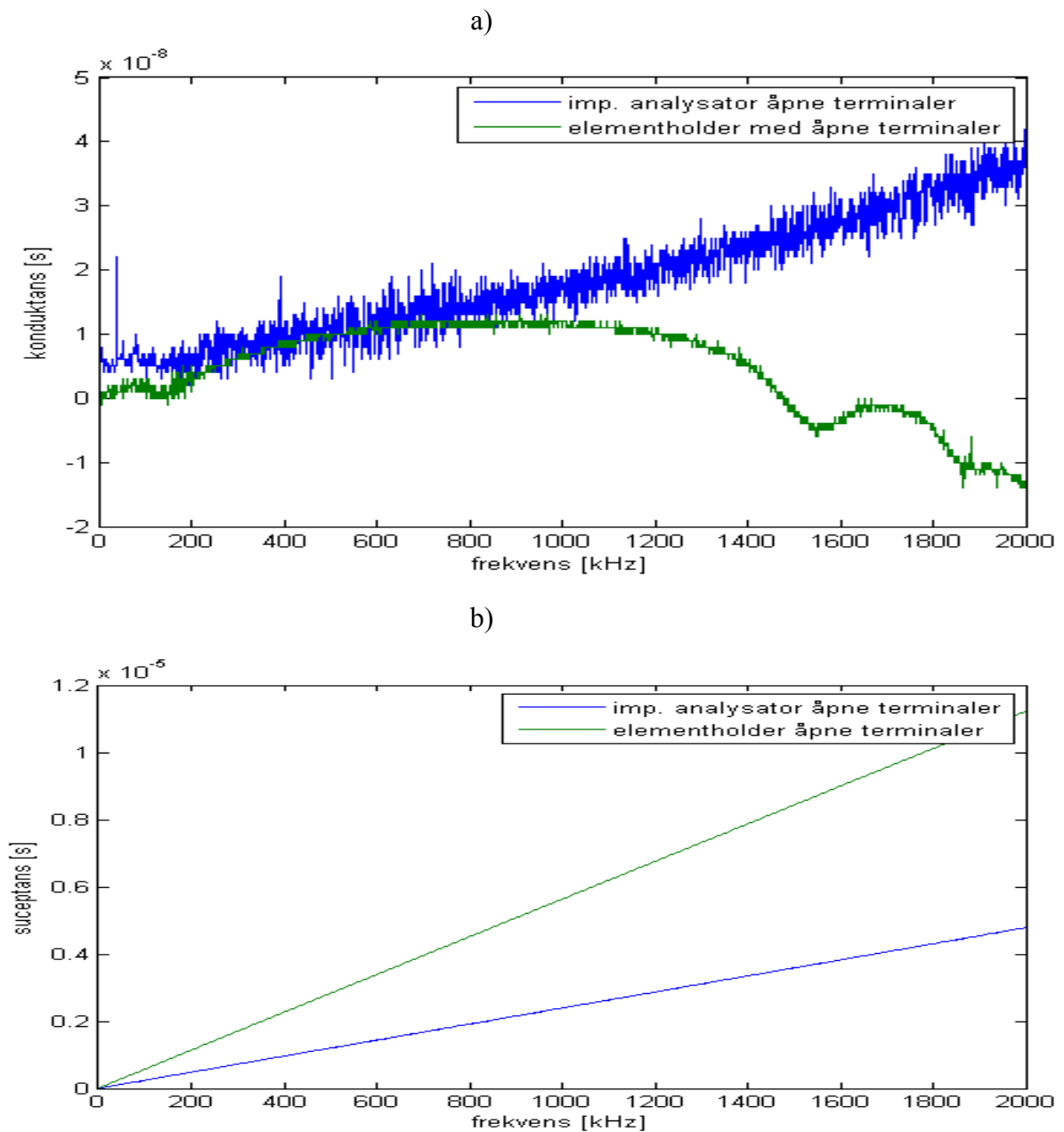
Miljøparametrene (trykk, temperatur og fuktighet) sin innvirkning vises analytisk i figurene ovenfor. Repeterbarheten til målingene for element 4 gir et inntrykk størrelsen på denne innvirkningen.

### 5.2.1.1 Impedansanalysatorens frekvensnøyaktighet

Impedansanalysatoren ble analysert ved å referansemåle intern oscillatorfrekvens til analysatoren via ekstern måleplugg på baksiden. Internreferansen er oppgitt til å være 1MHz. Målt med ekstern frekvensteller av typen HP5302A gir denne en frekvens på 1.00000Mhz. Nøyaktigheten ble med dette funnet å være bedre enn 0,001% relativt til frekvenstilleren sin nøyaktighet.

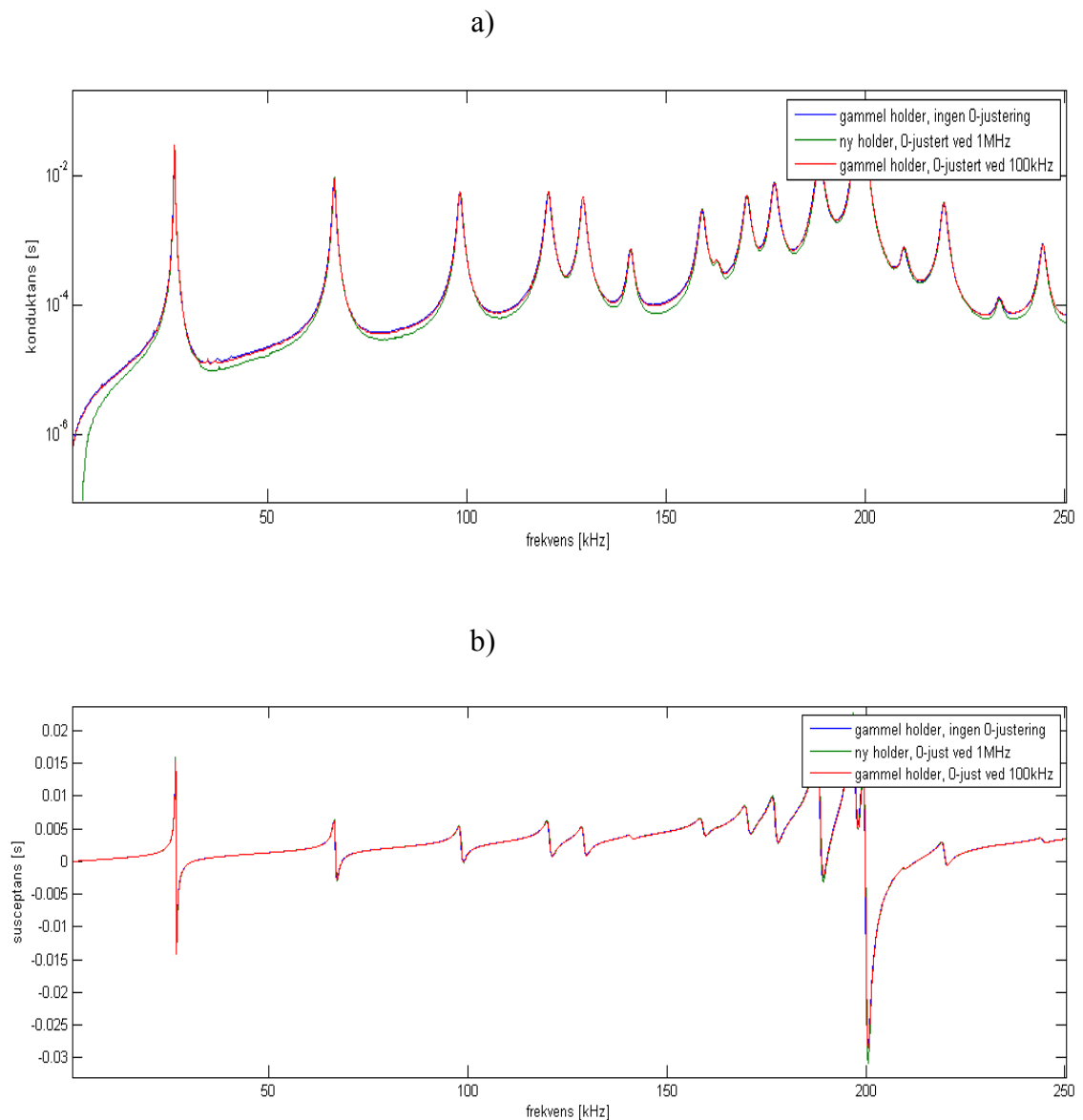
### 5.2.1.2 Linearitet til impedansanalysator

Impedansanalysatoren sin manglende linearitet kan kompenseres for med 0-justering som vist i kapitlene over. Lineariteten til analysatoren uten 0-justering henholdsvis med og uten elementholder er vist i figur 5.4.



Figur 5.4: Linearitet for impedansanalysator henholdsvis med og uten elementholder tilkoblet. (åpne terminaler). Gitt ved a) konduktans og b) susceptans som funksjon av frekvens

Elektriske målinger på elementene ble antatt å gi resultater som ble påvirket av denne ulineariteten. Målinger ble derfor utført på element 1 både med og uten 0-justering, samt for gammel og ny<sup>1</sup> holder.



Figur 5.5: Elektriske målinger på element 1 med ulike holdere og 0-justeringer av impedansanalysator for å kompensere for ulinearitet. a) konduktans, b) susceptans som funksjon av frekvens

<sup>1</sup> Ny holder referer til holderen som ble laget for akustiske målinger på elementet. Holderen vises på figur 4.5. Gammel holder vises på figur 4.3.

Avvikene i elektriske størrelser som følge av 0-justeringsmetode kan også tolkes i kvantifiserte størrelser. I tabells form fremheves endringene i større detalj enn for den grafiske fremstillingen.

Foruten manglende linearitet til impedansanalysatoren kan også lineariteten i selve elementet endres som funksjon av påtrykt spenning. For å evaluere dette ble element 1 målt med ulike spenninger påtrykt fra impedansanalysatoren. Det ble gjort målinger med påtrykt spenning (peak-peak) 100mV, 300mV, 500mV og 1000mV. Avvikene disse ulike spenningene gav, er vist grafisk for noen utsnitt.

Tabell 5.7: Kvantifiserte størrelser for elektriske egenskaper til tre ulike målinger på element 1. Målingene har henholdsvis ingen 0-justering, justering ved 1MHz og justering ved 100kHz for kompensasjon av manglende linearitet til impedansanalysator med elementholder.

|                          | Gammel holder<br>ingen 0-justering | Ny holder<br>0-justert ved 1MHz | Gammel holder<br>0-justert ved 100kHz |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| R1:fs (kHz)              | 26,7                               | 26,7                            | 26,7                                  |
| R2:fs (kHz)              | 66,75                              | 66,8                            | 66,8                                  |
| TE1:fs (kHz)             | 199,9                              | 200                             | 200                                   |
| R1:BW <sub>s</sub> (Hz)  | 250                                | 300                             | 250                                   |
| R2:BW <sub>s</sub> (Hz)  | 750                                | 600                             | 650                                   |
| TE1:BW <sub>s</sub> (Hz) | 3800                               | 3700                            | 3800                                  |
| R1:G (S)                 | 0,02849                            | 0,02836                         | 0,02924                               |
| R2:G (s)                 | 0,008872                           | 0,009374                        | 0,009093                              |
| TE1:G (s)                | 0,04813                            | 0,05142                         | 0,04736                               |
| R1:fp (kHz)              | 30,95                              | 31                              | 31                                    |
| R2:fp (kHz)              | 68,45                              | 68,5                            | 68,5                                  |
| TE1:fp (kHz)             | 212,6                              | 212,7                           | 212,7                                 |
| R1:BW <sub>p</sub> (Hz)  | 200                                | 200                             | 200                                   |
| R2:BW <sub>p</sub> (Hz)  | 700                                | 700                             | 650                                   |
| TE1:BW <sub>p</sub> (Hz) | 1200                               | 1200                            | 1200                                  |
| R1:R (ohm)               | 44430                              | 48090                           | 45500                                 |
| R2:R (ohm)               | 2691                               | 2829                            | 2789                                  |
| TE1:R (ohm)              | 4061                               | 4169                            | 3811                                  |

### 5.2.1.3 Linearitet i elementet som funksjon av påtrykt spenning

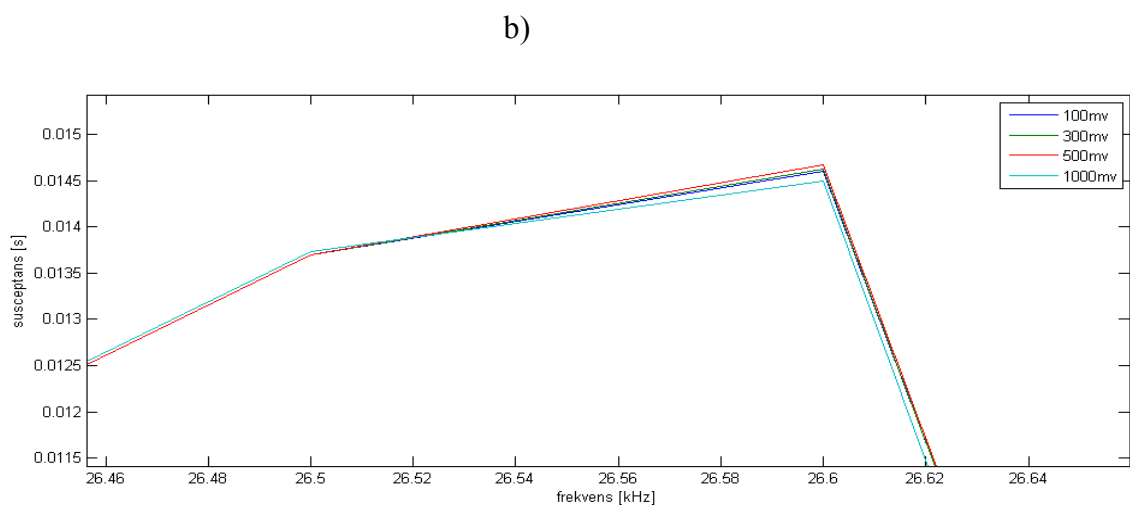
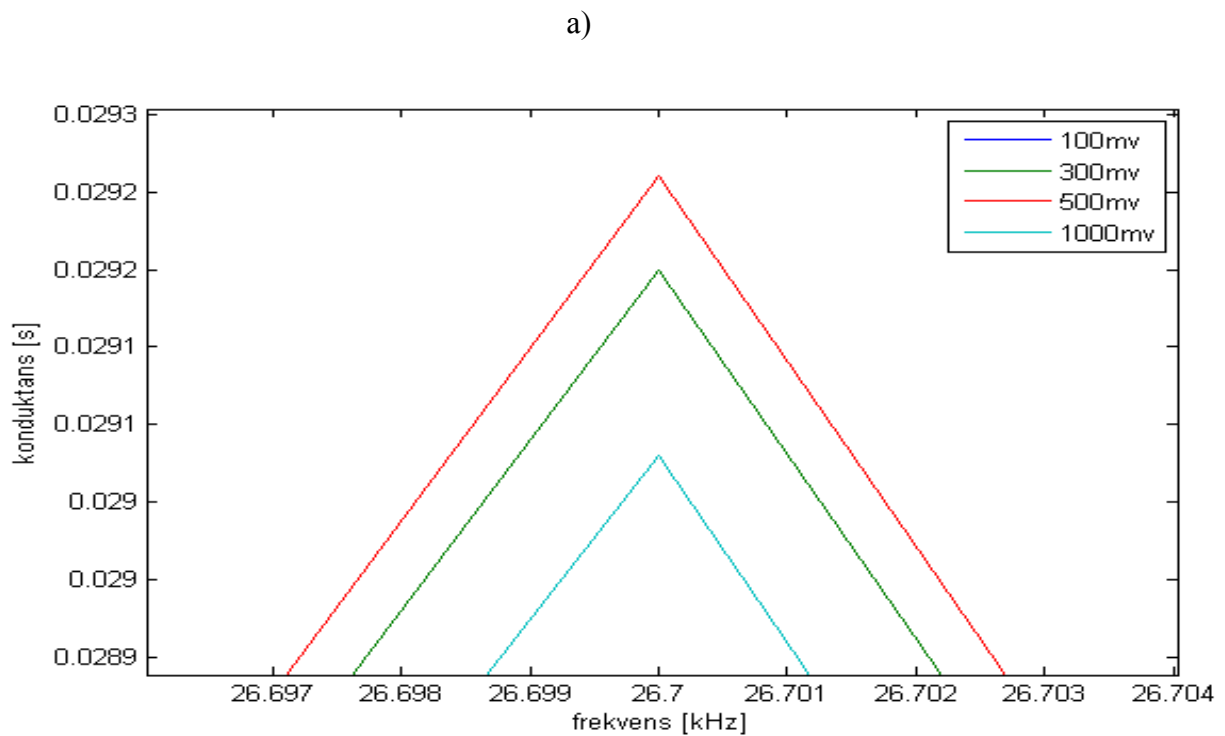
Påtrykt spenning på element 1 forandret i følge målingene ikke frekvensresponsen. Relativ differanse i konduktans mellom største og minste måling var på 0,62%. Relativ differanse i susceptans var tilsvarende på 1,24%. Største differanse i begge tilfeller fremkom mellom målingene med 500mV og 1000mV påtrykt spenning. Impedansanalysatoren ble 0-justert ved 100kHz i forkant av hver måling. Miljøparametere under måleseriene er listet i tabell 5.8

---

Tabell 5.8: Miljøparametre ved måling av elektriske egenskaper som funksjon av ulike påtrykte spenninger fra impedansanalysator for element 1. Verdier er gjennomsnittsverdier for avlesning ved start og stopp av måling.

|        | Temperatur [°C] | Relativ fuktighet [%] |
|--------|-----------------|-----------------------|
| 100mV  | 24,4            | 31,7                  |
| 300mV  | 24,4            | 30,7                  |
| 500mV  | 24,3            | 30,6                  |
| 1000mV | 23,7            | 30,1                  |

---

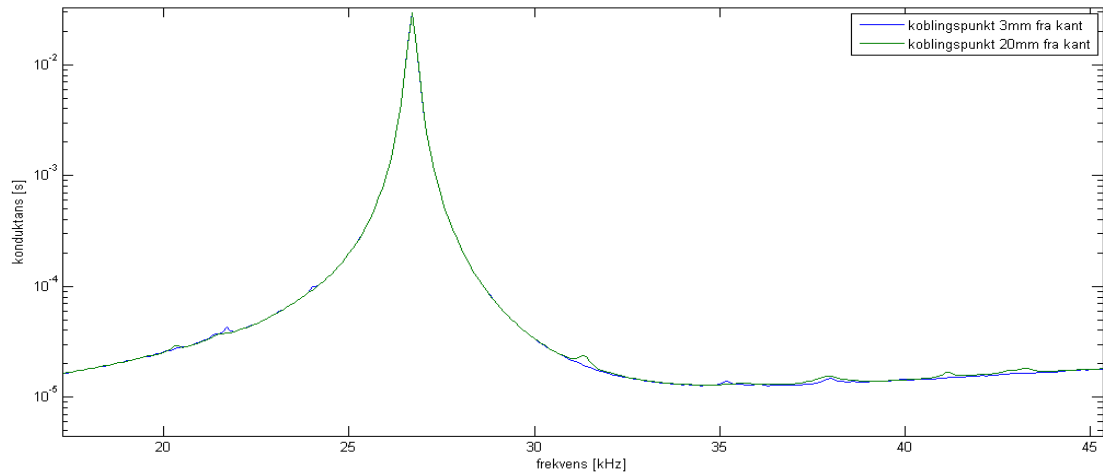


Figur 5.6: Element 1 eksitert fra impedansanalysator med peak-peak spenninger 100mV, 300mV, 500mV og 1000mV. a) viser konduktans og b) susceptans som funksjon av frekvens for første radiellmode resonans. Målingen med 100mV spenning maskeres i figur a) av målingen med 500mV på grunn av formlighet.

#### 5.2.1.4 Elektrisk kobling mellom holder og element

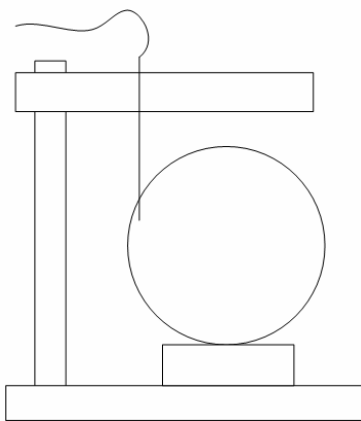
Elementholderen som ble benyttet i de elektriske målingene ble fortrinnsvis stilt slik at kontaktpunktene mellom elementets elektroder og kobbertrådene til holderen var i ytterkanten av elementet – ca 3mm fra kanten. Selv om det mekaniske presset kobbertrådene utgjorde kan sies å være ubetydelig, vil det likevel påvirke elementet som i teorien skal være ubelastet av

omgivelsene ved målinger. Spennet kobberledningene utøver på elementet var vanskelig å kvantifisere. Effekten av koblingen ble derfor undersøkt ved å sammenligne to måleserier med kontaktpunkt 3mm fra kanten og 20mm fra kanten. I resonanstoppene til de radielle svingemodene var relativ differanse mellom målingene 0% både for konduktans og frekvens.

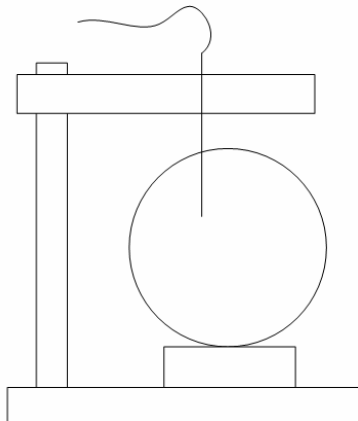


Figur 5.7: Utdrag av konduktans for 1. radiellmode til element 1. To ulike målinger med koblingspunkt mellom elektrodene og elementholderen sine stive kobberledninger på 3mm og 20mm avstand fra kanten.

a)



b)



Figur 5.8 Skjematisk oppsett av elementholder med to forskjellige tilkoblinger av måleledninger, a) med koblingspunkt 3mm fra kanten og b) med koblingspunkt 20 mm fra kanten. a) er benyttet i alle målinger hvor ikke annet er nevnt.

### 5.3 FEMP simuleringer

Simuleringer i FEMP dannet i dette arbeidet en viktig referanse ved sammenligninger av målinger og simuleringer med ulike inngangsparametere. Det viste seg raskt at både de fysiske og elektriske egenskaper til elementene gav utfordringer i forhold til bruk av endimensjonale modeller. Elementene hadde et diameter/tykkelse forhold lavere enn hva som er gyldighetsområdet for de endimensjonale modellene [17]. Avvik i resultater mellom målinger og endimensjonale simuleringer kunne derfor ikke med sikkerhet påvises som unøyaktigheter i materialkonstanter eller modellen i seg selv. FEMP ble derfor den modellen som ble satt mest fokus på, for å etablere en teoretisk fremstilling av elementene. Generelt ble FEMP brukt i alle deler av arbeidene, og mange av resultatene i de følgende avsnittene har resultater fra FEMP som sammenligningsgrunnlag.

Inngangsverdier for FEMP simulering er elementets fysiske størrelser, materialkonstanter, oppløsning (elementer pr. bølgelengde) og frekvensområde med oppløsning.

Som et utgangspunkt ble elementene forsøkt fremstilt i FEMP basert på materialkonstanter fra produsent (VERNITRON). I [2] ble piezoelektriske skiver av PZT-5A også benyttet, og i arbeidene ble materialkonstanter for disse skivene funnet fra målinger og analyse.

Materialkonstanter fra dette arbeidet dannet grunnlaget for arbeidet som ble gjort i [3]. Her ble materialkonstantene fra [2] forsøkt tilpasset for å gi bedre samsvar med målinger.

Disse tre materialkonstantsettene var utgangspunktet for FEMP simuleringer i denne oppgaven. I presentasjonen i denne oppgaven er alle materialkonstanter forsøkt samlet i konsistente sett på formen som benyttes i FEMP. Dertil er også alle konstantsettene gitt et materialnummer slik at det er entydig hvilket materialkonstantsett det er snakk om ved henvisning til materialdatafilen til FEMP. Materialdatafilen til FEMP som ble brukt i dette arbeidet ligger vedlagt i vedlegg 3.

#### 5.3.1 Innledende sammenligning

Målsettingen med bruk av FEMP er å ha et teoretisk verktøy for å beregne egenskapene til det piezoelektriske elementet. For at dette skal være hensiktsmessig, må den teoretiske fremstillingen være representativ. Med de usikkerheter og vurderinger som framkom under målinger av elektriske egenskaper til elementene, presentert ovenfor, er målinger av elementet utgangspunktet for all sammenligning mellom teoretiske modeller og elementets egenskaper.

Basert på tidligere materialkonstantsett som har blitt brukt for materialtypen PZT-5A under arbeider ved Fysisk institutt [10] og [3], hadde dette arbeidet inngangsverdier som vist i tabell 5.9 nedenfor:

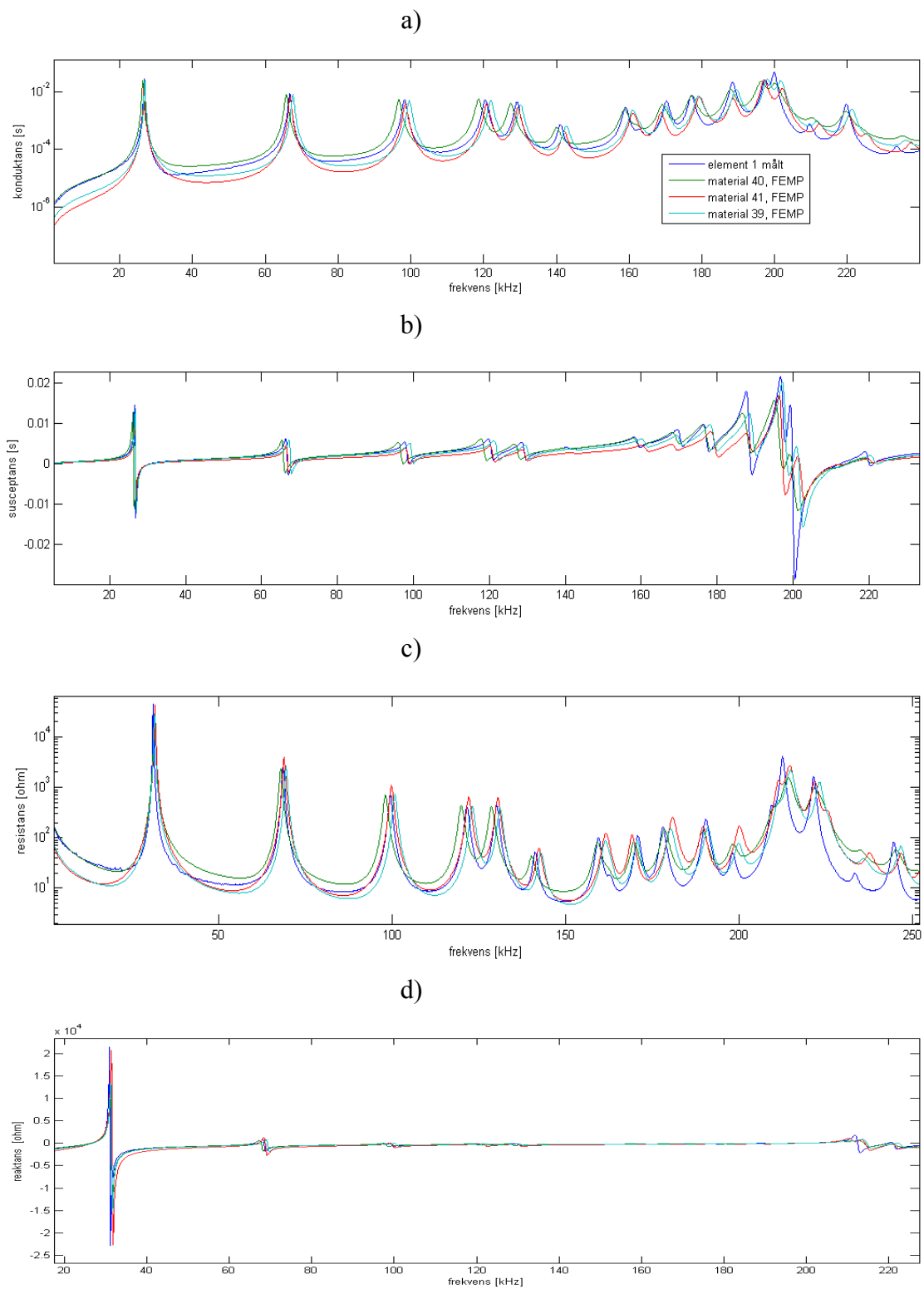


Tabell 5.9: Materialkonstanter som var grunnlaget for simulering av elementene i FEMP. Material 40 er hentet fra Vernitron produktinformasjon. Material 41 er basert på målinger utført under Atterås sitt Cand. scient arbeide. Material 39 er basert på arbeider under Fardal sitt hovedfagsarbeid og er tilpassing av material 41. Røde verdier i material 39 indikerer endringer fra material 41.

| Symbol | Enhet                  | Material 40<br>(Vernitron data) | Material 41<br>(ref Atterås [2])             | Material 39<br>(ref Fardal [3])              |
|--------|------------------------|---------------------------------|--|--|
| cE11   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 12,10                           | 11,99189684290205<br>(1+i/177.3557990405095) | <b>12,140</b><br>(1+i/177.3557990405095)     |
| cE12   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 7,54                            | 7,392665742331462<br>(1+i/469,4193738778428) | <b>7,281776</b><br>(1+i/469,4193738778428)   |
| cE13   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 7,52                            | 7,379724304579179<br>(1+i/397,2653483372656) | 7,379724304579179<br>(1+i/397,2653483372656) |
| cE33   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 11,1                            | 11,30 (1+i/164)                              | 11,30 (1+i/164)                              |
| cE44   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 2,11                            | 2.11(1+i/75)                                 | 2.11(1+i/75)                                 |
| ε11S   | 10e-8 F/m              | 0,811026                        | 0,81103(1-i/50)                              | <b>0,95030(1-i/50)</b>                       |
| ε33S   | 10e-8 F/m              | 0,734882                        | 0,518(1-i/163)                               | <b>0,696(1-i/100)</b>                        |
| e31    | C/m <sup>2</sup>       | -5,4                            | -4,84491652814358<br>(1-i/165,6427656060534) | -4,84491652814358<br>(1-i/165,6427656060534) |
| e33    | C/m <sup>2</sup>       | 15,8                            | 12,6(1-i/215)                                | <b>14,8(1-i/200)</b>                         |
| e15    | C/m <sup>2</sup>       | 12,3                            | 12,3(1-i/200)                                | 12,3(1-i/200)                                |
| ρ      | kg/m <sup>3</sup>      | 7750,0                          | 7740   | <b>7710</b>                                  |
| Qm     |                        | 75,0                            |  |  |
| tand   |                        | 0,02                            |  |  |

Målinger av element 1 sine elektriske egenskaper ble brukt for å sammenligne simuleringer i FEMP. Inngangsverdiene til FEMP tilsa at eneste forskjellen mellom de ulike elementene 1-5 sin fremstilling i FEMP ville kunne baseres på forskjeller i fysiske mål. Elementene skulle for øvrig være av samme kjemiske kvalitet. Effekten av de for skjellige fysiske målene for element 1-5 er presentert i senere avsnitt 5.3.2

I alle følgende resultater er målinger av element 1 benyttet som referanse om ikke annet er spesifisert. Målingene er utført etter forutgående 0-justering av impedansanalysator og holder. 0-justering er foretatt ved 100kHz for å ha størst gyldighetsområde der hvor interesseområde for sammenligning av egenskaper er størst. Frekvensoppløsningen i målingene er 50Hz. Tilsvarende er FEMP kjøring, dersom ikke annet er spesifisert, foretatt med fysiske mål fra element 1. Det er benyttet 6 elementer pr bølgelengde både i radiell og tykkelsesretning gitt ved 400kHz. Frekvensoppløsningen i FEMP er satt til 100Hz. Det er videre benyttet modalanalyse med 300 egenvektorer. For verifisering av nøyaktigheten til FEMP med modalanalyse vises det til kapittel 5.6.2.



Figur 5.9: FEMP simulering for tre ulike materialkonstantsett sammenholdt med måling av element 1. Material 40 er Vernitron produktdata, 41 er materialkonstanter fra Atterås sine arbeider, 39 er tilsvarende fra Fardal sine arbeider. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

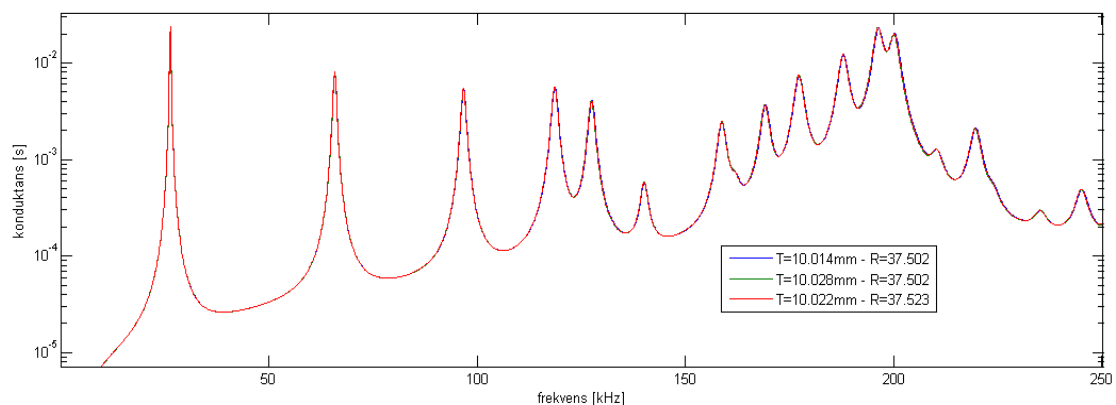
Forskjellen som fremkommer i elektriske egenskaper mellom målingen og de ulike materialkonstantsettene var betydelig for alle de elektriske størrelsene. Det vil i etterfølgende avsnitt presenteres resultater fra undersøkelser som ble utført å påpeke årsaker til forskjellene. Forståelse av disse årsakene ville kunne brukes til etablere en metode for å simulere elementene i FEMP med tilstrekkelig grad av likhet med de målte egenskapene.

### 5.3.2 Fysiske størrelser sin innvirkning

Kapittel 5.1 viser med tydelighet hvordan de fysiske målene til elementene hadde innbyrdes forskjeller. Forskjeller i elementenes elektriske egenskaper blir tydelig vist i kapittel 5.2. Med denne bakgrunnen var det grunn til å undersøke om disse forskjellene, og dermed eventuelt forskjellene i elektriske egenskaper fra målinger og FEMP simuleringer, kunne stamme fra forskjeller i fysiske egenskaper til elementene.

Standardavviket til de fysiske størrelsene og derav tettheten til elementene er betydelig ut fra et akademisk perspektiv, men likevel beskjedent sammenlignet med usikkerhetene knyttet til praktiske målinger. Se tabell 5.6.

Evaluering av problemstillingen rundt størrelsene ble gjort ved å kjøre FEMP med inngangsverdier for fysisk størrelse til elementet som varierte mellom minsteverdi fra målepunktene til største verdi. Forskjellen dette eventuelt skulle gi var forventet å stå i forhold til de innbyrdes forskjellene mellom elektriske målinger for de 5 elementene.



Figur 5.10: Konduktans for tre ulike simuleringer med variasjon i tykkelse og radius. Variasjon i størrelser er valgt fra element 1 sine ekstremalverdier fra målinger av elementet. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Maksimalt relativt avvik i resonansfrekvens for disse kjøringene var 0.1033% ved 3.radiellmode resonans. Avvikene for de påfølgende resonansene var på rundt 0.10%. Avvikene i konduktans var 0.25% for 1.radiellmoderesonans, 0.28% for 2.radiellmoderesonans og 2.05% for 1.tykkelsesresonans.

## 5.4 Bestemmelse av materialkonstanter

Som antydnet i kapitlene ovenfor kan det konkluderes med at materialkonstanter er en av de største usikkerhetene ved teoretiske simuleringer av piezoelektriske elementer. Metodisk har tilnærmingen til materialkonstanter i dette arbeidet fulgt noen grunnleggende prinsipper. Materialkonstanter har blitt forsøkt konsistent fremstilt i det materialdatasettet som benyttes i FEMP. FEMP kunne dermed benyttes som sammenligningsgrunnlag for alle målinger og simuleringer på like vilkår med hensyn til materialkonstanter. Det har gjennom flere tidligere arbeider [4], [2], [1] og [5] fremkommet en visshet om at FEMP fremstiller det piezoelektriske materialet med stor grad av nøyaktighet sett opp mot faktiske målinger forutsatt at materialkonstantene er riktige. Produsenter oppgir materialkonstanter med en så stor grad av usikkerhet at konstantene i seg selv gir et signifikant bidrag til unøyaktigheten som fremkommer i simulering av piezoelektriske elementer med ulike teoretiske modeller. I dette kapitlet vil materialkonstanter presenteres basert på tre ulike tilnærminger. Materialkonstanter fra produsent, materialkonstanter funnet fra målinger og materialkonstanter fra manuelle og iterative tilpassinger hvor FEMP er benyttet til validering. Det henvises til kapittel 3.2.3 for sammenhengen mellom de ulike konstantsettene.

### 5.4.1 Materialkonstanter fra elektriske målinger

Kapittel 3 gir teoretiske henvisninger til hvordan materialkonstanter kan finnes med basis i elektriske målinger på de piezoelektriske elementene. I det følgende vil konstanter funnet fra disse metodene presenteres.

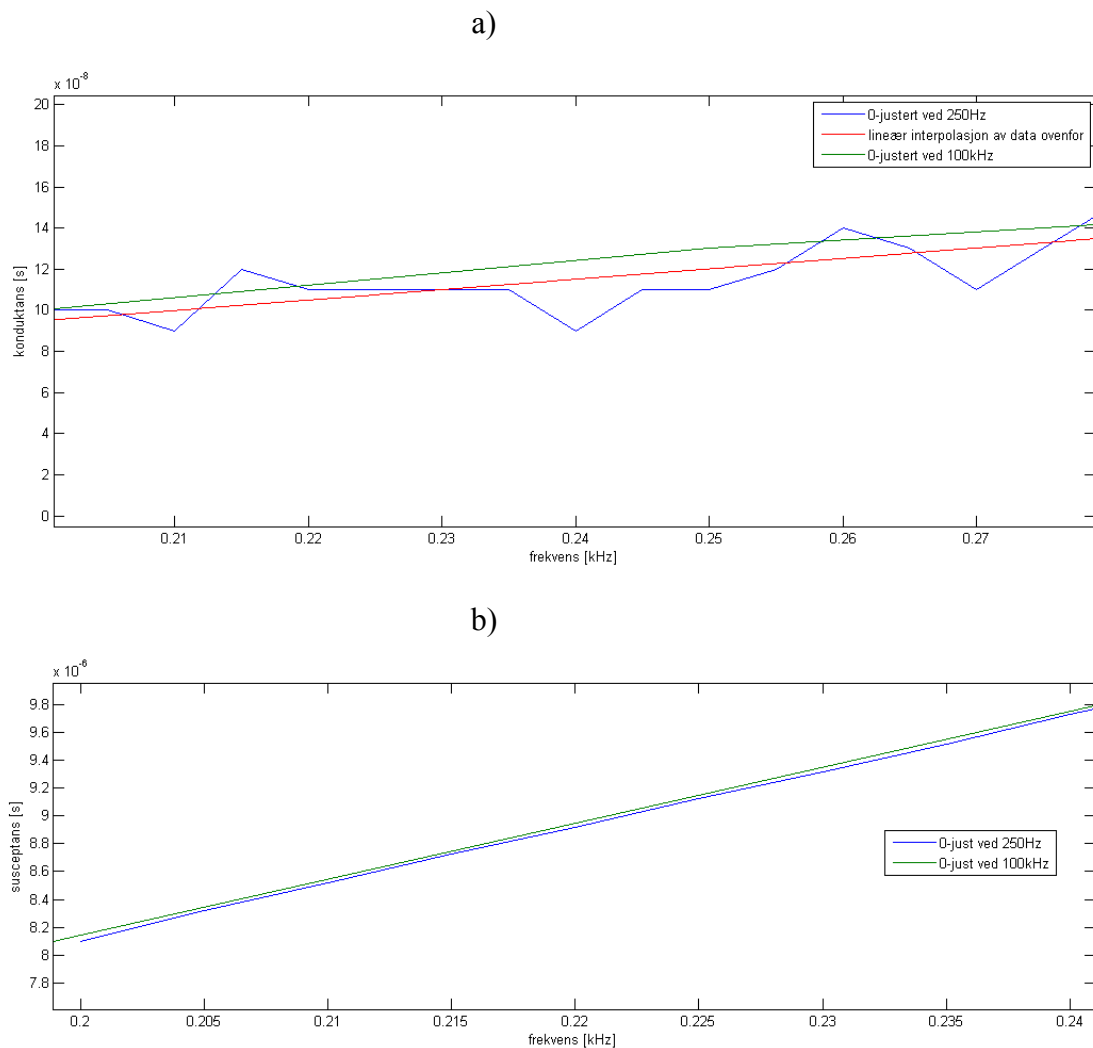
For å ivareta kravet til nøyaktighet ble element 1 målt med en frekvensoppløsning på 5Hz rundt de bestemmende frekvensområdene. Øvrige målinger ble gjort med 100Hz oppløsning. Der hvor det var mulig ble avlesningene interpolert mellom kjente målepunkt slik at nøyaktigheten i avlesning er større enn frekvensoppløsningen i målingene.

Som inngangsverdier til beregninger i Matlab, ble de avleste verdiene fra elektriske målinger brukt sammen med målte fysiske størrelser. Programfiler som ble brukt til beregning av materialkonstantene ligger vedlagt i vedlegg 2.

Tabell 5.10: Målte elektriske størrelser for element 1 som inngangsverdier til bestemmelse av materialkonstanter.

| Element 1 - 0-justerte målinger |                   |
|---------------------------------|-------------------|
|                                 | 5hz nøyaktighet   |
|                                 | 100hz nøyaktighet |
| R1:fs (kHz)                     | 26,705            |
| R2:fs (kHz)                     | 66,77             |
| TE1:fs (kHz)                    | 200               |
| R1:BW <sub>s</sub> (Hz)         | 245               |
| R2:BW <sub>s</sub> (Hz)         | 685               |
| TE1:BW <sub>s</sub> (Hz)        | 3700              |
| R1:G (S)                        | 0,029878          |
| R2:G (s)                        | 0,009149          |
| TE1:G (s)                       | 0,0488            |
|                                 |                   |
| R1:fp (kHz)                     | 30,98             |
| R2:fp (kHz)                     | 68,5              |
| TE1:fp (kHz)                    | 212,7             |
| R1:BW <sub>p</sub> (Hz)         | 215               |
| R2:BW <sub>p</sub> (Hz)         | 700               |
| TE1:BW <sub>p</sub> (Hz)        | 1200              |
| R1:R (ohm)                      | 44267             |
| R2:R (ohm)                      | 2787,295          |
| TE1:R (ohm)                     | 4257,89           |

For å bestemme permittivitetskonstanter, måtte det foretas måling av elementet ved frekvens mindre enn 1% av første radiellmoderesonans. Dette fordret en måling med frekvens lavere enn 267Hz. Som det fremgår av 0-justeringsdata for impedansanalysatoren må denne justeres for hver enkelt frekvens når målefrekvensen er lavere enn 500Hz. Analysatoren ble derfor justert ved 250Hz for å være i nærheten av den påkrevde frekvensen på maksimalt 267Hz. Målingen som ble foretatt med denne justeringen hadde en oppløsning på 5Hz. Denne målingen ble sammenhølt med tilsvarende måling hvor 0-justering var foretatt på 100kHz, og hvor oppløsningen var på 50Hz. Relativt avvik mellom disse målingene var henholdsvis 0,49% for susceptans og 0% for konduktans ved 200Hz. Imidlertid må det påpekes at konduktansmålingene med 5Hz oppløsning var ganske ujevne i formen, og en lineær interpolasjon mellom de ulike målepunktene gav en kurvetilpassing som var mer anvendbar enn enkeltfrekvensmålingene. Interpolasjonsfunksjonen hadde et relativt avvik til målingen med 50Hz oppløsning på 5,15%.



Figur 5.11: Elektriske målinger av element 1 for frekvensområdet rundt 1% av 1.radiellmoderesonans. a) viser konduktans for måling med impedansanalysator 0-justert ved 100kHz og 50Hz oppløsning, måling med 0-justering ved 250Hz og med 5Hz oppløsning, samt lineærinterpolasjon av målingen med 5Hz oppløsning. b) viser susceptans for de samme to målingene som i a).

Målingene av element 1 som vist i tabell 5.10 og figur 5.11 ble brukt til å beregne materialkonstanter etter metode referert i kapittel 3. Materialkonstantene ble beregnet ved hjelp av programkode skriptet i Matlab. Se vedlegg 2. Magne Aanes har velvillig meddelt deler av disse skriptene fra sitt mastergradsarbeid. Opphav er angitt på hver enkelt fil i vedlegg 2. Konstantene i tabell 5.11 kommer hovedsakelig direkte fra målinger på element 1. De konstantene som ikke kunne finnes fra målingene som ble utført under arbeidene er hentet direkte fra produsent sine materialdata. Dette er i tabell 5.11 angitt med farget utheving. Det henvises til teorien i kapittel 3 for sammenhengen mellom konstantene. Konstantnavn i tabell 5.11 er valgt for å harmonere med navnene slik de fremkommer i Matlab-filene som benyttes for omregninger. Matlab håndterer i utgangspunktet ikke annen navnekonvensjon enn alfanumeriske variabler. Konstantnavnene i tabell 5.11 er et forsøk på tilpasse den fonetiske uttalen av sammensatte og greske variabler.

Tabell 5.11: Materialkonstanter fra produsent (VERNITRON) og fra målinger på element 1. Noen av konstantene er fremkommet ved omrekning fra andre konstanter. De konstantene som ikke er funnet fra målinger er indikert med uthevet farge i tabellen. Disse er som nevnt hentet direkte fra VERNITRON sine materialkonstantverdier og benyttes videre for omrekning til konstantsettet brukt i FEMP. Navnekonvensjonen for konstantene er valgt for å harmonisere med navnene slik de fremkommer i Matlab-filene brukt til omrekninger og representerer en fonetisk tilnærming til mer brukte greske bokstaver.

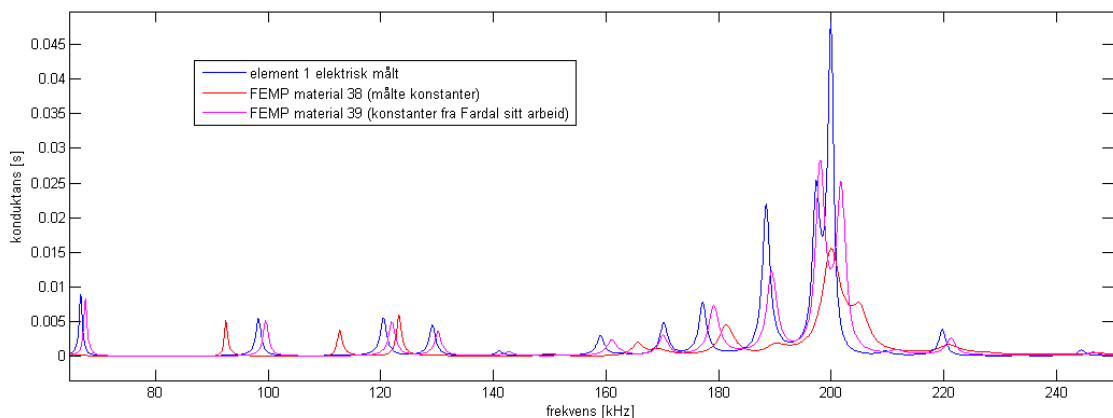
| Materialkonstant | Konstantverdier bestemt fra målinger på element 1 | VERNITRON<br>Materialkonstanter |
|------------------|---|---------------------------------|
| c11p             | 6.476496329431532e+10 + 6.755748220358479e+08i    |                                 |
| kp_n             | 0.584951423401798 - 0.002070926074032i            |                                 |
| kp opp2          | 0.392787273131506 - 0.004879340805639i            | 0.36                            |
| kp_ned2          | 0.342163879004985 - 0.002422782309530i            |                                 |
| kt               | 0.373538919279108 - 0.017736211302492i            | 0.48                            |
| k31              | 0.289417487667747 - 0.000284388028888i            |                                 |
| s11e             | 2.087675217222791e-11 - 2.899566564972022e-13i    | 16.4e-12                        |
| s12e             | -1.065505491084446e-11 + 2.002827118368202e-13i   | -5.74e-12                       |
| s13e             | -7.220000000000000e-12                            | -7.22*e-12                      |
| s33e             | 1.880000000000000e-11                             | 18.8*e-12                       |
| s44e             | 4.750000000000000e-11                             | 47.5*e-12                       |
| d15              | 5.840000000000000e-10                             | 584*e-12                        |
| d31              | -1.598043960297466e-10 + 2.253261526715462e-12i   | -1.71e-10                       |
| d33              | 3.740000000000000e-10                             | 374*e-12                        |
| h33              | 1.536942286258954e+09 - 7.381467416843206e+07i    | 21.5*e8                         |
| sigmap           | 0.510413737052915 - 0.002504453316272i            | 0.35                            |
| eps11s           | 8.130373684210524e-09                             | 8.1066*e-009                    |
| eps11t           | 1.531050000000000e-08                             | 1.53105*e-8                     |
| eps33p           | 9.607565848115774e-09 - 8.322388568204344e-11i    |                                 |
| eps33t           | 1.460413729000000e-08 - 1.802979912000000e-10i    | 1,5045e-8                       |
| eps33s           | 8.271134489466710e-09 + 5.566569515673611e-11i    |                                 |
| rho              | 7704.8  | 7750.0                          |

FEMP sin måte å angi konstanter på, er i presentasjonen av denne oppgaven benyttet som felles referanse for sammenligninger. Konstantene fra tabell 5.11 ble derfor omregnet til ny form for sammenligning med konstantsettene i FEMP. Relasjonene som ble benyttet til dette er vist i kapittel 3. I vedlegg 3 er alle materialkonstant filene som er benyttet i FEMP under arbeidene med denne oppgaven er listet.

Tabell 5.12: Konstanter omregnet til form brukt i FEMP. Konstantene er fra målinger på element 1 og er presentert i opprinnelig form i tabell 5.11

| Symbol | Enhet                  | Realverdi fra målinger Material 38 | Q-verdi. Rød er estimerte verdier (38) |
|--------|------------------------|------------------------------------|--|
| cE11   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 12.274                             | 53.4525                                |
| cE12   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 9.1034                             | 50.4820                                |
| cE13   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 8.2098                             | 52.1458                                |
| cE33   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 11.625                             | 96.1323                                |
| cE44   | 10e10 N/m <sup>2</sup> | 2.1053                             | 75                                     |
| E11S   | 10e-8 F/m              | 0.81304                            | 75                                     |
| E33S   | 10e-8 F/m              | 0.82711                            | 148.5858                               |
| e31    | C/m <sup>2</sup>       | -3.4665                            | 8.3452                                 |
| e33    | C/m <sup>2</sup>       | 12.7164                            | 24.2227                                |
| e15    | C/m <sup>2</sup>       | 12.2947                            | 25                                     |
| Rho    | kg/m <sup>3</sup>      | 7704.8                             |  |

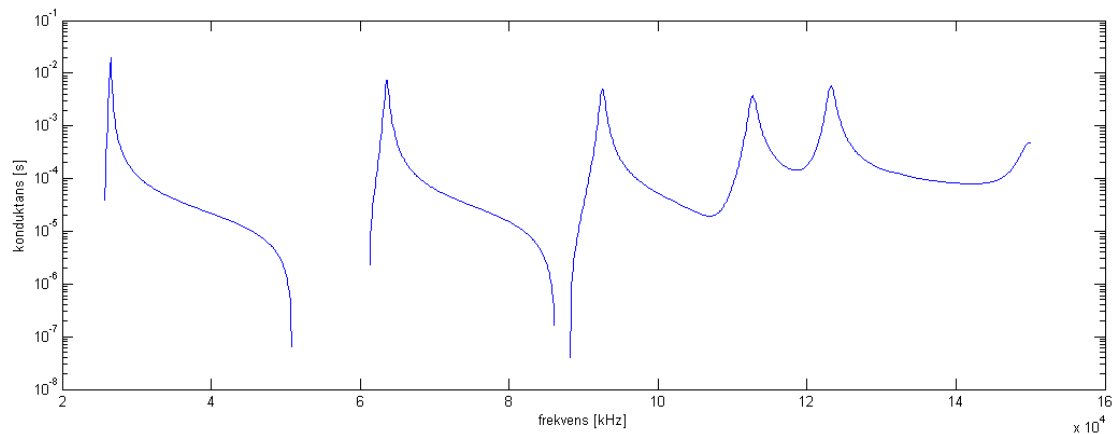
Simuleringer i FEMP med konstantsettet fra tabell 5.12 ble sammenlignet med FEMP simuleringer med konstanter fra resultatene etter konstanttilpassingene i arbeidene til Fardal [3]. Sammenligningene viste at Fardal sine konstanter representerte egenskapene til element 1 langt bedre enn konstantene funnet fra målinger på element 1.



Figur 5.12: Konduktans for element 1 (målt), FEMP simulering med material 39 (Materialkonstanter fra Fardal sitt arbeid [3]), og FEMP simulering med material 38 (Materialkonstanter fra målte egenskaper for element 1). FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.



Detaljerte studier av simulert konduktans for material 38 (konstanter fra målinger på element 1) viste at konduktansen var negativ i områdene rundt de første radiellmodene. Dette vises lett ved plotting med logaritmisk y-akse. Q-verdiene fra material 38 ble byttet med forenklet tap med  $Q_m=75$  og  $\tan\delta=0.02$  for å vurdere om feilen skyldes tapshåndteringen i materialkonstantene i material 38. Figur 5.13 viser at konduktansen for material 37 også gav negative verdier.



Figur 5.13 Konduktans material 37 (materialkonstanter med realdel fra målinger på element 1 og imaginærdelt håndtert ved tapsfaktor  $Q_m=75$  og  $\tan\delta=0.02$ ) simulert i FEMP. Bruddet i kurveformen skyldes negative verdier for konduktansen. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Erfaringen viste at selv om materialkonstantene kom fra målinger på element 1, var ikke resultatet av målingene konsistent nok til at FEMP håndterte dette riktig i simuleringen av elektriske egenskaper. Figur 5.12 viste dessuten at resultatet var langt fra tilfredsstillende selv om negative måleverdier mellom radiellmoderesonansene ble sett bort fra.

#### 5.4.2 Materialkonstanter fra FEMP kjøring

Materialkonstantene sin påvirkning av simuleringsresultatet i FEMP ble nøye undersøkt i [3]. Konklusjonene fra dette arbeidet ble benyttet for å forsøke å tilpasse et konstantsett for å gi best mulig samsvar mellom simuleringer i FEMP og elektriske målinger av element 1.

Simuleringer i FEMP med ulike materialkonstanter viste i figur 5.12 at materialdata fra Fardal sine arbeider (material 39 fra tabell 5.9) gav best tilpassing til de målte egenskapene til element 1. Material 39 ble derfor benyttet som utgangspunkt for å fremskaffe et sett med materialkonstanter som representerte egenskapene til element 1 med større grad av likhet enn hittil oppnådd. De ulike materialkonstantene sin innvirkning på elektriske størrelser er presentert i stor detaljeringsgrad i [3] og ble benyttet som utgangspunkt. Tabell 5.13 viser grovt konklusjonene fra [3], og gav en innfallsvinkel til den metodiske tilnærmingen som ble forsøkt i arbeidet med tilpassingen som presenteres i det følgende. Kvantifiseringen i elektriske egenskaper for element 1 fremkommer i tabell 5.10. Disse verdiene ble sammenholdt med tilsvarende verdier for elementet simulert i FEMP med material 39.

Tabell 5.13: Oppsummering av sensitivitetsanalyser i FEMP fra Fardal sine arbeider. (Tabell 5.35 fra [3]). Viser relativ variasjon i elektriske størrelser ved 1% økning av hver av de ti uavhengige materialkonstantene med tilhørende Q-verdi. En pil viser relativ variasjon på mellom 100ppm og 0,5%, to piler viser relativ variasjon på mellom 0,5% og 1%, og 3 piler viser en relativ variasjon på mer enn 1%.

|                     | Real $c_{11}^E$ | Q- $c_{11}^E$ | Real $c_{12}^E$ | Q- $c_{12}^E$ | Real $c_{13}^E$ | Q- $c_{13}^E$ | Real $c_{33}^E$ | Q- $c_{33}^E$ | Real $c_{44}^E$ | Q- $c_{44}^E$ |
|---------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| R1:fs               | ↑↑              |               | ↑               |               | ↓↓              |               | ↑               |               |                 |               |
| R2:fs               | ↑↑              |               | ↑               |               | ↓↓              |               | ↑               |               |                 |               |
| TE1:fs              | ↑               |               |                 |               | ↓               |               | ↑               |               | ↑               |               |
| R1:BW <sub>s</sub>  | ↑               | ↓↓            | ↓               | ↓             | ↑↑↑             | ↑             | ↓↓              | ↓↓            |                 |               |
| R2:BW <sub>s</sub>  | ↑               | ↓↓            | ↓               |               | ↑↑              | ↑             | ↓               | ↓             |                 |               |
| TE1:BW <sub>s</sub> | ↑↑↑             |               |                 |               | ↑               |               | ↓               | ↓↓            | ↑↑              |               |
| R1:G                | ↑               | ↑↑            | ↓               | ↑             | ↑               | ↓             | ↓↓              | ↑↑            |                 |               |
| R2:G                | ↓               | ↑↑            |                 | ↑             | ↑               | ↓             | ↓↓              | ↑             |                 |               |
| TE1:G               | ↓↓↓             | ↑             |                 |               | ↑↑↑             | ↓             | ↑↑↑             | ↑↑            | ↓↓↓             | ↑             |
| R1:fp               | ↑↑              |               | ↑               |               | ↓↓              |               | ↑               |               |                 |               |
| R2:fp               | ↑↑              |               | ↑               |               | ↓↓              |               | ↑               |               |                 |               |
| TE1:fp              |                 |               |                 |               |                 |               | ↑               |               | ↑               |               |
| R1:BW <sub>p</sub>  | ↑               | ↓↓↓           | ↑               | ↓             | ↑↑              | ↑             | ↓               | ↓             |                 |               |
| R2:BW <sub>p</sub>  | ↑               | ↓↓            |                 |               | ↑↑              | ↑             | ↓               | ↓             |                 |               |
| TE1:BW <sub>p</sub> | ↑↑↑             |               |                 |               | ↓↓↓             |               | ↑↑↑             | ↓↓↓           | ↑               | ↓             |
| R1:R                | ↓↓              | ↑↑↑           | ↓↓              | ↑             | ↑↑↑             | ↓             | ↓↓              | ↑             |                 |               |
| R2:R                | ↓↓↓             | ↑↑            | ↓               | ↑             | ↑↑↑             | ↓             | ↓↓↓             | ↑             |                 |               |
| TE1:R               | ↓↓↓             | ↑             |                 |               | ↑↑↑             |               | ↓↓              | ↑↑            | ↓↓↓             | ↑             |

| Verdi               | Real $\epsilon_{31}$ | Q- $\epsilon_{31}$ | Real $\epsilon_{33}$ | Q- $\epsilon_{33}$ | Real $\epsilon_{15}$ | Q- $\epsilon_{15}$ | Real $\epsilon_{11}^S$ | Q- $\epsilon_{11}^S$ | Real $\epsilon_{33}^S$ | Q- $\epsilon_{33}^S$ |
|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| R1:fs               |                      |                    |                      |                    |                      |                    |                        |                      |                        |                      |
| R2:fs               |                      |                    |                      |                    |                      |                    |                        |                      |                        |                      |
| TE1:fs              |                      |                    | ↑                    |                    |                      |                    |                        |                      | ↓                      |                      |
| R1:BW <sub>s</sub>  |                      |                    |                      |                    |                      |                    |                        |                      |                        |                      |
| R2:BW <sub>s</sub>  |                      |                    |                      |                    |                      |                    |                        |                      |                        |                      |
| TE1:BW <sub>s</sub> | ↑                    |                    | ↑                    |                    | ↑                    |                    |                        |                      |                        |                      |
| R1:G                | ↑↑                   |                    | ↑↑↑                  |                    |                      |                    |                        |                      |                        |                      |
| R2:G                | ↑↑                   |                    | ↑↑↑                  |                    |                      |                    |                        |                      |                        |                      |
| TE1:G               | ↓                    |                    | ↑↑↑                  | ↓                  | ↓↓↓                  | ↓                  | ↑↑                     | ↑                    | ↑                      | ↑                    |
| R1:fp               | ↑                    |                    | ↑                    |                    |                      |                    |                        |                      | ↓                      |                      |
| R2:fp               | ↑                    |                    | ↑                    |                    |                      |                    |                        |                      | ↓                      |                      |
| TE1:fp              |                      |                    | ↑                    |                    |                      |                    |                        |                      | ↓                      |                      |
| R1:BW <sub>p</sub>  | ↓                    | ↑                  | ↓                    | ↑                  |                      |                    |                        |                      | ↑                      | ↓                    |
| R2:BW <sub>p</sub>  |                      | ↑                  |                      | ↑                  |                      |                    |                        |                      | ↑                      |                      |
| TE1:BW <sub>p</sub> | ↑                    |                    | ↑↑↑                  | ↑                  | ↑↑                   |                    | ↓↓                     |                      |                        | ↓                    |
| R1:R                | ↑                    | ↓                  | ↑                    | ↓                  |                      |                    |                        |                      | ↓↓↓                    | ↑                    |
| R2:R                | ↑↑                   | ↓                  | ↑                    | ↓                  |                      |                    |                        |                      | ↓↓↓                    | ↑                    |
| TE1:R               | ↓                    |                    | ↑↑↑                  | ↓                  | ↓↓↓                  | ↓                  | ↑↑                     |                      | ↓↓↓                    | ↑                    |

Tilpassingen av materialkonstanter tok utgangspunkt i best mulig match av de elektriske størrelsene i venstre kolonne i tabell 5.13 og 5.14. Tilnæringsmessig ble konduktans valgt som innfallsvinkel. Material 52 fremstod etter økning av Qc33 som en mye bedre tilpassing enn utgangspunktet, spesielt for radielle moder. Etter dette ble fokus lagt på tilpassing av tykkelsesmoden da denne ikke harmonerte særlig godt med målingene.

Tabell 5.14: Kvantifiserte elektriske størrelser for element 1 fra målinger sammenholdt med elektriske størrelser funnet fra simuleringer i FEMP med ulike materialdatafiler. Resultat for FEMP med material 39, 50 og 51 presentert med relative avvik til målte verdier. Verdier i rødt indikerer relativ endring til foregående material fra venstre.

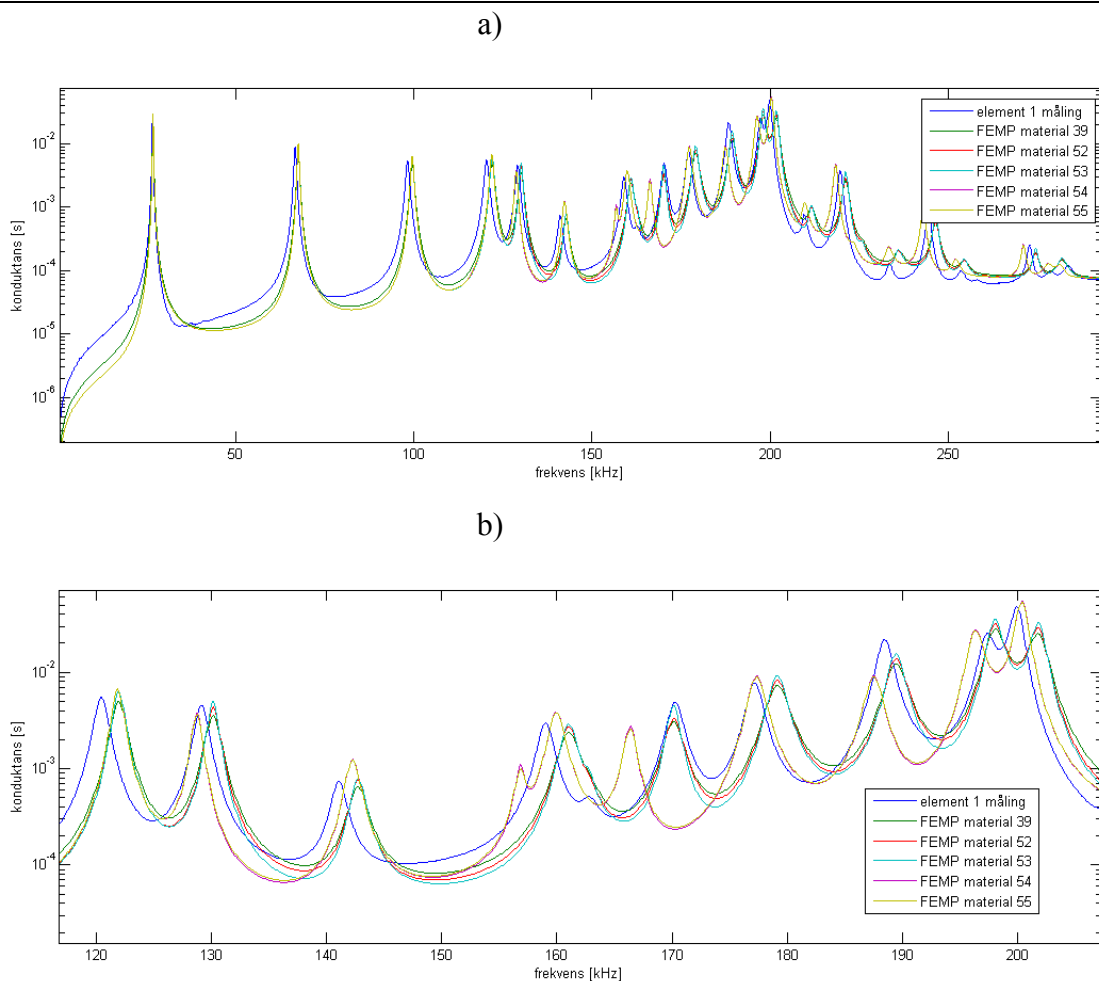
|                          | Element 1 - målinger | material 39<br>Konstanter fra Fardal sitt arbeid | rel.diff.(%)<br>material 39 - måling | material 50<br>Qc33 øket 5% ift mat 39 | rel dif (%) | material 51<br>Qc33 øket 20% ift mat 39 | rel diff (%) |
|--------------------------|----------------------|--|--------------------------------------|--|-------------|---|--------------|
| R1:fs (kHz)              | 26,705               | 26,9   | 0,73020034                           | 26,9                                   | 0,7302      | 26,9                                    | 0,7302       |
| R2:fs (kHz)              | 66,77                | 67,6   | 1,24307324                           | 67,6                                   | 1,2431      | 67,6                                    | 1,2431       |
| TE1:fs (kHz)             | 200                  | 198  | -1                                   | 198                                    | -1          | 198                                     | -1           |
| R1:BW <sub>s</sub> (Hz)  | 245                  | 300  | 22,4489796                           | 300                                    | 22,449      | 300                                     | 22,449       |
| R2:BW <sub>s</sub> (Hz)  | 685                  | 700  | 2,18978102                           | 700                                    | 2,1898      | 700                                     | 2,1898       |
| TE1:BW <sub>s</sub> (Hz) | 3700                 | 5450   | 47,2972973                           | 5200                                   | 40,541      | 5200                                    | 40,541       |
| R1:G (S)                 | 0,029878             | 0,0245   | -17,9998661                          | 0,0251                                 | -15,992     | 0,02673                                 | -10,54       |
| R2:G (s)                 | 0,009149             | 0,008225   | -10,0994644                          | 0,008419                               | -7,979      | 0,008945                                | -2,23        |
| TE1:G (s)                | 0,0488               | 0,0282   | -42,2131148                          | 0,0287                                 | -41,189     | 0,02998                                 | -38,57       |
| R1:fp (kHz)              | 30,98                | 31,3   | 1,03292447                           | 31,3                                   | 1,0329      | 31,3                                    | 1,0329       |
| R2:fp (kHz)              | 68,5                 | 69,3   | 1,16788321                           | 69,3                                   | 1,1679      | 69,3                                    | 1,1679       |
| TE1:fp (kHz)             | 212,7                | 214,9  | 1,03432064                           | 214,9                                  | 1,0343      | 214,9                                   | 1,0343       |
| R1:BW <sub>p</sub> (Hz)  | 215                  | 350  | 62,7906977                           | 400                                    | 86,047      | 400                                     | 86,047       |
| R2:BW <sub>p</sub> (Hz)  | 700                  | 750  | 7,14285714                           | 700                                    | 0           | 700                                     | 0            |
| TE1:BW <sub>p</sub> (Hz) | 1200                 | 2300   | 91,6666667                           | 2300                                   | 91,667      | 2200                                    | 83,333       |
| R1:R (ohm)               | 44267                | 28931  | -34,6443174                          | 29250                                  | -33,924     | 30080                                   | -32,05       |
| R2:R (ohm)               | 2787,295             | 2682   | -3,77767692                          | 2738                                   | -1,7686     | 2889                                    | 3,6489       |
| TE1:R (ohm)              | 4257,89              | 2212   | -48,049386                           | 2252                                   | -47,11      | 2358                                    | -44,62       |

Det ble antatt at tykkelses skjærbølger gjorde seg gjeldende og forårsaket et sammensatt bilde av responsene til elementene rundt tykkelsesmoderesonans. Bølgehastighet i skjærretning er gitt av c44. Det ble derfor antatt at c44 med tilhørende tapsverdi ville påvirke de elektriske responsene i frekvensområdet opp mot frekvensen for tykkelsesmode resonans (TE-moden)

Tabell 5.15: Kvantifiserte elektriske størrelser for element 1 fra målinger sammenholdt med elektriske størrelser funnet fra simuleringer i FEMP med ulike materialdatafiler. Resultat for FEMP med material 52, 53, 54 og 55 presentert med relative avvik til målte verdier. Verdier i rødt indikerer relativ endring til foregående material fra venstre. (Røde verdier for material 52 representerer endring fra material 51 i tabell 5.14:a))

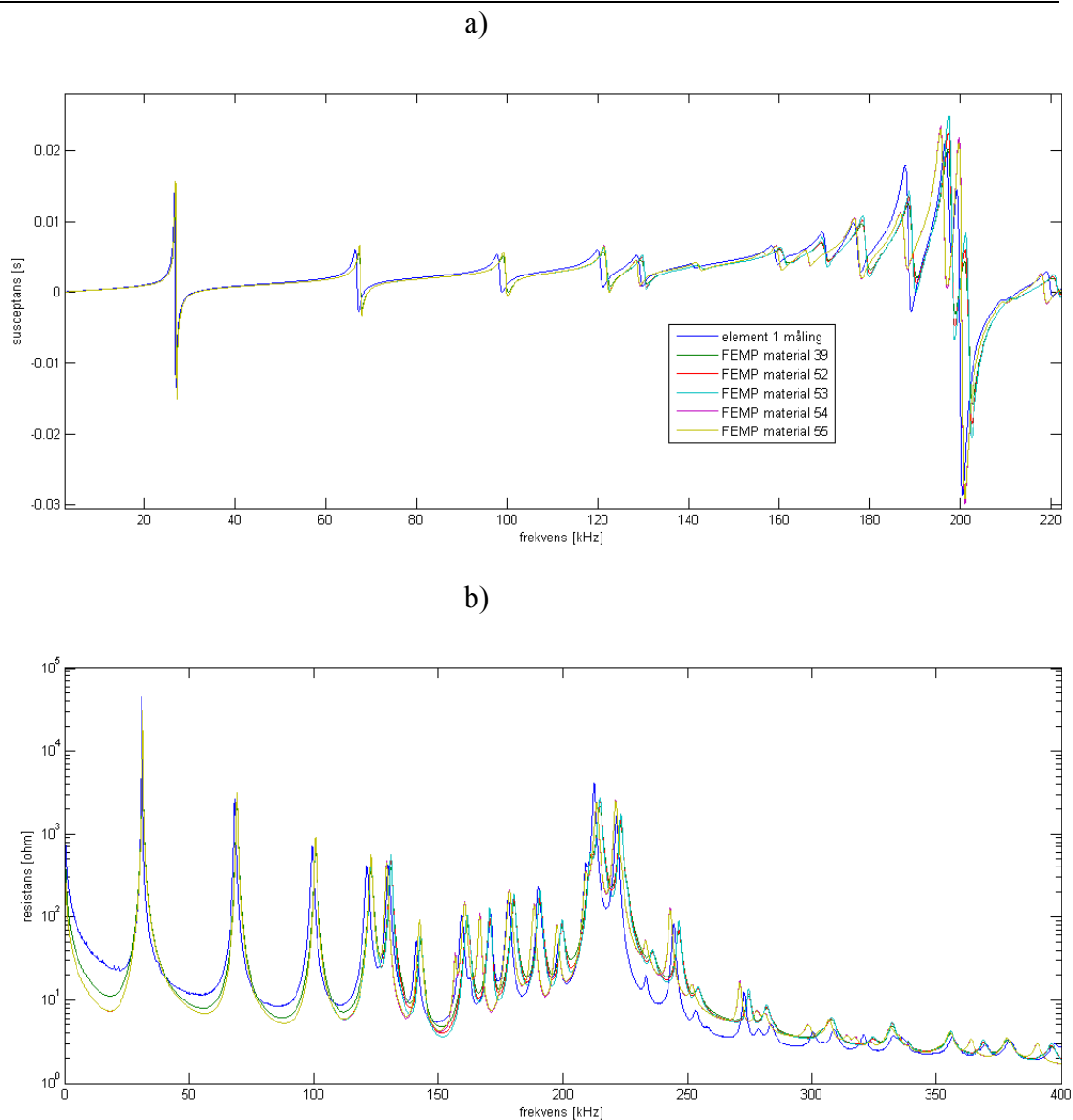
|                          | Element 1 - målinger | material 52<br>Qc33øket 50% ift mat 39 | rel diff (%) | material 53<br>Qc44 øket 100%<br>Qc33øket 50% ift mat 39 | rel. diff (%) | material 54<br>Qc33øket 50%, c44 redusert 10%, Qc44 øket 150% ift mat 39 | rel. diff (%) | material 55<br>Qc33øket 50%, c44 redusert 10%, Qc44 øket 100%, ift mat 39 | rel diff (%) |
|--------------------------|----------------------|--|--------------|--|---------------|--|---------------|---|--------------|
| R1:fs (kHz)              | 26,705               | 26,9                                   | 0,73         | 26,9   | 0,73          | 26,9   | 0,73          | 26,9  | 0,73         |
| R2:fs (kHz)              | 66,77                | 67,6                                   | 1,243        | 67,6   | 1,243         | 67,6   | 1,243         | 67,6  | 1,243        |
| TE1:fs (kHz)             | 200                  | 198                                    | -1           | 198  | -1            | 200,3  | 0,15          | 200,3   | 0,15         |
| R1:BW <sub>s</sub> (Hz)  | 245                  | 300                                    | 22,45        | 300  | 22,45         | 300  | 22,45         | 300   | 22,45        |
| R2:BW <sub>s</sub> (Hz)  | 685                  | 700                                    | 2,19         | 700  | 2,19          | 700  | 2,19          | 700   | 2,19         |
| TE1:BW <sub>s</sub> (Hz) | 3700                 | 5200                                   | 40,54        | 5200   | 40,54         | 5400   | 45,95         | 5300  | 43,24        |
| R1:G (S)                 | 0,029878             | 0,02935                                | -1,767       | 0,02935  | -1,77         | 0,02935  | -1,77         | 0,02935   | -1,767       |
| R2:G (s)                 | 0,009149             | 0,009801                               | 7,126        | 0,009801   | 7,126         | 0,009801   | 7,126         | 0,009799  | 7,105        |
| TE1:G (s)                | 0,0488               | 0,032                                  | -34,43       | 0,03585  | -26,5         | 0,05429  | 11,25         | 0,05315   | 8,914        |
| R1:fp (kHz)              | 30,98                | 31,3                                   | 1,033        | 31,3   | 1,033         | 31,3   | 1,033         | 31,3  | 1,033        |
| R2:fp (kHz)              | 68,5                 | 69,3                                   | 1,168        | 69,3   | 1,168         | 69,3   | 1,168         | 69,3  | 1,168        |
| TE1:fp (kHz)             | 212,7                | 214,9                                  | 1,034        | 214,9  | 1,034         | 213,5  | 0,376         | 213,5   | 0,376        |
| R1:BW <sub>p</sub> (Hz)  | 215                  | 400                                    | 86,05        | 400  | 86,05         | 400  | 86,05         | 300   | 39,53        |
| R2:BW <sub>p</sub> (Hz)  | 700                  | 700                                    | 0            | 700  | 0             | 700  | 0             | 600   | -14,29       |
| TE1:BW <sub>p</sub> (hz) | 1200                 | 2200                                   | 83,33        | 1800   | 50            | 1800   | 50            | 1600  | 33,33        |
| R1:R (ohm)               | 44267                | 31330                                  | -29,22       | 31330  | -29,2         | 31330  | -29,2         | 31330   | -29,22       |
| R2:R (ohm)               | 2787,295             | 3130                                   | 12,3         | 3130   | 12,3          | 3130   | 12,3          | 3131  | 12,33        |
| TE1:R (ohm)              | 4257,89              | 2526                                   | -40,67       | 2718   | -36,2         | 2396   | -43,7         | 2351  | -44,78       |

Relative differanser til målinger på element 1 virket til å bli reduserte i tilnærmingen som var valgt. Imidlertid viste tallsammenligningene at en fortsatt tilpassing basert på en metodisk tilnærming med sensitivitetsanalysene fra [3] som referanse ville møte på problemområder der bedring av et forhold gikk ut over et annet. Dette problemet avstedkom en mer kvalitativ tilnærming ved å se på responsfunksjonene og ut fra det forsøke å analysere effektene. Et essensielt forhold var å skille de ulike svingemodene fra hverandre og om mulig koble dette mot materialkonstanter og deres innvirkning.



Figur 5.14: Konduktans for måling av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med fem ulike sett med materialkonstanter. a) viser frekvensområdet inntil 300kHz, mens b) viser et utsnitt fra ca 120-220kHz. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Endring av materialkonstanter basert på Fardal sine arbeider gav helt klart en kvalitativ visuell forbedring av representasjonen av element 1 i FEMP. Likevel viste målinger og simuleringer at kvantifiseringen i tabell 5.14 ikke var dekkende for å beskrive materialkonstantenes virkning på den elektriske responsen. Hovedgrunnen til dette var tilsynelatende at responsen i frekvensområdet under tykkelsesresonans ikke var beskrevet med størrelsene benyttet i tabell 5.14. I dette frekvensområdet ble det antatt sterkere kobling mellom ulike svingemoder enn det som var opplevd i tidligere arbeider (f. eks i [3] som denne metodiske tilnærmingen er avledet fra). Dette basert på at element 1 hadde et diameter/tykkelsesforhold på rundt 7,5 i motsetning til vesentlig høyere verdier i andre arbeider hvor tilpassede konstanter benyttet i FEMP. [3], [4], [5] og [6].



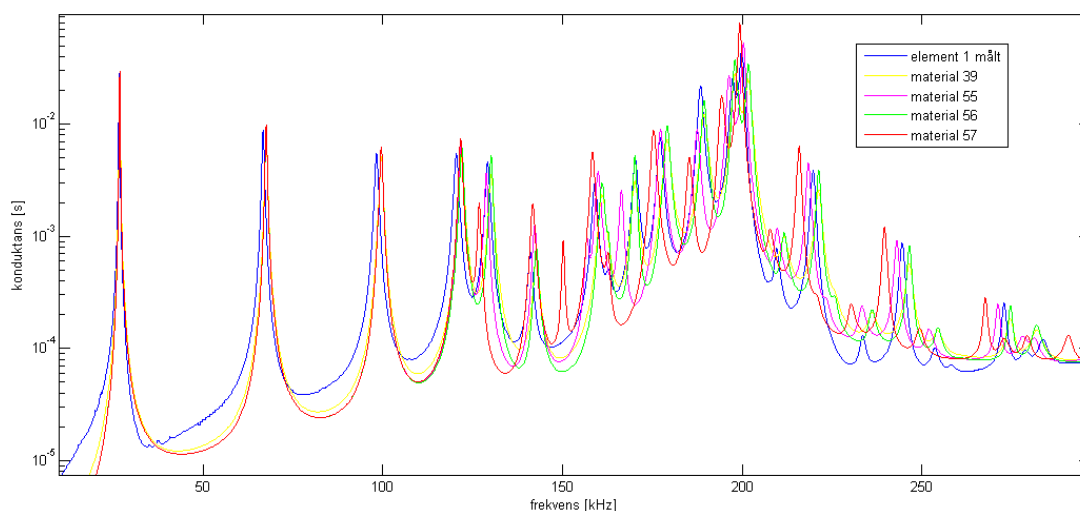
Figur 5.15: Susceptans a) og resistans b) for måling av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med fem ulike sett med materialkonstanter. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Material 55 hadde en tilpassing som gav en viss grad av formlikhet med de elektriske egenskapene til element 1 slik de fremkom av målinger. Imidlertid var det fremdeles så stor grad av mistilpassing at feilkildene klart overgikk alle andre feilkilder i arbeidene. Basert på det fremkomne faktum at både resistans og konduktans for serieresonansen til tykkelsesmoden (TE1-mode) var merkbart for lav, ble dette forsøkt ytterligere tilpasset. Med bakgrunn i konklusjonene fra [2] og tabell 5.13, ble endringer av  $c_{44}$  og  $Q_{c44}$  forsøkt. Dette gav ikke bedre tilpassing. Effekten ble kvalitativt vurdert ved å se på plottede kurver for elektriske egenskaper.

Tabell 5.16: Endringer i materialkonstanter for material 56 og 57 relativt til material 55.

| Material | Referanse material | Endring   | Effekt  |
|----------|--------------------|---|---|
| 56       | Material 55        | Qc44 øket 50%<br>(til totalt 200% ift material 39)  | Større frekvensavvik i området under tykkelsesmoden |
| 57       | Material 55        | c44 senket 11%<br>(til totalt -20% ift material 39) | Betydelige frekvensavvik.                           |

Endringene i materialkonstanter slik det fremkommer av figur 5.16 gav ingen forbedret tilpassing. Andre tilnærminger for å oppnå bedre tilpassing mellom FEMP simuleringer og målinger måtte derfor gjøres. Effektene som vises i området mellom de radielle modene (fra ca 100kHz) og opp mot tykkelsesmoden (200kHz) var lite og dårlig dokumentert i litteraturen som ble studert i arbeidene.



Figur 5.16: Konduktans for målinger av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 39, 55, 56 og 57. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

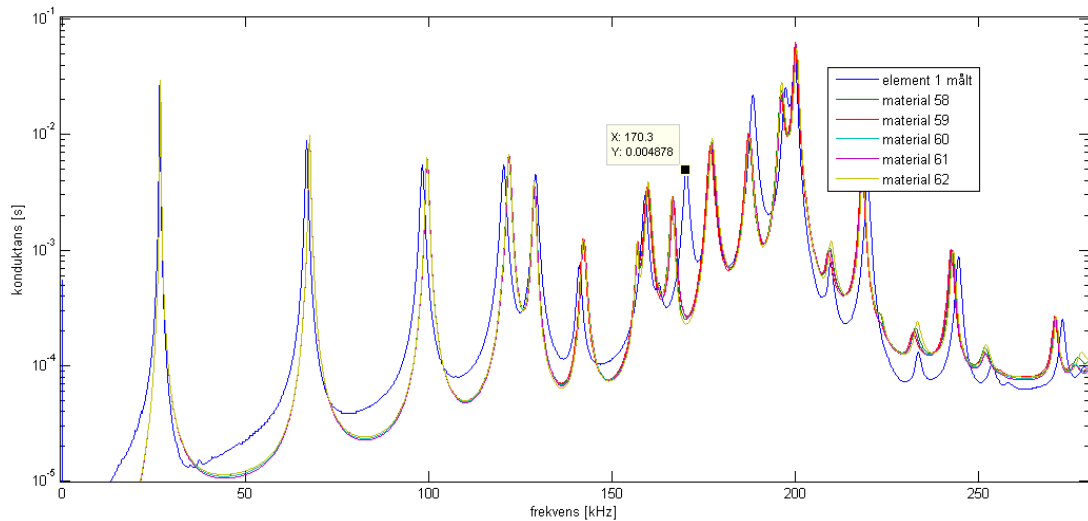
Grunnen til at de effektene som inntraff i frekvensområdet 100-200kHz ikke lot seg forklare med bakgrunn i tidligere arbeider, kan være at de ikke var studert i tilstrekkelig detaljgrad. Arbeidene til Fardal [3] har stått som en tilnærming til materialkonstanter i FEMP ved flere etterfølgende arbeider [4], [5] og [6]. Ingen av disse arbeidene beskriver i særlig detaljgrad sammenhengen mellom de sterke koblingseffektene som inntreffer mellom radiellmoden og tykkelsesmoden ved lave d/t-forhold. Disse koblingseffektene er heller ikke utførlig beskrevet i Fardal sine arbeider [3], mye på grunn av at arbeidene fokuserte på kvantifisering av egenskapene i størrelser rundt radiellmoderesonans og tykkelsesmoderesonans (ref tabell 5.13). De konstantene som enten ikke berører størrelsene listet i tabell 5.13 i særlig grad, eller som ikke ble endret i Fardal sin tilpassing av konstanter (tilpassing fra material 40-Vernitron produsentdata til material 39-Fardal tilpassede konstanter) ble derfor besluttet undersøkt.

Tabell 5.17: Relative endringer for ulike materialkonstantsett i FEMP. Kommentarer for tilpassingen er ikke komplette. Det vises til grafiske plott i figur 5.17-5.22 for utfyllende informasjon.

| Material | Referanse material | Endring         | Kommentar  |
|----------|--------------------|-----------------|--|
| 58       | Material 55        | Eps11 øket 5%   | Liten effekt   |
| 59       | Material 55        | E15 senket 5%   |  |
| 60       | Material 59        | Eps33 senket 5% |  |
| 61       | Material 60        | QEps33 øket 5%  |  |
| 62       | Material 59        | Qc44 øket 150%  | Tilsynelatende blindspor ift tilpassing                      |
| 63       | Material 56        | Eps33 øket 5%   |  |
| 64       | Material 63        | C13 øket 5%     |  |
| 65       | Material 63        | C13 øket 1%     |  |
| 66       | Material 63        | C13 øket 2%     | Formlikhet i frekvens oppnådd Litt for lav frekvens generelt |
| 67       | Material 63        | C13 øket 1,5%   | God tilpassing hittil  |
| 68       | Material 67        | C44 senket 1%   | Ingen bedring  |
| 69       | Material 68        | C11 senket 1%   | Forverret tilpassing. Frekvenser senket for mye              |
| 70       | Material 67        | e15 senket 1%   | Bedret tilpassingen  |
| 71       | Material 67        | e15 senket 5%   | Beste tilpassing. Litt høy konduktans i TE1 moden            |
| 72       | Material 71        | Qe15 øket 2%    | Dårligere tilpassing   |

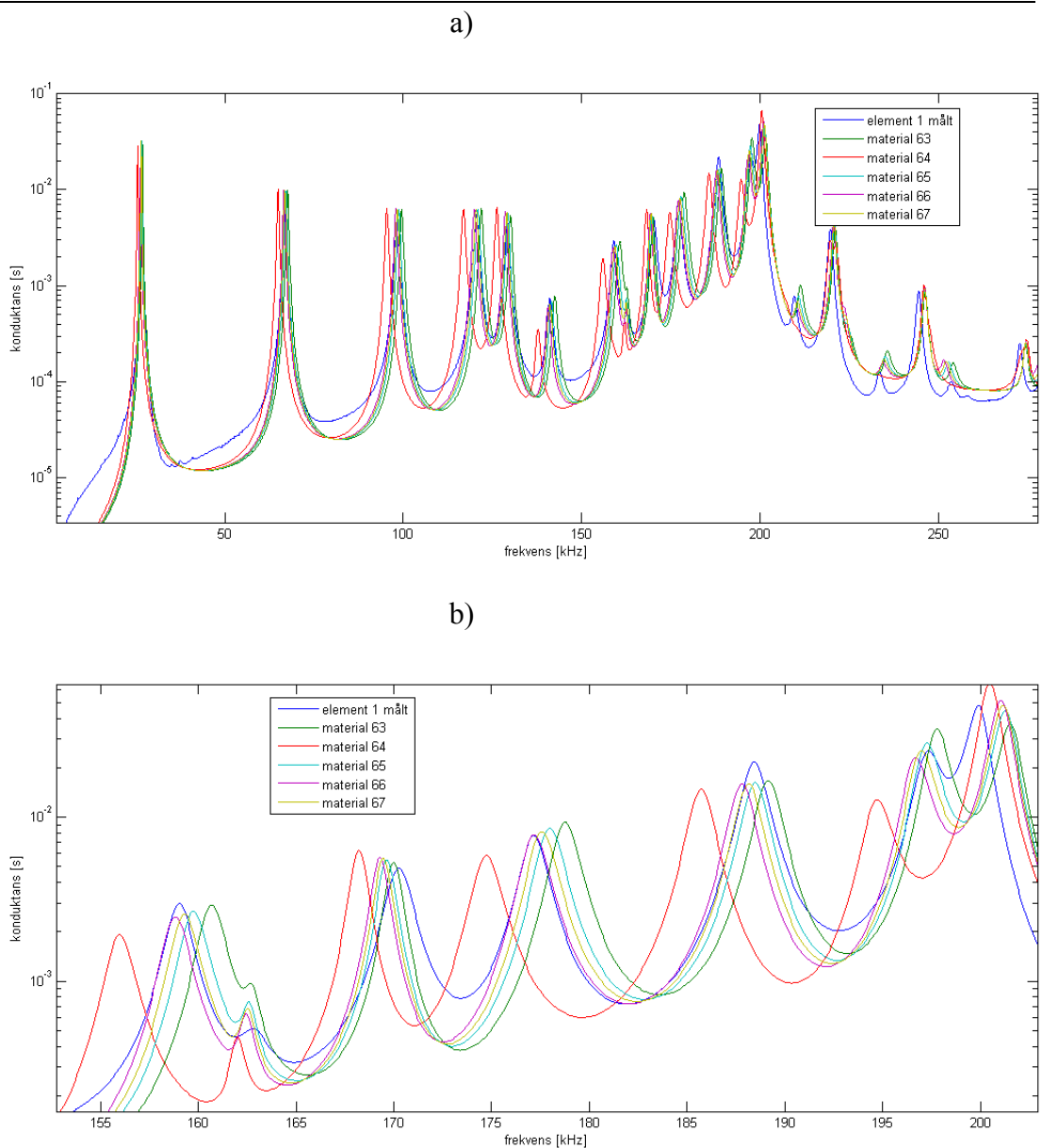


Materialkonstantsettene som henvises i tabell 5.17 er i sin komplette form listet i vedlegg 3. Tilpassingen av materialkonstanter var ikke hensiktsmessig å gjengi i tabells form slik som i tabell 5.15. Få av endringene i materialkonstanter for material 58-72 gav synlige endringer i den formen som egenskapene ble kvantifisert i denne tabellen. Effekten ble derfor tolket kvalitativt ved hjelp av grafiske plott.



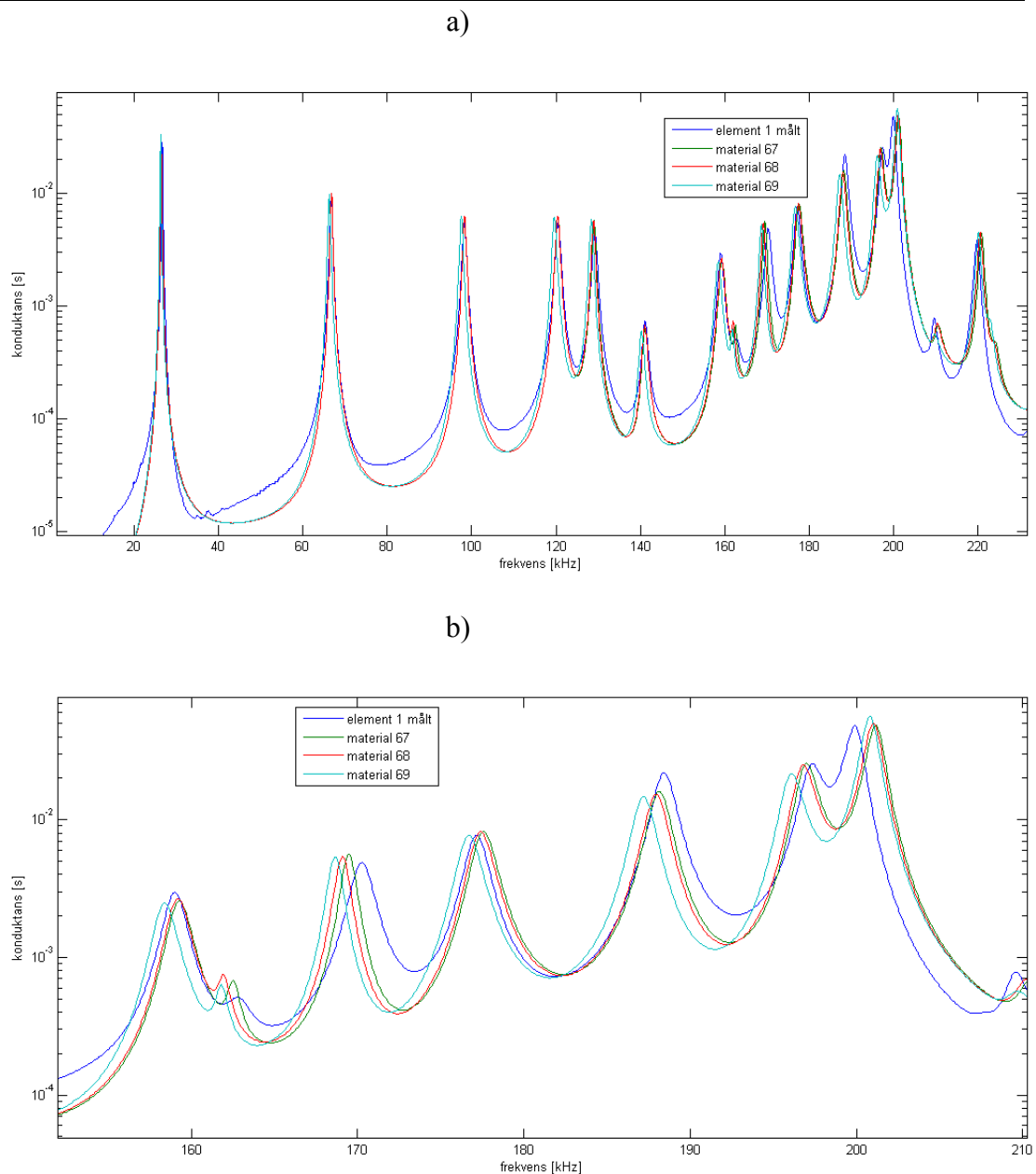
Figur 5.17: Konduktans for målinger av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 58, 59, 60, 61 og 62. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Hovedproblemet med tilpassing av materialkonstanter i FEMP fremgår av merket frekvenstopp i figur 5.17. Målingene av element 1 tilkjenne gav tydelig en svingemode rundt denne frekvensen som FEMP ikke gjenskapte. Prinsippielt ble det fremhøvt at FEMP ville representere elementet riktig forutsatt valide inngangsparametere. Det ble derfor forsøkt videre med ytterligere tilpassing av konstanter for material 63-72 slik det fremgår av tabell 5.17.



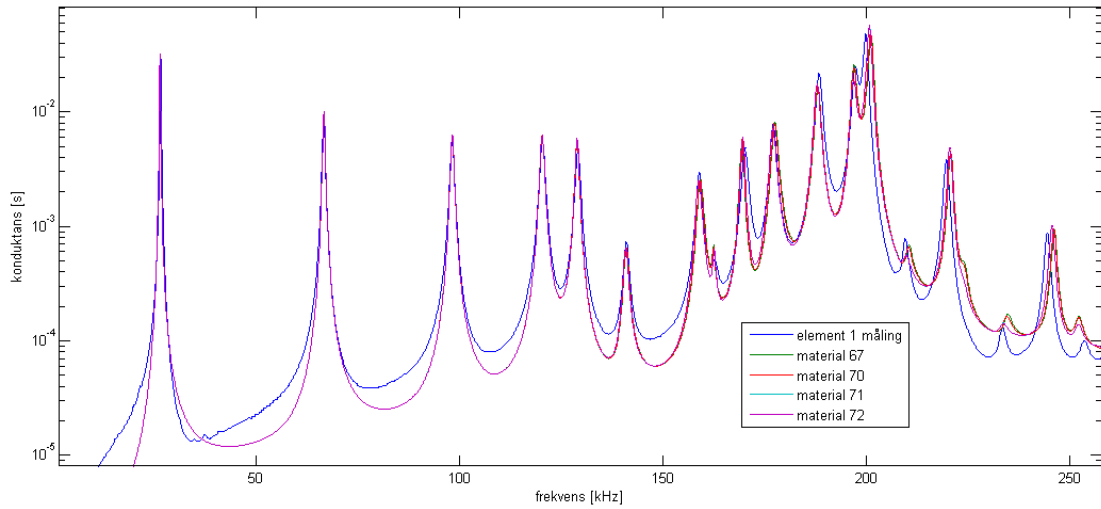
Figur 5.18: Konduktans for målinger av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 63, 64, 65, 66 og 67. a) viser frekvensområdet fra 0-270kHz. b) viser utsnitt for frekvensområdet 155-205kHz.  $c_{13}$  er endret med mellom 1 og 5% i de fem ulike materialnumrene. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Endring av  $c_{13}$  medførte forlikhet rundt resonansfrekvensen ved 170kHz. Ytterligere tilpassinger ble basert på material 67 da dette fremstod som best tilpasset i plottet.



Figur 5.19: Konduktans for målinger av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 67, 68 og 69. a) viser frekvensområdet fra 0-220kHz. b) viser frekvensområdet fra 155kHz til 210kHz. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

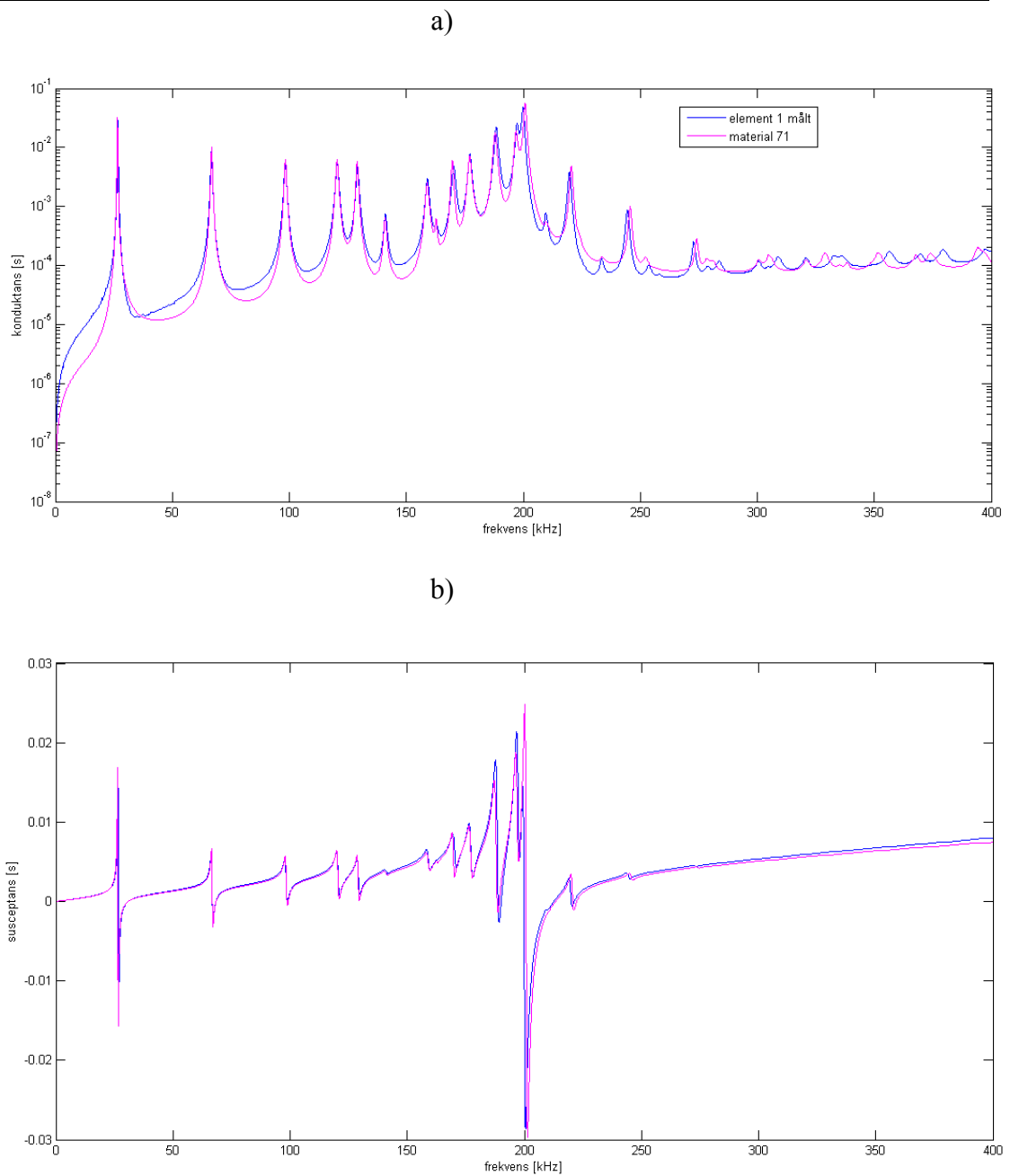
Material 68 og 69 gav ingen forbedring av tilpassingen da resonansfrekvensene generelt ble senket for mye.



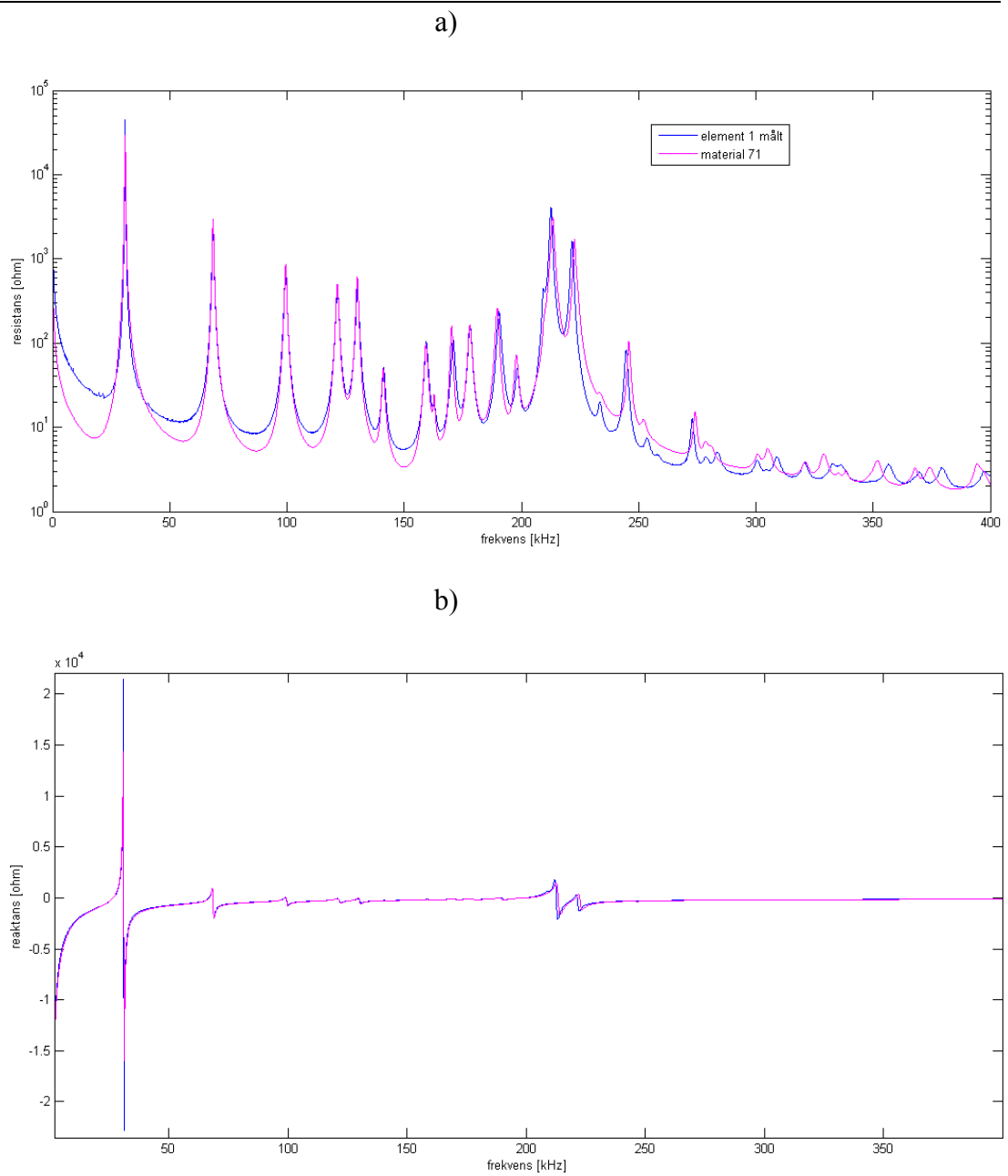
Figur 5.20: Konduktans for måling av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 67, 70, 71 og 72. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

---

Beste tilpassing av formlikhet mellom elektriske målinger av element 1 og simuleringer i FEMP ble oppnådd med material 71. Figurene 5.17 til 5.20 viser effektene endringene i materialkonstanter hadde på konduktansen til element 1 når det ble simulert i FEMP. Endringene av materialkonstanter fremgår av tabell 5.17 samt i materialdatafiler fra FEMP, listet i vedlegg 3. Material 71 ble benyttet videre i arbeidene når elementene skulle simuleres i FEMP.



Figur 5.21: Konduktans a) og susceptans b) for måling av element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 71. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.



Figur 5.22: Resistans a) og reaktans b) for måling av element element 1 sammenholdt med simuleringer i FEMP med materialnummer 71. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.

Tabell 5.18: Materialkonstanter for PZT-5A elementene benyttet i arbeidene. Material 38 er konstanter fra elektriske målinger på element 1. Material 38 er hentet fra [3] og er basert på tilpassinger i FEMP til PZT-5A skiver benyttet i det arbeidet. Material 71 er basert på tilpassinger i FEMP til PZT-5A skivene benyttet i dette arbeidet. Material 40 er basert på produktdata fra produsent av PZT-5A skivene i dette arbeidet og arbeidet referert i [3].

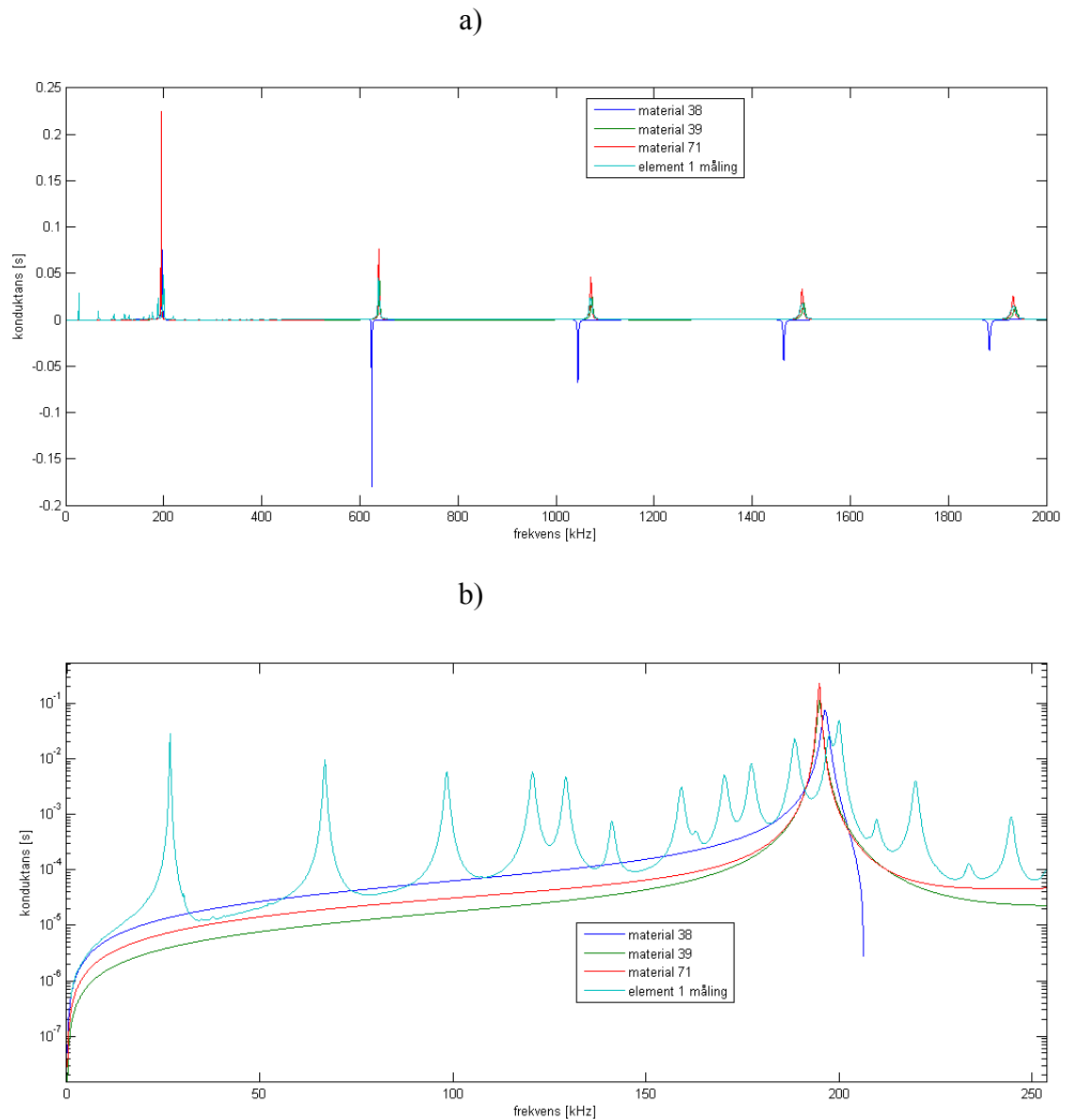
| Symbol | Enhet      | Realverdi fra målinger Material 38 | Q-verdi. Rødt er estimerte verdier (38) | Material 39<br>Verdi (ref. Rune Fardal)   |
|--------|------------|------------------------------------|---|---|
| cE11   | 10e10 N/m2 | 12.274                             | 53.4525                                 | 11,99189684290205 (1+i/177.3557990405095) |
| cE12   | 10e10 N/m2 | 9.1034                             | 50.4820                                 | 7,392665742331462 (1+i/469,4193738778428) |
| cE13   | 10e10 N/m2 | 8.2098                             | 52.1458                                 | 7,379724304579179 (1+i/397,2653483372656) |
| cE33   | 10e10 N/m2 | 11.625                             | 96.1323                                 | 11,30 (1+i/164)                           |
| cE44   | 10e10 N/m2 | 2.1053                             | 75                                      | 2.11(1+i/75)                              |
| E11S   | 10e-8 F/m  | 0.81304                            | 75                                      | 0,81103(1-i/50)                           |
| E33S   | 10e-8 F/m  | 0.82711                            | 148.5858                                | 0,518(1-i/163)                            |
| e31    | C/m2       | -3.4665                            | 8.3452                                  | -4,84491652814358 (1-i/165,6427656060534) |
| e33    | C/m2       | 12.7164                            | 24.2227                                 | 12,6(1-i/215)                             |
| e15    | C/m2       | 12.2947                            | 25                                      | 12,3(1-i/200)                             |
| Rho    | kg/m3      | 7704.8                             |   | 7740,0000000000000                        |
| Qm     |            |                                    |   |   |
| tand   |            |                                    |   |   |

| Symbol | Enhet      | Material 71<br>Tilpasset basert på FEMP simuleringer<br>Rødt indikerer endringer ift material 39 | Material 40<br>(Vernitron bulletin) |
|--------|------------|--|-------------------------------------|
| cE11   | 10e10 N/m2 | 12.140(1+i/177.3557990405095)  | 12,10000                            |
| cE12   | 10e10 N/m2 | 7.281776(1+i/469.4193738778428)  | 7,54000                             |
| cE13   | 10e10 N/m2 | 7.490420169(1+i/3.972653483372656e+02)   | 7,52000                             |
| cE33   | 10e10 N/m2 | 11.3000(1+i/246)   | 11,10000                            |
| cE44   | 10e10 N/m2 | 2.11000(1+i/225)   | 2,11000                             |
| E11S   | 10e-8 F/m  | 0.95030(1-i/50)  | 0,81103                             |
| E33S   | 10e-8 F/m  | 0.730800(1-i/1.000e+002)   | 0,73488                             |
| e31    | C/m2       | -4.84491652814358(1-i/165.6427656060534)   | -5,40000                            |
| e33    | C/m2       | 14.8000(1-i/200)   | 15,80000                            |
| e15    | C/m2       | 11.6850(1-i/200)   | 12,30000                            |
| Rho    | kg/m3      | 7710.00  | 7750,00000                          |
| Qm     |            |  | 75,00000                            |
| tand   |            |  | 0,02000                             |

## 5.5 Simulering med endimensjonale modeller

Radiellmodemodellen og tykkelsesmodemodellen gir begge et bilde av henholdsvis de radielle og tykkelses svingemodene uten kobling til andre moder. Materialkonstantene som inngår i de ulike modellene fremgår i kapittel 3.2.3. Som tidligere nevnt ble materialdatasettene benyttet med FEMP sin notasjon for direkte sammenligning mellom de ulike simuleringmodellene. Omrekning til de aktuelle konstantene som er inngangsverdi til de øvrige simuleringmodellene er vist også vist i kapittel 3.2.3.

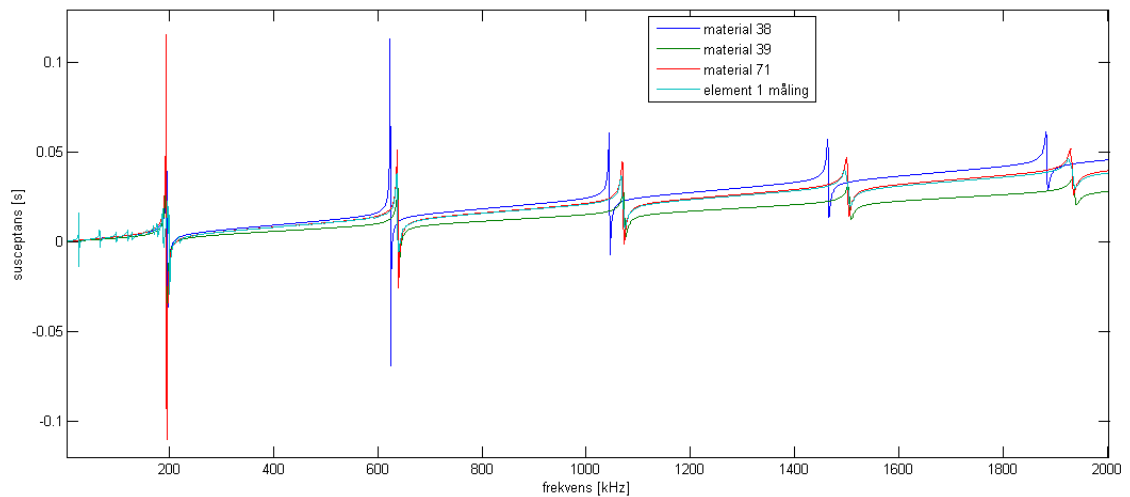
### 5.5.1 MASON Tykkelsesmodemodell



Figur 5.23: Konduktans fra måling av element 1 sammenholdt med simulering av element 1 med MASON tykkelsesmodemodell med material 38 (konstanter funnet fra målinger), 39 (konstanter fra Fardal sine arbeider [3]) og 71 (konstanter fra tilpasninger for best samsvar mellom målinger og simuleringer i FEMP). b) er utsnitt av målingene i a).

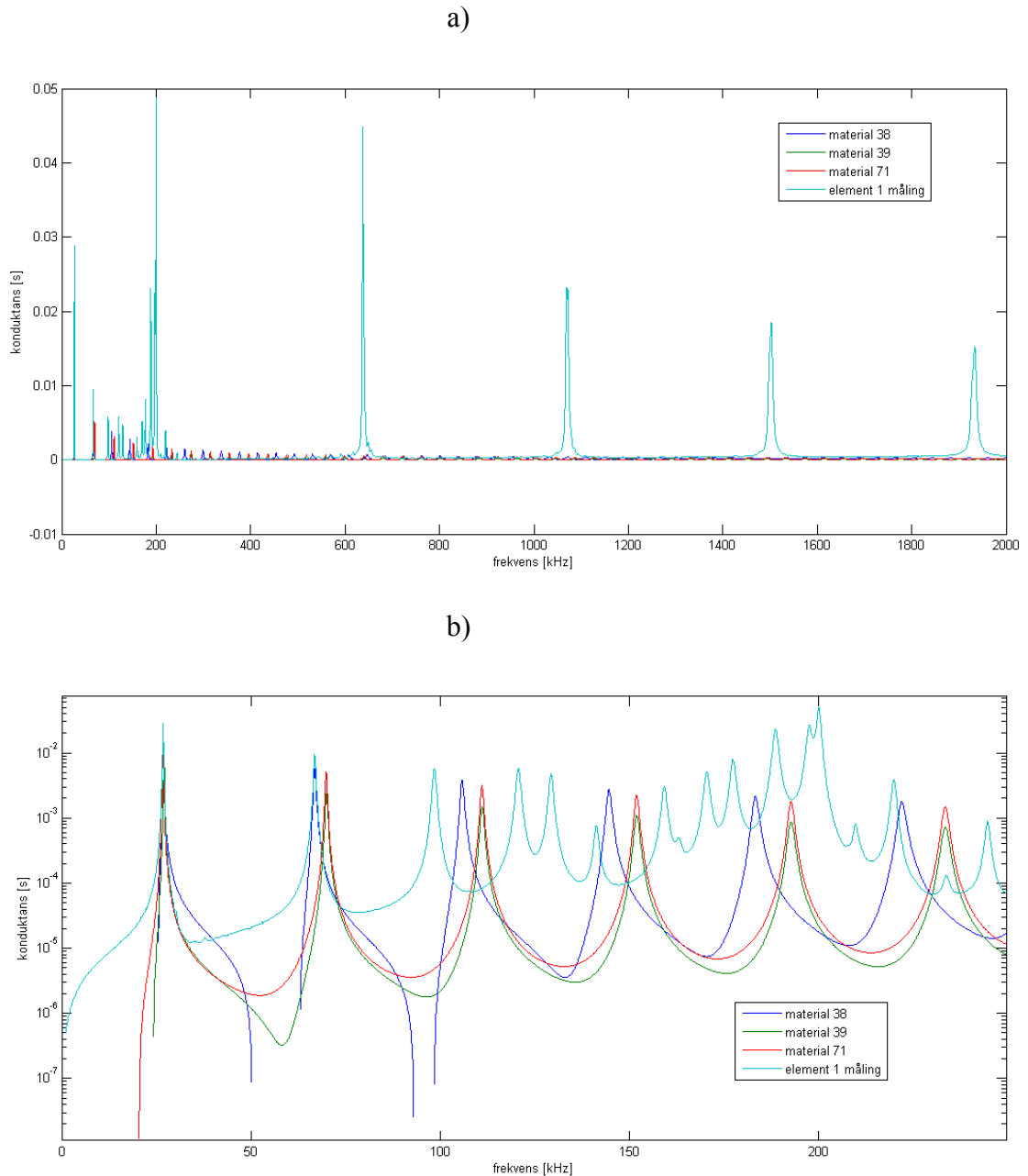


Figur 5.23 viser tydelig at de ulike materialkonstantene utgjør en vesentlig forskjell på egenskapene til elementet når det modelleres med tykkelsesmodemodellen. Material 38 viser tydelig inkonsistens i materialdatasettet i og med konduktansen er negativ i deler av frekvensområdet. Denne effekten fremkom også i FEMP simuleringer med samme materialet.



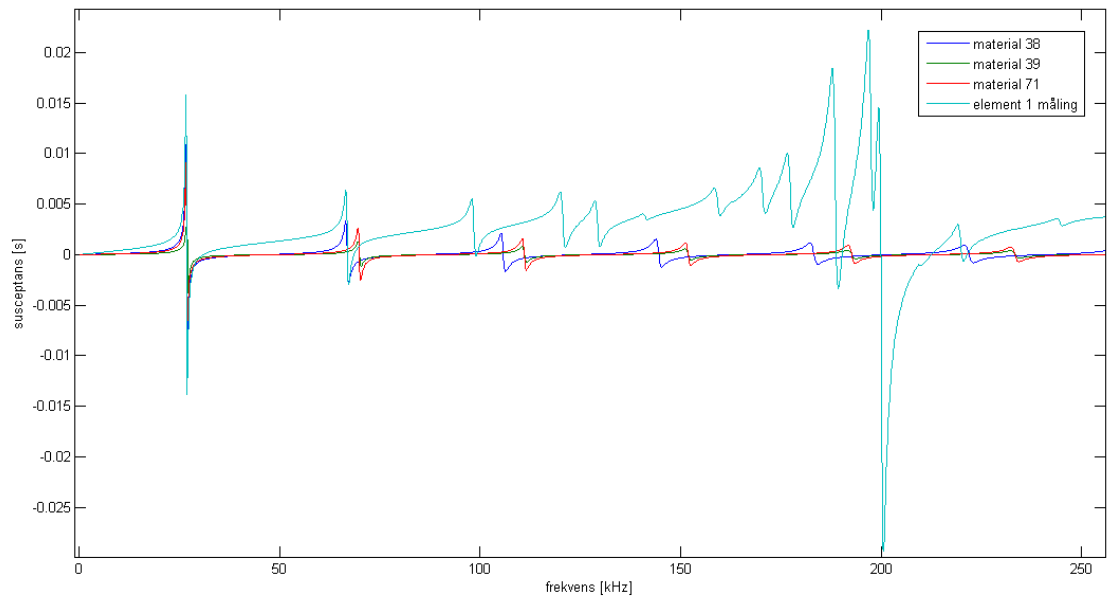
Figur 5.24: Susceptans fra måling av element 1 sammenholdt med simulering av element 1 med MASON tykkelsesmodemodell med material 38 (konstanter funnet fra målinger), 39 (konstanter fra Fardal sine arbeider [3]) og 71 (konstanter fra tilpasninger for best samsvar mellom målinger og simuleringer i FEMP).

## 5.5.2 Radiellmodemodellen



Figur 5.25: Konduktans fra måling av element 1 sammenholdt med simulering av element 1 med radiellmodemodellen med material 38 (konstanter funnet fra målinger), 39 (konstanter fra Fardal sine arbeider [3]) og 71 (konstanter fra tilpasninger for best samsvar mellom målinger og simuleringer i FEMP). b) er utsnitt av målingene i a).

Figur 5.25 viser forskjellen de ulike materialdatasettene utgjør når elementet simuleres med radiellmodemodellen. Diskontinuiteten i konduktansen til material 38 i b) er samsvarende med tilsvarende effekt observert både i tykkelsesmodemodellen og i FEMP for samme material.



Figur 5.26: : Susceptans fra måling av element 1 sammenholdt med simulering av element 1 med radiellmodemodell med material 38 (konstanter funnet fra målinger), 39 (konstanter fra Fardal sine arbeider [3]) og 71 (konstanter fra tilpasninger for best samsvar mellom målinger og simuleringer i FEMP).

---

## 5.6 Gyldighet til de ulike simuleringsmodellene

### 5.6.1 Endimensjonale modeller

De endimensjonale modellene er i arbeidene med denne oppgaven benyttet som vist ovenfor til å simulere elektriske egenskaper til de piezoelektriske skivene. I tillegg er de implisitt benyttet for å bestemme materialkonstanter for de piezoelektriske skivene ved hjelp av elektriske målinger på elementene. Imidlertid viste materialkonstantene som ble funnet, gitt i material 38, store avvik fra konstantene fra tidligere arbeider [2] og [3] samt konstantene funnet ved tilpassing av elektriske egenskaper fra simulering i FEMP, gitt ved material 71. Gyldighetsområdet til de endimensjonale modellene er referert i kapittel 3, og er gitt ved at diameter/tykkelse ( $D/T$ ) – forholdet er mye større enn 1. Dette er i [17] referert som mer enn 10, mens det i flere arbeider [2], [3], er hevdet å måtte være høyere enn dette for å oppnå en tilstrekkelig grad av konvergens mellom disse modellene og målinger. Om metodikken med bruk av de endimensjonale modellene skulle være gyldig ble det antatt at følgende fremgangsmåte kunne benyttes for å verifisere dette.

- Simulering av elektriske egenskaper i FEMP gjøres med et definert sett materialkonstanter.
- Bestemmelse av elektriske egenskaper i FEMP simuleringene benyttes for bestemmelse av materialkonstanter etter metode beskrevet i kapittel 3.
- Sammenligning av konstanter benyttet i FEMP og konstanter bestemt av elektriske størrelser fra FEMP simuleringene.

Antagelsen og fremgangsmåten er basert på arbeider av Vestrheim og Fardal [25], [20] og [22] hvor nøyaktighet til simuleringer i FEMP er sammenholdt med de endimensjonale modellene som ble betraktet i arbeidene med denne oppgaven.

Radiellmodemodellen, og bestemmelse av konstanter fra denne dannet utgangspunktet for undersøkelsene av nøyaktigheten i disse arbeidene. Det ble kjørt en FEMP simulering med fysiske mål fra element 1,  $D/T=7.488$ , med FEMP material 55. Denne materialfilen hadde vist godt samsvar med målinger for de to første radielle modene og skulle dermed være representativ for sammenligningen. Det ble i tillegg kjørt en FEMP-kjøring som var en ren reproduksjon av Fardal sin simulering på skive #21 [3], med  $D/T=20.13$  for å se variasjon av relative avvik når  $D/T$  ble mer enn doblet.

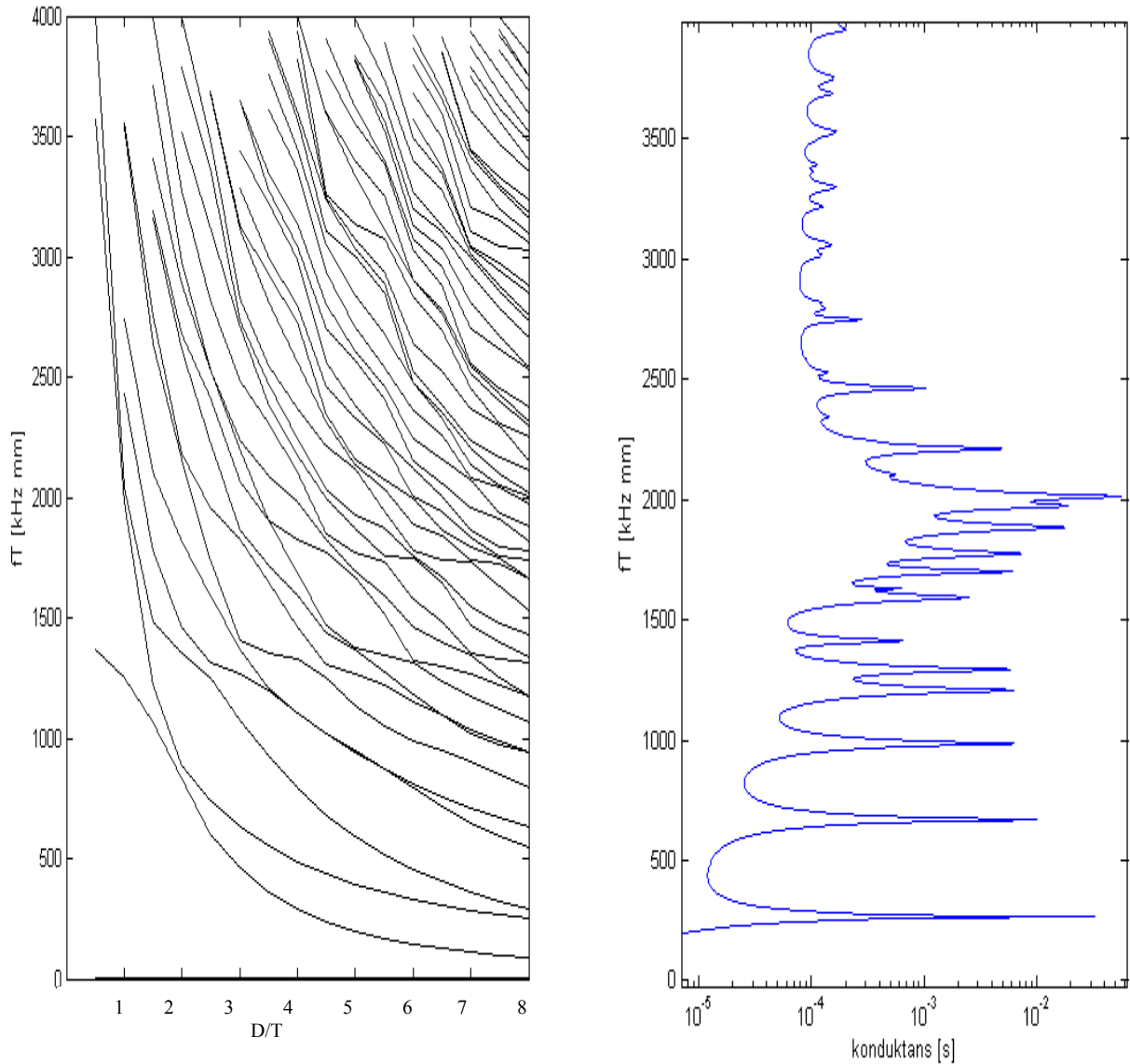
Tabell 5.19: Materialkonstanter brukt til FEMP simulering for to PZT-5A skiver med størrelseforhold D/T lik 7.488 og 20.13, sammenholdt med materialkonstanter bestemt fra de samme FEMP simuleringene. Relative størrelser er gitt som målt verdi i forhold til inngangsverdi for den respektive FEMP simuleringen. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og direkteharmonisk løsningsmetode med 300 egenvektorer.

| Verdier i radiellmodemodellen | D/T=7.488<br>Inngangsverdier til FEMP | D/T=7.488<br>Målte verdier fra FEMP kjøring (realdel) | relativ størrelse (%) (realdel) | D/T= 20.13<br>Inngangsverdi er til FEMP | D/T=20.13<br>Målte verdier fra FEMP kjøring (realdel) | relativ størrelse (%) (realdel) |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|---|---|---------------------------------|
|                               | a=37.523e-3                           |   |                                 | a=20.04e-3                              |   |                                 |
|                               | T=10.0218e-3                          |   |                                 | T=1.991e-3                              |   |                                 |
|                               | rho=7704.8                            |   |                                 | rho=7710                                |   |                                 |
| R1:fs (khz)                   | 26,9                                  |   |                                 | 50,3231                                 |   |                                 |
| R2:fs                         | 67,6                                  |   |                                 | 129,794                                 |   |                                 |
| R1:fp                         | 31,3                                  |   |                                 | 58,8855                                 |   |                                 |
| R1:BW (hz)                    | 300                                   |   |                                 | 490                                     |   |                                 |
| R2:BW                         | 700                                   |   |                                 | 1321,5                                  |   |                                 |
| R1:BWp                        | 300                                   |   |                                 | 348,7                                   |   |                                 |
| $\sigma$ (sigmap)             | 0,3364                                | 0,4872  | 144,8                           | 0,3588                                  | 0,37622287  | 104,9                           |
| c11p                          | 7,32E+10                              | 6,65E+10  | 90,8                            | 7,17E+10                                | 7,05E+10  | 98,3                            |
| e31p                          | -14,5104                              | -15,2752383   | 105,2                           | -13,0736                                | -13,1   | 100,2                           |
| kp                            | 0,5685                                | 0,58868009  | 103,5                           | 0,6016                                  | 0,59128781  | 98,3                            |

Avvikene i størrelser som er funnet fra inngangsverdier til FEMP sammenholdt med verdier funnet fra egenskapene til materialet når det simuleres i FEMP viser tydelig forskjell for materialet med D/T = 7.488 og materialet med D/T = 20.13.

Forutsetningen for gyldigheten til endimensjonale modeller er at responsen de skal representere er endimensjonal – det vil si ikke ha kobling til svingninger i andre dimensjoner. Slik det fremgår av resultatene i avsnittene over har elementene som ble studert i arbeidene med denne oppgaven tidvis sterk kobling mellom ulike svingemoder, noe som bryter klart med forutsetningene for de endimensjonale modellene. Denne koblingen er hittil best belyst under tilpassingen av materialkonstanter.

Figur 5.27 viser sammenheng mellom frekvensspekter og konduktansplott for FEMP simulering av material 71. Senere i figur 5.31 vises det at alle symmetriske moder fra frekvensspekteret samsvarer med resonanstoppene i konduktansplottet. De øvrige modene fra frekvensspekteret er asymmetriske moder som ikke har direkte kobling mot konduktansen. Virkningen av de asymmetriske modene vil bli ytterligere belyst i kap 5.6.2 og i drøftingen i kapittel 6.



Figur 5.27: Frekvensspekter fra modalanalyse i FEMP for material 71, sammenstilt med konduktans fra FEMP med samme material. Både symmetriske og asymmetriske moder vises i frekvensspekteret. X-akse på frekvensspekteret er gitt som diameter / tykkelsesforhold til elementet. Y-akse på begge plottene er frekvens x tykkelse for elementet FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz og direkteharmonisk løsningsmetode med 300 egenvektorer. Frekvensspekterplottet er kjørt med tykkelse på 1mm og radius fra 0.25mm til 4mm, og frekvens fra 0-4000kHz. Konduktansplottet er for element 1, 0-400kHz. Oppløsning for begge plottene er 100Hz.

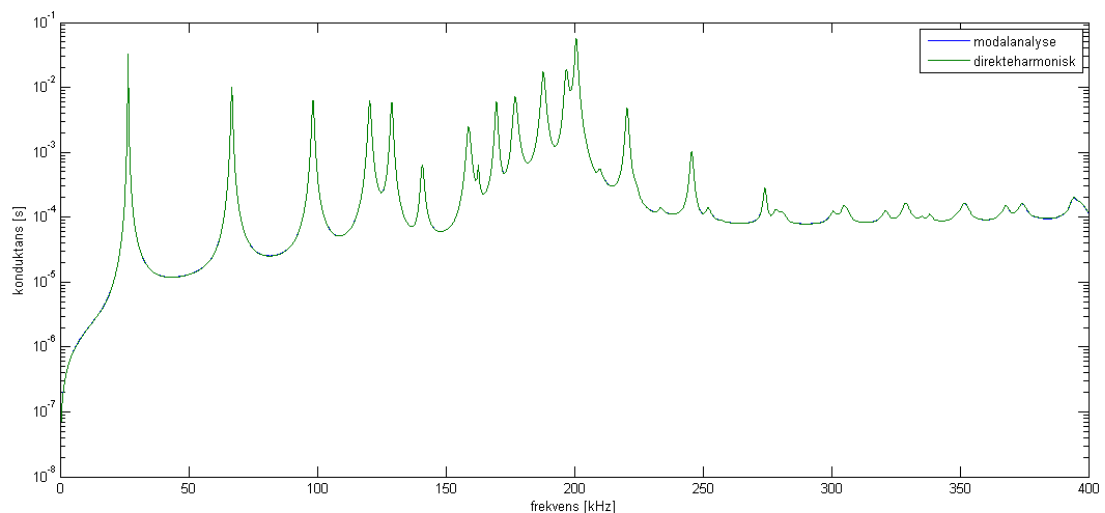
### 5.6.2 FEMP simuleringer

Materialkonstantene er som påpekt ovenfor kanskje den viktigste inngangsverdien til FEMP simuleringer for å oppnå en stor grad av nøyaktighet sammenholdt med elektriske målinger. De andre parametrene som er med på å bestemme nøyaktigheten er antall elementer pr. bølgelengde og løsningsmetode. Antall elementer pr bølgelengde er utførlig testet i tidligere arbeider [3] og [6], og ble derfor ikke viet stor oppmerksomhet i arbeidene med denne oppgaven. Det ble lagt til grunn at 6 elementer pr bølgelengde ved 400kHz var tilstrekkelig til å oppnå en så stor nøyaktighet at andre unøyaktigheter ville være signifikante i sammenhengen.

Materialkonstanter er diskutert i kapittel 5.4.

Valg av løsningsmetode er derfor den gjenværende faktoren for nøyaktigheten til FEMP simuleringen. Aanes sine arbeider [6] viser at det tidvis opptrer store avvik mellom direkteharmonisk og modal løsningsmetode av endelig element problemformuleringen. Det store påpekte avviket i Aanes sine arbeider fremkom ved sammenligninger mellom to løsninger hvor den ene inkluderte tykkelsesmoderesonans [TE1] mens den andre ikke gjorde dette når det ble løst med modalanalyse.

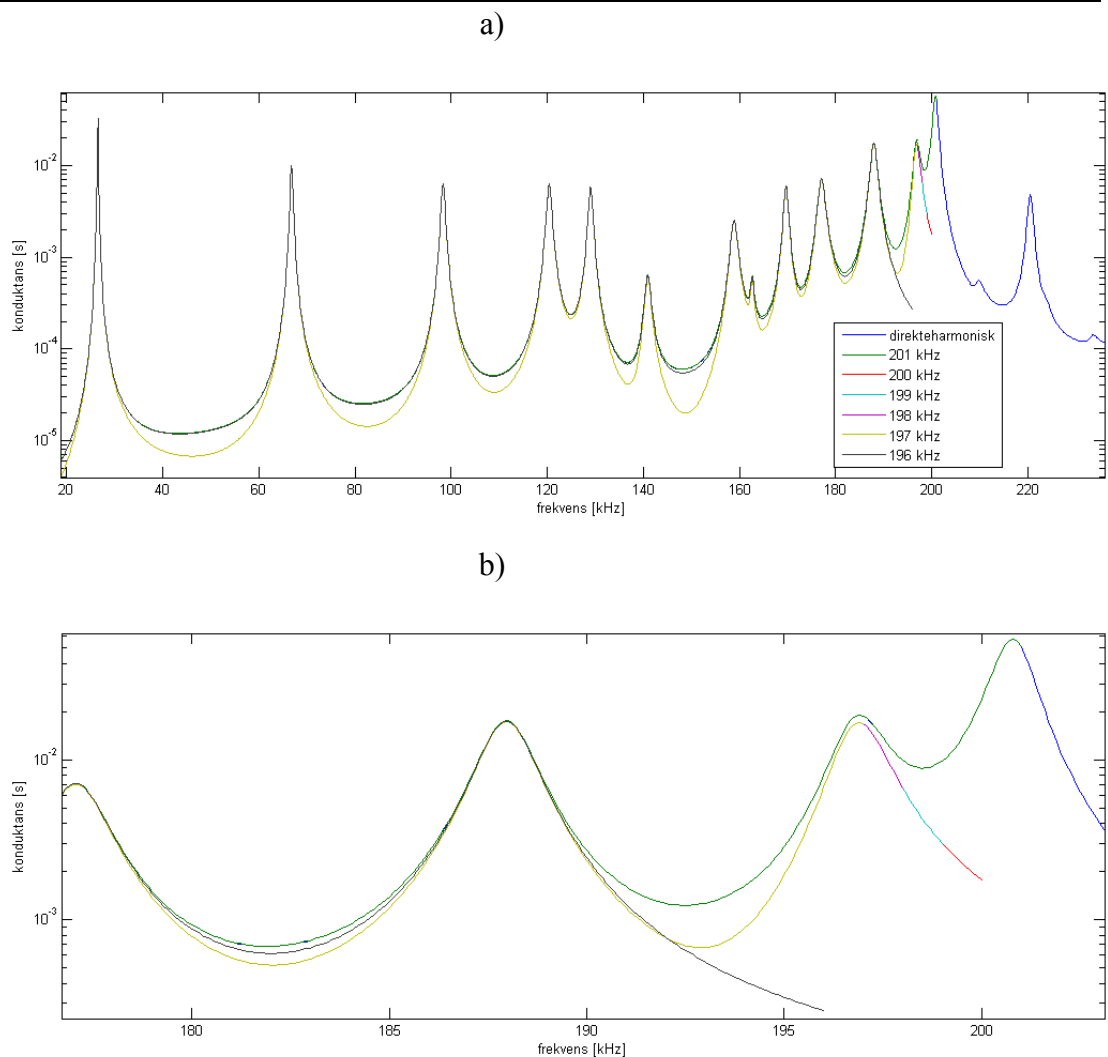
Eventuell unøyaktighet ble undersøkt i arbeidene med denne oppgaven også. Simuleringene ble som hovedregel kjørt med maks frekvens lik to ganger tykkelsesmoderesonans frekvens – dvs 400kHz. Sammenligning mellom modalanalyse og direkteharmonisk analyse gav i dette frekvensområdet små avvik.



Figur 5.28: Konduktans fra modalanalyse sammenholdt med direkteharmonisk analyse. . FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning. Modalanalysen er gjort med maksimalt 300 egenvektorer.

Største avviket mellom de to løsningsmetodene finnes i bølgedalene mellom radiellmoderesonansene. Her er relativt avvik 0.71%. På resonanstoppene er relativt avvik 0% for alle moder. For å evaluere den modale vektingsfaktoren til egenmodene rundt

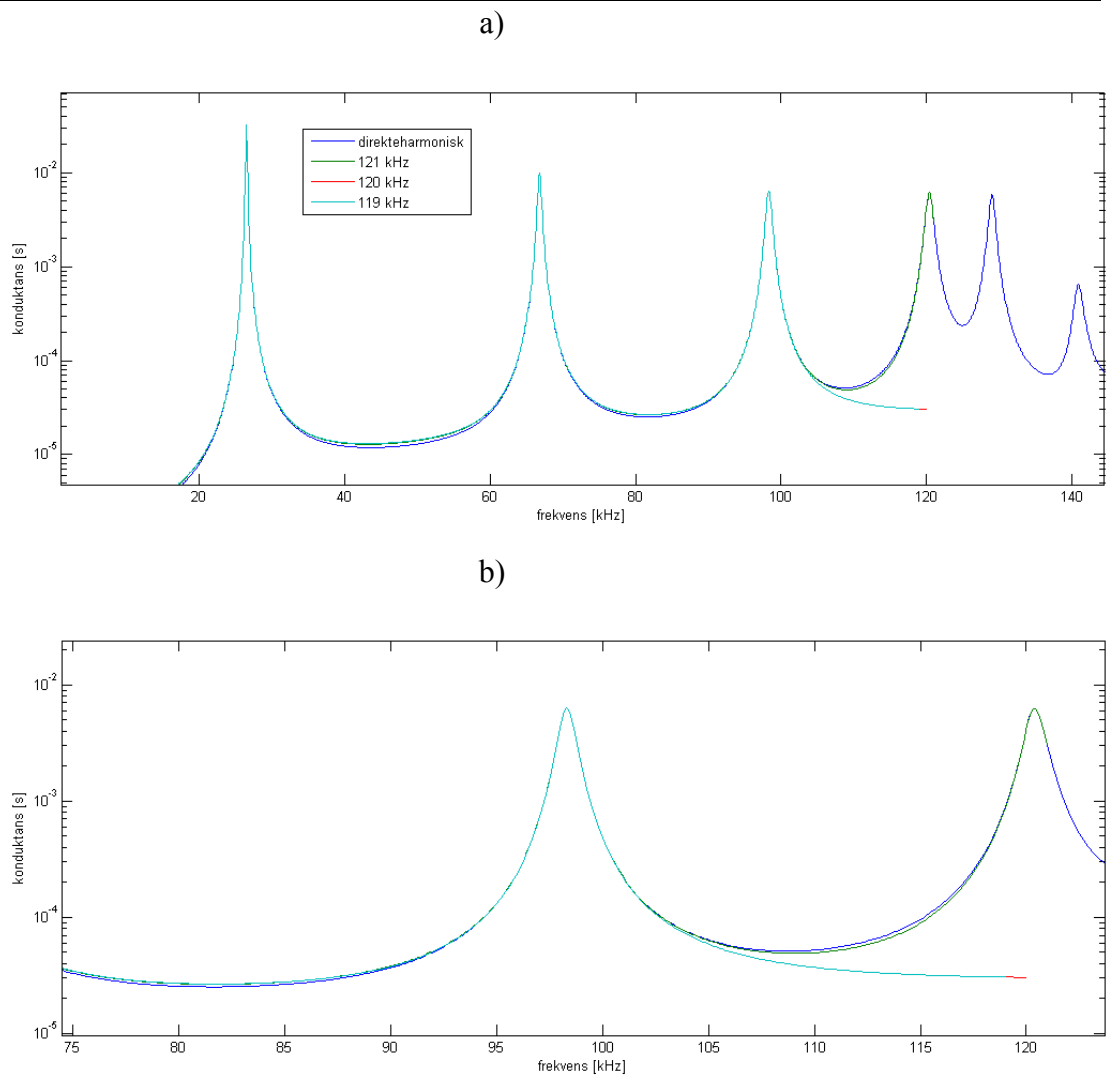
tykkelsesmoden ble det kjørt et antall simuleringer i modalanalyse hvor maksfrekvens var rundt tykkelsesmoderesonansen.



Figur 5.29: Konduktans for syv ulike FEMP simuleringer. Direkteharmonisk analyse er kjørt for frekvensområdet 0-400kHz. Øvrige simuleringer er modalanalyse med maksfrekvens fra 201kHz til 196kHz. Alle simuleringene har 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, og 100Hz frekvensoppløsning. Modalanalysen har inntil 300 egenvektorer.

Konduktansen i figur 5.29 viser store avvik mellom de ulike simuleringene. Avvikene fremkom når frekvensanalysen ble avsluttet før en resonanstopp. Relativt avvik mellom analysen som ble avsluttet i frekvens på 201kHz og analysen til 200kHz var på hele 63,6% i bølgedalen ved 146kHz. Som sammenligning for denne effekten ble det foretatt en simulering rundt resonanstoppen på 120 kHz. Tilsvarende effekt viste seg også der. Analysen som ble avsluttet i frekvens rett før toppen gav avvik for lavere frekvenser. Relativt avvik mellom analysen til 121 kHz og analysen til 119kHz var på maksimalt 1,6% i bølgedalen mellom de to første radielle modene.

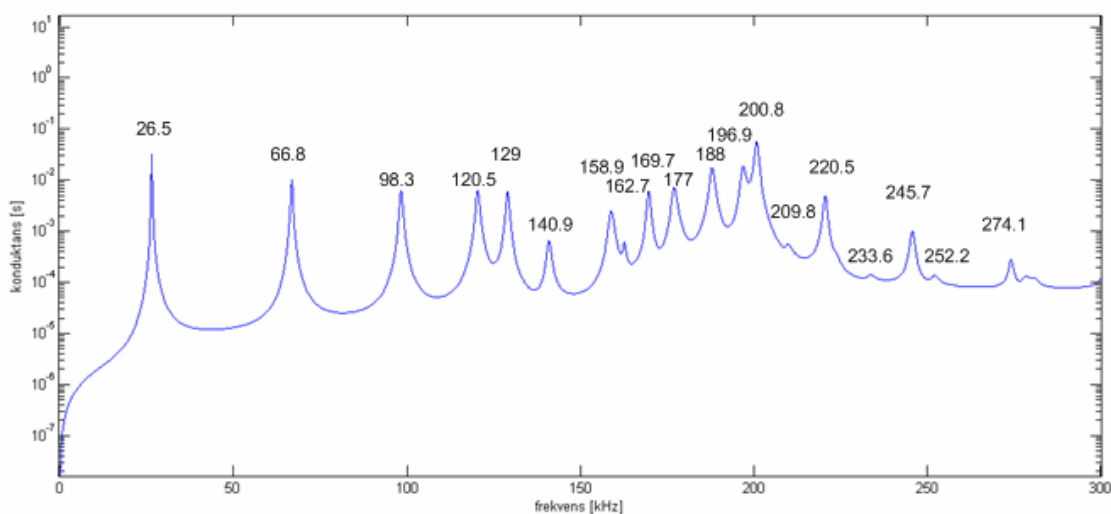




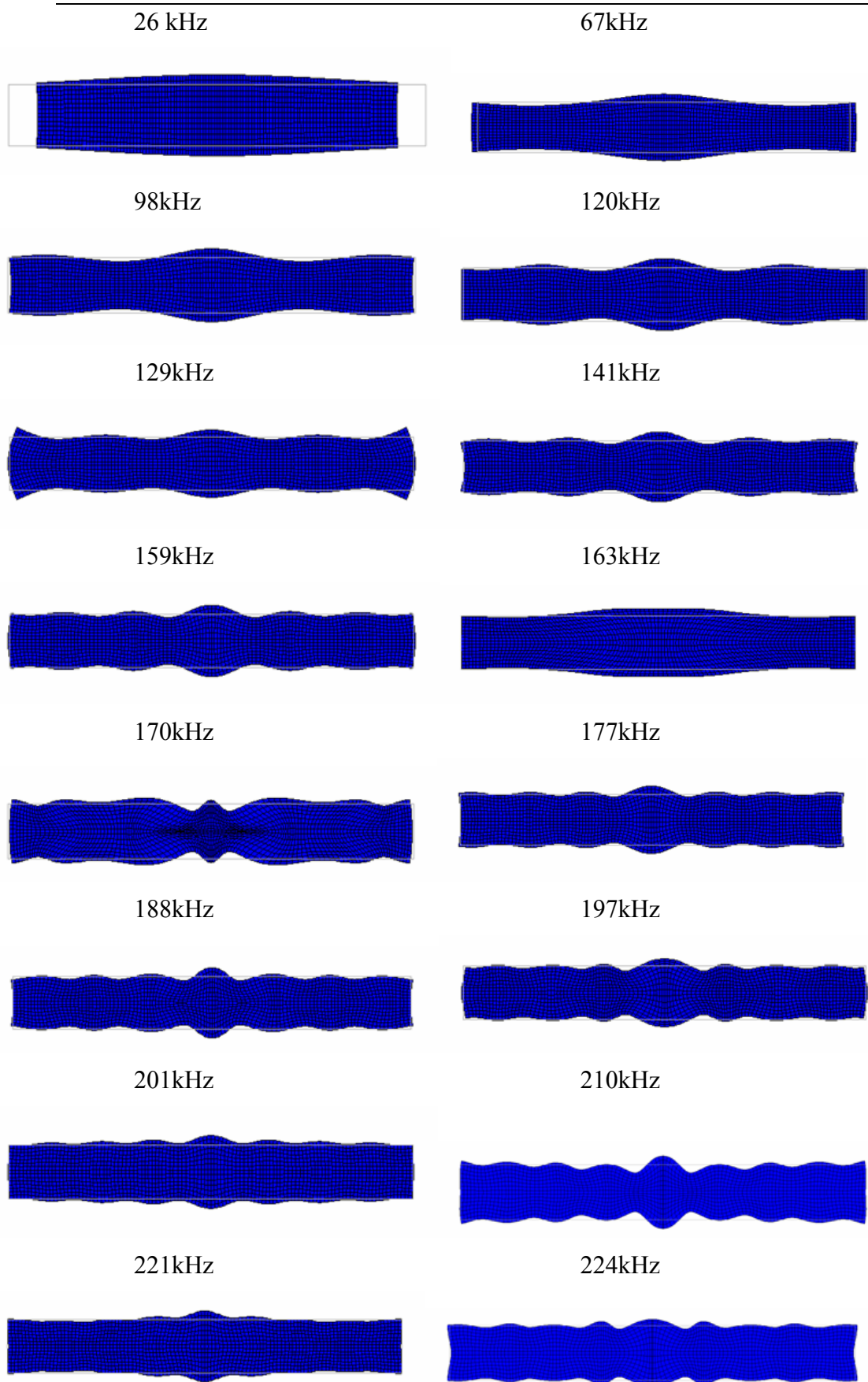
Figur 5.30: Konduktans for fire ulike FEMP simuleringer. Direkteharmonisk analyse er kjørt for frekvensområdet 0-400kHz. Øvrige simuleringer er modalanalyse med maksfrekvens 121, 120 og 119 kHz. Alle simuleringene har 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, og 100Hz frekvensoppløsning. Modalanalysen har inntil 300 egenvektorer.

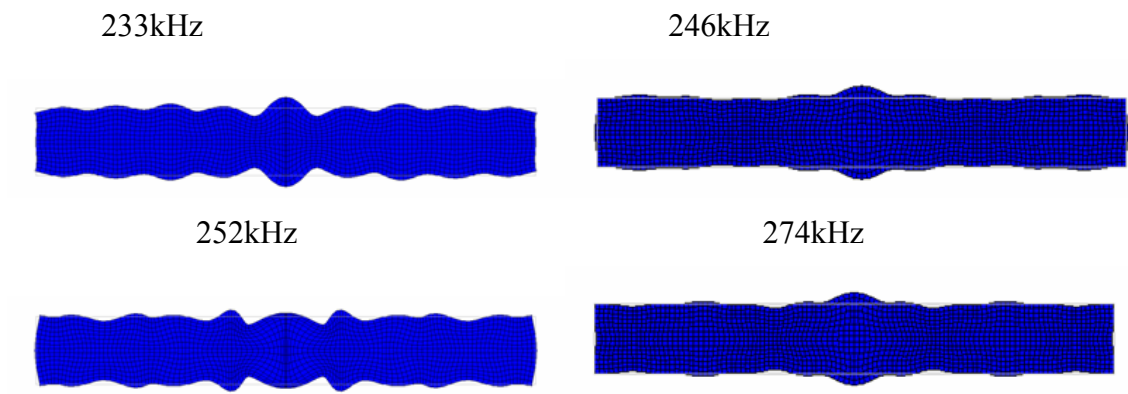
### 5.6.2.1 Svingemoder bestemt fra FEMP simulering

Den elektriske responsen for element 1 er vist tidligere i kapitlet. Sammenligninger med de to endimensjonelle modellene og FEMP er også vist i figur 5.23-5.26. På grunn av lavt d/t-forhold viser disse resultatene sterke koblinger mellom ulike svingemoder. Følgelig har det ikke vært lett å påpeke hvilke effekter som ligger bak egenskapene som vises. FEMP ble i arbeidene brukt som hjelpemiddel til å påvise de ulike svingemodene. Konduktansplottet viser 19 tydelige topper som var gjenstand for videre undersøkelser. Disse toppene samsvarte med alle symmetriske egenmoder slik de fremkom i FEMP.



Figur 5.31: Konduktans for element 1 simulert i FEMP. Frekvens til konduktanstoppene er påført over kurven. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og modalanalyse med 300 egenvektorer.





Figur 5.32: Svingemoder for de symmetriske egenmodene til element 1 slik det er simulert med modalanalyse i FEMP. Egenmodene samsvarer med konduktanstoppe slik de fremkommer i figur 5.31. FEMP er kjørt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, frekvensområde 0-400kHz med 100Hz oppløsning og med 300 egenvektorer.

## 5.7 Akustiske egenskaper

De akustiske egenskapene til element 1 ble målt i to omganger.

### 5.7.1 Måling i målebur

Målebur som beskrevet i kapittel 4 ble benyttet i første måleserie.

- Avstand mellom målemikrofon og element 1,00m +/- 0,005m
- Oscilloscopet midlet over 1200 punkt i 30 sweep
- Måleforsterker +70dB
- Temp: 22,3 °, Luftfuktighet: 35,8% RH, Trykk: 1009hPa
- Spenning fra generator til elementet 10 Volt p-p.
- Eksternt filter cutoff: LP 300kHz, HP 2kHz

Andre måleserie ble målt med mikrofon i målebur, element i rommet (se figur 4.5)

- Avstand mellom målemikrofon og element 2,81m +/-0,005m
- Oscilloscopet midlet over 1200 punkt i 70 sweep
- Måleforsterker +70dB
- Temp: 23,4 °, Luftfuktighet: 43,4% RH, Trykk: 1000hPa
- Spenning fra generator til elementet 10 Volt p-p.
- Eksternt filter cutoff: LP 300kHz, HP 2kHz

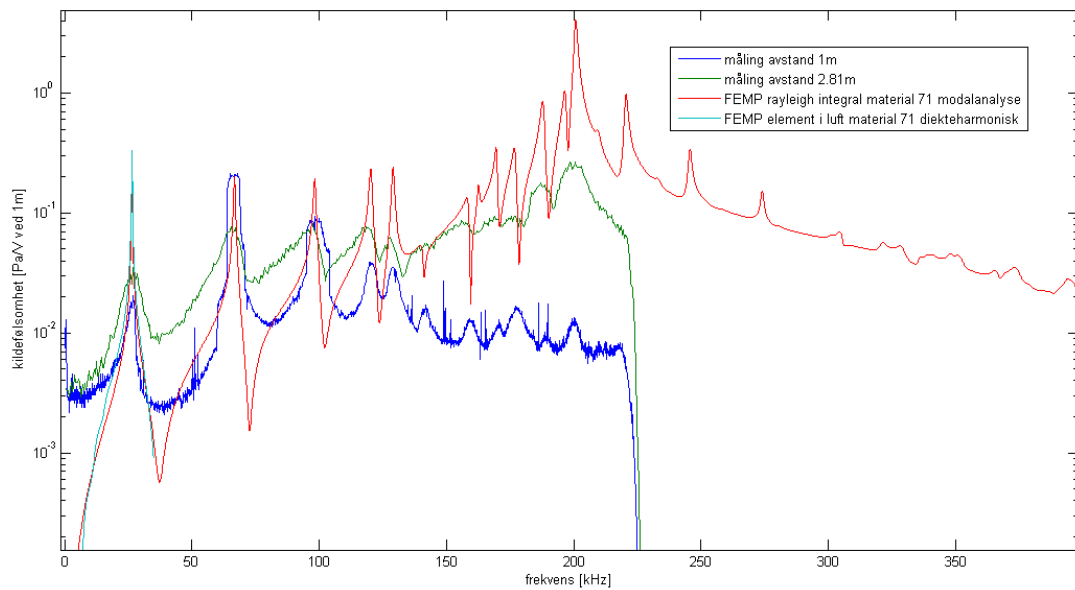
Måleavstanden i måleburet tilsvarte Rayleigh avstand ved 78,369kHz. Tilsvarende var måleavstanden i åpent rom lik Rayleigh avstand ved 220,217kHz

### 5.7.2 Simulering i FEMP

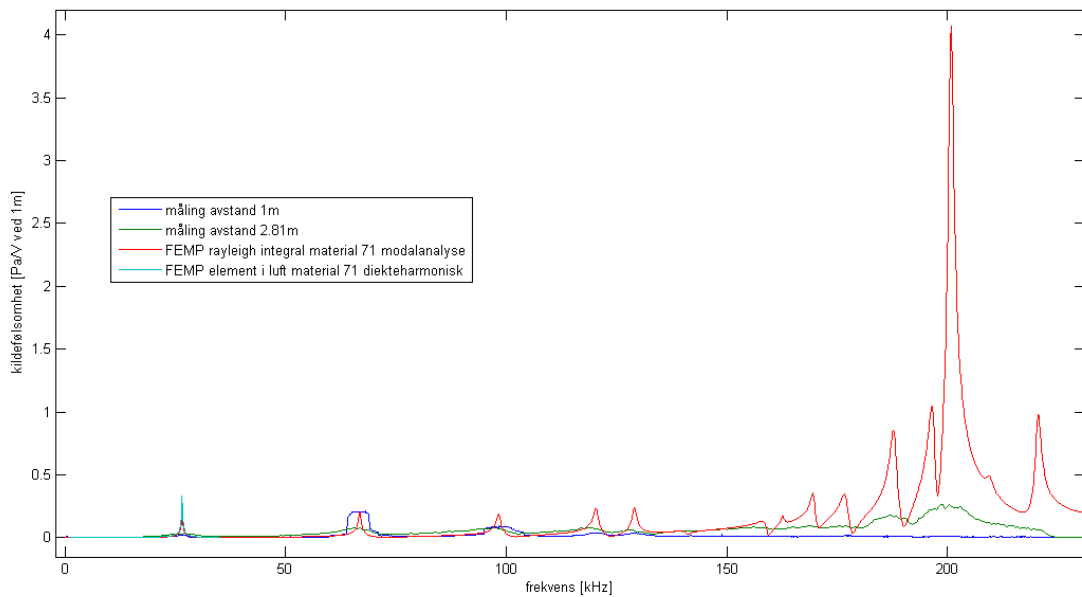
Kildefølsomhet er simulert ved hjelp av rayleigh integral metode for material 71, modalanalyse med 6 element pr  $\lambda$  i tykkelses og radiell retning ved 400kHz.

Kildefølsomhet er også simulert i FEMP ved direkteharmonisk analyse med 4 elementer pr  $\lambda$  i tykkelses og radiell retning ved 30kHz for element 1. Antal endelige elementer pr  $\lambda$  i mediet var 4. Endelig element avstand (Rinf) var 0.0459747meter og 10-ordens uendelige elementer ble benyttet..

a)



b)

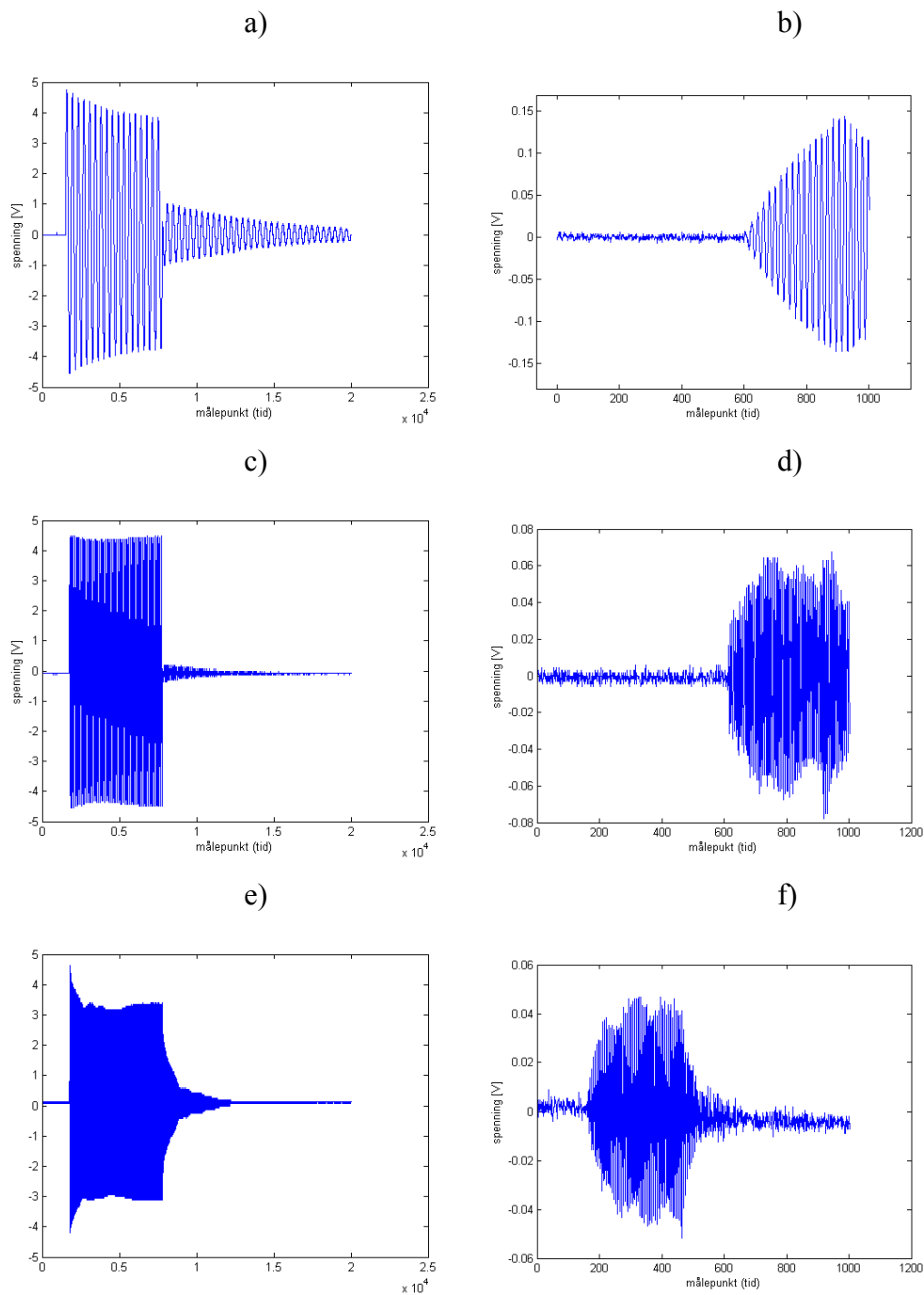


Figur 5.33 Kildefølsomhet fra målinger ved 1m og 2.81 m. Eksitasjonsspenning til elementet er 10V p-p. Frekvensoppløsning er 100Hz for målinger på 1m og 500Hz for målinger på 2.81 m. Rayleigh integral løsning fra modalanalyse 0-400kHz og direkteharmonisk løsning for element som svinger i luft fra 0-35kHz. Modalanalysen er foretatt med 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, og 100Hz frekvensoppløsning. Direkteharmonisk løsning har 4 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 30kHz for elementet, og 4 elementer pr  $\lambda$  i de endelige elementene i luft. Endelig element avstand ,Rinf 0,0459747meter og 10-ordens uendelige elementer. Frekvensoppløsning 100Hz og material 71 er benyttet for begge simuleringene.

Tabell 5.20: Kildefølsomhet for element 1 ved to ulike målinger og to ulike FEMP simuleringer. Målgene var utført med avstand 1,0 meter og 2,81meter og 10 volt p-p spenning inn. FEMP simulering modalanalyse var utført på material 71. 6 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 400kHz, og 100Hz frekvensoppløsning. FEMP simulering direkteharmonisk var utført utført på material 71. 4 elementer pr  $\lambda$  i radiell og tykkelsesretning ved 30kHz for elementet, og 4 elementer pr  $\lambda$  i de endelige elementene i luft. Endelig element avstand Rinf 0,0459747meter og 10-ordens uendelige elementer. Frekvensoppløsning var på 100Hz.

|        | Måling<br>R=1.0m | Måling R=2.81m | FEMP modal<br>Rayleigh<br>integral | FEMP<br>direkteharmonisk<br>stråling i luft |
|--------|------------------|----------------|------------------------------------|---|
| Sv R1  | 0,02025          | 0,03542        | 0,2378                             | 0,3332                                      |
| Sv R2  | 0,2074           | 0,0767         | 0,2023                             | -   |
| Sv TE1 | 0,01345          | 0,2665         | 4,06                               | -   |

Mottatte målepulser viser med tydelighet at stabilt svingeområde for måleoppstillingen var vanskelig å definere. Pulsformen viste en tydelig frekvensavhengighet, og at ulike lydbaneforplantninger kan medføre interferenseffekter som påvirker pulsformen.



Figur 5.34: Spenningspuls fra måleoppstilling i luft med avstand 2,81meter. a) sendepuls 27 kHz, b) mottatt puls 27 kHz, c) sendepuls 99,5 kHz, d) mottatt puls 99,5kHz, e) sendepuls 201 kHz, f) motatt puls 201 kHz.

Målinger over et stort frekvensområde var vanskelig å gjennomføre. På grunn av stor dynamikk i kildefølsomheten var måletekniske utfordringer store. Ikke minst å holde oscilloscopet innstilt for best mulig visning gjennom frekvensforløpet var vanskelig.



## 6 Diskusjon av resultater

Resultatene fra kapittel 5 vil i det følgende bli diskutert. Resultatene vil så langt det er hensiktsmessig bli diskutert i den logiske rekkefølgen de er presentert, selv om noen forhold kan være gjeldende for flere deler av resultatene.

### 6.1 Målte fysiske egenskaper

Elementene virket rimelig enhetlige i fysiske størrelser. Avvikene som ble avdekket av målinger var sammenlignbare med målinger på andre elementer i tilsvarende arbeider (f. eks [5]). Avvikene i de målte størrelsene var likevel av en slik karakter at det fremstod som hensiktsmessig å undersøke samsvar mellom fysiske størrelser og elektriske egenskaper. Dette ble undersøkt videre i kapittel 5.3.2 og konklusjonen var at avvikene i elektriske egenskaper ikke direkte kunne relateres til avvikene i fysiske størrelser.

Det ble ikke tatt hensyn til elektrodens tykkelse og egenskaper i arbeidene. Basert på konklusjoner fra Atterås sine arbeider [2] sammen med fysiske størrelser på elementene ble elektrodens innvirkning vurdert til å være av mindre betydning enn andre feilkilder. Tykkelsen til elementene var relativt mye større enn elektrodene. Effekten av elektrodene ble derfor antatt å være mindre for element 1-5 enn tilfellet har vært for andre elementer i tidligere arbeider det har blitt referert til. [4], [5], [2] og [3].

Diameteren til elementene i arbeidene var relativt store i forhold til elementene i de tidligere arbeider det er referert til. Nøyaktigheten på målingene og avvikene som ble målt var i en størrelsesorden sammenlignbar med tidligere arbeider. Effekten av den fysiske unøyaktigheten til elementene skulle derfor i disse arbeidene relativt sett være underordnet andre unøyaktigheter. Denne konklusjonen fremkom ikke minst på bakgrunn av at størrelsen på elementene var store relativt til de målte avvikene.

Et ankepunkt til metodikken som ble brukt, er at instrumenteringen som var tilgjengelig for måling av fysiske størrelser var relativt uideell til formålet. Mikrometerskruen grep ikke langt nok inn på elementene til å gi representative målinger av tykkelsen i senter av skivene. Tilsvarende var det en lite ideell situasjon at skyvelære som ble benyttet til måling av diameter har en dårligere nøyaktighet enn mikrometerskruen. Gitt størrelsene som ble målt, var den relative nøyaktigheten til skyvelæret likevel sammenlignbar med mikrometerskruen

### 6.2 Målte elektriske egenskaper

De elektriske egenskapene til elementene ble i all hovedsak bestemt ved hjelp av impedansanalysator. Gjennom gjentatte målinger hadde resultatene en god repeterbarhet. Figur 5.2 viser eksempler på dette.

Element 4 sine avvikende egenskaper ble tidlig påvist. Det fremkom ingen logisk forklaring til denne forskjellen mellom elementene. Det ble foretatt en rekke repeteringer av målingene for å bestemme mulige kilder til dette avviket uten at det lyktes. Element 4 ble derfor besluttet utelatt fra videre undersøkelser. Flere elementer med likest mulig egenskaper var et ønsket utgangspunkt for videre arbeider. I det tilfellet hvor en eller flere av elementene skulle bli modifisert, enten med pålodding av ledninger, påfesting av koblingslag eller isolerende materiale for bruk i vann ville det være gunstig å ha flere elementer uten modifisering som referanse. To og to av elementene henholdsvis element 1 og 3, og element 2 og 5 viser i figur 5.1 og 5.3 å ha en god innbyrdes likhet i elektriske egenskaper. Denne likheten kan ikke

forklares med bakgrun i fysiske størrelser. Elementene antas derfor å ha de ulikhetene som fremkommer fra produksjonen.

### 6.2.1 Nøyaktigheten til målingene

Impedansanalysatoren i seg selv ble ansett å ha en god frekvensnøyaktighet, basert på kontroll av intern frekvensstandard med ekstern frekvensteller. Nøyaktigheten til de avleste elektriske størrelsene er derimot relativt usikre. Det forelå ingen kalibreringsdata for analysatoren og det er derfor usikkerhet om nøyaktigheten til målte størrelser. Avvikene mellom de fire brukte elementene sin konduktansverdi fremkommer av figur 5.1 a). Relative avvik fra målinger ved 1. og 2. radiellmode ble funnet til maksimalt 1,5% og 2,5%. Tilsvarende for 1. tykkelsesmode var hele 8,53%. Nøyaktigheten til analysatoren ble i denne sammenhengen antatt å være langt bedre enn dette, og dermed en underordnet feilkilde for relative sammenligninger.

Sammenligninger med elektriske størrelser fra andre kilder enn målinger, f. eks simuleringer, kan imidlertid ikke kvalitetsjekkes uten andre referanser. Det ble i arbeidene antatt at analysatoren holdt seg innenfor sin oppgitte nøyaktighet på 0,15% [23].

Lineariteten til analysatoren ble i arbeidene kompensert for ved hjelp av 0-justering. Interessant frekvensområde for elementene var i hovedsak 0-250 kHz. Analysatoren skulle innenfor dette frekvensområdet 0-justeres i to ulike måleområder. For korrekt resultat skulle derfor måleserier over dette frekvensområdet bli foretatt i to trinn. Figur 5.5 og tabell 5.7 konkretiserer denne problemstillingen. Basert på de relativt store avvikene som viste seg i sammenligninger av simuleringsmodeller og målinger, ble det besluttet at feilen ved å justere analysatoren ved 100kHz for bruk i hele måleområdet var underordnet. Sammenligningene som ble foretatt i arbeidene baserte seg derfor hovedsakelig på målinger justert ved 100kHz. Denne feilkilden kan ikke ses å ha påvirket de videre resultatene i betydelig grad. Feilkilden er dessuten lett å eliminere i ettertid ved at målinger med ulik 0-justering finnes som referanse. Figur 5.4 gir et bilde av lineariteten til analysatoren henholdsvis med og uten elementholder. Grafen viser med tydelighet viktigheten av at justeringen blir foretatt med holder. Likevel må det påpekes at den admittansen analysatoren og holderen introduserer i måleoppsettet er relativt lav, maksimalt 0,03% av elementets admittans. Feilkilden bør uansett elimineres eller dokumenteres all den tid den er en av de påviselige og kvantifiserbare feilene i måleoppstillingen.

Spenningen elementene ble eksitert med gav en effekt som vist i figur 5.6. Det var antatt at spredning av resultatene skulle følge spredningen i påtrykt spenning. Dette viste seg å ikke være tilfellet. Det var heller ingen tegn til ulineære effekter i de elektriske egenskapene. Det ble derfor antatt at spredningen som fremkom under målingene, og som er gjengitt i figur 5.6, ikke skyldes påtrykt spenning, men er tilfeldige spredninger i målingene. De relative avvikene i målingene var maksimalt på 1,24%, og avvik i denne størrelsesordenen burde ikke forekomme. Ideelt sett burde et antall målinger blitt repetert for å se om disse målingene var repeterbare. Imidlertid ble avvikene ansett som underordnet i forhold til avvik i de samme størrelsene når det ble sammenlignet med simuleringer. For fremtidig bruk er det dessuten mulig å repetere disse målingene for å fastslå et gjennomsnittlig avvik fra et representativt antall målinger.

Ulineære effekter ble påvist som følge av størrelsen til påtrykt spenning i arbeidene til Lohne [4]. Dette ble ikke påvist i arbeidene med denne oppgaven. Det var heller ikke forventet at dette ville skje basert på forskjeller i fysiske størrelser i elementene i de to arbeidene. Større elementer ble antatt å tåle mer påtrykt spenning enn de mindre. Det ville vært en fordel om impedansanalysen kunne blitt foretatt med en eksitasjonsspenning tilstrekkelig til å fremprovosere ulineære effekter. Dette ville være med på å klassifisere egenskapene til

elementene bedre enn det som har vært tilfelle i arbeidene med denne oppgaven. All den tid akustiske målinger ble foretatt med spenning på 10V, dvs 10 ganger mer enn impedansanalysen, ville det være hensiktsmessig å vite om dette påvirket målingene i nevneverdig grad.

#### **6.2.2 Metodiske svakheter i elektriske målinger**

- Impedansanalysen ble foretatt med maksimal eksitasjonsspenning 1V, mens spenningen i pulsene ved akustisk måling er inntil 10V.
- Overgangsmotstand og andre elektromekaniske effekter i oppstilling og tilkobling av element til instrumenteringen er ikke godt nok håndtert da elementet ikke har fast tilkobling til elektrodene men er avhengig av spennet i kobbertrådene til holderne.

### 6.3 FEMP simuleringer

Innledende simuleringer i FEMP viste store avvik mellom elektriske egenskaper fra simuleringene og målte egenskaper på elementene. Dette resultatet var i samsvar med forventningene, og understøttes av tidligere arbeider [3], [4], [5] og [6]. Hypotesen i disse arbeidene kan synes å ha vært at materialkonstantene til det piezoelektriske materialet har vært den største kilden til avvikene. Fysiske mål på elementene som ble benyttet i arbeidene med denne oppgaven tilsa at koblingen mellom ulike svingemoder skulle være sterkere enn det som tidligere har vært fokusert i de refererte arbeidene. Eventuelle avvik i materialkonstanter ble derfor antatt å ha effekt på et større område for skivene benyttet i arbeidene med denne oppgaven. Avvikene som fremkom viste med tydelighet at dette var tilfelle. Figur 5.9 viser at det både er avvik i struktur og i størrelser. Strukturforskjellen vises tydeligst rundt 170 – 220kHz, hvor avviket i frekvens er forskjellig fra resonanstopp til resonans topp. Denne forskjellen i frekvensavvik ble antatt å stamme fra kobling mot ulike svingemoder som igjen var bestemt av ulike konstanter. Arbeidene til Fardal [3] ble mye benyttet som referanse til hvordan materialkonstantene virket inn på simuleringene i FEMP. Det ble også konkludert med at materialkonstantene som Fardal endret i sitt arbeide for å oppnå bedre samsvar mellom målinger og simuleringer også gav bedre samsvar for elementene i arbeidene med denne oppgaven. For frekvensområdet 170-220kHz var det likevel så dårlig samsvar mellom målinger og FEMP at videre bruk av FEMP var avhengig av at nøyaktigheten i dette området ble forbedret.

Forskjellene som fremkom i egenskaper mellom de ulike elementene, ble forsøkt å gjenskape i FEMP. Antagelsen var at dersom forskjellen i de fysiske størrelsene for de fem elementene var årsak til den påviste forskjellen i elektriske egenskaper, så ville dette kunne reproduseres med FEMP. Siden forskjellen var påviselig over et større frekvensområde ble det antatt at den unøyaktigheten som FEMP representerte (antatt på grunn av materialkonstantene sin unøyaktighet) ville være relativt lik for alle elementene og derfor kunne neglisjeres i dette henseende. Forskjellen mellom elektriske størrelser i disse FEMP simuleringene var lavere enn forskjellene fra elektriske målinger på elementene. Resultatene fra figur 5.3 sammenlignet med resultatene fra figur 5.10 viser tydelig denne forskjellen. Selv om forskjellen i fysiske størrelser ikke kunne utelukkes å medvirke til de målte forskjellene for elementene, gav denne sammenligningen i FEMP større tiltro til at forskjellen ikke kunne forklares med de fysiske størrelsene alene. Element 4 ble også med stor grad av sikkerhet valgt bort i videre arbeid basert på at forskjellene dette elementet viste ikke kunne tilskrives ytre kontrollerbare forhold. Elementet ble antatt å ha avvikende egenskaper fra produksjon, eller på en eller annen måte være skadet.

## 6.4 Bestemmelse av materialkonstanter

Både tidligere arbeider ved Universitetet i Bergen [2], [3], [4], [5] og [6], samt publiserte artikler [10], [11], [12], [13], [14], [9], [26], [15] og [16] belyser bestemmelse av materialkonstanter til piezoelektriske materialer. Produsenter av piezoelektriske materialer oppgir materialeegenskaper med stor unøyaktighet. Basert på disse erkjennelsene var det en naturlig innfallsvinkel å foreta en bestemmelse av materialkonstantene til elementene i arbeidene med denne oppgaven. Elektriske målinger på element 1 gav grunnlaget for bestemmelse av konstanter. Tabell 5.10 ble brukt som utgangspunkt for dette. Metoden som ble brukt gav materialkonstanter slik det presenteres i tabell 5.11. Det mest påfallende avviket i tabellen er for konstanten  $\sigma^p$  (sigmap). Denne ble bemerkelsesverdig høy basert på målingene. Avviket er på hele 45%. Tilsvarende ble  $\sigma^p$  fra Fardal sitt konstantsett (material 39) bare 2.5% forskjellig fra verdien oppgitt av produsent.

Det er hevet over enhver tvil at materialkonstantene som ble bestemt fra målinger (material 38) ikke er representative for egenskapene til de piezoelektriske skivene. Avvikene for enkelte av størrelsene var langt større enn forventet sett opp mot materialkonstanter både fra produsent og fra tidligere arbeider på samme materialtype. Simuleringer av elementet i FEMP med konstantene bestemt fra målinger gav dessuten inkonsistente konduktansplott. Figur 5.13 viser tydelig at konduktansen ikke er innenfor forventet resultat. Negativ konduktans har ikke blitt dokumentert i noen av de refererte arbeidene som har benyttet FEMP som simuleringsmodell. Det ble derfor konkludert med at FEMP sine tilnærminger ikke kan være grunn til dette resultatet, og at dette må skyldes materialkonstantene eller formalismen som ligger til grunn for utrekning av disse.

Radiellmodemodellen og tykkelsesmodemodellen er oppgitt til å være gyldige når diameter er vesentlig høyere enn tykkelsen for skiven som blir simulert. [17] oppgir dette som innfridd når forholdet er mer enn 10. For elementene i arbeidene med denne oppgaven er forholdet rundt 7,5 og klart utenfor dette gyldighetsområdet. Tidligere arbeider [2],[3] og [6] konkluderer med at et d/t for hold større enn 10 er nødvendig for å oppnå god nøyaktighet med disse metodene. Forsøkene som er referert i kapittel 5.6 viser at modellene som benyttes kan anses som gyldige i seg selv, men at dette ikke nødvendigvis gjelder for lave d/t forhold.

Koblingen mellom de ulike materialkonstantene ble tydeligst vist i tilpassingen i kapittel 5.4.2 hvor effekten av de ulike konstantene som ble endret fremgår. Figur 5.14-5.22 viser sammen med tabell 5.14-5.17 de ulike endringene og effekten dette hadde.

Utfordringen viste seg å være at ikke alle resonansene reagerte likt på de samme konstantene. Konstanter som er assosiert med en svingemode påvirker følgelig alle resonansene som har kobling til denne moden. Hvilke resonanser som har denne koblingen var imidlertid ikke enkelt å vite. Resonansen rundt 170kHz som vises i figur 5.17 var den umiddelbare utfordringen. Denne lot seg best tilpasse med endring av c13. Denne konstanten inngår ikke i tykkelsesmoden, men er medvirkende i flere konstanter i radiellmodemodellen, blant annet  $\sigma^p$ . Det er bemerkelsesverdig at  $\sigma^p$  får en realdel på 0,3229 dvs bare 7.7% avvik i forhold til produsentens verdi.

Fardal sine tilpassinger av konstantene for PZT-5A elementene i sine arbeider er beskrevet i [3] tabell 5.36. Det fremkommer der at eneste endringene som ble gjort for å påvirke frekvenstilpassingen av resonansene, var å endre c11E og c12E for å tilpasse de radielle modene. Dette indikerer at effekten som fremkommer rundt 170kHz i figur 5.17 ikke var tilstede i Fardal sine arbeider. Sterkere kobling mellom ulike svingemoder som følge av lavere d/t forhold fremstår som mest sannsynlig årsak til dette. Figur 3.32 viser FEMP sin

representasjon av svingemønsteret for moden ved 170kHz. Denne figuren gir tydelig inntrykk av en kompleks svingemode med sterke koblinger. FEMP sin funksjonalitet for å vise animasjon av de enkelte svingemodene et enda bedre forståelse enn figur 3.32. Animasjonen understøtter antagelsen om kompleksiteten til svingningene ved 170kHz, ved å vise sterke tegn til radielle forskyvninger inne i elementet uten et det medfører en radiell forskyvning av elementets ytterkanter. Alt i alt taler dette for at FEMP sin representasjon av elementene med material 71 harmonerer godt med de elektriske egenskapene elementet viser fra målingene. Påstanden om at FEMP er et godt egnet verktøy til å evaluere egenskapene til piezoelektriske skiver blir på den måten understøttet av resultatet i arbeidene. Resultatene understøtter også fremgangsmåten som er benyttet for tilpassing av materialkonstanter.

Det er i alle fall tydelig at tilnærmingen med tilpassing av materialkonstanter ved hjelp av sammenligninger mellom elektriske målinger og FEMP simuleringer fremstår som en god fremgangsmåte. For materialer med relativt lavt d/t-forhold slik som i disse arbeidene, fremstår langt på vei denne fremgangsmåten som godt anvendbar. Ingen av de andre metodene som er forsøkt gir en tilfredsstillende kvalitativ likhet mellom elektriske målinger og FEMP simuleringer i frekvensområdet mellom de første radielle modene og tykkelsesmoden.

#### **6.4.1 Metodiske svakheter i bestemmelse av materialkonstanter**

- Metoden som er benyttet forutsetter FEMP som valid referanse for evaluering av materialkonstanter.
- Arbeidene burde hatt elementer som referanse fra samme produksjonsbatch men med større d/t forhold for å verifisere om antagelsene og tilpasningene som ble gjort er generelt gyldige eller bare for de faktiske elementene med gitt d/t-forhold

## 6.5 Simulering med endimensjonale modeller

Figur 5.23 og 5.24 viser at frekvenstilpassingen i simuleringen med MASON tykkelsesmodemodellen er god for første harmoniske<sup>1</sup> resonans. Problemet som viser seg i figuren er at tykkelsesmoden ikke er en ren frikoblet mode i elementet. Undersøkelser av elementets oppførsel simulert i FEMP viser at det er en svingemode ved 200kHz og en ved 201kHz. Denne tette plasseringen av moder forklarer hvorfor bildet ikke er en enkelt konduktanstopp. Basert på dette blir det vanskelig å kvalitativt vurdere grundigere hvordan tykkelsesmodemodellen representerer elementets egenskaper.

Tilsvarende viser figur 5.25 at radiellmoden representerer en frekvensmessig god tilpassing for første harmoniske radiellmoderesonans. Interessant er det å legge merke til i figur 5.25b) at frekvensmessig passer andreharmonisk simulert med material 38 (materialkonstanter fra målinger) godt med elektriske målinger. Øvrige simuleringer med material 39 (Fardal konstantsett) og material 71 (tilpasset konstantsett fra FEMP) har vesentlig større avvik. Dette støtter opp under antagelsen om at radiellmodemodellen er gyldig i seg selv for et lite frekvensområde rundt første og andre resonans, men at resultatene fra målinger og simuleringer her ikke nødvendigvis er gyldige over et større område.

De endimensjonale modellene inngår i bestemmelse av materialkonstanter fra målinger. Konstantene som ble bestemt, ligger i tabell 5.11 og 5.12 bevislig et godt stykke unna verdiene både fra produsent og konstantene som er funnet fra FEMP simuleringer (material 71). Gyldigheten av konstantene er dessuten tvilsomme gitt konduktans i figur 5.23 og 5.25. Konduktansen i disse plottene viser at innsetting av de målte konstantene gir et ulogisk og feil bilde av egenskapene. Fra tabell 5.12 fremgår at Q-verdiene til de piezoelektriske konstantene er bemerkelsesmessig lave. Dette kan medføre et brudd på formalismen som ligger bak fortegnshåndtering av tapene i modellene. Forsøk på å evaluere dette vises i figur 5.13. Siden realverdiene her er fra målinger mens tapene er håndtert med forenklet sett med  $Q_m=75$  og  $\tan\delta=0.02$ , skulle det avsløre om håndteringen av tap var årsaken til de ulogiske resultatene. Figur 5.13 viser med all tydelighet at materialkonstantene sin real del er årsaken til det inkonsistente resultatet.

## 6.6 Gyldighet til simuleringmodellene

### 6.6.1 Endimensjonale modeller

Som vist i kapittel 5 og kommentert i avsnittene over, har de endimensjonale modellene begrenset dokumentert gyldighet over et større frekvensområde. Koblingen mellom ulike svingemoder viste seg å påvirke elementenes egenskaper i stor grad, noe som fremkommer tydelig i figur 5.27. Figur 5.21 viser tydelig tegn på sammensatte effekter for frekvensområdet rundt 140kHz og 170kHz. Nødvendig endring av materialkonstanter for å oppnå tilpassing i disse områdene er også med på å understreke kompleksiteten i svingemoder i disse områdene. Frekvensområdene samsvarer godt med terrasseeffektene rundt 1400ft og 1700ft i figur 5.27. Disse effektene er forhold som ikke tas hensyn til i noen av de endimensjonale modellene. Generelt kan det sies at gyldigheten til disse modellene ikke er særlig stor dersom figur 5.27 legges til grunn. Basert på [1] kan effekten rundt 140kHz antas å være randmode svingninger (E-mode), og 170kHz tykkelses skjærsvingninger (TS-mode).

---

<sup>1</sup> Første harmoniske refererer her som i flere andre kilder til den første resonansen. Konvensjonen er mye brukt for å få samsvar mellom tallbenevnelsen og forekomstnummeret. Fundamental frekvensen benevnes dermed formalistisk første harmoniske basert på at det er første forekomsten i en harmonisk rekke.

Oppsummert kan det med bakgrunn i arbeidene være fristende å hevde at de endimensjonale modellene har liten gyldighet utover sine respektive første resonanser (to første for radiellmodellen og første for tykkelsesmodellen) når brukt på elementer med  $d/t=7,5$ . Selv om det er vanskelig å bevise dette som en generalisert påstand, tyder tidligere arbeider på at det i alle fall langt på vei kan stilles spørsmål ved gyldighetsområdet til modellene ved  $d/t$ -forhold lavere enn 10. Nøyaktigheten har i alle fall blitt bevist å være større med økende  $d/t$ . Konklusjonen blir derfor at betingelsene fra [17] som presiserer at  $d/t$  bør være større enn 10 kan støttes med bakgrunn i resultatene som er vist.

### 6.6.2 FEMP simuleringer

Figur 5.28 viser at samsvaret mellom de to løsningsmetodene i FEMP er god. Avvikene er godt innenfor de andre feilkildene i arbeidene, og bidrar ikke til en signifikant feil. Avvikene som fremkom i Aanes sine arbeider [6] var betydelige, opp mot 18% for modalanalyse i forhold til direkteharmonisk løsning når ikke TE1 moden var inkludert i modalanalysen. Avvikene i konduktanstoppe var tilnærmet lik 0, mens avvikene fremkom i bølgedalene mellom resonansene. Figur 5.29 og 5.30 viser denne effekten for element 1 i arbeidene med denne oppgaven. Endringene av frekvensområdet for de ulike simuleringene som vises i figurene gir en klar indikasjon på hvordan egenverdiene blir beregnet i FEMP. FEMP benytter Matlab funksjonen *sptarn.m* for løsning av egenverdiene. Denne funksjonen løser egenverdier i spredte matriser. Løsningen gir en egenverdi for hver resonans (konduktanstoppe), slik det fremgår i figur 5.31 og 5.32. For at effekten av en resonans skal generere en egenverdi fremgår det av resultatene i figur 5.29 og 5.30 at resonansen må være entydig beskrevet ved at analysen går til og med den aktuelle resonanstoppen. Der dette skjer, viser figuren at avvikene for lavere frekvenser ikke kan tilskrives den resonansen.

Avvikene som fremkommer mellom resonanstoppe indikerer noe om hvor sterk påvirkningen fra resonanstoppen som er utelatt har for disse lavere frekvensene. Eksperimentet som ble kjørt med resonansen på 120kHz viste at ved å avslutte simuleringen på 119kHz ble det også generert avvik i bølgedalene mellom lavereliggende resonanser. Avvikene for 120kHz resonansen var likevel mye lavere enn for 201kHz. Dette viser at TE1 moden på 201kHz har sterk kobling til lavere svingemoder.

Figur 5.29b) viser hva som skjer når simuleringområdet blir senket til 196kHz slik at resonansen på 197kHz heller ikke kommer med. Dette viser også avvik for lavere frekvenser, men her er avvikene mindre enn for simuleringene fra 197-200kHz. Dette kan indikere at egenverdiene fra 197kHz resonans og 201kHz resonans motvirker hverandre slik at avviket med å utelate begge kan bli mindre enn ved å utelate bare den ene. Alternativt det indikere at simuleringen genererer en destruktiv egenverdi for alle simuleringene som avsluttes mellom to resonanser.

Svingemønstrene i FEMP viser at løsningen har en asymmetrisk svingemode på 200kHz. Det kan tyde på at den modale vekt faktoren for denne løsningen blir uforholdsmessig stor når den virker alene uten at den symmetriske svingemoden på 201kHz er med. Moden på 200kHz er følgelig ikke med i simuleringene for lavere frekvenser, og feilen blir derfor mindre når denne er utelatt. Neste svingemode er symmetrisk mode på 197kHz. Denne har ingen nærliggende asymmetriske moder i følge FEMP simuleringene. Den modale vektingen blir derfor tilsynelatende ikke så påvirket i negativ retning av å utelate moden på 197kHz som tilfellet var for 201kHz.

Basert på undersøkelsene som ble foretatt er det nærliggende å konkludere med at begge løsningsmetodene i FEMP er relativt nøyaktige. Valg av frekvensområde for modalanalysen viste seg derimot å være svært viktig for nøyaktigheten. Påvirkningen fra asymmetriske



svingemoder virket tilsynelatende mye større enn forventet, og spilte en stor rolle i de avvikene som fremkom. I arbeidene til Aanes [6] er kun symmetriske svingemoder vurdert i kapittel 7.1.1. Det er derfor vanskelig å vurdere om den påviste virkningen fra asymmetriske moder i arbeidene med denne oppgaven kan være gjeldende for avvikene som ble påvist i arbeidene til Aanes. Figur 5.27 viser at det er langt flere moder enn konduktansplottet gir uttrykk for. Hver topp i konduktansplottet har en tilhørende symmetrisk mode i frekvensspekter plottet. Alle øvrige linjer i frekvensspekterplottet viser i utgangspunktet asymmetriske svingemoder, og indikerer noe av kompleksiteten i egenskapene til de piezoelektriske skivene.

## 6.7 Akustiske egenskaper

Figur 5.33 viser med all tydelighet at de akustiske egenskapene til elementene var vanskelig å bestemme. På grunn av elementenes størrelse var simulering av egenskaper til element 1 med utstråling i luft svært ressurskrevende i Matlab. Med maskinvaren som var tilgjengelig var det derfor ikke mulig å få til simuleringer over et større område enn vist i figuren. I tillegg måtte nøyaktigheten av simuleringene bli dårligere enn ønskelig for å få nok minne til rådighet.

Målingene på 1 meter inne i måleburet og på 2.81 meter ute i rommet viser relativt god grad av samsvar for 1. og 3. radielle mode. Det observeres at bakgrunnsstøyen på målingene i måleburet er vesentlig lavere enn for målingene foretatt i rommet. Dette var forventet uten at det var konkretisert hvilke kilder dette skulle ha. Basert på tidligere arbeider [5] og [6] er det hevdet at luftstrømninger i rommet kan være største årsaken til støy. For å minimere påvirkningene fra ytre forhold, ble målingene i rommet foretatt på nattetid uten annen aktivitet i rommet. Det fremkommer ganske tydelig fra figur 5.33 at målingene i måleburet har flere støytopper. Denne effekten kan ikke sees på målingene foretatt i rommet. Det er ikke funnet noen forklaring på dette, men erfaring viser at fysiske forstyrrelser av holdere, bordplate eller andre mekaniske komponenter som er i kontakt med mikrofonholderen direkte eller indirekte kan forårsake slike støytopper. Målingene i måleburet på figur 5.33 er foretatt på dagtid med annen aktivitet i samme rommet. Det utelukkes derfor ikke at nevnte støy skyldes ytre fysiske påvirkninger. Generelt er det antatt at det uansett er få akustiske støykilder i rommet hvor målingene ble foretatt, innenfor det aktuelle frekvensområdet. Denne antagelsen er imidlertid ikke kvalitetssikret med målinger av forholdene.

### 6.7.1 Instrumentering ved akustiske målinger

#### 6.7.1.1 Sendepuls

Eksitasjonsspenningen ved målinger i luft var satt til 10 volt p-p. For å få gode signaler som lot seg skille fra bakgrunnsstøyen i områdene mellom resonanstoppene syntes denne spenningen nødvendig. At ikke høyere spenning ble forsøkt skyldes at signalgeneratoren ikke kunne levere høyere spenning. Det er en svakhet som tidligere nevnt at ikke impedansanalysen av elementene har fastslått om 10 volt eksitasjonsspenning gir ulineære effekter. Trolig er dette ikke tilfelle, men forholdet er altså ikke undersøkt.

Den største usikkerheten i instrumenteringen var å bestemme lengden på pulsbursten. Ideelt sett burde denne være tilstrekkelig lang til at et stabilt svingeområde på mottagerpulsene kunne entydig etableres. Teoretisk vil det alltid være et område hvor signalet er stabilt, etter at senderelementet har fått svinget seg inn på riktig frekvens og før det svinger seg ned etter at påtrykt spenning fjernes. Problemet viste seg å være at lange pulser skaper mulighet for både konstruktiv og destruktiv interferens fra alternative lydforplantningsretninger. Knappskog har illustrert dette i figur 5.2 i sin oppgave [5].

Pulsene benyttet i målingene var i størrelsesorden rundt 0.5 ms. Dette tilsvarer en pulslengde i luft på ca 17 cm. To ulike lydbaner mellom element og målemikrofon med lengdeforskjell på 17 cm eller mindre førte derfor til interferens. Denne effekten kan ses i figur 5.35 d) og f). I tillegg viser figur 5.35 at amplituden til senderpulsene inn til elementet ikke er stabil. Elementet ønsker primært å svinge på en frekvens som tilsvarer en av sine egenfrekvenser. Ved påtrykk av en frekvens vil derfor alltid elementet forsøke å svinge i selvsving før den påtrykte spenningen får overstyrret dette. Dette genererte avvik i amplitude og noen ganger frekvens ved starten av pulsene. Tilsvarende ses det fra figuren at elementet fortsetter å svinge

etter at spenningen er borte. Imidlertid er tapet i materialet såpass betydelig at det svinger seg fort ned og ikke går inn i selvsving.

### 6.7.1.2 Mottagerpuls

Pulskararakteristikken til starten på mottatt puls i målemikrofonen er vanskeligere å forklare. Mikrofonen har en karakteristikk som ikke skulle tilsi den gradvise økningen av signalet som figur 5.35 i større eller mindre grad viser for alle tre mottatte pulsene b), d) og f). Det er lite sannsynlig å anta at dette skyldes ujevn deteksjon i oscilloscopet. Dette midler et antall målepunkter gjennom et antall sweep. I figur 5.35 satt til 1200 punkter over 30 og 70 sweep. Unøyaktig eller manglende deteksjon av pulsens startpunkt på scopet vil kunne medføre en slik effekt. Måleteknisk er dette i utgangspunktet mindre problematisk all den tid målingene blir tatt fra et område hvor vi har definert stabil svingetilstand. Utfordringen er imidlertid å definere dette området så lenge pulsen bruker store deler av tiden i starten på å svinge seg opp i amplitude, og interferens kan inntreffe kort tid etter dette.

Sendepulsen sin manglende flate amplitude indikerer at elementet motsetter seg påtrykt spenning i større eller mindre grad. Hvordan dette gir seg utslag i det akustiske spekteret er det i utgangspunktet vanskelig å si noe om. Om det forutsettes at mottagermikrofonen og måleutrustning (forsterker og oscilloscop) ikke påvirker pulsformen, skriver pulsformen til mottatt puls seg fra senderelementet. I så fall er dette et forhold som må undersøkes videre. At signalgeneratoren ikke er en ideell spenningsstabilisert kilde, vises tydelig av variasjon i amplituden til elementets inngangssignal. For å få et bilde av elementets oppførsel når det påtrykkes en puls ville det være hensiktsmessig å kunne måle både spenning og strømtrekk samt fasevinkel mellom disse når elementet blir eksitert med pulsburst fra signalgeneratoren. Dette vil kunne gi mer informasjon om elementet sin oppførsel med hensyn på elektriske egenskaper og gi et bedre utgangspunkt for å forstå hvordan dette kan påvirke de akustiske egenskapene. Det vil tilsvarende gi nyttig informasjon dersom elementet i samme måleoppstillingen ble påtrykt et spenningsprang fra 0v til en gitt DC spenning<sup>1</sup> og deretter et tilsvarende sprang tilbake. Hvordan elementet svinger seg opp og ned i disse situasjonene vil gi et bilde på de samme svingeeffektene som vi ser eksempler på i figur 5.35.

### 6.7.1.3 Fysisk oppstilling

Den aller største utfordringen i målingene var å få til en fysisk oppstilling av element og mikrofon. Tabell 4.2 sier hvordan de fysiske egenskapene til elementet var antatt å være ved målinger i luft. Med en vinkeltoleranse i to akseretninger på mindre enn +/- 0,6 grader for hovedstrålen ved måling på 2.81meter og frekvenser rundt tykkelsesresonans var det en utfordring å finne lydaksen. Gitt disse marginene antas det at største unøyaktigheten i målingene skriver seg fra dette forholdet. Imidlertid viser målingene med all tydelighet at det er mulig å gjennomføre akustiske målinger på denne avstanden og med disse fysiske utfordringene. Størrelsen og frekvensresponsen til elementet har et veldig fleksibelt bruksområde i andre medium enn luft, f. eks vann. Målingene og simuleringene har vist at det er mulig å gjennomføre grunnleggende undersøkelser i luft før eventuelt bruk i andre medium, som f. eks vann. Med økende tilgjengelig datakraft i tiden fremover vil dessuten FEMP simuleringer for element i luft kunne gjennomføres med både større nøyaktighet og frekvensområde enn hva som viste seg mulig i arbeidene med denne oppgaven.

For å få bedre resultater ved tilsvarende målinger i luft må det tilvirkes bedre holdere for finretting av fysisk oppstilling. Holderen som ble tilvirket under arbeidene med denne oppgaven er forberedt for bruk sammen med MICOSSTEP dreiemotor i det at sentertapp på holder passer sentrert i dreiemotoren. Dette vil løse innretting i horisontalplanet. Innretting i

---

<sup>1</sup> Denne form for testing må være nøye vurdert i forhold til hva elementet tåler. Destruktiv testing er ikke ansett som en formålstjenlig fremgangsmåte.

vertikalplanet må tilsvarende tilstrebes ved at basen dreiemotoren plasseres på bør kunne tiltes trinnløst med god oppløsning. Dette vil eliminere store deler av den fysiske usikkerheten i målingene.

## 7 Konklusjon

I arbeidene med denne oppgaven har hovedfokus vært å karakterisere egenskapene til de piezoelektriske skivene av typen PZT-5A med diameter ca 75mm og tykkelse ca 10mm. Skivene har blitt undersøkt med elektriske og akustiske målinger. Disse har blitt sammenholdt med teoretiske simuleringmodeller.

I hovedsak har arbeidet konsentrert seg om følgende punkter:

- Bestemme egenskaper til skivene ved hjelp av målinger
- Bestemme egenskapene til skivene ved hjelp av simuleringer
- Sammenholde målinger og simuleringer for om mulig å validere simuleringmodellene

Elektriske målinger på elementene viste at elementene hadde en kompleks sammensetning av resonanser. Komplexiteten kunne tilskrives sterk kobling og sammenblanding mellom de ulike svingemodene. Dette var til en viss grad forventet, gitt at diameter/tykkelsesforholdet var lavt.

Målinger med ulike eksitasjonsspenninger under impedansanalysen viste at det var vanskelig å påvise noen ikkelinearitet som følge av at påtrykt spenning varierte mellom 100mV og 1V.

Akustiske målinger viste seg å være godt gjennomførbare selv med avstand på 2,8 meter mellom element og målemikrofon. Dette har vist at det er mulig å foreta karakterisering av egenskapene til element med denne fysiske størrelsen ved målinger i luft over et frekvensområde som går godt forbi tykkelsesresonans. Selv om utfordringene med fysisk oppstilling viste seg relativt store har metodikken i prinsippet vist seg vellykket.

Simuleringer ved hjelp av endimensjonale modeller for radiellmode og tykkelsesmode viste seg å gi dårlig samsvar med elektriske målinger. Gyldigheten til disse modellene er gitt ved diameter/tykkelsesforhold større enn 10. Resultatene i denne oppgaven viser at for d/t forhold på 7,5 gir ikke disse modellene tilfredsstillende samsvar. Bestemmelse av materialkonstanter basert på målinger baserer seg også på bruk av disse forenklede modellene. Som forventet basert på konklusjonen over gav også dette store avvik, både i forhold til materialkonstanter oppgitt av produsent og til materialkonstanter som viste seg å gi mer riktig representasjon av egenskapene.

Gjennom hele arbeidet er Finite Element simuleringmodellen FEMP benyttet som grunnlag for sammenligning av materialkonstanter. Materialkonstanter både fra tidligere arbeider, leverandører sine datablad samt fra elektriske målinger på elementene ble fremstilt på entydig og sammenlignbar form, slik de blir benyttet i FEMP.

Egenskapene til skivene har blitt simulert i FEMP, og det er tilpasset et sett med konstanter for å gi best mulig samsvar mellom simuleringene og elektriske målinger. Resultatet av simuleringer i FEMP med de to ulike simuleringmodellene, direkteharmonisk og modal analyse, ble studert i detalj for noen utvalgte frekvensområder. Det er i denne sammenhengen avdekket en større forståelse for hvordan modalanalysen blir gjennomført i FEMP, og hvilke forhold som påvirker nøyaktigheten til denne.

Arbeidene med oppgaven har vist at for elementer med lavt d/t-forhold er de endimensjonale modellene ikke i stand til å gi simuleringer av elementenes egenskaper med en tilstrekkelig

grad av nøyaktighet. Radiellmodellen har vist seg gyldig for 1. radielle mode isolert sett, og delvis 2. radielle mode, forutsatt at konstantene som inngår i modellen er bestemt fra målinger på elementet. Disse konstantene representerer på den annen side store avvik fra konstanter fra produsent, og konstanter som brukt i FEMP gir tilfredsstillende samsvar mellom målte og simulerte egenskaper.

FEMP har vist seg å gi godt samsvar mellom simuleringer og målte verdier for elektriske størrelser. Vilkåret for denne påstanden er at materialkonstantene blir tilpasset for best mulig samsvar. På grunn av mangel på gyldige simuleringsmodeller til å validere disse konstantene, er det ikke mulig å hevde at konstantene som FEMP bruker er de riktige. Imidlertid har undersøkelser av både egenfrekvensspekter og animasjoner og bilder av svingemønstre i FEMP vist tilsynelatende samsvarende egenskaper sammenlignet med målinger på elementene. Dette styrker både teorien om og troen på at FEMP er den simuleringsmodellen som er mest egnet til å simulere egenskapene til piezoelektriske elementer med lavt diameter/tykkelse forhold.

## 7.1 Videre arbeid

Arbeidene med denne oppgaven har hatt et preg av å være innledende tilnærming til problemstillingen med lavt d/t-forhold for piezoelektriske skiver. Håndtering av måleusikkerheter og usikkerheter knyttet til fysisk oppstilling av element og målemikrofon bør derfor vies oppmerksomhet i videre arbeid med samme eller tilsvarende elementer.

Det anbefales at eventuelt videre arbeid foretar en ytterligere justering/tilpassing av materialkonstanter for å få et optimalt utgangspunkt for simuleringer i FEMP. Siden denne simuleringsmodellen i praksis viste seg som den eneste som kunne representere elementenes egenskaper med en tilfredsstillende grad av samsvar med elektriske målinger bør det forsøkes å se videre på simuleringer av akustiske egenskaper. En forutsetning for dette vil være tilgjengelighet på datakraft til å håndtere større problemstillinger enn det som lot seg håndtere i arbeidene med denne oppgaven. 64 bit operativsystem og mer enn 4GB dynamisk minne er i så henseende en nødvendighet.

Måleinstrumenteringen for akustiske målinger bør gjennomgås sammen med den fysiske oppstillingen. Impedanskarakteristikk til elementet når det blir pulset av frekvensburster bør undersøkes for å finne ut av pulsformen på mottatt puls. Fastsettelse av burstlengde bør også vurderes nøye som funksjon av fysisk oppstilling og dermed muligheter for interferenseffekter. Til sammen bør disse tiltakene forbedre deteksjon av mottatt puls slik at ikke måleresultatene blir påvirket av måletekniske unøyaktigheter i så stor grad som med instrumenteringen som ble brukt i arbeidene med denne oppgaven.

Til sist bør elementene sine egenskaper i vann undersøkes. Elementene har en frekvenskarakteristikk og fysiske størrelser som synes fordelaktig til bruk i vann. Sammen med det faktum at bølgelengdene i vann er store relativt til i luft, gjør at mulighetene til simulering med FEMP er relativt sett mye større enn for luft gitt samme prosesseringskapasitet på datamaskinen.

## Referanser

1. Kocbach J., "*Finite Element Modelling of Ultrasonic Piezoelectric Transducers*". Ph. D. dissertation, Universitetet i Bergen, September 2000.
2. Atterås F., "*Materialkonstanter for Piezoelektriske Elementer*", Cand. Scient. Oppgave, Fysiks institutt, Universitetet i Bergen, 1998
3. Fardal R., "*Endelig Element Analyse av Elektriske Egenskaper til Piezoelektriske Skiver*" Hovedfagsoppgave, Fysisk Institutt, Universitetet i Bergen, 2002
4. Lohne, K.d, "*Undersøkelse og utnyttelse av svingemoder i ultralyd transduserkonstruksjoner*" Masteroppgave, Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen, Mai 2005
5. Knappskog V., "*Radiellmode Svingninger i Piezoelektriske Ultralydtransducere for Luft. Målinger og Endelig Element Analyser*" Masteroppgave, Institutt for Fysikk og Teknologi, Universitetet i Bergen 2007
6. Aanes M., "*Undersøkelser av piezokeramiske skiver. Målinger og endelig element analyser*" Masteroppgave, Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen Juni 2009.
7. Vestrheim M. "*Forelesingsnotater i PHYS272 akustiske transdusere*" ved Fysisk institutt, Universitetet i Bergen, 2003
8. Technical Publication TP-226, Morgan Electro Ceramics, Bursledon road, Thornhill, Southampton, SO19 7TG, UK [www.morgan-electroceramics.com](http://www.morgan-electroceramics.com)
9. Holland, R., "*Representation of Dielectric, Elastic, and Piezoelectric Losses by Complex Coefficients*" IEEE transactions on sonics and ultrasonics, vol SU-14 no. 1, 1967
10. Sherrit S., Gauthier N., Wiederick H. D., and Mukherjee B. K., "*Accurate evaluation of the real and imaginary material constants for a piezoelectric resonator in the radial mode*", Ferroelectrics vol. 119, 17-32, 1991
11. Sherrit S., Wiederick H. D., and Mukherjee B. K., "*Non-iterative evaluation of the real and imaginary material constants of piezoelectric resonators*", Ferroelectrics vol. 134, 111-119, 1992
12. Sherrit S., Gauthier N., Wiederick H. D., and Mukherjee B. K., "*A polynomial fit for calculating the electromechanical coupling constants of piezoelectric material using the method described by Onoe et al. [J. Acoust. Soc. Am. 35, 36-42(1963)]*", J. Acoust. Soc. Am. 91 (3), 1992
13. Chinchurreta F. J., Montero de Espinosa F., "*Guides to characterize piezoelectric materials from disk shaped samples*", Ferroelectrics vol 81, 229-232, 1988

14. Kin Wing Kwok, Helen Lai Wah Chan, Chung Loong Choy, "Evaluation of the material parameters of piezoelectric materials by various methods" IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control vol. 44, no. 4, 1997
15. Alemany C., Pardo L., Jiménez B., Carmona F., Mendiola J., González A. M., "Automatic iterative evaluation of complex material constants in piezoelectric ceramics" J. Phys. D: Appl Phys 27, 148-155, 1994
16. Alemany C., González A. M., Pardo L., Jiménez B., Carmona F., Mendiola J., "Automatic determination of complex constants of piezoelectric lossy materials in the radial mode" J. Phys D: Appl. Phys 28, 945-956, 1995
17. *IEEE Standard on Piezoelectricity – Std 176-1987*, (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 345 East 47<sup>th</sup> Street, New York 1988)
18. Lunde P., Vestrheim M., *Piezoelectric Transducer Modelling Part 1: Basic Equations for Poled Ferroelectric Ceramics* (Chr. Michelsen Institute Ref. nr. CMI-91-A10010, 1991)
19. *Guide to dynamic measurements of piezoelectric ceramics with high electromechanical coupling*, (International Electrotechnical Commission, Publication 483, 1976)
20. Vestrheim M., Fardal R., "Analyxes of electric measurements on piezoelectric disks using FE-modeling". Proceedings of the 24<sup>th</sup> Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, 2001.
21. Kinsler, Frey, Coppens, Sanders, "Fundamentals of Acoustics" fourth edition, John Wiley & Sons, Inc. 2000.
22. Vestrheim M, Fardal R, "Basic accuracy of measurement methods for material constants of piezoelectric ceramics". Paper presented at joint Baltic-Nordic Acoustical Meeting 2002, 26-28 August 2002, Technical University of Denmark, Lyngby, Copenhagen
23. *Operation and Service Manual: 4192 LF Impedance Analyzer* (Hewlett Packard, HP16047A, 1981)
24. *Five Modern Piezoelectric Ceramics, Bulletin 66011/F*, (Vernitron Piezoelectric Division, 232 Forbes Road, Bedford, England)
25. Vestrheim M., Fardal R., "Methods for determining constants of piezoelectric ceramic materials". Proceedings of the 25<sup>th</sup> Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Department of Telecommunications, Norwegian University of Science and Technology, 2002
26. Meitzler A. H., O'Bryan H. M. Jr, Tiersten H., "Definition and measurement of radial mode coupling factors in piezoelectric ceramic materials with large variations in Poisson's ratio" IEEE transactions on sonics and ultrasonics, Vol. SU-20 no.3, 1973
27. Erdal A., *Elementær innføring i sannsynlighetsregning og problemløsninger ved analyse av måleresultater*, (Fagbokforlaget, Fagerdalen 6, 5039 Bergen, 1999)



# Vedlegg 1

## Instrumentering brukt i arbeidene

| Utstyr                         | Produsent  | Modell    | Serienummer | Nøyaktighet/Kalibrering |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------|-------------------------|
| Digitalt skyvelære             | TESA       |           |             | 30µm / ingen            |
| Digital mikrometerskrue        | TESA       | TesaDIGIT |             | 5µm / ingen             |
| Digital vekt                   | AND        | GF-3000   |             |                         |
| Temperatur/fukt måler          | VAISALA    | HMI 31    |             |                         |
| Barometer                      | B&K        | UZ 0004   | 1918465     |                         |
| Impedansanalysator             | HP         | 4192A LF  | 2150J01344  |                         |
| Test fixture for HP4192A LF    | HP         | 16047A    |             |                         |
| Signalgenerator                | HP         | 33120A    | US36006293  |                         |
| Oscilloscope                   | LeCroy     | 9350      | 1199        | 10nov08 – due 10nov09   |
| Målemikrofon                   | B&K        | 4138      | 1832479     | 27.04.95                |
| Forforsterker for målemikrofon | B&K        | 2633      | 1833221     |                         |
| Måleforsterker                 | B&K        | 2636      | 1815638     |                         |
| Analogt filter                 | Krohn-Hite | 3202      | 5858        |                         |
| Pistonfon                      | B&K        | 4228      | 1918465     |                         |
| Frekvensteller                 | HP         | 5302A     | 1509U01965  |                         |

## PC-verktøy benyttet

DELL inspiron 6400 bærbar PC med Intel T2050 1.60GHz, 1GB RAM (øket til 2)

- Microsoft Windows XP Home Edition versjon 2002, Service Pack 3
- Microsoft Word 2002 med Math Type 6.5 formeeditor
- Matlab Versjon 7.5.0.342 (R2007b)
- FEMP U3.1 (med utførte endringer for å kjøre på Matlab R2007b. Disse endringene ble parallelt også utført i forbindelse med andre arbeider og resulterte i lansering av FEMP U3.2)

DELL PC på akustikklab ved IFT for kommunikasjon med måleinstrumentering.

ACER Aspire 5810T bærbar PC med Intel U3500 1.4GHz, 4GB RAM

- Microsoft Vista Home Premium
- Matlab Versjon 7.5.0.342 (R2007b)
- FEMP U3.1

## Vedlegg 2

### Programfiler brukt til elektriske målinger

#### Impanal.m

```
%skrevet av Halvor Hobæk
%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;
for frekv=0.5:1:2000
s=sprintf('%3.3f',frekv);
gpib('wrt',ud,['FR' s 'ENEX']);

pause(1)
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
```

### Programfiler brukt til akustiske målinger

#### main.m

```
%% Program for akustiske målinger på piezoelektriske element
% Opprinnelig laget av Vidar Knappskog (høst 2007)
% med modifikasjoner av Magne Aanes okt 2008

% Programmet kjører gjennom spesifisert frekvensområde
% og henter ut data fra kanal2 på skop.

% Oppsett forklart i masteroppgave med:
% LeCroy 9361 skop i burstmode -- GPIB kanal 4
% HP 33120A signalgenerator - GPIB kanal 12
% Transduser, oppheng forklart i masteroppgaven
% Målemikrofon B%K type 4138 med forforsterker type 2633
% Måleforsterker B%K type 2636
% Eksternt filter, Krohn - Hite model 3202

% Må gjøre to målinger, for inn-signal og ut-signal og deretter
% kjøre kildef.m
% Dette programmet finner "bare" spenning inn og ut av målemikrofonen.

% NOTE: Viktig for lesing fra skop at du har GPIB-metode i C++, er
% på de stasjonære maskinene i på laboratoriet.

% Midler på skop
```

```

%% VIKTIG: husk å stille inn at skopet skal trigge eksternt, ellers
%% vil målingene bli feile.

%% Programmet START
tic

%%-----BRUKER-----%%
%% Frekvensområdet en ønsker å undersøke
fstart = 100;
fstep = 100;
fstop = 250e3;

% Burst count blir nå beregnet av frekvens og variabel t, se nedenfor. For
% 95 kHz blir burst count = 57.

% Tid(i Hz) mellom hver burst
burst_rate = 50;

% Spenning på innsignal fra generatoren(pk)
voltinn = 10;

%%-----%%

% Opprettelse av GPIB-kanaler til skop og generator
ud_signal = gpib('find','DEV12'); % GPIB-kanal 12
ud_skop = gpib('find','DEV4'); % GPIB-kanal 4

% Initalisering av HP 33120A
hpset(ud_signal,['BM:INT:RATE ' num2str(burst_rate)]);
hpset(ud_signal,['VOLT ' num2str(voltinn)]);

% Initalisering av LeCroy 9350
lecset(ud_skop,'CHDR OFF');
lecset(ud_skop,'CFMT OFF,BYTE,HEX');
lecset(ud_skop,'WFSU SP,0,NP,0,FP,0');
lecset(ud_skop,'TDIV 2e-4');
lecset(ud_skop,'clsw');
% Husk å endre denne når spenning_ut måles
lecset(ud_skop,'C2:VDIV 2V');
pause(5);
resultatCh2 = {};
frekvens = [];
f = fstart;
i = 1;
t = 6e-4;

%% Innhenting av data fra LeCroy9361 og sweeping av frekvensområdet

while f <= fstop;
    disp(f)
    hpset(ud_signal,['BM:NCYC ', num2str(ceil(f*t))]);
    hpset(ud_signal,['FREQ ', num2str(f)]);
    % if f==25000
    %     lecset(ud_skop,'C2:VDIV 100MV');
    %     pause(5);
    % end
    % if f==28000
    %     lecset(ud_skop,'C2:VDIV 50MV');

```

```

%         pause(5);
%     end
%     if f==60000
%         lecset(ud_skop,'C2:VDIV 100MV');
%         pause(5);
%     end
    pause(4);
    kanal2 = leclesCh2(ud_skop);
    pause(1);
    % Skalering av signalet fra skopet
    skalaCh2 = lecskalering(ud_skop,2);
    kanal2 = kanal2*skalaCh2(4)/33.3333;
    resultatCh2{i} = kanal2;
    % Initalisering for ny kjøring(ny frekvens)
    kanall = 0;
    frekvens(i) = f;
    f = f + fstep;
    i = i + 1;
    % Clear av sweep, for ikke opphoping av data.
    lecset(ud_skop,'clsw');
end

fclose('all');
%save akustiskmaaling_ut_70dB_nr1_resultatCh2 frekvens
save akustiskmaaling_inn_10Vpp_resultatCh2 frekvens
toc

```

### **kildef.m**

```

%% Kildefølsomhet
% Dette programmet tar inn pulsene fra målingene, finner peak to peak
% verdiene i steady-state området, korrigerer for absorpsjon og
% interpolerer ut til 1m for lydtrykket. Finner deretter kildefølsomheten
% S_v re 20 mikroPa/V.

% Programmet er opprinnelig laget av Vidar Knappskog 2007
% Programmet er modifisert av Magne Aanes okt 2008

%%-----BRUKER-----%%
% Avstand mellom lydkilde og målemikrofon (i m)
s = 0.765;

% Atmosfæretrykk (i hPa)
p_a = 988;

% Relativ luftfuktighet (i %)
rel_fukt = 19.5;

% Temperatur (i C)
temperatur = 25.8;

% Forsterkning i måleforsterker (i dB)(under akustiske målinger)
Amp_faktor = 60;

% Bestemmelse av steady-state område for Vut (spenning ut fra forsterker)
% For å bestemme steady-state er det bare å plote signalet, eksempelvis:
% plot(resultatCh2{1,1})
grensel = 1.2e4;
grense2 = 1.4e4;

```

```

% Bestemmelse av steady-state område for Vinn (spenning inn på lydkilde)
grense3 = 1.1e4;
grense4 = 1.3e4;

%% KALIBRERING MED PISTOFON %%
% Målt spenning ut (peak2peak)
V_avlest_ref = 922e-3;

% Forsterkning i måleforsterker(i dB)
amp = 30;

% Atmosfæretrykk (i hPa)
p_aref = 1030;

% VIKTIG: Husk å dokumentere temperatur og luftfuktighet ved kalibrering
% men siden en ikke ta hensyn til disse ved utregning av kildefølsomheten
% er de ikke oppgitt som variabler i programmet.
%% FERDIG MED KALIBRERINGSDATA %%
%%-----%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%INNHEITING AV MÅLT DATA FRA MAIN.M%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% RETNINGER REFERERER TIL INN/UT TRANSDUSER

load akustiskmaaling_ut_2Vpp_60dB_DT25nr3_100Hz_R3.mat
Vut = resultatCh2(1,:); %Lagrer pulldata i matrisen Vut
Vut_f = frekvens; %Tilhørende frekvenser
load akustiskmaaling_inn_2Vpp_DT25nr3_100Hz_R3.mat
Vinn = resultatCh2(1,:); %Lagrer pulldata i matrisen Vinn
Vinn_f = frekvens; %Tilhørende frekvenser
resultatCh2={};
frekvens=[];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%---FINNER UNDER DENNE SEKSJONEN MAKS PEAK-PEAK AV SPENNING UT OG INN---%%

maksimum = 0;
minimum = 0;
spenning_inn = [];
spenning_ut = [];
snitt_a = 15000;

% Finner spenning ut peak to peak
% Finner snittet av maks- og min-verdier i det oppdelte transiente området.
for n = 1:length(Vut)
    snitt = ceil(Vut_f(n)/snitt_a);
    del = fix((grense2-grense1)/snitt);
    grense_a = grense1;
    grense_b = grense_a + del;
    maksimum = 0;
    minimum = 0;
    %While løkken finner maksimum og minimum i hvert av områdene og legger
    %de sammen.
    while grense_b <= grense2
        maksimum = maksimum + max(Vut{n}(grense_a:grense_b));
    end
end

```

```

        minimum = minimum + abs(min(Vut{n}(grense_a:grense_b)));
        grense_a = grense_a + del;
        grense_b = grense_b + del;
    end
    spenning_ut(n)= 2.*(maksimum+minimum)./snitt;
end

% Finner spenning inn peak to peak
for m=1:length(Vinn_f)

spenning_inn(m)=max(Vinn{m}(grense3:grense4))+abs(min(Vinn{m}(grense3:grense4)));
end

%%-----%%

%%-----FREKVENSPONS OG FRITTFELTKORREKSJON SAMT KALIBRERING-----%%

% Frekvensresponsen og frittfelt-korreksjonen til mikrofonen er gitt
% i frekrespons.m

%% KALIBRERING MED PISTOFON;
spl = 124.11 + ((p_aref)-983)*0.2/23;
p_ref = 10^(spl/20)*20e-6;
M_ref = 1;
Amp_faktor = 10^(Amp_faktor/20);
amp = 10^(amp/20);
V = spenning_ut/Amp_faktor;
V_ref = V_avlest_ref/amp;

% Henter frekvensrepsonsens med frittfelt-korreksjon for hver frekvens
M_fm = frekrespons(Vut_f);
M_fm_trykk = 10.^(M_fm./20);
% Trykket ved mikrofonen
p=(M_ref./M_fm_trykk).*(V./(V_ref*2*sqrt(2)).*p_ref);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%-----KORRIGERING FOR LYDABSORBASJON OG INTERPOLERING UT TIL 1M-----%%

% Henter spenningen som skal brukes for området utenfor resonansområdet i
% beregningen av kildefølsomheten.
V_innRef = spenning_inn(1);

% Absorbsjon er kalkulert i absorbsjon.m

s = s/1000; % absorbsjon.m trenger avstand i km
temp = 273.15 + temperatur;
p_i = [];
p_lm = [];
s_ref = 0.001; % 1 m

% Trykket interpolert ut til 1m
for k = 1:(length(Vut_f))
    p_i(k) = p(k)/(exp(-
0.1151*absorbsjon(Vut_f(k),(p_a/10),rel_fukt,temp)*s));
    % Beregning av tap mhp absorbsjon
    a = absorbsjon(Vut_f(k),(p_a/10),rel_fukt,temp); %dB per meter
    p_lm(k)=p(k)*s*(exp(0.1151*a*s))/s_ref;
end

```

```

end

% Kildefølsomhet S_v. Korrigerer her for spenningen inn. Den varierer i et
% område rundt resonans og er tilnærmet konstant i områdene utenfor.
S_v=[];
jj=1;
for ii=1:(length(Vut_f));
    if Vut_f(ii)==Vinn_f(jj);
        S_v(ii)=p_1m(ii)/(spenning_inn(jj)/(2*sqrt(2)));
        jj=jj+1;
        if jj>length(Vinn_f)
            jj=length(Vinn_f);
        end
    else
        S_v(ii)=p_1m(ii)/(V_innRef/(2*sqrt(2)));
    end
end

% Er nå gått fra peak2peak til rms verdier for spenning.
f = Vut_f;
Sv = S_v;
% Kildefølsomheten gitt i dB re 1V/Pa
Svlg = 20.*log10(Sv);

save kildefølsomhet_2Vpp_DT25nr3_100Hz_R3 f Sv Svlg

```

## absorbsjon.m

```
function korr_trykk = absorbsjon( frekvens,trykk,fukt,temp )

%Vidar Knappskog 2007
%Programmet rekner ut absorpsjonskoeffisienten for hver frekvens
f=frekvens;
p=trykk;
h_rel=fukt;
T=temp;

%f=10000;           %Frekvens
%p=101.325;        %Atmosfæretrykket
%h_rel=50;         %Relativ luftfuktighet
%T=253.15;        %Temperatur i Kelvin

T_01=273.16;       %Trippelpunkts isotermisk temperatur(0.01C)
p_ref=101.325;    % Referansetrykket i kPa( latm)
T_ref=293.15;     %Referanse temperatur Kelvin.(20 deg C)

%Finner først den molare konsentrasjonen av vann i luften
V=10.79586*(1-(T_01/T))-5.02808.*log10(T/T_01)+1.50474*(10^-4)*(1-10^(-
8.29692*(T/T_01-1)))+0.42873*(10^-3)*(-1+10^(4.76955*(1-T_01/T)))-
2.2195983;
h=h_rel*(10^V)*(p/p_ref)^-1;    %Molare luftfuktighet

%Relaksasjons frekvens for Oksygen
f_r0=(p/p_ref)*(24 + ((4.04*(10^4)*h)*(0.02+h)/(0.391+h)));

%Relaksasjonsfrekvensen for Nitrogen
f_rN=(p/p_ref)*(T/T_ref)^(-0.5)*(9+280*h*exp(-4.170*((T/T_ref)^(-1/3)-1)));

%Dempningskoeffisient
alfa=8.686*f^2*( (1.84*(10^-11)*(p/p_ref)^-1*(T/T_ref)^(0.5)) +
(T/T_ref)^(-5/2)*(0.01275*(exp(-2239.1/T))*(f_r0/(f_r0^2+f^2)) +
0.1068*exp(-3352/T)*(f_rN/(f_rN^2+f^2))));

korr_trykk=alfa*1000;
```



## leclesCh2.m

```
function [samples] = leclesCh2(ud);

% Lesing av informasjon som ligger på kanal2 på LeCroy 9361
% Halvor Hobæk

% Henter inn traceA
cmd=['TA:WF? DAT1'];
ibsta = gpib('wrt',ud,cmd);
gpib('rdf',ud,'data-lest');
pause(1);
ff=fopen('data-lest','r');
%pause(0.3);
t=fscanf(ff,'%2x',inf);
samples(1:length(t))=(t(1:length(t))-256*(t(1:length(t))>127));
fclose('all');
```

## frekrespons.m

```
function y = frekrespons(f);
% aktuell frekvensvektor

% frekvensrespons for målemikrofon B&K type 4138 serienr 1832479
f1 =
[20,500,600,700,800,900,1000,1500,2000,3000,4000,5000,6000,7000,8000,9000,1
0000,15000,20000,30000,40000,50000,...

60000,70000,77500,80000,90000,100000,110000,130000,150000,160000,165000,167
500,170000,172500,175000,195000,200000];
dB1 = [0,0,-0.02375,-0.0238,-0.045,-0.05625,-0.06,-0.07125,-0.095,-0.12,-
0.1275,-0.1375,-0.14375,-0.1475,-0.14875,...
-0.15125,-0.155,-0.03375,0,0.18625,0.3475,0.48625,0.16125,-0.505,-
0.39,-0.52875,-0.655,-0.5575,-0.5,0.19,2.5225,...
3.5875,3.835,3.7875,3.7455,3.5,2.895,0.5,-0.8475];

% kvadratisk interpolasjon av frekvensrespons over
kvad1 = interp1(f1,dB1,f,'cubic');

% fritt feltkorreksjon for målemikrofon B&K type 4138
f2 = 1e3.*[4,5,6,7,8,9,10,15,20,30,40,50,60,70,80,90,95,100,125,150,200];
dB2 =
[0.168,0.19,0.218,0.378,0.406,0.546,0.62,0.856,1.368,2.702,4.336,5.986,7.39
6,8.824,10.1048,10.766,10.95,10.864,9.198,4.716,-1.066];

% kvadratisk interpolasjon av fritt feltkorreksjon over
kvad2 = interp1(f2,dB2,f,'cubic');

% frekvensrespons inkludert fritt-feltkorreksjon.
kvad3 = kvad1 + kvad2;

% Omgjøring fra dB til mV/Pa
y = 10.^(kvad3./20);
```

### **hpset.m**

```
function y = hpset(ud,command);
```

```
% Metode for sending av ASCII  
% kommandoer til HP 33120A
```

```
gpib('wrt',ud,command);
```

### **lecskalering.m**

```
function sk = lecskalering(ud,ch)
```

```
% sk=skalering(ch) , funksjon for getting scaling factors for Lecroy 9350  
% sk(1)=skale for voltage, sk(2:3 ) for timebase
```

```
cmd='CHDR OFF';  
ibsta = gpib('wrt',ud,cmd);  
cmd=['C' num2str(ch) ':VDIV?'];  
ibsta = gpib('wrt',ud,cmd);  
s = gpib('rd',ud);  
skk=str2num(s);  
p=1;%eventuell probesetting  
sk(1)=skk*5/128/p;% scaling factor vertical  
cmd='TDIV?';% 'HOR:MAI:SCA?';  
ibsta=gpib('wrt',ud,cmd);  
sk1=gpib('rd',ud); sk(2)=str2num(sk1);  
cmd='TRIG_DELAY?';% 'HOR:MAI:POS?';  
ibsta=gpib('wrt',ud,cmd);  
pos=gpib('rd',ud); sk(3)=str2num(pos);  
sk(4)=skk; % skopscale  
sk(5)=p; % eventual probe-setting
```

## Programfiler for endimensjonale modeller

### radiellmodellen.m

```
% Skrevet av O.S.Oma høst 09
% Programmet simulerer radielmodesvingninger for piezoelektrisk element

% Inngangsverdier hentet på formen til FEMP materialkonstanter for entydig
% sammenligning med andre simuleringsmodeller

% INNGANGSVERDIER FOR MATERIALKONSTANTER

c11er=12.274e10
Qc11e=53.4525
c11e=c11er+(i*c11er/Qc11e)

c12er=9.1034e10
Qc12e=50.4820
c12e=c12er+(i*c12er/Qc12e)

c13er=8.2098e10
Qc13e=52.1458
c13e=c13er+(i*c13er/Qc13e)

c33er=11.625e10
Qc33e=96.1323
c33e=c33er+(i*c33er/Qc33e)

%%%%%%%%%%

e31r=-3.4665
Qe31=8.3452
e31=e31r-(i*e31r/Qe31)

e33r=12.7164
Qe33=24.2227
e33=e33r-(i*e33r/Qe33)

%%%%%%%%%%

eps33sr=0.82711e-8
Qeps33s=148.5858
eps33s=eps33sr-(i*eps33sr/Qeps33s)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INNGANGSVERDIER FOR SIMULERINGER

a=37.523e-3
t=10.0218e-3
rho=7704.8
%f=0:100:2000e3
%fmin = 0;
%fmax = 2000e3;
%antallpkt = (fmax-fmin)*0.001;
f = linspace(0,2000e3,20001); %fmin,fmax,antpkt
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
c11p=c11e-((c13e^2)/c33e)
e31p=e31 - ((e33*c13e)/c33e)
eps33p=eps33s + (e33^2/c33e)
kpp=sqrt(e31p^2/(c11p*eps33p))
sigmap=-(-c12e*c33e + c13e^2)/(c11e*c33e - c13e^2)
vp=sqrt(c11p/rho)
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
n=(2*pi.*f*a)./vp
Jz = n.*bessel(0,n)./bessel(1,n);
```

```
for k = 1 : length(f)
    Y(k) = (i*2*pi*f(k)*eps33p*pi*(a^2)/t)*((-1+(2*(kpp^2)))/(1-sigmap-
    Jz(k)));
end
```

### tykkelsesmodellen.m

```
% skrevet av O.S.Oma høst 09
% Programmet simulerer tykkelsesmodesvingninger for piezoelektrisk element.
```

```
% Inngangsverdier hentet på formen til FEMP materialkonstanter for entydig
% sammenligning med andre simuleringsmodeller.
```

```
% INNGANGSVERDIER FOR MATERIALKONSTANTER
```

```
c33er=11.3e10
```

```
Qc33e=164
```

```
c33e=c33er+(i*c33er/Qc33e)
```

```
e33r=12.6
```

```
Qe33=215
```

```
e33=e33r-(i*e33r/Qe33)
```

```
eps33sr=0.518e-8
```

```
Qeps33s=163
```

```
eps33s=eps33sr-(i*eps33sr/Qeps33s)
```

```
c33d=c33e+((e33^2)/eps33s)
```

```
kt2=(e33^2)/(c33d*eps33s)
```

```
% INNGANGSVERDIER FOR SIMULERINGER
```

```

a=37.523e-3
t=10.0218e-3
rho=7704.8
f=0:100:2000e3

% UTREKNINGER
vd=sqrt(c33d/rho)

C0s=(eps33s*pi*a^2)/t

% MELLOMREKNINGER
x=(pi*f*t)./vd
A=(tan(x))./x
B=(1-(kt2.*A))

% MASON MODELLEN FOR TYKKELSESMODE
Z=B./(i*2*pi*C0s*f)

```

## Programfiler for materialbesemmelser

### Bestemme FEMP konstanter\_min.m

```

%Skrevet av O.S.Oma, vår 09
%Finne FEMP konstanter fra målinger

```

```

%Metode beskrevet i arbeidene til Per/Magne CMR

```

```

%Inngangsverdier fra vernitron tabeller PZT5A

```

```

s13e=-7.22e-12
s33e=18.8e-12
s44e=47.5e-12
eps11t=1.53105e-8
d15=584e-12
d33=374e-12
%k33t=0.48          %kt kan finnes fra tykkelsesmoden
%h33=21.5e8        %kan finnes fra tykkelsesmoden

```

```

%Inngangsverdier fra målinger

```

```

%kp=0.58503 - 0.0020719i    %negativ fortegnskonvensjon i følge Vernitron

```

```

s11e=2.087675217222791e-11 - 2.899566564972022e-13i
s12e=-1.065505491084446e-11 + 2.002827118368202e-13i
eps33t=1.460413729000000e-08 - 1.802979912000000e-10i
d31=-1.598043960297466e-10 + 2.253261526715462e-12i
eps33s=8.271134489466710e-09 + 5.566569515673611e-11i
k33t=0.373538919279108 - 0.017736211302492i
h33=1.536942286258954e+09 - 7.381467416843206e+07i

```

```

c11e=(s11e/(s11e^2-(s12e^2)))+(s13e^2)/((s11e+s12e)*(s33e*(s11e+s12e)-
2*(s13e^2)))    %s13e og s33e fra tabell

```

```

c12e=(-s12e/(s11e^2-(s12e^2)))+(s13e^2)/((s11e+s12e)*(s33e*(s11e+s12e)-
2*(s13e^2)))    %s13e og s33e fra tabell

c13e=-s13e/(s33e*(s11e+s12e)-2*(s13e^2))           %s13e og s33e fra
tabell

c33e=(s11e+s12e)/(s33e*(s11e+s12e)-2*(s13e^2))     %s13e og s33e fra
tabell

c44e=1/s44e                                           %s44e fra tabell

eps11s=eps11t-(d15^2)*c44e                           %eps11t og d15 fra
tabell

e31=d31*(c11e+c12e)+d33*c13e                         %d33 fra tabell

e33=eps33s*h33

e15=d15*c44e                                           %d15 fra tabell

```

```
%Finne Q-verdier
```

```

Qc11e=real(c11e)/imag(c11e)
Qc12e=real(c12e)/imag(c12e)
Qc13e=real(c13e)/imag(c13e)
Qc33e=real(c33e)/imag(c33e)
Qc44e=real(c44e)/imag(c44e)

Qeps11s=real(eps11s)/imag(eps11s)
Qeps33s=real(eps33s)/imag(eps33s)

Qe31=real(e31)/imag(e31)
Qe33=real(e33)/imag(e33)
Qe15=real(e15)/imag(e15)

e31=e31p+(e33*c13e/c33e)
e31p=-15.59 + 0.081867i

```

### kpbestemmelse\_min.m

```

%% kpbestemmelse med imagin rdeler..
% i femp
%Opprinnelig skriptet av M.Aanes
%Endret av O.S.Oma

% IEEE metode benyttet
% Q-verdi ved   se p  imagin rdel til hhv Y og Z

f1s = 26.705e3%39880;
f2s = 66.77e3%102955;

```

```

flp = 30.98e3%46525;

Qf1p = flp/215%(46770-46280);
Qf1s = fls/245%(40120-39640);
Qf2s = f2s/685%(103480-102425);

fls = fls*((1-i/Qf1s)^(-1/2));
f2s = f2s*((1-i/Qf2s)^(-1/2));
flp = flp*((1-i/Qf1p)^(-1/2));

rs = f2s/fls;
%eps0 = 8.854187817e-12;
a = 37.523e-3%25.001e-3;
t = 10.0218e-3%2.009e-3;
%masse = 30.8e-3;
%rho = masse/(pi*a^2*t);
rho = 7704.8
eps33t = 1.460413729e-8-i*1.802979912e-10      %Funnet fra måling på element

% Test for validasjon av metoden til Sherrit
if abs(imag(rs)) <= 2*sqrt(2)*1e-3/Qf1s^(1/2)
    rs = real(rs);
end

% Startverdi valgt fra iterasjon med reelle konstanter:
% eta = n = 2.0877 og sigmap = 0.3637, tatt fra Sherrit-tabell fra IEEE.
n = 11.2924 - 7.63859*rs + 2.13559*(rs^2) - 0.215782*(rs^3);
sigmap = 97.527023 - 126.91730*rs + 63.400384*(rs^2) - 14.340444*(rs^3) +
1.2312109*(rs^4);

c11p = (2*pi*fls*a)^2*rho/(n^2);
s11e = 1/(c11p*(1-sigmap^2));
s12e = -sigmap*s11e;

ksi = 2*pi*flp*a/((c11p/rho)^(1/2));
Jz_ksi = ksi*bessel(0,ksi)/bessel(1,ksi);

kp_opp2 = (1-sigmap-Jz_ksi)/2;

eps33p = eps33t/(1 + ((2*kp_opp2)/(1+sigmap)));
kp_ned2 = 1 - eps33p/eps33t;
kp_n = sqrt(kp_ned2);
k31 = kp_n*sqrt((1-sigmap)/2);
d31 = k31*-sqrt(eps33t*s11e);

k33bestemmelse_min.m
%% Materialbestemmelser rundt tykkelsesmoder
% basert på IEEE metode

% @author, Magne Aanes vÅr 2009
% korrigert for frekvensbestemmelse etter IEEE metode fra Sherrit

fs = 200e3          %satt inn fra målinger
fp = 212.7e3       %satt inn fra målinger

```

```

% Finner Q-verdi til frekvens med å se på imaginærdel til hhv Y og Z
Qfs = fs/(3700);    %satt inn fra målinger
Qfp = fp/(1200);    %satt inn fra målinger

% Inkluderer Q-verdier i opprinnelige frekvenser.
fs = fs*((1-i/Qfs)^(-1/2));
fp = fp*((1-i/Qfp)^(-1/2));
deltaF = fp-fs;
% Beregning av materialkonstanter fra måling.
k33t2 = (pi/2) * (fs/fp) * (tan((pi/2)*(deltaF/fp)));
c33d = 4*rho*(fp*t)^2;
% Beregning av andre materialkonstanter
eps33s = eps33t*(1-k33t2)*(1-kp_ned2);
k33t = sqrt(k33t2);
e33_2 = k33t2*eps33s*c33d;
c33e = c33d*(1-(k33t2));

h33=sqrt(k33t2*c33d/eps33s)

```



## Programfiler brukt i FEMP U3.1

### femp-\_\_.inn

```
# Example file for a PZT-5A disk with diameter 37.523mm and thickness
10.0218 mm
# in vacuum. Calculations are made using modal analysis.
# Admittance and source sensitivity response is calculated for
# a limited frequency range.
# Losses are included using complex material constants.
# Resonance frequencies are also calculated (with losses)

# Set the variable 'thickness' to 10,022 mm
set
t,10.0218e-3
end

# Use materialfile 'material.dat'
materialfile
0
end

# The number of elements per wavelength is calculated at 400 kHz
meshingtype
elementspervavelength,400e3
end

# View mesh before starting simulation.
viewmesh
1
end

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

# Model a piezoelectric disk with radius 37,5 mm, thickness defined by the
# variable 't', 6 elements per wavelength in both radial and thickness
# direction, and of material no. 71.
piezodisk
37.523e-3,t,6,6,71
end

# Perform a modal analysis, in which resonance frequencies up to 400 kHz
are
# extracted. Resonance frequencies and eigenmodes are calculated with
# complex losses. 300 angir antal egenvektorer som reknes ut. Kan være 300-
800
modalanalysis
0,400e3,complex_loss,300
end

# Calculate admittance in steps of 100 Hz between 0 and 400 kHz.
admittance
0,100,400e3,normal
end
```

```

# Calculate source sensitivity response in steps of 100 Hz between 0 and
400 kHz
# using the hybrid FE/Rayleigh integral method.
sensitivityunloaded
0,100,400e3
end

# Calculate the eigenmodes of the piezoelectric disk (first line) and the
vibration of
# the disk using the mode superposition method for frequencies between
# 0 and 400 kHz with a frequency step of 100 Hz.
displacement
0,0,0,eigenmodes,no_average,-1,1,-1,1
0,100,400e3,normal,no_average,-1,1,-1,1
end

# Save admittance, sensitivity and resonancefrequencies as a text-file for
easy import to
# e.g. Excel.
savetxt
admittance,sensitivity,resonancefrequencies
end

# Save resonancefrequencies, admittance, sensitivity, eigenmodes and disk
displacement to
# Matlab-file 'disk_vacuum_modal_result.mat'.
save
resonancefrequencies,resonancefrequencies_issym,admittance,admittance_f,sen
sitivity,sensitivity_f,displacement,displacement_eigenmodes,displacement_el
ements,displacement_coord,displacement_f,displacement_elementtype,displacem
ent_eigenmodes_f
end

```

# Vedlegg 3

## Materialfiler brukt i FEMP

### material.mat

```
37      piezo      pzt5a ref målinger fra element 1 forenklet tap
# mechanical terms
 1.22740e+011 9.1034e+010 8.2098e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
 9.1034e+010 1.22740e+011 8.2098e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
 8.2098e+010 8.2098e+010 1.16250e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.10530e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.10530e+010
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.5853e+010
# coupling terms
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.22947e+001
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.22947e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-3.4665e+000 -3.4665e+000 1.271640e+001 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
# dielectric terms
 8.13040e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
 0.00000e+000 8.13040e-009 0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 8.27110e-009
# density and damping coefficients
 7.704800e+003 7.5e+001 2.0000e-002
# mechanical Q-factors
 5.34525e+01 5.04820e+01 5.21458e+01 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
 5.04820e+01 5.34525e+01 5.21458e+01 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
 5.21458e+01 5.21458e+01 9.613230e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
6.43176e+02
# piezoelectric Q-factors
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.0000e+002
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.0000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
 8.3452e+001 8.3452e+001 2.4222700e+001 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
# dielectric Q-factors
 7.5000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
 0.00000e+000 7.5000e+01 0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 1.485858e+002
# end of material data
38      piezo      pzt5a ref målinger fra element 1
# mechanical terms
```

```

1.22740e+011 9.1034e+010 8.2098e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
9.1034e+010 1.22740e+011 8.2098e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
8.2098e+010 8.2098e+010 1.16250e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.10530e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.10530e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.5853e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.22947e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.22947e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-3.4665e+000 -3.4665e+000 1.271640e+001 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
# dielectric terms
8.13040e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 8.13040e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 8.27110e-009
# density and damping coefficients
7.704800e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
5.34525e+01 5.04820e+01 5.21458e+01 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
5.04820e+01 5.34525e+01 5.21458e+01 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
5.21458e+01 5.21458e+01 9.613230e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
6.43176e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.50000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.50000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
8.3452e+000 8.3452e+000 2.4222700e+001 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
# dielectric Q-factors
7.5000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 7.5000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.485858e+002
# end of material data
39 piezo pzt5a ref Fardal resultatkonstanter (funnet fra
tilpasninger tabell 5.36)
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 1.64000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
40 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
50 piezo pzt5a ref 39 qc33opp fem present
# mechanical terms

```

```

1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 1.72200e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
51 piezo pzt5a ref 39 qc33opp tyve prosent
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 1.96800e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
52 piezo pzt5a ref 39 qc33 øket 50%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000

```

```

-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
53 piezo pzt5a ref 39, qc44 øket 100%, qc33 øket 50%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors

```



```

1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.50000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
54 piezo pzt5a ref 39 qc33 øket 50%, c44 red10%, qc44 øket
150%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.87500e+02 0.00000e+000
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
55 piezo pzt5a ref 39 qc33 øket 50%, c44 red 10%, qc44 øket
100%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.50000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
56 piezo pzt5a ref 55, qc44 øket 50%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data

```

```

57      piezo      pzt5a ref 55 c44 senket 11%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.68800e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
58      piezo      pzt5a ref 55, eps11 øket 5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.68800e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.97815e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.97815e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.50000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
59 piezo pzt5a ref 55 e15 senket 5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.50000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
60 piezo pzt5a ref 59 eps33 senket 5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.612000e-009
# density and damping coefficients

```

```

7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.50000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
        61      piezo      pzt5a ref 60 qeps33 øket 5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.61200e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.50000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.050e+002
# end of material data
        62      piezo      pzt5a ref 59 qc44 øket 150%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.89900e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 6.96000e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000

```



```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
63 piezo pzt5a ref 56 eps33 øket 5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.379724304579179e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.379724304579179e+010 7.379724304579179e+010 1.13000e+011 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data

```

```

        64      piezo      pzt5a ref 63 c13 øket 5%
# mechanical terms
 1.2140e+011 7.281776e+010 7.74871051980813795e+010 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
 7.281776e+010 1.2140e+011 7.74871051980813795e+010 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
 7.74871051980813795e+010 7.74871051980813795e+010 1.13000e+011
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
 9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
 0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
 7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
 1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
 4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
 3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
 1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
 5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
 0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
 0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
        65      piezo      pzt5a ref 63 c13 øket 1%
# mechanical terms
 1.2140e+011 7.281776e+010 7.453521547e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
 7.281776e+010 1.2140e+011 7.453521547e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
 7.453521547e+010 7.453521547e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
66 piezo pzt5a ref 63 c13 øket 2%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.52731879e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.52731879e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.52731879e+010 7.52731879e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
67 piezo pzt5a ref 63 c13 øket 1.5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.490420169e+010 7.490420169e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients

```

```

7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
      68      piezo      pzt5a ref 67 c44 senket 1%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.490420169e+010 7.490420169e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.08890e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.08890e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
        69      piezo      pzt5a ref 68 c11 senket 1%
# mechanical terms
1.20186e+011 7.281776e+010 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.20186e+011 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.490420169e+010 7.490420169e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.08890e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.08890e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.368412e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.23000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000

```

```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
70 piezo pzt5a ref 67 e15 senket 1%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.490420169e+010 7.490420169e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.21770e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.21770e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data

```

```

71      piezo      pzt5a ref 67 e15 senket 5%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.490420169e+010 7.490420169e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
72      piezo      pzt5a ref 71 qe15 øket 2%
# mechanical terms
1.2140e+011 7.281776e+010 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.281776e+010 1.2140e+011 7.490420169e+010 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000
7.490420169e+010 7.490420169e+010 1.13000e+011 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000

```



```

0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.11000e+010
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
2.429112e+010
# coupling terms
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.16850e+001 0.00000e+000
0.00000e+000
-4.84491652814358e+000 -4.84491652814358e+000 1.48000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric terms
9.5030e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 9.5030e-009 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 7.30800e-009
# density and damping coefficients
7.71000e+003 9.99000e+002 9.99000e+002
# mechanical Q-factors
1.773557990405095e+02 4.694193738778428e+02 3.972653483372656e+02
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
4.69419e+02 1.773557990405095e+02 3.972653483372656e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
3.972653483372656e+02 3.972653483372656e+02 2.46000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 2.25000e+02 0.00000e+000
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 7.50000e+01
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000
1.4603178741866665e+02
# piezoelectric Q-factors
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.96000e+002
0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 0.00000e+000 1.96000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000
1.656427656060534e+002 1.656427656060534e+002 2.00000e+002 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000
# dielectric Q-factors
5.00000e+01 0.00000e+000 0.00000e+000
0.00000e+000 5.00000e+001 0.00000e+000
0.00000e+000 0.00000e+000 1.000e+002
# end of material data
10000 fluid water
1.00000E+03 2.25000E+09 0.00000E+00 0.00000E+00
10001 fluid paraffin-selfridge, oil-paraffin(1)
0.83500E+03 1.68369E+09 0.00000E+00 0.00000E+00
10002 fluid heavyaluminiumlike
2.70000E+03 1.07163E+11 0.00000E+00 0.00000E+00
10100 fluid air
1.20500E+00 1.41767E+05 0.00000E+00 0.00000E+00
10101 fluid air20grader
1.21000E+00 1.42355e+05 0.00000E+00 0.00000E+00

```