

# Måling av lavfrekvent utstråling fra scenegulv

**Steffen Eidal Wiken**

Master i elektronikk

Oppgaven levert: Juni 2009

Hovedveileder: Ulf R Kristiansen, IET

Biveileder(e): Knut Guettler, Norges musikkhøgskole



# Oppgavetekst

På grunn av sine relativt små dimensjoner er utstrålingen fra kontrabassens kropp svært begrenset i frekvensområdet under Helmholtzfrekvensen (ca 60 Hz), mens moderne orkesterbasser vanligvis har strenger stemt helt ned til B0 (30.9 Hz). Om disse laveste frekvensene fysisk skal kunne nå tilhørerne må det derfor skje via gulvet, hvor relativt store vibrasjoner kan påvises rundt kontrabassens pigg. Hensikten med denne undersøkelsen er å klarlegge denne energiens videre skjebne.

Følgende vil derfor være ønskelig:

- Å måle overføring fra vibrerende scenegulv lydtrykk til sal i noen saler med ulik gulvkonstruksjon
- Å eksitere gulvet over bjelker og mellom bjelker.
- Å kartlegge hvor stor del av scenegulvet som kan betraktes som aktivt ved punkteksitasjon (for eksempel amplituder  $> -10$  dB rel. eksitasjonspunktet) og formen på flaten.
- Å sammenlikne overføring fra gulvet med overføringen fra en lukket podiekasse med begrenset overflate.
- Å finne egnede matematiske uttrykk for beregning av gulvets utstråling/absorpsjon i det aktuelle frekvensområdet (minst 30 til 60 Hz).

Oppgaven gitt: 15. januar 2009

Hovedveileder: Ulf R Kristiansen, IET



# Sammendrag

Kontrabassens laveste egenfrekvens er rundt 60 Hz, men enkelte kontrabasser kan spille toner helt ned til 30,8 Hz. Hvis det skal utstråles lyd i området 30 til 60 Hz må det derfor i hovedsak foregå ved overføring av energi gjennom kontrabassens pigg til scenegulv. Guettler et al. [4] har påvist at overføringen fra kontrabass til scene er størst ved god impedanstilpasning, noe som i frekvensområdet 30 til 60 Hz vil si ettergivende underlag.

Denne oppgaven tar i den sammenheng for seg lavfrekvent lydutstråling fra vibrerende scenegulv. Det ble gjennomført målinger av vibrasjoner på scenegulv og målinger av lydtrykket i sal ved eksitering av scenegulv. Det er videre gjennomført vurderinger med grunnlag i målingene og gjeldende teori.

Målingene indikerer at bølgelengden til scenedekker av tre i området 30 til 60 Hz har kortere bøyningsbølgelengde enn bølgelengden i luft, noe som tilsier at dette området ligger under grensefrekvens og dermed har minimal utstråling fra utbredende bølger og resonanser. Videre indikerer målingene at det finnes et felt rundt eksitasjonspunktet med kraftig utsving og videre målinger indikerer at dette feltet kan være hovedkilden til utstrålt lyd fra scenegulv i området 30 til 60 Hz. Målinger av lydtrykk i saler viser at det finnes forsterkning av lavere frekvenser, men at det er frekvensene over 60 Hz, sannsynligvis utstrålt fra kontrabassen, som dominerer lydtrykket i rommet.

Da dette er en kompleks problemstilling med mange innvirkende faktorer bør videre arbeid inkludere undersøkelser for å underbygge eller motbevise det som er vurdert ut fra funnene i denne oppgaven. Det burde også undersøkes hvilken innvirkning hulrommet under scener og bruk av klangkasser har å si for utstråling av lavfrekvent lyd.



# Forord

Denne masteroppgaven er en del av masterstudiet innen elektronikk ved NTNU. Oppgaven er gitt av Knut Guettler, professor i kontrabass ved Norges musikkhøgskole. Arbeidet er gjennomført i Trondheim våren 2009 og ferdig rapport levert inn i juni 2009.

Det er mange som i større eller mindre grad har bidratt med framdriften i oppgaven, men jeg vil spesielt takke Knut Guettler, Ulf Kristiansen og Peter Svensson for god veiledning og interessante diskusjoner. En takk rettes også til Håkan Henriksen som stilte opp med sin kontrabass under målingene. Frimurerlogen og Dokkhuset fortjener en takk for utlån av sal med scene.

Trondheim 2009

Steffen Eidal Wiken





# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>2</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	2
1.2	Oppgavens formål . . . . .	2
1.3	Tidligere arbeid . . . . .	2
1.4	Rapportens oppbygning . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Teoretisk bakgrunn</b>	<b>5</b>
2.1	Lydutstråling fra plater . . . . .	5
2.1.1	Bøyningsbølger . . . . .	5
2.1.2	Stående bølger . . . . .	5
2.1.3	Lydutstråling fra en enkelt bøyningsbølge på en uendelig stor plate	6
2.1.4	Grensefrekvens . . . . .	7
2.1.5	Lydutstråling fra plater med endelige dimensjoner . . . . .	7
2.1.6	Lydutstråling ved punktkraft . . . . .	9
2.2	Schröders grensefrekvens . . . . .	10
2.3	Diskret Fourier transformasjon . . . . .	10
2.3.1	Fast Fourier transformasjon . . . . .	10
2.4	A-vekting . . . . .	11
2.5	Akselerometer . . . . .	12
2.6	Shaker . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Målinger</b>	<b>13</b>
3.1	Salene . . . . .	13
3.1.1	Logen . . . . .	13
3.1.2	Dokkhuset . . . . .	14
3.2	Måling av vibrasjoner på scenegulv . . . . .	15
3.2.1	Logen . . . . .	16
3.3	Måling av lydutstråling fra vibrerende scene . . . . .	18
3.3.1	Logen . . . . .	19
3.3.2	Dokkhuset . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>25</b>
4.1	Vibrasjoner på scenegulv . . . . .	25

4.1.1	Logen . . . . .	25
4.2	Lydutstråling fra vibrerende scene . . . . .	32
4.2.1	Logen . . . . .	32
4.2.2	Dokkhuset . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>38</b>
5.1	Vibrasjoner på scene . . . . .	38
5.2	Lydtrykk i rommet . . . . .	39
5.3	Total vurdering . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>44</b>

# Figurer

1.1	Overføringsfunksjon mellom påført kraft og lydtrykk i rommet ved diverse målinger i Berwald hall. Hentet fra Guettler et al. [4]. . . . .	3
2.1	Til venstre: Hjørnemodi. Vil kun gi utstråling fra de grå feltene i hjørnene. Til høyre: Kantmodi. Vil kun gi kantutstråling fra de grå feltene. . . . .	8
2.2	Figuren viser beregnet strålingsfaktoren for en aluminiumsplate ved forskjellige størrelser. Hentet fra Vigran [10]. . . . .	8
2.3	Figuren viser med de grå feltene hvor utstrålingen vil komme fra på en punkteksitert plate. Feltene i hjørnene er på grunn av resonant utstråling og sirkelen i midten på grunn av nærfeltet rundt eksitasjonspunktet . . .	9
2.4	Figuren viser A-vektingskurven og C-vektingskurven. Hentet fra Kinsler et al. [5] . . . . .	11
2.5	Akselerometer av typen 4526 fra Brüel & Kjær. . . . .	12
2.6	Shaker av typen 4809 fra Brüel & Kjær. . . . .	12
3.1	Skisse av scenen i Logen sett ovenfra. Den svarte sikelen på midten indikerer shakerens posisjon under målingene . . . . .	14
3.2	Skisse av det som kunne observeres av sceneoppbygningen i Logen. Øverst et parkettlag, videre et tynt filtlag før det kommer to trelag. Alt lå på en stålramme. . . . .	15
3.3	Skisse av måleoppsett for scenevibrasjoner . . . . .	17
3.4	Skisse av mikrofonplasseringene som ble brukt i lydtrykksmålingene i Logen	20
3.5	Skisse av salen i Dokkhuset sett ovenfra. Skissen viser også mikrofonen og kontrabassens posisjon under målingene. . . . .	22
3.6	Skisse av måleoppsett for lydtrykksmålinger i Dokkhuset . . . . .	22
3.7	Eksempel på vinduseffekt der energien som finnes i frekvensen 30,8 Hz har fordelt seg over et bredere bånd på ca 4-5 Hz. . . . .	24
4.1	Frekvensrespons for alle målepunktene på tatt på langs i Logen. . . . .	26
4.2	Frekvensrespons for alle målepunktene på tatt på tvers i Logen. . . . .	26
4.3	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 30 Hz på tvers av scenen. . . . .	27
4.4	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 60 Hz på tvers av scenen. . . . .	28

4.5	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 38,8 Hz på tvers av scenen. . . . .	28
4.6	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 84,5 Hz på tvers av scenen. . . . .	29
4.7	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 30 Hz på langs av scenen. . . . .	30
4.8	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 35 Hz på langs av scenen. . . . .	30
4.9	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 60 Hz på langs av scenen. . . . .	31
4.10	Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 80 Hz på langs av scenen. . . . .	31
4.11	Svart kurve viser midlet frekvensrespons i rommet og rød kurve frekvensrespons av fritthengende shaker. Grafen viser relativt lydtrykk i dB som funksjon av frekvens. . . . .	32
4.12	Differansen mellom når shakeren satte scenen i vibrasjon og shakeren hang fritt. Relativt lydtrykk i dB som funksjon av frekvens. . . . .	33
4.13	Punktplott av alle grunntoner, 2. og 3. harmoniske som viser overføring mellom akselerasjon på kontrabassen og lydtrykk i rommet . Plottet viser bare frekvensene under 100 Hz. Blått plott viser resultat fra målinger med piggen rett i gulvet, grønt med knott og rødt med isolasjon. . . . .	34
4.14	Tilsvarende som figur 4.13, men her er A-vekting forsøkt flatet ut ved å justere verdiene fra mikrofonmålingene. . . . .	34
4.15	Viser differanse mellom målingene med pigg og målingene med knott i blå kurve. I svart kurve viser differansen mellom målingene med pigg og målingene med isolerende materiale. . . . .	35
4.16	Lineær regresjon av målingene i Dokkhuset, 30-50 Hz. Blå linje er pigg, grønn knott og rød isolert. . . . .	36
4.17	Linjær regresjon av målingene i Dokkhuset, 55-100 Hz. Blå linje er pigg, grønn knott og rød isolert. . . . .	36
4.18	Lineær regresjon av målingene i Dokkhuset, 55-300 Hz. Blå linje er pigg, grønn knott og rød isolert. . . . .	37
4.19	Frekvensresponsen til lydtrykket i rommet for tonen B0 (30,8 Hz). I figuren kan man se grunntone, 2., 3. og 4. harmoniske. . . . .	37
5.1	Dempkurve hentet fra [2]. Viser grad av overført kraft som funksjon av forholdet mellom frekvens og dempematerialets resonansfrekvens. . . . .	41

# Tabeller

3.1	Utstørsliste for målingene i Logen . . . . .	16
3.2	Utstørsliste for målingene i dokkhuset . . . . .	21

# Definisjoner og forkortelser

<i>Pigg el. pinne</i>	Stålpinne som sitter under kontrabassen
<i>Kropp</i>	Kontrabassens klangkasse
<i>Stol</i>	Del av kontrabassen som stikker ut fram på kroppen som strengene er spent over
<i>Hals</i>	Kontrabassens lange tynne arm mellom kroppen og der strengene er festet
<i>Sinus-sweep</i>	Generering av ren sinustone med gradvis økende frekvens
<i>Matlab</i>	Kombinert beregnings- og programmeringsverktøy spesielt egnet for matriser
<i>WinMLS</i>	Akustisk måleverktøy for PC
$\omega$	Vinkelfrekvens gitt av $\omega = f \cdot 2\pi$ , der f er frekvens
$k$	Bølgetall gitt av $k = \frac{\omega}{c}$ , der $\omega$ er vinkelfrekvensen og c er lydhastigheten
$c_0$	Lydhastigheten i luft. Ved beregning er 344 m/s benyttet
<i>DFT</i>	Diskret Fourier Transformasjon
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformasjon

# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Den laveste egenfrekvensen til en kontrabass ligger rundt 60 Hz [1], noe som i utgangspunktet fører til minimal lydutstråling fra kontrabassen av frekvenser under denne. Moderne orkesterkontrabasser har strenger som er stemt helt ned til 30.9 Hz (B0) [7], noe som gjør at ikke hele kontrabassens frekvensspenn er utstrålt fra selve instrumentet. For at frekvensene i området 30-60 Hz skal utstråles må det i stor grad skje gjennom energi-overføring til og utstråling fra andre strukturer, for eksempel scenegulv. Det er i dag sprikende kunnskap om hvilke scenekonstruksjoner som gir den beste effekten og om det i det hele tatt er mulig å få noen vesentlig utstrålt effekt i det ønskede frekvensområdet.

### 1.2 Oppgavens formål

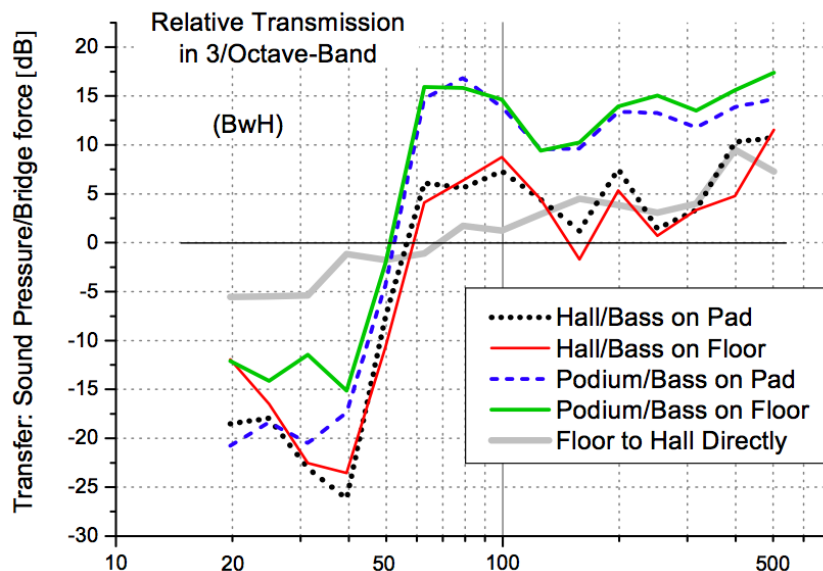
Denne oppgaven har lagt vekt på å se i hvilken grad scener kan påvirke lydtrykket i et rom, spesielt i det nevnte området 30-60 Hz. Det er også blitt sett på hvordan vibrasjoner opptrer på et eksitert scenegulv, noe som videre kan si noe om grunnen til eventuelle påvirkninger i lydtrykk i rommet. I oppgaven er det valgt å legge vekt på gjennomføring av målinger. Det er også presentert kjent teori som kan være relevant med tanke på problemstillingen og målingene som er gjort. I forhold til gitt oppgavetekst er det ikke prioritert eller vært disponibelt tid til å undersøke klangkasser.

### 1.3 Tidligere arbeid

Denne oppgaven er en videreføring av Guettler, Buen og Askenfelts tidligere arbeid der det har blitt sett på hastighetsoverføringen fra kontrabassens pinne til scenegulv [3, 4]. Dette

har i hovedsak blitt sett på ved å måle impedansen på endepinnen til kontrabassen og impedansen til gulvet. Ved hjelp av disse impedansene har overføringsfunksjonen mellom pinne og gulv blitt beregnet. Arbeidet viser at hastighetsoverføringen til gulvet blir størst når det er en god impedanstilpasning mellom kontrabass og gulv. Målingene viste at for frekvensområde 30-60 Hz gjelder dette i størst grad for ettergivende partier av gulv, som for eksempel mellom støttende bjelker eller på gulvheiser. Enkelte av de ettergivende gulvene hadde også en grad av forsterkning i overføringen. Stive gulv og gulvpartier, for eksempel rett på støttende bjelker, gir en vesentlig svakere overføring av energi til gulvet i frekvensområdet 30-60 Hz.

Det har også blitt gjennomført målinger for å se på overføringsfunksjonen mellom kontrabassen på scenegulv og lydtrykket i rommet. Dette ble gjennomført i Berwald hall i Stockholm. Resultatene fra disse kan sees i figur 1.1. Den grå linjen viser overføringen direkte fra scene til sal og de fire andre fra kontrabass til sal. Uten å gå i detaljer indikerer målingene et tydelig skille i lydtrykk rundt 60 Hz ved at lydtrykket over 60 Hz er omtrent 30 dB høyere enn lydtrykket under. Dette gjelder i stor grad både i nærfelt og ute i rommet, og både når kontrabassen står på stivt og ettergivende del av gulvet. Da 60 Hz er kontrabassens laveste egenfrekvens tyder hoppet på at det er utstrålingen fra kontrabassen som fører til hoppet, og at det dermed denne utstrålte lyden som dominerer lydbildet.



Figur 1.1: Overføringsfunksjon mellom påført kraft og lydtrykk i rommet ved diverse målinger i Berwald hall. Hentet fra Guettler et al. [4].



## 1.4 Rapportens oppbygning

Rapporten er bygget opp på følgende måte:

- Kapittel 2 - Her presenteres den teoretiske bakgrunnen for oppgaven. Det blir presentert både teori som er relevant for selve problemstillingen og relevant teori brukt ved gjennomføring av målinger.
- Kapittel 3 - I dette kapitlet forklares hvilke målinger som er gjort og hvordan de er gjennomført.
- Kapittel 4 - Her presenteres resultatene fra målingene
- Kapittel 5 - Dette kapitlet diskuterer resultatene fra målingene og sammenligner med kjent teori. Her presenteres også forslag til videre arbeid.
- Kapittel 6 - I dette kapitlet kommer arbeidets konklusjon.

# Kapittel 2

## Teoretisk bakgrunn

I dette kapitlet blir relevant teoretisk bakgrunn for oppgaven presentert. Alle delkapitlene referer fra Vigran [10] der annet ikke er spesifisert.

### 2.1 Lydutstråling fra plater

En plate som er satt i svingninger vil i større eller mindre grad fungere som en lydutstråler. I denne sammenheng kan en plate defineres som et element der den ene dimensjonen er mye mindre enn de to andre. Dette delkapitlet vil se på hvilke faktorer og parametre som bestemmer hvor effektiv en plate er som lydutstråler når den er satt i vibrasjoner.

#### 2.1.1 Bøyningsbølger

Bølgene som dominerer når plater og bjelker er satt i vibrasjoner er bøyningsbølger. I bøyningsbølger er partikkelhastigheten loddrett på forplantningshastigheten, noe som kan føre til trykkvariasjoner i det omgivende medium. Dette gjør at eksitering av bøyningsbølger kan gi en effektiv lydutstråling.

#### 2.1.2 Stående bølger

Når en lydbølge treffer en flate, eller mer generelt et nytt medium, vil en del av bølgen videreføres inn i det nye mediet mens en del vil reflekteres. Hvis man da har to flater som står overfor hverandre vil det oppstå refleksjoner fram og tilbake mellom flatene. Ved enkelte frekvenser vil dette føre til en svingetilstand der man får en stillestående bølge mellom disse flatene. En slik stående bølge er en resonant svingning. Stående bølger vil typisk oppstå mellom vegger i rom eller mellom endene på vibrerende plater. Resonansene eller egenfrekvensene man vil få fra en gitt plate kan beregnes ved hjelp av

$$f(n_x, n_y) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{m}} \left[ \left( \frac{n_x}{a} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{b} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

, hvor  $B$  er bøyestivhet per lengdeenhet,  $m$  er masse per flateenhet,  $a$  og  $b$  platens lengde og bredde og  $n_x$  og  $n_y$  er modetallene.

### 2.1.3 Lydutstråling fra en enkelt bøyingsbølge på en uendelig stor plate

Utstrålingen man får fra en teoretisk uendelig stor plate sier noe om hva som er viktig for utstråling fra en virkelig plate. Man har i dette tilfellet en plan plate med uendelig utstrekning der det utbres en enkel plan bøyingsbølge med en gitt bøyingshastighet. Man er da interessert i lydtrykket i et tenkt punkt  $p(x, y)$  i rommet. Dette lydtrykket er gitt av

$$p(x, y) = \frac{\rho_0 c_0 \hat{u}}{\sqrt{1 - \frac{k_B^2}{k^2}}} \cdot e^{j(\omega t - K_B x)} \cdot e^{-j\sqrt{k^2 - k_B^2} y} \quad (2.2)$$

Denne ligningen viser at det er forholdet mellom bølgelengden  $\lambda_B$  til bøyingsbølgen i platen og bølgelengden  $\lambda$  i luft som i stor grad bestemmer hvor mye utstrålt effekt man får fra en plate. Er  $\lambda > \lambda_B$ , altså at bølgetallet  $k_B > k$ , vil lydtrykket avta eksponentielt og man vil bare få et nærfelt som er eksponentielt avtagende. Dette vil i praksis si at man får så og si ingen utstråling til omgivelsene.

Er derimot  $\lambda_B > \lambda$ , altså at  $k > k_B$ , vil lydtrykket øke med økende forhold  $\frac{\lambda_B}{\lambda}$ , eller  $\frac{k}{k_B}$ . Ved dette tilfellet får man det man kaller sportilpasning. Sportilpasning vil si at bølgelengden i det omgivende medium, her luft, blir platebølgen projisert i bølgens retning.

Ved hjelp av det gitte lydtrykket i punktet  $p$  kan man finne strålingsfaktoren fra en plate. Strålingsfaktoren er en måte å karakterisere hvor effektivt en flate utstråler lyd. Strålingsfaktoren fra en plate er gitt av

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{k_B^2}{k^2}}}. \quad (2.3)$$

som gjelder for  $k > k_B$ . Ligningen viser at for økende  $k$ , eller økende bøyingsbølgelengde i platen i forhold til bølgelengden i luft, vil strålingsfaktoren gå mot 1. Dette vil i praksis si at all effekt stråles ut.

### 2.1.4 Grensefrekvens

Grensefrekvensen er frekvensen der bølgelengden i platen er den samme som i luft. Under grensefrekvensen er bølgelengden i platen kortere enn i luft. Over er den lengre, noe som gjør grensefrekvensen til den laveste frekvensen der man kan få sportilpasning.

For en homogen plate er grensefrekvensen gitt av

$$f_g \approx \frac{c_0^2}{1.8 \cdot c_L \cdot h} \quad (2.4)$$

Her er  $c_L$  den longitudinale fasehastigheten i materialet og  $h$  er tykkelsen på platen.

### 2.1.5 Lydutstråling fra plater med endelige dimensjoner

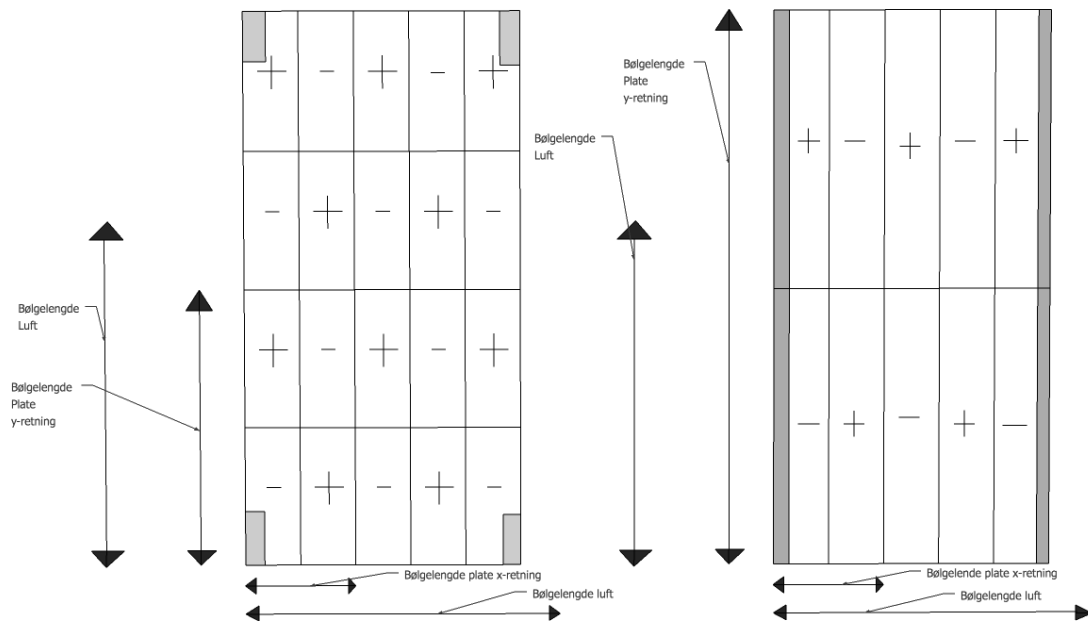
Å beregne lydutstråling fra en plate med endelige dimensjoner er komplisert og krever informasjon om både materialer, dimensjoner og eksitasjonsform.

I de fleste tilfeller vil en plate eksiteres av en bredbåndet kilde der utstrålingen vil bestemmes av egenmodiene til platen og bølgelengden til disse i forhold til bølgelengde i luft. I motsetning til den uendelige platen har man her to dimensjoner, og det vil derfor kunne oppstå tre forskjellige forhold. Disse kalles flatemodi, hjørnemodi og kantmodi. Flatemodi oppstår når bølgelengdene til resonansene i begge retninger er lengre enn bølgelengden i luft. Dette gir en effektiv stråling som går mot en strålingsfaktor på 1 over hele flaten.

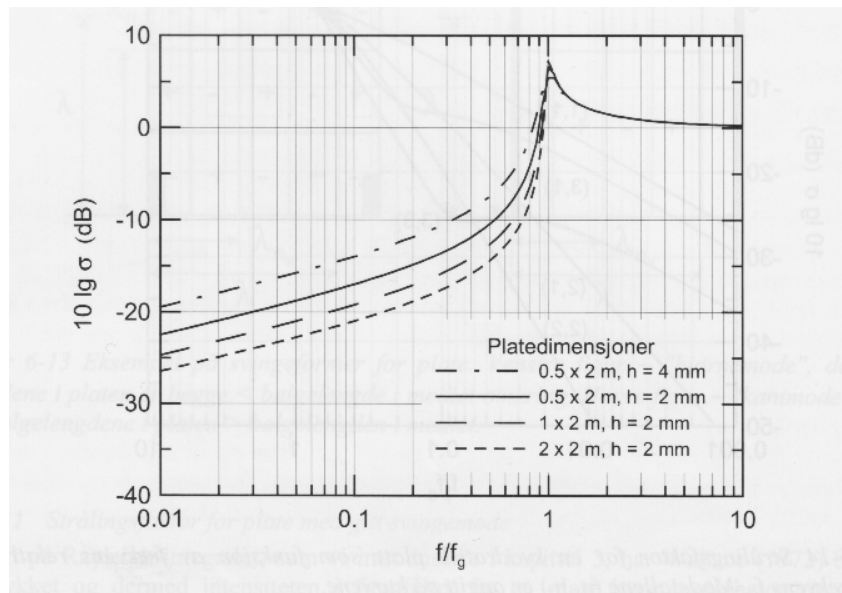
Har derimot resonansene kortere bølgelengder enn bølgelengden til luft i begge retninger får man hjørnemodi. Dette er illustrert til venstre i figur 2.1, der det er eksemplifisert med en svingemodi med modetall 5,4. Der kan man se på + som i motfase med – og at delene dermed svinger i motfase med en avstand mindre enn bølgelengden i luft. Dette gjør at platen kan betraktes som en multipol der de positive og negative delene utligner hverandres utstråling. Men får dermed kun utstråling fra de grå feltene i hjørnene.

Ved det siste tilfellet, kantmodi, er det kortere bølgelengde enn i luft i den ene retningen og lengre enn i luft i den andre. Dette er illustrert ved en svingemodi med modetall 5,2 til høyre i figur 2.1, der man ser, som ved hjørnemodi, at de positive bidragene blir kansellert av negative. Ved kantmodi får man utstråling ved kantene som vist av de grå feltene.

Figur 2.2 kan gi et bilde på hvordan strålingsfaktoren fra en plate vil være. Strålingsfaktoren er her gitt som en funksjon av forholdet mellom gitt frekvens og grensefrekvens. Plottene er beregnet ut i fra et uttrykk funnet med tanke på å finne en frekvensmidlet strålingsfaktor ved eksitasjon fra en bredbåndet kilde, beregnet for en plate av stål eller aluminium. Det kan i figuren sees fire forskjellige tilfeller av strålingsfaktorer ved forskjellige platedimensjoner. Det som generelt kan sees ut av figuren er at frekvenser over grensefrekvensen som tidligere nevnt alltid har en strålingsfaktor på minst 1. Videre viser figuren at for frekvenser under grensefrekvensen vil strålingsfaktoren kunne anses som mye mindre enn 1.



Figur 2.1: Til venstre: Hjørnemodi. Vil kun gi utstråling fra de grå feltene i hjørnene. Til høyre: Kantmodi. Vil kun gi kantutstråling fra de grå feltene.



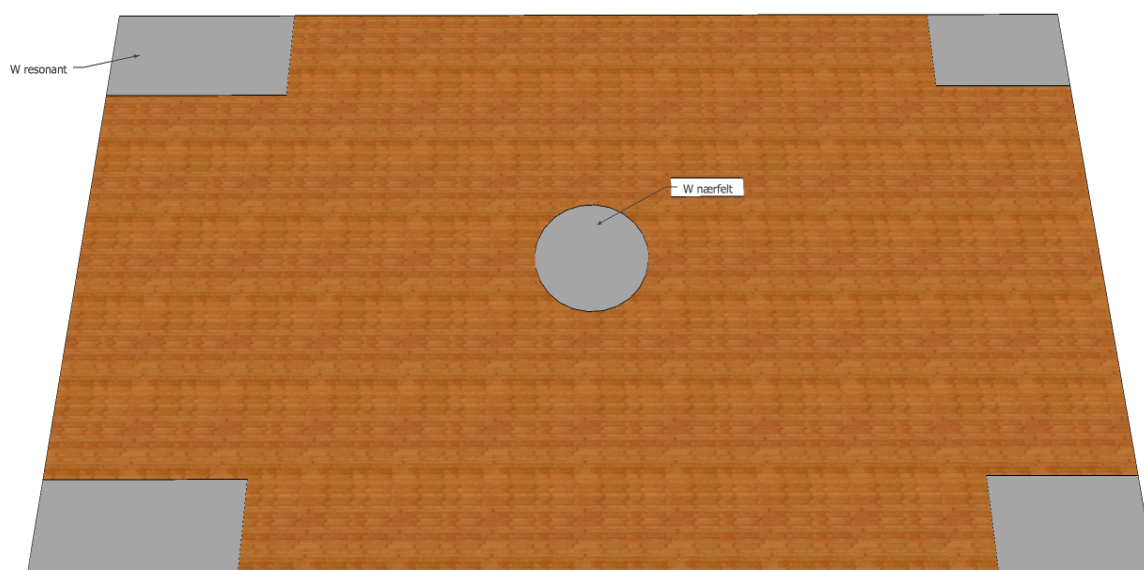
Figur 2.2: Figuren viser beregnet strålingsfaktoren for en aluminiumsplate ved forskjellige størrelser. Hentet fra Vigran [10].

### 2.1.6 Lydutstråling ved punktkraft

Den akustiske effekten man får ved å eksitere en plate med punktkraft kan skrives som

$$W_{tot} = W_{naerfelt} + W_{resonant} = W_{naerfelt} + \rho_0 c_0 S \langle \tilde{u}^2 \rangle \sigma \quad (2.5)$$

Den totale utstrålte effekten består av summen av effekten fra et vibrerende nærfelt rundt eksitasjonspunktet og effekt man får fra resonansene, illustrert i figur 2.3.



Figur 2.3: Figuren viser med de grå feltene hvor utstrålingen vil komme fra på en punkteksitert plate. Feltene i hjørnene er på grunn av resonant utstråling og sirkelen i midten på grunn av nærfeltet rundt eksitasjonspunktet

Effekten fra resonansene bestemmes av strålingsfaktoren vist i delkapitel 2.1.5 og kvadratet av den midlede hastigheten på platen. Effekten fra nærfeltet er bestemt av

$$W_{naerfelt} = \frac{\rho_0 \tilde{F}^2}{2\pi c_0 m^2}, k \ll k_B \quad (2.6)$$

hvor altså bølgetallet i luft må være mindre enn bølgetallet til bøyingsbølgene. Dette betyr at uttrykket bare gjelder under grensefrekvensen. Man kan se av uttrykket at denne effekten er bestemt av kvadratet av midlet påtrykket kraft  $\tilde{F}$  og kvadratet til masse per flateenhet  $m$ . En slutning man kan dra av ligning 2.6 og 2.5 er at siden den resonante delen inneholder strålingsfaktoren vil denne dominere over grensefrekvensen. Under grensefrekvensen vil det vibrerende nærfeltet rundt eksitasjonspunktet i større grad bidra med effekt.

## 2.2 Schröders grensefrekvens

I romakustisk sammenheng brukes ofte en diffusfeltmodell ved for eksempel måling av lydtrykk. Ved diffusfelttilnærmingen trenger man i utgangspunktet ikke å ta hensyn til hvor i rommet man plasserer for eksempel en mikrofon ved måling, da lydtrykket anses som tilnærmet likt i hele rommet. Denne diffusfelttilnærmingen gjelder bare for frekvenser i områder med en viss modetetthet. Nedre grense for bruk av diffusfelt kalles Schröders grensefrekvens og finnes ved hjelp av

$$f_{schroder} = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.7)$$

der  $T$  er gjennomsnittlig etterklangstid i rommet og  $V$  er volumet. Måler man i frekvensområdet under denne frekvensen kan man altså ikke anta at lydtrykket er likt i hele rommet, og dermed heller ikke anta at måling i én posisjon gir et korrekt resultat som gjelder for hele rommet.

## 2.3 Diskret Fourier transformasjon

Diskret Fourier transformasjon (DFT) transformerer ved beregning en funksjon eller et signal fra tidsdomenet til frekvensdomenet og brukes for å kunne se frekvensinnholdet til funksjonen eller signalet. Funksjonen eller signalet må være diskret og ha et begrenset antall verdier. Å beregne DFT kan i utgangspunktet gjøres formelen

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.8)$$

der  $x$  er signalet i tidsdomenet,  $n$  er samplenummer,  $N$  er antall samples signalet består av og  $X(k)$  der  $k=0,1,2,\dots,N-1$  er resultat av DFT. [8]

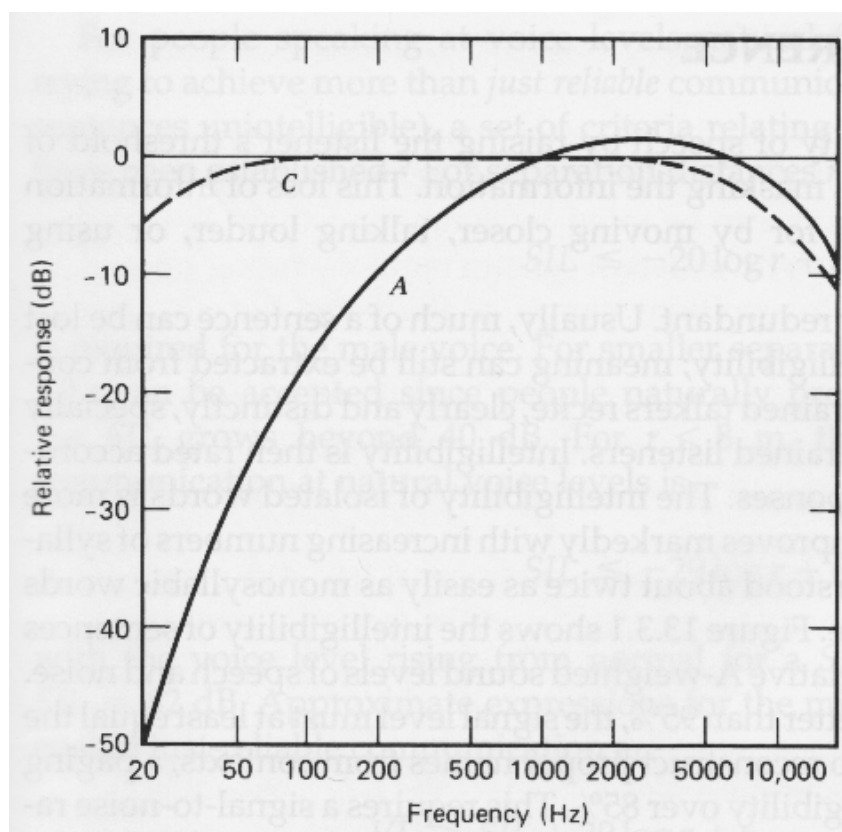
### 2.3.1 Fast Fourier transformasjon

Fast Fourier transformasjon (FFT) er en algoritme brukt for å beregne DFT. Med FFT får man gjennomført DFT-beregningen med nøyaktig samme utfall, men med en raskere beregningstid. Beregning av DFT ved hjelp av FFT gjøres ofte enkelt ved ferdig lagde funksjoner i programvare, som for eksempel i denne oppgaven der det gjøres i Matlab.

Ved beregning av FFT er det viktig å ha en lang nok signalsekvens for å få god oppløsning på resultater. Hvis man har en funksjon som består av et lite antall samples kan man gjøre dette ved å legge til et ønsket antall nuller. Dette vil øke signallengden uten å tilføre ny informasjon. [8]

## 2.4 A-vekting

Menneskets hørsel har ikke en flat frekvensrespons, men forskjellig sensitivitet ved forskjellige frekvenser. Det finnes derfor filtre som kan omforme en flat respons til en respons som i større grad representerer det som i realiteten oppfattes av menneskets hørsel.



Figur 2.4: Figuren viser A-vektingskurven og C-vektingskurven. Hentet fra Kinsler et al. [5]

Denne sensitiviteten varierer med lydtrykket og det finnes derfor flere filtre. De to mest brukte kalles A-vekting og C-vekting. Kurvene for A-vekting og C-vekting kan sees i figur 2.4. A-vektingen brukes mest ved lave til middels lydtrykk og C-vekting fra middels og oppover.

A-vektingskurven kan representeres ved følgende funksjoner

$$R_A(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20.6^2)\sqrt{(f^2 + 107.7^2)(f^2 + 738.9^2)(f^2 + 12200^2)}} \quad (2.9)$$

$$A = 2.0 + 20 \log_{10}(R_A(f)) \quad (2.10)$$



## 2.5 Akselerometer

Et piezoelektrisk akselerometer er en transduser som brukes til å måle vibrasjoner. Transduseren genererer elektriske signaler som er proporsjonale med den mekaniske vibrasjonen. Et akselerometer burde ha en vekt som er ti ganger mindre enn det vibrerende elementet det er festet på for at akselerometeret ikke skal påvirke målingene i for stor grad. Ved bruk av akselerometer festes det gjerne til den flaten man ønsker å måle akselerasjon på ved bruk av bivoks. Figur 2.5 viser et typisk akselerometer, her representert ved typen 4526 fra Brüel & Kjær. Datablad for benyttede akselerometere kan sees i appendiks F. [6]



Figur 2.5: Akselerometer av typen 4526 fra Brüel & Kjær.

## 2.6 Shaker

En shaker, også kjent som for eksempel rystebord eller vibration exciter, er en anretning laget for eksitere vibrasjoner. Det finnes flere typer shakere men en typisk model kan sees i figur 2.6, type 4809 fra Brüel & Kjær. Modellen eksitere vibrasjoner ved hjelp av en membran som sitter på toppen. Data for benyttet shaker kan sees i appendiks D.



Figur 2.6: Shaker av typen 4809 fra Brüel & Kjær.

# Kapittel 3

## Målinger

Dette kapitlet beskriver målingene som er gjennomført og metodene som er brukt. Målingene har hatt to hovedformål. Det første var å se på lydtrykket som oppstår i saler som følge av at scenen er satt i vibrasjon. Det andre var å se på vibrasjonsmønsteret som oppstår på scenegulvet.

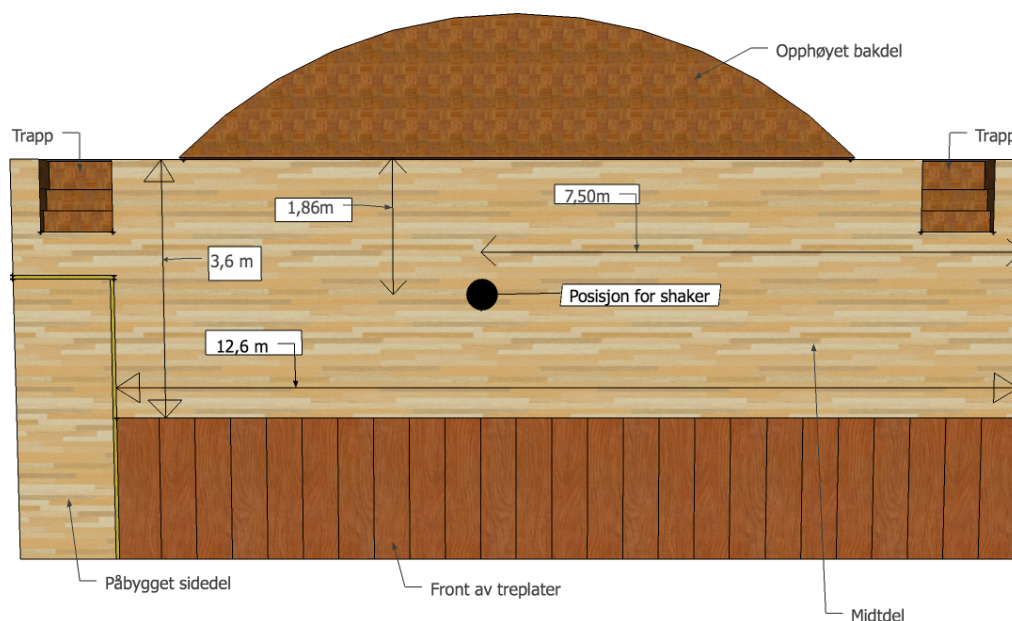
### 3.1 Salene

Målingene ble gjennomført i to saler i Trondheim, Dokkhuset og storsalen i Logen. Disse salene ble valgt på bakgrunn av at de er to antatt gode konsertsaler og at det var velvillighet med tanke på utlån.

#### 3.1.1 Logen

Logen i Trondheim er bygget tidlig på 1900-tallet, men når scenen slik den er i dag ble fullført er det ikke funnet noen kilder på. Salen går for å ha veldig gode akustiske forhold for orkestre og var tidligere tilholdssted for Trondheim symfoniorkester. Salen brukes fortsatt mye til kammerkonsserter, og blir blant annet benyttet under Trondheim Kammermusikkfestival.

Storsalen i Logen har dimensjoner på cirka 20x15x5 meter. Som man kan se i figur 3.1 består scenen av tre hoveddeler. Bakerst er det en opphøyet bueformet del, i midten en rektangulær parkettdekket del og fremst en påbygget del med tykke treplater for å få en større scene. Det er også en liten rektangulær del lengst frem til venstre som ikke er i fysisk kontakt med resterende deler av scenen, men kun forbundet med en skjøt. I tillegg finnes det to trapper ned til hvert sitt bakrom. Målingene ble valgt gjennomført på midtdelen siden den hadde størst sammenhengende overflate samtidig som den hadde rette kanter.



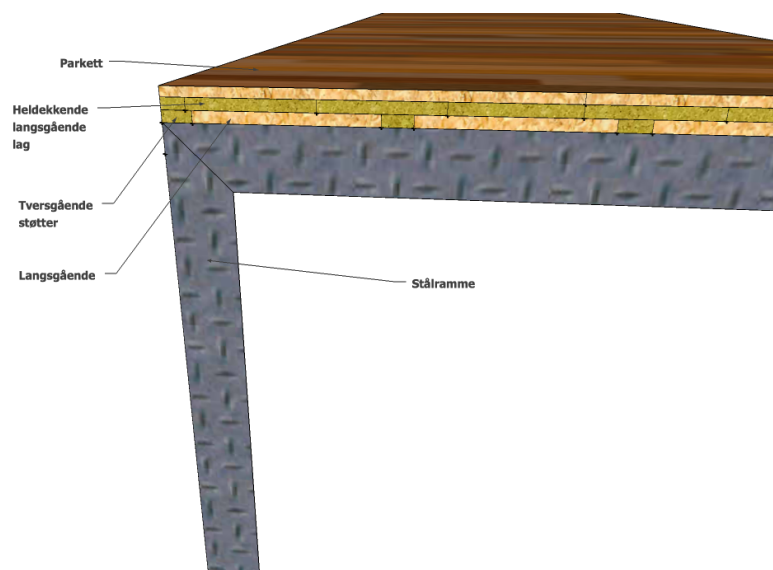
Figur 3.1: Skisse av scenen i Logen sett ovenfra. Den svarte sikelen på midten indikerer shakerens posisjon under målingene

Middelen som ble brukt til målingene er 3,6 meter i dybden og 12,6 meter i bredden, men som man kan se i figur 3.1 er den ikke fullstendig rektangulær. Det er en liten utstikker bakerst til venstre og de to trappene som går ned til bakrommene stikker inn. Tegninger av hvordan scenen er bygget opp var ikke å oppdrive, men tverrsnittet kunne sees ved å fjerne en av platene fremst på scenen. Figur 3.2 skisserer hvordan scenen er bygget opp i tre lag som hviler på et stålrammefundament. Det øverste laget er parkett satt sammen av deler på 65x6x1cm. Dekket går på tvers av scenen. Under parketten ligger det et tynt filtlag over et langsgående lag av tre, og til slutt et tredje trelag som var vanskelig å identifisere. Det så ut til at alle disse lagene var heldekkende. Selv om noen støttende bjelker ikke var å se på grunn av utilgjengelighet, tilsier scenens størrelse at noe slikt burde finnes.

### 3.1.2 Dokkhuset

Dokkhuset er det gamle dokkhuset til Trondhjems mekaniske værksted som er ombygget til et kulturhus med blandt annet en konsertsal. Akustikken i salen er prosjektert av COWI og var ferdigstilt i 2006. Den benyttes i stor grad til kammermusikk- og jazzkonserter, blant annet av Trondheimssolistene og jazzlinja ved NTNU. Dokkhuset er prosjektert med tanke på å ha en god respons i bassen ved kammerkonsserter.

Salen har dimensjoner på cirka 20x10x4 meter og en skisse av salen sett fra oven kan sees i figur 3.5. Scenen er i én rektangulær del og er 4 meter dyp og 10 meter bred. Den er



Figur 3.2: Skisse av det som kunne observeres av sceneoppbygningen i Logen. Øverst et parkettlag, videre et tynt filtlag før det kommer to trelag. Alt lå på en stålramme.

bygget opp med et parkettlag over et filtlag og gulvbord montert på 8" trebjelkelag og 50 mm mineralull festet under gulvbordene.

## 3.2 Måling av vibrasjoner på scenegulv

Ved å se på vibrasjonsmønsteret til et scenegulvet kan man få en nærmere forståelse av hvor eventuell lydstråling fra et scenegulv kommer fra. Det finnes allerede gode beskrivelser av bølgeutbredelse og lydstråling fra homogene plater som beskrevet i kapittel 2.1, men det er ikke sikkert at teorien for plater er direkte overførbart og gjeldende for scener. Dette fordi scener ofte har en mer kompleks struktur enn homogene plater. For det første har gjerne scener et dekke av tre som er et anisotropisk materiale, altså at materialegenskapene varierer med retningen. En scene har i tillegg ofte en komplisert oppbygning av flere mindre treplater, gjerne i flere lag, med støttende bjelker. Det er derfor gjennomført målinger for å undersøke hvordan vibrasjonene som overføres til et scenegulv brer seg utover gulvet. Det kan da undersøkes om det oppstår refleksjoner og stående bølger, eller om man i hovedsak kun får et dominerende vibrasjonsfelt rundt eksitasjonspunktet. Hvis dette området er observerbart vil det kunne sees på som nærfeltet rundt eksitasjonspunktet og effekten beregnes av ligning 2.6. Det var også av interesse å se om bølgelengdene kunne observeres, og om det var store variasjoner forskjellige steder på scenen. Ved å sammenligne frekvensene beregnet ut fra målte bølgelengder med grensefrekvensen kan man se i hvilken grad man kan få utstråling og hvor denne kommer fra.

Det ble gjennomført vibrasjonsmålinger kun i Logen da disponibel tid i Dokkhuset ble

prioritert brukt på lydtrykksmålingene som man kan lese om i seksjon 3.3 .

### 3.2.1 Logen

Vibrasjonsmålingene i Logen ble gjennomført 24. februar 2009.

#### Måleoppsett

En skisse av måleoppsettet kan sees i figur 3.3. Utstyrliste kan sees i tabell 3.1.

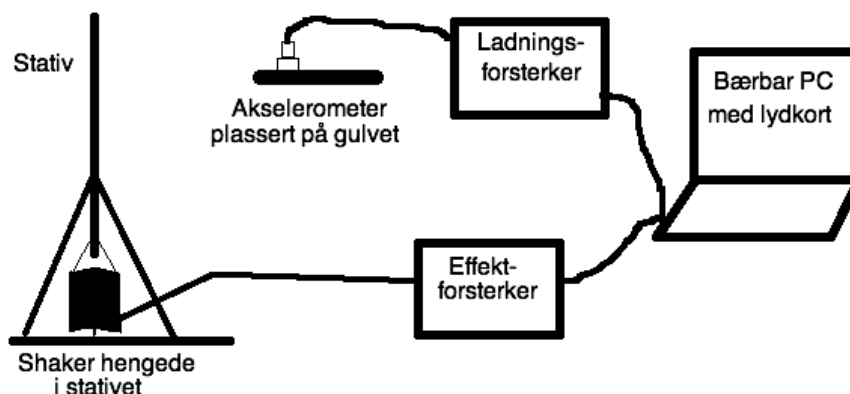
<i>Produsent</i>	<i>Modell</i>	<i>Type</i>	<i>Serinummer</i>
Brüel & Kjær	Akselerometer	Type 4369	550819
Brüel & Kjær	Shaker	Type 4809	566250
Brüel & Kjær	Trykkfølsom mikrofon	Type 4166	Bc-2109
Norsonic	Mikrofonforsterker	Front end type 336	20593
Norsonic	Mikrofonforsterker	Type 1201	CB 4107
Endevco	Ladningsforsterker	2721	AC70
Acoustical Mfg Co Ltd	Effektforsterker	QUAD 50E	B 037
Acer	PC	TravleMate 8101 WLMi	PB4450
Digigram	Lydkort	VXpocket V2	10300008657
Morset Sound Develop.	WinMLS	2004	Eval. vers. level 9
MathWorks	Matlab	R2008b	7.7.0.471

Tabell 3.1: Utstyrliste for målingene i Logen

Som kilde til vibrasjoner ble det valgt å eksitere gulvet med en shaker. Shakeren ble hengt opp i et stativ med shakerens membran hengende ned mot gulvet. For å få punkteksitasjon på gulvet ble det i membranen skrudd inn en tapp som i tykkelse og endeform ligner piggen til en kontrabass. Som man kan se i figur 3.1 ble shakeren plassert ganske midt på scenegulvet, 1,86 meter fra bakdelen og 7,5 meter fra høyre ende. Dette fordi størrelsen og formen på et eventuelt dominerende vibrasjonsfelt var ukjent. Det ble dermed valgt å ha mest mulig avstand fra alle endene av scenen til shakeren for å best mulig kunne kartlegge et slik område. Det ble ikke funnet noen merkbar forskjell på stivheten rundt på scenegulvet, noe som kan stemme godt med tanke på at den er bygget opp av relativt mange lag. Plasseringen av shaker ble derfor gjort uten å ta hensyn til hvor det eventuelt fantes støttende bjelker.

For å kartlegge vibrasjonene ble det brukt et akselerometer som enkelt kan festes på gulvet med bivoks. Det ble brukt et relativt stort og tungt akselerometer da de er mer nøyaktige enn de mindre og lettere. Tyngden på scenen var uansett så stor at tyngden på akselerometeret var forsvinnende liten.

En PC med eksternt lydkort og programmet WinMLS ble brukt til å gjennomføre målingene. WinMLS ble valgt siden programmet har et ferdig oppsett som heter 'impuls/fre-



Figur 3.3: Skisse av måleoppsett for scenevibrasjoner

quency response'. Oppsettet genererer sinus-sweep som stimulerer systemet man vil måle. Ved å måle responsen til systemet med en sensor, for eksempel mikrofon eller akselerometer, og returnere det til WinMLS beregnes impulsresponsen til systemet. Det er også enkelt å ha kontroll på utgangssignalet da kildestyrken enkelt kan kontrolleres og varieres i programvaren.

For å ha nok effekt til drive shakeren ble signalet fra PC-en forsterket ved hjelp av en effektforsterker og signalet fra akselerometeret med en ladningsforsterker. Forsterkernivåene som ble brukt var ikke essensielt for målingene, men begge forsterkerne ble satt til å forsterke signalene med 20 dB.

## Målemetode

I korte trekk gikk målingen ut på å eksitere gulvet med sinus-sweep og måle utsvinget med akselerometeret på forskjellige punkter på scenegulvet, for deretter å kunne analysere vibrasjonene.

Før målingene kunne gjennomføres måtte det gjøres noen innstillinger i WinMLS. For å ha god dekning i området 30-60 Hz ble det brukt et sweep som gikk fra 16-150 Hz. Programvaren anbefalte å la sweepet være så lenge som mulig for å få minst mulig støy, og ble derfor satt til 10 sekunder. Av andre innstillinger ble det valgt å bruke etterklangstid på 1,5 sekunder og en samplingsfrekvens på 44100 Hz. Styrken på utgangs- og inngangssignalet til WinMLS ble bestemt ved testing. Ved å kjøre flere test-sweep ble utgangssignalet fra programmet satt til et nivå der det var et godt signal til støyforhold, samtidig som det ikke overskred shakerens effektgrense. Deretter ble inngangssignalet justert ved å sette det til et høyest mulig nivå uten at det ble klippet. Som siste forberedelse før måling ble støygulvet registrert for å sjekke om det var et godt signal til støyforhold. Dette ble gjort ved å gjennomføre et sweep der strømforsyningen til shakeren var koblet fra slik at gulvet ikke ble eksitert.

På grunn av tidsbegrensninger for bruk av salen ble det bestemt å ta to måleserier, en på langs og en på tvers av scenen. Målingene på tvers ble gjort mot høyre ende sett fra salen, og de på langs bakover mot den buede bakdelen. Siden akselerometeret ikke fikk plass under shakeren ble første måling gjort 9 cm fra selve eksitasjonspunktet, som var midt under shakeren. Avstanden mellom målepunktene var tett i starten med økende avstand jo lenger fra kilden målingene ble gjort. Det ble tatt målinger helt ut til begge endene, altså 7,5 meter på tvers og 1,86 på langs. Målepunktene som ble brukt kan sees i appendiks G. Det ble i hovedsak gjennomført ett sweep per målepunkt. Siden frekvensresponsen ble plottet i WinMLS rett etter måling ble det gjort eventuelle andre- og tredjemålinger ved mistenkelige avvik.

For analyse ble alle målingene lagret i WinMLS sitt filformat wmb. I wmb lagres impulsresponsen fra målingene. Siden målingene ikke inneholdt frekvenser høyere enn 150 Hz ble de lagret med en samplingsfrekvens på 300 Hz. Nedsamlingen fra 44100 Hz til 300 Hz var noe WinMLS gjorde automatisk ved lagring, og det antas dermed at nødvendig databehandling for en korrekt nedsampling er gjennomført.

## Databehandling

For å behandle dataene ble det skrevet et skript i Matlab. Skriptet kan sees i appendiks A. De målte dataene måtte konverteres fra wmb-formatet for å kunne behandles av Matlab. Dette ble gjort ved hjelp av funksjonen loadimp.m. Denne funksjonen er skrevet av Morset Sound Development, som har laget WinMLS, for å konverterer impulsresponsen i wmb-formatet til matlab-vektorer. I Matlab ble gjennomført FFT av alle målingene for å se på frekvensinnholdet. Alle frekvensresponsene ble plottet i to plot, ett for alle målingene på tvers og ett for målingene på langs.

Det var også av interesse å se hvordan utsvinget varierte som funksjon av avstand fra kilden. Dette ble gjort for utvalgte frekvenser både på langs og tvers. Verdiene for de utvalgte frekvensene i alle målepunktene ble hentet ut fra frekvensresponsene. For hver av frekvensene ble det deretter laget et plott med differansen mellom utsvinget i hvert punkt og utsvinget ved kilden som funksjon av avstand fra kilden. Siden første målepunkt var 7 cm fra eksitasjonspunktet ble alle differansene beregnet med utgangspunkt i dette punktet. For å i størst mulig grad kunne tolke disse plottene ble også fasen tatt med. Den ble på samme måte som utsvinget plottet med differansen til kildefasen som funksjon av avstand.

## 3.3 Måling av lydstråling fra vibrerende scene

Det er gjennomført målinger for å undersøke lydtrykket i salen når scenegulv er satt i vibrasjoner. Det vil bli sett på om en scene utstråler nok effekt til at det kan oppstå et lydtrykk som er hørbart i salen og hvilken frekvensfordeling dette lydtrykket vil ha.

Målingene ble gjennomført i Logen og Dokkhuset, men med to forskjellige metoder og oppsett som blir presentert i de neste delkapitlene.

### 3.3.1 Logen

Målingene i Logen ble gjennomført 24. februar 2009.

#### Måleoppsett

Oppsettet som ble brukt ligner oppsettet for vibrasjonsmålingene vist i figur 3.3. Forskjellen var at det i stedet for akselerometer og ladningsforsterker ble brukt en mikrofon i stativ og mikrofonforsterker. Mikrofonforsterkeren ble satt til en forsterkning på 20 dB. Det ble brukt identisk oppsett i WinMLS. Utstyret kan sees i tabell 3.1.

#### Målemetode

Som i vibrasjonsmålingene ble gulvet eksitert med sinus-sweep, men i denne målingen var det lydtrykket i salen som ble målt. Det ble brukt samme utgangssignal til shakeren som i vibrasjonsmålingene, men inngangssignalet fra mikrofonen til WinMLS ble justert slik at det var et godt signal til støyforhold uten at det ble klipping av signalet. Det ble med samme metode som i vibrasjonsmålingene også her gjennomført en måling av støygulvet.

For å ha et referanselydtrykk ble det først tatt et sweep der tappen på shakeren ikke var i kontakt med gulvet, og dermed ikke satte det i vibrasjon. Eventuelle differanser mellom lydtrykket man får med og uten gulvet i vibrasjon vil kunne begrunnes av vibrasjonene. Mikrofonen ble i denne referansemålingen plassert i målepunkt 1 i figur 3.4. Mikrofonen ble plassert såpass nærme shakeren da lydtrykket i rommet var så minimalt, spesielt fra 16-60 Hz, at det ellers ville ligget ved støygulvet.

Det ble deretter gjennomført målinger der gulvet ble eksitert. Med en antatt etterklangstid på 1.5 sekunder vil den beregnede schröderfrekvensen ligge på ca 63 Hz. Dette vil si at det mest interessante frekvensområdet på 30-60 Hz ikke kan sees på som et diffusfelt, lydtrykket ble derfor målt i flere posisjoner. Midling av disse målingene vil i stor grad kunne eliminere ekstreme verdier som følge av at man havner i noder eller moder. Posisjonene det ble målt i kan sees i figur 3.4 i målepunkt 2 til 6.

Impulsresponsene ble etter målingene lagret i wmb-formatet for analyse.

#### Databehandling

Målingene ble behandlet i Matlab og derfor konvertert til vektorer ved hjelp av funksjonen loadimp.m. For å se på frekvensresponsen ble det gjort FFT på impulsresponsene. Det





Figur 3.4: Skisse av mikrofonplasseringene som ble brukt i lydtrykksmålingene i Logen

ble deretter beregnet gjennomsnittet av måling 2 til 6. Måling 1 og snittet av måling 2 til 6 ble deretter plottet. Differansen mellom måling 1 og snittet av måling 2 til 6 ble også beregnet og plottet. Matlabkoden som ble brukt kan sees i appendiks B.

### 3.3.2 Dokkhuset

Målingene i Dokkhuset ble gjennomført 4. mai 2009.

#### Måleoppsett

En skisse av måleoppsettet i Dokkhuset kan man se i figur 3.6. Utstyrliste kan sees i tabell 3.2.

Som kilde for å eksitere gulvet ble det denne gangen valgt å bruke en kontrabass. Dette for å unngå eventuelle avvik ved vibrasjonsoverføringen som kunne oppstå på grunn av shakerens eventuelle forskjeller fra kontrabasser. Siden kontrabassens utstråling i seg selv i stor grad bidrar til lydtrykket i rommet vil det, i motsetning til med en shaker, gi et fullstendig og riktig bilde av lydtrykket som oppstår i salen. Tidsbegrensningene førte til at det ikke ble prioritert å måle både på og mellom støttebjelker. Det ble prioritert å måle mellom bjelker og kontrabassen ble dermed plassert på et ettergivende punkt på scene. På bakgrunn av dette ble den plassert ca 1,5 meter fra bakveggen og 2 meter fra høyre

<i>Produsent</i>	<i>Modell</i>	<i>Type</i>	<i>Serinummer</i>
Brüel & Kjær	Akselerometer	Type 4375	1131763
Brüel & Kjær	Trykkfølsom Mikrofon	Type 4166	Bc-2109
Endevco	Ladningsforsterker	2721	AC70
Norsonic	Mikrofonforsterker	Front end type 336	20593
Norsonic	Mikrofonforsterker	Type 1201	CB 4107
Sound Devices	Digital Audio Recorder	722	LD-4059
MathWorks	Matlab	R2008b	7.7.0.471

Tabell 3.2: Utstyrsliste for målingene i dokkhuset

sidevegg sett fra publikum. Kontrabassen ble håndtert av en profesjonell kontrabassist siden en kontrabass er et teknisk krevende instrument som krever kunnskap og erfaring.

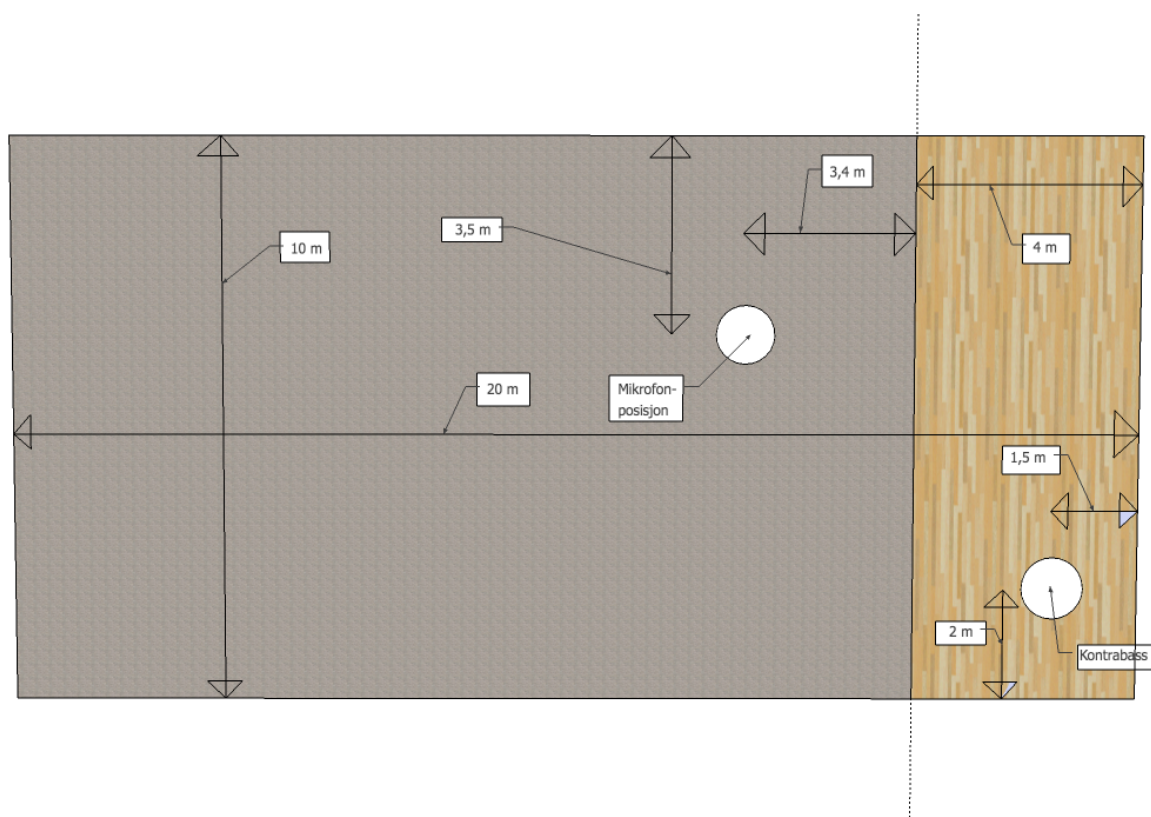
For å måle lydtrykket ble det plassert en mikrofon i rommet. Som ved målingene i Logen ligger schröderfrekvensen over 60 Hz og lydfeltet i det interessante frekvensområdet kan ikke anses som et diffusfelt. På grunn av tidsbegrensning i utlånstiden var det imidlertid bare tid til å gjennomføre ønskede måleserier i én mikrofonposisjon. Det er så og si umulig å unngå noder og moder, men for å unngå de mest åpenbare ble mikrofonen plassert et stykke fra veggene og samtidig ikke midt i rommet. I tillegg til mikrofonen i rommet ble det plassert et akselerometer på kontrabassens stol for å kunne beregne en overføringsfunksjonen fra kontrabassens eksitasjon til lydtrykk i rommet. Stolen er den delen av kontrabassen strengene er spent over, plassert på kroppen. Stolen er den primære vibrasjonsoverføreren til kroppen, altså klangkassen, og å måle vibrasjonen der vil gi informasjon om de eksiterte tonene. Siden strengene primært vibrerer langs den horisontale akse ble akselerometeret plassert på kortsiden av stolen, nærmest de dypeste strengene.

Signalene fra akselerometeret ble forsterket av en ladningsforsterker, og signalene fra mikrofonen med en mikrofonforsterker. Som i målingene i Logen ble forsterkerene satt til å forsterke 20 dB. Når det gjelder mikrofonforsterkeren ble det ved en feiltakelse gjennomført A-vekting av målingene, da det i utgangspunktet var meningen å gjennomføre målingen med flat respons. En flat respons var opprinnelig ønskelig da A-vekting demper området 30-60 Hz ganske kraftig og ville kunne føre til et dårlig signal til støyforhold i dette frekvensområdet.

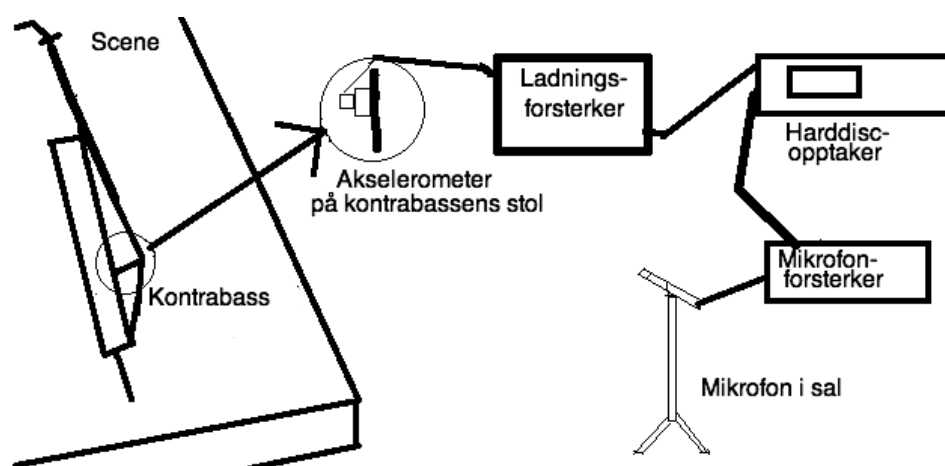
For å gjøre opptak av målingene ble det brukt en harddiskopptaker. Den hadde to inn-ganger, der den ene ble brukt til mikrofonen og den andre til akselerometeret.

### Målemetode

Målingene gikk i korte trekk ut på å eksitere kontrabassen ved forskjellige toner og måle lydtrykket i rommet. Før målingene ble det som i tidligere nevnte målinger gjennomført justering av inngangssignalet og støygulvmåling. Justeringen av inngangssignalet foregikk



Figur 3.5: Skisse av salen i Dokkhuset sett ovenfra. Skissen viser også mikrofonen og kontrabassens posisjon under målingene.



Figur 3.6: Skisse av måleoppsett for lydtrykkmålinger i Dokkhuset

ved at kontrabassen ble eksitert kraftig og inngangsnivåene til begge kanalene på harddiskopptakeren ble justert så høyt det var mulig uten klipping. Støymålingen ble gjennomført ved å ta et opptak på 10 sekunder uten at kontrabassen ble eksitert.

Den dypeste tonen de mest vanlige kontrabassene kan spille er i utgangspunktet tonen E1 med frekvensen 41,2 Hz. Kontrabassen hadde derfor påmontert en forlengelse av halsen slik at toner helt ned til B0 på 30,9 Hz kunne spilles. Målingene ble gjort ved at kontrabassisten strøk toner fra B0 på 30,9 Hz til G2 på 98 Hz med halvtonesintervaller med små pauser i mellom. Dette ble tatt opp på harddiskopptakeren. For å få et godt signal til støyforhold ble det eksitert relativt korte toner med et kraftig stryk ved en styrke som betegnes som fortissimo innen musikkterminologien. Målingene ble gjennomført ved tre forskjellige tilfeller av kontakt mellom scene og kontrabass. Intensjonen med dette var å kunne se på forskjellen i lydtrykk i rommet mellom når kontrabassen overførte energi til scenen gjennom piggen og når piggen var isolert fra scenen. Eventuell differansen mellom disse lydtrykkene måtte da være på grunn av energien som ble overført til scenen. Det første tilfellet var med piggen rett i gulvet for å få mest mulig direkte kontakt med underlaget. Det ble også målt med gummiknott på piggen. Denne gummiknotten brukes mye på piggen i hovedsak for å beskytte underlaget fra skade og slitasje fra piggen. Tilslutt ble det målt med et forsøk på å isolere pigge og scene. Isolasjonen som ble brukt var et 15 cm lag med svart skumgummi med to lag gummi på 1 cm lagt oppå dette.

Målingene ble lagret på tre forskjellige opptak, ett for piggen, ett for knotten og ett for det isolerte. Opptakene ble lagret i wav-formatet med en 16-bits oppløsning og 44,1 kb/s som samplingsfrekvens på harddiskopptakeren.

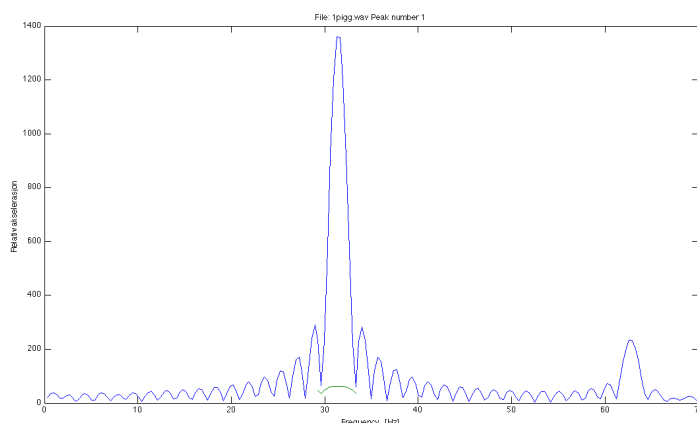
## Databehandling

I analysen måtte hver tone analyseres hver for seg. Ved hjelp av lydredigeringsprogrammet Audacity ble derfor opptakene delt opp og alle enkelttonene lagret i hver sin wav-fil. Wav-filene ble lastet inn i Matlab ved hjelp av funksjonen wavread.m som konverterer wavfiler til vektorer som kan behandles der. I Matlab ble det skrevet et skript som behandlet dataene, dette kan sees i appendiks C. Målet med beregningene var å få tre overføringsfunksjoner, en for hver av de tre tilfellene, mellom målt akselerasjon på kontrabass og lydtrykk i rommet.

Skriptet gjennomfører først FFT av alle de spilte tonene. For å få sammenlignbare og riktige frekvensresponser ble det hentet ut akkurat like lange tidsvinduer av alle tonene i et område av tonen der det var relativt stabile nivåer. Alle FFT-ene ble plottet og ved hjelp av funksjonen 'ginput' i Matlab ble frekvensene til alle grunntonene, 2. og 3. harmoniske til alle de eksiterte tonene funnet. Figur 3.7 viser et eksempel på en slik harmonisk, her ved grunntonen til en B0 på ca 30,8 Hz. I figuren kan man se at det som i større grad burde vært én tagg akkurat i grunntonens frekvensen er i FFT-beregningen blitt til et mer bredbåndet område rundt den samme frekvensen. Denne effekten kalles vinduseffekten og kommer av at når man tar FFT av et gitt tidsvindu vil man sannsynligvis ikke

treffe frekvensene akkurat i fase, noe som i databehandlingen fører til at energien fordeles seg over en viss båndbredde. Den samme energimengden som ville fantes i taggen er fordelt over denne båndbredden. Energien til frekvensene ble derfor funnet ved å summere kvaratet av alle verdiene i området  $\pm 2$  Hz fra frekvensverdiene til tonene. Overføringen mellom akselerasjonen på kontrabassen og lydtrykket i rommet ble beregnet for hver av frekvensene ved dividere mikrofonverdien med tilsvarende akselerometerverdier. Overføringsverdiene ble tilslutt plottet for alle frekvenser. For å finne tendensene i målingene ble også beregnet tendenskurver for pigg-, knott- og isolasjonsmålingene ved hjelp av lineær regresjon.

Siden det ble brukt A-vektingsfiler på mikrofonforsterkeren ved målingene ble det også gjennomført en beregning for å se hvordan det påvirket resultatene. Det ble gjort samme beregning som beskrevet over, men mikrofonmålingene ble for alle frekvenser filtrert ved formel 2.9 og 2.10. Siden verdiene ikke var i dB og det var meningen å inversfiltrere ble resultatene fra formelene omregnet fra dB-verdier og videre ikke multiplisert men dividert med. Dette skulle dermed resultere i at lydtrykksnivåene ble flatet ut.



Figur 3.7: Eksempel på vinduseffekt der energien som finnes i frekvensen 30,8 Hz har fordelt seg over et bredere bånd på ca 4-5 Hz.

# Kapittel 4

## Resultater

### 4.1 Vibrasjoner på scenegulv

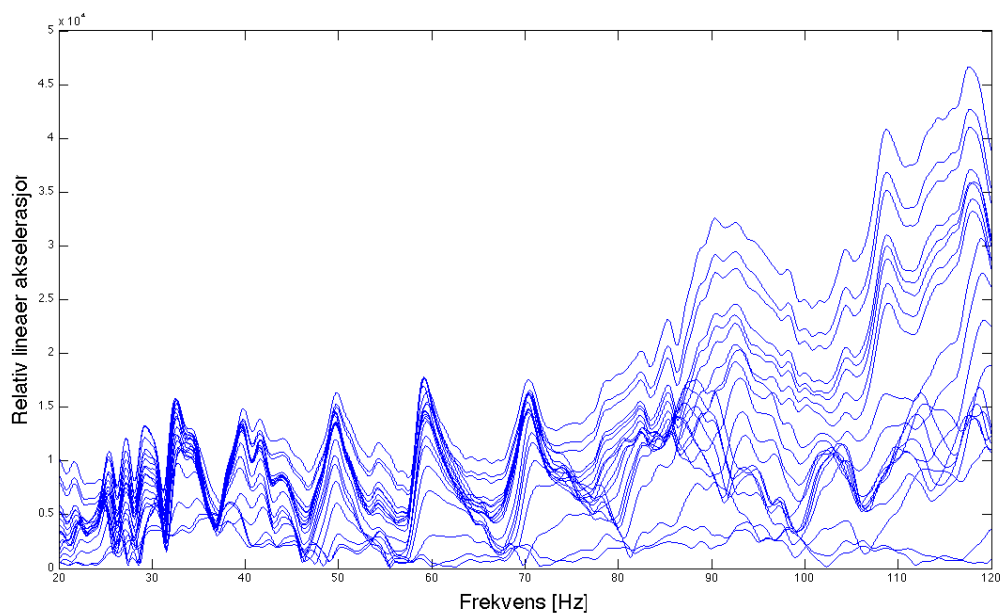
#### 4.1.1 Logen

I dette delkapitlet vil resultatene fra målinger av vibrasjoner på scenegulvet i Logen presenteres. Først presenteres frekvensresponsene, og deretter variasjonene i amplitude og fase ved de forskjellige målepunktene.

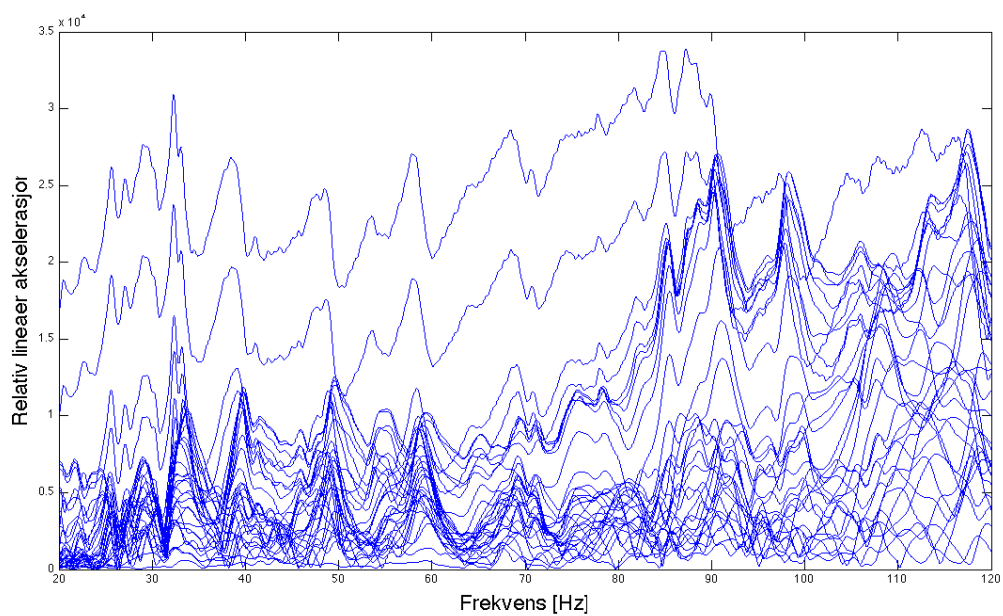
#### Frekvensrespons

Figur 4.1 viser frekvensresponsen i området 20-120 Hz fra akselerometeret for alle målingene på langs av scenen. Man kan i figuren se tydelige resonanstopper som har blitt registrert i alle målepunktene, spesielt under 100 Hz. Over 100 Hz kan det se ut til at det blir et mer diffust felt. De tydeligste resonansene som sees ligger ved frekvensene 25.5, 27.3, 29.4, 32.7, 39.7, 41.7, 49.8, 59.3 og 70.5 Hz.

Figur 4.2 viser frekvensresponsen i området 20-120 Hz fra akselerometeret for alle målingene på tvers av scenen. Man kan i figuren se mer eller mindre tydelige resonanstopper som er registrert i alle målepunkter. De resonansene som i størst grad stikker seg ut ligger ved frekvensene 25.7, 27.2, 29.4, 33.1, 39.0, 49.1, 58.1 og 68.8 Hz. Det er interessant å sammenligne frekvensene med frekvensene funnet på langs og se at de fleste er rimelig sammenfallende, bortsett fra at målingene på tvers har tydeligere resonanser ved 41.7 og 70.5 Hz og at målingene på tvers ikke har en like tydelig ved 68.8 Hz.



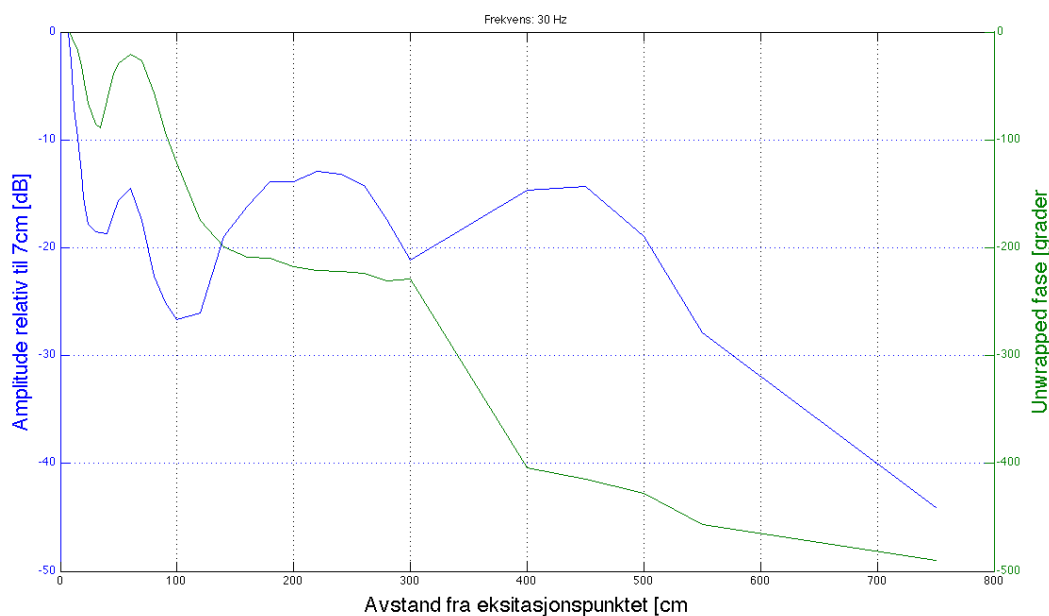
Figur 4.1: Frekvensrespons for alle målepunktene på tatt på langs i Logen.



Figur 4.2: Frekvensrespons for alle målepunktene på tatt på tvers i Logen.

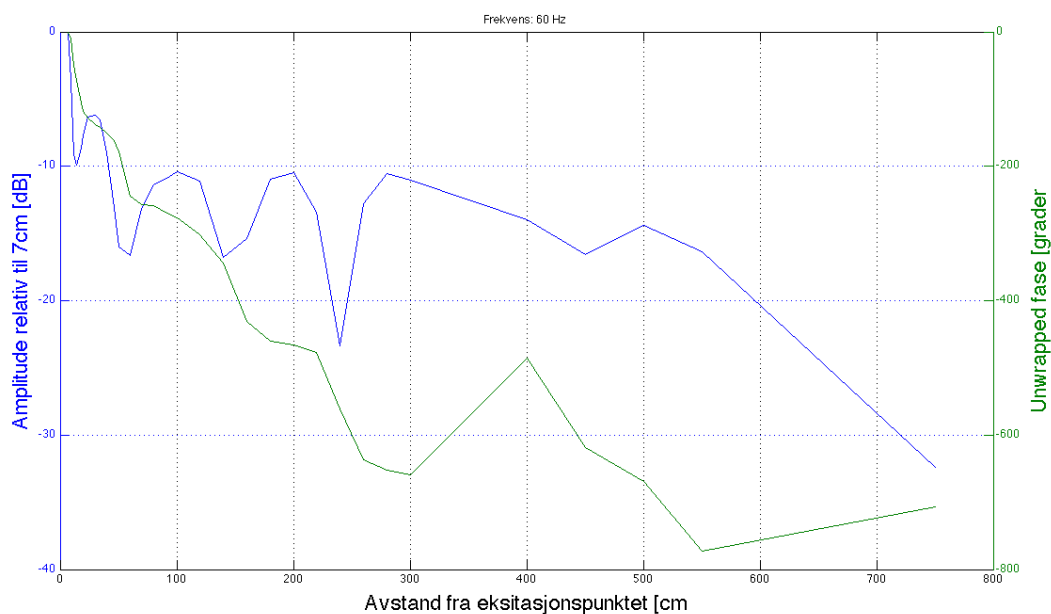
### Amplitude- og faseforskjeller på scenen

For å presentere målingene som er gjort er det her tatt med et lite utvalg av frekvenser både på tvers og på langs for å vise de forskjellige tendensene som er observert. For å representere målingene på tvers viser figur 4.3, 4.5, 4.4 og 4.6 fasen og amplituden ved henholdsvis 30, 38,8, 60 og 84,5 Hz. Fasen og amplituden er vist relativt til verdien i første målepunkt ved 7 cm som funksjon av avstand. Det blå plottet viser amplituden og det grønne fasen, der amplitudeverdiene er på venstre og faseverdiene på høyre side. Likheten mellom alle frekvensene er at alle har et bratt fall på ca. 10 dB fra referansepunktet i løpet av de første 30-50 cm. Videre er det også et fall i amplitude i løpet av de siste 1-2 meterne mot kanten av scenen. Det er altså tydelig at det er store utsving rundt eksitasjonspunktet og minimalt med utsving i kantene. I området mellom disse fenomenene kan det i stor grad observeres to tilfeller. Det første tilfellet kan sees i plottene for 30 og 60 Hz. Der kan det observeres jevnlig amplitudetopper. Man ser også jevnt synkende fase der man observerer faseforskjeller på 180 grader mellom amplitudetoppene. For plottet av 30 Hz kan disse toppene sees ved målepunktene ca. 220 og 400 cm fra kilden og for plottet av 60 Hz ved 100, 200, 300 og en mulig ved 400 cm fra kilden. Hvis dette er observerte bøyningsbølger indikerer mønsteret en bølgelengde på henholdsvis  $(400 - 220) \cdot 2 = 360$  cm og  $(200 - 100) \cdot 2 = 200$  cm. Tilfeller som sees i plottene til 38,8 og 84,5 Hz er tatt med for å vise at det finnes frekvenser der amplitudene og fasene er mer tvetydelige og vanskelige å tolke. I disse plottene er toppene ikke like tydelige og regelmessige som ved 30 og 60 Hz og fasen varierer på en måte som gjør det vanskelig å tolke.

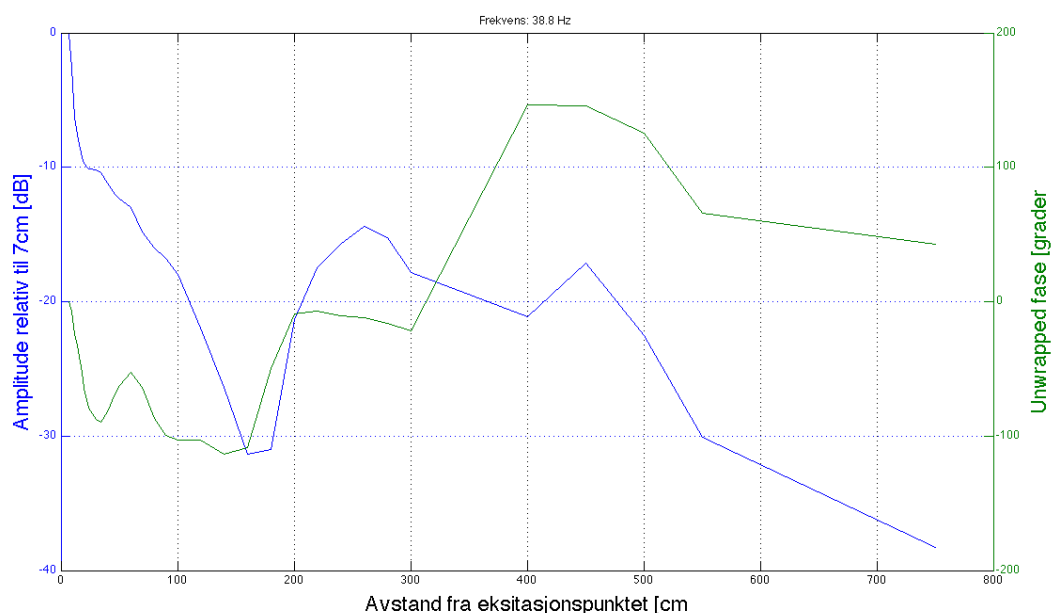


Figur 4.3: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 30 Hz på tvers av scenen.

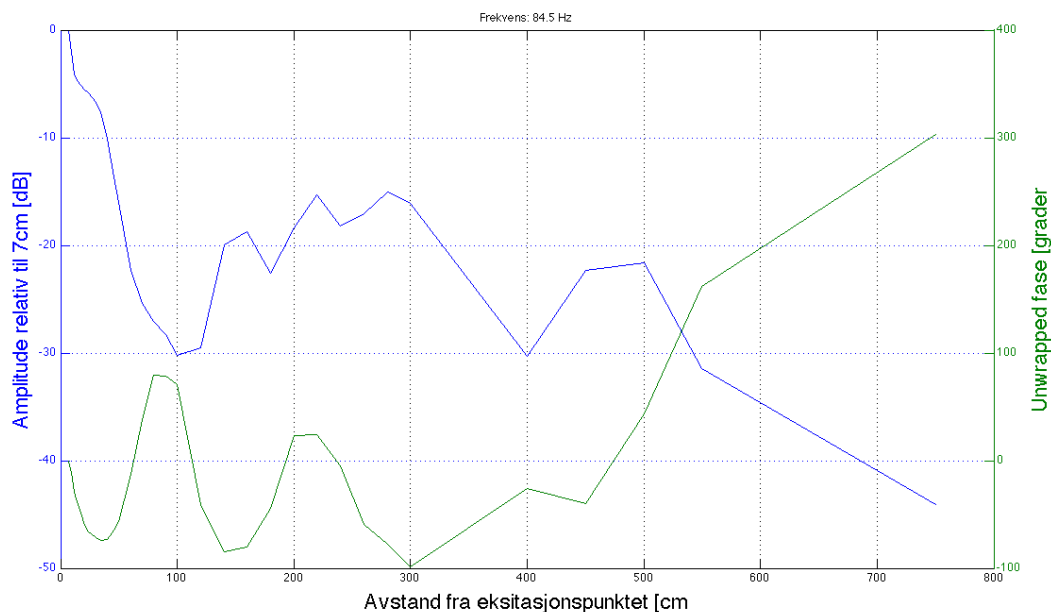




Figur 4.4: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 60 Hz på tvers av scenen.

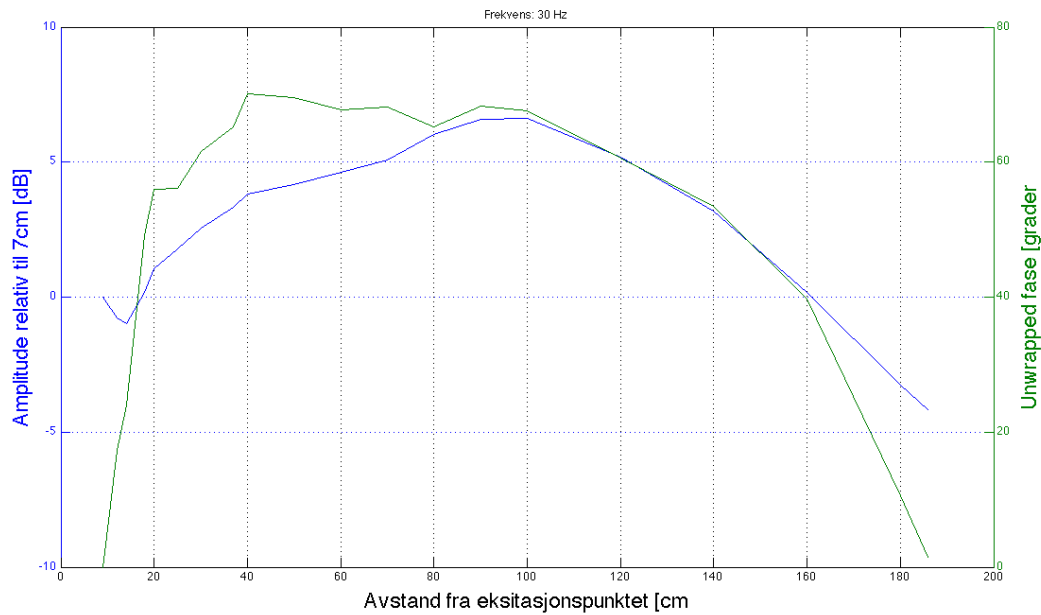


Figur 4.5: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 38,8 Hz på tvers av scenen.

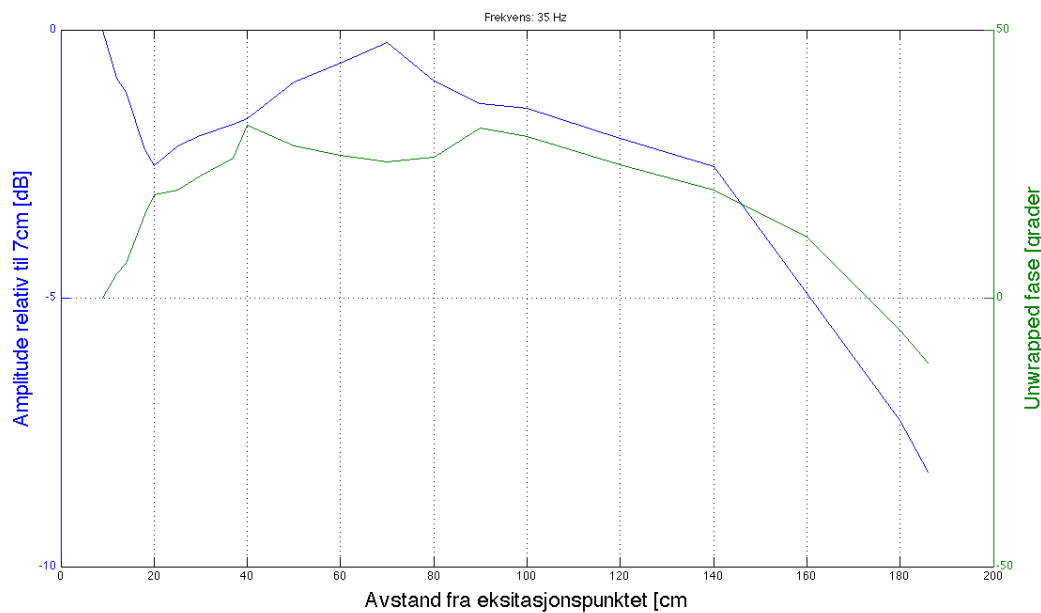


Figur 4.6: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 84,5 Hz på tvers av scenen.

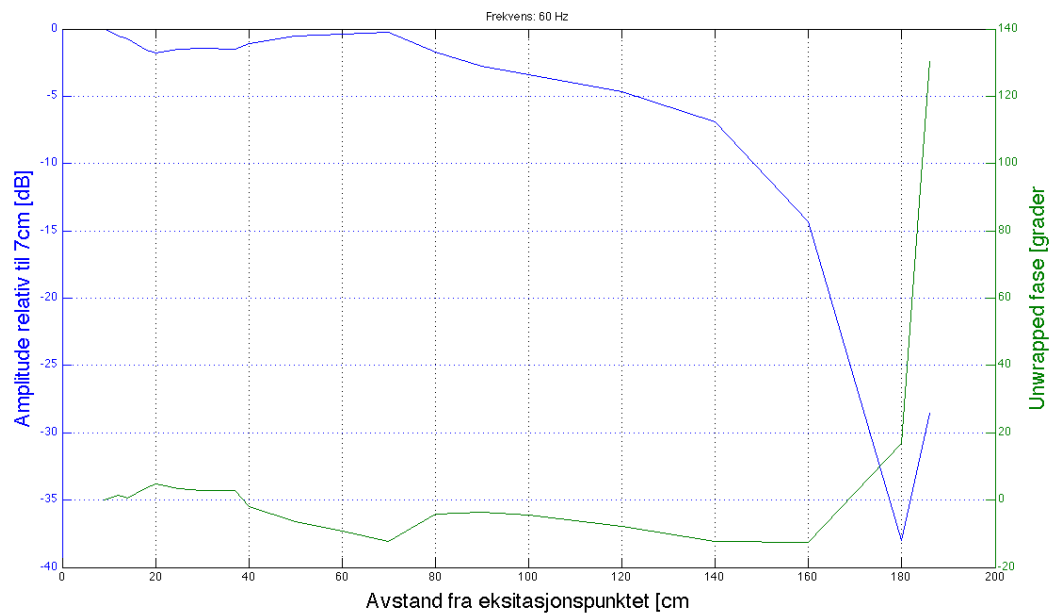
I figur 4.7, 4.8, 4.9 og 4.10 ser man tilsvarende plott som ble vist av målingene på tvers for målingene på langs. I figurene er det henholdsvis frekvensene 30, 35, 60 og 80 Hz som er vist. På tvers er ikke tendensene til at det skjer et fall i amplitude fra eksitasjonspunktet like tydelige, men det kan observeres i større eller mindre grad for alle frekvenser. Tendens til at utsvinget svekkes betraktelig og er minimalt ved kanten av scene kan i utgangspunktet observeres i alle frekvenser. Et lite unntak kan sees i plottet for 30 Hz. Der skjer det et lite fall før man faktisk ser en økning av amplitude. Formen på kurven indikerer en halvbølge med topp midt mellom eksitasjonspunktet og enden av scenen. Her er det sannsynlig at shakeren har stått midt i noden til 30 Hz og at det dermed har vært minimalt med resonant utsving ved shakeren. Ellers finnes det to generelle tendenser. Den første kan sees i plottene for 35 og 60 Hz. Her kan det sees et lite fall i amplitude de første 20 cm, deretter stabiliserer amplituden seg før den tilslutt svekkes de siste 40 cm. Den siste typiske formen, som i større grad opptrer ved høyere frekvenser, kan sees i plottet til 80 Hz. Der har man som ved 35 og 60 Hz et fall de første 20 cm, men ved disse tilfellene fortsetter amplituden å falle relativt jevnt hele veien ut til enden. I alle tilfellene bortsett fra ved 80 Hz er det en relativt lik fase i alle målepunkt. Ved 80 Hz har man derimot en jevnt fallende fase mot sceneenden.



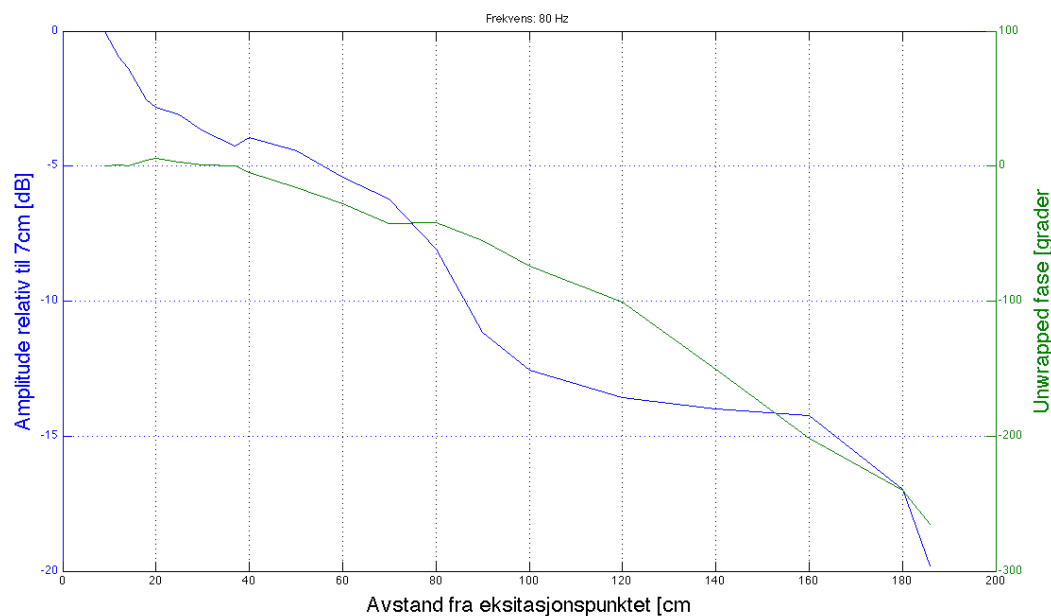
Figur 4.7: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 30 Hz på langs av scenen.



Figur 4.8: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 35 Hz på langs av scenen.



Figur 4.9: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 60 Hz på langs av scenen.



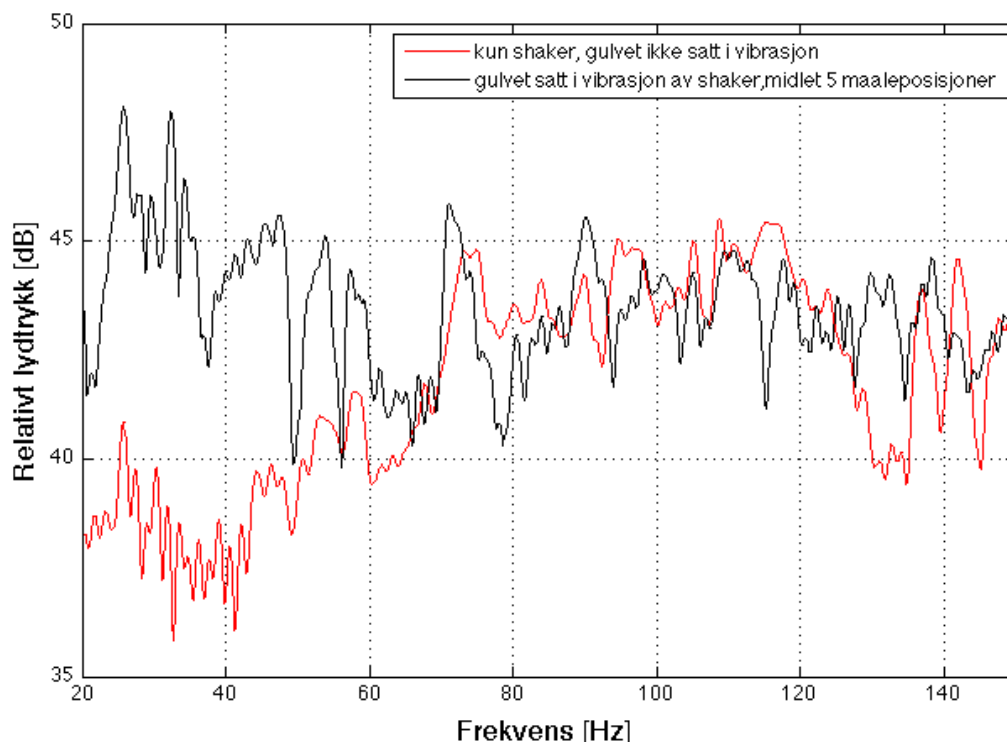
Figur 4.10: Differansen i amplituden og fase fra første målepunkt som funksjon av avstand fra eksitasjonspunkt. For 80 Hz på langs av scenen.

## 4.2 Lydutstråling fra vibrerende scene

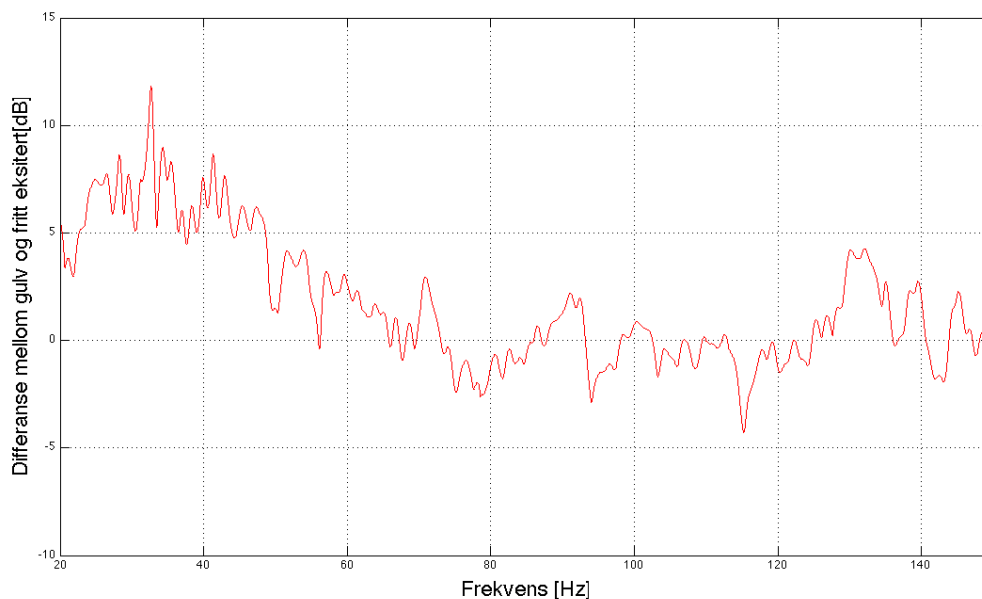
### 4.2.1 Logen

I dette delkapitlet vil resultatene fra målinger av lydtrykk i Logen presenteres.

Figur 4.11 viser lydtrykket i rommet med og uten eksitering av gulvet. Den røde kurven viser frekvensresponsen til målingene som ble gjort der gulvet ikke ble eksitert og shakeren hang fritt. Den svarte kurven er beregnet snitte av alle lydtrykkene målt i de 5 mikrofonposisjonene. Figur 4.12 viser differansen mellom den røde og den svarte kurven i figur 4.11. Tendensen man kan se i figur 4.12 er at lydtrykket i rommet er litt over 5 dB høyere i området 20-50 Hz når shakeren eksiterer gulvet. Videre fra 50-70 Hz skjer det et jevnt fall i differansen før tendensen er at den stabiliserer seg rundt 0 dB.



Figur 4.11: Svart kurve viser midlet frekvensrespons i rommet og rød kurve frekvensrespons av fritthengende shaker. Grafen viser relativt lydtrykk i dB som funksjon av frekvens.



Figur 4.12: Differansen mellom når shakeren satte scenen i vibrasjon og shakeren hang fritt. Relativt lydtrykk i dB som funksjon av frekvens.

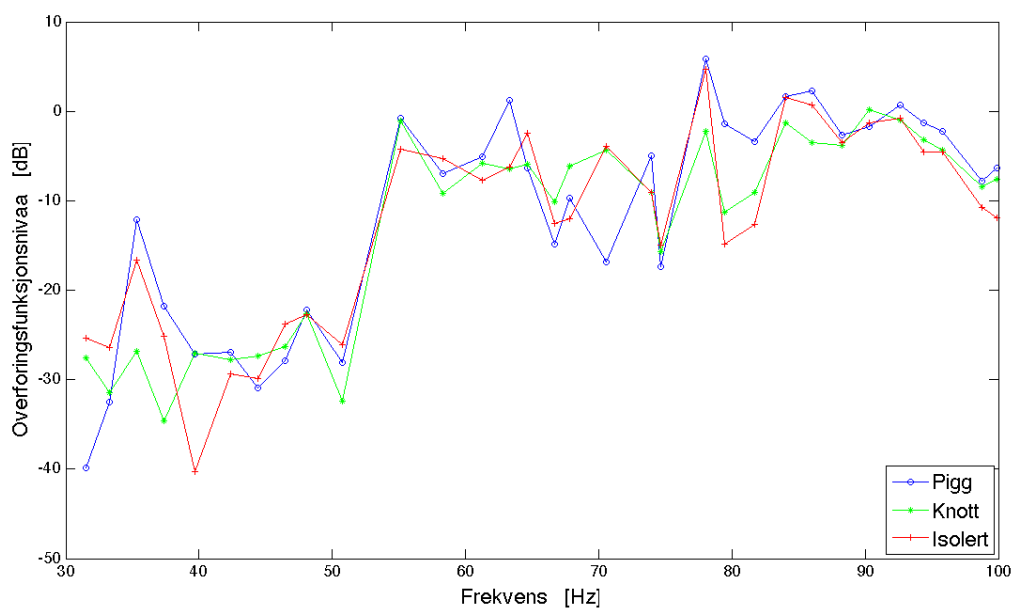
### 4.2.2 Dokkhuset

I dette delkapitlet presenteres resultatene av lydtrykksmålingene i Dokkhuset.

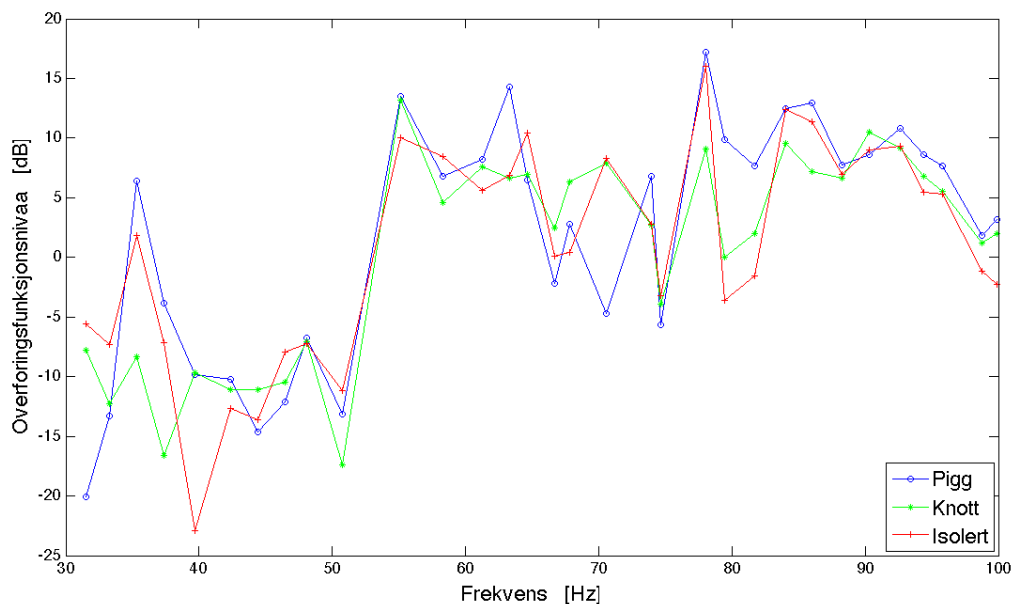
Figur 4.13 viser forholdet mellom akselerasjonen på kontrabassen og lydtrykket i rommet punktplottet for alle grunntoner og 2. og 3. harmoniske. De blå punktene og den blå linjen viser overføringen når piggen sto rett i gulvet. Videre viser det grønne tilsvarende for knott og den røde for isolert. I figur 4.14 kan tilsvarende figur sees, men her er A-vektingen forsøkt flatet ut ved å justere verdiene fra mikrofonmålingene. Det er ingen vesentlige forskjeller på mønstrene i plottene, men det man kan se i begge er at det er en tendens til at verdiene over 60 Hz ligger 15-25 dB over verdiene under 60 Hz. Det er forøvrig store utslag i variasjonene mellom målepunktene, noe som i stor grad må skyldes moder og noder. Da det var små forskjeller mellom de originale A-vekta målingene og de som var forsøkt flatet ut er alle videre resultater beregnet ut i fra de A-vektede målingene.

Videre viser figur 4.15 differansen mellom pigg- og knottmålingene og pigg- og isolertmålingene, altså differansen mellom henholdsvis blått og grønt plott og blått og rødt plott i figur 4.13 og 4.14. I plottet viser de blå punktene og det blå plottet differansen mellom pigg og knott og svart tilsvarende for pigg og isolert. Det kan se ut til at det ikke er noen tydelige utslag i differansene, men mer tilfeldige utslag der den overordnede tendensen er en differanse på null.

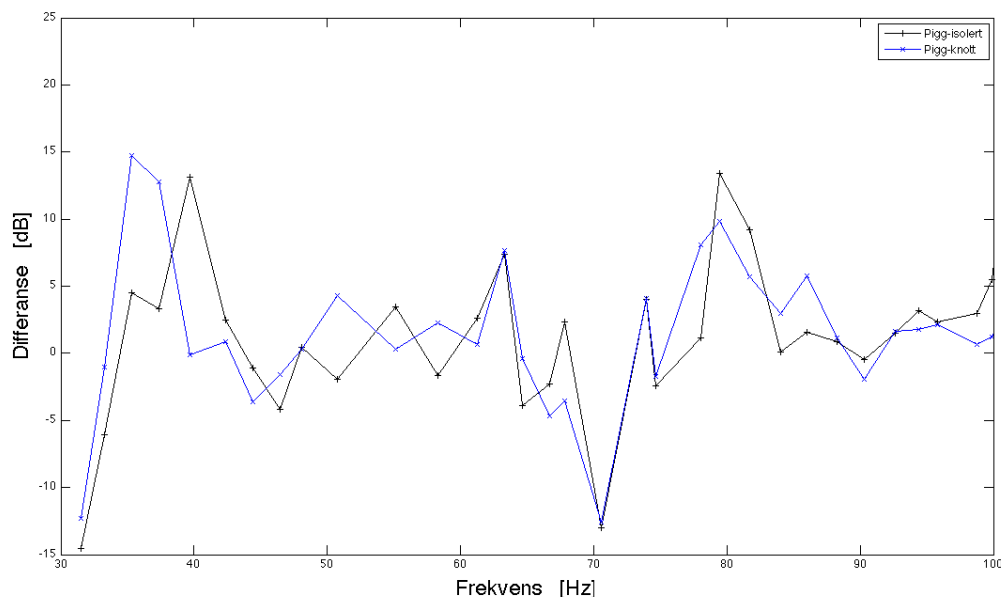
Da punktene ikke gir noe nøyaktig bilde på forskjellene mellom de tre måletilfellene er



Figur 4.13: Punktplott av alle grunntoner, 2. og 3. harmoniske som viser overføring mellom akselerasjon på kontrabassen og lydtrykk i rommet . Plottet viser bare frekvensene under 100 Hz. Blått plott viser resultat fra målinger med piggen rett i gulvet, grønt med knott og rødt med isolasjon.



Figur 4.14: Tilsvarende som figur 4.13, men her er A-vekting forsøkt flatet ut ved å justere verdiene fra mikrofonmålingene.

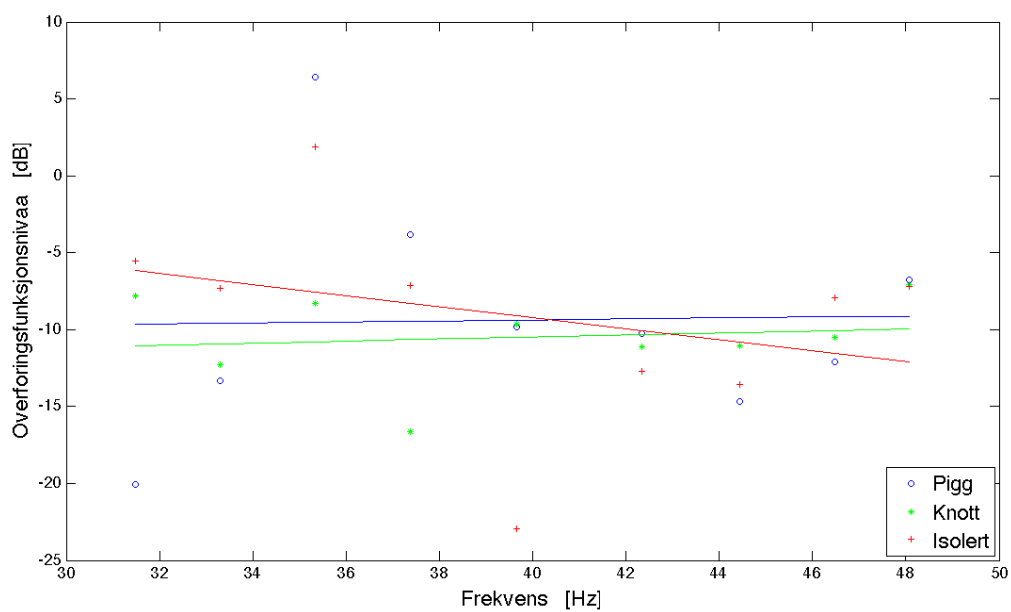


Figur 4.15: Viser differanse mellom målingene med pigg og målingene med knott i blå kurve. I svart kurve viser differansen mellom målingene med pigg og målingene med isolerende materiale.

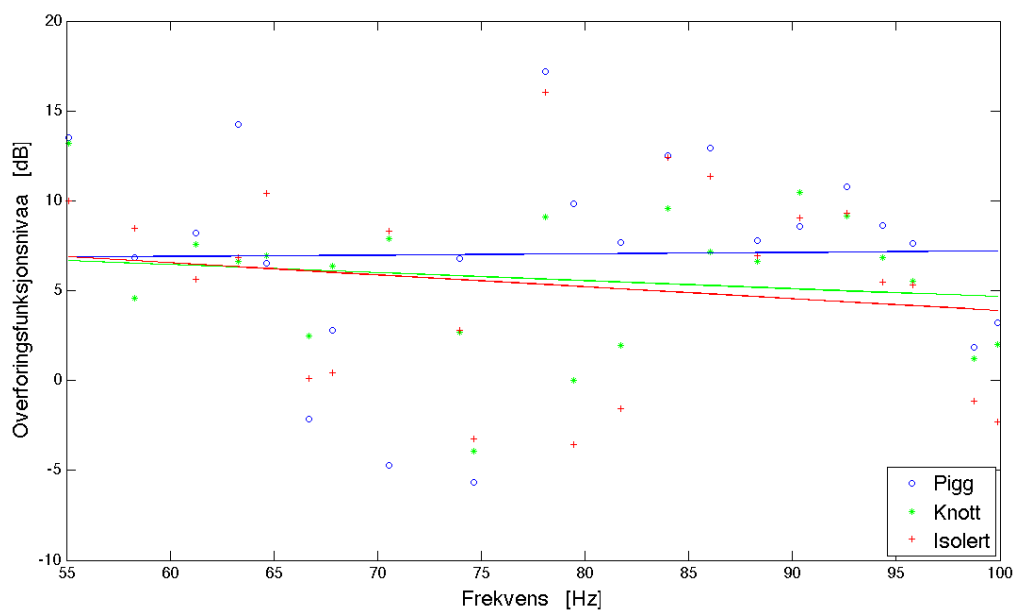
det gjennomført lineær regresjon for sammenligning. Da det er store hopp rundt 60 Hz er det laget en linje i området 30-50 Hz for hver av de tre måletilfellene og en i området 55-100 Hz. Det var forøvrig ingen punkter mellom 50 og 55 Hz, så at dette intervallet ikke er med har ingen betydning. I figur 4.16 kan man se de beregnede linjene i området 30 til 50 Hz der blå linje er pigg, grønn linje er knott og rød linje er isolert. Videre viser figur 4.17 tilsvarende plott for området 55 til 100 Hz. Ser man først på linjene i figur 4.16 kan det sees at linjen for de isolerte målingene til en viss grad skiller seg ut ved at den har litt bedre overføring enn pigg og knott ved de laveste frekvensene. Videre blir overføringen til isolert gradvis dårligere og mellom 40 og 50 Hz er det pigg og knott som har best overføring. Ser man videre i figur 4.17 har pigg en stabil tendens over hele frekvensområdet, mens både pigg og knott har en synkende tendens i overføringen. Siden det fantes 2. og 3. harmoniske av de eksiterte tonene helt opp til 300 Hz tas det med en lineær regresjon i området 55-300 Hz. Denne kan sees i figur 4.18. Her kan man se at tendensene er helt omvendt av det som kommer fram i figur 4.17 da tendensen for pigg og knott er stigende.

I figur 4.19 er et eksempel på frekvensresponsen for lydtrykket i rommet vist. Dette for å vise at hvordan en typisk frekvensrespons fra kontrabassen ser ut og for å vise at frekvenser under 60 Hz kan observeres. I figuren kan man tydelig se grunntonen, her på 30,8 Hz. Selv om den er mye svakere enn 2., 3. og 4. harmoniske indikerer at det må finnes lydutstråling i frekvensområdet 30 til 60 Hz enten fra kontrabass eller scene.

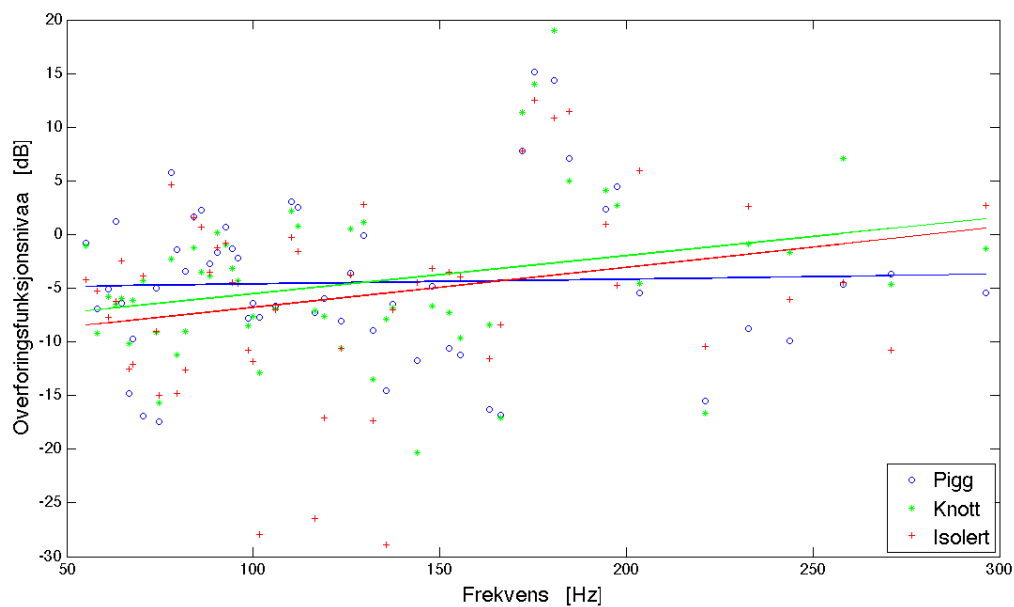




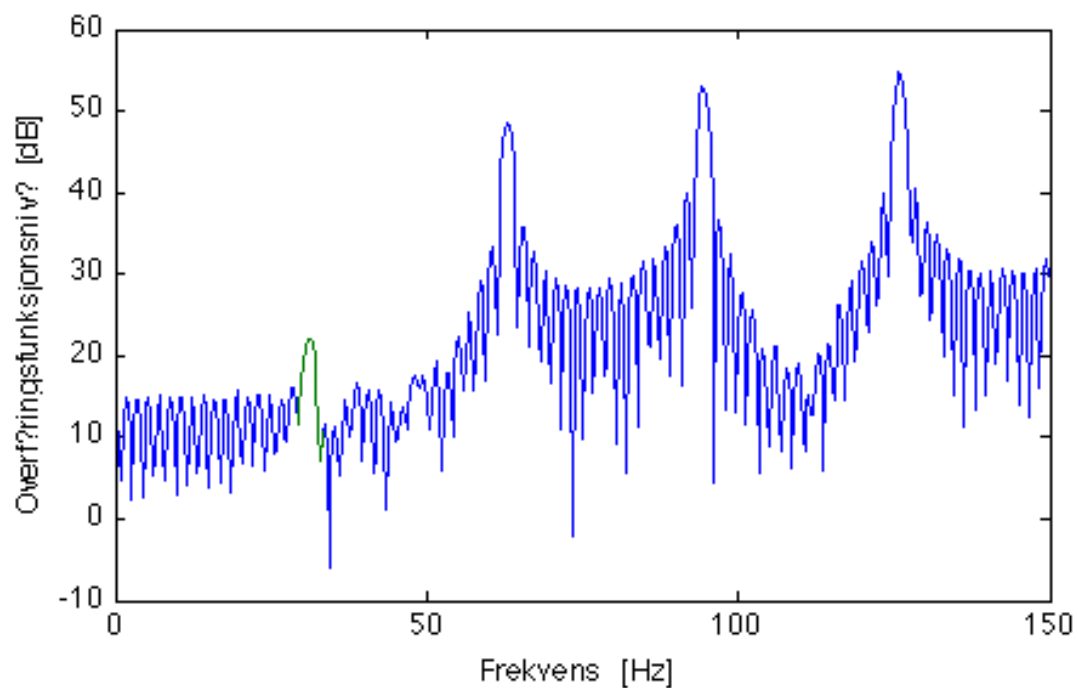
Figur 4.16: Lineær regresjon av målingene i Dokkhuset, 30-50 Hz. Blå linje er pigg, grønn knott og rød isolert.



Figur 4.17: Lineær regresjon av målingene i Dokkhuset, 55-100 Hz. Blå linje er pigg, grønn knott og rød isolert.



Figur 4.18: Lineær regresjon av målingene i Dokkhuset, 55-300 Hz. Blå linje er pigg, grønn knott og rød isolert.



Figur 4.19: Frekvensresponsen til lydtrykket i rommet for tonen B0 (30,8 Hz). I figuren kan man se grunntone, 2., 3. og 4. harmoniske.

# Kapittel 5

## Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene som er funnet og noen av metodene som ble brukt.

### 5.1 Vibrasjoner på scene

Funnene fra vibrasjonsmålingene inneholder resultater som kan være interessante med tanke på lydutstråling og det kan observeres tendenser som gjør at det er interessant å sammenligne med teorien om lydutstråling fra plater i kapittel 2.1 .

Det ble i målingene funnet mulige tegn på bølgelengder. I målingene på tvers kunne det observeres amplitudetopper med medfølgende faseforskjeller på 180 grader. Det kan antas at dette er bøyingsbølger på 30 og 60 Hz med bølgelengde på henholdsvis 360 og 200 cm. I målingene på langs kan fenomenet i figur 4.7 også indikere en resonans ved 30 Hz med bølgelengde på  $186 \cdot 2 = 372$  cm. Hvis man sammenligner disse bølgelengdene med bølgelengdene for tilsvarende frekvenser i luft,  $344/30 = 1156$  cm og  $344/60 = 573$  cm, så ser man at  $\lambda_B < \lambda_{luft}$  for de aktuelle frekvensene. Som forklart i delkapittel 2.1.5 vil dette eventuelt bety at man ikke har sportilpasning, som igjen betyr at område 30 - 60 Hz ligger under grensefrekvensen.

Disse resultatene kan sammenlignes med teori, og det er interessant å se på formel 2.4. Det er ikke kjent hvilken type tre som ble brukt på parketten, så sammenligningen gjøres med tretypene oppgitt i Kinsler et al. [5]. Der er eik og furu oppgitt med hastigheter på henholdsvis 4000 og 3500 m/s. Ut fra disse oppgitte hastighetene antas det at mange tretyper ligger innenfor intervallet 3000 til 5000 m/s. Tykkelsen på plata scenen representerer er også delvis ukjent, da det er vanskelig å si om bøyingsbølgen i hovedsak brer seg i det øverste parkettlaget eller om strukturene henger så sammen at alle lagene svinger med. Ved det første tilfellet vil tykkelsen være ca 3 cm og det andre ca 15 cm. Med disse antakelsene kan intervallet der den teoretisk mulige grensefrekvensen ligger finnes. Ytterpunktene fås ved den høyeste hastigheten og største tykkelsen og den laveste hastigheten og minste tykkelsen. Ved innsetting i formel 2.4 vil man da få intervallet fra

87.6 til 730.5 Hz. At frekvensområdet mellom 30-60 Hz ligger under grensefrekvensen er derfor meget sannsynlig. Dette gjelder ikke bare scenen i Logen, men da verdiene som er brukt sannsynligvis er noen av de høyeste man kan få med tre kan det antas at alle gulv i tre ligger under grensefrekvensen.

I figur 4.1 og 4.2, som viser frekvensresponsene, er det et relativt avansert mønster og mye som kunne ha blitt analysert. Det viktigste som kommer ut av det er uansett at det er tydelige resonanser. At det kan observeres, spesielt i figur 4.1, at resonanstettheten avtar med økende frekvens er overraskende, men grunnen til det har sannsynligvis lite med utstråling å gjøre og vil ikke bli videre diskutert. I hvilken grad det vil oppstå utstråling fra disse resonante svingningene er vanskelig å si. Hvis området 30 til 60 Hz ligger under grensefrekvensen tilsier plateteorien i delkapittel 2.1.5 at det vil være minimal utstråling, spesielt i forhold til det som vil stråles ut av resonansene over grensefrekvensen.

Målingene viser også at det er et lite område rundt eksitasjonspunktet der utsvinget er større enn ellers. Dette gjelder i størst grad på tvers av scenen men det kan også i mindre grad observeres på langs. Sammenlignet med teorien kan dette indikere et vibrerende nærfelt som er beskrevet i kapittel 2.1.6. Da vil det eventuelt være formel 2.6 som bestemmer lyden utstrålt fra dette området. Formelen er forøvrig bare gjeldende for bøyingsbølgetall mye mindre enn bølgetall i luft, altså under grensefrekvensen. Hvis det er slik at frekvensområdet 30-60 Hz ligger under grensefrekvensen betyr dette at man sannsynligvis vil få en utstråling i dette frekvensområdet fra det vibrerende nærfeltet. Denne effekten vil da i hovedsak være bestemt av påført kraft og masse per flateenhet ved eksitasjonspunktet.

Det er også observert at utsvinget avtar betraktelig langs endene av scenen, noe som kan ha noe å si for utstrålingen. Med tanke på fenomenet med kant- og hjørnemodi beskrevet i kapittel 2.1.5, der utstrålingen i hovedsak skjer langs kantene og hjørnene, kan det antas at det ikke er noen fordel for mengden utstrålt effekt fra resonansene at utsvinget ved kantene er så minimalt.

## 5.2 Lydtrykk i rommet

### Logen

Som det kan sees i figur 4.12 viser målingene i Logen en tydelig forskjell i lydtrykk mellom når gulvet blir eksitert og ikke i området 30-80 Hz. Dette er en ganske tydelig indikasjon på at gulvet bidrar med effekt i rommet. Hva som fører til at responsen bare blir forskjellig i dette frekvensområdet kan det være mange grunner til. En sannsynlig grunn kan være det vibrerende nærfeltet diskutert i forrige delkapittel 5.1, altså at den observerte økningen i effekt kommer fra effekten beskrevet i formel 2.6. En slik type utstråling gjelder i følge teorien bare under grensefrekvensen, og som det tidligere er nevnt er det god grunn til å tro at det forsterkede området 30-80 Hz ligger under denne.

Målingene viser ingen store forskjeller i frekvensområdet over 70 Hz. Det kan være flere grunner til dette. Den mest åpenbare grunnen er at gulvet utstråler minimalt med effekt, og at det i hovedsak bare er shakerens bidrag som observeres i begge målingene. En annen grunn kan være at shakerens egenskaper endrer seg mellom når det er kontakt med gulvet eller ikke. I figur 4.11 kan man se at utstrålingen fra shakeren over 70 Hz er relativt god. Dette er nok utstråling fra membranen i shakeren. Når det da settes på en tapp på membranen og dette settes i gulvet, kan det hende at arbeidsvilkårene har endret seg slik at membranen ikke har fått like godt utsving. Utstrålingen vil dermed svekkes. At nivået da er omtrent like høyt kan forklares med at energien er overført til scene og videre utstrålt fra den. At det ikke er en nivåheving over 70 Hz utelukker derfor ikke at det er utstråling fra scenen i dette frekvensområdet.

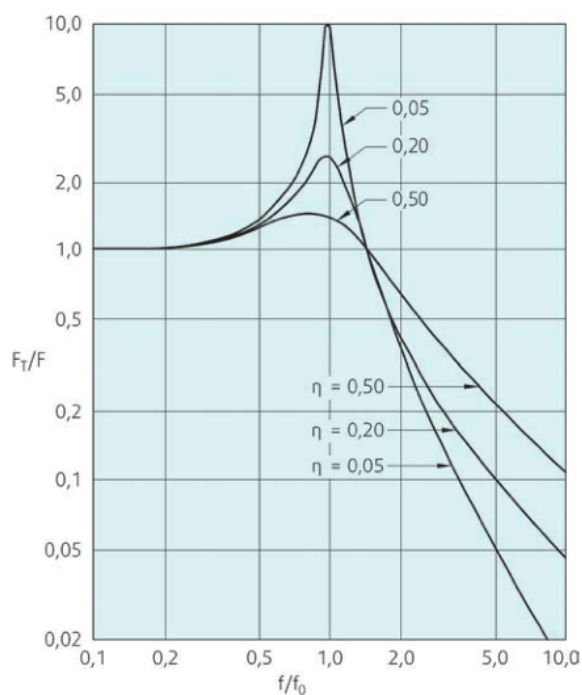
Målingene med shaker kunne med stor fordel ha blitt gjennomført med en kraftmåler. Slik som målingene ble gjennomført var det ingen kontroll på hvor mye kraft gulvet ble utsatt for. Med kraftmåler kunne overføringsfunksjonen mellom påført kraft og lydtrykk ha blitt funnet. Kontroll på kraften kunne også gitt en eksitasjon som sannsynligvis minner mer om en kontrabass. At kraften som ble overført er helt ukjent fører til at gulvet kan ha blitt påført en mye større kraft enn hva som er realistisk med en kontrabass. Flere målinger med varierende kraft kunne også ha vært interessant for sammenligning, da for eksempel en eventuell kvadratisk økning i lydtrykk ved dobling av kraft i stor grad kunne ha underbygget formel 2.6 og at effekten kom fra det vibrerende nærfeltet.

## Dokkhuset

En av intensjonene med målingene i Dokkhuset var å se på forskjellen i lydtrykket mellom når kontrabassen sto med piggen i gulvet og overførte energi og når den i størst mulig grad var isolert fra gulvet med minimal energioverføring. Ved å se på figurene i delkapittel 4.2.2 er det i utgangspunktet ingenting som indikerer en vesentlig forskjell i lydtrykk mellom pigg, knott og isolert. Det kan i hovedsak være tre grunner til dette. Den første er at det verken med pigg, knott eller isolasjon har blitt overført noen vesentlig mengde energi til gulvet. Dette er veldig usannsynlig blant annet fordi det ved kontrabassen tydelig kunne kjennes at scenen vibrerte. Videre kan det være at energien som ble overført ikke ble utstrålt som lyd, og at det dermed ikke var noen forskjell mellom om piggen sto i gulvet eller var isolert. Dette alternativet vil i utgangspunktet gi et svar på det som var intensjonen med målingene, og det vil i så fall bli at det ikke finnes relevant lydutstråling fra den vibrerende scenen. Hvis man ser på figur 4.19 er det liten tvil om det finnes noe utstråling i området under 60 Hz. Hvis det antas at kontrabassen ikke har noe utstråling i dette området er det tvilsomt at det ikke kommer fra energien overført til scene.

Den siste og mest sannsynlige grunnen kan være at knotten og isolasjon ikke hadde noen vesentlig dempende effekt på overføring av vibrasjonen i bassområdet. Figur 4.18 kan indikere dette. Der kan man se en tendens til at overføringen øker med økende frekvens for både pigg og isolert. I figur 5.1 kan en se en generell kurve for vibrasjonsdempning. Der ser man at dempematerialer har en resonansfrekvens, gitt av masse og fjæregenskaper. Som

utgangspunkt burde frekvensene man ønsker å dempe ligge godt over denne frekvensen for å få en god dempning. Man kan også se at ved resonansen til dempematerialet vil man få mer eller mindre forsterkning avhengig av materialets egenskaper [2]. At tendensen til knotten og isolerende materiale er stigende kan rett og slett ha med å gjøre at de nærmer seg denne resonansfrekvensen. Dette betyr igjen at det ikke har vært noe dempning i det ønskede området da overføringsfaktoren er 1 under resonansen. Gummi burde i utgangspunktet kunne ha dempet de dype frekvensene. Grunnen til at resonansfrekvensen sannsynligvis har vært høy er en kombinasjon av at massen til kontrabassen har vært for liten og at stivheten til gummien i knotten og det isolerende materialet har vært for stor. På en annen side burde de 15 cm med skumgummi kanskje bidratt med å lage fjærstivheten i system mindre, men det har sannsynligvis ikke hjulpet i stor nok grad. Ved lignende fremtidige målinger anbefales det derfor å prøve med ganske myk og tykk gummi eller eventuelt isolere kontrabassen på en annen måte ved å for eksempel å henge den opp. Da er i alle fall all kontakt med underlager i utgangspunktet være brutt.



Figur 5.1: Dempkurve hentet fra [2]. Viser grad av overført kraft som funksjon av forholdet mellom frekvens og dempematerialets resonansfrekvens.

Noe som er interessant ved målingene i Dokkhuset er det tydelig hoppet i overføring rundt 60 Hz. Hvis man sammenligner plottet med plottet i figur 1.1 kan samme tendens sees i begge målinger. Dette er som nevnt i introduksjonskapitlet et hopp som sannsynligvis skyldes utstråling fra kontrabassen og at denne utstrålingen dermed er mye kraftigere enn fra scenen. Det finnes derfor mulige forbedringspotensialer for begge disse scenene.

### 5.3 Total vurdering

Bølgelengdene observert i vibrasjonsmålingene kombinert med plateteorien indikerer at scener bygget i tre vil ha en så høy grensefrekvens at strålingsfaktoren vil være så liten at den utstrålte effekten i det ønskede frekvensområdet fra utbredene bøyingsbølger og resonanser vil være minimal. Videre sannsynliggjør lydtrykksmålingene i Logen noe av det samme ved at forskjellen i lydtrykk mellom når scene vibrerte og ikke først og fremst kan observeres i det dype bassområdet under 80 Hz. Dette indikerer dermed at det er det vibrerende nærfeltet rundt eksitasjonspunktet som i stor grad utstråler effekt i frekvensområdet 30 til 60 Hz, da denne effekten kun oppstår under grensefrekvensen. Videre viser målingene i Dokkhuset, og målingene gjort i Berwaldhallen av Guettler et al. [4], at lydtrykket i rommet domineres av utstrålingen fra kontrabassens kropp. Hvis det er slik at utstrålingen fra det vibrerende nærfeltet er hovedbidragsyter av utstrålt effekt under 60 Hz betyr det enten at tilført kraft må økes eller at masse per flateenhet minskes.

Da disse vurderingene av et relativt komplisert problem i utgangspunktet kun er gjort med støtte fra noen få målinger og litt grunnleggende teori for enkle vibrerende plater, finnes det nok mange flere faktorer rundt scenekonstruksjoner som kan påvirke den totale utstrålte effekten i området under 60 Hz enn de som er nevnt her. En faktor kan være hulrommet under scenen. Samtaler med Bård Støfringsdal, som har målt betydelige differanser mellom lydtrykket i hulrom under scenen og lydtrykk i sal i området under 100 Hz, antyder at sammenhengen mellom scenevibrasjoner, lydtrykk i hulrom under scenen og lydtrykk i rom burde utforskes nærmere. Det kan være at vibrasjoner på scenen bygger opp et lydfelt i dette hulrommet. Man kan da se på hulrommet under scenen som et 'naborom' til salen, og dette hulrommet vil dermed få et eget lydfelt. De fleste har nok opplevd at hvis det er lyd i et naborom er bassen som i hovedsak slipper gjennom veggen. Det er derfor ikke umulig at hvis det skapes et lydtrykksfelt under scenen som er sterkere enn i salen vil en stor mengde av de dype frekvensene kunne stråles gjennom scenegulvet og scenefront og ut i salen. I den sammenheng kan det være nyttig å tenke på at hvis etterklangstiden i dette hulrommet blir lengre enn i salen vil det kunne oppstå en basskilde som stråler ut dyp bass unaturlig lenge. Dette skal forøvrig være et problem som kan oppstå i Dokkhuset, spesielt under forsterkede konserter. [9]

Denne oppgaven har ikke hatt fokus på klangkasser, men teorien rundt scenens hulrom fører til litt vurderinger rundt dette. Da klangkasser også vil ha et hulrom burde det utforskes om det er mulig å utnytte dette for å forsterke frekvensene under 60 Hz. Dette hulrommet kan for eksempel lages rimelig lite i forhold til bølgelengden til frekvensene under 60 Hz, noe som gjør at det burde mulig å utnytte klangkassen som en basskasse. Når det gjelder dimensjonene til en klangkasse kan det også være muligheter for at man kan oppnå utstråling fra selve gulvet på kassen. Bølgelengdene målt i Logen viser at laveste svingemodi på scenen sannsynligvis lå et stykke under 30 Hz. Ser man på formel 2.1 burde det med en kombinasjon av liten utstrekning og riktig materialer være mulig å få til at de laveste modiene har resonansfrekvenser over 60 Hz. Da er det mulighet for at

strålingsfaktoren, til tross for at den er under grensefrekvensen, kanskje vil kunne gå mot 1 og muligens over.



# Kapittel 6

## Konklusjon

Hensikten med denne oppgaven var å se på hvordan og i hvilken grad et scenegulv kan utstråle lavfrekvent lyd. Det har i oppgaven blitt fokusert på å gjøre målinger og sammenligne resultatene med kjent teori.

Det har blitt gjennomført en måling der det er sett på vibrasjonsmønsteret på et scenegulv og to målinger der det er sett på lydtrykket i rommet ved eksitering av gulv. Vibrasjonsmålingene ble gjort ved å eksitere gulvet på scene med sinus-sweep fra shaker, der vibrasjonene ble kartlagt ved målinger med akselerometer i flere punkter på gulvet. Vibrasjonsmønstermålingene indikerer at bøyingsbølgene for frekvenser under 60 Hz har kortere bølgelengde enn i luft og dermed ligger under grensefrekvensen. Det ble også observert resonanser og et kraftig vibrerende felt rundt eksitasjonspunktet. At bøyingsbølgene ligger under grensefrekvensen betyr at det sannsynligvis vil være minimalt med utstrålt lyd fra bøyingsbølger som brer seg utover scenegulvet og scenens resonanser.

Den første lydtrykksmålingen ble gjennomført ved å se på forskjellen i lydtrykket i rommet når shakeren eksiterte gulvet og når shakeren ikke var kontakt med gulvet. Målingene viste en endring kun i lydtrykksnivå i frekvensområdet under 50 Hz. Ved sammenligning med teori indikerer dette at det kan være det vibrerende nærfelt rundt eksitasjonspunktet som kan være kilden til det økte lydtrykket. Ved den siste lydtrykksmålingen var det intensjoner om å måle overføringsfunksjonen mellom akselerasjonen på kontrabassen og lydtrykk i rommet, for å se på forskjellen i lydtrykket i rommet når kontrabassen eksiterte gulvet og når den var isolert fra gulvet. Målingene viste ingen relevante forskjeller i lydtrykk mellom de to tilfellene. Dette kunne ha tydet på at det ikke fantes noen målbar utstrålt effekt fra scenen, men grunnen er mest sannsynlig at det isolerende materialet har dempet for dårlig slik at gulvet har blitt satt i vibrasjoner i like stor grad ved begge tilfeller. Målingene viste forøvrig et tydelig skille i lydtrykk over og under 60 Hz, noe som indikerer at det er utstråling fra kontrabassen som dominerer lydtrykket over 60 Hz. Dette bekrefter at det finnes forbedringspotensiale med tanke på å få en flatere respons i rommet.

Da utstråling fra scenegulv er et komplisert og sammensatt problem er det behov for

videre målinger for å understøtte eller avkrefte resultatene og vurderingene som her er presentert. Andre viktige faktorer kan blant annet være å utforske hvilken innvirkning hulrommet under scenen har og hvilken utstråling det er mulig å få fra klangkasser.

# Bibliografi

- [1] Anders Askenfelt. Eigenmodes and tone quality of double bass. *Catgut Acoustical Society Newsletter*, 1982.
- [2] SINTEF Byggforsk. Vibrasjonsisolering av maskiner og utstyr. *Byggforsk detaljblad*, 550.501, 2007.
- [3] Knut Guettler, Anders Buen, and Anders Askenfelt. *Double basses on stage floor*, 2007.
- [4] Knut Guettler, Anders Buen, and Anders Askenfelt. *An in-depth analysis of the double bass-stage floor contact*, 2008.
- [5] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, and James V. Sanders. *Fundamentals of acoustics, Fourth edition*. Wiley, 2000.
- [6] Meliha Mesihovic. Støydempende motordeksel, undersøkelse av støylekkasjer. Master's thesis, NTNU, 2008.
- [7] American national standard. Acoustical terminology. ANSI S1.1-1994, 1994.
- [8] John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis. *Digital signal processing. Principles, Algorithms and applications*. Prentice Hall, 2007.
- [9] Bård Støfringsdal. Samtale med Bård Støfringsdal, 19. Mai 2009.
- [10] Tor Erik Vigran. *Bygningsakustikk : et grunnlag*. Tapir, 2002.

# Appendiks A - Matlabskript for vibrasjonsmålinger i Logen

```
clear all
clf

%Bestemmer hvilken måleserie som skal behandles
maleserie = 'langs';
plotallfreqresp = 1;

nfft = 2^17; %lengden på fft
Fs= 390; %samplingsfrekvens
df = Fs/nfft;

if maleserie == 'tvers'
    %Definerer frekvenser som skal plottes
    freqvec = [32.6,38.6,48.2,58.3,68.4,36.8];
    %Definerer målepunkter og filnavn for filavlesning
    distvec = [7,9,12,14,18,20,24,30,34,40,46,50,60,70,80,90...
,100,120,140,160,180,200,220,240,260,280,300,400,450,500,550,750];
    filenamestart = ['M1_'];
    filenameend = ['cm_h.wmb'];
elseif maleserie == 'langs'
    %Definerer frekvenser som skal plottes
    freqvec = [30.8677,61.7354,32.7032,65.4064,48.9994];
    %Definerer målepunkter og filnavn for filavlesning
    distvec = [9,12,14,18,20,25,30,37,40,50,60,70,80,90,100,120,140,160,180,186];
    filenamestart = ['M2_'];
    filenameend = ['cm_inn.wmb'];
end

indexvec = round(freqvec/df)+1;
%frekvensvektor
fvec = df*[0:nfft/2-1];
```

```

figure(1)
grid on

%omgjør alle wmb-filene til vektorer, tar fft og plotter.
%Henter også ut verdiene til frekvensene oppgitt i freqvec
for ii = 1 :length(distvec)
    filename = [filenamestart,int2str(distvec(ii)),filenameend];
    [h,fs] = loadimp(filename);
    F = fft(h,nfft);
    if plotallfreqresp == 1
        plot(fvec,abs(F(1:nfft/2)))
        xlabel('Frekvens [Hz]','FontSize',18)
        ylabel('Relativ lineær akselerasjon','FontSize',18)
        if maleserie == 'tvers'
            axis([20 120 0 35000])
        elseif maleserie == 'langs'
            axis([20 120 0 50000])
        end
        if ii == 1, hold on; end
    end
    Futsnitt = F(indexvec);
    resmatrise(ii,:) = Futsnitt;
end
if plotallfreqresp == 1
    pause
end

angleresmatrise = angle(resmatrise);

%Beregner fasen og finner differansen
for ii = 1 : length(freqvec)
    absresmatrise(:,ii) = 20*log10(abs(resmatrise(:,ii))/abs(resmatrise(1,ii)));
    angleresmatrise(:,ii) = (unwrap(angleresmatrise(:,ii))*(180/pi));
    angleresmatrise(:,ii) = angleresmatrise(:,ii) - angleresmatrise(1,ii) ;
end

%Plotter frekvens og fase som funksjon av avstanden
% fra første målepunkt.
for ii=1:length(freqvec)
figure(ii+1)
[AX,H1,H2] = plotyy(distvec,absresmatrise(:,ii),distvec,angleresmatrise(:,ii),'plot')
xlabel('Avstand fra eksitasjonspunktet [cm]','FontSize',18)
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Amplitude relativ til 7cm [dB]','FontSize',18)

```

```
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Unwrapped fase [grader]','FontSize',18)
title(['Frekvens: ',num2str(freqvec(ii)),' Hz'])
grid on
end
```

# Appendiks B - Matlabskript for lydtrykksmålinger i Logen

```
clear all
clf

%Henter inn wmb-filer som vektorer
[h1,Fs] = loadimp ('Mik_hengende.wmb');
[h2] = loadimp ('Mik_1meter_h.wmb');
[h3] = loadimp ('Mik_10-15meter_midtsalbakerst.wmb');
[h7] = loadimp ('Mik_5-6meter.wmb');
[h8] = loadimp ('Mik_5-6meter_midtsal.wmb');
[h9] = loadimp ('Mik_5-6meter_venstretsal.wmb');

nfft = 2^17;
df = Fs/nfft;
fvec = df*[0:nfft/2-1];

%FFT av alle m?lingeneog
f1 = abs(fft(h1,nfft));
f2 = abs(fft(h2,nfft));
f3 = abs(fft(h3,nfft));
f7 = abs(fft(h7,nfft));
f8 = abs(fft(h8,nfft));
f9 = abs(fft(h9,nfft));

%Beregner snittet av lydtrykksmålingene.
fmean = (f2+f3+f7+f8+f9)/5;

f1 = 10*log10(f1);
fmean = 10*log10(fmean);

%Plotter frekvensresponsene
plot(fvec,(f1(1:nfft/2)), 'r')
```

```

hold on
plot(fvec,(fmean(1:nfft/2)), 'k')
hold on
axis([20 150 35 50])
xlabel('Frekvens [Hz]', 'FontSize', 14)
ylabel('Relativt lydtrykk [dB]', 'FontSize', 14)
legend('kun shaker, gulvet ikke satt i vibrasjon', ...
'gulvet satt i vibrasjon av shaker, midlet 5 maaleposisjoner')
grid on

fdiff = fmean-f1;

%plotter differansen mellom eksitert og
figure(2)
plot(fvec,(fdiff(1:nfft/2)), 'r')
grid on
axis([20 150 -10 15])
legend off
xlabel('Frekvens [Hz]', 'FontSize', 18)
ylabel('Differanse mellom gulv og fritt eksitert [dB]', 'FontSize', 18)

```



# Appendiks C - Matlabskript for lydtrykksmålinger i Dokkhuset

```
clear all
clf

Fs= 44100; %samplingsrate
nfft = 2^17; %Lengden på FFT
df = Fs/nfft;
fvec = df*[0:nfft/2-1]; %Frekvensvektor

% Vektorer for filavlesning
tonevec = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21];
filenameendpigg = ['pigg.wav'];
filenameendknott = ['knott.wav'];
filenameendisolert = ['isolert.wav'];

% Array med frekvensen til de 21 tonene som har blitt spilt
%(Alle halvtoner mellom H0 p? 31.5Hz til G1 p? 98.8for Hz)
% 1. kolonne er grunntone, 2 . og .3 overtoner.

freqarray2 = [31.4899 63.3081 94.3687...
              33.2955 66.7045 99.8864...
              35.3409 70.5682 105.94...
              37.3864 74.6591 111.9 ...
              39.6591 79.4318 119 ...
              42.3485 84.0152 126 ...
              44.4318 88.295 132.2 ...
              46.4773 92.6136 137.3 ...
              48.0682 95.7955 143.86 ...
              50.7955 101.7045 152.5 ...
              55.1136 110.2272 166.3408 ...
              58.2955 116.59 175.33 ...
```

```

61.2500 123.5      184.7 ...
64.6591 129.5 194.5773 ...
67.8409 135.6818 203.5227 ...
73.9773 147.9546 221.1 ...
78.0682 155.4 232.8 ...
81.7045 163.4090 243.9 ...
86.0227 172.0454 258.0681 ...
90.3409 180.6818 271.0227 ...
98.7500 197.5 296.25];

```

```

% Ytre for-lokke for ? beregne pigg, knott og isolerte hver for seg
%Indre for ? beregne hver av de 21 tonene

```

```

for k = 1: 3
    l = 0;
    for ii = 1: length(tonevec)

        if k == 1
            filename = [int2str(tonevec(ii)),filenameendpigg];
        elseif k == 2
            filename = [int2str(tonevec(ii)),filenameendknott] ;
        else
            filename= [int2str(tonevec(ii)),filenameendisolert];
        end

        [h,fs] = wavread(filename);
        iv = 30000:55000; %Definerer tidsvindu
        % Henter ut m?lingene fra akselerometeret fra kanal 1 og mikrofon fra kanal
        haks = h(iv,1);
        hmik = h(iv,2);

        %FFT
        Faks = (fft(haks,nfft));
        Fmik = (fft(hmik,nfft));

        for j = 1:3
            l = l+1;

            %Finner +/- 2Hz fra senterfrekvensen
            fmax = round((freqarray2(l) +2)/df);
            fmin = round((freqarray2(l) -2)/df);

```

```

%Beregner energien i akselerasjoen
yaks(1) = sum(abs(Faks(fmin:fmax).^2)*df);

% Henter ut verdien til frekvensen fra mikrofonm?lingen
x = round(freqarray2(1)/df);
ymik(1) = sum(abs(Fmik(fmin:fmax).^2)*df);

%Invers a-veiling
% var = freqarray2(1);
% aveidtemp = (12200^2*var^4)/((var^2+20.6^2)*(var^2+12200^2)*sqrt((var^2
% aveid= 2 + 20*log10(aveidtemp);
% aveid = 10^(aveid/20);
% ymik(1) = ymik(1)/aveid;

%Beregner overføringsfunksjon i desibel.
if k == 1
    punktpigg(1) = 10*log10((ymik(1)/yaks(1))) ;
elseif k == 2
    punktknott(1) = 10*log10((ymik(1)/yaks(1)));
else
    punktisolert(1) = 10*log10((ymik(1)/yaks(1)));
end
end
end
end

nmax = length(punktpigg);

%Definerer ønsket området å beregne lineregresjon
ivfvalg = find(freqarray2(1:nmax)>55 & freqarray2(1:nmax<300));
%Beregner linjeregresjon
[A_punktpigg,B_punktpigg,r2] = linreg(freqarray2(ivfvalg),punktpigg(ivfvalg));
[A_punktknott,B_punktknott,r2] = linreg(freqarray2(ivfvalg),punktknott(ivfvalg));
[A_punktisolert,B_punktisolert,r2] = linreg(freqarray2(ivfvalg),punktisolert(ivfvalg))

%Lager linjer av beregnet linjeregresjon
freqplotline = freqarray2(ivfvalg);
line_punktpigg = A_punktpigg + B_punktpigg*freqplotline;
line_punktknott = A_punktknott + B_punktknott*freqplotline;
line_punktisolert = A_punktisolert + B_punktisolert*freqplotline;

```

```

%Plott
figure(2)
h = plot(freqarray2(ivfvalg),punktpigg(ivfvalg),'bo',freqarray2(ivfvalg),...
punktknott(ivfvalg),'g*',freqarray2(ivfvalg),punktisolert(ivfvalg),'r+',...
    freqplotline,line_punktpigg,'b',freqplotline,line_punktknott,'g',...
    freqplotline,line_punktisolert,'r')
set(h(4),'LineWidth',1)
set(h(5),'LineWidth',1)
set(h(6),'LineWidth',1)
h = get(h(1),'Parent');
set(h,'FontSize',14,'FontWeight','Normal')%, 'FontName','Comic Sans MS')
h =          xlabel(['Frekvens      [Hz]'])
set(h,'FontSize',18,'FontWeight','Normal')
h =          ylabel(['Overforingsfunksjonsnivaa      [dB]'])
set(h,'FontSize',18,'FontWeight','Normal')
h = legend('Pigg','Knott','Isolert')
set(h(1),'FontSize',18,'FontWeight','Normal','Location','SouthEast')

```

```

% %Liten sorteringsrutine for sortering av punktene til plott

```

```

z=0
for ii = 1:length(freqarray2)
    for j=1:(length(freqarray2)-ii)
        if freqarray2(j) > freqarray2(j+1);
            temp=freqarray2(j);
            temp2=punktpigg(j);
            temp3=punktknott(j);
            temp4=punktisolert(j);
            freqarray2(j)=freqarray2(j+1);
            punktpigg(j)=punktpigg(j+1);
            punktknott(j)=punktknott(j+1);
            punktisolert(j)=punktisolert(j+1);
            freqarray2(j+1)=temp;
            punktpigg(j+1)=temp2;
            punktknott(j+1)=temp3;
            punktisolert(j+1)=temp4;
        end
    end
end
end

```

```

figure(5)
ivfvalg = find(freqarray2(1:nmax)>30 & freqarray2(1:nmax)<100);

```

```

%Plotter punktplott
h = plot(freqarray2(ivfvalg),punktpigg(ivfvalg),'-bo',freqarray2(ivfvalg),...
punktknott(ivfvalg),'-g*',freqarray2(ivfvalg),punktisolert(ivfvalg),'-r+')

h = get(h(1),'Parent');
set(h,'FontSize',14,'FontWeight','Normal')
h =          xlabel(['Frekvens    [Hz]'])
set(h,'FontSize',18,'FontWeight','Normal')
h =          ylabel(['Overforingsfunksjonsnivaa    [dB]'])
set(h,'FontSize',18,'FontWeight','Normal')
h = legend('Pigg','Knott','Isolert')
set(h(1),'FontSize',18,'FontWeight','Normal','Location','SouthEast')

% Plotter differansen mellom pigg og isolert , og pigg og knott.
figure(6)
plot(freqarray2,punktpigg-punktisolert,'-+k')
hold on
plot(freqarray2,punktpigg-punktknott,'-xb')
axis([30 100 -15 25])
xlabel(['Frekvens    [Hz]'],'FontSize',18)
ylabel(['Differanse    [dB]'],'FontSize',18)
legend('Pigg-isolert','Pigg-knott','FontSize',18)

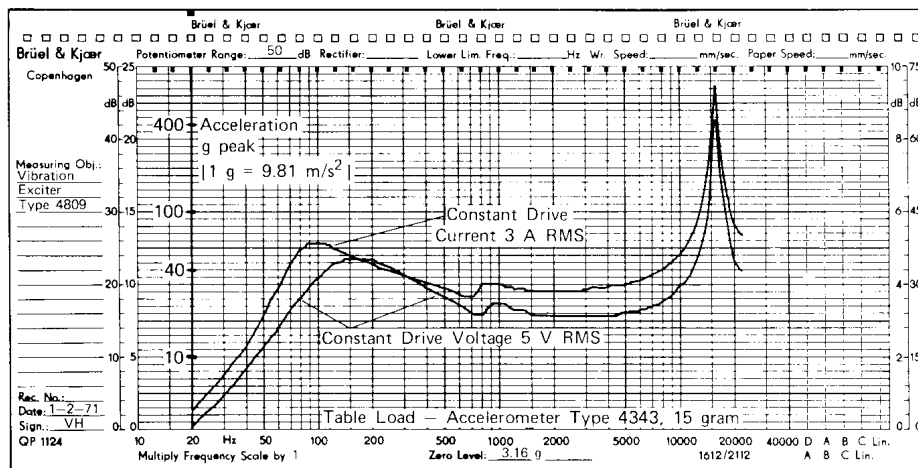
```

# Appendiks D - Data for shaker

Spesifikasjon og frekvensrespons for Brüel & Kjær shaker, type 4809.

## Specifications 4809

<b>RATED FORCE:</b> 44,5N (10lb) sine peak 60N (13,5lb) with forced air cooling	<b>DYNAMIC FLEXURE STIFFNESS:</b> 12N/mm (69lb/in)	<b>FASTENING THREAD:</b> 5 × 5/16" – 18UNC for M5 and 10–32 UNF inserts
<b>FREQUENCY RANGE:</b> 10Hz to 20kHz bare table	<b>MAXIMUM INPUT CURRENT:</b> 5 A RMS 7 A RMS with forced air cooling	<b>TOTAL WEIGHT:</b> 8,3 kg (18,3 lb)
<b>AXIAL RESONANCE FREQUENCY:</b> 20kHz bare table	<b>HEAD CONSTANT:</b> $\sim 6,4 N_{\text{peak}}/A_{\text{peak}} \sim 0,16 A_{\text{peak}}/N_{\text{peak}}$	<b>DIMENSIONS:</b> Diameter: 149 mm (5,87 in) Height: 143 mm (5,63 in)
<b>MAXIMUM BARE TABLE ACCELERATION:</b> 736 $\text{ms}^{-2}$ (75 g) 1000 $\text{ms}^{-2}$ (100 g) with air cooling	<b>COIL IMPEDANCE:</b> 2 $\Omega$ approx. at 500Hz (bare table)	<b>ACCESSORIES INCLUDED:</b> Thread inserts (M5).....YS 0810 Thread inserts (10–32).....YS 0811 Insert mounting tool.....QA 0061 Tap for 10–32 UNF.....QA 0029 Studs, nut and screw.....DB 1416 Instruction Manual
<b>MAXIMUM DISPLACEMENT:</b> 8 mm (0,315 in) peak-to-peak	<b>STRAY MAGNETIC FIELD:</b> 20 × 10 <sup>-3</sup> T at table face 8 × 10 <sup>-3</sup> T at 12,7 mm (0,5 in) above table face	<b>ACCESSORIES AVAILABLE:</b> Service Manual
<b>MAXIMUM VELOCITY:</b> 1,65 $\text{ms}^{-1}$ (65 $\text{ins}^{-1}$ ) peak	<b>TABLE SIZE:</b> 29 mm (1,14 in) diameter	
<b>DYNAMIC WEIGHT OF MOVING ELEMENT:</b> 60 g (0,132 lb)		

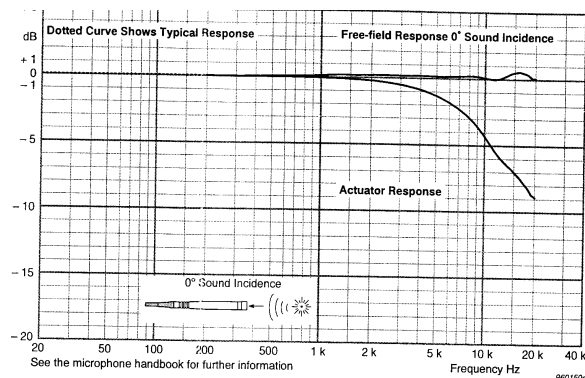


# Appendiks E - Data for målemikrofon

Datablad for målemikrofon 4165. Det er type 4166 som er brukt i målingene, men datablad for denne var ikke å oppdrive. Det skal ikke være relevante forskjeller mellom modellene 4166 og 4165

**type 4165** *BC-2111*  
 Bruel & Kjaer Calibration Chart  
 Serial No: **2068935**  
 Open-circuit Sensitivity\*, S<sub>o</sub>: **-26.8** dB re 1V/Pa  
 Equivalent to: **45.8** mV/Pa  
 Uncertainty, 95 % confidence level: 0.2 dB  
 Capacitance: **19.4** pF  
 Valid At:  
 Temperature: 23 °C  
 Ambient Static Pressure: 101.3 kPa  
 Relative Humidity: 50 %  
 Frequency: 251.2 Hz  
 Polarization Voltage, external: 200 V  
 Sensitivity Traceable To:  
 DPLA: Danish Primary Laboratory of Acoustics  
 NIST: National Institute of Standards and Technology, USA  
 IEC 1094-4: Type WS 2 F  
 Environmental Calibration Conditions:  
 101.5 kPa 23 °C 39 % RH  
 Procedure: 770035 Date: 16. Mar. 1998 Signature: *RL*  
 \*K<sub>0</sub> = -26 - S<sub>0</sub> Example: K<sub>0</sub> = -26 - (-26.2) = + 0.2 dB

*SINTEF  
 Tele-og data.*



# Appendiks F - Datablad for akselerometere

## Datablad for akselerometer 4375

**Calibration Chart for B & K Kjær**  
**Accelerometer Type 4375**  
~~1131763~~ **BJ4026** B K

**Serial No.** 1131763 ..... Nærum Denmark

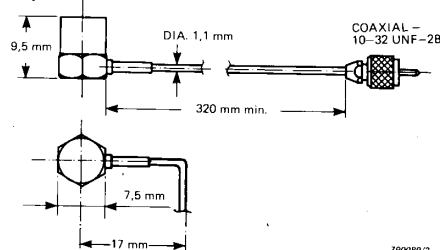
**Reference Sensitivity at 50 Hz, 100 ms<sup>-2</sup>**  
 and ..... 23 °C  
**Charge Sensitivity\*** 0,361 pC/ms<sup>-2</sup> or 3,54 pC/g  
**Voltage Sensitivity\*** (excl. AO 0038)  
 ..... 0,481 mV/ms<sup>-2</sup> or 4,72 mV/g  
**Voltage Sensitivity\*** (incl. AO 0038)  
 ..... 0,419 mV/ms<sup>-2</sup> or 4,11 mV/g  
 (Voltage Preamp. input Capacitance: 3,5 pF)  
**Capacitance** (incl. integral cable) ..... 750 pF  
**Capacitance of Extension Cable AO 0038** ..... 111 pF  
**Maximum Transverse Sensitivity**  
 (at 30 Hz, 100 ms<sup>-2</sup>) ..... 3,7 %  
**Undamped Natural Frequency** ..... 9,7 kHz  
**Typical Mounted Resonance Frequency** ..... 55 kHz  
 See reverse side of chart for frequency response curve  
**Typical Transverse Resonance Frequency**, using Exciter Table 4290, with accelerometer mounted on a beryllium cube by a M3 steel screw, mounting torque 0,6 Nm and greased surfaces: ..... 14 kHz  
**Polarity** is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer  
**Resistance** minimum 20000 MΩ at room temperature  
**Date** 8.V. 09.27. Signature J.A.  
 1 g = 9,807 ms<sup>-2</sup> or 10 ms<sup>-2</sup> = 1,02 g

\* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D.C.

BC 0110-12

**Environmental:**  
**Humidity:** Welded, Sealed  
**Temperature Range:** -74 to +250°C (-100 to +482°F)  
**Max. Shock Acceleration:** 250000 ms<sup>-2</sup> peak  
**Typical Magnetic Sensitivity** (50 Hz—0,03 T):  
 30 ms<sup>-2</sup>/T  
**Typical Acoustic Sensitivity:** 0,04 ms<sup>-2</sup> at  
 154 dB SPL (2—100 Hz)  
**Typical Base Strain Sensitivity** (at 250 με in base  
 plane): 0,005 ms<sup>-2</sup>/με  
**Typical Temperature Transient Sensitivity**  
 (3 Hz LLF): 2 ms<sup>-2</sup>/°C  
**Specifications** obtained in accordance with ANSI  
 S2.11-1969

**Physical:**

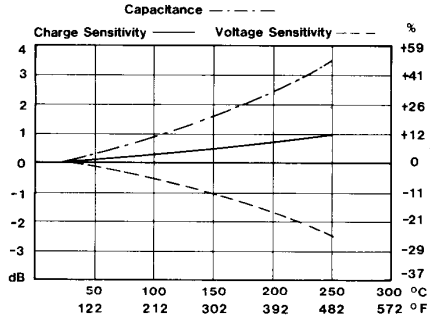


790089/2

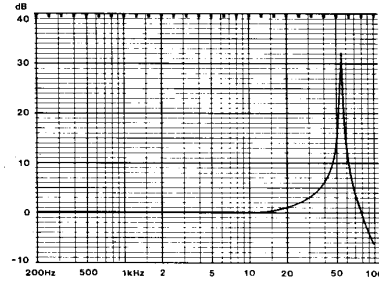
**Material:** Titanium  
**Weight:** 2,6 gram excl. cable  
**Mounting Thread:** M3  
**Mounting Screw:** M3 x 8 mm, steel  
**Mounting Surface Flatness:** < 3 μm  
**Mounting Torque:**  
 Normal 0,6 Nm  
 Max. 1,0 Nm  
 Min. 0,3 Nm  
**Seismic Mass:** 0,67 gram  
**Center of Gravity of Seismic Mass:** 6,9 mm  
 from mounting surface on central axis  
**Center of Gravity of Accelerometer:** 5,4 mm  
 from mounting surface on central axis  
 For further information see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Pre-amplifier" handbook Pat. DK 131401



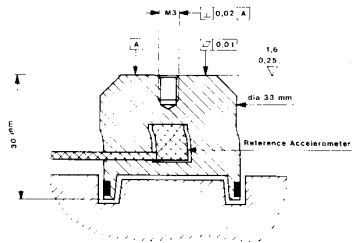
**Typical Temperature Sensitivity Deviation:**  
(Piezoelectric Material PZ27)



**Typical Frequency Response Curve of 4375**  
(Corrected for response of 4290):



**Schematic Drawing of Exciter 4290:**  
(Modified laboratory reference)



**Material:** Stainless steel

**Mass of Exciter table:** 180 gram

**Mounting Technique:**

Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness

If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.

Fasten the 4375 using a 3 mm stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.

A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.

For other types of mounting, see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

# Datablad for akselerometer 4369

## Calibration Chart for Accelerometer Type 4369



Serial no. 550819  
 Reference Sensitivity at 50 Hz at 22 °C  
 Cable Capacitance of 107 pF  
 Charge Sensitivity\*\*  
2.14 pC/ms<sup>-2</sup>, or 21.0 pC/g\*  
 Voltage Sensitivity\*\*  
1.68 mV/ms<sup>-2</sup>, or 16.5 mV/g  
 Capacitance (including cable) 123 pF  
 Maximum Transverse Sensitivity at 30 Hz 0.9 %  
 Weight 14.0 grams

Undamped natural frequency 3.9 kHz  
 For Resonant Frequency mounted on steel exciter of 180 grams and for Frequency Response relative to Reference Sensitivity, see attached individual Frequency Response Curve.

Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer.

Resistance minimum 20,000 Megohms at room temperature

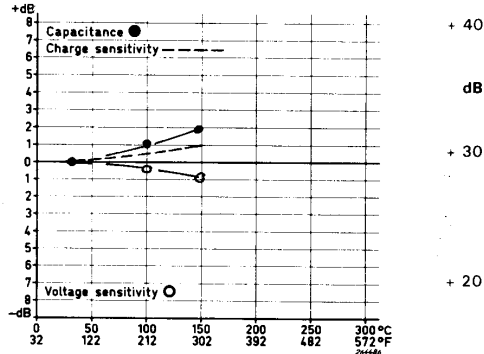
Date 10-7-75 Signature O.H.

\* 1 g = 9.807 ms<sup>-2</sup>       $\frac{mV}{g} = \frac{mVRMS}{g_{RMS}} = \frac{mV_{peak}}{g_{peak}}$

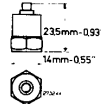
\*\* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D. C.

BC 0084

## Individual Temperature Sensitivity Error in dB rel. the Reference Values.



### Physical:

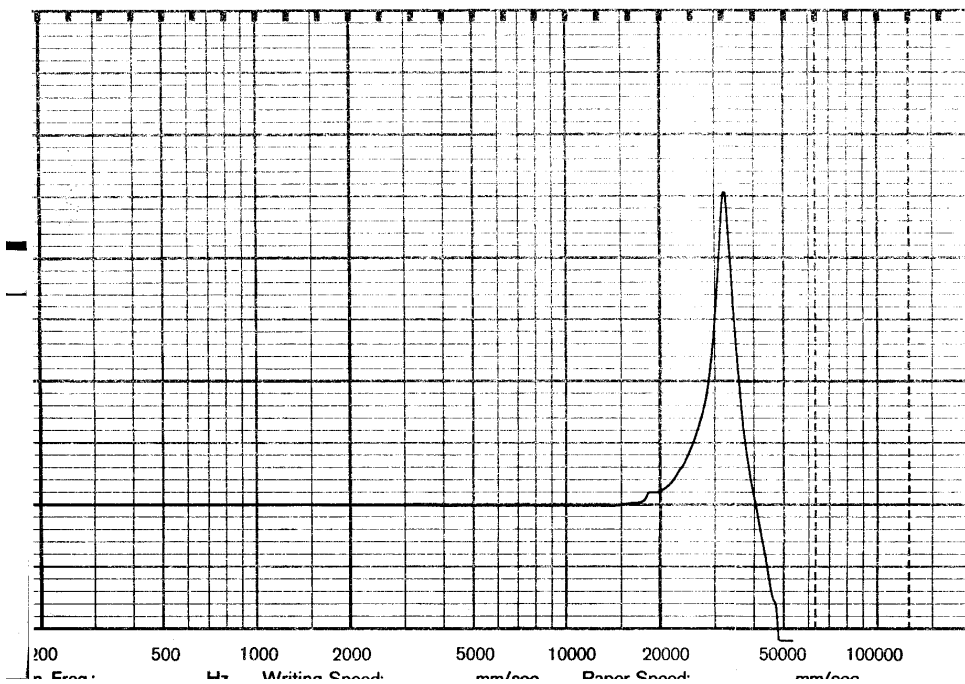


Material: Titanium  
 Mounting Thread: 10-32 NF  
 Electrical Connector: Normal coaxial 10-32 thread

### Environmental:

Humidity: Sealed  
 Max. Temperature: 177°C or 350°F  
 Max. Continuous Sinusoidal Acc. (peak): 30,000ms<sup>-2</sup> or 3000g  
 Max. Shock Acceleration: 100,000 ms<sup>-2</sup> or 10,000g  
 Magnetic Sensitivity (50 Hz): < 5 ms<sup>-2</sup>/T or 0.05 g/kgauss  
 Temperature Transient Sensitivity (typical): (Low Lim. Freq.: 3 Hz) 1 ms<sup>-2</sup>/°C or 0.1 g/°C  
 Base Strain Sensitivity (typical): 0.008 ms<sup>-2</sup>/μ strain or 0.0008 g/μ strain  
 For further information see instruction book

Date: \_\_\_\_\_ Potentiometer: \_\_\_\_\_ Zero Level: \_\_\_\_\_ D A B C Lin.



# Appendiks G - Målepunkt for vibrasjonsmålinger i Logen

Målepunkt for vibrasjonsmålinger i Logen, oppgitt i cm fra eksitasjonspunktet.

<i>Tvers</i>	7	9	12	14	18	20	25
	30	37	40	50	60	70	80
	90	100	120	140	160	180	186
<i>Langs</i>	7	9	12	14	18	20	24
	30	34	40	46	50	60	70
	80	90	100	120	140	160	180
	200	220	240	260	280	300	400
	450	500	550	750			