



ROMAKUSTIKK

Jens Jørgen Dammerud

3. utgave

© 2013 Jens Jørgen Dammerud

INNHold

1	Introduksjon	1
2	Grunnlag for å studere lyd i rom	2
2.1	Bølgeakustikk, geometrisk akustikk og statistisk akustikk	2
2.1.1	<i>Ett rom, to forskjellige typer lydfelt</i>	3
2.2	Undersøkelse av akustisk respons	4
2.3	Opplevde effekter av reflektert lyd	4
2.3.1	<i>Akustisk forandring av lyd i forhold til tid</i>	5
2.3.2	<i>Akustisk forandring av lyd i forhold til frekvens</i>	5
2.3.3	<i>Akustisk forandring av lyd i forhold til retning og perspektiv</i>	5
2.3.4	<i>Akustisk forandring av lyd i forhold til romopplevelse</i>	5
2.3.5	<i>Andre effekter av reflektert lyd</i>	5
2.3.6	<i>Precedence-effekten og to lydstrømmer</i>	5
2.3.7	<i>Etterklang</i>	8
2.3.8	<i>Oppfattelse av enkeltrefleksjoner – ekko og flutter-ekko</i>	9
2.3.9	<i>Variasjon i mange dimensjoner og innblikk i fysiske forhold</i>	9
2.3.10	<i>Benades «Central Paradox»</i>	10
2.3.11	<i>Jakten på det optimale rom</i>	10
3	Akustikk i små rom	11
3.1	Rommoder (stående bølger)	11
3.1.1	<i>Trykksone</i>	14
3.1.2	<i>Trykkbølge og partikkelhastighetsbølge</i>	14
3.1.3	<i>Igangsetting av moder avhengig av høyttalertype/lydkilde</i>	15
3.1.4	<i>Rommoders påvirkning av diffusjon, absorpsjon, romproporsjoner og romstørrelse</i>	17
3.1.5	<i>Bonellos kriterium</i>	18
3.1.6	<i>Utrekning av frekvens til moder</i>	19
3.1.7	<i>Reduksjon av effekten av stående bølger</i>	20
3.1.7.1	<i>Bruk av mer enn én sub i små rom</i>	20
3.2	Interferens mellom direktelyd og refleksjon	21
3.3	Etterklang og totalt lydnivå	26
3.4	Diffusjon og absorpsjon	26
3.5	Elektronisk korleksjon av akustisk romrespons	27
3.6	Lytterom	28
3.6.1	<i>Panning</i>	28
3.6.2	<i>Inne-i-hodet-lyd</i>	29
3.6.3	<i>Sidevegger</i>	29
3.6.4	<i>Frontvegg og bakvegg</i>	30
3.6.5	<i>Himling og gulv</i>	30
3.6.6	<i>Plassering av høyttalere</i>	31
3.6.7	<i>Etterklang</i>	31
3.7	Design av kontrollrom	31
3.7.1	<i>LEDE – Live End Dead End</i>	31
3.7.2	<i>Refleksjonsfri sone (RFZ)</i>	32
3.7.3	<i>Non-environmental design</i>	32
3.7.4	<i>Toyashima design</i>	33

3.7.5	Høy grad av diffusjon	34
3.7.6	Anbefalinger til kontrollrom	34
3.7.6.1	Etterklangstid og tidlige refleksjoner.....	34
3.7.6.2	Foretrukket frekvensrespons for høyttalere i rom.....	35
3.8	Innspillingsrom	36
3.8.1	Justerbar akustikk	36
3.9	Jakten på det perfekte lytterom og kontrollrom	37
4	Akustikk i store rom.....	39
4.1	Forholdet mellom direktelyd og reflektert lyd	39
4.2	Etterklangstid, T_{60} eller T	40
4.2.1	Sabines formel for etterklangstid	41
4.2.2	Anslå absorpsjonsareal basert på målt etterklangstid	43
4.2.3	Alternative formler for etterklangstid	43
4.3	Nivå til total akustisk respons og reflektert lyd	43
4.3.1	Kritisk avstand.....	45
4.4	Retning til refleksjoner.....	47
4.5	Design av teatre operahus og konsertsaler	48
4.5.1	Teatre.....	48
4.5.2	Kirker.....	49
4.5.3	Operasaler	50
4.5.4	Konsertsaler.....	51
4.5.5	Kinosaler	55
4.5.6	Saler for både akustisk og forsterket musikk.....	55
4.5.7	Forhold på scenen	56
5	Måling av et roms akustiske respons	57
5.1	Enkle vurderingsteknikker	57
5.2	Måling ved hjelp av rosa støy og RTA (eldre metode).....	57
5.3	Måling av rommets impulsrespons (nyere metoder).....	58
5.3.1	Lage impulsive lyder og ta opp responsen direkte	58
5.3.2	FFT (Source Independent).....	59
5.3.3	MLS.....	59
5.3.4	Sinussveip.....	59
5.3.5	Målehøyttaler og målemikrofon	60
5.3.6	Målinger med og uten publikum.....	60
5.3.7	Relevans til impulsrespons	61
5.3.8	Grafer for impulsrespons	61
5.3.9	Frekvensrespons	63
5.3.9.1	Tidsvindu	66
5.3.10	Waterfall/fosseplot	67
5.3.11	Eksempler på programvare.....	69
6	Auralisering av et roms akustiske respons.....	70
7	Romakustiske parametre	71
7.1	Etterklangstid, T (T_{60} , T_{30} og T_{20})	71
7.1.1	Måling av etterklangstid	71
7.1.2	Måling av etterklangstid og sammenlikning opp mot Sabines formel.....	74

7.1.3	Oktavbåndsverdier.....	76
7.1.4	Tidlig etterklangtid, EDT.....	76
7.1.5	EDT/T.....	77
7.1.6	Bass Ratio (BR) og Treble Ratio (TR).....	77
7.1.7	Totalt lydnivå og akustisk forsterking, G.....	77
7.1.8	Tidsmessig tydelighet.....	78
7.1.9	Akustisk sentertid, T_s	79
7.1.10	Lateral fraction, LF, og interaural crosscorrelation, IACC.....	80
7.1.11	Sceneparametere, ST.....	80
8	Lydbidrag fra overflater og objekter.....	81
8.1	Refleksjon og diffusjon.....	81
8.1.1	Spekulær refleksjon.....	81
8.1.1.1	Grensefrekvens for spekulær refleksjon og diffraksjon.....	82
8.2	Diffusjon.....	84
8.2.1	Diffusjon på grunn av geometrisk form.....	85
8.2.2	Diffusjon på grunn av interferens.....	85
8.2.3	Lavfrekvent diffusjon på grunn av romform.....	86
8.2.4	Schroeder-diffusor (phase-grating diffusor).....	87
8.2.5	Måling av diffuserende egenskap.....	88
8.2.5.1	Spredningskoeffisient.....	89
8.3	Absorpsjon av lyd.....	89
8.4	Tre hovedmekanismer for absorpsjon av lyd.....	90
8.5	Friksjonsabsorbenter.....	90
8.5.1	Porøs absorbent – nedbremsing av luftpartiklene.....	90
8.5.2	Mikroperforeerte absorbenter.....	93
8.6	Resonante absorbenter.....	94
8.6.1	Panelabsorbent.....	94
8.6.2	Helmholtz-absorbent.....	95
8.7	Effekten av møbler, tekstiler og eggekartonger.....	96
8.8	Måling av absorpsjonskoeffisient.....	97
8.9	Nivå til refleksjoner.....	97
9	Simulering av et roms akustiske respons.....	98
9.1.1	Speilkildemetoden.....	98
9.1.2	Strålegangsmetode.....	99
9.1.3	Inndata.....	100
9.1.4	Utdata.....	100
9.1.5	Utfordringer.....	100
9.1.6	Fordeler.....	101
9.1.7	Eksempler på programvare.....	101
10	Kontroll av støy.....	102
10.1	Luftlyd, trinnlyd og vibrasjoner.....	102
10.2	Lydisolasjon.....	102
10.3	Ventilasjonsstøy, støy fra utstyr.....	102
10.3.1	Noise rating (NR)-kurver.....	103
11	Problemløsning innen romakustikk.....	104

12	Litteratur.....	106
13	Figurkilder.....	108

1 INTRODUKSJON

Et rom setter sitt preg på lyd som generert inne i rommet. Dette må lydteknikere forholde seg til for eksempel i kontroll, ved lydopptak, i mastringprosessen og ved forsterking av lyd i konsertlokaler. Et lite rom setter et ganske forskjellig preg på lyden i forhold til et stort rom. Som lydteknikere vil det være nyttig og effektivt å forstå hvordan rommet setter preg på lyden for å oppnå de lytteopplevelsene man sikter mot. Dette kompendiet har fokus på selve rommet, men ser også noe på samspillet mellom høyttaler og rom.

Mål for faget:

- Forståelse for hvordan ulike rom setter sitt preg på lyden.
- Kjenne til begrep og fenomen som diskuteres blant akustikere som jobber primært med akustisk lyd i rom.
- Anslå akustiske forhold basert på for eksempel visuell/geometrisk informasjon og aktuelle materialer. Gjøre mer detaljerte undersøkelser ved hjelp av måleverktøy.
- Dimensjonering og spesifisering av løsninger ved hjelp av regning.

Reflektert lyd i rom blir fort komplekst og vår forståelse av hva som vil være akustiske forhold og hvordan dette vil påvirker lytteopplevelsen er ofte begrenset. Mye av årsaken til dette er at det er vanskelig å få bred erfaring med mange ulike rom, det er vanskelig raskt å gjøre endringer på rommet for å teste forskjell i opplevelse (A/B-testing er ofte dyrt og tidsrommet mellom forhold A og B er langt, ofte mange uker, måneder eller år). Samtidig er det vanskelig å måle hva vi faktisk opplever. I mange situasjoner har vi også problemer med å måle relevante fysiske akustisk forhold. Ofte måler vi på fysiske forhold som er langt fra faktiske forhold siden det er svært vanskelig eller dyrt å gjøre målinger av for eksempel 3-dimensjonal akustisk respons til rommet fra en (bestemt) fiolin i en fullsatt konsertsal. I stedet måler vi ofte i stedet med en høyttaler i tom sal og bruker dette som grunnlag for å forstå opplevde forhold.

Målet med dette kompendiet er å skape en viss grunnleggende oversikt over hva som kan være årsaken når visse lydproblemer opplever. Det finnes sjelden enkle løsninger og enkle tips som vil fungere for alle situasjoner av romakustiske forhold. Hva som er riktig tiltak vil ofte komme an på situasjonen og hva vi ønsker å oppnå. Vi må ofte bruke vår grunnleggende forståelse til å få en idé om hva som kan foregå akustisk i et bestemt rom. Basert på dette kan vi finne ut hvilke type tiltak som har størst potensiale til å kunne gi forhold i retning slik vi ønsker det. Å designe gode rom for ulik bruk vil derfor fortsatt kunne regnes som en *kunst* som krever mer erfaring og kunnskap enn dette kompendiet kan gi.

Dette kompendiet er et supplement til læreboka som brukes i faget, *Master Handbook of Acoustics* (Everest & Pohlmann (2009), se litteraturlisten i kapittel 12), og kompendiet bygger på kompendier gitt til Elektroakustikk. Deler av stoffet fra Elektroakustikk er også inkludert i dette kompendiet. I kompendiet vil det refereres til figurer og kapitler i *Master Handbook of Acoustics*.

2 GRUNNLAG FOR Å STUDERE LYD I ROM

Grunnleggende beskrivelse av direktelyd og reflektert lyd i rom er gitt i kompendiet for Elektroakustikk. Dette kapitlet gir en oversikt over sentrale emner for lyd i rom. Dette inkluderer hvordan vi ser på lydbølger for å kunne lage enkle/håndterbare beskrivelser av hvordan lyden oppfører seg inne i et lukket rom. Vi vil også kort ta for oss opplevelse av lyd i rom.

Lyd som inne i et rom er som innesperret energi. En lydbølge som treffer en hard vegg vil bli reflektert tilbake. Reflekterte bølger skaper effekter som rommoder (stående bølger), kamfilter og etterklang. Måten lyden blir reflektert tilbake på er avhengig av størrelse og form til flaten og flatens lydabsorberende egenskaper. Ujevne flater, sett i forhold til bølgelengde til lyden, fører til at lydbølgen blir brutt opp i ulike retninger og vi får diffusjon. Ved å øke absorpsjonsevnen til overflatene i rommet får de reflekterte bølgene mindre betydning. Diffusjon endrer også nivået til reflektert lyd i én bestemt retning. Å endre flatenes evne til å absorbere og diffusere vil derfor forandre hvordan rommet setter sitt preg på lyden. Dette i tillegg til å endre på rommets form og oppbygning er hva vi må bestemme oss når rom skal designes for gode lydforhold. Kapittel 6, 7, 9 og 10 i læreboka tar for seg refleksjon, diffraksjon, diffusjon og kamfilter som fenomen. Rommoder og etterklang blir beskrevet i kapittel 3 og 4.

2.1 Bølgeakustikk, geometrisk akustikk og statistisk akustikk

I bølgeakustikk studeres lydbølger som hva det faktisk er – lydbølger. Ved å inkludere alle bølger hver for seg og hvordan de faktisk brer seg utover i rommet får vi inkludert faseforhold mellom bølger og fenomen som diffraksjon. Dette er nødvendig for å beskrive for eksempel kamfilter og rommoder og lydbølger som treffer for eksempel en liten flate. Med kun noen få bølger går det bra å holde oversikt over bølger individuelt, men i et lukket rom får vi svært mange reflekterte bølger som samler seg opp over tid. Dette gjør det vanskelig eller svært tid-/ressurskrevende å holde orden på hver enkelt bølge og klare å modellere den fysisk korrekt.

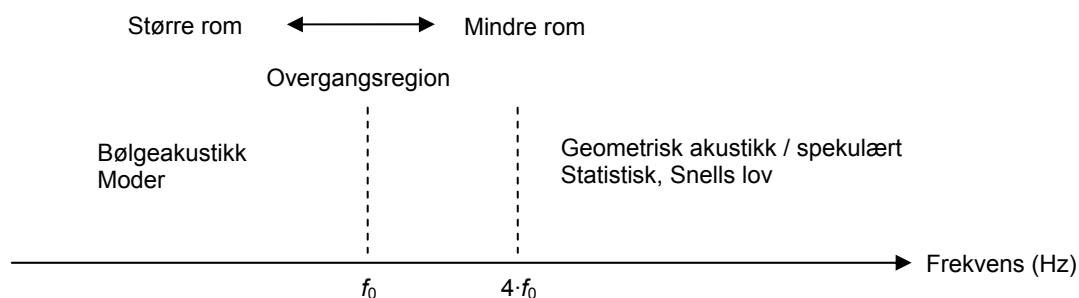
Fram til for få år siden var det alt for ressurskrevende å gjøre fysisk bølgemodellering som beskrevet over. I det siste er datamaskiner blitt raske nok til fysisk å modellere direktelyd fra høyttalere og refleksjoner fra høyttalerkabinettet. Men å modellere alle reflekterte lydbølger inne i et rom er fortsatt en veldig krevende oppgave. Det er derfor gjort forenklinger. En av forenklingene er å late som at lydbølger heller oppfører seg som en lysstråle/laserstråle (spekulære refleksjoner som følger Snells lov for store jevne flater). Dette kalles geometrisk akustikk. Da forsvinner alle bølgeeffekter som diffraksjon, refraksjon og informasjon om fase, men dette gjør det mye mindre ressurskrevende å holde orden på lydutbredelse i et rom. Å se på lyd som lysstråler er mest gyldig når dimensjonene til selve rommet og objekter i rommet er store og helt flate (jevne) i forhold til bølgelengden til lyden. Dette betyr at den forenklingen som er gjort i geometrisk akustikk er et mindre problem i diskanten enn bassen. I de fleste tilfeller fører dette til at geometrisk akustikk kun er tilstrekkelig gyldig i mellomtone og diskant.

Med statistisk akustikk er det gjort enda mer forenklinger. Da ser vi ikke lenger på hver enkelt lydbølge i rom, men kun på den totale akustiske responsen fra rommet. En av forutsetningene for å se på kun total respons er at reflektert lyd (ikke direktelyd) skal være så å si lik uansett hvor i rommet vi befinner oss. For rom som har enkel geometrisk form og mange lyddiffuserende flater vil vi komme nær en slik beskrivelse. Vi vil ha det som kalles et diffust lydfelt. I et diffust lydfelt har vi

lydbølger fra alle retninger ved enhver posisjon inne rommet og den totale lyden i rommet er lik uansett hvor i rommet vi befinner oss. Dette er selvfølgelig en kraftig forenkling som sjelden er helt gyldig – spesielt i bassen – men en slik forenkling gjør det veldig enkelt å gjøre noe enkle utregninger på lyd i lukkede rom; blant annet finne rommets etterklangstid og nivået til den totale reflekterte lyden (etterklengen). Statistisk akustikk er mest gyldig når geometrisk akustikk også er gyldig, fordi bølgeeffekter bidrar til å redusere graden av diffusjon i rom. Siden statistisk akustikk fører til vi kan beregne akustiske forhold kun ved hjelp av enkle formler, er denne tilnæringsmetoden ganske utbredt (se kapittel 4).

2.1.1 Ett rom, to forskjellige typer lydfelt

For lyd med lang bølgelengde, har bølgenaturen til lyden stor betydning. Jo mindre rommet er, desto mer betydelig blir bølgeeffekter som for eksempel rommoder (stående bølger i rom). For høyere frekvenser kan vi betrakte lydbølgene som om de var lysstråler (spekulære refleksjoner, «lydstråler»). Vi kan dermed se på lyd enten i form av bølgeakustikk eller geometrisk akustikk avhengig av frekvensen til lyden. Dette er forsøk illustrert i figur 1. Dersom vi øker størrelsen til rommet, vil den geometriske akustikken være gyldig i et større frekvensområde. Under frekvensen f_0 vil bølgeakustikk og effekter som rommoder (stående bølger i rommet) dominere, mens over f_0 vil rommoder ha liten betydning. Over frekvensen lik omtrent $4 \cdot f_0$ kan lydbølger behandles som lysstråler (spekulær refleksjon).



Figur 1: Frekvensområder hvor bølgeakustikk er dominerende og geometrisk akustikk gyldig.

Hvor grensefrekvensen f_0 går mellom bølgeakustikk og geometrisk akustikk kan anslås ved hjelp av en formel, se likning (1). Denne grensefrekvensen kalles Schroeders grensefrekvens. Vi ser fra formelen at et større rom fører til at f_0 blir mindre. Lengre etterklangstid, T , fører til det motsatte. Grunnen at til f_0 blir lavere med lengre etterklangstid er at lang etterklangstid skyldes et udempet rom (lite akustisk absorpsjon) som fører til at rommodene blir kraftigere og mer betydningsfulle (se delkapittel 3.1 for mer detaljer).

$$f_0 = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (1)$$

Likning (2) er en enklere variant for å anslå over hvilken grensefrekvens bølgeeffekter ikke lenger er betydelige. Denne formelen er kun basert på den minste dimensjonen til et rom og gir i de fleste praktiske tilfeller cirka samme grensefrekvens som likning (1). Lydhastigheten er betegnet som c og minste dimensjonen til rommet er betegnet som L_{\min} . Forenklet er $3 \cdot c$ cirka lik 1000 (1029).

$$f_0 = \frac{3 \cdot c}{L_{\min}} \approx \frac{1000}{L_{\min}} \quad (2)$$

2.2 Undersøkelse av akustisk respons

For å undersøke den akustiske responsen til et rom er det nyttig med verktøy for å undersøke hva selve responsen er og måter å presentere den på. Den mest vanlige måten å sjekke den akustiske responsen til et rom er å sjekke hvordan rommet responderer på en impulsiv lyd. Alt som er av lyd etter den korte impulsen er rommets «svar». Denne teknikken med å finne impulsresponsen brukes også for å undersøke andre systemer, som elektroniske kretser. Kapittel 6 tar for seg i mer detalj hvordan vi kan måle rommets impulsrespons.

Presentasjon av et roms impulsrespons kalles gjerne rommets ekkogram eller reflektogram og viser nivået til refleksjonene fra flater og gjenstander i rommet, og hvor lang avstand de ulike reflekterte bølgene har tilbakelagt eller hvor stor tidsforsinkelse de har. Andre egenskaper å undersøke er frekvensresponsen til rommet og hvordan frekvensresponsen endrer seg over tid etter at rommet er blitt utsatt for en impulsiv lyd. Den siste visningsformen kalles et waterfall-plot, eller fosseplot/fossefall-plot på norsk. Se kapittel 6 for mer detaljer om slike plot og visninger.

2.3 Opplevde effekter av reflektert lyd

Et rom vil alltid tilføre noe til lytteopplevelsen. De to mest opplagte opplevde effekten av et roms akustiske respons er etterklang og nivå. På engelsk refereres det disse to effektene som «reverberance» og «loudness». På grunn av lydhastigheten vil responsen fra rommet være strekt ut tid, samtidig som at alle i oppsamlede refleksjonen bidrar til total lydnivå. Andre lytteopplevelser som det er blitt mer fokus på i nyere tid er i hvilken grad rommets respons bidrar til at lydkildens tilsynelatende bredde (omfang horisontalt) øker, og i hvilken grad lytteren føler seg omgitt av lyd fra rommet. Disse to effektene blir referert til som «apparent source width» (ASW) og «listener envelopment» (LE) på engelsk. ASW vil være en betydelig effekt både i små kontrollrom og i store konsertsaler og er med på å forklare hvorfor noe stereomikser låter bredere i visse rom. Hvordan de arkitektoniske elementene i et rom, både geometri og materialvalg, bidrar til disse opplevelsene er ennå ikke fullt ut forstått og er gjenstand for debatt. Eksempler på spørsmål til debatt er hvilke proporsjoner et rom bør ha (for eksempel bredt og lavt versus smalt og høyt) og i hvilken grad materialene i rommet bør være lyddiffuserende (se kapittel 8).

Eksempler på ord som ofte blir brukt for å beskrive opplevelsen av akustiske lydforhold er: Balanse, «blend», briljans, klarhet, definisjon, vått/tørt, dynamisk område, ekko, omsluttet av lyd, «glare», intimitet, livlighet, nærvær, etterklang, romlighet, tekstur, klang/sound, klangbalanse, varme/fylde. Det er fortsatt en del usikkerhet knyttet til hvilke fysiske forhold som kontrollerer disse ulike opplevelsene. Dette er med å gjøre akustikk til 'svart magi' siden gode opplevde forhold ikke så lett kan dokumenteres rent fysisk. Det fører også til akustikk kan være både veldig fascinerende og frustrerende å jobbe med.

Typiske effekter av reflektert lyd i rom er ekko, flutterekko, stående bølger, etterklang, feillokalisering, farging, tidsmessig utsmøring av lyden og en lyd fra mange retninger til samme tid. Hvordan disse fysiske effektene oppleves er kraftig styrt av oppbygningen til vår hørsel og hvordan hjernen tolker nerveimpulsene som sendes fra sneglehuset i det indre øret. Kapittel 4 i læreboka tar for seg ørets oppbygning og kjente effekter i forhold til vår opplevelse av lyd. Under er det gitt litt mer detaljer rundt ulike måter rommet kan forandre lydbildet. Det er også beskrevet litt mer om precedence-effekten ut fra hva nyere forskning indikerer.

2.3.1 Akustisk forandring av lyd i forhold til tid

Resonanser i rommet, rommoder, fører til at visse frekvenser henger igjen i rommet. Etterklang vil også føre til liknende tidseffekter. Lyd som henger igjen i rommet vil føre til dårligere tidsdefinisjon ved at lyden blir «smørt ut» i tid. Resonanser og etterklang som henger igjen i tid vil også kunne maskere lyd ved frekvenser som ikke henger like mye igjen i rommet. Lydmiksen kan høres annerledes ut dersom resonanser og etterklang forsvinner.

2.3.2 Akustisk forandring av lyd i forhold til frekvens

Både etterklang, rommoder og kamfiltre fører til at nivået ved ulike frekvenser vil bli ulikt sammenliknet med opprinnelig lyd/signal. I rom med etterklang som er sterkt ulik ved de forskjellige frekvenser, sterke rommoder og kamfiltre kan vi ende opp med å stille for eksempel EQ helt «på jordet». Rommoder fører til ujevn bassrespons først og fremst i små rom. Rommoder fører også til tidsmessig «utsmøring» og maskering av lyd ved nærliggende frekvenser. Kamfiltre med avstand mellom kanselleringer over kritisk båndbredde ($1/3$ – $1/6$ oktav) er ofte mest merkbare i forhold til EQ. Kamfiltre som er vesentlig forskjellige ved venstre og høyre øre er ofte mindre sjenerende.

2.3.3 Akustisk forandring av lyd i forhold til retning og perspektiv

Veldig tidlige refleksjoner vil forvirre vår retningshørsel og retningsbestemmelsen av lyden blir mer usikker. Vår hørsel bruker blant annet tidsforskjeller mellom høyre og venstre øre til å retningsbestemme lydkilder. Forsinkelser innenfor ca. 0–8 ms kan lett bidra til tvetydig indikasjon på retning til lydkilden, forutsatt at refleksjonen er svakere enn direktelyden. Refleksjoner som er sterkere enn direktelyden kan fullstendig endre vår akustiske oppfattelse av hvor lydkilden befinner seg. Refleksjoner fra sidevegger får oss til å oppleve lydbildet som bredere. Det er lett å mikse for smale stereoperspektiv i slike rom. Tidlige refleksjoner skaper et bredere og «større» lydbilde enn hva det blir i andre rom. Kamfiltre som har kanselleringer i diskant kan forvirre vår retningshørsel ved at kamfilteret etterlikner effekten av øremusling-refleksjonen. (Kamfiltre kan også brukes til å lage stereo ut av mono – ved å innføre kamfiltre med ulike kansellerings-frekvenser i høyre og venstre kanal får vi en romlig «ikke-mono» opplevelse.)

2.3.4 Akustisk forandring av lyd i forhold til romopplevelse

Tegn tyder på at vi er i stand til å høre i hva slags rom en lydkilde er tatt opp i ut fra når de tidlige refleksjonene kommer. Er det tatt opp i et stort rom, vil første tidlige refleksjon har stor forsinkelse sammenliknet med direktelyden. Vi hører at det er tatt opp i et stort rom. Blinde bruker denne informasjonen aktivt. Om vi lytter på lyden av dette opptaket i et lite rom vil lytterrommet gi oss en tidlig refleksjon før den første tidlige refleksjonen fra opptaket. Vi kan få et annet/falskt inntrykk av rommet det er tatt opp i.

2.3.5 Andre effekter av reflektert lyd

Diffus reflektert etterklangslyd får oss til å føle oss omgitt av lyden («enveloped»/«surrounded» på engelsk). Dette er som regel en positiv effekt. Diffus reflektert lyd på et moderat nivå føles som et mer naturlig rom og farger ikke lyden så mye. Vi vil derfor ofte ha en del diffusjon i rommet.

2.3.6 Precedence-effekten og to lydstrømmer

The precedence effect (ofte definert slik at den inkluderer også Haas-effekten) er ganske sentral for vår opplevelse av reflektert lyd i rom. Vi ignorerer tidlige refleksjoner så lenge de tidlige refleksjonene

ikke endre seg tidsmessig. Vi sier at direktelyden tar «presedens» i forhold til retningsbedømming av lydkilden – det vil si går foran og tar oppmerksomheten fra de tidlige refleksjonene. Selv om vi ikke er bevisst de tidlige refleksjonene endrer det vår oppfatning av lyden – som for eksempel lydkildens bredde, retning og frekvensspekter. Vi kan på grunn av dette ha lett for å undervurdere betydningen av tidlige refleksjoner fordi vi «intuitivt» ikke er så bevisst de.

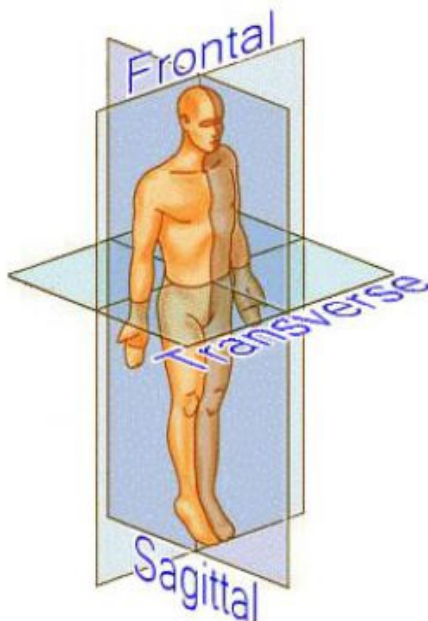
Ofte er det fokus på tidsresponsen fra rommet basert på en impuls lyd generert inne i rommet, det vil si ekkogrammet/reflektogrammet for rommet. I de fleste praktiske situasjoner lager lydkilden ikke impulsive lyder, men mer sammenhengende lyder som vokallyder i sang med mer. Men mer sammenhengende lyder vil refleksjonene mye mer flyte sammen, og totalnivået til oppsamlet tidlige refleksjoner er muligens vel så relevant. David Griesinger (Griesinger, 2005) har foreslått som en tommelfingerregel at samlet nivå til tidlige refleksjoner ikke bør være sterkere enn -6 til -4 dB relativt direktelyden.

Når forsinkelsen mellom direktelyd og refleksjon er mindre enn 0,3 ms klarer vi ikke å lokalisere presist lenger fordi forsinkelsen tilsvarer forsinkelse i lyd mellom våre to ører. Hjernen tar da et slags gjennomsnitt som er bakgrunnen for at vi kan skape illusjon av at lyden kommer et sted mellom høyttalerne, for eksempel 50 % til siden, ikke bare 100 % venstre, 100 % høyre eller midt i mellom høyttalerne. Refleksjoner med veldig liten tidsforsinkelse i forhold til den første ankomne lyden vil derfor endre opplevelse av retning til lyden og kan være en effekt vi ønsker eller noe som fører til at opplevelsen av retning blir feil i forhold til hva vi ønsket å oppnå. Når forsinkelsen blir stor nok til å unngå forvirring av lokalisering eller å gi uheldige kamfilter, vil precedence-effekten føre til at refleksjoner kan ha positive effekter (som større bredde og høyere opplevd lydnivå). Overgangen fra negativ til positiv effekt vil avhenge av retningen refleksjonen kommer fra, men skjer typisk med forsinkelse over 5–10 ms.

Nyere forskning indikerer at refleksjoner som har samme frekvensspekter og faserespons som direktelyden flyter opplevelsesmessig best sammen med direktelyden. Absorpsjon og diffusjon endrer oftest frekvensspekter og faserespons til reflektert lyd, og kan dermed ha uheldig effekter dersom vi ønsker at tidlige refleksjoner skal øke opplevd lydnivå mest mulig uten å få uheldige effekter på kjøpet. I små rom trenger vi ofte ikke sterke refleksjoner siden lydnivået blir høyt nok uansett. I store rom med svak direktelyd vil tidlige refleksjoner være viktigere (se kapittel 4).

Refleksjoner fra retninger som fører til at de ankommer høyre og venstre øre ved forskjellig ankomsttid virker til å være mest gunstige for opplevd lydforhold. Slike refleksjoner virker gunstig med tanke på en mest mulig effektiv precedence effect, hvor refleksjonene øker opplevd lydnivå uten at de blir sjenerende i tillegg til at det oppleves om lydkilden får en større romlig bredde. Lydkilder som befinner seg i ulike retninger vil ofte være lettere å skille fra hverandre siden vi kan retningsbestemme de fra ulike retninger (knyttet til cocktail-party-effekten). Refleksjoner fra siden kan derfor også være mindre sjenerende siden vi lettere kan skille det fra direktelyden. Refleksjoner som ankommer samtidig vil være i det såkalte *sagittale* (evt. *mediane*) planet, som rett framfor, rett over eller rett bak oss, se figur 2. Tidlige refleksjoner som ankommer samtidig er knyttet til størst fare for at kamfilter får ugunstig effekt siden kamfilteret blir likt ved begge ørene. Refleksjoner i det sagittale planet er også mye mer vanskelig å retningsbedømme og dermed mer vanskelig å isolere fra direktelyden. Det virker derfor på bakgrunn i dette gunstig å ha reflekterende

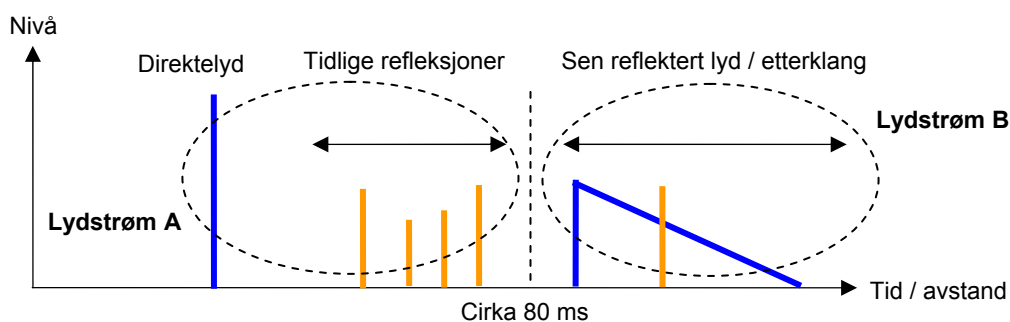
flater i en eller annen grad ute på sidene i forhold til oss, og samtidig unngå at for eksempel taket/himlingen er for lav. En lav himling/tak vil gi oss en kraftig refleksjon i det sagittale planet.



Figur 2: Det sagittale (mediane), coronale og transverse plan i forhold til kroppen vår.

Refleksjoner som er forsinket med mer enn ca. 80 ms vil ikke kunne flyte sammen med direktelyd og vi hører slik lyd som atskilt lyd, en lydstrøm som ikke direkte henger sammen med direktelyden i «våre ører». Etter 80 ms får vi som regel veldig mange refleksjoner inne i et lukket rom, og alle disse refleksjonene blander seg sammen til det vi betegner som etterklang. Etterklangen vil dermed oppleves som en egen lydstrøm til forskjell fra lydstrømmen som vi assosierer direkte fra lydkilden (direktelyd og de «ikke-hørbare» tidlige refleksjonene som øker oppfattet lydnivå og romlig bredde til lyden). Tidsgrensen på 80 ms er veldig omtrentlig siden den er avhengig av «rommets komposisjon» av refleksjoner mellom 0 og 80 ms. Tidsgrensen vil også avhenge av type lydkilde, for eksempel perkusiv eller mer langvarige lyder. Perkusive lyder har lettere for å avdekke enkeltrefleksjoner og rommets respons høres ikke lenger ut som en jevn etterklang.

I figur 3 er det forsøkt illustrert hvordan direktelyd og tidlige refleksjoner oppleves som én lydstrøm A, mens sene refleksjoner og etterklang oppleves som en annen atskilte lydstrøm B. Direktelyd og alle tidlige refleksjoner i lydstrøm A henger sammen tidsmessig i vår opplevelse, men de tidlige refleksjonene vil kunne påvirke våre opplevelse av frekvensspekter, bredde og gi noe informasjon om rommet. Lydstrøm B henger ikke sammen med lydstrøm A tidsmessig og de sene refleksjonene og etterklangen oppleves mye som en del av rommet ikke selve lydkilde.

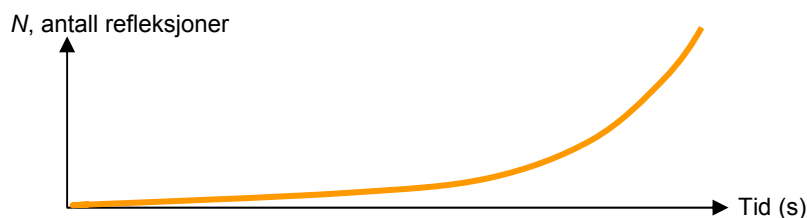


Figur 3: Inndeling av ekkogram i de to opplevde lydstrømmene A (direktelyd) og B (etterklang).

2.3.7 Etterklang

Når lydbølgene forplanter seg fra en lydkilde, vil den i et rom møte flater der bølgene blir reflektert eller absorbert. På bølgens ferd gjennom rommet vil lydnivået gå ned på grunn av sfærisk demping (avstandsloven), men også på grunn av absorpsjon (lyden treffer en porøs og fluffy sofa for eksempel). På grunn av lydhastigheten (343 m/s i romtemperatur) vil det ta ganske lang tid før nivået til lyden ikke lenger er hørbar. Disse «fangede» lydbølgene i rommet som farer rundt mer eller mindre «hvileløst» er det vi hører som etterklang. Det samme vil skje med lys, men fordi lyshastigheten er så høy tar det kort tid før lyset er blitt dempet ned av lysabsorberende flater at det er så svakt at vi ikke lenger ser lyset (for eksempel når vi slår av lysbryteren).

Antall nye refleksjoner som dukker opp innenfor samme tidsintervall øker eksponentielt. Figur 4 viser antall refleksjoner i rommet etter et gitt tidspunkt etter at en impulsiv lyd ble generert i rommet. Likning (3) er en formel for å finne økningen av antall refleksjoner. Det er ikke essensielt å huske eller bruke denne formelen, men det er verdt å merke seg at volum V bidrar til å spre refleksjonene ut i tid. Et lite rom vil gi kraftig økning av antall refleksjoner over tid sammenliknet med et lite rom.



Figur 4: Antall refleksjoner fra et rom ved ethvert tidspunkt relativt ankomst av direktelyden.

$$dN = 4\pi c^2 t^2 / V \quad (3)$$

Refleksjonene som dukker opp er stort sett ikke i fase i forhold til kilden og nivået til refleksjonene følger avstandsloven. Dersom refleksjoner dukker opp til samme tid i fase, for eksempel ved fokusering, vil nivået komme over det vi forventer ut fra avstandsloven.

Etterklang består ikke av noen få refleksjoner, men summen av flere hundre tusen, gjerne millioner av refleksjoner. Etterklangen blir da preget av hele rommet og alle flatene i rommet, og etterklangen er den totale responsen av refleksjoner fra alle flatene som reflekteres på nytt og på nytt. Etterklangen kan derfor være en viss indikasjon på hvordan rommet i sin helhet responderer.

Vi ønsker ofte litt etterklang for å gi «liv» til for eksempel vokal. Uten etterklang flyter tonene lite sammen, det blir litt for mye stakkato musikalsk sett. Med kun direktelyd vil lydkilden ofte også oppleves dimensjonsløs. Utøvere ønsker også å høre etterklangen av seg selv (som sangere) fordi denne lyden gir de en idé om hvordan de høres ut for publikum og man har følelsen av en viss akustisk respons og støtte fra rommet. For avspilling i rom, vil etterklangen i avspillingsrommet komme i tillegg til etterklang som allerede er i lydmiksen, eller etterklang fra alle åpne mikrofoner på scenen. Det kan ofte bli et problem når mange etterklanger legger seg oppå hverandre og lyden oppleves som udefinert/uklar.

2.3.8 *Oppfattelse av enkeltrefleksjoner – ekko og flutter-ekko*

Et ekko er én enkelt refleksjon som er forsinket så mye at den oppfattes som en selvstendig lydhendelse. Hvor mye lyden må forsinkes for å bli en selvstendig hendelse er avhengig av frekvens og type lydkilde. Lydkilder som lager kortvarige (impulsive, som trommer) lyder vil mye lettere skape hørbare ekkoer sammenliknet med kilder som lager mer langvarige toner (som vokal, fiolin). Vi har lettere for å høre ekko ved høyere frekvenser, så høyfrekvente, kortvarige lyder har høyest sjans for å oppleves som ekko.

Et flutter-ekko (flagre-ekko) er mange refleksjoner med den samme tidsforsinkelse mellom hver enkelt refleksjon, som regel på grunn av refleksjon mellom to parallelle flater. Flutter-ekko gir en opplevelse av en kjede av gjentakende ekko, et slags «ra-ta-ta», eller én syngende tone som henger igjen i rommet, et slags «zaaang». Avstanden mellom de parallelle flatene avgjør hvor stor forsinkelsen blir mellom hver enkelt refleksjon. Kort avstand fører til at flutter-ekkoet høres ut som «zæng», mens lang avstand fører til at det høres ut som «ratata». Dette er ofte hørt for eksempel mellom veggen i et hotellrom, eller mellom sidevegger i et auditorium og kan være ganske sjenerende.

Å oppfatte enkeltrefleksjon som ekko eller flutter-ekko vil oftest være negativt. Ved å ha diffuserende flater og eventuell kompleks romgeometri vil vi unngå store jevne flater som kan gi sterke enkeltrefleksjoner. For rom som har lav grad av diffusjon må flater ofte ha mer akustisk demping for at vi skal unngå hørbare ekko. Sagt på en annen måte: Rom som gir et diffust lydfelt kan være mer reflekterende (ha flere harde flater) før det blir et problem. Det betyr at rom med like lang etterklangstid og nivå til etterklang kan oppleves ganske forskjellig, og detaljer i geometri og materialvalg er de faktorene som får stor betydning for hvor fint rommet låter.

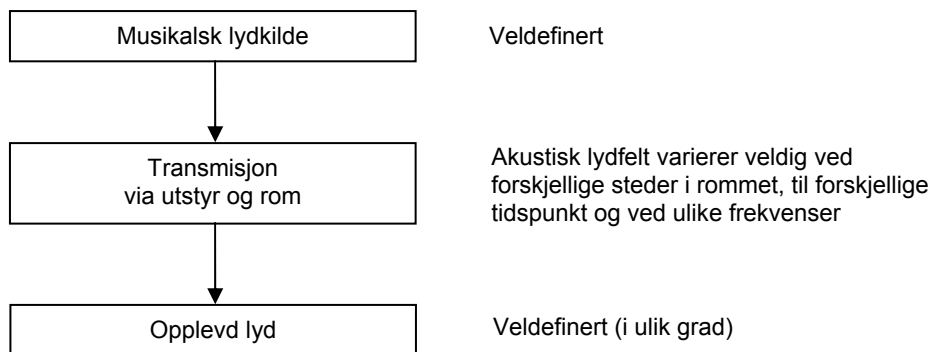
2.3.9 *Variasjon i mange dimensjoner og innblikk i fysiske forhold*

Akustiske forhold vil alltid variere i både tid, frekvens, fase og den akustiske responsen vil komme fra mange forskjellige retning. I tid og frekvens vil vi ha variasjoner til nivået. Dette bidrar til å gjøre det vanskelig å isolere eller evaluere de ulike dimensjonene/faktorene fra hverandre separat. Særlig for bygde rom vil vi ikke uten videre kunne endre egenskapene til kun én av disse faktorene, uten at de andre faktorene også endre seg. Vi vil i hovedsak kun være i stand til å lytte til en gitt kombinasjon av alle faktorene. Dette gjør det vanskelig å få tydelig innblikk i hvordan de ulike faktorene bidrar til opplevde forhold. Og dette fører til utfordringer ved design av rom og rommet akustiske respons (se også delkapittel 4.5).

Som nevnt i kapittel 1 og delkapittel 2.1 er romakustikk preget av at responsen fra rommet er så kompleks at vi ikke engang er i stand til å få fullt innblikk i hva som skjer rent fysisk. Hva vi er i stand til å måle eller beregne av akustisk respons er sjelden eksakt hva som er tilfelle i en konkret eksakt. Vi måler for eksempel ofte med en høyttaler i stedet for aktuelt instrumentet eller måler med en mikrofon i stedet for våre egne ører. Å måle med kun én mikrofon (og omnidireksjonell direktivitet), som er mest vanlig, gir oss heller ikke innblikk i det 3-dimensjonale lydfeltet i et rom, vi kan kun separere i nivå, tid og frekvens, ikke i retning. I løpet av de siste årene har det derfor blitt mer fokus på å trekke ut akustiske egenskaper basert på lydopptak med aktuelle instrumenter (ikke egen målehøyttaler), og å gjøre målinger med flere mikroner, eventuelt med kunsthode.

2.3.10 Benades «Central Paradox»

Vi er i stand til å gjenkjenne instrumenter og personer selv om vi hører de under veldig varierende (elektro)akustiske forhold. Dette så Arthur Benade på som et sentralt paradoks for opplevelsen av romakustiske forhold, se figur 5. Vi har en god evne til å trekke ut relevant informasjon under varierte og tidvis vanskelig forhold. Dette betyr ikke at utstyret og rommet ikke kan påvirke vår bedømming, men det er et paradoks at vi klarer å gjenkjenne lydkilder under forhold en skulle tro at det ikke var mulig.



Figur 5: Benades «Central Paradox».

Vi har en god evne til å tilpasse oss forhold. Jobber mye vi mye ett lytterom tilpasser vi oss forholdene i dette lytterrommet uten å være bevisst det. Dette kan være skummelt med tanke på å lage mikser som fungerer andre steder enn i ditt kjente kjære rom. Det er nyttig å være kjent med fysiske forhold i rommet du jobber i så du kan være bevisst om valgene du foretar i dette rommet er gyldig utenfor rommet. I tillegg til å måle rommet, lytt til mange plater du kjenner godt. Men det er ikke så lett å vite hvem som sitter på «sannheten» om hvordan ting bør/skal låte.

2.3.11 Jakten på det optimale rom

Refleksjoner gir liv til lyden, følelse av rom, bredde. Men vi kan lett få negative effekter av refleksjoner. Å finne den rette balansen kan være vanskelig, men å vite hvilke fysiske og psykiske effekter som er med å påvirke opplevelsen kan gjøre det lettere å jobbe seg fram til gode løsninger. Og samtidig kan det å jobbe med lyd bli mer fascinerende. Det eksisterer ingen standarder for hva slags akustisk respons et kontrollrom skal ha for vurdering av musikkproduksjoner. Det ville være lettere å oppnå konsistente og mer forutsigbare lytteropplevelser om alle lyttet i et standardisert rom, men det er ingen standard for design av verken kontrollrom eller lytterom. Dette gjør det vanskelig å vite hvordan lydмикsen skal være for at lytteren får den ultimate lytteropplevelsen. Vi blir derfor nødt til å leve med uvissheten om hvordan sluttbruker faktisk opplever det vi produserer og må være bevisst på hvordan alle de ikke-standardiserte rommene er med på å farge vår vurdering av det som produseres. Det er nyttig å forstå effekten fra rommet og lære de å kjenne, så vi kan lage stort sett tilstrekkelig konsistente mikser. En del negative effekter av reflektert lyd kan lett unngås slik at vi gjør jobben lettere for oss selv ved å unngå ekstremt rare akustiske rom.

3 AKUSTIKK I SMÅ ROM

Typiske eksempler på små rom er innspillingsrom, kontrollrom og lytterom (som stue). I små rom blir lydets bølgenatur veldig fremtredende. I små rom blir dimensjonene til rommet cirka på størrelse på bølgelengden til lyden eller mindre. Dette fører til at rommoder (stående bølger) får veldig stor betydning og fører ofte til en svært ujevn frekvensrespons, tidsmessig etterheng på lyden, og store nivåvariasjoner til lyden ved ulike lytteposisjoner i rommet. For typiske små rom på 10 m² og vanlig takhøyde (2,4 m) begrenser problemer knyttet til rommoder seg til under ca. 200 Hz. For ekstremt små rom (som vokalbokser) kan rommoder ha betydning langt opp i mellomtonen. Høyere opp i frekvens blir rommets dimensjoner store i forhold til bølgelengden og rommoder blir da et mindre betydelig problem. Høyere opp i frekvens kommer resonansfrekvensene til rommodene tettere i frekvens i tillegg til at trykkammerhøytaler (vanlige studiomonitorer) blir mindre omnidireksjonell. Derfor er det som regel langt lettere å oppnå akseptable forhold over 200 Hz. Over 200 Hz kan ofte kamfiltre være årsaken til en ujevn frekvensrespons (med store nivåvariasjoner innenfor smale frekvensbånd).

Som vi skal se i kapittel 5 er det samtidig vanskeligst å oppnå effektiv lydabsorpsjon i bassen, mens langt lettere i diskanten. Dette fører til at lydforhold i bassen ofte blir et så å si uløselig problem i praksis. Rommet er akustisk sett for lite og å redusere effekten av refleksjoner fra vegger og tak med absorpsjon er ofte mye dyrere enn vi tar oss råd til, eller rent fysisk har plass til. Men ved å kjenne egenskapene til rommoder bedre kan vi unngå at vi jobber i de verst tenkelig tilfellene ved å optimalisere plassering av høyttalere og lytteposisjon. Kapittel 13 i læreboka tar for seg rommoder i detalj.

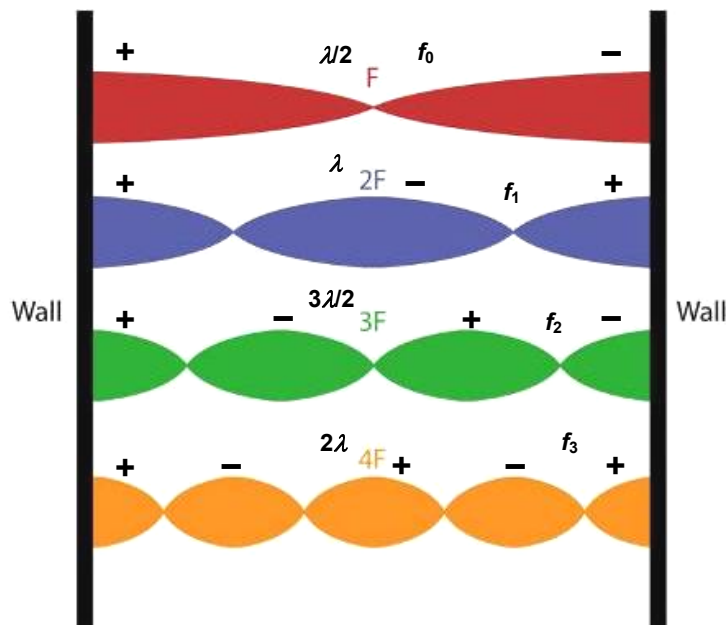
Kamfiltereffekter er ofte også avgjørende i små rom. Kamfilter er behandlet i kompendiet til Elektroakustikk, i kapittel 10 i læreboka og i dette kapitlet. Siste del av dette kapitlet tar for seg prinsipper for design av lytterom og kontrollrom (og til dels innspillingsrom). Kapittel 18, 19 og 20 i læreboka tar for seg akustikk i lytterom, innspillingsrom og kontrollrom.

3.1 Rommoder (stående bølger)

Rommoder, også omtalt som stående bølger eller eigenmodes, er en akustisk resonans som oppstår når de reflekterte bølgene kommer i fase med kilden. Det totale oppsamlede nivået over tid vil dermed bli høyt. Når bølgene går fram og tilbake i rommet med dette bestemte faseforholdet blir bølgemønsteret stående, som svingningene på en gitarstreng (en gitarstreng har også stående bølger). Figur 6 viser stående bølger mellom to parallelle vegger. Ved bestemte frekvenser, F , $2F$, $3F$ osv., blir faseforholdet slik at de reflekterte bølgene konstruktivt interfererer med hverandre. Laveste resonansfrekvens f_0 (F) kalles ofte grunnfrekvensen («fundamental» på engelsk). Harmoniske overtoner f_1 , f_2 osv. inntreffer ved heltall ganget med grunnfrekvensen.

Knutepunktene til de stående bølgene kalles noder. Her har vi ingen variasjoner i lydtrykket og det er helt stille – helt tiden. Den stående bølgen på toppen av figur 6 har én node. Ved $2F$ er det to noder og så videre. Der hvor den stående bølgen er tykkest i figur 6 er trykkvariasjonene maksimal og dette stedet kalles en antinode. Ved antinodene vil lydnivået være høyest. Om vi tenker oss at vi setter på en rentone med frekvens F og vi går gradvis fra venstre mot høyre vegg vil lydnivået være høyest rett ved venstre vegg. Mot midten går nivået gradvis mot stillhet og forbi midten øker nivået mot maksimalt nivå igjen. For å få helt stillhet i midten må vi stå eksakt og kun i det lille punktet

hvor noden befinner seg. Dette er lettere å oppnå med en liten mikrofon enn med våre to ører, og spesielt ved de laveste resonansfrekvensene siden avstand til node og antinode her er størst.



Figur 6: Frekvens og bølglengde til rommoder (stående bølger) mellom to parallelle flater.

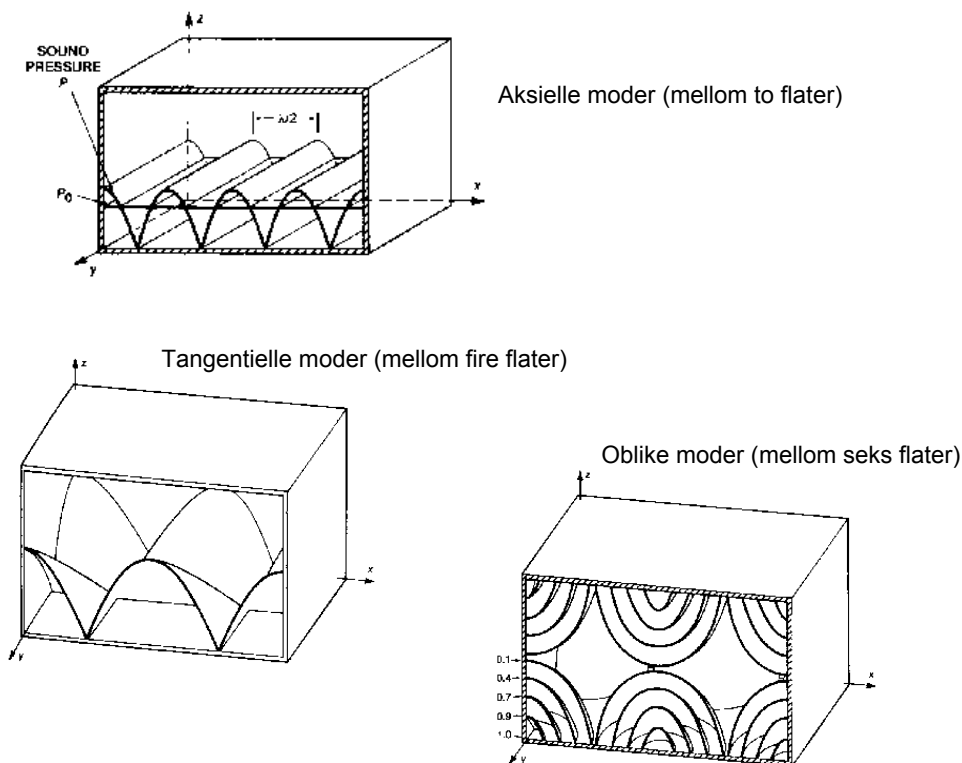
Hvor mye lydbølgen blir reflektert og bygger seg opp til et høyt nivå er styrt av hvor mye veggene absorberer lydbølgene og diffuserer (sprer) lyd vekk fra den parallelle veien mellom de to veggene. Udempede og helt flate jevne vegger, sett i forhold til bølglengden, fører til sterke stående bølger med store nivåvariasjoner. Ved resonansfrekvenser for de stående bølgene blir nivåvariasjonene mellom veggene veldig stor og lyden henger igjen tidsmessig (som en etterklang) mellom veggene. Dette fører til både ujevn frekvensrespons og toner i rommet som henger igjen og som kan maskere annen «ny» direktelyd som kommer fra lydkilden/høytalerne.

De reflekterte lydbølgene trenger ikke å gå parallelt på sin vei før den vender tilbake til utgangspunktet. De kan også gå diagonalt via fire eller seks flater. Rommoder som går parallelt, som i figur 6, kalles aksielle moder. For aksielle moder vil lydnivået ikke forandre seg dersom vi beveger oss på tvers av aksial retning, som vist i figur 7. For diagonale mellom fire flater kalles modene tangentiell, mens oblique for refleksjoner som går via rommets alle seks flater. Mønsteret for noder og antinoder blir da mye mer komplekst. For oblike moder vil nivået variere i alle tre dimensjonene i rommet. Alle disse modene kan være i et rom samtidig og dette gjør rommoder til et komplekst fenomen.

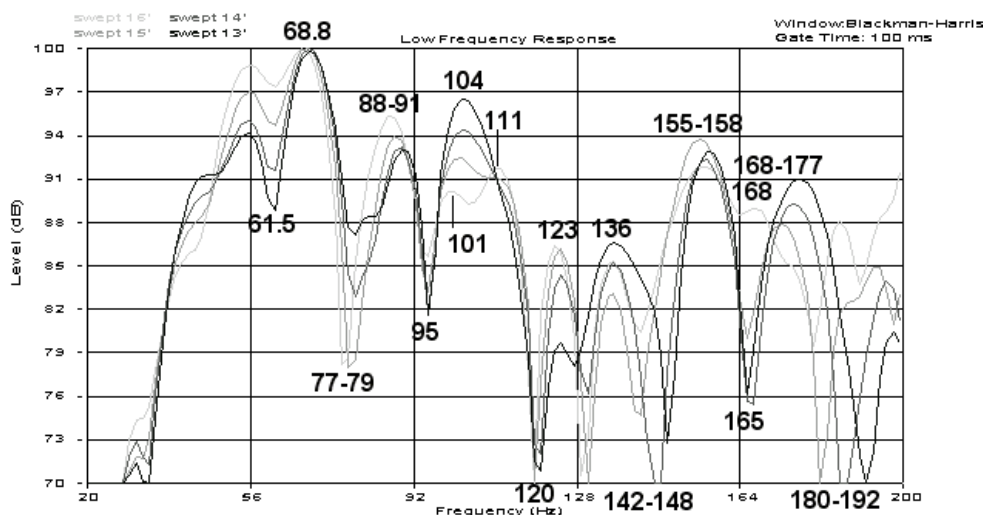
Heldigvis viser det seg at aksielle moder oftest har størst betydning. Disse blir som regel minst dempet fordi de treffer færre flater per sekund. Hver gang lydbølgene treffer et av rommets flater vil de potensielt bli redusert i nivå. Lufta absorberer lyd mindre enn flatene lyden treffer, spesielt under 1000 Hz, så flatene er oftest den største bidragsyteren til å dempe ned modene (de reflekterte lydbølgene). I rom med lite akustisk demping vil de tangentielle og oblike modene også bli lite dempet, så vi kan dessverre ikke se helt bort fra dem.

Figur 8 viser et eksempel på frekvensresponsen i bassen i et lite rom i en bestemt lytteposisjon. Ved visse frekvenser er nivået høyt, for eksempel ved 69 Hz, fordi lytteposisjonen befinner seg i antinoden til en bestemt mode. Rommet vil dermed ved 69 Hz bidra til å «booste opp» nivået og vi

kan feilvurdere vårt lydmateriale om vi ikke er klar over dette. Flytter vi oss litt i rommet vil nivået kunne gå ned ved denne frekvensen fordi vi da flytter oss fra en antinode til en node. Ved andre frekvenser er nivået lavt fordi vi er nær en node, som ved for eksempel 120 Hz.



Figur 7: Mønstre for noder og antinoder for aksielle, tangentielle og oblike rommoder.

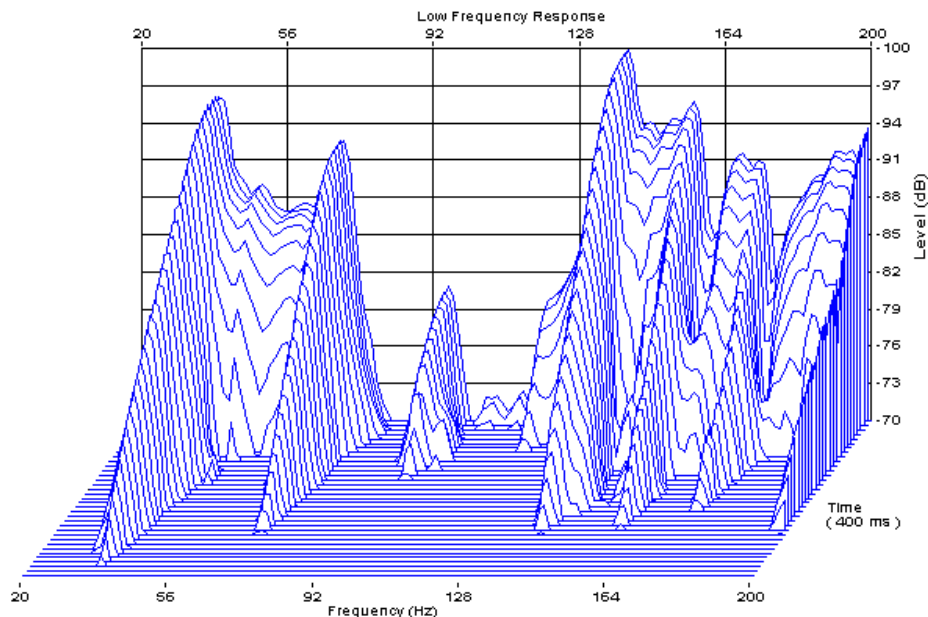


Figur 8: Frekvensrespons med rommoder.

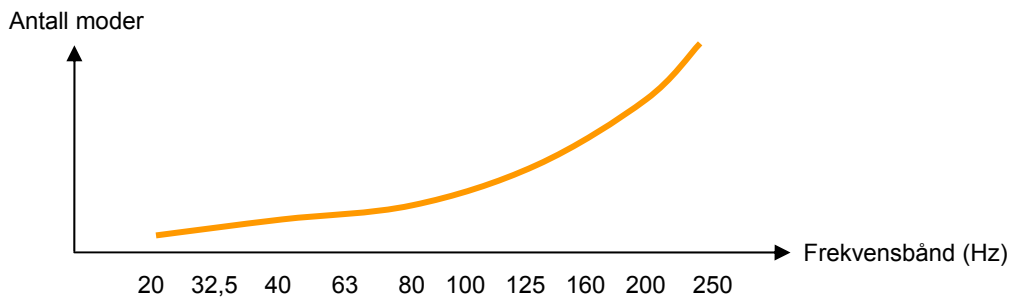
Når lyden slås av i rommet henger rommodene igjen i rommet. Figur 9 viser et såkalt waterfall-plot for responsen til et bestemt rom. For denne grafen henger lyden spesielt ved ca. 60 og 120 Hz. En slik respons kan gjøre det vanskelig å høre lyd med frekvens like over 120 Hz, for eksempel 150 Hz fordi etterhøvet av lyd ved 120 Hz overdøver (maskerer) lyd ved 150 Hz. Dette kan lure oss til å heve nivået unødvendig ved 150 Hz når vi mikser/mastrer i dette rommet.

Avstanden mellom de overharmoniske modene er konstant på en lineær frekvensskala. Dette tilsvarer overtonene til et instrument. Men vi hører frekvenser i forhold til en logaritmisk skala. På

en logaritmisk skala vil avstanden mellom hver overharmoniske frekvens blir redusert når frekvensen økes. Når vi ser på frekvens til modene innenfor oktavbaserte frekvensbånd vil antall moder innenfor hvert enkelt bånd øke med økende frekvens. Innen rommoder er det vanlig å se på totalt antall moder innenfor 1/3 oktav-bånd. Figur 10 viser hvordan tettheten i moder, antall moder innenfor 1/3 oktavband, øker med økende frekvens. Tettheten til moder i forhold til frekvens øker proporsjonalt med f^2 , slik at for høye frekvenser er tettheten så høy at mange moder utfyller hverandre innenfor selv smale frekvensbånd. Derfor blir stående bølger mindre betydningsfullt for opplevde lydforhold ved høye frekvenser (som beskrevet i kapittel 2).



Figur 9: Eksempel på målt waterfall i et rom med sterke moder ved cirka 60 og 120 Hz.



Figur 10: Antall rommoder per 1/3 oktavbånd.

3.1.1 Trykksone

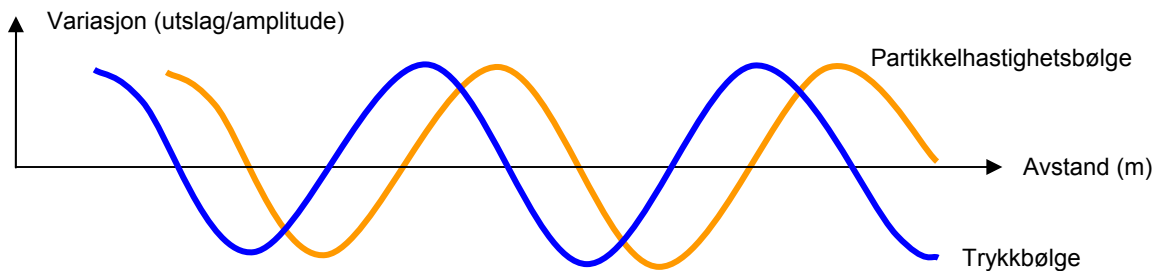
For frekvenser under laveste rommode i rommet har vi det som kalles trykksone. Ved disse frekvensene har vi ingen akustiske resonans (stående bølger), kun et trykkammer. Dersom rommet er fullstendig tett øker nivået 12 dB per oktav nedover i frekvens når vi er i trykksonen, fordi de reflekterte bølgene blir mer og mer 100 % i fase med hverandre når rommets dimensjoner blir svært lite i forhold til bølgelengden.

3.1.2 Trykkbølge og partikkelhastighetsbølge

For å si noe om hvordan plassering av lydilden påvirker styrken til rommodene må vi se på de to typene av bølger vi har for lyd, nemlig trykkbølge og partikkelhastighetsbølge. En lydbølge vil føre

til en variasjon i forhold til både lufttrykket og hastigheten til luftmolekylene. For plane bølgefronter (langt fra lydkilden i fjernfeltet) vil partikkelhastighet og trykk være i fase. For stående bølger derimot vil trykk og partikkelhastighet være 90° ut av i forhold til hverandre. Dette er forsøkt illustrert i figur 11. Nær en vegg vil alltid partikkelhastighetsvariasjonene være lik null, mens trykkvariasjonene er maksimale, fordi bølgen ved veggen treffer noe hardt og må snu.

Partikkelhastighetsbølgen tilsvarer trykkgradienten til lydbølgen. En trykkgradientmikrofon vil være følsom for partikkelhastighetsbølgen, ikke trykkbølgen. En elektrostatiske høyttaler vil mest effektivt sette i gang hastighetsbølgen, ikke trykkbølgen. Vi er kun følsomme for trykkbølgen, men en høyttaler kan lage en trykkbølge ved å sette i gang en partikkelhastighetsbølge – siden de to bølgene alltid er knyttet sammen, vi kan ikke ha kun den ene.



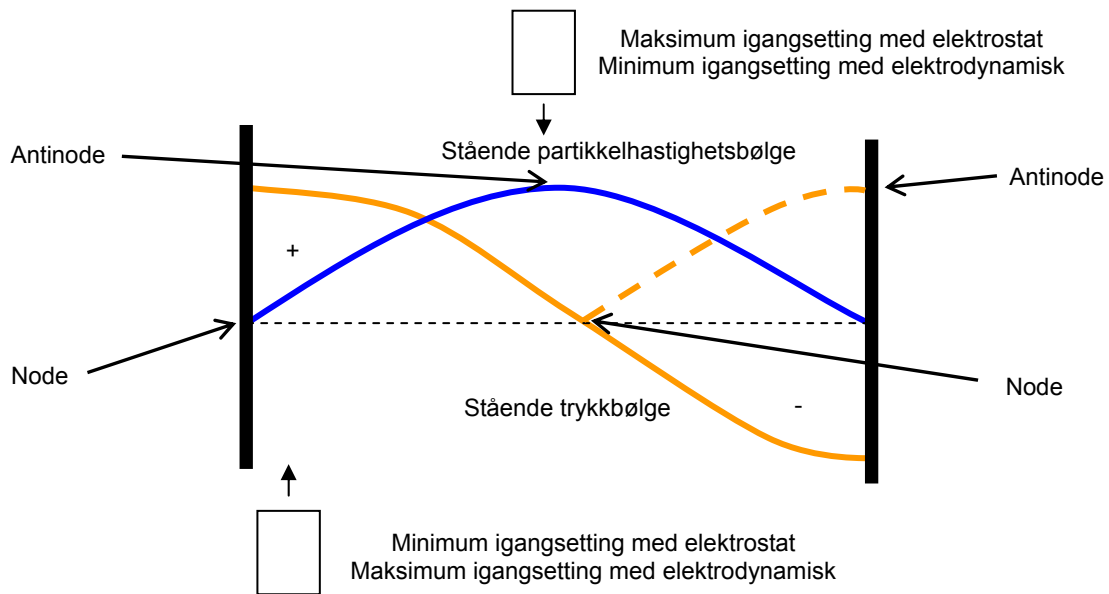
Figur 11: Trykkbølge og partikkelhastighetsbølge for stående bølge mellom to flater.

3.1.3 Igangsetting av moder avhengig av høyttalertype/lydkilde

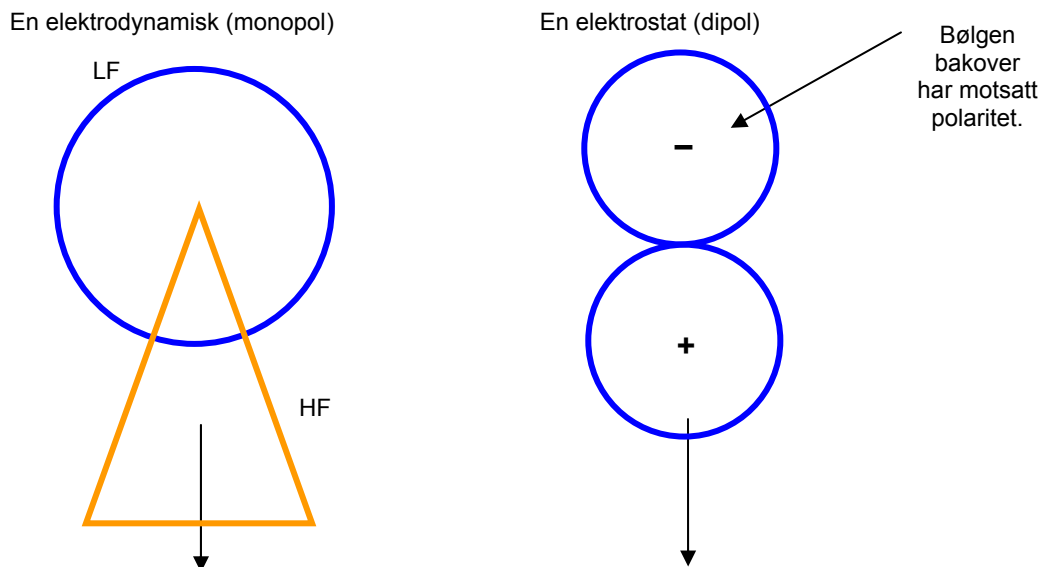
I hvilken grad de stående bølgene settes i gang, hvor sterke de blir i nivå, er avhengig av hvor høyttaleren/lydkilden står. Dette tilsvarer at frekvensspekteret (nivået til de ulike overtonene, «soundet») på en gitar avhenger av hvor langs strengen du setter strengen i bevegelse. Hvor du slår an strengen på gitaren tilsvarer hvor du plasserer høyttaleren, og plassering av pickup'ene på en elektrisk gitar tilsvarer din lytteposisjon. Figur 12 viser stående trykkbølge og partikkelhastighetsbølge mellom to parallelle flater. Vi ser at de to stående bølgene er «komplementære» i forhold til hverandre: Den stående bølgen for trykkvariasjonen har node hvor vi har antinode for den stående bølgen for partikkelhastighetsvariasjonen. En høyttaler vil sette i gang den stående bølgen når høyttaleren er nær antinode for den bølge som høyttaleren mest effektivt klarer å sette i gang. Er den ene stående bølgen satt i gang (trykk eller hastighet), vil den andre stående bølge «følge med på kjøpet». Dette det betyr at elektrodynamiske trykkammerhøyttalere lettest setter i gang stående bølger om de står tett inntil en av de reflekterende flatene. En elektrostathøyttaler derimot setter lettest i gang den stående bølgen ved å stå midt mellom flatene. Dette fører til at de to høyttalertypene vil gi ganske forskjellige nivåer på de ulike modene i rommet, og at optimal plassering av de to høyttalertypene vil ofte være ulik.

Direktiviteten til høyttaleren/lydkilden vil også påvirke hvordan de stående bølgene blir satt i gang. En elektrodynamisk høyttaler er nær ved å være fullstendig omnidireksjonell i bassen (en slik lydkilde kalles en monopol), se figur 13. Den vil dermed sette i gang stående bølger i alle retninger rundt seg. En elektrodynamisk høyttaler har en åttetalls karakteristikk, med mindre en elektrodynamisk høyttaler brukes som subwoofer for den elektrostatiske høyttaleren. Med en åttetalls karakteristikk vil stående bølger sideveis i forhold til on-axis settes i gang i liten grad. Polaritetsforskjellen for lyd forover og bakover på en elektrostatiske fører også til at stående bølger settes mindre i gang. En elektrostatiske høyttaler vil dermed sette i gang færre stående bølger i

rommet og føre til ganske forskjellige nivå på de stående bølgene i rommet (aksielle, tangentielle og oblike) i forhold til en elektrodynamisk (som er mest vanlig).



Figur 12: Igangsetting av stående bølge med ulike plassering og høyttalertype.

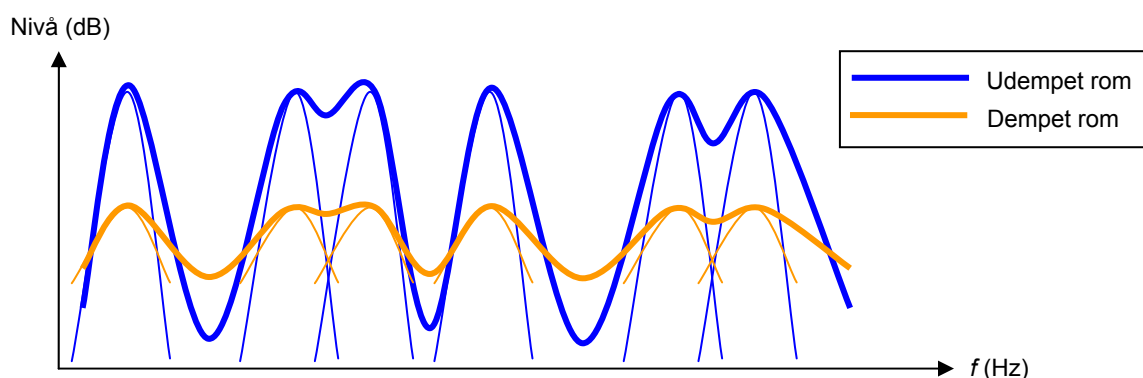


Figur 13: Lydutstråling til elektrodynamisk og elektrostatisk høyttaler.
(LF = lave frekvenser, HF = høye frekvenser).

I forhold til elektrodynamisk versus elektrostat vil direktiviteten ved ulike frekvenser være mer konstant for en elektrostat i forhold til en elektrodynamisk. Dette er forsøkt illustrert i figur 13 (LF, HF). En konstant direktivitet i hele frekvensområdet fører til at den reflekterte lyden har samme frekvensrespons som direktelyden. For den elektrodynamiske vil den reflekterte lyden ha klar dominans av lavfrekvent lyd. Mindre avvik i frekvensrespons mellom direktelyd og refleksjoner fra rommet er antatt å føre til at precedence-effekten fungerer bedre og responsen fra rommet blir mindre hørbart (rommet setter mindre preg, låter mer naturlig).

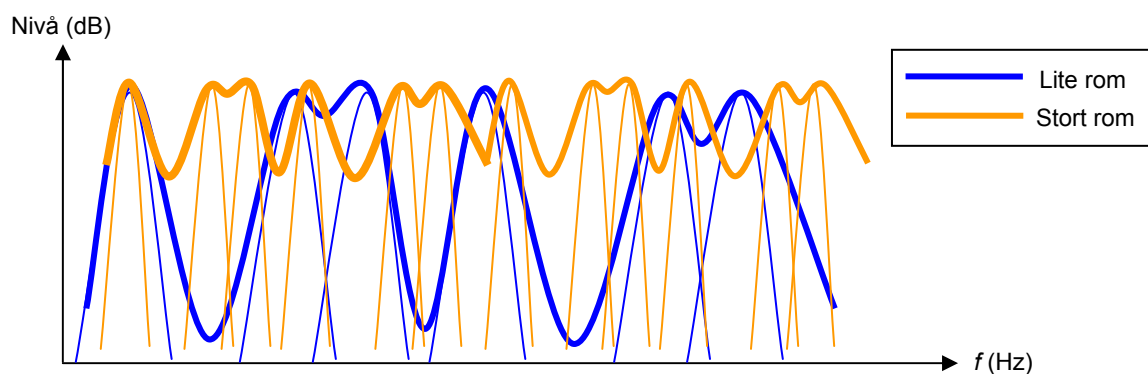
3.1.4 Rommoders påvirkning av diffusjon, absorpsjon, romproporsjoner og romstørrelse

Dersom veggene som fører til stående bølger har en viss grad av diffusjon (akustisk spredning) eller absorpsjon (akustisk demping) vil lydenergien enten spres vekk fra den parallelle veien mellom veggene eller omgjøres til varmeenergi og bli redusert i nivå. Både diffusjon og absorpsjon vil dermed føre til at nivået til de stående bølgene blir lavere. Absorpsjon vil i tillegg føre til at den stående bølgen resonnerer innenfor et bredere frekvensområde. At resonansen blir mer bredbåndet med økt resistans er et generelt fenomen – blant annet brukes en variable resistor til å endre Q-verdi for analog EQ. En mer bredbåndet resonans fører til en jevnere frekvensrespons for den totale lyden med alle de stående bølgene inkludert. Dette er forsøkt illustrert i figur 14. Betydelig diffusjon er ofte vanskelig å oppnå ved lave frekvenser, gjerne enda vanskeligere enn å oppnå absorpsjon i bassen. Absorpsjon er derfor mer vanlig enn diffusjon som et virkemiddel mot sterke rommoder (ujevn frekvensgang og tidsmessig etterheng på lyden). Romformen i seg selv kan gi noe diffusjon i bassen, se delkapittel 8.2.3 for mer detaljer.



Figur 14: Effekten av demping (absorpsjon) på rommoder og frekvensrespons.

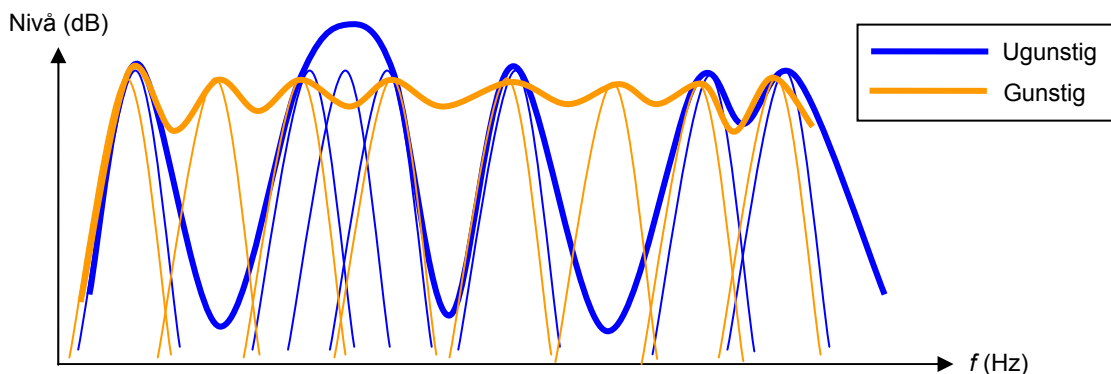
Stor avstand mellom veggene vil føre til at grunnfrekvensen f_0 til den stående bølgen blir lavere, sammenliknet med liten avstand mellom veggene. Når grunnfrekvensen f_0 starter ved en lav frekvens, for eksempel 20 Hz, vil de overharmoniske stående bølgene f_1 , f_2 og f_3 komme ved 40, 60, 80 Hz. Starter grunnfrekvensen f_0 ved 80 Hz vil de overharmoniske stående bølgene f_1 , f_2 og f_3 komme ved 160, 240 og 320 Hz. Stor avstand mellom veggene (stort rom) vil derfor føre til at rommodene kommer mye tettere i frekvens sammenliknet med små rom. Mindre gap i frekvens mellom rommodene fører til jevnere frekvensrespons, som forsøkt illustrert i figur 15. Dette er bakgrunnen for formelen $3c/L_{\min}$ nevnt i kapittel 2, se likning (2).



Figur 15: Effekten av romstørrelse på rommoder og frekvensrespons.

Dersom et rom er like bredt og høyt som langt vil rommodene komme ved de samme frekvensene i rommets alle tre retninger (i lengderetning, sideveis og vertikalt). Tre eller to moder ved samme

frekvens gir større nivåendring ved denne frekvensen sammenliknet med kun én. Vi vil derfor ønske at dimensjonene til rommene ikke har heltallsfaktorer seg i mellom. Et rom som er 4 m bredt og 8 m langt har en faktor 2 i dimensjonsforhold. Annenhver rommode kommer i dette tilfellet ved samme frekvens, siden 1. overharmoniske i lengderetningen blir lik grunnfrekvensen sideveis. I rom med gunstige dimensjonsforhold vil resonansene være jevnt fordelt i frekvens og vil oppnå en jevnere frekvensrespons. Dette er forsøkt illustrert i figur 16. Et kubisk rom vil være det minst gunstige: moder mellom veggene og gulv og tak kommer ved de samme frekvensene. Visse dimensjonsforhold er regnet som bedre enn andre («golden ratios»), se figur 13-20 i lærebok.



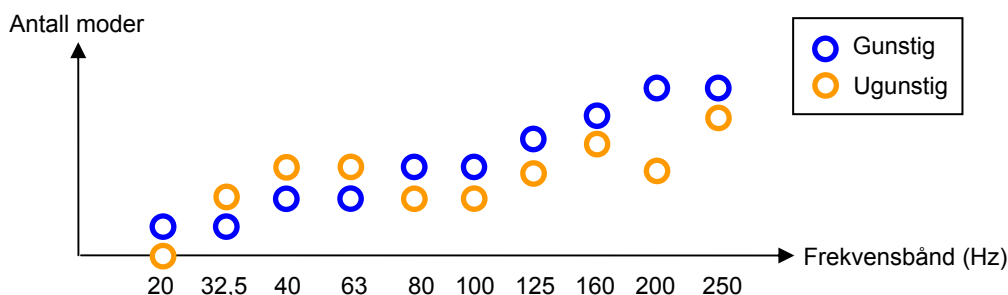
Figur 16: Effekten av romproporsjoner på rommoder og frekvensrespons.

3.1.5 Bonellos kriterium

Oscar Bonello laget et kriterium i forhold til rommoder:

- Tell opp antall moder innenfor hvert enkelt 1/3-oktavnband (20 Hz, 32,5 Hz, 40 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz osv.)
- Antall moder innenfor hvert 1/3-oktavnband skal være jevnt stigende. Med to overlappende moder innfor ett 1/3-oktavnband må dette oktavnbandet ha minst fem moder for at disse overlappende modene skal være akseptabelt.
- Det motsatte vil være tegn på at en eller flere 1/3 oktavnband har for få moder til å kunne skape rimelig jevn frekvensrespons.

En gunstig og ugunstig fordeling av antall rommoder innenfor de ulike 1/3 oktavnbandene (i følge Bonello) er forsøkt illustrert i figur 17.



Figur 17: Antall rommoder innenfor hver 1/3 oktavnband for å sjekke mot Bonellos kriterium.

3.1.6 Utregning av frekvens til moder

Å regne ut frekvens til de aksielle modene er forholdvis lett og minner veldig om framgangsmåten for å finne kanselleringsfrekvenser for kamfiltre:

- Finn lengde, bredde og høyde til rommet.
- Frekvensen for første aksielle mode i lengderetningen er lik lydhastigheten delt på det dobbelte av avstanden mellom de reflekterende flatene. Med rommets lengde L som avstand mellom flatene (endeveggen) får vi $f = c/(2L)$.
- De overharmoniske modene finnes ved å ta frekvensene du fant og gange med heltallene 2, 3, 4, 5 og så videre. Med N lik et heltall kan formelen for grunnfrekvens og overharmoniske skrives i form av likning (4). som $f = N \cdot c/(2L)$. Det vil være nyttig å regne ut frekvens til moder opp til grensefrekvensen gitt av likning (2), det vil si $3 \cdot c/L_{\min}$. Avstand fra vegg til første node er lik $1/2$, $1/4$, $1/6$ og så videre, eller mer generelt $1/(2 \cdot N)$. Dobler denne avstanden finner vi avstanden mellom nodene (for N større enn 1).

$$f_N = \frac{c \cdot N}{2 \cdot L} \quad (4)$$

Det er tilgjengelig i en kalkulator for kun aksielle moder med sammenlikning av rommets dimensjoner opp mot hva som er regnet som gunstige dimensjonsforhold (kun Windows), se <http://www.realtraps.com/modecalc.htm>

Tangentielle og oblike moder er mer komplisert å regne ut, se likning (5), hvor p , q og r er heltall fra 0 og oppover. Dersom to av disse tre heltallene er lik 0 vil vi få de aksielle modene og formelen får samme form som likning (4). Dersom kun ett av heltallene er lik 0 finner vi de tangentielle modene, mens p , q og r alle over 0 i heltallsverdi gir de oblike modene. Se også læreboka, side 228–235.

$$f_{p,q,r} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{B}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \quad (5)$$

For å regne ut slike tangentielle og oblike moder finnes det kalkulatorer på nett som bruker denne formelen, se for eksempel: <http://amroc.andymel.eu/>, <http://www.bobgolds.com/Mode/RoomModes.htm>, <http://www.mcsquared.com/metricmodes.htm> og <http://www.hunecke.de/en/calculators/room-eigenmodes.html>.

Regneeksempel:

Et rom som er 5 m langt ($L = 5$), 3,5 m bredt ($B = 3,5$) og 2,4 m ($H = 2,4$ m) høyt vil gi oss følgende grunnfrekvenser:

I lengderetning: $f_0 = c/(2L) = 343/(2 \cdot 5) \approx 34,3$ Hz

Sideveis: $f_0 = c/(2B) = 343/(2 \cdot 3,5) \approx 49,0$ Hz

Vertikalt: $f_0 = c/(2H) = 343/(2 \cdot 2,4) \approx 71,5$ Hz

Ved å gange disse frekvensene med heltall finner vi de overharmoniske modene opp til ca. 200 Hz. Over 100 Hz kan vi runde av til hele Hz. Tabell 1 viser utregnede aksielle moder opp til 200 Hz i de

tre ulike aksielle retningene. Vi bør finne moder opp til ca. 430 Hz for dette rommet her basert på likning (2), men for å spare litt plass er de ikke tatt med her i tabell 1.

Utregnede moder vil dessverre ikke alltid stemme med virkeligheten. For eksempel er ofte rommets flater ikke fullstendig lydette og reflekterende. Dette fører til at resonansfrekvensene flytter seg noe i forhold til hva vi har regnet ut, både i frekvens og hvor nodene og antinodene befinner seg i rommet. Skråstilte vegger fjerner ikke stående bølger, de bare fører til at mønsteret til de stående bølgene med noder og antinoder bare flytter seg litt i forhold til hva vi ville forventet, og de blir dermed vanskeligere å forutse (se figur 13-23 i læreboka). Rom som er helt rektangulære og har helt harde vegger uten noen åpninger og sprekker fører til at være utregninger treffer best i forhold til virkeligheten.

Tabell 1: Utregnede aksielle moder.

Mode	Lengderetning	Sideveis	Vertikalt
f_0	34,4 Hz	49,0 Hz	71,5 Hz
f_1	68,6 Hz	98,0 Hz	143 Hz
f_2	103 Hz	147 Hz	214 Hz
f_3	137 Hz	196 Hz	286 Hz
f_3	172 Hz		

3.1.7 Reduksjon av effekten av stående bølger

Følgende kan gjøres for å redusere effekten av stående bølger (rommoder):

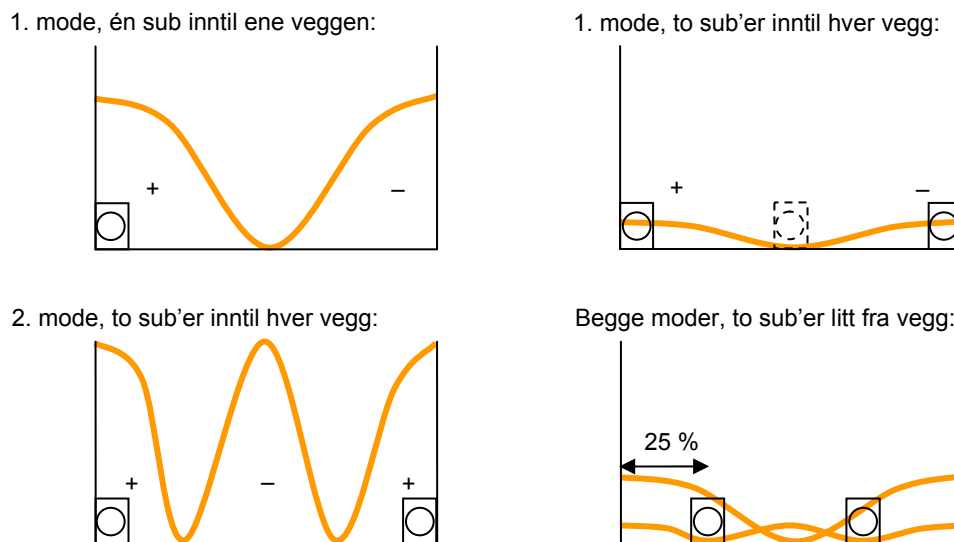
- Det vil være strategisk ikke å bruke rom som har de verste dimensjonsforholdene, for eksempel kubisk rom.
- Finne gunstig/smart plassering av høyttalere og lytteposisjon. Å sette høyttaler på en node vil redusere nivået til aktuell stående bølge, mens på en antinode heves nivået. Ofte må en prøve seg fram ved å flytte høyttalere og lytteposisjon og høre hva som skjer siden modene i realiteten er annerledes enn hva de enkle utregningene tilsier. Å sette på rentoner som tilsvarer frekvensen til detekterte rommoder vil gjøre det lettere å utforske nivåvariasjonene i rommet. Har vi sterke aksielle, tangentiell og oblike moder blir det svært vanskelig å finne de punktene i rommet optimal balanseringen mellom alle modene.
- Akustisk absorpsjon og diffusjon. Tiltakene må være effektiv i bassen (under 200 Hz). Se kapittel 8 for informasjon om effektivitet til absorbenter og diffusorer ved ulike frekvenser.
- Elektronisk korreksjon, se delkapitlet 3.5 for mer detaljer.

Ved å måle akustiske forhold med moderne måleutstyr er det lettere å sette i gang effektive tiltak av alle de tre variantene over. Se kapittel 5 for mer detaljer.

3.1.7.1 Bruk av mer enn én sub i små rom

For å redusere dominans av rommoder i små rom vil det være mulig å fase ut rommodene ved å bruke to sub'er. Figur 18 viser hvordan en stående bølge kan bli faset ut ved å plassere en sub i hver av endene av vegg. Dette vil være mest effektivt og praktisk å oppnå for den mest lavfrekvente moden (grunntonen) mellom de aktuelle veggene: Den mest lavfrekvente stående bølgen vil ha en halv bølgelengde mellom de to veggene. Dette fører til at den stående bølgen har

motsatt polaritet ved de to veggene. Ved å plassere en sub ved hver vegg som får tilført det samme signalet vil vi få to ulike stående bølger som kansellerer hverandre ut. For den andre harmoniske moden (2. mode) vil ikke dette fungere da de to stående bølgene er i fase. Dersom sub'ene flyttes i en avstand ut fra veggen lik 25 % av total avstand mellom veggene vil sub'ene stå i nodene (nullpunktene) til 2. mode i tillegg til at 1. mode vil bli delvis utfaset av de to sub'ene.



Figur 18: Utfasing av stående bølger ved hjelp av to sub'ere.

For ethvert flerkanals oppsett vil vi ha en situasjon som beskrevet i figur 18, ikke bare for sub'ere, men også hovedhøytalere. Det vil dermed alltid være et visst samspill (ulik fase) mellom stående bølger ved samme frekvens satt opp av de høytalene som spiller samme kildesignal. Som regel panoreres en lydkilde kun mellom to høyttaler (i stereo/surround). Det vil derfor være interessant å undersøke stående bølger både med én høyttaler isolert sett og med begge høyttalene som det panoreres mellom. For surround vil det være aktuelt å sjekke parvis stående bølger med signal ut fra L+C, R+C, L+Ls, R+Rs og Ls+Rs (hvor Ls og Rs er surroundkanalene bak). Dette blir ganske mye mer omfattende enn å undersøke stereo-oppsett (kun L+R).

Bruk av utfasing kan også brukes i andre sammenhenger hvor vi ønsker å kvitte oss med et bestemt lydbidrag. For å lykkes fullstendig med dette må lydene være fullstendig i fase og ha samme nivå ved aktuelle frekvenser i utgangspunktet. Dette vil være lettest å oppnå ved lave frekvenser.

3.2 Interferens mellom direktelyd og refleksjon

Interferens mellom direktelyd og reflektert lyd fra rommet skaper store variasjoner i totalt nivå i form av kamfiltre. Slik interferens kan være betydelig i hele frekvensområdet avhengig av veiforskjell mellom direktelyd og refleksjon, og i hvilken grad lydkilden er direksjonell. Interferens mellom direktelyd og en enkelt refleksjon som har tilnærmet samme nivå vil ofte gi et problematisk kamfilter. For frekvensområder hvor høyttaleren er omnidireksjonell vil vi få minst mulig nivåforskjell mellom direktelyd og refleksjon. Nivåforskjell mellom disse bølgene vil da være utelukkende styrt av avstandsloven, akustiske egenskaper til reflekterende flater og direktivitet til mottakeren (lytteren eller mikrofonen).

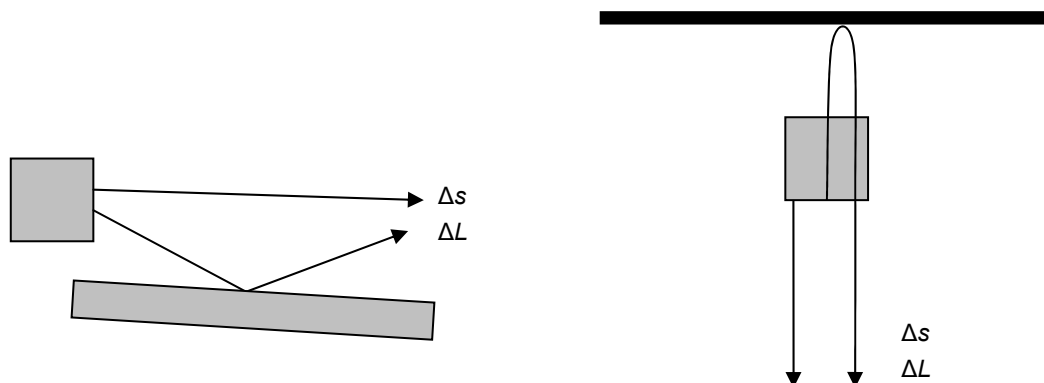
Likning (6) gir faseforskyvning mellom direktelyd og en refleksjon basert på forskjell i veilengde, Δs , som de to bølgene tilbakelegger fra lydkilde til mottaker og bølgelengde λ . Alternativt kan faseforskyvningen finnes ut fra forskjell i ankomsttid hos mottaker mellom bølgene, Δt , og periode T . Som regel er vi mest interessert i den del av faseforskyvningen som går utover hele omdreininger, målt innenfor $+180$ til -180° . Dette gjør det lettere å relatere faseforskyvning til den faseforskyvningen som har størst negativ konsekvens, nemlig 180° . Vi vil få 180° faseforskyvning når $\Delta s = \lambda/2$ eller $T/2$. Likning (7) viser hvordan vi kan finne laveste frekvens for utfasing (frekvens for 180° faseforskyvning, f_{180°) mellom de to bølgene ut fra en kjent veiforskjell Δs eller tidsforsinkelse Δt . Vi får også utfasing ved et oddetall (3, 5, 7, osv.) ganget med f_{180° .

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta s}{\lambda} \cdot 360^\circ = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ \quad (6)$$

$$f_{180^\circ} = \frac{c}{2 \cdot \Delta s} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (7)$$

Over 200 Hz vil vi oftest ha høy tetthet av moder slik at stående bølger blir et mindre betydelig problem. Lave nivåer over 200 Hz vil derfor ofte skyldes interferens. Under 200 Hz vil vi ofte ha en kombinasjon av interferens og stående bølger og det vil være vanskelig å skille disse to fenomenene fra hverandre. For eksempel er opplevd lavt nivå ved 80 Hz på grunn av interferens eller stående bølger? Ved å måle opp veiforskjell mellom direktelyd og «mistenkte» reflekterende flater kan vi finne om det virker sannsynlig at det lave nivået skyldes interferens.

Figur 19 viser de to vanligste og ugunstige interferensene på direktelyden som vil oppstå i et kontrollrom: Én enkelt refleksjon fra flater som befinner seg mellom høyttaleren og lytte posisjon, som miksebord eller «outboards» og én enkelt refleksjon fra veggen bak høyttaler (frontveggen i rommet for stereo-oppsett). Kamfiltre fra for eksempel miksebordrefleksjonen kan ofte lett unngås ved riktig plassering av høyttaler og miksebord og vinkling av miksebord. Det er ofte vanskeligere å unngå kamfiltre forårsaket av frontveggen fordi det ikke alltid er lett å absorbere refleksjonen fra frontveggen ved lave frekvenser. Med høyttaler innebygget i veggen slik at høyttalerfronten er jevn med veggen («flush mounted») vil vi slippe dette kamfilteret fullstendig. Slik høyttalerinstallering er forholdsvis vanlig for kontrollrom.



Figur 19: Refleksjoner i kontrollrom som ofte fører til uheldige kamfiltre.

For miksebordrefleksjon er forskjellen i nivå mellom direktelyd og refleksjonen, ΔL , ofte lav, kun noen få dB, også selv om høyttaleren er ganske direktiv. Med reflekterende flater nær forplantningslinjen for direktelyden vil vinkelavviket mellom direktelyd og refleksjon bli liten. Dette, i

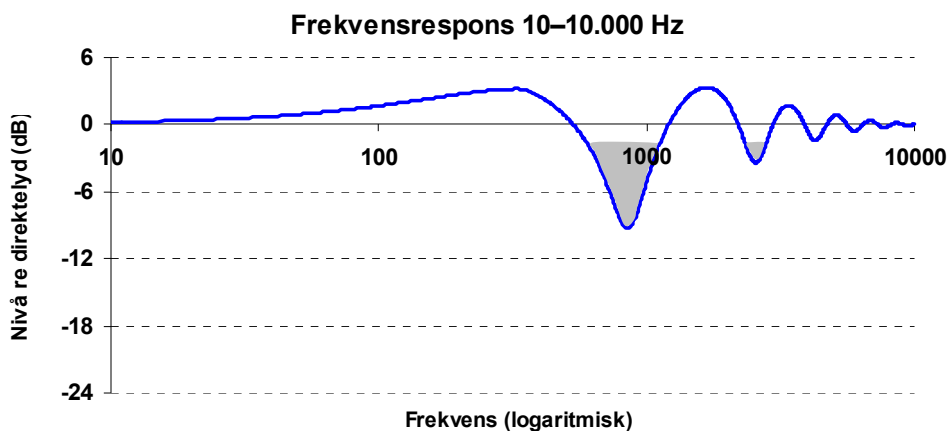
kombinasjon med forholdsvis ganske lik veilengde (avstandsloven) fører til liten nivåforskjell. Liten nivåforskjell gir et sterkt kamfilter som svekker direktelyden betydelig. Veiforskjellen, Δs , er typisk 20–40 cm som fører til at laveste kanselleringsfrekvens i kamfilteret, f_{180° , havner i området 430–860 Hz. Refleksjonen fra frontveggen gir i hovedsak betydelig interferens ved lave frekvenser hvor høyttaleren er så å si omnidireksjonell, typisk under 200 Hz. Avstanden som lydbølgene tilbakelegger regnes fra høyttalers dominerende akustiske senter. Dette vil ofte være i front av høyttaler som indikert i figur 19. For høyttalere med bassrefleks og åpning bak kan det være mer korrekt å se på akustisk senter bak høyttaler, men kun i det frekvensområdet som bassrefleksjonen jobber – i nedre del av frekvensresponsen til høyttaleren. Dersom høyttalers akustiske senter er 0,43 m fra frontveggen vil Δs bli lik $2 \cdot 0,43 = 0,86$ m og refleksjonen kommer 180° ut av fase med direktelyden ved 200 Hz.

For refleksjon bak høyttaler vil f_{180° flyttes opp i frekvens dersom høyttaler settes nærmere vegg. Vi kan på denne måten flytte f_{180° opp i frekvensområdet hvor høyttaler er betydelig direktiv. Vi får på grunn av direktiviteten økt nivåforskjellen ΔL slik at interferensen får mindre betydning. Når høyttalers avstand til vegg økes vil f_{180° flyttes ned i frekvens. For store avstander mellom høyttaler og vegg, typisk over 2 m, vil avstandsloven føre til stor nivåforskjell slik at interferensen blir svakere. Med ca. 0,3–2,2 m avstand til frontvegg får vi ofte et problematisk kamfilter fordi vi får liten nivåforskjell mellom direktelyd og refleksjonen så lenge høyttaler er omnidireksjonell. En slik avstand gir første kanselleringsfrekvens innenfor 39–286 Hz.

Sideveggene, himling og gulv vil også kunne gi interfererende refleksjon og uheldige kamfiltre (sett ut fra et stereo-oppsett). For bakveggen i rommet (eller mer generelt vegg framfor høyttaler) vil veiforskjellen Δs være så stor at ΔL også blir veldig stor (på grunn av avstandsloven) og kamfilteret blir veldig svakt (liten nivåheving og -svekking). Erfaringer med måling i kontrollrom viser at interferens fra vegg bak høyttaler er mye mer betydelig enn interferens fra andre flater for et stereo-oppsett. Dette kan skyldes at den destruktive interferensen fra denne vegg (frontveggen i et stereo-oppsett) også rammer de aksielle modene i lengderetning til rommet. Enkeltrefleksjonen fra frontveggen vil fase ut kilden ved en viss frekvens og igangsettelse av aksielle stående bølger ved denne frekvensen blir liten. Derimot for refleksjon fra sideveggen vil denne refleksjonen ha en betydelig annerledes veiforskjell i forhold til direktelyd i lytteposisjon, sammenliknet med aksial retning sideveis i rommet. De stående bølgene vil for disse flatene bli svekket ved andre frekvenser enn kamfilteret i lytteposisjon.

Figur 20 viser skisse av et resulterende kamfilter fra en miksebordrefleksjon med veiforskjell lik 0,2 m og antatt en standard studiomonitor (direktestrålende elektrodynamisk trykkammer). I diskanten (typisk over 5 kHz) vil som regel kamfilteret bli svakere fordi høyttaler er direktiv og vi får større nivåforskjell, ΔL . For lave frekvenser reflekter miksebordet lite lyd så vi har i hovedsak kun direktelyd i bassen. Kanselleringen vil gjelde i et ganske bredt frekvensbånd i litt over en oktav. For eksempel en kansellering ved 860 Hz vil føre til nivåsvemming i hele området 550–1250 Hz. Dette frekvensområdet er viktig for definisjon av tale/vokal og andre lyder. Med en svekking av direktelyden i dette området kan det bli vanskeligere å lokalisere. Opplevd definisjon går gjerne ned fordi vi får overvekt av reflektert lyd i dette frekvensområdet (grå felter representerer reflektert lyd i figur 20). Lyden vil lett få en mer romlig/diffus karakter i dette frekvensområdet, avhengig av hvor reflekterende kontrollrommet er. For godt dempede kontrollrom vil det stort sett være frekvensresponsen som vil framstå som underlig, opplevd definisjon vil bli mindre påvirket.

Kansellering høyt oppe i frekvens kan også likne på kanselleringene vi får for refleksjoner fra øremuslingene. Et kamfilter fra en refleksjon i rommet kan dermed kunne forvirre oss i forhold til retning til lyden. Totalt sett vil kamfilteret kunne gi oss et mer diffust stereobilde og lavere tydelighet/definisjon.



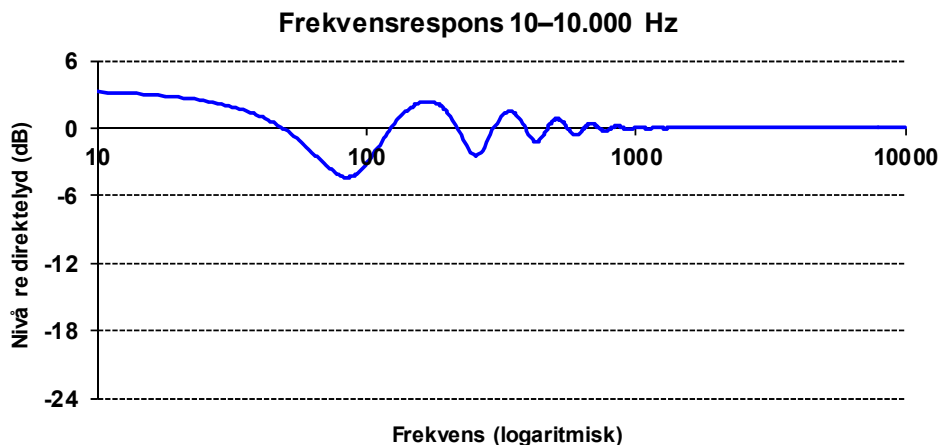
Figur 20: Kamfilter på grunn av miksebordrefleksjon med 0,2 m veiforskjell (1,8 og 1,6 m), forutsatt at lydkilden er en typisk studiomonitor (elektrodynamisk trykkammer).

Et forsøk på å få tilbake tapt/savnet definisjon på lyden ved hjelp av EQ vil kun løfte det totale lydnivået og vil ikke få tilbake tapt direktelyd eller endre på det uheldige forholdet mellom direktelyd og reflektert lyd. Det beste vil være å svekke selve kamfilteret/interferensen. Ved å flytte høyttaleren lenger bak mikseren, eller endre høyde og helling på mikseren kan vi styre miksebordrefleksjonen bort fra lytteposisjonen. Bruk av speil vil her være praktisk for å sjekke hvilke flater som kan gi spekulær refleksjon (se delkapittel 8.1.1) fra høyttaler.

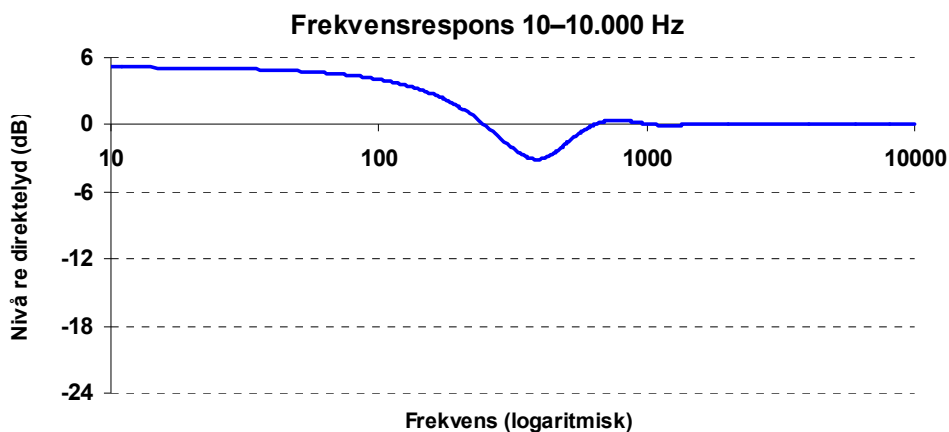
Det andre tilfellet av uheldig kamfilter vist i høyre del av figur 19 er refleksjonen fra vegg bak høyttaler. Denne refleksjonen bidrar til et kamfilter som skissert i figur 21, basert på at høyttalers front er 1 m fra vegg. Dette oppsettet fører til laveste kanselleringsfrekvens ved 86 Hz, fordi lydbølgen med 180° faseskift har en bølgelengde lik det dobbelt av avstand lyden tilbakelegger fra høyttaler mot vegg og tilbake til høyttaler igjen (total $2 \cdot 1 = 2$ m). Over 500 Hz er kamfilteret mindre betydelig fordi høyttaleren er direktiv; lyd bakover mot vegg som reflekterer har vesentlig lavere nivå enn direktelyden forover. Dette kamfilteret vil legge seg oppå responsen fra stående bølger, slik at det totale nivået i rommet ikke nødvendigvis trenger å være lik kamfilteret vist i figur 21. Dersom rommet har en aksielle mode i lengderetning rundt 86 Hz kan reduksjonen av nivået ved 86 Hz totalt sett bli mer enn skissert i figur 21.

Figur 22 og 23 viser forventet kamfilter ved å ha høyttalers front henholdsvis 0,2 m og 2,5 m fra vegg. Dette er over og under avstandsområdet som er regnet som mest uheldig. Ved å flytte høyttaler nærmere frontveggen reduseres både Δs og ΔL . Den totale lyden blir så å si koherent i hele frekvensområdet hvor høyttaleren er omnidireksjonell og vi får så å si 6 dB nivåheving på grunn av veggrefleksjonen. Over 200 Hz er veggrefleksjonen betydelig svekket på grunn av direktivitet og kamfilteret blir svakere. Vi ser at det største problemet knyttet til veggrefleksjonen er for tilfellet kraftig nivåheving i bassen på grunn av refleksjonen, men dette kan lett kompenseres for med EQ siden effekten av kamfilteret vil stort sett være lik i hele rommet. Veiforskjellen Δs varierer lite når vi flytter oss rundt i rommet slik at kamfilteret som vi ønsker å kompensere for blir tilnærmet lik. Mange studiomonitorer har med bakgrunn i dette mulighet til å senke nivået i bassen (og

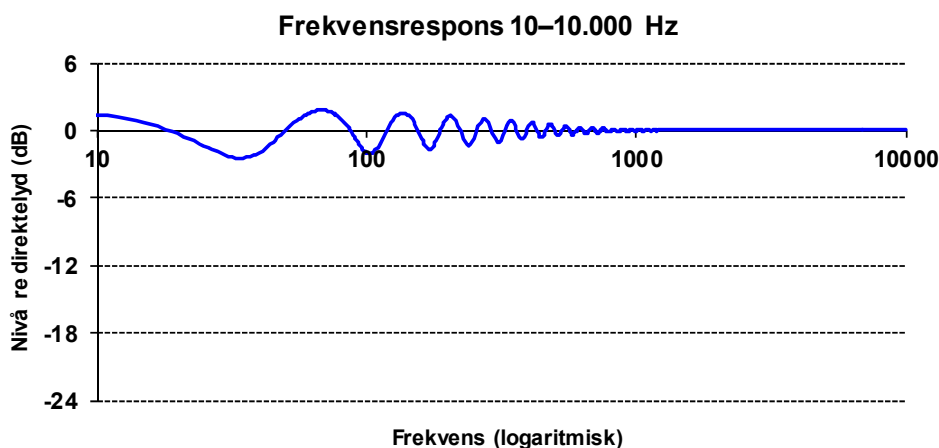
diskanten) med brytere/«dip switcher» bak på monitoren for å korrigere for denne effekten av veggrefleksjonen. Med økt avstand til frontveggen øker både Δs og ΔL . Kamfilteret flytter seg nedover på grunn av økt i frekvens men blir samtidig svekket på grunn av avstandsloven.



Figur 21: Kamfilter med høyttaler 0,5 m fra frontvegg.



Figur 22: Kamfilter med høyttaler 0,2 m fra frontvegg.



Figur 23: Kamfilter med høyttaler 2,5 m fra frontvegg.

Rommoder blir gjerne et mindre problem om vi demper ned én av veggene som de stående bølgene står mellom. For eksempel vil neddemping av himling/tak føre til svakere og større båndbredde for alle rommoder som involverer himlingen, som aksiell mode mellom gulv og taket. Ved å dempe ned et rom vil vi få mindre reflektert lyd. Dette kan føre til at i stedet for å ha betydelig

interferens mellom mange bølger (og mye etterklang) får vi betydelig interferens mellom kun noen få bølger. Dette fører til at vi hadde store problemer med rommoder før tiltak (demping av rommet), men at nye problemer med interferens mellom et lite antall bølger blir et voksende problem etter hvert som rommet dempes mer og mer ned. Ofte vil vi dempe noen flater mer enn andre slik at vi sitter igjen med sterke refleksjoner fra kun noen av rommets flater. Dette gir liten grad av diffusjon og kun noen få kamfiltre som blir betydelige. Frekvensresponsen blir da lett ujevn. Etterklangen i rommet vil generelt gå ned etter å ha dempet ned rommet, men vi får ikke nødvendigvis en mye mer flat og jevn frekvensrespons etter å ha dempet ned rommet! Mange vil forvente kun forbedring ved å gjøre akustisk tiltak og vil ikke være forberedt på det at nye problemet kan oppstå.

I tillegg vil situasjonen med et godt dempet rom, men noen få interfererende bølger, være mindre representativt sammenliknet med forholdene i en vanlig stue (som folk flest bruker for å lytte til musikk). Vi vil gjerne måtte prioritere mellom hvor representativt vår lyttesituasjon er i forhold til hvor mye detaljer i lydbildet vi er i stand til å høre. Et veldig dempet rom vil gjøre oss i stand til å høre små detaljer i lydbildet, men kan lett ha en frekvensrespons og et fravær av etterklang som vi må være veldig bevisst. Lytterne vil kunne høre på din lydmiiks i både hodetelefoner, udempede og dempede rom. Alle disse tre ulike lytteforholdene vil forandre frekvens- og tidsrespons til lyden for lytteren. Den perfekte akustiske respons vil derfor neppe kunne finnes for små rom og lytting. Noe av hovedpoenget er å være bevisst hvordan ditt rom er med å påvirke lydbildet og hvordan du skal forholde deg til dette når du mikser. Ved å vite ved hvilke frekvenser rommet endrer lyden vil vi lettere vite ved hvilke frekvenser vi må passe på å kompensere unødvendig for rommets farging av lyden. Å bruke både hodetelefoner og lytting i ulike rom kan gjøre oss tryggere på hvor bra en miks vil fungere for målgruppen.

3.3 Etterklang og totalt lydnivå

I små rom som er møblert vil etterklangstiden være typisk rundt 0,5 sekunder. Består rommet av harde reflekterende flater uten møbler kan etterklangstiden bli lenger og ikke minst totalt lydnivå vesentlig høyere. Når oppsamlet lydenergi fordeler seg over et mindre volum går akustisk lydnivå opp. I en slik situasjon vil ofte lav takhøyde være veldig problematisk fordi alle vil ha den reflekterende himlingen (taket) nær seg og volumet til rommet blir lite i forhold til hvor mange lydkilder det er plass til. Slike små, lave og harde rom har man gjerne erfart som problematisk i øvingslokaler eller puber. Med mange lydkilder blir det ofte slitsomt sterk totallyd og vanskelig å fokusere på bestemte lydkilder (som vokalisten i bandet eller den du snakker med). Å få hevet himling/tak vil ofte være vanskelig for å få ned lydnivået, så alternativet blir som regel å gjøre himling/tak mer lydabsorberende. Dette senker totalt lydnivå og etterklangstid. Ønsker vi lang etterklangstid og et akseptabelt totalnivå er ofte eneste alternativ å heve høyden i rommet.

For noe dempede rom vil vi ikke ha nok refleksjoner og eller et tilstrekkelig diffust lydfelt til å snakke om etterklang. Kontrollrom for kritisk lytting ønsker mange gjerne å dempe ned akustisk slik at etterklangen blir lavere enn 0,5 sekunder, typisk 0,2–0,3 sekunder. Da vil det ofte ikke være snakk om en fullverdig etterklang, heller noen enkeltrefleksjon som gir en viss følelse av etterklang/rom.

3.4 Diffusjon og absorpsjon

Både diffusjon og absorpsjon vil redusere stående bølger og enkeltrefleksjoner. Sterke enkeltrefleksjon vil kunne skape forandring av frekvensrespons, lokalisering (kamfiltre og tidlige

refleksjoner som kan forvirre vår retningssans) og gi hørbare ekko og flutter-ekko. Når refleksjoner med betydelig nivå økes i antall, vil fargingen til hver enkelt refleksjon ofte utjevne hverandre.

Diffuserende flater skaper en mer nøytral akustisk respons uten å dempe ned den totale responsen. Diffusjon vil øke antall refleksjoner i rommet, men nivået til hver enkelt refleksjon blir redusert sammenliknet med bruk av jevne, harde flater. Diffuserende flater bidrar til å gjøre rommet tilsynelatende større siden nivåene på hver enkelt refleksjon går ned. Diffusjon vil også mikse den reflekterte lyden bedre i rommet. Vi får et mer diffust lydfelt, faren for ekko blir redusert og vi får en større opplevelse av å bli omsluttet av responsen fra rommet. Diffusjon kan også føre til at etterklangstiden blir kortere ved at alle de reflekterte lydbølgene i rommet jevnlig treffer alle overflatene i rommet. Vi hindrer dermed at lydbølger forplantes mellom kun to av rommets flater.

Absorpsjon demper den akustiske responsen og vil føre til mindre etterklang i rommet. Dersom kun noen få flater i rommet dempes (og de resterende flatene ikke dempes i det hele tatt) vil rommet få et veldig ikke-diffust lydfelt som lett kan gi få refleksjoner med betydelig nivå, som nevnt i delkapittel 3.2, spesielt når de flatene som er reflekterende har lite diffusjon. Basert på dette kan en spørre seg hvorfor demping av små rom er mer vanlig enn å innføre flater som effektivt diffuserer lyden. Som vi skal komme inn på i kapittel 8 vil det være krevende mer dybde i rommets overflater for å få til effektiv diffusjon. Og for å få effektiv diffusjon i et bredt frekvensområde kan ikke flaten ha en enkelt form. Så bruk av absorpsjon i stedet for diffusjon har ofte med økonomi og hvor lett det er å konstruere absorbenter sammenliknet med diffusorer.

3.5 Elektronisk korreksjon av akustisk romrespons

Ofte vil det være kostbart og vi har for lite plass i utgangspunktet til å lage akustiske konstruksjoner slik at vi oppnår ønsket akustisk respons, spesielt i bassen som vi skal komme nærmere inn på i kapittel 8. Det vil derfor være et alternativ å korrigere dette elektronisk. Elektronisk korreksjon gjøres som regel på mastersignal ut av mikser, på signal inn til forforsterker eller ved hjelp av innebygget EQ i aktive høyttalere. Elektronisk korreksjon består ofte av EQ, delay og polaritetsskift på signalet til høyttaler. EQ brukes for å kompensere for frekvensresponsen vi får med høyttaleren i rommet. EQ vil i prinsippet ikke endre tidsresponsen til rommet, kun endre totalt lydnivå og frekvensrespons. Men rommoder som henger lenge igjen i rommet blir mindre hørbare tidsmessig om nivået ved aktuelle frekvenser blir justert ned. Delay brukes i hovedsak for å gjøre et usymmetrisk lytteoppsett symmetrisk (se figur 23). Polaritetsskifte brukes som regel på en eventuell subwoofer for å kunne endre faseforholdet ved delefrekvensen mellom sub og hovedhøyttaler, eller mellom flere sub'er (se figur 18). Ved å endre faseforholdet kan frekvensresponsen bli mer flat rundt delefrekvensen.

Skal det gjøres EQ-korreksjon for et større lytteområde bør det kun korrigeres avvik som vil gjelde i hele lytteområdet. Det vil være mindre problematisk å trekke ned topper i frekvensresponsen, sammenliknet med å heve lave partier i frekvensresponsen. Dette skyldes at vi ved å heve nivået også vil heve bakgrunnsstøyen i lyden du lytter til, samtidig som headroom for lyttesystemet blir redusert ved de frekvenser hvor vi hever nivået. I tillegg er topper som regel mye mer merkbare/sjenerende, så opplevd frekvensrespons blir merkbart bedre ved kun å «sage av» toppene. Flerbånds parametrisk EQ er mye mer effektiv/nøyaktig enn grafisk EQ med typisk 1/3 oktav oppløsning. Med en parametrisk EQ kan senterfrekvens og Q-verdi settes til å passe

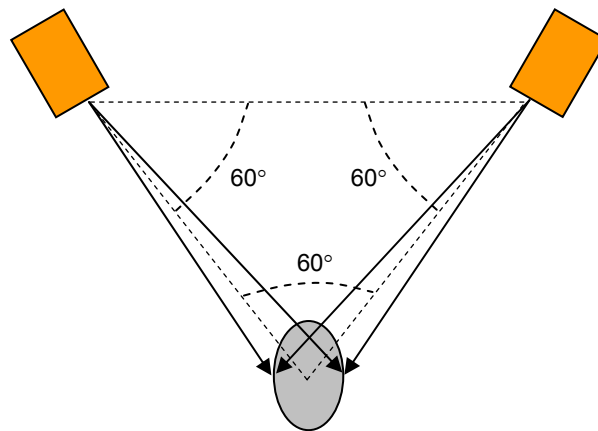
problemet mye bedre hva en får til med grafisk EQ (med faste frekvenser og båndbredde/Q-verdi). Faseresponsen til EQ'en vil ofte også være bedre for parametriske sammenliknet med grafiske.

Noen systemer bruker mer avanserte metoder som består i å regne ut den inverse impulsresponsen for høyttaler og rom, og konvolvare («flette») lyden ut til høyttaler med denne inverse responsen. Dette vil forbedre selve tidsresponsen (gi kun direktelyd ideelt sett/teoretisk) og føre til at det låter vesentlig mer «tight». Slik inversfiltrering egner seg best for en bestemt sweet-spot siden impulsresponsen (ekkoagrammet) vil være ulik i forskjellige steder i rommet.

3.6 Lytterom

Høyttalere har én gitt direktivitet og de kan ikke samtidig etterlikne ulike direktiviteter til mange ulike instrumenter. To eller flere høyttaler har i oppgave å gjenskape lydfelt fra virkeligheten – film eller musikk, eller å skape illusjoner som er troverdige *nok*. Ideelt skal hver lytter få «servert» den samme lyden uavhengig av hvilket rom de sitter. Refleksjoner som rommet tilfører vil endre vår opplevelse av avspilt lyd, så det er i praksis heller snakk om hvor store avvik som kan tolereres. Et fullstendig dempet lytterom vil ikke være gunstig, ei heller ikke et veldig reflekterende lytterom. Optimale forhold gir reflektert lyd som ikke farger lydopplevelse i for ekstrem grad.

Gode lytteforhold starter med et symmetrisk høyttaleroppsett, se figur 24. For stereo skal det være en likesidet trekant mellom høyttalerne og lytteposisjonen. Ofte blir lytteposisjonen betegnet som «sweet spot», nettopp fordi lytteforholdene ofte er optimalisert for et bestemt sted i rommet.



Figur 24: Standard stereooppsett.

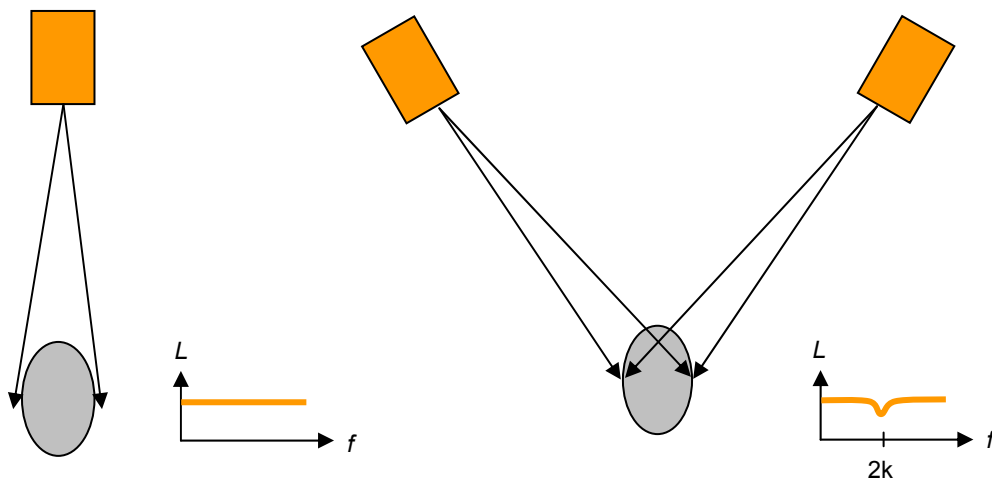
Lyden fra venstre høyttaler vil nå høyre øre og vise versa når vi har høyttalere i rom, som vist i figur 24. I hodetelefoner skjer ikke dette og er med på å forklare hvorfor en miks låter veldig forskjellig i forhold til lytting med høyttalere i rom. Fordi hodet skygger for lyd ved høye frekvenser er denne lekkasjen mest betydelig under ca. 4 kHz. Det er mulig å kompensere for dette ved å la det være en viss lekkasje ('cross feeding') mellom signalene til venstre og høyre hodetelefon. Eksempler på slike plugins er Bauer stereophonic-to-binaural DSP (forkortet til bs2b plugin, blant annet VST plugin) og HeadPlug DSP plugin (kun i musikkspilleren Winamp).

3.6.1 Panning

Med likt lydnivå i begge høyttalerne vil vi oppfatte det som at lyden kommer rett forfra. Dette er fordi det ikke er noen tidsforsinkelse eller nivåforskjell mellom lyd fra venstre og høyttaler. Å legge lyd i kun én høyttaler vil gi en mer robust formidling av retning; det skal mer til for at tidlige refleksjoner

gir forvirrende informasjon om retningen til lyden. Dette blir gjerne kjedelig i stereo (60-tallsstereo med gitar i venstre og vokal i høyre høyttaler), men er mer vanlig i surround-miksing. I 5.1 surround er panning mer vanskelig blant annet fordi lyden fra høyttalerne bak og til siden blir skygget av vårt hode. Det blir vanskeligere å skape en illusjon av at lyd kommer fra et sted midt mellom to av høyttalerne til siden eller bak. For å gjenskape et 3-dimensjonalt lydfelt på en robust og troverdig måte, må vi ofte bruke mer avanserte metoder. For eksempel Ambisonics, kunsthodeteknikk og bruk av HRTF (Head-Related Transfer Functions), sistnevnte for å simulere hvordan vårt hode påvirker lyden til hvert av ørene.

Med to høyttalere får vi et kamfilter for lyd til hvert øre, siden to lydkilder bidrar med tilnærmet like høyt nivå, men med litt tidsforskjell. Med likt nivå fra begge høyttalerne vil vi lokalisere til senter, men vi får et kamfilter som reduserer nivået med ca. 6 dB ved ca. 2 kHz. Over 2 kHz skygger hodet mye for lyden fra én av høyttalerne slik at det ikke blir noen betydelig interferens. Denne dippen ved 2 kHz blir mer betydelig jo nærmere vi sitter høyttalerne og jo sterkere nivået til direktelyden er i forhold til reflektert lyd. Nær-monitoring i veldig dempede rom kan dermed lure oss til å mikse med for høyt nivå rundt 2 kHz! Dette viser svakheter ved stereo, og fordelene med å ha en senterhøyttaler, som forsøkt illustrert i figur 25. Tidlige refleksjoner vil gjøre situasjonen mindre problematisk fordi disse refleksjonene vil «fylle igjen» dippen ved 2 kHz. Senterhøyttaler er brukt blant annet i 5.1 for å ha mer robust lokalisering til senter og talelyden blir fri for interferens mellom to høyttalere.



Figur 25: Frekvensrespons for direktelyd for senterhøyttaler og senterpanorering.

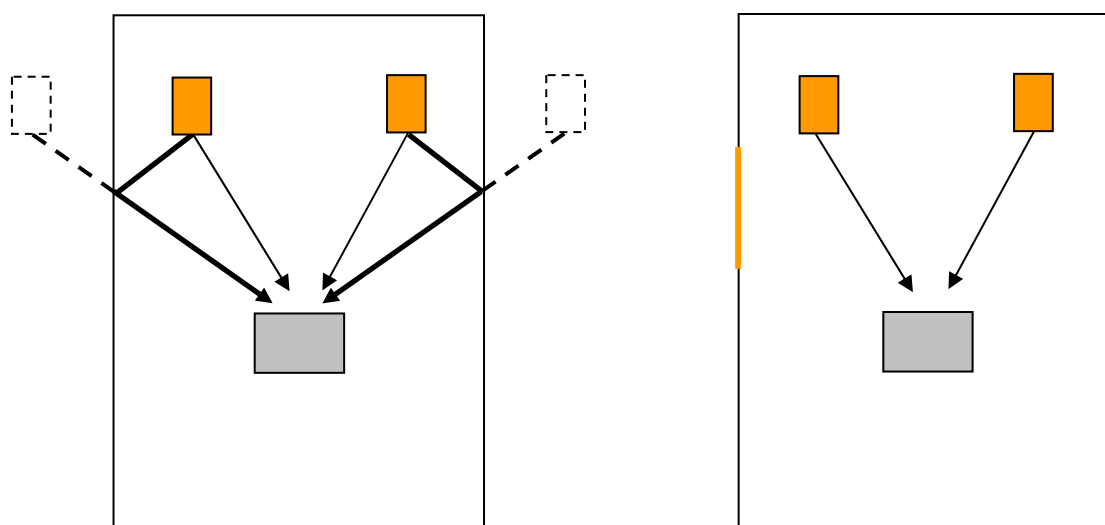
3.6.2 Inne-i-hodet-lyd

Ved lytting på hodetelefoner eller i rom uten noen refleksjoner høres det ut som lyden er inne i hodet, ikke ute i rommet. Å ha noen tidlige refleksjoner er nyttige for å unngå denne opplevelsen.

3.6.3 Sidevegger

Lydbølger som treffer kun én flate fra lydkilde til lytteposisjon (evt. mikrofon) kalles *første ordens refleksjon* – ordenen til refleksjonen angir hvor mange flater lydbølgen treffer. Figur 26 viser første ordens sideveggsrefleksjon med udempede og fulldempet felt langs sideveggene som vil kraftig dempe sideveggsrefleksjonene. De to første ordens sideveggsrefleksjonene vil tilsvare at sideveggene fjernes og i stedet erstattes med to speilkilder, tegnet som stiplede høyttalere i figur 26. De to speilkildene vil bidra til at ditt effektive stereo-oppsett blir bredere.

Hvor bredt ditt lydbilde oppleves vil med ord regnes å være påvirket av hvor mye sideveggrefleksjonene blir dempet (med absorberende materialer). En annen måte nivået til sideveggrefleksjonene kan dempes på er å øke bredden til rommet, på grunn av avstandsloven. Diffuserende overflater på sideveggene vil også redusere nivået til de første ordens refleksjonene, men vil spre lydenergien i andre retninger slik at mer lydenergi forflyttes til å dukke opp i lytteposisjonen til et senere tidspunkt og heller bidra til etterklang og ikke opplevd bredde i lydbildet. Disse tiltakene vil også redusere uheldig farging av lyden og forvirring i forhold til retning på grunn av sideveggrefleksjonene. Det er gunstig med en viss bredde i rommet slik at refleksjonene ikke kommer så tidlig at de forvirrer vår opplevelse og retningsvurdering av direktelyden. Mange lydteknikere vil heller foretrekke å ha dempede sidevegger. Denne forskjellen kan forklares ut fra hvordan vi ønsker å lytte kritisk til kun lyden som kommer fra høyttalerne og at lydteknikere kanskje også er mer følsomme for tidlige refleksjoner.



Figur 26: Udempede og dempede refleksjoner fra sideveggene.

3.6.4 Frontvegg og bakvegg

For et stereo-oppsatt vil frontveggen i rommet ofte skape kamfilter i bassen som nevnt i delkapittel 3.2. Refleksjoner fra bakveggen har oftest lavere nivå enn frontveggen med referanse til direktelydnivået, slik at bakvegg sjeldnere gir kamfilterproblem. Bakvegg kan derimot lett skape forvirring om retning til lyden, slik at vi oftest ønsker å dempe ned eller diffusere refleksjoner fra bakveggen, spesielt 1. orden refleksjon. For surround-oppsatt, som 5.1, vil bakveggen også bli en flate som er bak surround-/bakhøyttalerne. For surround-miksing vil vi derfor ende opp med at alle rommets vegger bør dempes godt, spesielt under 200 Hz hvor høyttalerne oftest er så å si omnidireksjonelle. Å ha sidevegger som er like mye dempet som front- og bakvegg vil skape et mer symmetrisk lydbilde og lik bredde i lydbildet fra alle høyttalerne.

3.6.5 Himling og gulv

Lyd ovenfra virker ikke til å øke opplevd bredde til lyden og gir lett opplevelse av farging av lyden (frekvensmessig) – spesielt første ordens refleksjoner. Vi vil derfor ofte ha absorberende eller diffuserende materialer på veggen bak og himlingen i lytterommet. Himling bør ha en absorberende eller diffuserende overflate i området hvor vi vil ha første ordens refleksjon fra høyttaler ned til lytteposisjon. Gulvet vil vi ha i de fleste lyttesituasjoner, men kan ha teppe for å redusere generell etterklang. Som nevnt i delkapittel 3.2 vil gulvrefleksjonen kunne bli mer framtrædende som et interfererende element når andre flater i rommet er kraftig dempet ned.

3.6.6 Plassering av høyttalere

Plassering av høyttaler vil bli i forhold til både stående bølger og interfererende refleksjon fra frontvegg som beskrevet i delkapittel 3.2. Som nevnt vil det være viktigst å unngå 0,3–2,2 m avstand til veggen for elektrodynamiske høyttalere, med mindre høyttalere er omnidireksjonell også ved høye frekvenser som gir uheldig utslukning av nivået over 200 Hz med 0,3 m avstand.

3.6.7 Etterklang

En gjennomsnittlig stue/lytterom vil ofte ha noe høyere nivå på tidlige refleksjon og lengre etterklang sammenliknet med et kontrollrom (for kritisk lytting), typisk 0,5 s sammenliknet mot 0,2–0,3 s. Dette vil føre til at tydelighet til lydmiksen blir noe lavere i lytterrommet sammenliknet med i kontrollrommet. Men dedikerte lytterom kan ofte ha en etterklang mer opp mot kontrollrommet.

3.7 Design av kontrollrom

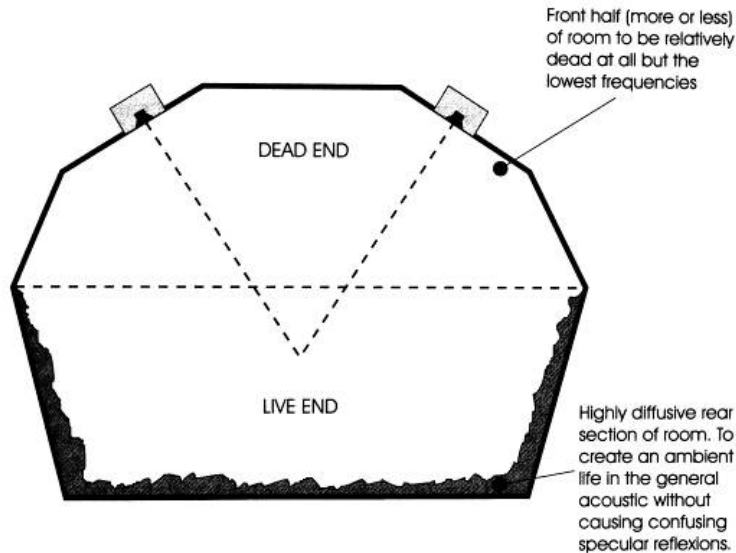
Kontrollrom er i hovedsak designet for kritisk lytting. Vi ønsker gjerne å kunne høre detaljer i miksen bedre i kontrollrommet sammenliknet med i et lytterom. Av den grunn er som nevnt etterklangstiden som regel lavere i kontrollrom sammenliknet et lytterom, 0,2–0,3 i stedet for ca. 0,5 s, og nivået på refleksjoner er generelt lavere. Har vi mye etterklang i kontrollrommet vil det være vanskelig å vurdere etterklang i lyden vi mikser fordi kontrollrommets etterklang vil maskere etterklangen på opptak/spor i miksen. På den annen side vil veldig lav etterklangstid i kontrollrommet også være et problem. Veldig lite akustisk respons fra rommet vil føre til at vi stort sett lytter på direktelyd og dette er veldig forskjellig fra forholdene hjemme i en stue. Så det vil være balanse mellom at kontrollrommet gir innblikk i flere detaljere enn i vanlig lyttesituasjon, samtidig som forholdene ikke er for langt unna forholdene for en «gjennomsnittlig» lytter. Mange lytter for tiden til musikk med hodetelefoner. Ved miksing vil det være nyttig å sjekke lydmiksen i ulike lyttemiljøer inklusive hodetelefoner. Under er noen av de mest kjente designfilosofiene for kontrollrom beskrevet.

3.7.1 LEDE – Live End Dead End

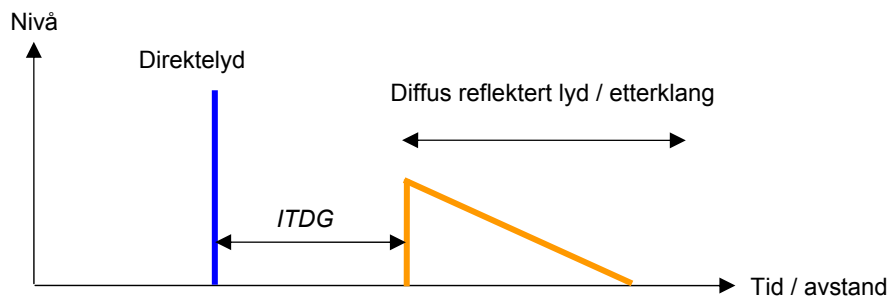
LEDE (Live End, Dead End) er et designkonsept utviklet av Don og Carolyn Davis (Syn-Aud-Con) på 70-tallet. Monitorene er plassert i den akustisk «døde» halvdel av rommet, mens den livige delen av rommet er bak lytteren, se figur 27. Den livige lydreflekterende delen skal ha høy grad av diffusjon. Den «døde» delen i et LEDE-rom brukes ofte for bassdemping og kan være noe reflekterende siden formen på veggen er slik at refleksjoner fra høyttalere vil treffe den diffuserende bakveggen før den når lytteposisjonen. Dette krever at høyttalere er montert i veggen som vist i figur 27.

Tanken bak designkonseptet er å minimere hvor mye kontrollrommet setter preg på opplevelsen av lyden du jobber med. Kontrollrommet skal gi litt liv til lyden, som de fleste vanlige lytterom, men på en mest mulig nøytral måte. Nøkkelen til dette var tenkt å være *initial time delay gap (ITDG)* og veldig høy grad av diffusjon på reflektert lyd fra kontrollrommet. Initial time delay gap er tidsforsinkelsen mellom direktelyden og den første refleksjonen som kommer. Et lite rom har lav verdi på *ITDG*, mens et stort rom har høy verdi for *ITDG*. For LEDE-design er det tenkt at *ITDG* til kontrollrommet skal være større en *ITDG* for innspillingsrommet. Ved at *ITDG* er ca. 20 ms vil første refleksjonen fra opptaksrommet i mange tilfeller komme før første refleksjon fra kontrollrommet. Figur 28 viser ekkogram/reflektogram for LEDE-design. Det er så å si ingen sterke

enkeltrefleksjoner, kun mange diffuse refleksjoner som dukker opp etter *ITDG*. *ITDG* er blitt regnet som viktig for opplevelsen av rommets størrelse og oppfattelse av direktelyden, men hvor viktig den er i forhold til nivå og grad av diffusjon på de første refleksjonene som dukker opp fra rommet er noe uvisst. *ITDG* vil muligens være mer betydningsfullt for ren akustisk lyd i kontrollrommet sammenliknet med *ITDG* fra opptaket siden cocktail-party og precedence effect avhenger av at direktelyd og refleksjon kommer fra ulike retninger til lytteren.



Figur 27: Skisse av LEDE-design sett ovenfra..



Figur 28: Ekkogram/reflektogram for LEDE-design.

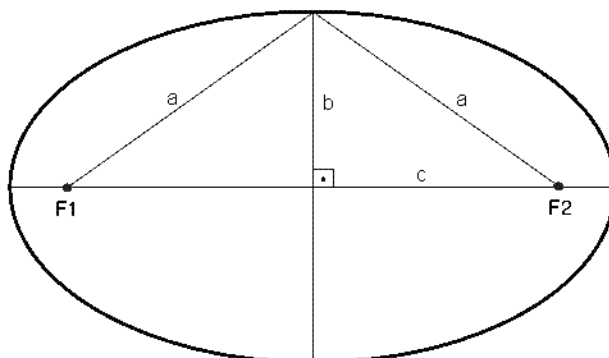
3.7.2 Refleksjonsfri sone (RFZ)

LEDE-design bygger på tanken at lytteposisjonen skal være innenfor en refleksjonsfri sone (*Reflection Free Zone*, RFZ). Innenfor sonen er det ingen refleksjoner som ikke dukker opp før tiden *ITDG*. Dette vil kreve en bestemt avstand og/eller vinkling av flater. En ellipseformet kurve angir kravet til avstand til reflekterende flate for å oppnå en viss forsinkelse for refleksjonen fra ulike retninger, se figur 29. F1 er posisjonen til lydkilden, F2 til mikrofon-/lytteposisjon. Vi ser fra figur 29 at det er lettest å få til tilstrekkelig forsinkelse nær F1 og F2. For flater innenfor ellipsen kan vi unngå spekulære refleksjoner ved å vinkle flaten slik at speilrefleksjonen ikke treffer lytteposisjonen, som frontveggene i et LEDE-design. Men diffraksjonsbidrag fra slike flater kan gi refleksjoner som dukker opp for *ITDG*.

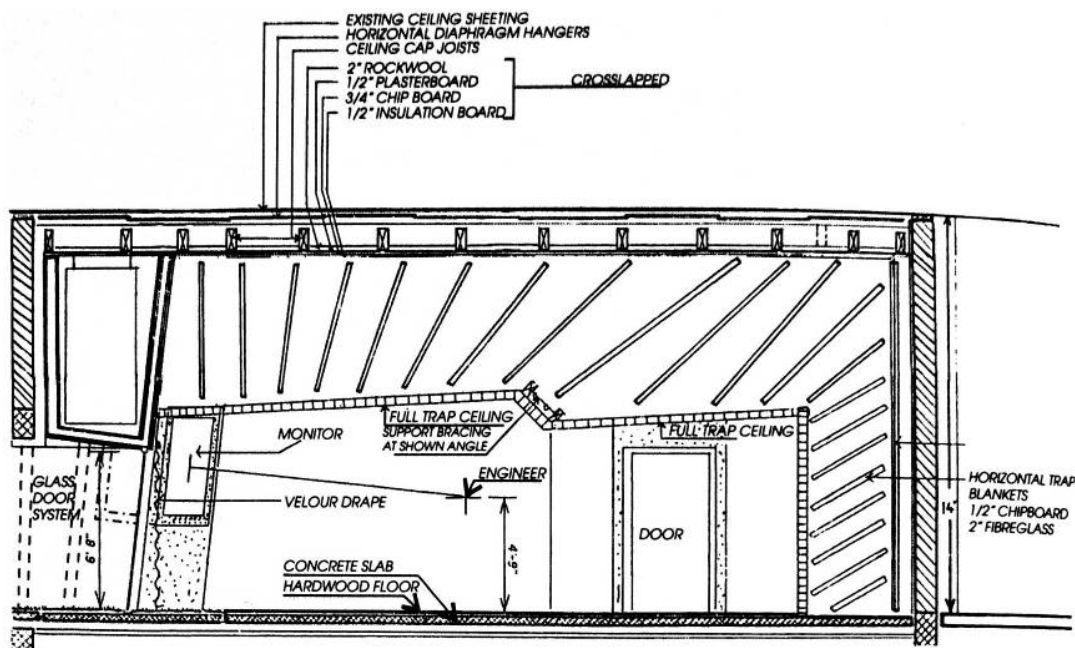
3.7.3 Non-environmental design

Non-environmental er en designfilosofi etablert av Tom Hidley på 80-tallet. Hidley skal ha utviklet dette designet etter jobbing i et kontrollrom sammen med Stevie Wonder. Stevie Wonder var med å

mikse i et rom hvor det var noen tidlige refleksjoner på et betydelig nivå og Stevie Wonder pekte i feil retning når han tenkte å peke mot høyttaleren (Newell, 2011). Dette fikk Hidley til å tenke at et kontrollrom bør ha minst mulig reflektert lyd, som om det ikke var noe reflekterende miljø rundt høyttalerne i det hele tatt, for mest mulig nøyaktig vurdering av lyden fra høyttalerne. Dette vil bety å dempe rommet mest mulig ned og i hovedsak lytte til direktelyden, med minst mulig påvirkning fra rommet. Dette gir et veldig tørt som avviker mye fra vanlige lytterom og det kan være krevende å adaptere til det, men det gir veldig gode analytiske forhold. Figur 30 og 31 viser eksempler på tegninger av kontrollrom som følger denne filosofien, sett vertikalt (snittegning) og ovenfra (plantegning). Vi ser at de akustiske tiltakene krever veldig stor plass.



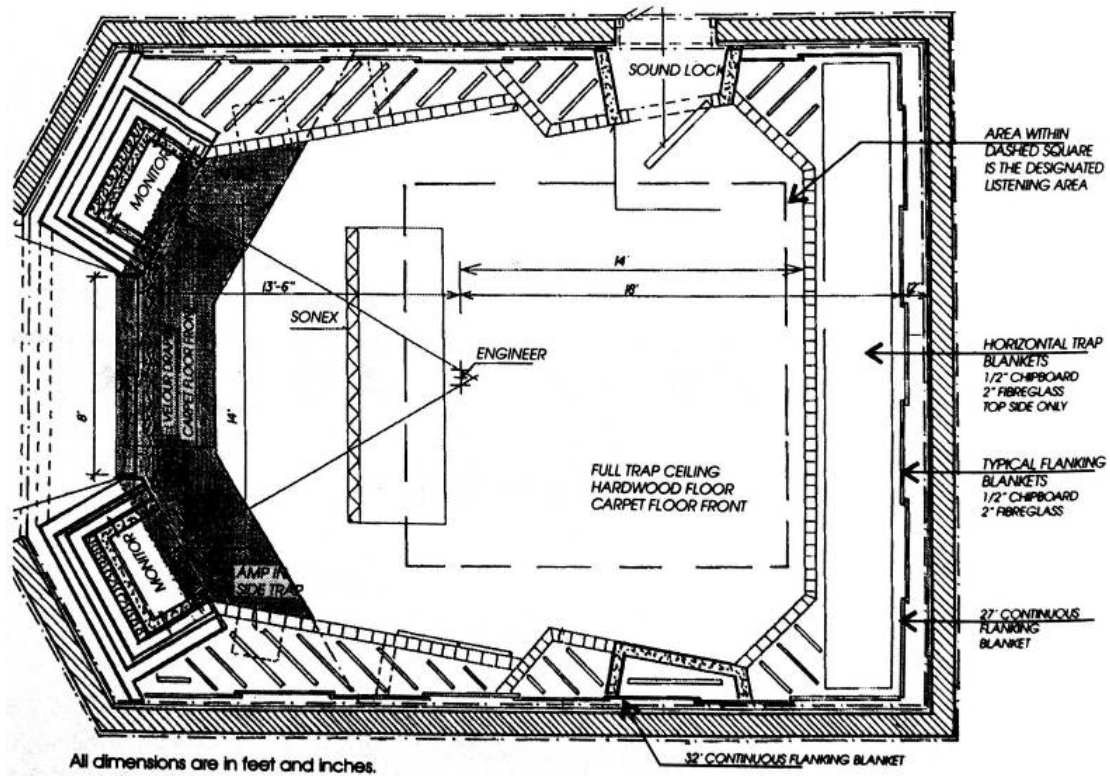
Figur 29: Refleksjonsfri sone definert av en ellipse med kildepunkt F1 og mottakerpunkt F2.



Figur 30: Non-environmental design, snitt.

3.7.4 Toyashima design

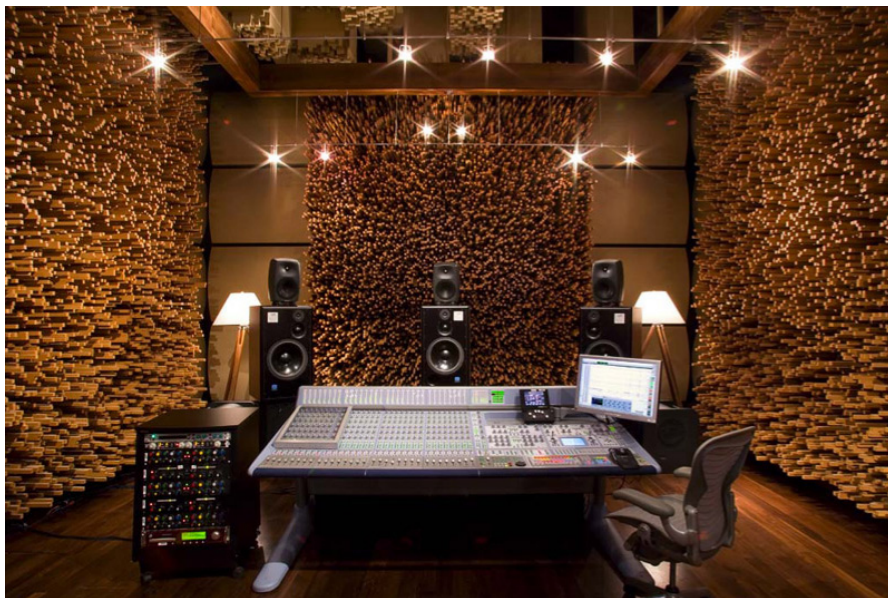
Toyashima design er en designfilosofi lik Hidleys, også fra 80-tallet. Toyashima argumenterte for at etterklangstiden var et viktigere kriterium enn *ITDG*: Kontrollrom bør ha kortere etterklangstid enn lytterom for å ha tilstrekkelig klarhet – 0,2 s i kontrollrom, 0,4 s i lytterom. Han var mer opptatt av at tidlige refleksjoner pluss etterklangen i lytterom ikke bør maskere akustisk respons fra innspillingsrommet – og altså mindre vekt på *ITDG*. Han mente at LEDE burde snus på hodet – det vil si ha absorberende bakvegg for å få dempet rommoder mest mulig effektivt.



Figur 31: Non-environmental design, plan.

3.7.5 Høy grad av diffusjon

En annen strategi med veldig høy diffusjon fra alle flater unntatt gulvet er kontrollrommet til George Massenburg, se figur 32. Det er også tegn til absorpsjon på frontvegg ute på sidene i figur 32.



Figur 32: Kontrollrom med generelt mye diffusjon (George Massenburg).

3.7.6 Anbefalinger til kontrollrom

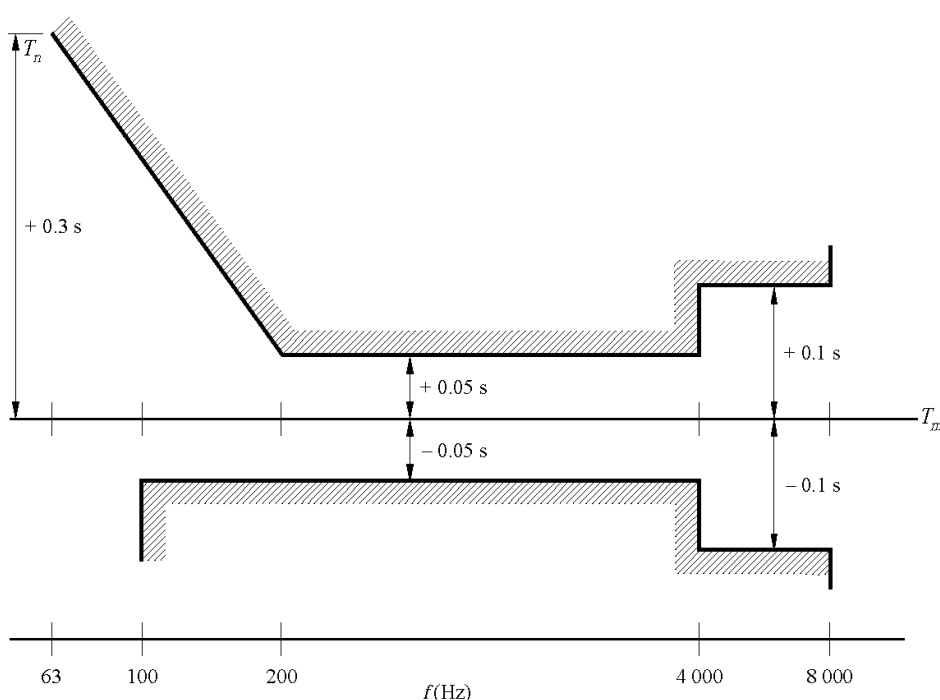
3.7.6.1 Etterklangstid og tidlige refleksjoner

International Telecommunication Union (ITU) har laget noen anbefalinger til akustiske forhold i kontrollrom, ITU-R BS.1116-1. De gir anbefaling til størrelse og dimensjonsforhold for rommet, etterklangstid og nivå til tidlige refleksjoner. Likning (8) viser de tre likningene som definerer krav til

forhold mellom rommets lengde, l , bredde, w , og høyde h . Likning (9) gir krav til etterklangstid, T_m , innenfor 200 til 4000 Hz, hvor V er volumet til rommet og V_0 er et referansevolum lik 100 m^3 . Det tillates visse avvik fra T_m som angitt i figur 34. For tidlige refleksjoner er satt krav til at ingen refleksjoner skal ha et nivå over -10 dB i løpet av de første 15 ms etter direktelyden, hvor 0 dB representerer nivået til direktelyden. Se også delkapittel 3.6.3 for foretrukket frekvensrespons.

$$1.1w/h \leq l/h \leq 4.5w/h - 4 \quad \& \quad l/h < 3 \quad \& \quad w/h < 3 \quad (8)$$

$$T_m = 0,25 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{1/3} \quad (9)$$



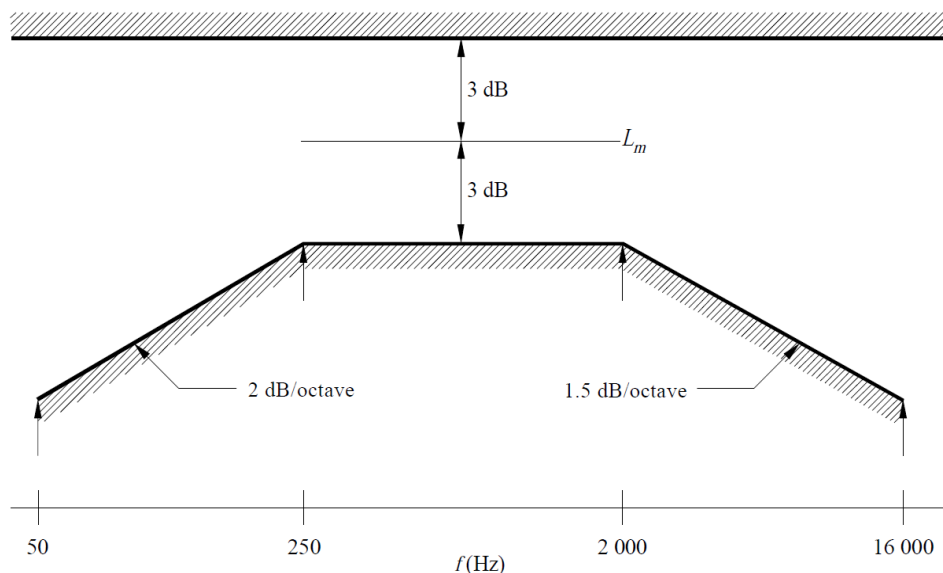
Figur 33: Grenser for anbefalt etterklangstid i kontrollrom, basert på 1/3 oktavbånd-verdier.

3.7.6.2 Foretrukket frekvensrespons for høyttalere i rom

En horisontalt flat frekvensrespons blir ofte trukket fram som en ideell frekvensrespons for et lydssystem. For responsen til høyttaleren i seg selv vil dette kunne være et godt og ikke så langt fra oppnåelig ideal. For frekvensrespons med høyttalere i rom er det svært vanskelig å oppnå en fullstendig flat og horisontal respons (på grunn av stående bølger og interferens). Et mer realistisk mål vil være å unngå sterke stående bølger og kraftig interferens. Med kraftig interferens kan nivåvariasjonen innenfor et smalt frekvensområde lett bli 20 dB . Som en tommelfingerregel sies det at dersom frekvensresponsen varierer innenfor 10 dB med 1/3 oktav utjevning, tilsvarer dette ganske akseptable forhold. Variasjonen på 10 dB må vurderes innenfor frekvensresponsen til høyttaleren. Se delkapittel 5.3.6 for mer detaljer rundt utjevning/glatting av frekvensresponskurver. Figur 34 viser grenser for anbefalt frekvensrespons ITU-R BS.1116-1, målt innenfor 1/3 oktavbånd. Nivået L_m er bredbåndet gjennomsnittlig nivå.

Topper som stikker seg ut vil være mer merkbare enn dipper i responsen. Men dipper i et bredere frekvensområde (spesielt utover 1/3 oktav) vil kunne være et betydelig problem for lyttesituasjon. Sterke kontraster i responsen, det vil si en svært bratt kurve vil være mer mest problematisk. NB! I

tillegg til å studere responsen med 1/3 oktav utglattung bør vi også studere frekvensresponsen i full oppløsning (minst 1/24 oktav) for å kunne oppdage store nivåavvik innenfor smale frekvensbånd (som vil være hørbare spesielt om det er smale, høye topper i responsen). En slik oppløsning gjør det også lettere å finne årsaker til hvorfor frekvensresponsen er som den er, som for eksempel kamfiltre.



Figur 34: Grenser for anbefalt frekvensrespons for lytting i rom, basert på 1/3 oktav utglattung.

Vi vil ofte foretrekke at nivåene i bass og diskant er noe hevet (for å kompensere for vår følsomhet ved ulike frekvenser). Men for jobbing med lyd i flere timer i strekk er det ofte foretrukket at nivået faller litt oppe i diskant, for å redusere effekten av at man blir veldig sliten i ørene av å høre på høyfrekvent lyd over lengre tid.

3.8 Innspillingsrom

For innspillingsrom vil det være en balanse mellom rom som er generelt anvendelige og rom med et spesielt særpreg. Eksempel på et rom med et spesielt særpreg er vist i figur 35. Dette er et trommerom med reflekterende naturstein som gir en ganske ujevn overflate. Dette gir ganske mye etterklang, men vi vil få høy grad av diffusjon ved høye frekvenser. Rommet har også en god takhøyde. Som nevnt i delkapittel 3.3 er det en fordel med stor takhøyde, siden vi da kan ha en del etterklang uten at totalnivået blir for høyt.

3.8.1 Justerbar akustikk

For innspillingsrom kan det være nyttig å ha justerbar akustikk for innspilling av ulike instrumenter, stilarter og besetninger. Under er det listet opp eksempler på fleksible løsninger:

- Flyttbare tepper/scenetepper/Molton.
- Paneler som har ulike akustiske egenskaper på forside og bakside, for eksempel lydabsorberende på den ene siden og diffuserende på den andre siden. Den akustiske egenskapen man ikke ønsker kan settes inntil vegg/himling.
- Det er lettest å oppnå både absorpsjon og diffusjon i mellomtone og diskant, langt vanskeligere i bassen, så responsen til rommet vil være vanskeligst å variere i bassen. Se kapittel 8 for mer detaljer.

- Absorbenter og diffusorer er mest effektivt nær lydkilden, men lydkilder bør ofte ikke være for nær visse typer av diffuserende konstruksjoner, se delkapittel 8.2 for mer detaljer.
- Plexiglass og andre skjermer for å blokkere direktelyd eller refleksjoner mellom instrumenter.



Figur 35: Innspillingsrom for trommer, Townhouse Two i London.

3.9 Jakten på det perfekte lytterom og kontrollrom

Det perfekte lytterom eller kontrollrom finnes gjerne ikke. Både fordi det ofte vil være svært dyrt å lage rom som ikke har tydelig rommoder eller kamfiltre, men også fordi vi har problemer med å definere hvordan den perfekte responsen skal være. De som skal lytte til din lydproduksjon vil ha veldig varierende lytteforhold og det er vanskelig å optimalisere en lydmiiks for eksempel for lytting på hodetelefoner når mange også lytter på den samme produksjon i rom som er både svært lite akustiske dempet og godt dempet. I stedet for å etterstrebe perfekte forhold vil det være mer pragmatisk og vende seg til at alle rom vil tilføre en viss signatur til lyden, og ha kjennskap til lyttepreferanser til målgruppen. Innen popmusikk vil kanskje en hovedvekt av lytterne få lyden rett i ørene eller på billig utstyr i udempede rom. Innen for eksempel jazz derimot kan en større andel av lytterne ha rom som er godt akustiske dempet og som også vil avsløre flere detaljer i miksen din. Ved å forstå hvordan dimensjoner til rommet, plassering av lydkilde og lytteposisjon spiller inn kan vi jobbe mye mer bevisst i forhold til rommets respons – ikke bare lete i blinde etter steder i rommet som gir ønsket lyd.

Det mest nøytrale vil være kun direktelyd, men dette fører til en veldig lite representativ situasjon og selv interferensen mellom direktelyd fra høyre og venstre høyttaler kan bli et problem. Fordelen med mange refleksjoner er at vi unngår at interferens mellom bølger fører til et lite antall sterke kamfiltre. Vi ønsker oss gjerne dimensjonsforhold som ikke er nær hele tall og refleksjoner som ikke følger faste mønstre. Vanlige «nybegynnerfeil» for akustikk i små rom er å ende opp med å fjerne et godt samspill mellom mange refleksjoner i jakten på et godt dempet rom. Mange refleksjoner i godt samspill er mye bedre enn et lite antall refleksjon og en for dominerende direktelyd. Hodetelefoner kan også brukes bevisst for å kunne høre detaljer i lydbildet, man trenger

ikke nødvendigvis dempe ned et rom veldig akustisk for å kunne få innblikk i detaljer i lydbildet som noen lyttere vil kunne få med seg på godt utstyr i dempede rom.

Har man et rom med mange rare og betydelige avvik er slitsomt å forholde seg til. Ofte kan relativt enkle tiltak gjøre situasjonen betraktelig bare man har en god idé på hva som vil trekke ting i riktig retning. Generelt kan vi si at vi ønsker oss en jevn frekvensrespons og nøytral reflektert lyd som ikke setter et markant preg på lyden. Hvor mye etterklang (hvor lite dempet rom) vi ønsker vil være smak og behag og en vurdering mellom mulighet for god analytisk versus representativ lytting.

Det er nyttig å ha mikrofoner/utstyr som man kjenner godt. Dette fører gjerne til mindre behov for å skru og justere i etterkant i miksen, og det er lettere å vite hva man skal forvente ut fra selve opptaket. En god forståelse for hvordan opptakssituasjonen påvirker lydbildet vil også gjøre det lettere å skille effektene av opptaket fra effektene av kontrollrommet. Det vil være nyttig å sjekke på forskjellig lytting i ulike rom og oppsett før man tar store avgjørelser på miksen.

4 AKUSTIKK I STORE ROM

Typisk bruk av store akustiske rom er innspilling, konserter, teater, opera, konferanser og events. Som nevnt vil rommoder og kamfiltre ofte være den største påvirkningen for lyd i små rom. For store rom har disse bølgeeffektene mindre betydning siden tettheten av rommoder er såpass høy ved de fleste frekvenser slike at bølgeeffekter sjelden blir et problem (se kapittel 2). Et unntak vil være om én eller flere av rommets dimensjoner er i liten, for eksempel et stort rom med lav takhøyde. Kamfiltre kan forekomme med høyttaler/mikrofon nær reflekterende flate, men med unntak av det vil vi ofte ha så mange refleksjoner at kamfiltre ikke blir så betydelige (de utfyller hverandre). Nivå til etterklang, etterklangstid og sterke tidlige og sene refleksjoner (ekko) er ofte de effektene som setter sterkest preg på lydbildet store rom. Nivået til etterklangen vil være påvirket av diffusjon, absorpsjon og volum.

For store rom er ofte det største problemet at direktelydnivået blir veldig lavt. For akustisk framføring av tale og musikk vil det dermed være et ganske sterkt behov for reflektert lyd, som kompensasjon for lave direktelydnivåer. Siden direktelydnivået faller kraftig på lang avstand til lydkilden blir det totale lydnivået lavt på lang avstand til lydkilden. Nivået til all reflektert lyd i rommet faller mindre med økt avstand slik at lytterne på lang avstand i hovedsak får servert reflektert lyd. Det vil for store rom derfor ofte være et ønske om generell akustisk forsterking ved hjelp av reflektert lyd. Den tidsmessige sammenflytingen som den reflekterte lyden fører til er en integrert del av mye akustisk musikk, og den reflekterte lyden gir en positiv opplevelse av å være omsluttet av lyden. Men den tidsmessige sammenflytingen og opphoping av reflektert lyd i rommet kan føre til en kraftig konflikt for sjangre som baserer seg på forsterket lyd. I ekstreme tilfeller vil totalt lydnivå bli så høyt eller tidsmessig sammenflyting så stor at også rent akustiske ensembler vil har problemer i form av slitsomt/skadelig høye lydnivåer eller lav tydeligheten/definisjon til lyden.

4.1 Forholdet mellom direktelyd og reflektert lyd

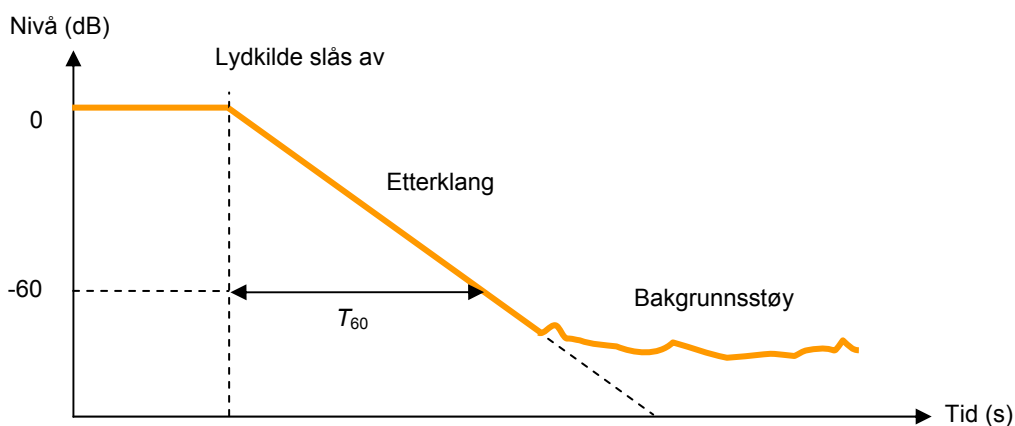
I store rom er direktelydnivået ofte lavt når vi befinner oss lett vekk fra lydkilde. Vi vil derfor ønske at refleksjoner skal bidra til å øke opplevd lydnivå. For forsterket lyd (SR) er behovet for refleksjoner ofte mindre, men kun direktelyd gir liten opplevelse av å være omsluttet av den forsterkede lyden. Nyere forskning indikerer at tidlige refleksjoner fra sidene som har samme frekvens- og faserespons som direktelyden er best egnet til å øke opplevd lydnivå. I et slikt tilfelle peker resultatene på at opplevd forsterkning på grunn av de tidlige refleksjonene blir maksimert, samtidig som at risikoen for at refleksjonene bidrar negativt til opplevd lyd kvalitet er lav (Lokki *et al.*, 2011). Hvis den reflekterte lyden varierer betydelig fra egenskapene til direktelyden kan refleksjonene oppleves helt eller delvis atskilt fra direktelyden. Oppfattet tydeligheten blir da gjerne redusert og opplevd lydnivå øker ikke like mye. I små reflekterende rom vil alle refleksjonene til sammen lett overdøve direktelyden – både rent fysisk og perseptuelt. Dersom vi ikke klarer å oppfatte direktelyden vil vi ikke lenger klare å lokalisere lyden – man tenker at vi lettere distanserer oss fra lyden (Griesinger, 2010). Så tidlige refleksjoner er noe vi ofte er avhengig av for akustisk fremføring i store rom, spesielt på lang avstand fra lydkilden. Det kritiske vil være balansen mellom direktelyd og reflektert lyd, i tillegg til hvordan de tidlige refleksjonene er bygget opp i nivå og tid (detaljer i reflektogrammet). Men ikke bare nivåer virker relevant: Både grad av diffusjon og retning til reflektert lyd virker relevant. Dette gjør diskusjonen mer kompleks for beskrivelse av hvordan rom bør utformes i detalj.

I store rom vil det være nyttig også å unngå kamfiltre. Risikoen for kamfiltre virker størst når lydveien til refleksjonen er i det såkalte sagittale (mediane) planet (se figur 2). På lang avstand fra lydkilden vil det bli vanskelig å unngå liten nivåforskjell mellom direktelyd og refleksjoner. Men vi kan påvirke tidsforsinkelser. For eksempel kan takhøyde være store nok til å unngå refleksjoner innenfor de første 15 ms relativt direktelyden. Beranek foreslo i sin tid tidsgapet mellom direktelyd og første refleksjon (*ITDG*, se delkapittel 3.7.1.) som kritisk for gode forhold i konsertsaler, og anbefalte en verdi på *ITDG* på minst 20 ms (Beranek, 2004). Et slikt krav var ikke knyttet til retningen til den først ankomne refleksjonen. Siden refleksjoner for eksempel ovenfra later til å ha en annen effekt enn refleksjoner fra sidene, kan Beraneks enkle krav virke noe overforenklet. Refleksjoner fra siden gir forskjellige kamfiltre ved vår to ører og disse refleksjonene kan isoleres fra direktelyden siden vi er gode på retningsbestemme horisontalt. Refleksjoner med forsinkelse under 20 ms kan derfor være ønskelig eller akseptabelt for å øke opplevd lydnivå og bredde til lydbildet så sant de kommer fra en gunstig retning.

Sen reflektert lyd gir etterklang og opplevelse av å omslutes av lyden («envelopment»). For klassisk musikk er dette en viktig del av lyden. Etterklangen må være på et visst nivå for at den skal være hørbar i forhold til direktelyd og tidlige refleksjoner. Etterklang fra diffuse flater vil gi etterklangslyd sprett i tid og fra mange forskjellige retninger og gir ingen hørbare sene ekko.

4.2 Etterklangstid, T_{60} eller T

Etterklangstid, vanligvis betegnet som T_{60} eller kun T , er et akustisk mål som i stor del har sin bakgrunn i statistisk akustikk. Etterklangstid er et resultat av all akustisk respons fra rommet og vi vet ingenting om detaljer til den akustiske responsen som tid og retning for enkeltrefleksjoner. Etterklangstid sier oss kun hvor lang tid det vil ta for den totale akustiske responsen ikke lenger er hørbar etter at lydkilden er slått av. Etterklangstid som mål vil kunne fungere rimelig bra i store rom siden vi oftest får veldig mange refleksjoner i store rom. Med høy grad av diffusjon i rommet vil også etterklangstiden bli den samme i hele rommet. Med høy grad av diffusjon vil den akustiske responsen være veldig lik uansett hvor vi stor i rommet, sett bort fra direktelyden. Etterklangstid er ment å være et mål på total reflektert lyd (eksklusive direktelyd). Figur 36 viser nivåfall til total lyd etter at lydkilden er skrudd av i et fullstendig diffust rom. Et fullstendig diffust lydfelt gir oss et tidsmessig lineært nivåfall. I et fullstendig diffust lydfelt vil etterklangstiden være den samme overalt i rommet. Etterklangstid er definert som tiden det tar før lydnivået har falt 60 dB. I mange rom kan vi ikke høre hele dette nivåfallet fordi bakgrunnsstøy fra andre lydkilder maskerer etterklangslyden.



Figur 36: Etterklangstid basert på nivåfall i et fullstendig diffust lydfelt.

4.2.1 Sabines formel for etterklangstid

Sabine utviklet en formel for å beregne/forutse hva etterklangstiden blir i et rom styrt av volumet til rommet og total mengde av absorpsjon i rommet, se likning (10) hvor V er rommets volum (m^3) og A er rommets absorpsjonsareal. Absorpsjonsarealet tilsvarer hvor mange kvadratmeter med 100 % absorpsjon du har i rommet. Absorpsjonsareal A måles i enheten Sabine (Sa), også omtalt som «metric Sabine» (basert på meter som areal, ikke fot), og vil variere med frekvens. Etterklangstiden vil derfor variere med frekvens.

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (10)$$

A er summen av absorpsjonsarealet til alle flatene og objektene i rommet. Absorpsjonsarealet A til hver enkelt flate i rommet finnes ved å gange overflatearealet S eksponert i rommet (fra «surface area») med absorpsjonskoeffisienten α : $A = S \cdot \alpha$. Absorpsjonskoeffisienten, betegnet med α (evt. a), er 0 dersom flaten er fullreflekterende og 1 dersom flaten er fullabsorberende (det vil si at flaten omgjør all lydenergi til varmeenergi og reflekterer ingen lyd tilbake). Total A kan skrives som: $S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots$, hvor S er overflatearealet (m^2) og α er absorpsjonskoeffisienten til hver enkelt flate. Alternativt kan A finnes som total S ganget med gjennomsnittlig α , betegnet som $\bar{\alpha}$.

Absorpsjonsarealet tilsvarer antall kvadratmeter som fullstendig absorberer lyden ($\alpha = 1$). For eksempel en 10 m^2 stor flate med α lik 0,3 vil ha $A = S \cdot \alpha = 10 \cdot 0,3 = 3 \text{ Sa}$. Tabell 2 viser eksempler på absorpsjonskoeffisient, α , for ulike type materialer innenfor oktavgbåndene 125–4000 Hz.

Tabell 2: Absorpsjonskoeffisient, α , for ulike materialer innenfor oktavgbåndene (gjennomsnittverdi) 125–4000 Hz.

Absorberende materiale	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Teppe (340 g/m ² , flatt rett mot vegg)	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,35
Mineralullplate (25 mm tykk)	0,06	0,20	0,65	0,90	0,95	0,98
Mineralullplate (50 mm tykk)	0,18	0,76	0,99	0,99	0,99	0,99
Mineralullplate (75 mm tykk)	0,53	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Mineralullplate (100 mm tykk)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97

Luftabsorpsjon vil også absorbere lyd. For oktavgbandsverdier kan luftabsorpsjon ignoreres under 2 kHz. Denne absorpsjonen bør regnes med for det totale absorpsjonsarealet A . Likning (11) viser hvordan luftabsorpsjonen kan inkluderes i Sabines formel. For oktavgbåndene 2 og 4 kHz er $4 \cdot m$ lik henholdsvis 0,0089 og 0,0262 (antatt normal luftfuktighet, 20–40 %).

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad (11)$$

Dersom du ikke er så glad i formler går det an å huske/pugge at med $V = 1000 \text{ m}^3$ og A lik 100 Sa gir T lik 1,61 s (uten luftabsorpsjon inkludert). En dobling av V eller halvering av A fører til dobling av T , og motsatt; en halvering av V eller dobling av A gir halvering av T . Andre faktorer enn 2 (dobling/halvering) kan også brukes.

Sabines formel er ganske enkel, men det er mange forutsetninger som skal være oppfylt for at formelen skal stemme rimelig godt med faktisk etterklangstid ved ulike posisjon i et rom:

- Rommet må gi et veldig diffust lydfelt, det vil si at rommet må ha mange flater som sprer lyden i ulike retninger.
- Rommet kan ikke være for absorberende. Gjennomsnittlig absorpsjonskoeffisient bør ikke være over 0,4.
- Rommet bør ha en enkel form med få avlukk, kriker og kroker.

I mange situasjoner vil ikke alle disse kravene være oppfylt. Og hvordan skal vi klare å finne ut hvor mye absorpsjon vi har i rommet? Det er ofte ikke så lett å vite i praksis. Vi må med andre ord vite arealet til alle flatene i rommet og absorpsjonskoeffisienten til alle disse flatene... Vi derfor være forsiktige med å legge stor vekt på anslått etterklangstid basert på Sabines formel. Men for å få en idé om «hvor landet ligger» kan den være nyttig. Volumet til rommet er som regel ikke så vanskelig å finne og det er ikke så problematisk om vi bommer litt. Om volumet blir dobbelt så stort, blir etterklangstiden dobbelt så lang. Er det veldig stort avvik mellom hvilken etterklangstid Sabines formel gir i forhold til hva du har som ønsket etterklangstid, kan du være rimelig sikker på at rommets egenskaper ikke vil kunne oppfylle forholdene du ønsker deg. For mer nøyaktige vurderinger må vi gjøre datasimulering av rommet (del kapittel 9 for mer detaljer).

For rom som har en kompleks geometrisk form og veldig ujevn fordeling av lydabsorberende flater vil vi lett få et reflektert lydfelt som er langt fra å være helt diffust. I slike rom vil ofte ekko og enkeltrefleksjoner være det største problemet. Geometrisk akustikk vil her bli mer relevant. At Sabines formel samtidig er lite til å stole på blir dermed mindre problematisk, siden selve etterklangstiden ikke er så relevant for problemstillingen. Snudd på hodet: Etterklangstid vil ha størst betydning for rom som er rimelig diffuserende (og da vil også gyldigheten til Sabines formel være best).

Regneeksempel: Regne ut etterklangstid i klasserommet, 8,9 m langt, 7,1 m bredt og 3,2 m høyt.

- Hva er volumet? Rommets blir $8,9 \cdot 7,1 \cdot 3,2 = 202 \text{ m}^3$.
- Hva så med absorpsjonen? Om vi tenker at det er kun himlingen som absorberer:
 $S = 8,9 \cdot 7,1 = 63,2 \text{ m}^2$.
- Om vi antar at himlingen absorberer 90 % ved 1 kHz (litt optimistisk) blir $\alpha = 0,9$ og for himlingen $A = S \cdot \alpha = 63,2 \cdot 0,9 = 56,9 \text{ Sa}$.
- Om vi bruker Sabines formel får vi: $T = 0,161 \cdot V/A = 0,161 \cdot 202/56,9 = 0,57 \text{ s}$

Ikke så langt fra sannheten? Å klappe og lytte til etterklngen kan være en enkel sjekk. Med mindre vi har mye bakgrunnsstøy vil varigheten til etterklngen vi hører stemme noenlunde overens med etterklangstiden. For eksisterende rom vil det være mer effektiv å måle faktisk etterklangstiden i stedet for å anslå den basert på Sabines formel, se kapittel 7 for detaljer.

Om vi i stedet tok utgangspunkt i huskereglene om 1.000 m^3 og 100 Sa : Klasserommet har et volum lik ca. $1/5$ av 1.000 m^3 . Dette fører til at etterklangstiden blir $1/5$ av $1,61 \text{ s}$ lik $0,32 \text{ s}$. Men samtidig er totalt absorpsjonsareal ($56,9$) lik ca. halvparten av 100 Sa . Dette forholdet fører til ca.

en dobling av etterklangstiden fra 0,32 til 0,64 s. Dette svaret er 12 % høyere enn svaret basert på å bruke formelen. Å kunne gjøre slike anslag kjapt kan være veldig praktisk i visse situasjoner for å ha en idé om hva etterklangstiden vil være sånn cirka. Formelen har sjelden veldig høy gyldighet så om vi bommer med 15 % i selve utregningen er det sjelden et stort problem. Avviket mellom utregnet og faktisk absorpsjonsareal og etterklangstid vil ofte være større enn 15 %.

4.2.2 Anslå absorpsjonsareal basert på målt etterklangstid

Dersom vi har målt etterklangstiden T (se delkapittel 7.1 for detaljer) og vet volumet V , kan vi anslå hvor mye absorpsjon vi har i rommet ved å snu om på Sabines formel, se likning (12). For eksempel dersom vi har målt $T = 1,5$ s ved 1 kHz og volumet til rommet V er lik 500 m^3 : Dette gir oss $A = 0,161 \cdot V/T = 0,161 \cdot 500/1,5 \approx 53,7$ Sa. At vi faktisk har 53,7 Sa ved 1 kHz krever at Sabines formel faktisk er gyldig. For ikke-diffuse lydforhold vil vi lett underestimere A ved å finne A basert på Sabines formel, siden det er gått «inflasjon» i reell A på grunn av lite diffusjon. Men å anslå A ut fra målt T og V , kan være nyttig for å ha en idé om hvor mye mer absorpsjonsareal som er nødvendig om vi for eksempel ønsker å halvere T . Da må vi i teorien doble absorpsjonsarealet.

$$A = \frac{0,161 \cdot V}{T} \quad (12)$$

4.2.3 Alternative formler for etterklangstid

Som nevnt over er det en god del begrensninger for gyldigheten til Sabines formel. For eksempel at rom som har ujevn fordeling av absorpsjon og lite diffusjon (for eksempel et rom med all absorpsjon i himling og harde, flate parallelle vegger) kan ha mye lenger etterklangstid enn beregnet ut fra Sabines formel. Mer avanserte formler er utviklet for å forbedre beregnet etterklangstid i slike tilfeller. Eksempler på slike er formler utviklet av Fitzroy og Arau-Puchades. Disse bruker forskjellig gjennomsnittlig absorpsjonskoeffisient i rommets tre ulike retninger (lengde, bredde, høyde).

Et annet problem med Sabines formel er at etterklangstiden blir lite gyldig i forhold til virkeligheten dersom alle rommets flater er nær å være fullabsorberende ($\alpha = 1$). Eyrings formel er eksempel på alternativ formel som vil være mer gyldig enn Sabines versjon for slike tilfeller, for eksempel kontrollrom, se likning (13). Gjennomsnittlig absorpsjonskoeffisient er betegnet som $\bar{\alpha}$, mens \ln er naturlig logaritme (ikke \log_{10}). Kalkulator for beregning av T basert på disse ulike formlene er tilgjengelig på <http://threedb.com>. Se også Bistafa & Bradley (2000), Neubauer & Kostek (2004).

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (13)$$

4.3 Nivå til total akustisk respons og reflektert lyd

Nivået til den akustiske responsen virker like relevant som etterklangstiden i rommet. Ofte ønsker vi oss en gitt kombinasjon av etterklangstid og nivå. Etterklangstiden er mye med på å styre detaljrikdommen i lyden og hvordan toner etter hverandre i tid samler seg sammen til én lyd. Høyt nivå til reflektert lyd kan bidra til et for høyt totalt lydnivå eller for dårlig tydelighet/definisjon. For lavt nivå til reflektert lyd kan føre til at responsen fra rommet ikke er tilstrekkelig hørbar og rommet føles for dødt (selv om etterklangstiden er lang). Dersom det totale lydnivået blir for høyt i et rom vil det ikke alltid være et godt alternativ å spille svakere. De fleste akustiske instrument blir annerledes å spille på eller endrer sitt «sound» dersom man må spille svakere enn man pleier å gjøre. Måling av

nivå til akustisk respons har ofte blitt utelatt fordi det krever at man har kalibrert måleutstyret for måling av absolutte nivå, ikke bare observering av relative forskjeller (som for måling av etterklangstid). I stedet har man gjerne hatt anbefalinger til akseptable kombinasjoner for etterklangstid og volum. Men det vil være mer presist å se på kombinasjonen etterklangstid og nivå til reflektert lyd sammenliknet med kombinasjonen etterklangstid og volum. Dette skyldes at faktisk nivå til reflektert lyd kan være vidt forskjellig for rom med samme etterklangstid og volum. Graden av diffusjon påvirker totalnivået.

Nivået til den totale reflekterte akustiske responsen, betegnet L_{refl} , vil også være et globalt mål i samsvar med statistisk akustikk siden den totale responsen ikke gir detaljer om enkeltrefleksjoner. I følge tradisjonell statistisk teori er nivået til total reflektert lyd det samme (konstant) i hele rommet (uavhengig av avstand til lydkilden eller posisjon i rommet) og kun styrt av absorpsjonsarealet til rommet, se likning (14). Ved å bruke likning (12) for A i likning (14) får vi formelen gitt i likning (15). Basert på likning (15) vil doubling av T eller halvering av V gi 3 dB økning av L_{refl} .

$$L_{refl} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4}{A} \right) \quad (14)$$

$$L_{refl} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{24,8 \cdot T}{V} \right) \quad (15)$$

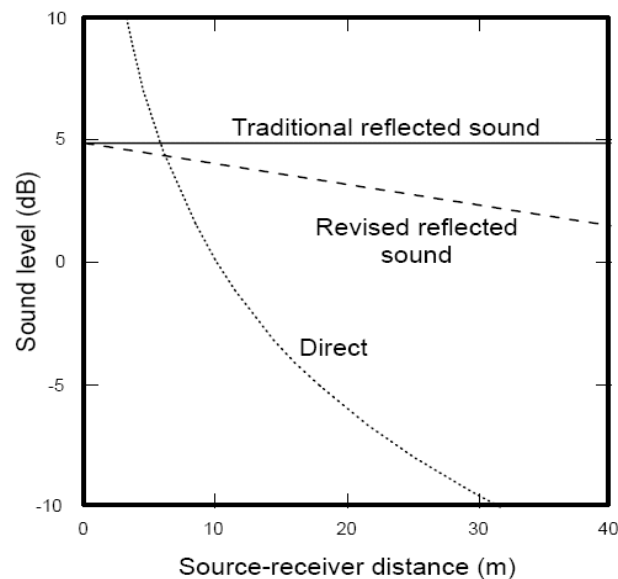
For nivå på akustisk respons er det blitt definert et akustisk mål G hvor referansenivået er fritt-felt direktelydnivå på 10 m avstand fra lydkilden. Dette målet er vel etablert innenfor akustikk i store rom. G inkluderer direktelyd og all reflektert lyd. Likning (16) viser formelen for nivået til total reflektert lyd med G som standard. Likning (17) viser hvordan vi kan finne nivået til direktelyden etter G -standarden basert på avstanden r til lydkilden.

$$G_{refl} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{31200 \cdot T}{V} \right) \quad (16)$$

$$G_{dir} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{100}{r^2} \right) \quad (17)$$

Mike Barron har foreslått en revisjon av formelen for L_{refl} hvor nivået ikke konstant i et rom, men vil være noe påvirket av etterklangstiden i rommet og avstanden, r , til lydkilden (Barron, 2010). Denne teorien er kalt «*Revised Theory*». Det kan være nyttig å være klar over at nivået på reflektert lyd vil falle noe med økt avstand, spesielt for rom med kort etterklangstid. Figur 37 viser hvordan direktelydnivået og totalt nivå til reflektert lyd er målt i G , i følge tradisjonell teori og Barrons *Revised Theory*. Jo kortere etterklangstiden i rommet er jo større vil avviket blir mellom tradisjonell og revidert teori. Likning (18) viser Barrons formel for G_{refl} . Variabelen e i disse formlene er Eulers konstant (tilnærmet lik 2,7 i verdi), også betegnet som exp på visse kalkulatormodeller og beregningsprogram. Barron har også funnet formler for nivået til akustisk responsen innenfor 0–80 ms relativt ankomst til direktelyd, betegnet som G_{early} , og nivået til all akustisk respons etter 80 ms (80–∞ ms), betegnet som G_{late} . Likning (19) og (20) viser hans formler for dette. NB! G_{early} er uten direktelyden! Likning (21) viser formel for det totale nivået G (inklusive direktelyd og all reflektert lyd). Formlene kan virke kompliserte, men har man først fått de inn i et regneark er de

lette å forholde seg til. Alle disse formlene antar at rommet har et fullstendig diffust lydfelt, noe som sjelden er tilfellet. Disse formlene kan derfor kun gi en viss pekepinn på linje med Sabines formel. For eksisterende rom vil det være mulig å måle hva etterklangstiden og nivået innenfor ulike tidsintervaller faktisk er, se kapittel 7 for detaljer.



Figur 37: Nivå til direktelyd og all reflektert lyd som funksjon av avstand til kilden.

$$G_{\text{refl}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{31200 \cdot T}{V} \cdot e^{-0,04 \cdot r/T} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{31200 \cdot T}{V} \right) - 0,174 \cdot \frac{r}{T} \quad (18)$$

$$G_{\text{refl,early}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{31200 \cdot T}{V} \cdot e^{-0,04 \cdot r/T} \cdot (1 - e^{-1,11/T}) \right) \quad (19)$$

$$G_{\text{refl,late}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{31200 \cdot T}{V} \cdot e^{-0,04 \cdot r/T} \cdot e^{-1,11/T} \right) \quad (20)$$

$$G = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{100}{r^2} + \frac{31200 \cdot T}{V} \cdot e^{-0,04 \cdot r/T} \right) \quad (21)$$

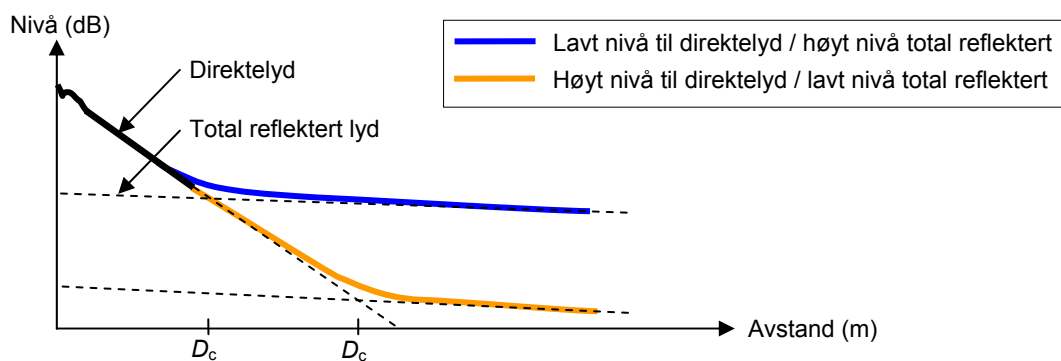
Vår opplevelse av lydforholdene er oftest knyttet til forventning i forkant. På lang avstand vil vi ofte forvente at lydnivåene er lavere og at lyden er mindre definert på grunn av høyt nivå på reflektert lyd i forhold til direktelyde. Det kan derfor være et mindre problem enn man frykter at lydnivåer og tydelig/definisjon er lav for publikumsplasser langt bak i en sal (Barron, 2007).

4.3.1 Kritisk avstand

Kritisk avstand til et rom (eller rommets romradius) forteller oss på hvilken avstand den totale reflekterte lyden har samme nivå som direktelyden. Denne avstanden vil være påvirket av hvor «livlig» rommet er og direktiviteten til lydkilden – både rom og høyttaler er med på å styre tydeligheten av lyden i rommet. På kort avstand fra lydkilden vil direktelydnivået være høyt, men det avtar med 6 dB for hver gang vi dobler avstanden til lydkilden, dersom vi har en punktkilde. På lang avstand fra lydkilden vil dermed direktelydnivået være svært lavt (sammenliknet med kort avstand). Nivået på den totale reflekterte lyden vil variere mye mindre i forhold til avstanden til lydkilden – den avtar kun noe når vi øker avstanden til lydkilden. Dette betyr at på kort avstand til

lydkilden vil direktelyden dominere og vi er ikke langt unna et frittfelt (det vil si kun direktelyd) svært nær lydkilden. På lang avstand vil den reflekterte lyden dominere og vi vil være i et diffust lydfelt (diffusfelt) med mange refleksjoner som kommer fra så å si alle mulige retninger avhengig av hvor diffuserende rommet er.

På en viss avstand fra lydkilden vil nivået til direktelyden være likt det totale nivået på reflektert lyd. Denne avstanden kalles kritisk avstand og betegnes D_c («critical distance»). Både bokstaven D og r brukes for å betegne avstanden til lydkilden i romakustikk. Den kritiske avstanden er styrt av både nivået til direktelyden og det totale nivået til reflektert lyd. Figur 38 viser nivået til direktelyd og total reflektert lyd på ulike avstander fra lydkilden og hvordan kritisk avstand er styrt av forholdet mellom direktelyd og total reflektert lyd. Med et klangfullt rom og omnidireksjonell kilde kan kritisk avstand være så kort som 1 m. Ved hvilken avstand fra kilden vil vi ha god balanse mellom direktelyd og reflektert lyd vil avhenge av sjanger. For rytmisk forsterket musikk vil vi ofte i det minste være innenfor kritisk avstand. Her vil direktelyden dominere og sjansene for å oppnå god tydelighet er god. Dersom vi er på kritisk avstand fra lydkilden vil det totale lydnivået reduseres 3 dB i det direktelyden forsvinner.



Figur 38: Kritisk avstand ved ulik balanse av direktelyd og total reflektert lyd.

For en punktkilde kan vi i følge klassisk statistisk akustikk (diffusfelt-teori, nivået til total reflektert lyd er lik overalt i rommet) anslå kritisk avstand. Likning (22) viser formelen for kritisk avstand D_c basert på Q -verdi for direktiviteten til lydkilden, volumet V til rommet og etterklangstiden T . Vi ser fra likning (22) at en direktiv lydkilde (Q -verdi over 1) og et stort volum bidrar til at D_c blir stor, mens etterklangstiden til rommet bidrar i motsatt retning. For de fleste rom i praksis vil absorberende, diffuserende og spekulært reflekterende flater ikke være jevnt fordelt. Likning (22) vil derfor kun delvis være gyldig. I praksis vil kritisk avstand variere ut fra hvor i rommet vi befinner oss siden nivået til den totale reflekterte lyden varierer rundt i rommet, i tillegg til at vi kan ha interferens på direktelyden (fra en og samme høyttaler, mellom flere høyttalere eller fra en sterk enkeltrefleksjon).

$$D_c = 0,057 \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T}} \quad (22)$$

Om du ikke vil huske likning (22) kan det være nyttig å vite at med en omnidireksjonell kilde, volum lik 1.000 m^3 og etterklangstid lik $1,61 \text{ s}$ vil D_c være lik $1,4 \text{ m}$. En dobling av Q eller V fører til ca. 41% økning av D_c , mens en dobling av T fører til ca. 41% reduksjon av D_c , og motsatt. En firedobling av Q eller V fører til en dobling av D_c , mens en firedobling T fører til halvering av D_c .

I følge Barrons *Revised Theory* vil D_c være ved en noe kortere avstand enn ut fra likning (22) siden nivået til total reflektert lyd faller noe med avstanden. Men i praksis gjør det ikke så mye om kritisk avstand faktisk er på 11 m i stedet for 10 m – det blir bare en liten bonus.

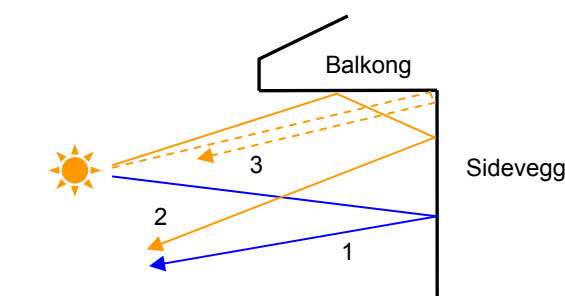
Dersom direktelydnivået varierer mye over tid, vil også den kritiske avstanden variere. En sterk direktelyd vil etter litt tid bidra til et høyt nivå på reflektert lyd. Dersom sterk direktelyd er etterfulgt av svak direktelyd, vil den kritiske avstanden bli kort når den svake direktelyden når lytterne. Bruk av kompressorer for å redusere dynamikken på direktelyden vil kunne føre til en mindre tidsvarierende tydelighet på grunn av mer konstant forhold mellom direktelyd og total reflektert lyd.

4.4 Retning til refleksjoner

Som nevnt i kapittel 3 og ellers i dette kapitlet: Refleksjoner fra retninger som fører til at de ankommer høyre og venstre øre ved forskjellig ankomsttid virker til å være mest fordelaktige. Slike refleksjoner vil for eksempel komme fra sidevegger. Det er fortsatt noe usikkerhet knyttet til hvilken kombinasjon av slike refleksjoner som bør være på plass i tillegg til retning, tidsforsinkelse, nivå og grad av diffusjon. For sene refleksjoner virker det gunstig med et diffust lydfelt. Dette vil gi oss betydelige refleksjoner fra mange forskjellige retninger, noe som virker til å bidra til at vi føler oss omsluttet av lyden («enveloped» på engelsk). Eksisterende akustiske parametere fanger i liten grad opp retning til reflektert lyd. Retning til reflektert lyd og geometrisk akustikk har derfor lenge vært ignorert ved vurdering av akustiske forhold, men har fått mye mer fokus de siste 10–15 årene.

Utøvere på scenen vil gjerne ha refleksjoner fra publikumsområdet. Dette gir opplevelse av å få en tilbakemelding og et visst inntrykk av hvordan lyden av seg selv høres ut for publikum. For en del utøver kan sterke enkeltrefleksjoner fra én bestemt retning (for eksempel fra bakveggen i salen) være nyttig og tolererbar, mens for andre utøver vil en slik refleksjon lett bli rytmisk forstyrrende. Utøvere som synger eller spiller langvarige toner er mindre følsomme for sterke enkeltrefleksjoner sammenliknet med utøvere som lager perkusive lyder som trommiser. Med kortvarige lyder som trommelyder stikker den ene refleksjonene seg mye mer ut i opplevd lyd sammenliknet med om det lages mer langvarige, mindre perkusive lyder på scenen.

For siderefleksjoner har vi gjerne to viktige bidragsytere: sideveggene i seg selv og refleksjoner som går via sidevegg og underkant av for eksempel balkong, se figur 39. Slike refleksjoner kalles gjerne «side kickers», «cue ball reflections» eller «cornice reflections». «Side kickers» henspiller trolig på Haas-effekten hvor de tidlige refleksjonene vil «sparke» i gang denne effekten og øke opplevd lydnivå. En spesiell egenskap til «cornice reflections» er at de alltid vil gi en refleksjon direkte tilbake til kilden (refleksjon 3 i figur 39). Dette kan være nyttig for å reflektere lyd tilbake til utøverne på scenen.



Figur 39: Sidevegsrefleksjon (1) og «cornice reflection» (2 og 3).

4.5 Design av teatre operahus og konsertsaler

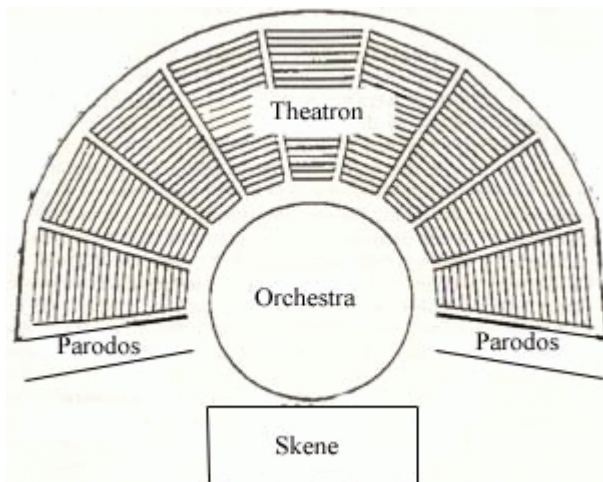
Design av teatre, operahus og konsertsaler er ofte mer krevende enn design av studioer og kontrollrom. Budsjettene er mye større og mange flere ulike type brukere vil uttale seg om hvorvidt salen fungerer (publikum, artister, dirigent, teknisk personal med mer). Og dersom et design viser seg å være fullstendig mislykket vil det være veldig dyrt å forsøke og forbedre forholdene, og dermed også vanskeligere å bli mer klok på hva som ikke fungerte i designet. Fallhøyden er dermed stor for de som skal designe slike rom og saler. Siden akustikk er et noe marginalt fagfelt i den store sammenheng, men ikke desto mindre komplekst i sitt samspill mellom objektiv fysikk og subjektive opplevelser, er det utført relativt lite vitenskapelig forskning innenfor fagfeltet konsertsaldesign. Derfor er det lite vi strengt tatt vet sikkert, og kanskje finnes det flere selvutropte eksperter som lover å ha en god løsning enn forskere med bred forståelse for praktiske problemstillinger som tar initiativet til en god og åpen debatt. Men over tid er det en del funn som virker til å ha rimelig god gyldighet. Etter hvert som vi har fått bedre forståelse for hvordan vi opplever ulike akustiske responser har vi fått en mer konkret forståelse for hva som skal til rent fysisk for å oppnå gode forhold. Men fortsatt vil man gjerne kopiere gamle vellykkede design i stedet for å eksperimentere med nye løsninger fordi vi fortsatt har en noe begrenset forståelse og fallhøyden er så stor. Dette kapitlet tar for seg vanlig problemstillinger innenfor akustikk i store rom, etablerte konsepter og designløsninger som har vist seg gunstige og uheldige.

Felles for både teatre, operasaler og konsertsaler er at alle publikummere bør ha god sikt mot scenen og en ikke-blokkert direktelyd. For teatre og operasaler er det behov for å ha lytterne nærmere scenen for at det skal være mulig å oppfatte hva som blir sagt eller sunget. De neste delkapitlene tar for seg disse romtypene i detalj.

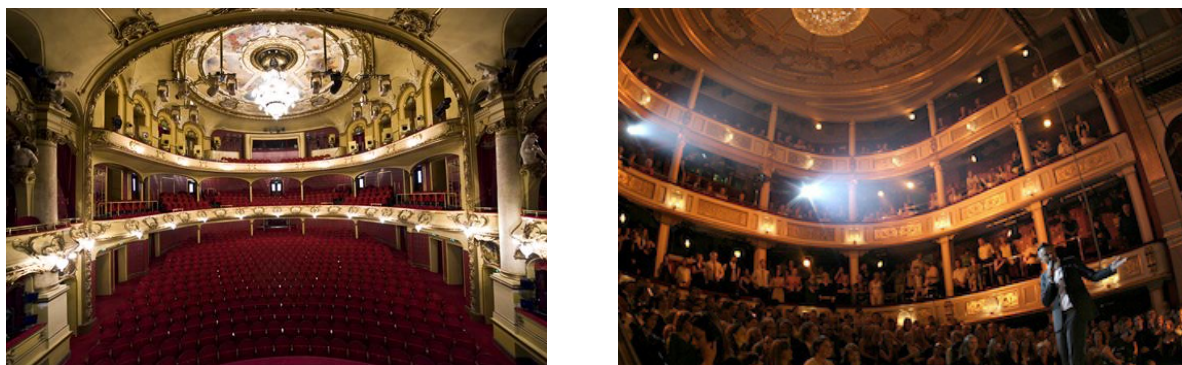
4.5.1 Teatre

Historisk sett har teatrene kommet først. De greske utendørs amfiteatrene og etter hvert også de romerske teatrene er blant de første teatrene i historien som fortsatt er rimelig godt bevart. Disse var i hovedsak utendørs. Figur 40 viser en skisse for et gresk teater. Publikum var samlet i en sirkelbue rundt scenen, ofte kalt en hestekoform, for at alle skulle sitte så nær scenen som mulig. Formen på publikumsområdet er nok noe påvirket av direktiviteten til en taler. Den høyfrekvente lyden av en taler som er viktig for tydeligheten har høyest nivå cirka innfor den sektoren hvor publikum sitter. Området Orchestra i figur 40 var der skuespillerne sto. Skene var en eventuell steinbygning, som var veldig vanlig i romerske teatre.

Teatre fra nyere tid er til en viss grad basert på samme tankegang som for et gresk teater, men for nyere teatre har publikumsområder i ulike høyder for å kunne få inn enda flere folk uten at folk må sette lenger fra scenen. I tillegg er nyere teatre lukkede rom. Figur 41 viser bilder fra Nationaltheatret i Oslo og Drammens Teater. I og med at disse teatrene er lukkede rom, vil vi også ha refleksjoner som kan kompensere for lavt direktelyd nivå for de langt unna scenen og i tillegg etterklang. Etterklang gir et visst liv til lyden men er ofte mindre viktig enn tidlige refleksjoner, siden etterklang ofte bidrar til å redusere tale tydelighet. Balkongfronter og veggene på siden ved scenen, prosceniene, gir nyttige tidlige refleksjoner. For teatre er anbefalt etterklangstid ca. 1–1,3 s. Men volumet til teatret vil være med på å regulere nivået til etterklangen og kritisk avstand. Scenografi kan være betydningsfull for tale tydelighet siden scenografien kan innføre nyttige tidlige refleksjoner.



Figur 40: Prinsippskisse for Gresk teater sett ovenfra.

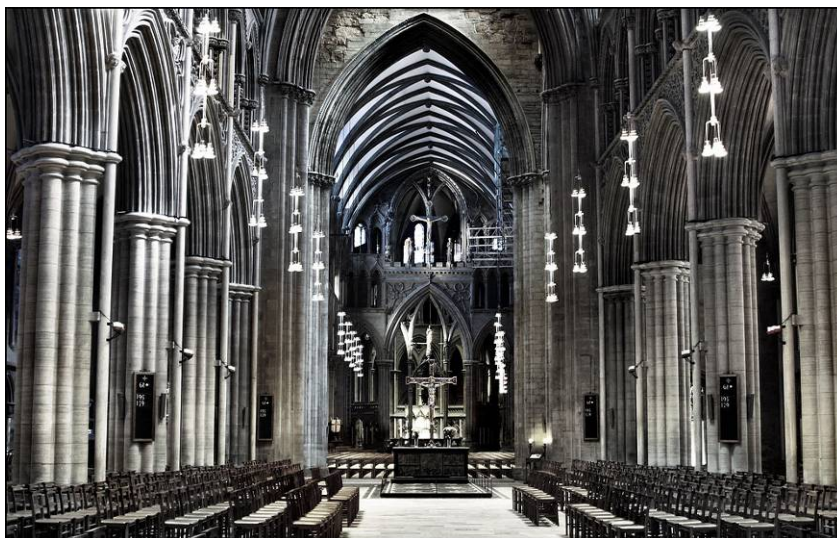


Figur 41: Nationaltheatret i Oslo (venstre) og Drammens Teater (høyre).

4.5.2 Kirker

Kirkemusikk er gjerne assosiert med orgel- og kormusikk. Mye av denne musikken ble utviklet i store kirker av stein med stor takhøyde. På grunn av liten absorpsjon og stort volum fører dette til lang etterklangstid, ofte over 5 sekunder. I eldre katedraler er det mye ornamentering som bidrar til diffusjon. Figur 42 viser bilde fra Nidarosdomen i Trondheim. Siden det meste av absorpsjon er nede på gulvet får vi et veldig stort klangrom i den øvre delen av rommet med et ganske diffust lydfelt. Orgel- og kormusikk i slike katedraler gir et mektig inntrykk og er ofte komponert for å utnytte den lange og «altomsluttende» akustiske responsen. Den lange etterklangen blander sammen toner til akkorder og taletydigheten er ofte dårlig. Mye av kirkemusikken har langsomme musikalske tema tilpasset den lange etterklangstiden. Uten folk til stedet vil steinkirker ha veldig lite absorberende materialer. Etterklangstiden i slike kirker vil derfor ofte bli kraftig redusert når kirken fylles med folk, i enkelte tilfeller opptil 75 % reduksjon av etterklangstiden. Dette kan være upraktisk for eksempel ved innøving av konserter i kirker. (Den rake motsetningen vil ofte være kinosaler med godt polstrede seter, hvor endring med og uten folk i salen er tilnærmet lik 0 %).

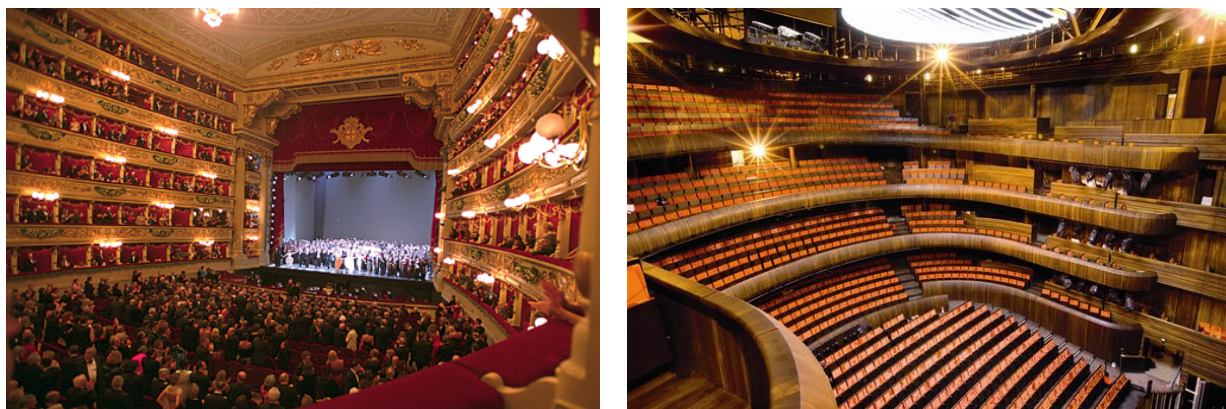
På grunn av det store volumet er ikke alltid den lange etterklangstiden et like stort problem som vi kunne forvente. Som et eksempel har St. Paul's cathedral et volum på 152.000 m³ og en målt etterklangstid på 11 s ved 500 Hz. Dette gir et teoretisk nivå på G_{late} lik +3 dB, ut fra likning (20). Dette er ikke noe spesielt høyere nivå enn i konsertsaler, men med stor dynamikk i musikken vil man tydelig høre rommets utrolig lange etterklang.



Figur 42: Nidarosdomen i Trondheim.

4.5.3 Operasaler

Opera oppsto i Italia på slutten av 1500-tallet. Dette kombinerte musikk og teater på en ny måte. En operasal er større enn et teater og orkesteret sitter foran scenen i en orkestergrav (noe teatre også kan ha, bare mindre). Figur 43 viser bilde fra to operasaler: La Scala i Milano og den nye operaen i Bjørvika. Disse salene har tradisjonell hestesko-form. Wagner innførte vifteformet operasal (se figur 44) i Bayreuth (1876) med utgangspunkt i at ingen adel skulle skille seg ut oppe på balkongene. Etter 1994 har man i stor grad gått tilbake utelukkende til hesteskoformet sal, for eksempel salene i Glyndebourne, Gøteborg, København, Helsinki, Cardiff, Toronto og Oslo. Hestesko-form gir et mindre eksponert publikumsareal (lyden har vanskeligere for å støte borti det absorberende publikumsarealet) som fører til mer etterklang og mer refleksjoner tilbake til scenen.



Figur 43: Operahus, La Scala i Milano (venstre) og den nye operaen i Bjørvika (høyre).

For opera er det noe lavere krav til tydelighet sammenliknet med teater og et orkester låter gjerne bedre med mer etterklang enn hva vi finner i et teater. For opera er anbefalt etterklangstid typisk 1,3–1,7 s. En viktig egenskap er balanse mellom orkesteret og sangere. Etterklangstid i operasaler er gjerne lengre nord i Europa sammenliknet med sør i Europa. Mange av operaene har italiensk tekst, slik at sør i Europa hvor mange forstår italiensk, ønsker publikum å oppfatte teksten som synges. Tekstene for sangen vises ofte også på skjermer i salen (kalt *libretto*) på stor skjerm over scenen eller på små skjermer tiltenkt hver enkelt tilhører, som gjør det mindre viktig faktisk å oppfatte teksten i sangen.

En hesteskoformet konstruksjon kan lett føre til fokusering av lyden, siden en krummet flate vil føre til fokusering. I *fokalpunktet* (stedet hvor det fokuserer) vil vi få høye nivåer og dermed også store nivåvariasjoner for de lytterne som er ved fokalpunktet og lytterne som er godt utenfor. Ved å ha gode diffuserende egenskaper til for eksempel krummede balkongfronter kan man unngå slik kraftig og ofte også uheldig fokusering.

For den nye operaen i Bjørvika ble det satt et uvanlig høyt krav til etterklangstid, nemlig 1,8 s (i mellomtone). Noen eksperter fryktet i forkant av åpningen av salen at tydelighet til sang ville bli for lav og at orkesteret lett ville overdøve sangerne. Dette kan være med på å illustrere de klare begrensningene vi har ved å bruke akustiske parametere som eneste mål for akustisk kvalitet. Hvorfor salen har vist seg å være veldig populær er ikke fullstendig forstått, men geometri til rommet, design av balkongfronter og et ekstra volum øverst i salen kan bidra til nyttige tidlige refleksjoner og regulere nivået til etterklangen. Viktige designelementer i Bjørvikas store sal er: utforming av balkongforkanter, refleksjoner via bakvegg, undersidene til balkongene («cornice reflections»), ringen rundt lysekrona i himlingen til salen og utforming av publikumsstolene. Balkongfrontene, bakvegger og balkongoverheng er utformet slik at de reflekterer en del tilbake til scenen (uten å gi sjenerende ekko), se også figur 39. Balkongfrontene har varierende vertikal vinkling for å motvirke fokusering. Stolene er designet slik at stolenes bidrag til absorpsjon med folk i setene ikke blir så høy. Dette bidrar til ganske mye etterklangslyd også for fullsatt sal. Endring i etterklangstid i tom og helt fylt sal er ca. 10 %; fra 2,2 til 2,0 s (ved midlere frekvenser).

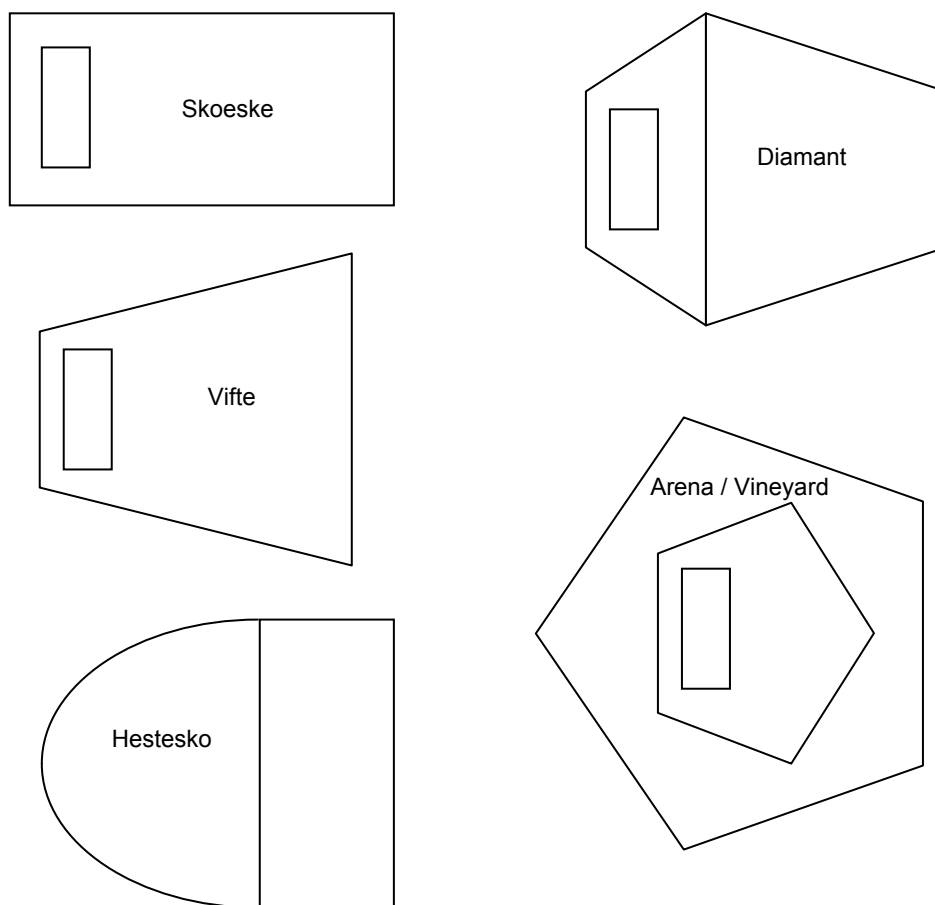
4.5.4 *Konsertsaler*

Konsertsaler er historisk sett tiltenkt symfoniorkestre eller mindre akustiske ensembler (kammermusikk). På 1700-tallet hadde man kammermusikk på slott i Europa, for eksempel strykekvartetter. Disse besetningene utviklet seg over 1800-tallet til symfoniorkesteret og rommet som orkesterne spilte vokste til store konsertsaler. Saler for kammermusikk (små konsertsaler) finnes fortsatt. For orkestermusikk er kravet til tydelighet lavere enn for teatre og operasaler. Lengre etterklangstid gir mulighet for å skape harmonier i etterklangen ut fra enkelttoner som er spilt etter hverandre henger igjen i rommet. I tillegg, med egnet nivå på etterklangen, får lytteren opplevelse av å være omgitt av orkesterlyden og etterklangen blir godt hørbar som en del av musikken. En slik akustisk respons har gjerne komponistene hatt i tankene da de skrev musikken. For saler for symfonisk musikk er gjerne kravet til etterklangstid lik 1,8–2,2 s. For kammermusikk er salene mindre og anbefalt etterklangstid kortere, typisk 1–1,5 s.

For å få nok etterklang innenfor et passende nivå vil det bli nødvendig med et tilstrekkelig volum over publikum uten for mye absorpsjon hvor etterklangen får lov til å utvikle seg. Dette volumet over publikum kalles er blitt omtalt som «hard cap». Etterklang fra et stort volum over publikum vil også kunne gi lytterne opplevelsen av å være omgitt av salens sene akustiske respons («envelopment»). Det sies gjerne at man bør ha 10 m³ volum per tilhører som en tommelfingerregel. Publikum med seter vil være det mest betydelige bidraget til absorpsjon, resten av salen består som regel av reflekterende flater. Når man har bestemt seg for hvor man publikumsplasser man har lyst på for en bestemt sal, må salen ha et stort nok volum til å gi lang nok etterklangstid og passende nivå til etterklangen.

Opp gjennom tidene har ulike salsformer blitt lansert. De første salene hadde en rektangulær form, som en skoeste. De gamle salene fra 1800-tallet som står fortsatt, som Musikverein i Wien og

Symphony Hall i Boston (USA), er i hovedsak rektangelformete saler som er høye, smale og lange. De var gjerne smale og rektangelformede for å kunne få en sterk nok takkonstruksjon. På begynnelsen av 1900-tallet tenkte de gjerne at en sal ville låte fint så lenge etterklangstiden var lik disse gamle populære salene. I tillegg var det andre ønsker som tilsa at en annen form enn skoeske var gunstig. Figur 44 viser noen av de salsformene som er blitt prøvd. For kino ble vifteformet sal sett på som gunstig for å samle flest mulig folk framfor et lerret. Man endret i visse tilfeller på salsformen uten helt å innse konsekvensene av geometriforandringene som ikke ble fanget opp av etterklangstiden som mål (statistisk akustikk). Resultatet ble mange mislykkede saler. Kravet til å få inn mange publikummere for også å kunne ha konserter med forsterket lyd og events (flerbruksaler) gjorde det praktisk å ha vifteform på salen. Nye konstruksjonsmetoder gjorde det også mulig å lage tak med lange spenn. Andre foreslo en arenaform på salen med scenen mer midt i salen og publikum rundt, som for en konsert på et torg.



Figur 44: Ulike romformer for konsertsaler med hesteskoform for teatre og operasaler også inkludert.

I etterkant har det vist seg at saler med vifteform ofte fører til problematiske akustiske forhold. Forklaringen har vært at skråstilte sidevegger leder lydbølgene bak i salen og ikke inn mot midten av salen (svake sideveggsrefleksjoner). Se også figur 22-4 i læreboka. Også her tyder det på siderefleksjoner er positive i forhold til refleksjoner fra himlingen. Smale saler med rette vegger vil få siderefleksjoner med sterkt nivå. De gamle salene har også gjerne balkonger langs sideveggene, hvor balkongunderkanten kaster refleksjoner inn mot salen (såkalte «side-kickers»). Noen saler med sterke refleksjoner ovenfra ble så mislykkede at de er blitt revet i etterkant. Saler med arenaform har blitt vellykkede ved at de som har designet salen har fokusert på å skape reflekterende flater som gir tidlige refleksjoner mye fra sidene for lytterne.

Det er også blitt spekulert i betydning av diffuserende flater. De gamle salene har mange kurvede former og statuer med mer stående rundt i salen. De nyere salene på midten av 1900-tallet hadde store, jevne flater siden dette var billigst å bygge. Betydningen av geometri og grad av diffusjon er fortsatt ikke fullt ut forstått. Blant annet på grunn av dette og stor fallhøyde ved eksperimentering har skoeseformede saler blitt veldig populære igjen. Rett og slett fordi de har vist seg å fungere bra, selv om vi ikke fullt ut forstår hvorfor. En oppdatering i forhold til de gamle salene er gjerne at de har et skrått gulv slik at alle for fri sikt mot scenen og nye saler har gjerne noe lavere grad av diffusjon.

Når det gjelder mål utover etterklangstid som vil kunne evaluere om en konsertsal vil låte bra, er det foreslått en god del parametere i løpet av de siste 60 årene. Mange av disse akustiske parametere er omtalt i kapittel 7, se også kapittel 22 i læreboka. Som nevnt i delkapittel 4.1 har Beranek foreslått *ITDG* som en geometrisk parameter, og anbefalt *ITDG* innenfor 15–20 ms, men det stor uenighet om hvor avgjørende *ITDG* er for opplevd lyd i konsertsaler.

Å ha mange balkonger kan føre til for kort etterklangstid for symfoniorkester siden det totale absorpsjonsareal blir for stort. I tillegg vil de som sitter under store balkonger få lite etterklangslid siden balkongen skygger for mange av refleksjoner fra den øvre delen av rommet, se også figur 22-5 i læreboka. Å ha mange balkonger fungerer bedre for opera og teater hvor ønsket etterklangstid er kortere sammenliknet med symfonisk musikk.

Figur 45 og 46 viser bilder fra to populære saler. En gammel og skoeseformet, Musikverein i Wien og en mer moderne med arena(vineyard)-form, Berliner Philharmonie i Berlin. Vi ser hvordan Musikverein er smal, lang og høy med mange diffuserende elementer og balkonger langs sideveggene (men med flatt gulv som gir dårlig sikt). Berliner Philharmonie representerte en helt ny designstil i sin tid (åpnet i 1963). Balkongfronter gir tidlige refleksjoner for publikum. Scenen midt i salen gjør scenen til et samlingspunkt (som nevnt som en gruppe som spiller konsert på torg). Noe av ulempen med publikum bak orkesteret er at orkester låter ganske annerledes bakfra sammenliknet med forfra. Men det fører også til at de på scenen, orkesteret og dirigenten, blir veldig integrert med resten av salen – noe som virker positivt.

Figur 47 viser Oslo Konserthus i Vika. Denne salen har hatt problemer med negativ omtale av akustikken (og som kan være vanskelig å snu når det først har etablert seg sosialt). Dirigenten Mariss Jansons sa opp sin stilling som dirigent for Oslo Filharmonisk Orkester i 2000. Denne salen er vifteformet og har også andre elementer som er annerledes sammenliknet med de salene vist i figur 45 og 46. Blant annet har den en stor, bred og dyp scene uten noen vegg bak orkesteret. Den har også veldig lette sidevegger som fører til kort etterklangstid i bassen (se delkapittel 8.6.1).

For en del nye saler under utbygging er det satt som kriterium at de ikke skal ligne for mye på gamle skoeseformede saler, det vil si representere noe «nytt og spennende» som også fungerer akustisk. Figur 48 og 49 viser prosjekterings-skisser for Philharmonie de Paris (planlagt åpning i 2015) og Sinfonia Varsovia Concert Hall, Warsawa (planlagt åpning i 2016). Noe av det som kjennetegner disse nye salene er at grunnformen er rektangulær og at salen i hovedsak er smal og høy, men publikum sitter også bak orkesteret. Tidlige refleksjoner fra sidene er mye gitt av strategisk plasserte balkongforanter.



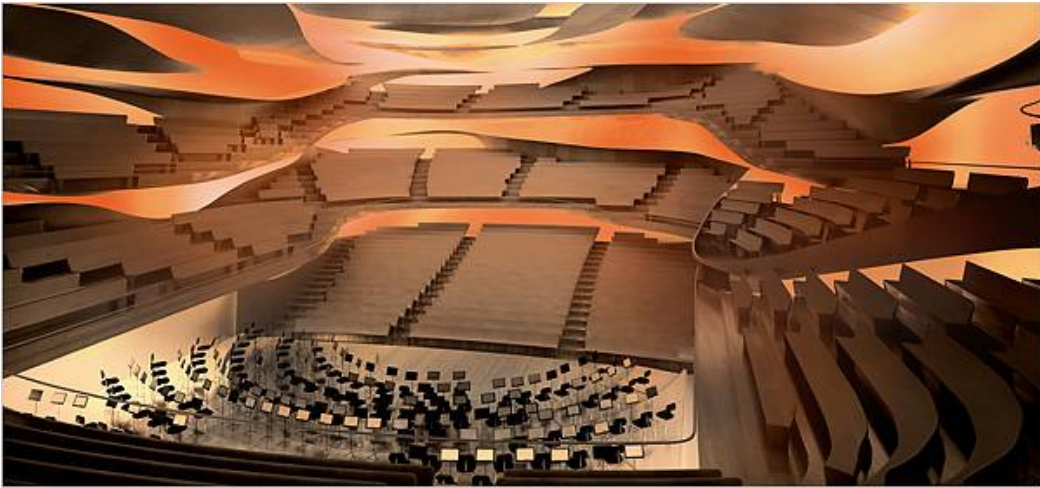
Figur 45: Musikverein i Wien.



Figur 46: Berliner Philharmonie i Berlin.



Figur 47: Oslo Konserthus.



Figur 48: Philharmonie de Paris.



Figur 49: Sinfonia Varsovia Concert Hall, Warsawa.

4.5.5 Kinosaler

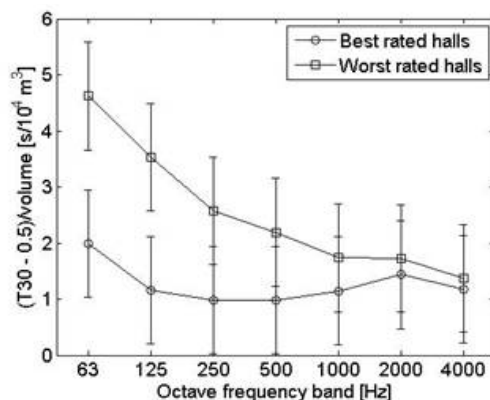
For kinolyd er det ønskelig med en godt dempet sal, slik at selve filmproduksjonen setter premissene for mye av opplevelsen av omgivelsene for filmen. Som nevnt i delkapittel 4.5.4 er ofte kinosaler noe vifteformet, eller de kan være skoeformet. Typisk etterklangstid for kino er 0,8–1,2 s ved midlere frekvenser, noe som kan gjøre de egnet for tale/konferanse/teater og forsterket musikk, men sjelden akustisk musikk.

4.5.6 Saler for både akustisk og forsterket musikk

Å få saler til å fungere godt for ulike bruk/ulike sjangre er krevende. Et symfoniorkester vil ha andre krav til akustikken sammenliknet med et pop/rock-band som skal forsterkes. Av økonomiske årsaker blir de fleste konsertsaler bygget for å fungere også for forsterket musikk og har derfor elementer av variabel akustikk. Akustisk musikk er avhengig av en viss akustisk respons, både for utøvere og publikum. For forsterket musikk er dette behovet mindre, men det er en fordel med et visst liv i rommet, så det ikke blir for stor dominans av direktelyd (liten opplevelse av å være omsluttet av lyd). Mange saler har derfor for eksempel tepper lagret i kamre som kan skyves ut for forsterket musikk, eller andre brukere som ønsker mindre etterklang og reflektert lyd.

For klassisk musikk vil vi oftest ha lengre etterklangstid i bassen sammenliknet med mellomtone og diskant (typisk faktor 1,2). For pop/rock og tale derimot er det vanligvis mindre behov og gjerne et krav at etterklangen ikke er lengre i bassen siden etterklangen bidrar til å redusere «punch» i

bassen og hvor «tight» lydbildet blir. Se figur 22-2 i læreboka. Nyere funn (Adelman-Larsen *et al.*, 2009) indikerer at populære saler for pop/rock skiller seg fra mindre populære saler blant annet ved at de har et lavere nivå til etterklngen i bassen, se figur 50. Nye type produkter er oppblåsbare installasjoner som gir effektiv absorpsjon i bassen og som lett kan skrus av slik at de absorberer mindre (fungerer som membranabsorbenter, se delkapittel 8.6.1).



Figur 50: Forskjeller i ukalibrert energi til reflektert lyd mellom mest og minst populære pop/rock saler.

Hvor mye som må absorberes ved ulike frekvenser for pop/rock kan virke til å avhenge av forventninger og krav. For krav til ok tydelighet, ikke minst på vokal, virker det avgjørende å ha godt med absorpsjon i frekvensområdet 300–800 Hz. I dette frekvensområdet har mange lydtkilder mye lydenergi og høyttalerne er ikke så veldig direkte i dette frekvensområdet. Mye av definisjon på lyden er dermed styrt av rommet, høyttaleren kan ikke løse alt «alene». Det kan dermed virke som at pop/rock kan «leve med» en del romling bassen så lenge tydeligheten er god i mellomtone og diskant. Men dersom det er krav eller forventning til at det skal låte bortimot like tight som på plate vil vi også trenge lite etterklang og lavt nivå til etterklngen også under 300 Hz for å oppnå tilfredsstillende forhold. Siden de fleste høyttalere er så å si omnidireksjonelle i bassen vil tydelighet i bassen i stor grad være priggitt rommet, med mindre man for eksempel bruker subwoofere med cardioide-karakteristikk. Molton-tepper absorberer lite under 150 Hz, det vil si de begynner å absorbere effektivt fra 150 Hz og oppover i frekvens. Tiltak som bruk av Molton-tepper kan dermed gi kraftig forbedring for tydelighet til vokal, men vil ikke være tilstrekkelig i alle situasjoner.

Det vil ofte være spesielt viktig å dempe ved lave frekvenser dersom vi har liten avstand mellom gulv/tak eller vegger, siden dette lett vil gi sterke stående bølger og store nivåvariasjoner rundt i rommet, i tillegg til lang etterklangstid og høye nivåer til etterklngen i bassen.

4.5.7 Forhold på scenen

Det er forsket langt mindre på forhold for utøverne på scenen sammenliknet med forhold for publikum. Nyere forskning (Dammerud, 2009) indikerer at smale og høye scenehus er en fordel for symfoniorkestre, og at musikerne i tilstrekkelig grad kan oppleve den akustiske responsen fra salen. Det vil si at den akustiske responsen fra scenehuset ikke bør overdøve etterklngen som kan høres fra salen. Dette virker til å gi musikerne anledning til å høre seg selv og hverandre, samtidig som de har en følelse av å nå gjennom til publikum og til en viss grad høre hva publikum hører (for eksempel balansering og intonasjon hørt fra etterklngen).

5 MÅLING AV ET ROMS AKUSTISKE RESPONS

Dette kapitlet beskriver ulike måleteknikker som er vanlig innen romakustikk. Måleteknikker kan i hovedsak deles opp i to typer – eldre og nyere metoder. Med nyere metoder er det mulig å måle impulsresponsen til rommet og få et visst innblikk i ekkogrammet til rommet. Basert på impulsresponsen vil vi finne/regne ut ekkogrammet/reflektogrammet, frekvensrespons, waterfall, faserespons og romakustiske parametere. Med eldre metoder kan vi i hovedsak kun studere totalt lydnivå innenfor ulike frekvenser. Vi vil ikke få noe innsyn i tidsresponsen til rommet.

Gode løsninger på et problem er ofte basert på å stille riktig diagnose i utgangspunktet. Med riktig bruk av måleteknikk kan vi lettere finne ut hva som er de mest betydelige problemene for et roms akustiske respons. Måleteknikk kan ikke fullt ut erstatte det å lytte til lydforholdene med egne ører – det er kombinasjonen av begge som har et stort potensiale.

Måling har gjerne to ulike formål: Å måle lyd fra høyttalere i rom, for eksempel i et kontrollrom, eller å måle utelukkende den akustiske responsen fra rommet i seg selv.

5.1 Enkle vurderingsteknikker

Under er det listet noen enkle metoder og verktøy du kan bruke for å evaluere lydforhold i rom:

- Sett på musikk du kjenner godt og lytt med egne ører.
- Sett på hvit/rosa støy og gå rundt og lytt til støyen. Sterke kamfiltre (dvs. interferens) vil høres godt ved at støyens karakterer endrer seg når du flytter deg.
- Sett på rentoner/sinustoner for frekvenser du forventer spesielle forhold, som rommoder.
- Se deg rundt med «akustiske øyne» – se etter tegn til interferens, uheldige reflekterende flater, fokuserende flater med mer.

5.2 Måling ved hjelp av rosa støy og RTA (eldre metode)

Eldre metoder for måling av frekvensrespons til høyttalere i rom baserer seg på å spille av rosa støy. Rosa støy har et likt nivå ved ulike frekvenser når nivået summeres innenfor oktavnånder. Sammen med en signalkilde med rosa støy bruker man en såkalt RTA (*Real Time Analyser*) som ved hjelp av en mikrofon viser nivået til lyden i rommet innenfor 1/3 oktavnånder (vanligvis). Dersom høyttaler og rom ikke endrer på frekvensrespons vil RTA'en i prinsippet vise likt nivå innenfor alle 1/3 oktavnånder. Dersom rommet hever eller senker nivået unødvendig mye innenfor de ulike 1/3 oktavnånderne kan vi justere inn nivåene ved hjelp av en grafisk EQ som også opererer på 1/3 oktavnånder, inntil vi har oppnådd ønsket nivåpåvirkning fra rommet (inklusive høyttaler).

Noe av svakhetene med en slik metode er at vi kun måler på den totale responsen til systemet (høyttaler og rom). Vi ikke få noe innblikk i tidsresponsen til den akustiske responsen fra rommet for å avdekke eventuell uheldig interferens eller uheldige ekko. Interferens kan ses i form av kamfiltre i frekvensresponsen, men med 1/3 oktavn oppløsning vil ikke alle typer kamfiltre fremstå så tydelig. Rommoder er også vanskeligere å få et tydelig bilde innenfor 1/3 oktavnånder. I tillegg gir grafisk EQ med 1/3 oktavn oppløsning ofte uheldig faserespons/tidsrespons.

5.3 Måling av rommets impulsrespons (nyere metoder)

Impulsresponsmetoder er basert på å finne de elektriske eller akustiske egenskapene til et system, for eksempel en høyttaler eller et rom. Systemet som skal testes kalles gjerne DUT (*Device Under Test*). Dersom vi finner impulsresponsen til systemet kan vi finne nivåene til tidsresponsen (ETC – *Envelope Time Curve*), frekvensresponsen, faseresponsen, waterfall med mer. ETC for et rom er det samme som ekkogrammet/reflektogrammet til rommet. Slike analysemuligheter som ble tilgjengelig i løpet av 70-tallet ble kalt for *Time Delay Spectrometry* (TDS). Muligheten til å se hvordan nivåene varierte i forhold til både tid og frekvens var ny i forhold til de eldre metodene (RTA), og vi kan si at de nye verktøyene som kom på 70-tallet var med på revolusjonere lydteknikken. Da digitalteknikken kom på 80-tallet fikk vi mulighet både til å kartlegge systemer tidsmessig og justere tidsavvik med delay-enheter. På 90-tallet og etter tusenårsskiftet ble mulighetene billige og anvendt i utstyr, som for eksempel verktøy for romkorleksjon.

Når vi gjør slike målinger i et rom vil alltid høyttaler, rom og mikrofon være del av DUT. Den elektriske impulsresponsen til for eksempel en grafisk EQ kan lett finnes, mens impulsresponsen til en mikrofon eller høyttaler isolert sett bør finnes i et ekkofritt rom (et rom uten noen refleksjoner). Hvis ikke vil rommet påvirke måleresultatet for mikrofon eller høyttaler på grunn av refleksjoner som forstyrrer observert direktelyd fra høyttaler/til mikrofon. Impulsresponsen til hardwaren som brukes for målingen, for eksempel et lydkort, kan elimineres slik at lydkortet ikke er med å påvirke resultatet. Ved å bruke en omnidireksjonell mikrofon oppnår vi en ganske nøytral tids- og frekvensrespons fra mikrofonen. Denne vil dermed ikke være med å prege resultatet så mye. Er vi kun interessert i rommet må vi ha en veldig nøytral høyttaler. For målinger av «ren» akustisk respons i for eksempel konsertsaler brukes det derfor en rimelig standardisert lydkilde som skal være mest mulig omnidireksjonell (tilsvarende som for mikrofonen). Grunnen til at man har valgt omnidireksjonell mikrofon og høyttaler for måling på rom er at omnidireksjonell kilde er at hele rommets respons fanges i én enkelt måling og dette samsvarer også med det perspektivet ut fra tradisjonell statistisk akustikk (måling av etterklangstid framfor ekkogrammet).

For å få en korrekt målt impulsrespons er det en forutsetning at rommet/systemet som måles er lineært og tidsinvariant system. Det betyr at det ikke kan være noe komprimering av dynamikk eller variasjon til systemets respons over tid, som vind, temperaturendring eller forflytning av høyttaler eller mikrofon i løpet av måleperioden. Det finnes ulike metoder for å finne impulsresponsen. De ulike metodene er beskrevet i detalj under.

5.3.1 Lage impulsive lyder og ta opp responsen direkte

Den enkleste metode for å få impulsresponsen fra et rom er å lage en impulsiv lyd med ved å klappe, stikke hull på en ballong eller skyte et skudd med startpistol og så ta opp denne responsen (med en vanlig lydopptaker). Et klapp eller en ballong som smeller er en impulsiv lyd. Men det vil ofte være problematisk å få smellet høyt nok i forhold til bakgrunnsstøyen. For å måle responsen til elektriske systemer er klikkesignaler også for begrensende i forhold til bakgrunnsstøy. Vi trenger alternative metoder hvor signalet varer lenger i tid og hvor vi får bedre signal-støy-forhold. De tre metode under er basert på å sende ut signal fra en elektrisk signalkilde, med valgt lydsignal, signalgenerator eller måleprogram som signalkilde.

5.3.2 FFT (Source Independent)

En litt eldre metode for å måle via høyttaler kalles ofte FFT eller «source independent method». Med denne metode kan du bruke et hvilket som helst signal som målesignal, derav navnet kildeuavhengig metode. Dette selvvalgte signalet (som musikk eller rosa støy) spilles av på høyttalerne og tas opp ved hjelp av mikrofon. Frekvensrespons til signal ut til høyttaler og signal inn fra mikrofon finnes ved hjelp av FFT (*Fast Fourier Transform*). Frekvensresponsen til systemet som skal undersøkes (gjørne høyttaler og rom) finnes ved å se på forskjell i frekvensspekter på utgang og inngang. Ved å ta FFT basert på å observere signalet over et visst tidsrom kan vi få en mye mer detaljert frekvensrespons sammenliknet med 1/3 oktav RTA. Vi kan også finne faseresponsen ved hjelp av FFT-metoden. Ved å ta *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) kan vi finne impulsrespons (ekskogram), men kvaliteten på denne responsen blir ikke alltid så bra. Den reduserte kvaliteten kan skyldes at målesignalet har lavt signalnivå ved visse frekvenser, spesielt om vi bruker musikk som signalkilde. En fordel med denne metoden er at vi kan måle underveis for eksempel i en konsert.

5.3.3 MLS

MLS-metoden er å sende ut et spesielt målesignal til høyttaler, et firkantpulssignal som signalkilde hvor bredden til hver enkelt firkantpuls varierer over tid. Metoden for å regne ut varigheten til hver enkelt firkantpuls er kalt *Maximum Length Sequence*, derav navnet. Frekvensspekteret til MLS-signalet tilsvarer tilnærmet hvit støy (-1,6 dB ved 1/3 av samplingsfrekvensen). Ved å gjøre en EQ (pre-amphasis) på målesignalet kan det omgjøres til rosa frekvensspekter. Et rosa støyspekter har høyere nivåer i bassen, noe som er gunstig i forhold til å overvinne ofte bassdominert bakgrunnsstøy med målesignalet. Ved hjelp av en matematisk metode kan lyden man får ute i rommet med et slikt målesignal regnes om til en respons gitt at signalkilden i stedet var en impuls. Ved å spille av en MLS-sekvens med lang varighet vil vi kunne eliminere bakgrunnsstøy i den målte impulsresponsen. Økt signal-støy-forhold gir bedre kvalitet på målt impulsrespons og vil bli vesentlig bedre sammenliknet med å sende kun en kortvarig impuls som målesignal eller å bruke FFT-metoden. Alternativt kan vi bruke denne økte kvaliteten til redusere lydnivåene under måling. Men siden MLS-signalet høres mest ut som et støysignal kan det være vanskelig å gjøre en slik måling mens publikum er til stede.

5.3.4 Sinussveip

Et sinussveip sender ut et rentonesignal hvor frekvensen gradvis endres i løpet av signalets varighet. Sinussveip-metoden er den mest brukte i dag og har de samme måletekniske fordelene som MLS-metoden. Frekvensen til sinustonen kan økes lineært eller logaritmisk. Et lineært sveip vil ha hvitt frekvensspekter (som hvit støy), mens et logaritmisk sveip vil ha rosa frekvensspekter (som rosa støy). Et logaritmisk sveip brukes ofte for å oppnå bedre signal-støy-forhold i bassen. Ved å bruke et lengre sveip vil vi få bedre signal-støy-forhold, som for MLS-metoden. Det er viktig å være klar over at sinussveip eliminerer harmonisk forvrenging og intermodulasjonsforvrengning til høyttaleren. Dette er praktisk om man kun er interessert i den akustiske responsen til rommet. Men med et lydsystem kan denne forvrengingen være viktig å få med i målingen. På lydsystemer brukes derfor ofte MLS i stedet, for eksempel for vurdering av tale tydelighet. Med MLS- og sinussveipmetoden er det også vanlig å bruke et referansesignal. Responsen til systemet man ønsker å måle på (DUT) vil da ses relativt referansesignalet. På denne måten kan responsen til lydkorte elimineres ved måling av et roms akustiske respons. Selv om et logaritmisk sveip har rosa spekter vil responsen til lydkortet ha en veldefinert impuls og flatt frekvensspekter.

5.3.5 Målehøytaler og målemikrofon

Det er viktig å være klar over at tidsresponsen til høyttaleren (og dermed også frekvensresponsen) vil sette preg på målt impulsrespons til rommet. Ideelt vil direktelyden være representert som en perfekt impuls. Men direktelyden vil være styrt av høyttalerens respons som betyr at direktelyden vil ha en viss varighet. Ved høye frekvenser er tidsresponsen til høyttaler rask, mens tidsresponsen i bassen ofte er mer enn 5–10 ms, så sant vi ikke har elektrostathøytaler som lydkilde (se Newell, 2011). Dette fører til at lydbidrag tett i tid, det vil si innenfor varigheten til direktelyden (som direktelyd og gulvrefleksjon) lett kan flyte sammen til én uttatskillelig lydhendelse. Om vi vil undersøke lytteforhold i et kontrollrom vil vi som regel bruke de høyttalerne som man faktisk skal bruke i rommet som lydkilde. For å måle kun rommets respons må vi bruke en standard lydkilde. Innen romakustikk er denne standard lydkilden som nevnt en omnidireksjonell høyttaler, ofte en såkalt «dodec» som vil si en høyttaler bestående av 12 høyttalerelementer som danner en kuleform eller mer eksakt et dodekahedron som er en generell betegnelse på en 12-sidet 3-dimensjonell flate. Slike høyttalere er ofte kun tilstrekkelig omnidireksjonelle fra oktavbåndet 1 kHz og nedover i frekvens. Det vil si at lydutstråling over 1 kHz er ikke-standard for kulehøyttalere.

En omnidireksjonell mikrofon er vanligst som målemikrofon, som nevnt fordi den lett inkluderer alle refleksjoner og passer bra i forhold til statistisk akustikk. For å finne frekvensrespons er omnidireksjonell mikrofon også godt egnet fordi denne type mikrofon har den jevneste frekvensresponsen. Med en omnidireksjonell karakteristikk (opp til minst 4 kHz) får det mindre betydning hvordan mikrofonen orienteres og det blir lettere å få konsistente resultater mellom ulike målinger. Vår hørsel kan sies å ha en direktivitet mer lik cardioidekarakteristikk ved høyere frekvenser, men cardioidmikrofoner har større variasjon i sine karakteristikker og orientering av målemikrofonen vil få stor betydning. Som regel måles det kun i mono. Måling i kun ett punkt med en omnidireksjonell mikrofon i mono er ikke en fullverdig representasjon av hvordan vi vil oppfatte aktuelle forhold, spesielt ikke over mellomtone og diskant hvor vi får betydelig forskjeller i lyden på venstre og høyre øre.

En betydelig svakhet med omnidireksjonell mikrofon er at vi ikke får noe innblikk i retning til refleksjonene. Vår begrensede forståelse av retning til refleksjoner, geometrisk akustikk, kan muligens tilskrives at vi ikke har hatt noe standard utstyr for å kunne måle det. Men fordelene med omnidireksjonell mikrofon er i det minste at det er lett å gjøre lik type målinger i ulike rom, som gjør det lettere å finne forskjeller innenfor de aspektene av romresponsen som vi klarer å observere. Måling er best for å diagnostisere system, ikke gi et bra bilde på hvordan vi oppfatte lyden – kun gi visse indikasjoner. Alle stereoeffekter blir ikke tatt med. Å måle i flere punkter i nærheten av sweet spot kan være fornuftig i for eksempel et kontrollrom/lytterom, siden dette bedre vil samsvare med å ha to ører og at vi gjerne flytter oss litt rundt mens vi vurderer lyden (for eksempel langs hele miksebordet). Det er viktig å være klar over at målinger med en omnidireksjonell mikrofon, og eventuelt høyttaler, gir et dårlig bilde av hvordan vi opplever lydforholdene. Men de er nyttige verktøy for å diagnostisere akustiske responser på en standard måte.

5.3.6 Målinger med og uten publikum

Det kan i mange tilfeller bli ganske store variasjoner i lydforhold med og uten publikum. Publikum bidrar med absorpsjon og diffusjon. For saler med kun ståplasser vil gulvrefleksjonen nesten forsvinne med publikum til stede. På lengre avstand fra lydkilden vil publikum i stor grad absorbere

gulvrefleksjonen over ca. 500 Hz. Jo høyere opp i frekvens jo bedre absorberer publikum refleksjonen. Det er på lang avstand at effekten av publikum er mest utslagsgivende, fordi gulvrefleksjonen da må passere gjennom mange mennesker. For saler med stoler vil forskjellen med og uten publikum være avhengig av type stol. Ofte er stolene designet for å føre til liten forskjell med og uten publikum, men for mye absorpsjon i stolen kan føre til at den totale absorpsjonen med publikum til stede blir for høy.

I tillegg til delvis å absorbere gulvrefleksjonen vil publikum føre til at etterklangstiden i lokalet går ned og nivået på total reflektert lyd blir redusert. Dette fører som regel til bedre tydelighet i lyden når publikum er på plass enn hva målinger indikerer (en forandring i positiv retning). Men med folk til stede vil også bakgrunnsstøynivået oftest gå opp, som vil bidra til lavere tydelighet.

Med masse folk til stedet vil ofte luftfuktigheten og temperaturen øke, spesielt for små klubblokaler. Dette vil føre til at luftabsorpsjonen endrer seg og dette vil påvirke nivåene til direktelyd og reflektert lyd. For små lokaler vil vi ikke få så merkbar endring av nivåene til direktelyden (fordi denne bølgen går kun kort avstand fra høyttaler til publikum), mens nivåene til reflektert lyd vil kunne endre seg betydelig og gi en hørbar endring av tydelighet.

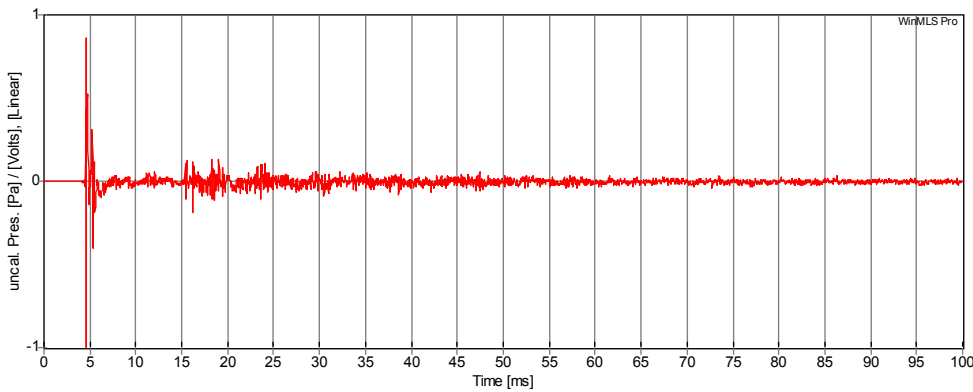
På grunn av publikums påvirkning på lyden vil vi utgangspunktet undersøke de akustiske forholdene i en sal med publikum til sted. Men i praksis er det ofte vanskelig å få til dette. Det er derfor vanlig å måle uten publikum og det er viktig å opplyse om at målingene er gjort uten eller med publikum.

5.3.7 *Relevans til impulsrespons*

En impulsrespons er rommets svar på en (virtuell) impulsiv lyd som har et hvitt frekvensspekter, det vil si likt nivå ved alle frekvenser. Dette betyr at tidsresponsen vi får som resultat for rommet vil være basert på et frekvensspekter tilsvarende hvit støy. Når vi ser på den bredbåndede tidsresponsen kan høyfrekvente bidrag få større betydning enn det vil gjøre ved avspilling av musikk, som mer tilsvarende rosa støy. På grunn av dette er det noen som filtrerer målt tidsrespons for å få en respons som bedre tilsvarende musikk som kilde-signal. Med langvarige/kontinuerlige lyder vildetaljer i ekkogrammet vil flyte sammen fordi lydhendelser nær hverandre i tid i ekkogrammet vil komme mens samme lyd lages. Det vil derfor være vanskelig for eksempel å bedømme om visse refleksjoner i ekkogrammet vil være hørbare som atskilte ekko. For eksempel kan en sanger være veldig begeistret for et roms ekkogram, mens en trommeslager ikke liker det i det hele. Dette fordi sangere lager mer langvarige lyder og som er mindre høyfrekvente. Kortvarige høyfrekvente lyder vil lettest gi hørbare ekko. For vurdering av impulsrespons/ekkkogram vil det derfor være nyttig å *auralisere* ekkogrammet, se kapittel 7.

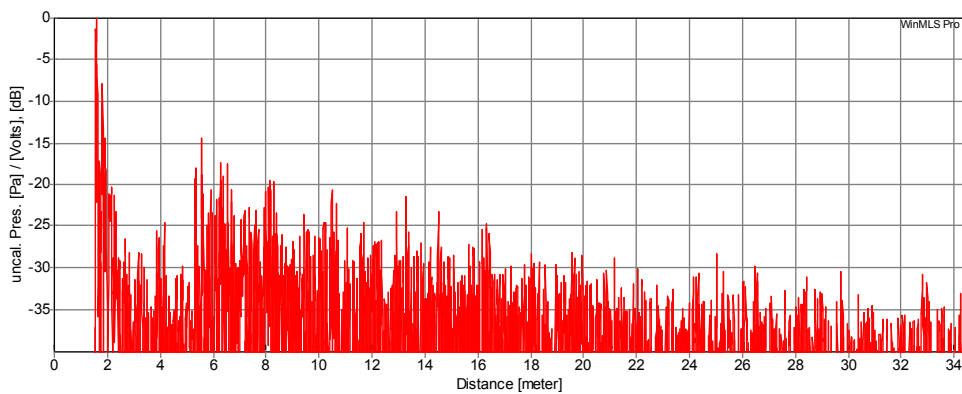
5.3.8 *Grafer for impulsrespons*

Impulsresponsen tilsvarende rommets ekkogram/reflektogram. Figur 51 viser impulsresponsen med tid langs x-aksen (ms) og lineær amplitude langs y-aksen. Direktelyden dukker her opp etter knappe 5 ms. Dette vil representere avstanden mellom høyttaler og mikrofon, så sant ikke signalkjeden har betydelig elektrisk delay. En lineær akse er ikke praktisk for å se på nivåforskjeller mellom lydbidragene fra rommet. En slik visning er i grunn mest praktisk for å se polariteten til direktelyden for å sjekke om flere høyttaler gir direktelyd med samme polaritet (ikke faser hverandre ut).



Figur 51: Impulsrespons med tid (ms) langs x-aksen og ukalibrert amplitude langs y-aksen.

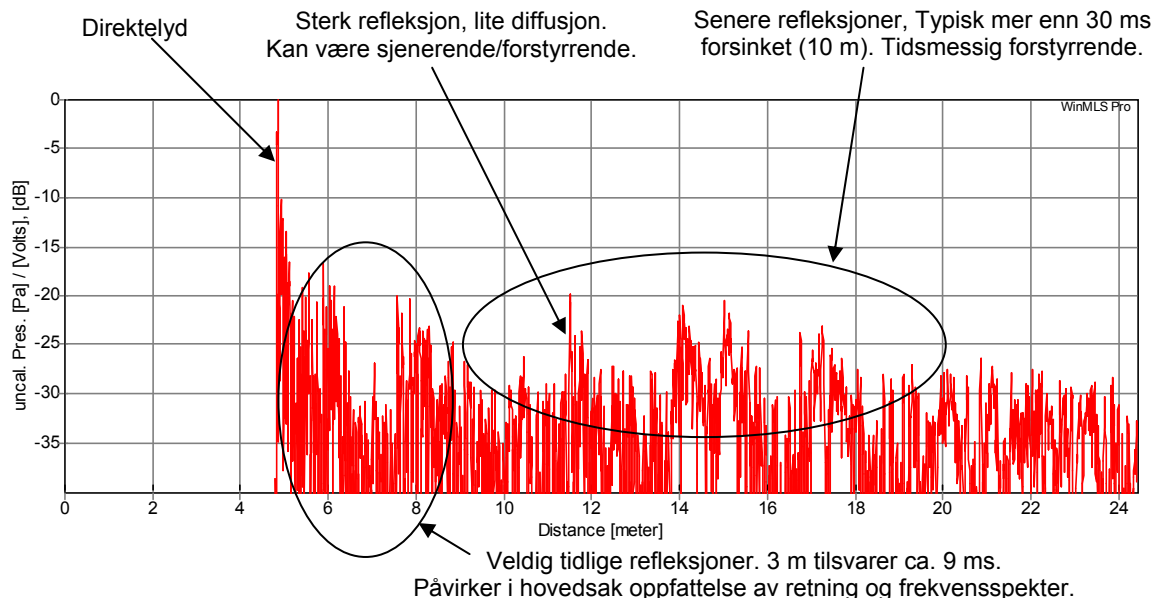
Figur 52 viser den samme målte impulsresponsen med avstand (m) langs x-aksen og nivå (dB) langs y-aksen. Dette er en vanlig visning for rommets respons, eventuelt med tid langs x-aksen. Responsen er målt med en omnidireksjonell mikrofon, så vi vil ikke direkte vite fra hvilken retning de ulike refleksjonene kommer fra. Men vi kan lese av avstanden refleksjonen har tilbakelagt mellom høyttaler og mikrofon. Basert på dette kan vi forsøke å finne ut hvilke veier den aktuelle refleksjonen har tatt rundt i rommet vi har målt. Dette blir et slags detektivarbeid som er mer eller mindre lett å nøste opp. Ved å legge lydabsorberende materiale foran en mistenkt reflekterende overflate kan vi se om refleksjonen går ned i nivå i impulsresponsen innenfor det frekvensområdet hvor absorbenten er effektiv. Vi bør i dette tilfelle filtrere impulsresponsen slik at nivået gjelder kun innenfor ønsket frekvensområde. Dette er mulig i mange av programvarene for måling av impulsrespons. Men filtrering av kun bass gir en veldig utjevnet tidsrespons som blir svært vanskelig å forstå/lese – raske/definerte endringer i tid krever høyfrekvente frekvenskomponenter. Figur 53 viser en målt impulsrespons zoomet inn på x-aksen (avstand) og ulike bidrag til målt respons. Som nevnt i delkapittel 5.3.7 kan de høyfrekvente toppene i tidsresponsen (refleksjonen) være misvisende høye i forhold til avspilling av musikk i rommet.



Figur 52: Impulsrespons med avstand langs x-aksen (m) og nivå (dB) langs y-aksen.

Impulsresponsen vist i et måleprogram vil være normalisert i forhold til frekvensspekteret til selve målesignalet (som for eksempel et logaritmisk sinussveip). Total impulsrespons er summen av impulsresponsen ved alle frekvenser. Frekvensresponsen til selve målesignalet er kompensert for slik at impulsilden som responsen er basert på hvitt frekvensspekter. I realiteten vil musikk, tale med mer ha et spektrum som ligner mer på rosa eller brunt spektrum. Så dersom vi lytter direkte til impulsresponsen vil det ofte bli misvisende mer diskant enn om vi *konvolverer* impulsresponsen med musikk eller tale (se kapittel 6 for mer detaljer). Å finne lavfrekvente refleksjoner kan være vanskelig, siden høyfrekvente refleksjoner dominerer i det totale nivået som blir vist. Et alternativ er

å bruke et målesignal som kun er innenfor et visst frekvensområdet og få en impulsrespons som kun gjelder innenfor dette frekvensområdet. Vi kan også bruke en EQ på målt impulsrespons for å gjøre ekkogrammet mer relevant.

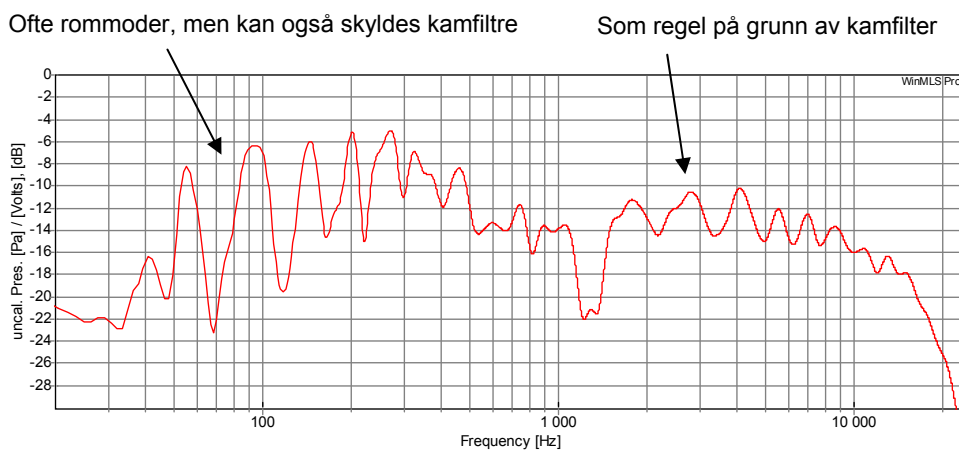


Figur 53: Målt impulsrespons og ulike bidrag fra rommet.

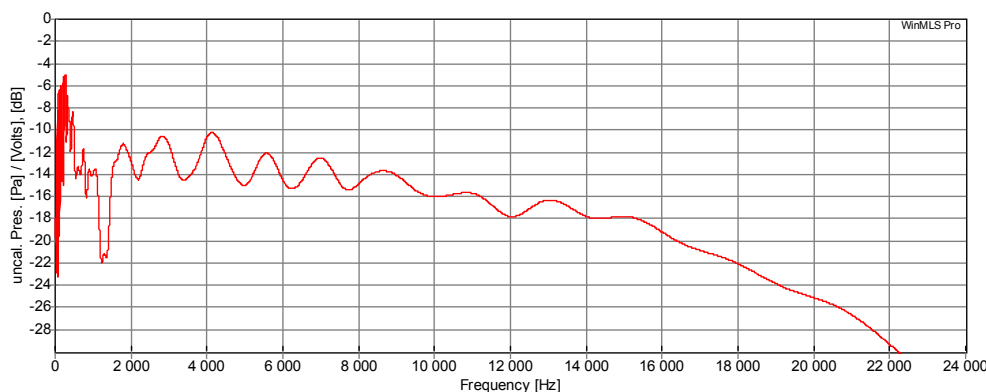
5.3.9 Frekvensrespons

Basert på målt impulsrespons kan frekvensresponsen regnes ut ved hjelp av FFT (Fast Fourier Transform). I frekvensresponsen vil vi se hvordan kombinasjonen av høyttaler og rom endrer nivået ved ulike frekvenser. Frekvensresponsen presentert i figur 54 er basert på impulsresponsen vist i figur 51 og 52, med logaritmisk frekvensakse langs x -aksen og nivå (dB) langs y -aksen. Vi vil gjerne søke etter moder og kamfiltre i responsen for små rom. For store rom er det mindre viktig å sjekke frekvensresponsen, men vil være nyttig for å avdekke eventuelle kamfiltre med mer. For store rom vil målt G innenfor ulike frekvensbånd være vel så viktig (oftest kun hele oktavnåbånd). Ved å se på frekvensrespons med lineær frekvensakse kan vi lettere avduke mulige rommoder og kamfiltre i responsen, siden disse gjentar seg ved harmoniske frekvenser (lik avstand mellom frekvenskomponentene med lineær skala). Ofte er rommoder og kamfiltre overlappende i bassen som gjør det vanskelig å isolere de to effektene. Ved å måle opp gangvei til direktelyd og tidlige refleksjoner kan vi regne ut mulige kamfiltre og se nivåvariasjonene matcher eventuelle kamfiltre. Får vi dårlig match er det tegn til at variasjonene i stedet skyldes rommoder.

Samme frekvensrespons som i figur 54 er vist med lineær frekvensakse i figur 55. I figur 55 ser vi lik avstand mellom topper og dipper ved høye frekvenser som indikere et kamfilter. Vi kan i figur 52 se at det kommer en ganske sterk refleksjon rett etter direktelyden (som er ca. 7 dB svakere enn direktelyden, basert på bredbåndet spekter) som kan være årsak til dette kamfilter. Ved å se på tidsforsinkelse mellom de to lydbidragene i tidsresponsen (figur 52) og avstand mellom topper i frekvensresponsen kan vi sjekke om «mistenkt» refleksjon er årsak til kamfilter i frekvensresponsen. Å måle på én høyttaler av gangen vil gjøre det lettere å finne forklaringer til kamfiltre, fordi lyd fra mer enn én høyttaler vil gi kamfilter mellom direktelydbølgene fra høyttalerne.



Figur 54: Målt frekvensrespons med logaritmisk frekvensakse (Hz) og nivå (dB).

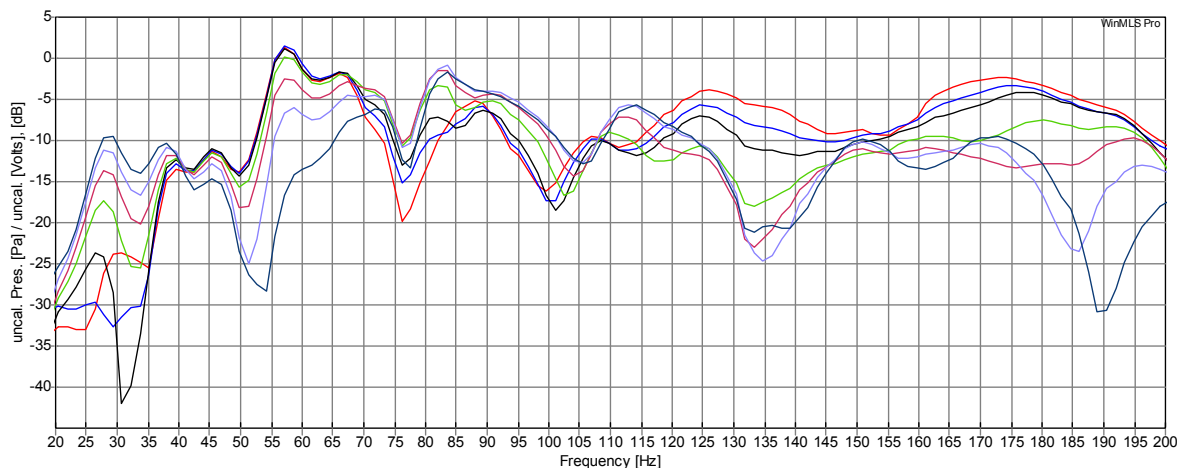


Figur 55: Målt frekvensrespons med lineær frekvensakse (Hz) og nivå (dB).

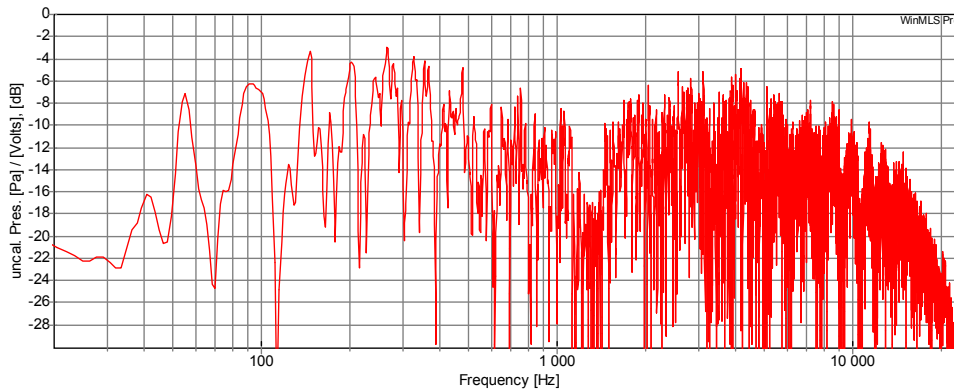
For undersøkelse av rommoder vil det være aktuelt å måle med høyttalere hver for seg og med lyd fra begge høyttalere det skal panoreres i mellom, se delkapittel 3.1.7.1 for detaljer. Ved å måle stegvis langs lengde-, bredde- og høyderetning til rommet kan vi undersøke ved hvilke frekvenser nivået forandrer seg langs de aksielle retningene til rommet. Figur 56 viser frekvensresponser målt med mikrofon plassert langs rommets lengderetning, med 30 cm avstand mellom hver mikrofonposisjon (målinger stegvis bakover i rommet). Vi ser store variasjoner i nivå ved frekvensene cirka lik 28, 56, 84 og 135 Hz. Disse frekvensene passer godt med en stående bølge med grunnharmoniske frekvens lik 28 Hz. Ved oppmåling av rommet er lengden på rommet lik 6,25 m. Dette gir teoretisk sett aksielle moder i lengderetningen med grunnfrekvens lik 27 Hz. Siden dette passer veldig godt overens, kan vi være rimelig trygge på at nivåvariasjoner ved disse frekvensene skyldes stående aksielle bølger mellom endeveggene i rommet. Å øke absorpsjonen på disse endeveggene kan bidra til å jevne ut og forbedre nivåene ved disse frekvensene. Slik absorpsjon kan også settes inn i rommet midlertidig som en del av diagnostiseringen av rommet, bare vi får inn nok absorpsjon til å kunne få en betydelig akustisk forskjell. Som en tommelfingerregel sies det at 20 % av aktuelle flater må dempes effektivt for å få en betydelig forskjell (Newell, 2011).

Frekvensresponsene vist i figur 54–56 er med en viss utglating av frekvensrespons-kurven. Figur 54 og 55 har en oppløsning på 1/9 oktav, mens figur 56 har en oppløsning på 1/24 oktav for å få med detaljene til nivåvariasjonene i bassen (20–200 Hz). For en oppløsning på 1/24 oktav blir det regnet ut et gjennomsnittlig nivå innen for hver 1/24 oktav (som gir oss 24 punkter innenfor én oktav). Figur 57 viser samme frekvensrespons som i figur 54, men uten noe utglating. Vi ser at

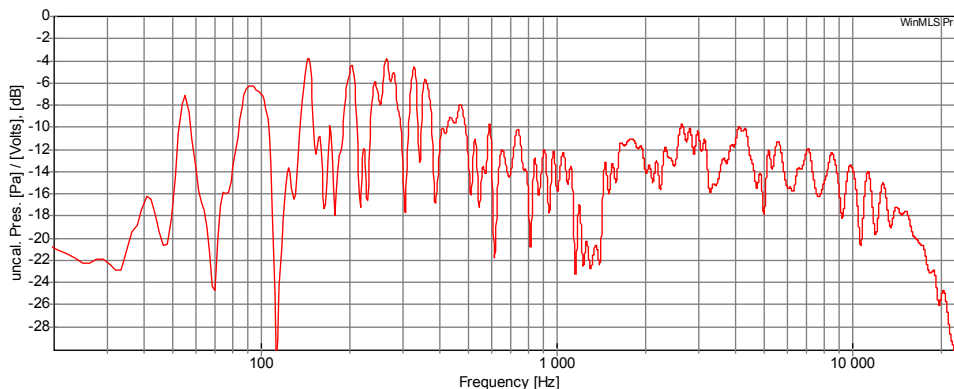
detaljene i frekvensresponsen øker etter hvert som frekvensen øker, når vi ser det på logaritmisk frekvensakse. Figur 58 og 59 viser samme frekvensrespons med henholdsvis 1/24 og 1/3 oktav utglating. Ofte er en utglating med oppløsning 1/3 eventuelt 1/6 sett på som relevant i forhold til opplevde forhold siden dette tilsvarer ørets kritiske båndbredde (gjør det mulig å «se skogen for bare trær»). En slik 1/3 og 1/6 kan være nyttig for en overordnet sjekk og for å se de store trendene mens 1/24 oktav alltid bør også finnes for å ikke gå glipp av visse uheldige detaljer i responsen og bedre mulighet for stille en «akustisk diagnose» for rommet (som å lettere oppdage kamfiltre).



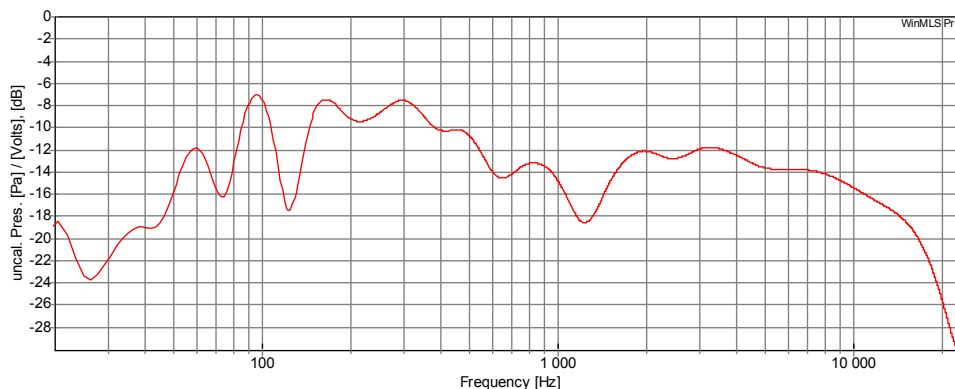
Figur 56: Frekvensrespons målt med mikrofon stegvis, 30 cm avstand, i lengderetning til rom, med lineær frekvensakse.



Figur 57: Frekvensrespons uten noe utglating.



Figur 58: Frekvensrespons med 1/24 oktav utglating.

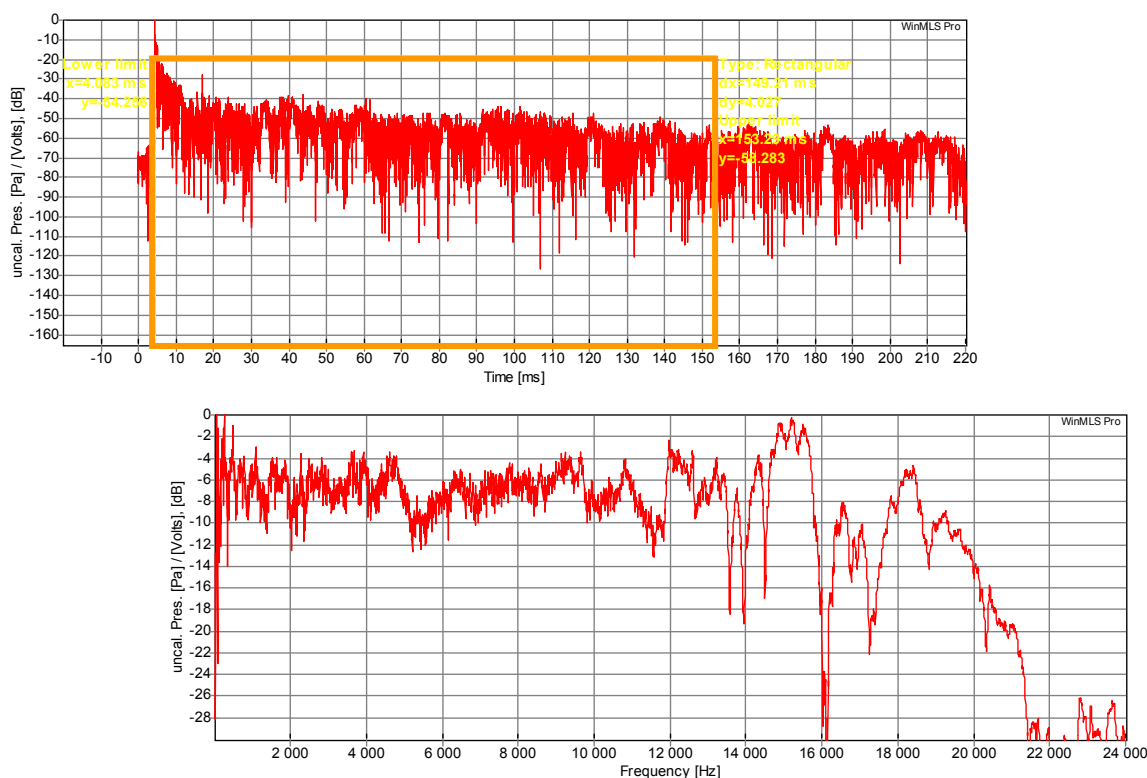


Figur 59: Frekvensrespons med 1/3 oktav utglatting.

5.3.9.1 Tidsvindu

Med et tidsvindu kan vi velge hvilken del av responsen som skal være grunnlaget for frekvens- og faseresponsen. Tidsvindu kan også brukes til isolert sett å studere direktelyd, tidlige refleksjoner, etterklangen eller bakgrunnsstøyen i rommet. For eksempel kan frekvensresponsen til rommets sene akustiske respons eller bakgrunnsstøyen i rommet på denne måten lett studeres. Korte tidsvinduer gir dårlig oppløsning i frekvens, spesielt i bassen. Vi må observere lyd over litt tid for å kunne bestemme frekvensinnhold med høy nøyaktighet. Dette fører til at vi ikke vil være i stand til fullstendig å isolere for eksempel direktelyden fra tidlige refleksjoner. Dersom tidsresponsen blir for kort, blir frekvensoppløsningen for dårlig.

Figur 60 viser et langt rektangulært tidsvindu på målt impulsrespons og resulterende frekvensrespons. Rektangulær form betyr at hele responsen innenfor vinduet blir vektlagt likt. Figur 61 viser et kort tidsvindu på sammen målte impulsrespons og resulterende frekvensrespons. Vi ser fra figur 60 og 61 at et kort tidsvindu gir oss færre punkter på frekvensresponskurven.

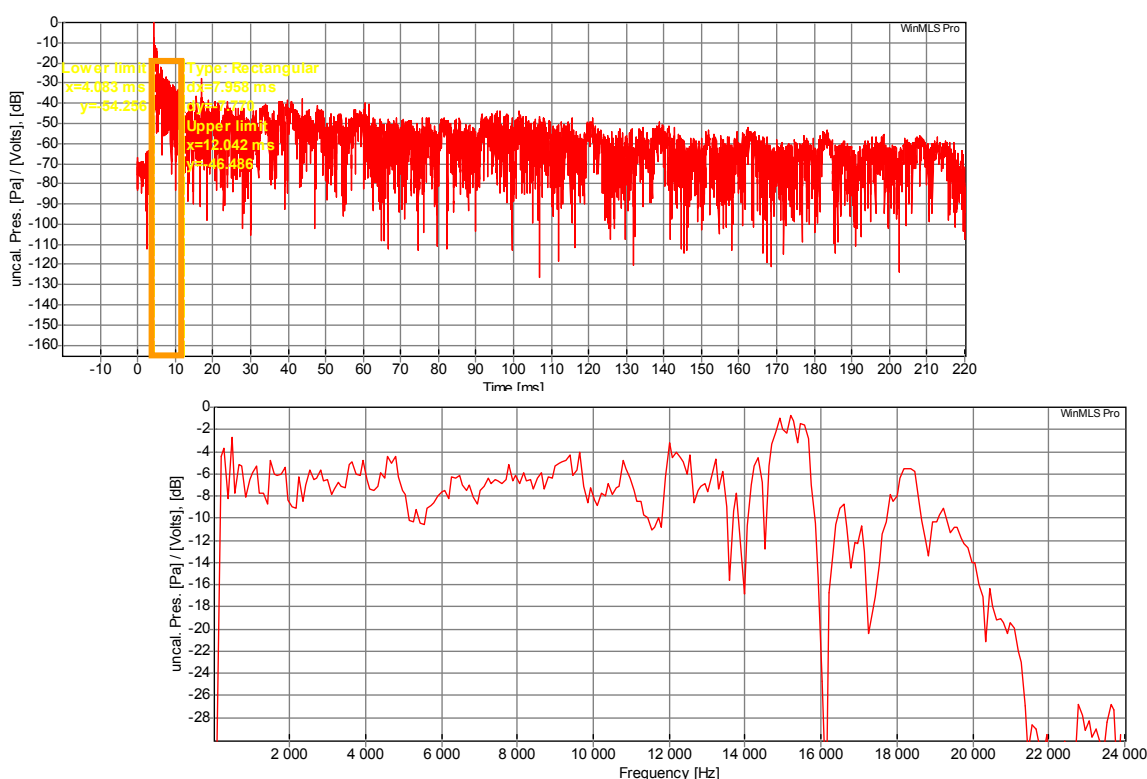


Figur 60: Langt rektangulært tidsvindu og resulterende frekvensrespons.

Figur 62 viser resulterende frekvensrespons med et kort tidsvindu, men her med en halv cosinusform (kalt Hanning) på tidsvinduet som vektlegger første del av tidsvinduet mer enn siste del innenfor tidsvinduet. Dette er en måte for eksempel å gi prioritet til direktelyd.

Frekvensresponsene i figur 60 og 61 har lineær frekvensakse og vi ser at punktene på frekvensresponskurven fordeler seg jevnt i frekvens. På en logaritmisk akse vil det bety at det er lengst avstand mellom punktene i frekvensresponskurven i bassen. I figur 62 er frekvensresponsen vist med en logaritmisk frekvensakse og det er lett å se at frekvensresponskurven er mindre detaljer ned mot 100 Hz. Det korte tidsvinduet gir oss dårligst oppløsning i bassen.

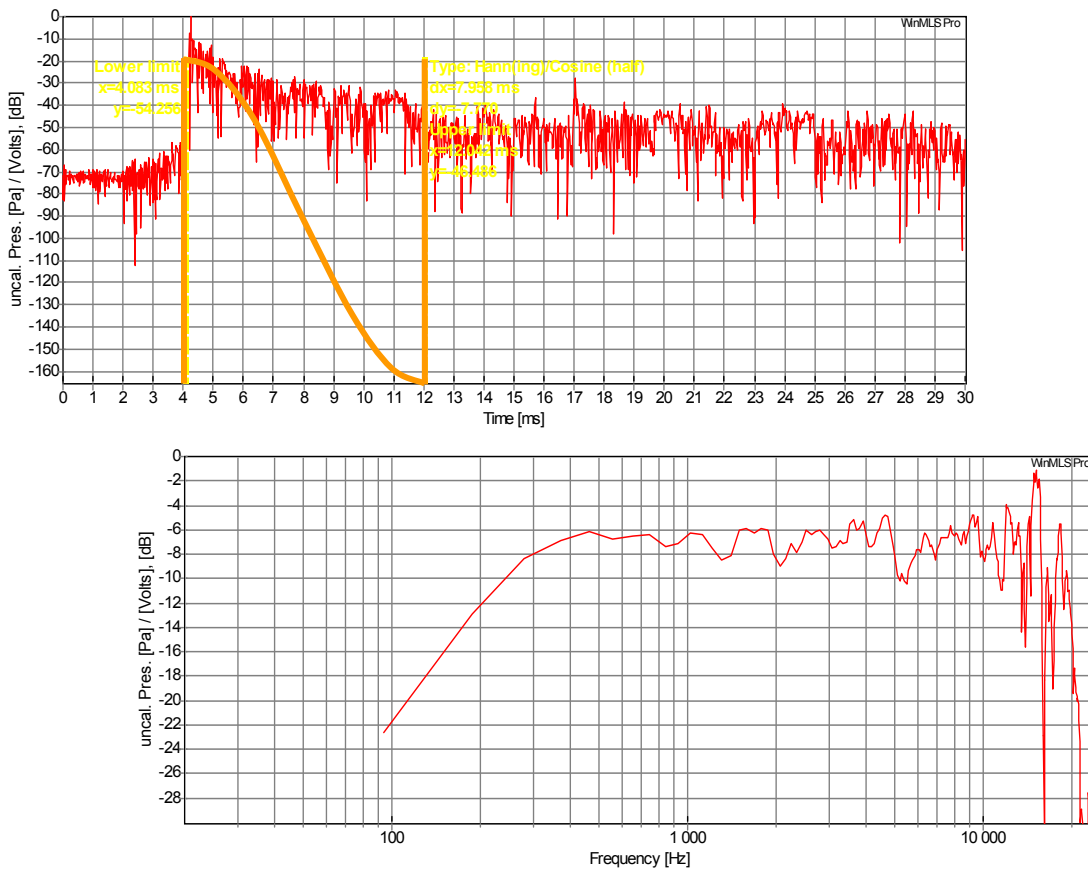
Det finnes en rekke ulike former på tidsvindu, som Hanning, Blackman-Harris, Kaiser-Bessel med mer. De ulike vindusfunksjonene vektlegger responsen ulikt innenfor tidsvinduet og vil gi oss noe variasjon i utregnet frekvensrespons innenfor tidsvinduet.



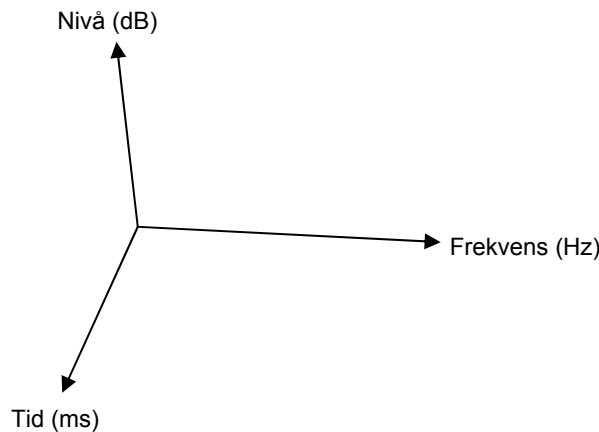
Figur 61: Kort rektangulært tidsvindu og resulterende frekvensrespons.

5.3.10 Waterfall/fosseplot

Et waterfallplot eller fosseplot viser nivået ved ulike frekvenser som funksjon av tiden. Dette gir oss frekvensresponsen til lyden til de ulike delene av tidsresponsen til systemet som er målt. Som regel er frekvens langs x-aksen, tid langs y-aksen og nivå langs z-aksen som vist i figur 63. For å få en frekvensrespons med nødvendig oppløsning vil vi lage fosseplot ved å ha et glidende tidsvindu, hvor vinduet start først i ekkogrammet for den første frekvensresponsen (gjerne tegnet bakerst), og så settes tidsvinduet et visst steg fram i tid for utregning av neste frekvensrespons. Vi får da en kjede av frekvensrespons som gir en tredimensjonal flate/kontur.

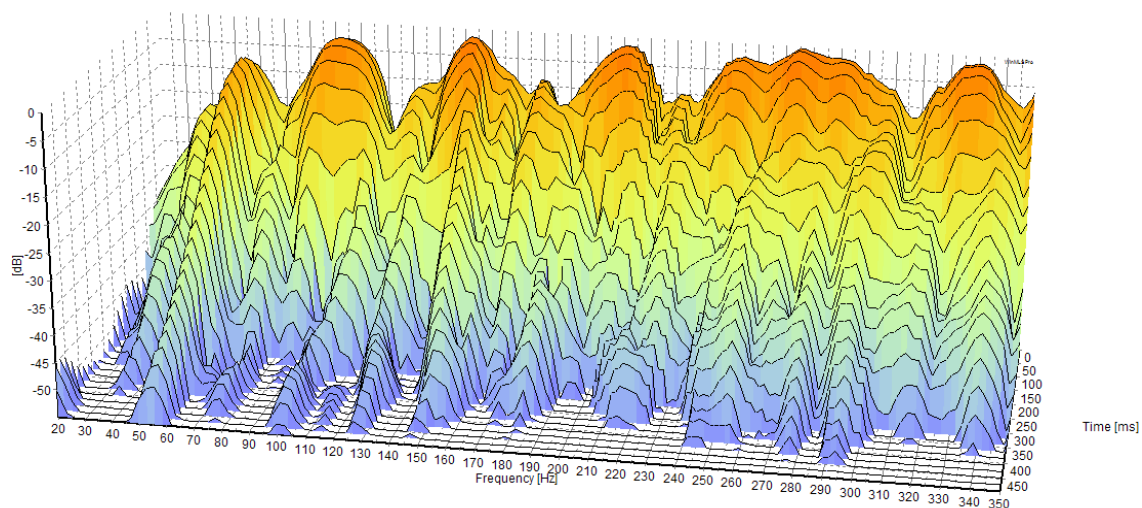


Figur 62: Kort tidsvindu med halv cosinus (Hanning-form) og resulterende frekvensrespons.

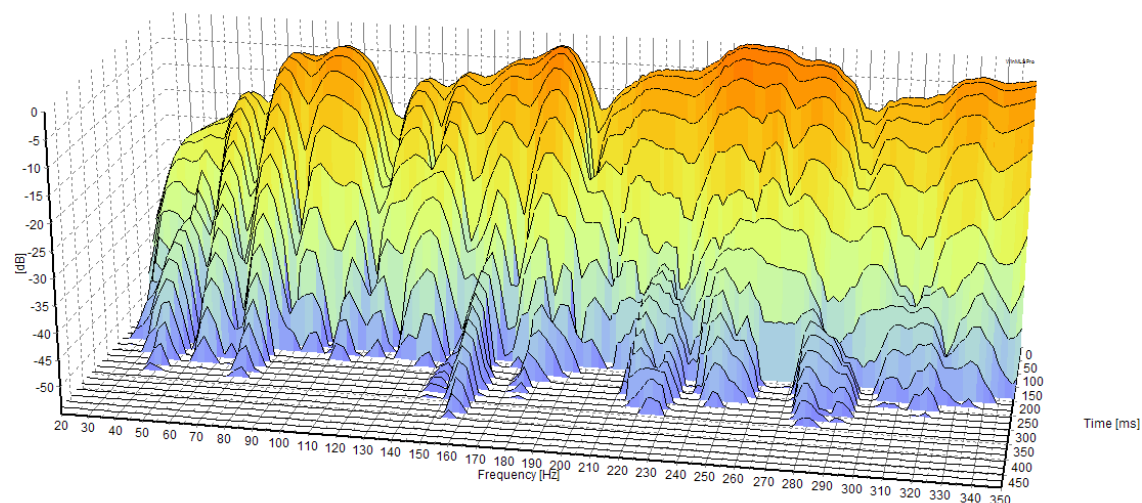


Figur 63: Akser i et waterfall-plot.

Figur 64 og 65 viser fosseplot i en lytteposisjon før og etter akustiske tiltak. Før tiltak (figur 64) resonerer rommet ved bestemte frekvenser på grunn av stående bølger. Etter tiltak i rommet er mange av de stående bølgene dempet ned, de faller raskere i nivå. Neddemping av modene fører til en jevnere frekvensrespons og bedre definisjon på lyden. Fosseplot vil være nyttig for å skille interferens fra stående bølger. Skyldes store nivåvariasjoner stående bølger bør vi se tegn til etterheng av nivå i tid ved aktuelle resonansfrekvenser. Om vi er plassert i noden til rommoden vil vi ikke få noe etterheng på i tid med høyt nivå ved aktuell frekvens. Ved å flytte mikrofon til forventet antinode kan vi se om vi her får etterheng i tid med betydelig nivå.



Figur 64: Fosseplot i lytteposisjon før akustiske tiltak.



Figur 65: Fosseplot etter akustiske tiltak.

5.3.11 Eksempler på programvare

Programvare for impulsresponsmålinger er historisk sett basert på et målesystem med dedikert hardware og software. I nyere tid er det kommet målesystemer som er basert på bruk av et vilkårlig lydkort og PC/MAC. Mange av de tidligere variantene var designet kun for PC (som for simulering av lyd i rom), mens nyere programmer finnes på flere plattformer eller er JAVA-basert. Noen av de mest brukte målesystemene er:

- SMAART (PC og MAC)
- Easera (Utviklet av Ahnert Feistel Media Group – samme som EASE, kun PC)
- WinMLS (kun PC)
- Arta (kun PC)
- MLSSA (Uttales «Melissa», MLS-basert – de første som kom med MLS målesystem)
- RoomEQ Wizard (gratis, JAVA-basert – PC, MAC, UNIX)
- TEF (kun hardware, det første systemet som gjorde TDS mulig)
- SIM (Meyer Sound, kun hardware)

6 AURALISERING AV ET ROMS AKUSTISKE RESPONS

Å *auralisere* stammer fra (eller er inspirert av) ordet å visualisere. Dersom vi har målt impulsresponsen kan vi bruke denne responsen til å lytte på responsen med selvvalgt lydmateriale. Å lytte til impulsresponsen alene vil ikke være så informativt. Lydmaterialet som benyttes må være helt fri for romrespons, «tørt», dersom vi kun skal høre aktuelt roms respons (og ikke en kombinasjon av rommet anvendt i lydmaterialet og rommet vi vil lytte på). Helt «tørt» lydmateriale vil være basert på opptak i ekkofritt rom (fulldempet studio). Eventuelt kan nærmik'ede opptak fungere rimelig greit, men ofte får vi litt av rommets respons uansett hvor nær vi mikker opp, spesielt i bassen (hvor mikrofonen er mer omnidireksjonell).

For å legge rommets impulsrespons opp det «tørre» lydmaterialet vi har valgt oss må impulsrespons og lydmaterialet *konvolveres* (*foldes*) med hverandre. Det finnes gratis verktøy som lar deg konvolvere en målt impulsrespons med valgt lyd-/musikklipp. GratisVolver er et slikt gratis verktøy for PC. Systemer som Altiverb er også basert på en slik konvolusjonsteknikk.

7 ROMAKUSTISKE PARAMETRE

Ut fra et målt ekkogram/reflektrogram vil det være mulig å beregne visse størrelser som har en ettallsverdi som er lett å forholde seg til. Et ekkogram vil alltid være komplekst og kan ikke i seg selv lett reduseres til ett enkelt tall. Målbare størrelser basert på ekkogrammet kalles romakustiske parametere. Disse parameterne har som mål å samsvare med visse aspekter av vår lydopplevelse. Parameterne er en forenkling av virkeligheten og er best egnet til å gjøre en «grovsjekk» av forholdene og sammenlikne ulike forhold opp mot hverandre. Slike parametere vil også være godt egnet for å definere juridisk forpliktende mål for et rom, for eksempel maksimalt tillatt etterklangstid i klasserom. Vidt forskjellige rom med vidt forskjellige lytteropplevelser kan ha like verdier for de romakustiske parameterne. Mye av forklaringen bak dette er at retning og tidsmessig oppbygging til refleksjonene fra rommet blir fullstendig ignorert i de mest vanlige romakustiske parameterne. At lydtkilder i praksis ikke er impulsive lydtkilder, som er bakgrunn for rommets ekkogram, er en annen forklaringer. Romakustiske parameter er nyttige for å gi et overblikk over forhold og så kan man gå mer i detalj i ekkogrammet og geometrien til rommet eller lytte i rommet under aktuell bruk for videre «diagnostisering».

Når vi er innenfor anbefalte områder for disse grove akustiske målene vil ikke de akustiske målene lenger ha noen betydelig relevans for opplevde forhold. Slike akustiske mål er derfor best egnet for å unngå ekstremt dårlige forhold (som man dog gjerne kan oppdage uten å gjøre noen målinger med gode ører litt forståelse for effekter i romakustikk...).

De mest kjente og etablerte romakustiske parameterne har som mål å vurdere opplevd etterklang i rommet (T , EDT), total akustisk forsterking av rommet (G) og tydelighet (D_c , C_7 , C_{80} , D_{50}). Disse parameterne vil vi ta for oss i detalj i de neste delkapitlene. Har vi målt impulsresponsen (ekkkogrammet) til rommet kan disse parameterne regnes ut, men det er kritisk at man gjør denne utregningen riktig, spesielt om det er mye bakgrunnsstøy mens man gjør målingene – det blir lett høye bakgrunnsstøynivå i bassen (ventilasjonsanlegg med mer). Det finnes målestandarder (ISO 3382-1) som beskriver hvordan impulsrespons skal finnes og hvordan disse parameterne skal regnes ut basert på målt impulsrespons.

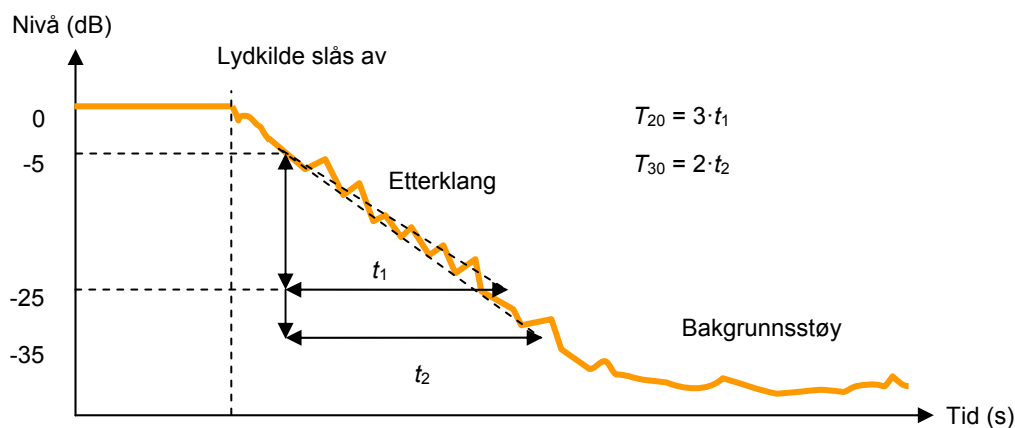
Ved hjelp av Sabines formel kan man anslå etterklangstiden (T) uten å måle. Det kan i mange tilfeller være ganske mange feilfaktorer ved bruk av Sabines formel, som direktivitet til høyttaler, hvor jevnt lydabsorpsjonen er fordelt i rommet, rommets geometri med mer. Derfor vil vi ofte forsøke å gjøre mer detaljert romakustisk simulering (kapittel 9) eller gjøre måling i stedet for å bruke Sabines formel.

7.1 Etterklangstid, T (T_{60} , T_{30} og T_{20})

7.1.1 Måling av etterklangstid

Etterklangstid er tenkt å være en egenskap til rommet alene. Den reflekterte lyden er derfor grunnlaget for å måle etterklangstid. Figur 66 viser måling av etterklangstid etter tradisjonell metode hvor rosa støy sendes ut av høyttaler og nivåfall etter at lydtkilden er slått av logges i forhold til tid, for eksempel med en RTA (Real Time Analyser). Som regel har vi mest bakgrunnsstøy i bassen og rosa støy passer dermed bra som målesignal. Ved måling av etterklangstid er det ofte vanskelig å måle et 60 dB fall i nivå før man når bakgrunnsstøynivået

innenfor alle relevante frekvenser (typisk oktavbånd 125 til 4000 Hz). Vi måler i stedet hvor raskt nivåfallet er innenfor et fall på 20 eller 30 dB og ganger tida vi oppnår med 3 eller 2 henholdsvis, antatt at nivået faller like hurtig for de resterende 40 eller 30 dB. Utrechnet etterklangstid har da betegnelsene T_{20} eller T_{30} for å indikere hvilket nivåfall det er målt innenfor, men oppgitt verdi tilsvarer 60 dB fall. Med intensjonen om å måle nivåfallet til den reflekterte lyden i rommet, starter «stoppeklokka» for å måle nivåfallet først etter at totalnivået har falt 5 dB for å ekskludere nivåfallet vi får når vi mister direktelyden. Observert nivåfall for T_{20} og T_{30} blir dermed fra -5 til -25 og -5 til -35 dB (med 0 dB tilsvarende totalnivå med lydkilden på i rommet).

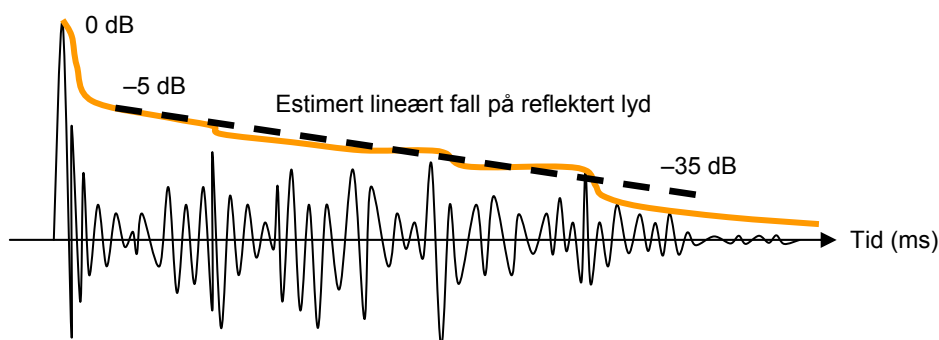


Figur 66: Måling av etterklangstid etter tradisjonell støybasert metode.

Etterklangstiden er avhengig av hvor raskt nivået til total reflektert lyd faller som funksjon av tiden. Nivåfallet vil sjelden representere en rett linje, så sant vi ikke har et rom med svært høy grad av diffusjon. Vi vil derfor trenge å finne en linje som passer best med nivåfallet. I figur 66 er det vist en stiplet linje som går fra -5 dB til -25 dB og fra -5 til -35 dB. De stiplede linjene er det lineære fallet i nivå som passer best med faktisk nivåfall. I de fleste tilfeller finnes den kurven automatisk i måleprogrammet. Ved å gange resulterende tider med henholdsvis 3 og 2 får vi verdiene for T_{20} og T_{30} . Som vi ser fra figur 66 er ikke de to stiplede kurvene like bratte. Dette er fordi lydfeltet i rommet ikke er fullstendig diffust og nivået faller ikke like raskt gjennom hele etterklangsforløpet (når rommet tømmes for reflektert lyd). Liten forskjell mellom utregnet T_{20} og T_{30} vil indikere et diffust lydfelt, og indikerer også at målte verdier er rimelig pålitelige. Har vi mye bakgrunnsstøy er det ikke sikkert vi kan observere mer enn -25 dB punktet på Schroederkurven før vi får problem med usikkerhet på grunn av bakgrunnsstøy. Vi vil i dette tilfellet ikke være i stand til å regne ut T_{30} eller verdiene for T_{30} vil være høyst tvilsomme. I hvilken grad måleprogrammet varsler om dette varierer mellom de ulike måleprogram som er tilgjengelig.

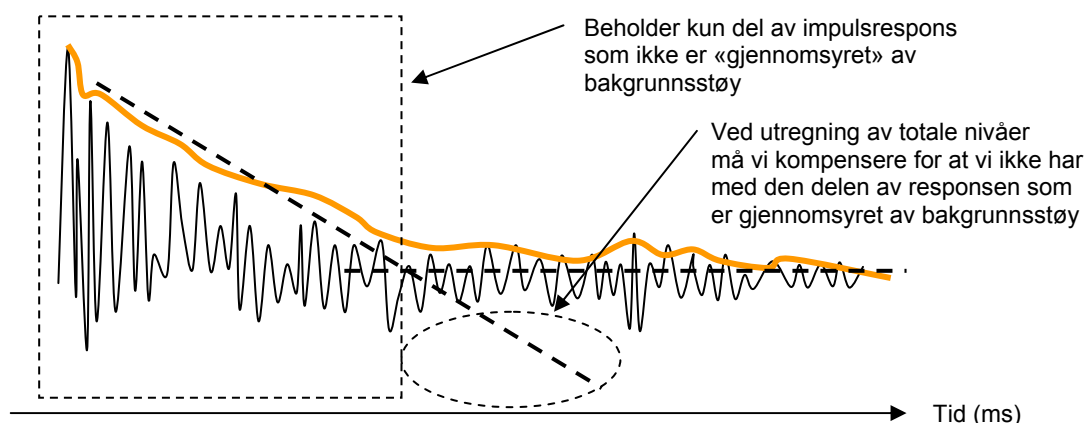
Som nevnt er det for utregning av etterklangstid antatt at totalnivået faller mindre enn 5 dB i det direktelyden forsvinner i mottakerposisjonen. Dersom direktelyden er betydelig i forhold til reflektert lyd vil nivået kunne falle mer enn 5 dB i det vi mister direktelyd. Utrechnet linje for nivåfall vil da inkludere direktelyden, ikke kun reflektert lyd som er intensjonen for etterklangstid. For rene romakustiske målinger er det derfor krav til at det brukes en lydkilde (og mikrofon) som er mest mulig omnidireksjonell. Dette bidrar til at nivåbalansen mellom direktelyd og total reflektert lyd ikke blir for høy. Det er vanlig å bruke en såkalt «dodec» som lydkilde. Det vil si en høyttaler bestående av 12 høyttalerelementer som danner en kuleform, eller mer eksakt et dodekahedron som er en generell betegnelse på en 12-sidet 3-dimensjonell flate. Dersom vi måler etterklangstid ved å bruke et lydsystem som er veldig direktivt, kan målte etterklangsverdier være misvisende lave.

For utregning av etterklangstid basert på målt impulsrespons i rommet må vi først beregne den såkalte Schroederkurven. Schroederkurven er basert på baklengs summering av impulsresponsen og vil representere hvordan lyden i rommet «tømmes» for lyd når en lydkilde som har stått på lenge med konstant nivå blir slått av. Ut fra Schroeder-kurven kan vi se hvor betydningsfull direktelyden er på totalt lydnivå i tillegg til å beregne etterklangstiden. Etter å ha funnet Schroeder-kurven kan etterklangstiden regnes ut med samme metode som for den støybasert metoden vist i figur 66. Figur 67 viser målt impulsrespons med lineær vertikalt skala (ikke dB-nivå) og utregnet Schroederkurve (heltrukken tykk linje).



Figur 67: Schroederkurve og måling av etterklangstid basert på målt impulsrespons.

Grunnen til at vi ikke finner -60 dB-punktet på Schroeder-kurven vist i figur 67 er på grunn av bakgrunnsstøy. Figur 68 viser et større tidsutsnitt av impulsresponsen vist i figur 67, denne gang med nivå (dB-verdi) vertikalt. Impulsresponsen med dB-skala vertikalt er det samme som ekkogrammet/reflektogrammet. Etter hvert som refleksjonene fra rommet blir svakere og svakere (på grunn av avstandsloven og absorpsjon) vil refleksjonene drukne i bakgrunnsstøy. Dersom vi tar med bakgrunnsstøyen ved utregning av Schroederkurven vil vi få en misvisende Schroeder-kurve med feil resultat for etterklangstiden. Måten dette håndteres på i måleprogrammer varierer og fører til at de forskjellige måleprogrammene ofte gir forskjellig noe svar for T_{30} og T_{20} selv om de regnet ut basert på eksakt samme målte impulsrespons (spesielt under 500 Hz hvor bakgrunnsstøynivået ofte er høyt).



Figur 68: Målt ekkogram med bakgrunnsstøy.

For å regne ut riktig etterklangstid (og verdi på andre akustiske parametere som inkluderer den sene akustiske responsen i rommet) må vi kappe av impulsresponsen i det bakgrunnsstøyen starter å få innflytelse. Vi må også estimere hvor mye lydenergi vi har gått glipp av ved å gjøre denne avkappingen. Vi ønsker med andre ord å kunne finne rommets akustiske respons uten

bakgrunnsstøy. Denne prosessen er omtalt som «truncation and compensation» på engelsk. I figur 68 er det vist en stiplet firkant som viser den delen av impulsresponsen som ikke er betydelig forstyrret av bakgrunnsstøy. Den akustiske responsen fra rommet vil følge den stiplede linjen nedover i figuren, mens bakgrunnsstøyen ligger på et rimelig konstant nivå hele tiden. For målinger med mye bakgrunnsstøy blir utregnede verdier veldig usikre siden vi kun klarer å observere en liten del av etterklangsforløpet til rommet.

Det er nyttig å være klar over at nivåfallene vist i figur 66–68 er et resultat av å ha slått av en lydkilde som har bidratt til et konstant lydnivå over lengre tid før den blir slått av. For musikk eller tale vil lydnivået fra kilden variere mye over tid; vi vil stadig få ny direktelyd fra kilden som kan maskere tidlige refleksjoner eller etterklangen. Vi kan si at Schroederkurven vil være mer relevant for å beskrive hvordan den totale lyden i rommet oppfører seg ren objektivt, mer enn å beskrive vår opplevelse av etterklangen i rommet.

7.1.2 Måling av etterklangstid og sammenlikning opp mot Sabines formel

For å gjøre en sammenlikning mellom målt etterklangstid og beregnet etterklangstid ut fra Sabines formel (beskrevet i delkapittel 4.2.1), ble en impulsiv lyd laget inne i en gangtunnel, se figur 69. En gangtunnel må sies å være et av de minst gunstige akustiske rommene for bruk av Sabines formel. Så en slik test kan være egnet til å demonstrere hvor store avvik vi kan få mellom målt og beregnet etterklangstid i ekstreme tilfeller. I en gangtunnel vil lydfeltet bli veldig lite diffust siden vi får veldig mye reflektert lyd sideveis og vertikalt, mens all lyden forsvinner ut av gangtunnel i lengderetning. At lyden forsvinner ut tilsvarer at gangtunnelen så å si har endevegger som er 100 % lydabsorberende ($\alpha = 1$).



Figur 69: Gangtunnel hvor det ble undersøkt etterklang.

Vi forsøker først å anslå etterklangstiden ved bruk av Sabines formel. Anslåtte mål og lydabsorberende egenskaper til gangtunnelen som vil være relevant for bruk av Sabines formel:

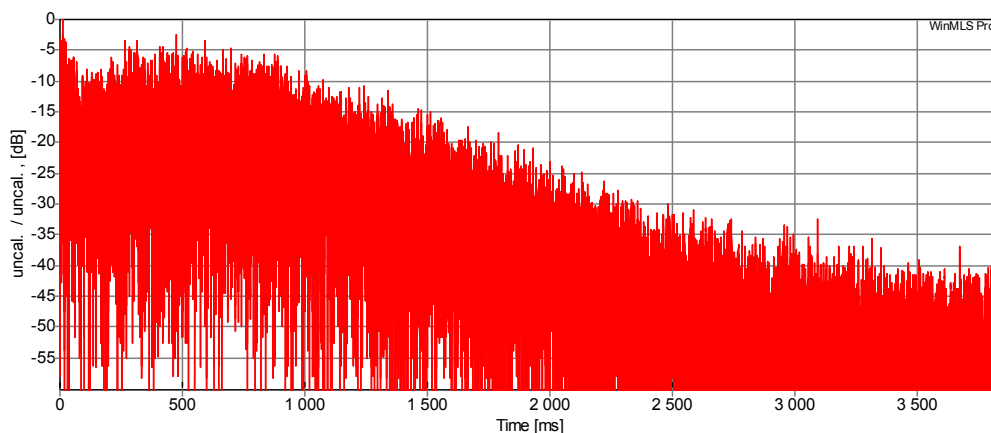
$$\text{Volum } V = 10 \cdot 3 \cdot 3 = 90 \text{ m}^3.$$

$$\text{Totalt areal for de to åpningene: } S = 2 \cdot 3 \cdot 3 = 18 \text{ m}^2 \text{ (9 m}^2 \text{ i hver ende).}$$

Absorpsjonsareal til de to åpningene: $A = S \cdot \alpha = 18 \cdot 1 = 18 \text{ Sa}$.

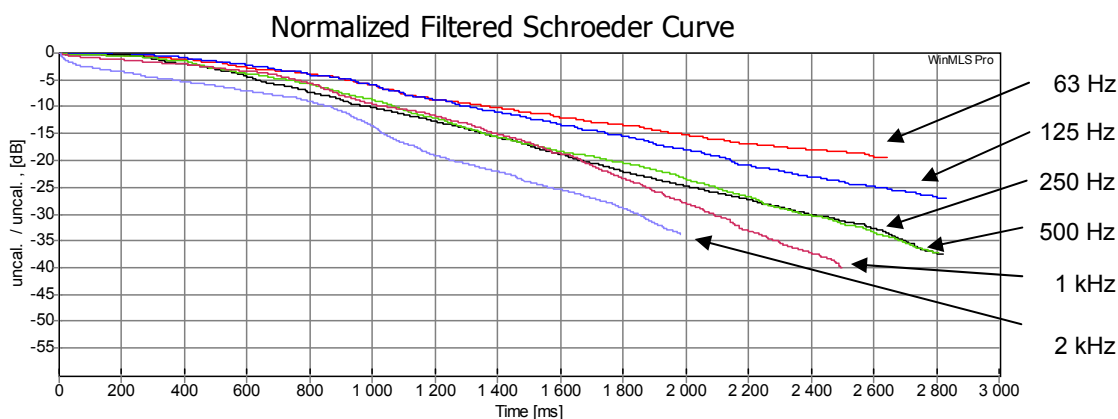
Dersom vi regner de harde veggene som fullreflekterende, $\alpha = 0$, har vi de tallene vi trenger for å bruke Sabines formel: $T_{60} = 0,161 \cdot V/A = 0,161 \cdot 90/18 = 0,81 \text{ s}$.

For enkelt å lage en impulsrespons for gangtunnelen ble det hoppet hardt ned i betongen inne i gangtunnelen og lyden av dette ble tatt opp. Det er en tilnærmet impulsiv lyd. Figur 70 viser resulterende ekkogram for gangtunnelen som resultat av denne «impulsen», med lydnivå (dB) langs den vertikale akse.



Figur 70: Ekkogram til gangtunnel basert på hardt tramp inne i tunnelen.

Figur 71 viser utregnede Schroederkurver innenfor oktavbåndene 63 til 2000 Hz, basert på ekkogrammet vist i figur 70. Alle Schroederkurvene strekker seg ned til minst -35 dB for oktavbåndene 250, 500 og 1000 Hz. Dette gjør det mulig å regne ut T_{30} . For de andre oktavbåndene er bakgrunnsstøyen (sett i forhold til lydnivået fra trampet) høyere og kun T_{20} er mulig å regne ut for oktavbåndene 125 og 2000 Hz. For oktavbåndet 63 Hz er lydnivået fra trampet så svakt i forhold til bakgrunnsstøyen at det vil være vanskelig å regne ut en pålitelig verdi for etterklangstiden.



Figur 71: Schroederkurver innenfor ulike oktavbånd ut fra målt ekkogram i gangtunnel.

Tabell 3 viser resultatet for utregnet etterklangstid basert på Sabines formel og utregnet T_{30} og T_{20} . Verdier for T_{30} og T_{20} i kursiv er av måleprogrammet (WinMLS) regnet som ikke pålitelige på grunn av for mye bakgrunnsstøy. Aller først legger vi merke til at vi bommet ganske kraftig i vårt anslag av etterklangstid i gangtunnelen basert på Sabines formel. Grunnen til dette er at Sabines formel antar

at lydfeltet er helt diffust og at lydabsorpsjonen er jevnt fordelt i hele rommet. Dette er ikke tilfelle i gangtunnelen; noen flater er fullt absorberende, mens de andre flatene er fullt reflekterende. Vi får kraftig etterklang mellom de harde parallelle flatene og de reflekterte lydbølgene blir i liten grad diffusert vekk fra denne parallelle lydveien. Dette blir ikke «oppdaget» ved å bruke Sabines formel og bruk av Sabines formel gir et veldig misvisende resultat.

Tabell 3: Beregnet og målt etterklangtid i gangtunnelen innenfor ulike oktavbånd.

Oktavbånd (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
T_{60} beregnet (s)	0,81 s					
T_{30} målt (s)	7,40 s	5,11 s	4,19 s	3,99 s	3,11 s	3,23 s
T_{20} målt (s)	7,40 s	5,01 s	4,19 s	4,11 s	3,54 s	3,23 s

Vi ser også fra tabell 3 at vi får ulik resultat for målt etterklangtid i tunnel basert på om vi regner ut T_{30} og T_{20} , spesielt for oktavbåndene 125, 500 og 1000 Hz. Dette skyldes at Schroederkurvene ikke er helt lineære på grunn av lav grad av diffusjon (et fullstendig diffust lydfelt gir helt lineært nivåfall). Vi ser at selv målte verdier har usikkerhet knyttet til seg, både på grunn av bakgrunnsstøy og ikke-lineært nivåfall.

Vi vil ha noe diffusjon og absorpsjon i tunnelen:

- Lavere etterklang ved høyere frekvens på grunn av en viss diffusering (spredning) av lyden. Veggene består av små runde steiner, med typisk høydevariasjon lik 1 cm. En dybdevariasjon på 1 cm vil teoretisk sett gi oss betydelige diffusjon for bølgelengder mindre enn 4 cm. Dette tilsvarer lyd med frekvens over ca. 10.000 Hz eller mer nøyaktig: $f = c/\lambda = 343/0,04 = 8575$ Hz (Se delkapittel 8.2 for anslag av ved hvilke frekvenser en overflate vil være diffuserende). Dette er en frekvens godt over det øverste oktavbåndet i tabell 3 (2 kHz) og kan nok til en viss grad forklare lavere etterklangtid med økende frekvens.
- Luftabsorpsjon begynner å bli betydelig ved 1 kHz. Dette vil føre til kortere etterklangtid over 1 kHz, noe vi ser i tabell 3. Vi ser et ganske betydelig redusert etterklangtid fra 500 til 1000 Hz, sammenliknet med reduksjonen fra 250 til 500 Hz.

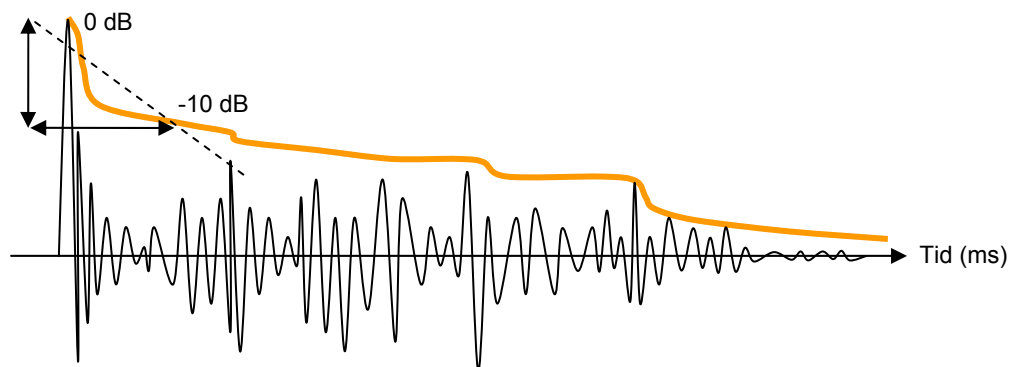
7.1.3 Oktavbåndsverdier

For å redusere informasjonsmengden ser vi som regel på summerte verdier innen for oktavbånd eller 1/3 oktavbånd. Det er viktig at oktavbåndsfiltrenging gjøres riktig med standardiserte filtre (6. ordens Butterworth-filtre i følge målestANDARDEN IEC 61260). Vi kan eventuelt også finne gjennomsnittlig verdi for alle frekvensbånd, men da vil vi ikke lenger ha noe informasjon knyttet til frekvens. Dette kan føre til i overkant reduksjon av informasjonen. Oftest vil vi ha oktavbåndsverdier for målt etterklangtid, eller 1/3 oktavbånds-verdier, men ofte er det oppgitt også gjennomsnittverdi over flere oktavbånd. For eksempel kan målt etterklangtid være gjennomsnittlig verdi for i de tre oktavbåndene 500, 1000 og 2000 Hz (ofte regnet som de tre viktigste oktavbåndene for tale tydelighet).

7.1.4 Tidlig etterklangtid, EDT

Utreget etterklangtid gir ofte dårlig samsvar med opplevd etterklang i musikken sjelden består av stasjonære lyd kilder (konstant lyden) som plutselig slås fullstendig av, som nevnt i delkapittel 7.1.1. EDT (Early Decay Time) ble designet for å forsøke å lage en parameter som samsvarer bedre med

opplevd etterklang i musikk. *EDT* er basert på utregnet Schroeder-kurve som for *T*, men etterklangstiden regnes ut fra det lineære fallet vi kan finne ut fra et nivåfall fra 0 til -10 dB på Schroeder-kurven. Dette betyr at direktelyden er inkludert i nivåfallet vi studerer for *EDT*. Oppgitt verdi tilsvarende tiden for 60 dB fall (definisjonen av etterklangstid). Figur 72 viser hvordan det lineære nivåfallet finnes for en målt impulsrespons. Metoden *EDT* regnes ut på er også blitt kritisert. Hvor bratt linjen blir fra 0 til -10 dB er veldig følsomt for hvor man detekterer at direktelyden faktisk dukker opp i impulsresponsen.



Figur 72: Utregning av *EDT*.

7.1.5 *EDT/T*

Forholdet mellom *EDT* og *T* (*RT*) er blitt foreslått som relevant for å vurdere i hvilken grad tidlige refleksjoner blir ledet mot publikumsarealet. Fra Barron (2005): "The mean *EDT/RT* ratio [of a specific hall] takes values between about 0.8 and 1.1; [and] it can be seen as a measure of the directedness of a design. If surfaces direct early reflections onto audience seating, this reduces the early decay time, giving a low value to the ratio. This is acceptable if the reverberation time is long, giving an *EDT* within the recommended range. On the other hand, there seems little virtue in having ratios which much exceed 1.0."

7.1.6 Bass Ratio (*BR*) og Treble Ratio (*TR*)

Bass Ratio evaluerer i hvilken grad rommet gir en farging av lyden i forhold til bassheving eller bassenking for etterklangen. *BR* er gitt som forholdet mellom etterklangstid i bassen sammenliknet med mellomtone, innenfor de fire oktavnåtene 125, 250, 500 og 1000 Hz, se likning (23). Dette forholdet oppgis som regel i prosent. Det finnes et tilsvarende forhold for evaluering av diskantheving eller diskantsenking på grunn av rommets respons, se likning (24).

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1k}} \quad (23)$$

$$TR = \frac{T_{2k} + T_{4k}}{T_{500} + T_{1k}} \quad (24)$$

7.1.7 Totalt lydnivå og akustisk forsterking, *G*

Ved å summere hele den akustiske impulsresponsen til rommet kan vi finne totalt lydnivå *L* (dBA, dBC) eller rommets akustiske forsterking *G* (Strength). Dette er forsøkt illustrert i figur 73. For å få målt riktig lydtryknivå må mikrofonen være kalibrert og for måling av *G* må hele målesystemet være kalibrert (se under). Forskjellen mellom totalt lydnivå *L* og *G* er at *G* skal kun representere

rommets akustiske forsterkning. For måling av G er det viktig at effekten av bakgrunnsstøyen elimineres (eller er tilstrekkelig lav innenfor alle interessante frekvenser). For måling av lydtryknivå L kan vi ofte være interessert i å inkludere bakgrunnsstøyen. Måler vi totalt lydnivå med tradisjonelle metoder (ikke impulsresponsmåling, se delkapittel 5.2) har vi ikke anledning til å eliminere bakgrunnsstøyen fra målingen i ettertid.



Figur 73: Utregning av totalt lydnivå eller G .

Ved utregning av G sammenliknes det målte totale nivået opp mot frittfelt direktelydnivå på 10 m avstand. G er også basert på en omnidireksjonell lydkilde. Dersom lydkilden har betydelig direktivitet vil vi måle lavere akustisk forsterkning til rommet. I et slikt tilfelle vil mindre lyd bli strålt ut totalt sett, mens direktelydnivået så å si vil være det samme uansett direktivitet. For å kunne måle G må vi dermed kalibrere målesystemet og finne direktelydnivået til omnidireksjonell høyttaler på 10 m avstand. Dette vil som oftest kreve at høyttaleren måles i en ekkofri lab (for å unngå forstyrrende refleksjoner i løpet av hele direktelydens varighet) og gain til ut- og innsignal i målesystem må overvåkes (ikke endres uten at man vet eksakt hvor mye) etter direktelydnivået er målt. Fordi det krever frakting av måleutstyr til nærmeste ekkofrie laboratorium og det må betales for leie av slik lab utelates det ofte å måle G . Vi går i et slikt tilfelle glipp av hvilke akustisk forsterkning av lydnivå som rommet bidrar med og vil kun være i stand til å anslå dette basert for eksempel på Barrons Revised Theory (se delkapittel 4.3).

Har vi klart å måle G kan vi også regne ut G innenfor bestemte tidsintervall, ved for eksempel i tillegg ha funnet C_{80} (se delkapittel 7.1.8) I et slikt tilfelle kan vi regne ut G_{early} (G_e) og G_{late} (G_l) som representerer nivået til akustisk respons som kommer før og etter 80 ms i ekkogrammet. Likning (25) og (26) viser formler for G_{early} og G_{late} basert på utregnet/målt G og C_{80} . NB! G_{early} vil her inkludere direktelyden, i motsetning til G_{early} fra Barrons Revised Theory. Dersom vi bruker C_7 eller D_{50} kan vi med tilsvarende formler finne G innenfor tidsrommene 0–7, 7–∞, 0–50 og 50–∞ ms.

$$G_{\text{early}} = G_{0-80} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{10^{C_{80}/10} \cdot 10^{G/10}}{1 + 10^{C_{80}/10}} \right) = G + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{10^{C_{80}/10}}{1 + 10^{C_{80}/10}} \right) \quad (25)$$

$$G_{\text{late}} = G_{80-\infty} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{10^{G/10}}{1 + 10^{C_{80}/10}} \right) = G + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{1 + 10^{C_{80}/10}} \right) \quad (26)$$

7.1.8 Tidsmessig tydelighet

Det finnes akustiske parametere som er ment å vurdere hvor tydelig eller klart lydbilde en gitt impulsrespons/ekkoogram representerer. Disse parametere sammenlikner energien i ekkogrammet før og etter en gitt tidsgrense. Vanlige tidsgrenser er 7, 50 og 80 ms, se figur 74. Dersom tidsgrensen er 7 ms vil all akustisk energi som kommer 7 ms etter ankomsten av direktelyden

regnes som negative bidragsyttere til opplevd tydelighet. Med en tidsgrense på 50 ms vil tidlige refleksjoner regnes som gunstige i forhold til tydelighet.



Figur 74: Inndeling av impulsresponsen i to deler for vurdering av tidsmessig tydelighet.

Parameterne for tidsmessig tydelighet betegnes enten med C (for clarity) eller D (for deutlichkeit). Vanlige versjoner av parameterne er C_{80} , D_{50} og C_7 . Tallet indikerer hvor tidsgrensen går mellom gunstig og ugunstige refleksjoner. Forholdet mellom tidlig og sen lyd måles i dB for C og i prosent for D . En positiv verdi på C betyr at det totale nivået på den tidlige (gunstige) akustiske responsen har et høyere nivå enn det totale nivået på den sene (ugunstige) responsen fra rommet. For D vil en verdi på 50 % tilsvare en verdi lik 0 dB.

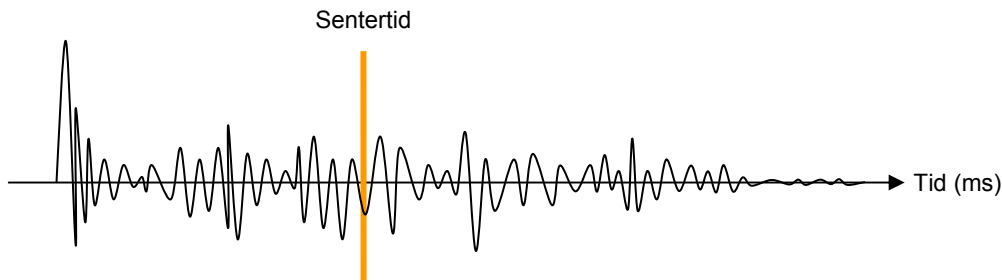
C_7 tilsvarer rundt regnet forholdet mellom direktelyd og total reflektert lyd, slik at en positiv verdi på C_7 vil indikere at vi er innenfor kritisk avstand. Ofte vil tidsvinduet 0–7 ms ikke være nok til å få med hele direktelyden siden høyttaler har en tidsrespons som er lenger enn 7 ms (som nevnt i delkapittel 5.3.5). Dette inntreffer lett oktavbåndene under 500 Hz, avhengig av tidsresponsen til høyttaleren. Tidsvinduet 0–7 ms vil på litt avstand fra høyttaler også lett inkludere refleksjoner, typisk gulvrefleksjonen. Dette gjør det vanskelig å isolere direktelyden på fra målinger gjort i rom.

Opplevd tydelighet er styrt av mange faktorer. For eksempel er det sannsynlig at vår evne til å lokalisere direktelyd og å skille direktelyd og reflektert lyd retningsmessig fra hverandre påvirke opplevd tydelighet. Disse relativt kompliserte effektene er ikke lett å måle. Graden av diffusjon vil heller ikke evalueres i det hele tatt av disse parameterne designet for å evaluere opplevd (tidsmessig) tydelighet. Men målte parametere kan gi en viss indikasjon, spesielt for rom som er stor grad av diffusjon, og som regel kan de i det minste kunne skille svært gode forhold fra svært dårlige... Siden parameterne C og D evaluerer balanse mellom tidlig og sen lyd vil disse parameterne også kunne evaluere hvor hørbar etterklangen er, siden etterklang kan bli maskert av direktelyd og tidlige refleksjoner.

Andre parametere er foreslått for å vurdere tydelighet, for eksempel taetydelighet på tale. En slik parameter er STI (Speech Intelligibility Index), som ikke er del av dette kompendiet. Griesinger (2010) har i det siste foreslått en ny parameter som er knyttet til vurdering av opplevd tydelighet som studerer koherens til opplevd tonehøyde.

7.1.9 Akustisk sentertid, T_s

Akustisk sentertid, betegnet T_s , angir tidspunktet i ekkogrammet hvor vi har like mye energi før som etter, se figur 75. Dette kan ses på som et alternativ til parameterne C og D . En kort sentertid indikerer at det meste av den akustiske responsen kommer i løpet av kort tid etter direktelyden – med andre ord tegn på god tidsmessig tydelighet. Men dette er også et veldig grovt mål.



Figur 75: Senteretid for en impulsrespons, T_s .

7.1.10 Lateral fraction, LF , og interaural crosscorrelation, $IACC$

Det er foreslått akustiske parametere som evaluerer andelen av akustisk respons som kommer fra siden sammenliknet med andre retninger innenfor visse tidsrom. Dette er basert på at refleksjoner fra sidene av mange er ansett som mer gunstige/nødvendige enn refleksjoner ovenfra/bakfra (i det sagittale/mediane planet). Tidlige refleksjoner fra sidene er ansett å bidra til ASW, *Apparent Source Width*, mens sene refleksjoner fra sidene er ansett å bidra til LE, *Listener Envelopment*. Tre akustiske mål for å evaluere dette er Lateral Energy Fraction (LF eller LEF), Interaural crosscorrelation ($IACC$) og Late Lateral Strength (LG). For å måle dette må man måle akustisk respons med mikrofon med både kule- og åttetalls karakteristikk.

Lateral Energy Fraction, LF eller LEF , evaluerer energiforholdet mellom respons målt med åttetallsmikrofon og respons målt med omnidireksjonell mikrofon, innenfor tidsrommet 5–80 ms fra åttetallmikrofonen og 0–80 ms fra omni-mikrofonen (relativt ankomst av direktelyden).

Interaural Crosscorrelation bør måles med kunsthode og evaluerer hvor lik den akustiske responsen er ved høyre og venstre øret. Dette kan evalueres innenfor tidlig (0–100 ms) eller sen del (etter 100 ms) av den akustiske responsen fra rommet (relativt ankomst av direktelyden). $IACC$ vil ha en verdi mellom 0 og 1 (som for korrelasjonskoeffisienter generelt). Lite samsvar mellom høyre og venstre øre, lav verdi for $IACC$, er regnet å bidra til økt opplevelse av ASW eller LE. Ofte oppgis verdien $1 - IACC$ slik at høyest verdi for $IACC$ gir høyest verdi for ASW og LE.

Late Lateral Strength er basert på G_{late} målt med en åttetallsmikrofon hvor refleksjoner fra sidene vektlegges for evaluert nivå. Dersom man kun tidligere har målt G_{late} med omnidireksjonell mikrofon og $IACC$, er det foreslått et alternativ målt kalt Listener Envelopment (LEV), se likning (27). Nyere resultater viser dog at G_{late} omnidireksjonelt kanskje er det greieste målet for LE (Beranek, 2008).

$$LEV = 0.5 \cdot G_{late} - 10 \cdot \log_{10}(1 - IACC) \quad (27)$$

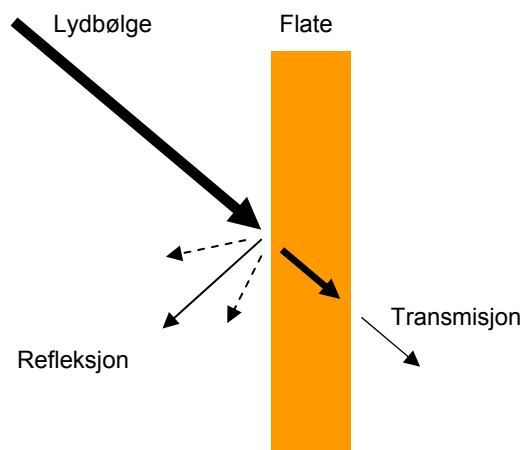
7.1.11 Sceneparametere, ST

Det er foreslått parametere for å evaluere samspillforhold for musikerne på scenen. Disse parametere er omtalt som ST -parametere (support). ST -parametere tilsvarer G innenfor ulike tidsintervall, men referansenivå er her summen av direktelyd og gulvrefleksjon. ST skal alltid måles med mikrofonen 1 m fra senteret til høyttaleren. For ST_{early} summeres totalt nivå til reflektert lyd (omnidireksjonell) innenfor 20–100 ms, for ST_{late} summeres det innenfor 100–1000 ms og for ST_{total} innenfor 20–1000 ms. Dette akustiske målet er i hovedsak hva som er blitt brukt for å studere sceneforhold objektivt, men funn fra nyere studier (blant annet Dammerud, 2009) indikerer at ST_{early} er lite relevant i forhold til opplevde samspillforhold blant musikerne.

8 LYDBIDRAG FRA OVERFLATER OG OBJEKTER

Det er nyttig å forstå hvordan ulike materialer og egenskaper til objekter påvirker refleksjon, diffusjon og absorpsjon av lyd. Med en slik forståelse kan vi lettere ha «akustiske briller», ved at vi kan forstå hvordan lydforholdene i et rom vil bli ut fra visuell informasjon. Noen egenskaper er det best å få beskrevet av for eksempel produsenten av materialet, for eksempel fra tekniske datablad. Ved å forstå hva slike data betyr og representerer kan vi enda bedre forstå rommets akustiske egenskaper. I mange tilfeller vil det holde å ha en omtrentlig forståelse av rommets akustiske respons. For mer detaljerte undersøkelser vil det være mulig å gjøre målinger.

Når en lydbølge treffer en flate eller et objekt kan lydenergien bli reflektert, absorbert og/eller transmittert som forsøkt illustrert i figur 76. Den reflekterte bølgen kan bli diffusert (spredt opp i ulike retninger) som antydnet med stiplede linjer i figur 76. Er flaten liten i forhold til bølgelengden kan lydbølgen transmittere på grunn av diffraksjon. Forskjell i energi til den innkommende lydbølgen og den totale reflekterte energien tilsvarer det som er blitt absorbert eller transmittert. For lyd som er absorbert er lydenergien omdannet til varmeenergi. Diffusjon absorberer i prinsippet ikke lyden, men den kan føre til at lyd blir sendt mot absorberende flater, som ellers ville stå og bli reflektert fram og tilbake mellom parallelle reflekterende flater. Delkapitlene under tar for seg refleksjon, diffusjon og absorpsjon i mer detalj.

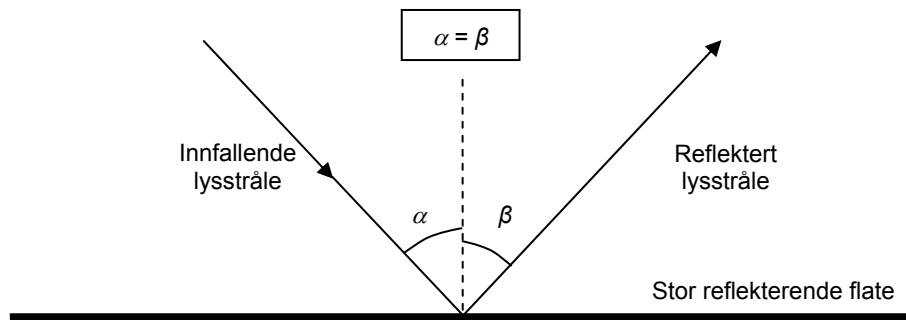


Figur 76: Refleksjon, absorpsjon og transmisjon av en lydbølge som treffer en flate.

8.1 Refleksjon og diffusjon

8.1.1 Spekulær refleksjon

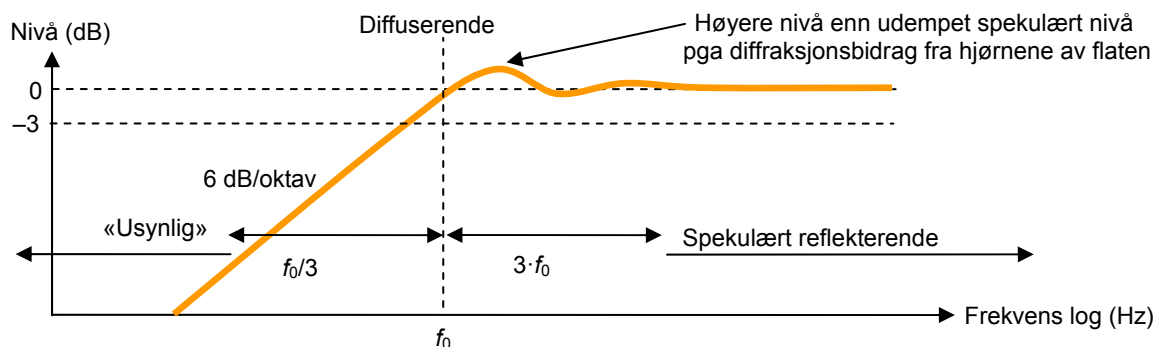
Dersom objektet som bølgen treffer er veldig stort i forhold til bølgelengde og helt flatt, vil lydbølgen bli reflektert i én bestemt retning. Dette kalles en spekulær refleksjon. En slik refleksjon er lik det vi får når lys som treffer et flatt speil. Dette betyr at i de tilfeller hvor vi har spekulær refleksjon kan vi bruke lover som er funnet for lys/optikk. En slik måte å se på lydbølger er grunnlaget for geometrisk akustikk. En av lovene fra optisk teori kalles Snells lov, vist i figur 77. Denne loven gjelder ved spekulær refleksjon og sier noe om retningen til det reflekterte lyset avhengig av retningen på lysstrålen som kommer inn mot den reflekterende flaten. Snells lov sier at utfallsvinkelen til reflektert lysstråle (β) er lik innfallsvinkelen til innkommende lysstråle (α), sett i forhold til den reflekterende flaten. Dette forkortes gjerne til at utfallsvinkelen er lik innfallsvinkelen ($\alpha = \beta$).



Figur 77: Snells lov.

8.1.1.1 Grensefrekvens for spekulær refleksjon og diffraksjon

Dersom lydbølgen treffer en kvadrisk flate som er liten i forhold til bølgelengden, vil lydbølgen i hovedsak diffraktere rundt flaten. Som en tommelfingerregel vil vi være i grenseland mellom diffraksjon og refleksjon når dimensjonen til den kvadratiske flaten, slik lydbølgen ser den, er lik bølgelengden. Denne grensefrekvensen kalles f_0 . Ved grensefrekvensen f_0 vil vi få noe diffusjon, som indikert i figur 78. Godt under f_0 , rundt regnet under $f_0/3$ vil flaten i hovedsak være usynlig eller gjennomsiktig og lydbølgen transmitterer (ca. 10 dB nivåreduksjon sammenliknet med nivå til spekulært reflektert bølge). Godt over f_0 , rundt regnet over $3 \cdot f_0$, vil flaten være så stor at vi får en spekulær refleksjon. Nivået 0 dB i figur 78 tilsvarer nivået til en ikke-dempet spekulær refleksjon.



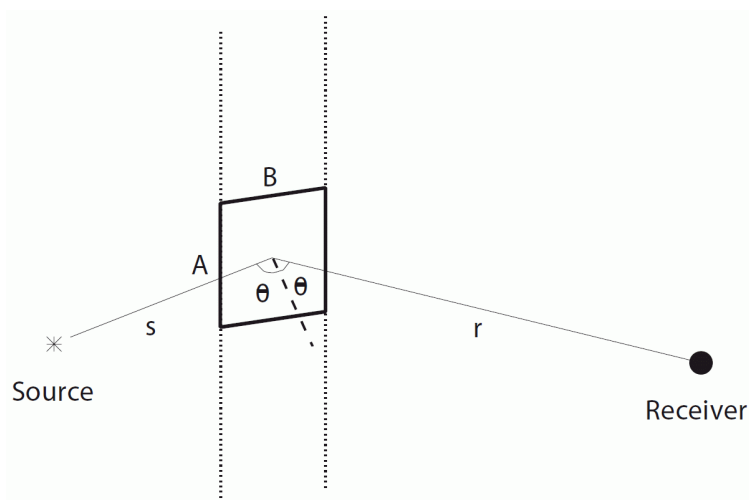
Figur 78: Akustisk første ordens høypassfilter på grunn av begrenset størrelse til kvadratisk flate.

Rett over frekvensen f_0 varierer nivået noe før nivået flater ut mot 0 dB ved høyere frekvenser. Dette skyldes kantdiffraksjonseffekter. Kantdiffraksjon gir oss noe lydbidrag fra hjørnene på flaten som har motsatt polaritet i forhold til den spekulære refleksjonen. Interferensen mellom kantdiffraksjonsbidragene og den spekulære refleksjonen gir nivåvariasjoner som et svakt kamfilter. Slik interferens får vi også på høyttalerkasser med skarpe hjørner og bidrar til en ikke-flat frekvensrespons. Har vi en spekulær refleksjon uten noe absorpsjon kan vi finne nivået til refleksjonen ut fra avstandsloven og eventuell luftabsorpsjon (over ca. 1 kHz). Under f_0 faller nivået til refleksjonen gradvis mer og mer, med 6 dB/oktav. Dette tilsvarer en akustisk versjon av et første ordens høypassfilter, bare at f_0 er definert som -3 dB-punktet for et filter.

Tommelfingerregelen nevnt over sier at f_0 er lik c/B , hvor B er bredden til den kvadratiske flaten. I realiteten er tommelfingerregelen ganske overforenklet i forhold til virkeligheten, men det er lett å huske. Likning (28) er for mer nøyaktig utregning av f_0 basert på dimensjonen til en flate, her kalt B (se Barron, 2010 for mer detaljer). Figur 79 viser situasjon og de ulike størrelsene i likning (28). I figur 79 har flaten bredde B og en mye større lengde A . Dersom lydbølgen kommer vinkelrett mot flaten vil lydbølgen se en flate med bredde B . Men dersom lydbølgen kommer inn med en vinkel θ i

avvik fra vinkelrett retning, vil den projiserte bredden til panel bli lik $B \cdot \cos(\theta)$. Med θ lik 0° , vinkelrett innfall, blir $\cos(\theta)$ lik 1. Fra likning (28) ser vi at avstanden fra lydkilden til flaten, s , og avstanden fra flaten til mottakerposisjon, r , også spiller inn på f_0 .

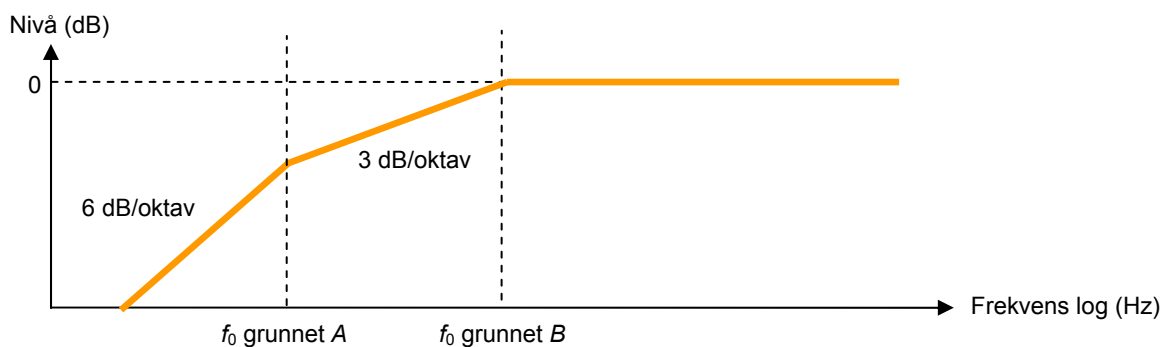
$$f_0 = \frac{c}{\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r}\right) \cdot (B \cdot \cos \theta)^2} \quad (28)$$



Figur 79: Situasjon for refleksjon mot et reflekterende panel.

For en flate med dimensjonene A og B lik 1 m, og en lydkilde og mottaker på 2 m avstand vinkelrett ut fra flaten ($\theta = 0^\circ$, $r = 2$, $s = 2$) vil f_0 ut fra likning (28) bli lik 343 Hz. I dette tilfelle vil den enkle tommelfingerregelen være gyldig: Grensefrekvensen er lik tilhørende frekvens for bølgelengde lik 1 m. Dersom lydkilde og mottaker flyttes nærmere flaten vil f_0 få en lavere verdi som betyr at flaten reflekterer bedre lavfrekvente lydbølger. I motsatt retning vil vi på lang avstand fra en reflekterende flate kun få reflektert høyfrekvent lyd.

Er dimensjon A vist i figur 79 veldig stor, vil vi få én grensefrekvens f_0 og nivået faller 3 dB/oktav under f_0 . Har flaten lengde A lik B , vil nivået falle 6 dB/oktav under f_0 , siden refleksjonen blir «punktert» av liten dimensjon både i bredde og lengde, som for den kvadratiske flaten i figur 78. Dersom A er noe større enn B (rektangulær flate) vil grensefrekvensen på grunn av dimensjonen A komme ved en annen grensefrekvens som også kan finnes ved hjelp av likning (28). Høypassfilteret får da en form som skissert noe forenklet i figur 80. Dersom A er mindre enn B , vil f_0 grunnet A havne over f_0 grunnet B .



Figur 80: Høypassfilter for refleksjon for en flate med dimensjonene A og B .

Regneeksempel på bruk av tommelfingerregelen nevnt over:

Hvor mye vil folk blokkere for lyden om de står i veien for høyttaleren?

Dersom folk står spredt og ikke tett inntil hverandre, med fjeset rett mot lydkilden: En person er ca. 50 cm bred og det er den minste dimensjonen til lydhindringen slik lyden «ser» det. Denne dimensjonen blir avgjørende for om vi får diffraksjon eller refleksjon/lydskygge. En bølgelengde på 50 cm tilsvarer en frekvens lik $c/\lambda = 343/0,5 \approx 686$ Hz.

Under ca. $686/3 = 229$ Hz vil lyden diffraktere relativt uforhindret forbi, mens over ca. $686 \cdot 3 = 2058$ Hz vil personene kaste en betydelig lydskygge. Dersom bare hodet skygger vil aktuell dimensjon være ca. 17 cm i stedet for 50 cm, det vil si at grensefrekvens mellom diffraksjon og refleksjon/skygging flyttes fra ca. 686 til 2000 Hz. Sjekk gjerne selv ut om dette virker til å stemme når du for eksempel er på konsert.

Regneeksempel på bruk av formelen i likning (28):

Et miksebord er 1 m dypt og 2 m bredt. Ta utgangspunkt i situasjonen skissert i venstre halvdel av figur 19. Gitt at refleksjon via miksebordet til sammen tilbakelegger en avstand på 1,8 m, under hvilken frekvens vil vi forvente at miksebordet ikke lenger gir noen betydelig interfererende refleksjon?

Dybden til bordet, $D = 1$ m, vil være dimensjonen som gir den mest lavfrekvente grensefrekvensen for refleksjon. For situasjonen i figur 19 vil θ være lik ca. 60° , og med totalt 1,6 m avstand vil både r og s være cirka halvparten av dette, det vil si 0,8 m. Vi setter dette inn i likning (28) får vi:

$$f_0 = \frac{343}{\left(\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8}\right) \cdot (1 \cdot \cos[60^\circ])^2} \approx 549 \text{ Hz}$$

Tar vi en tredel av dette er vi i et område hvor vi vil forvente at lydbølgen fra høyttaleren stort sett diffrakterer rundt miksebordet: $549/3 \approx 183$ Hz. Problemer i bassen i et rom med denne mikseren vil med andre ord neppe skyldes refleksjonen fra miksebordet. Ut fra tommelfingerregelen vil f_0 bli $343/1 = 343$ Hz. Vi ser at vi bommer nesten en oktav i forhold 549 Hz. Dette er et betydelig avvik, men for å ha en idé om frekvensområdet til miksebordrefleksjon er tommelfingerregelen nyttig.

8.2 Diffusjon

Vi kan få spredt opp lydenergien på tre ulike måter:

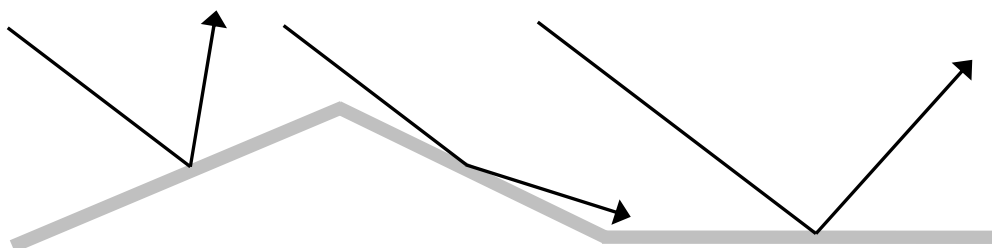
- Ved overgang fra diffraksjon til refleksjon som beskrevet over.
- På grunn av geometrisk form til en flate.
- På grunn av interferens mellom ulike reflekterte bølger fra en og samme flate som har betydelige faseforskjeller.

Diffusjon er ofte blitt ansett som positivt i romakustikk fordi det øker antall refleksjoner. Økt antall refleksjoner reduserer kamfiltre og faren for hørbare ekko (enkeltrefleksjoner). Men diffusjon har også blitt trukket fra med mulig ulempe siden diffuserende flater ofte endrer på frekvensspekter og faseforhold ved ulike frekvenser til direktelyden. Refleksjoner som treffer harde og jevne flater vil

lettere beholde frekvensspekter og faseforhold. Sistnevnte refleksjoner kan ut fra dette føre til en mer effekt precedence-effekten og gi høyere opplevd lydnivå uten negative effekter. Med diffusjon kan opplevd lydnivå blir lavere ut fra Lokki *et al.* (2011). Jevne harde flater kan ut fra dette være nyttige bare man er bevisst på hvor mange plassere de (på sidene og ikke over, foran eller bak). Ikke-diffuse flater for å maksimere opplevd nivå vil være mest relevant for store rom og ren akustisk lyd (som konsertsaler), hvor behovet for akustisk forsterkning av lydkildene er størst.

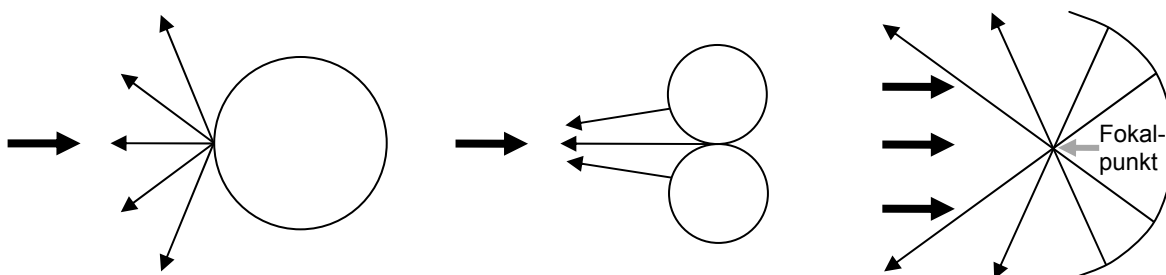
8.2.1 Diffusjon på grunn av geometrisk form

Dersom en overflate har store elementer som er vinklede vil den spekulære refleksjon gå i ulike retninger ved forskjeller deler av flaten som forsøkt illustrert i figur 81. Bølgelengden er her mye mindre enn ujevnhetene og vi får spekulær refleksjon fra de ulike flateelementene. Dette er ofte den enkleste måten å gi diffusjon for lys. For lys er det lett å lage flatelementer med ulik orientering som er store i forhold til bølgelengden, siden bølgelengde til synlig lys er innenfor 400–700 nm (milliardtedels meter.)



Figur 81: Diffusjon basert på vinklede flatelementer som er store i forhold til bølgelengden.

En konveks overflateform vil bidra til å spre lyden, men kun for frekvenser hvor vi har spekulær refleksjon. Men to konvekse flater ved siden av hverandre vil skape fokusering, noe som er uheldig, se figur 82. En liten konveks flate (for eksempel en vertikal søyle i rommet) kan spre lydbølgene også på grunn av diffraksjon når dimensjonen til flaten er cirka like stor som bølgelengden. En konkav flate kan spre lydbølge på samme måte som en konveks, men en konkav flate vil ha et fokuspunkt (fokuspunkt). Konkave flater gir spredning ved andre steder enn fokuspunktet, slik at de kan bidra positivt til diffusjon så sant vi kan unngå å ha en mottaker i fokuspunktet. Fokuspunkter fører lett til at lydfeltet blir vanskelig å jobbe i med store variasjoner i lydnivå (ikke-diffust lydfelt).



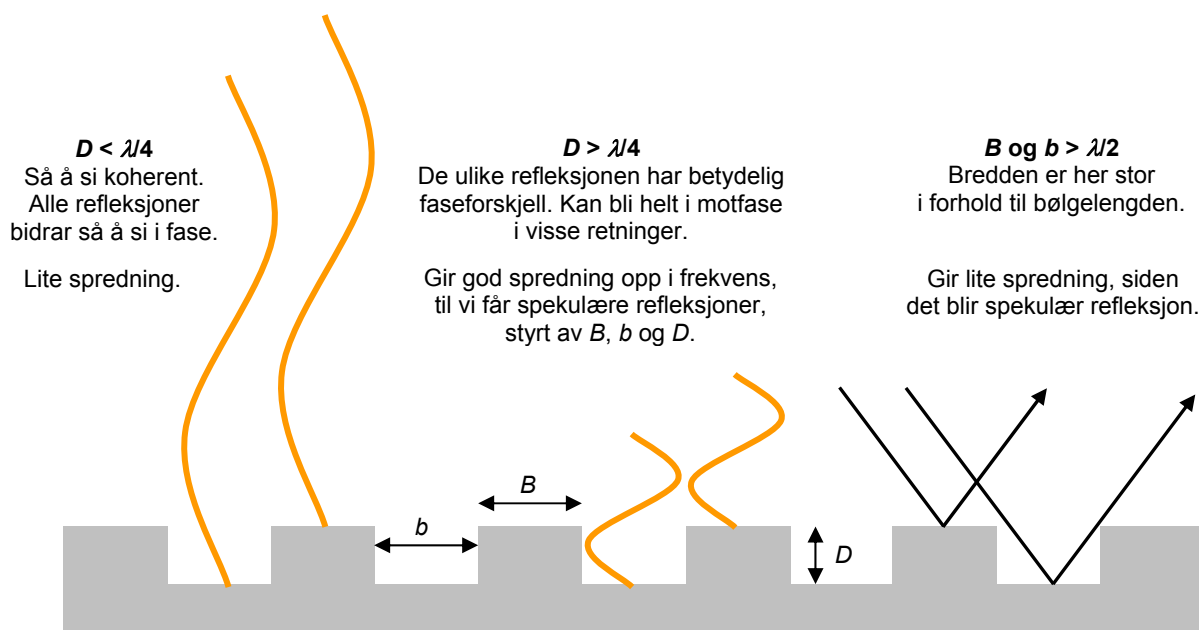
Figur 82: Diffusering og fokusering på grunn av konvekse og konkave former.

8.2.2 Diffusjon på grunn av interferens

Ved å bryte opp flaten med ujevnheter vil vi få ulike refleksjonsbidrag fra flaten som ikke lenger er helt i fase i forhold til hverandre. Er ujevnhetene så store at vi får minst 90° faseskift vil interferensen føre til at lydenergi blir betydelig spredt ut i andre retninger enn den spekulære retningen. Vi vil med andre ord unngå en sterk spekulær refleksjon. Figur 83 viser en flate med firkantform, hvor dybden til firkantformen er lik D og bredden til firkantelementene er lik B og b . For

lavfrekvent lyd vil refleksjon fra de ulike delene av firkantformen være tilnærmet koherent og vi får ingen lydspredende (diffuserende) egenskap for flaten. Med $D = \lambda/4$ vil vi nå 90° faseforskyvning og vi vil få betydelig diffusering. Dette vil skje ved frekvensen $c/(4D)$. For å oppnå betydelig diffusjon i bassen må diffusoren være veldig dyp ($D = 1,07$ m ved 80 Hz). For frekvenser over $c/(4D)$ vil vi til slutt ha så liten bølgelengde at hvert av sideelementene i firkantformen vil gi oss spekulær refleksjon. Da vil vi igjen få liten grad av diffusjon. Dette inntreffer for frekvenser hvor B og $b > \lambda/2$.

Ønsket om betydelig faseforskjell mellom koherente lydbidrag er det motsatte av hva vi ønsker for høyttalere. Da vil vi som regel ha alle lydkilder eller reflektert lyd mest mulig i fase (koherent) – det vil si mindre enn en kvart bølgelengde mellom kildene.



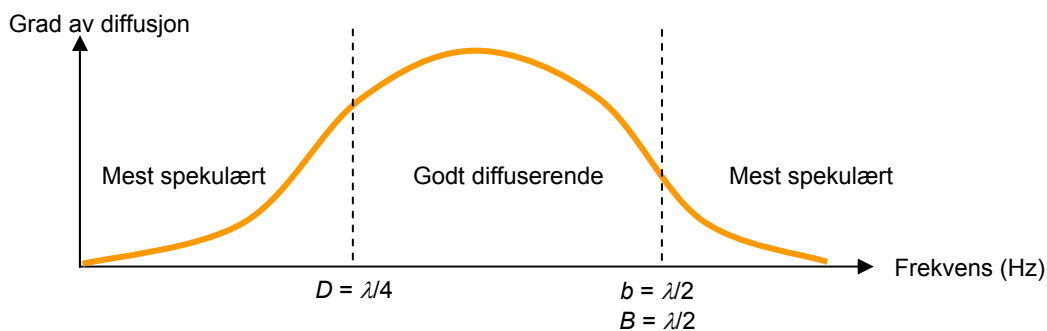
Figur 83: Diffusjon på grunn av interferens mellom ulike refleksjonsbidrag.

På grunn av interferensen vil en diffusor som beskrevet i figur 83 ha et fjernfelt og nærfelt. Vi må være på tilstrekkelig avstand fra diffusoren for at nivået til den reflekterte lyden ikke skal variere for mye med små variasjoner i avstand til diffusoren, som i nærfeltet til en høyttaler. Minimum avstand bør som en tommelfingerregel være en fot avstand fra en tomme dyp diffusor og skalert opp tilsvarende for dypere diffusorer. Om vi *må* være nær den reflekterende flate kan det være bedre med absorpsjon i stedet for diffusjon. Absorbenter har ikke noen liknende nærgrense.

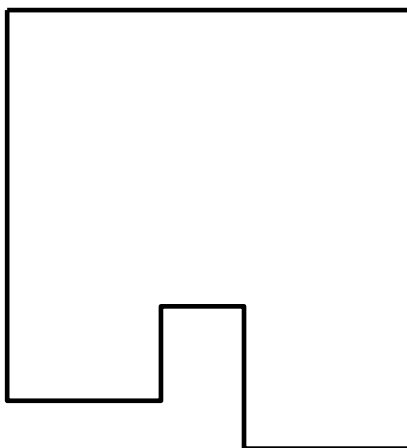
Figur 84 viser skissert lyd-diffuserende egenskap som funksjon av frekvensen for flaten vist i figur 83. Ved å variere hvor dyp ujevnhetene er på ulike steder langs flaten kan vi oppnå betydelig diffusering innenfor et bredt frekvensområde. Et eksempel på en slik type diffusor er Schroeder-diffusor, se delkapittel 8.2.4.

8.2.3 Lavfrekvent diffusjon på grunn av romform

Selve formen på for eksempel bakveggen i et rom kan gi diffusjon ved lave frekvenser og bryte opp mønstre på stående bølger (moder), som forsøk illustrert i figur 85. En slik stor dybdevariasjon gir ikke diffusjon ved høyere frekvenser fordi bredden på de ulike seksjonene er mye større enn bølgelengde ved høyere frekvenser, og gir i stedet spekulære refleksjoner.



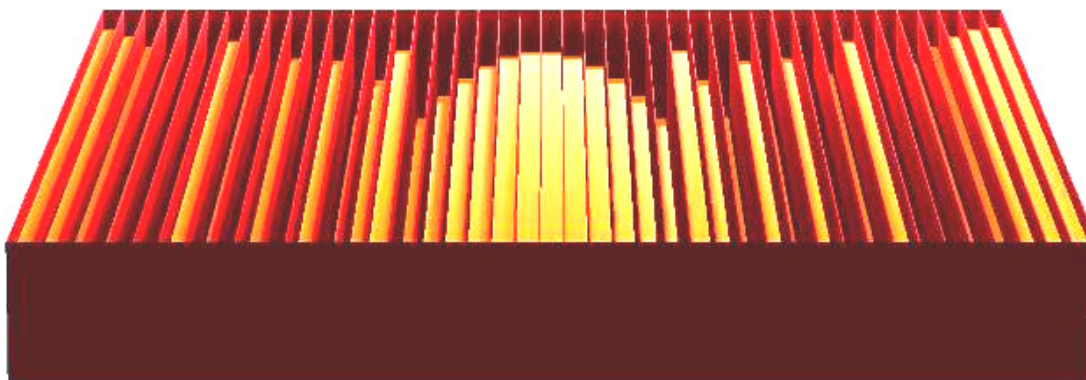
Figur 84: Grad av diffusjon som funksjon av frekvens for en firkantformet flate.



Figur 85: Bakvegg med varierende dybde.

8.2.4 Schroeder-diffusor (phase-grating diffusor)

En Schroeder-diffusor har varierende dybde eller bredde, se figur 86. Varierende bredde gir en jevnere spredning i ulike retninger – en mer omnidireksjonell direktivitet til den reflekterte lyden. Varierende dybde gir en mer bredbåndet diffusjon (Cox & D'Antonio, 2009). Varierende dybde brukes ofte siden man ønsker bredbåndet diffusjon. En spesiell formel brukes for å regne ut dybdevariasjonen, og gir navn til de ulike typene. For eksempel Quadratic Residue Diffusors (QRD) og Primitive-Root Diffusor (PRD) hvor maksimum og minimum dybde avgjør frekvensområdet til diffusoren. Diffusoren i figur 86 gir spredning kun i én dimensjon, i bredderetning for dette bildet. (En slik type finnes for eksempel i Oslo Konserthus). Ved å ha en fraktalstruktur kan vi få til en mer bredbåndet diffusor, se figur 14-3 i læreboka.



Figur 86: 2D QRD-diffusor.

Figur 87 viser en 3-dimensjonal QRD-diffusor som gir diffusjon i to retninger, både horisontalt og vertikalt med diffusoren festet til en vegg. Figur 88 viser eksempler på diffusorer i et innspillingsrom. Vi ser kvadratiske elementer med QRD-diffusorer. De stående spaltene gir diffusjon sideveis (horisontalt) i rommet, mens de liggende spaltene gir diffusjon vertikalt i rommet. For beregning av QRD-diffusorer finnes det for PC et gratis program kalt *QRDude*, <http://www.subwoofer-builder.com/qrdude.htm>.

8.2.5 Måling av diffuserende egenskap

Ønsker vi å teste den diffuserende egenskapen til en diffusor krever dette en prosess tilsvarende det å måle direktiviteten til en høyttaler, i ekkofritt laboratorium slik at vi lett kan unngå andre forstyrrende refleksjoner. Diffuserende egenskap til en diffusor beskrives ofte i form av et polarplot som viser nivået til reflektert lyd i ulike retninger med et visst lydinnfall mot diffusoren, se figur 14-6 i læreboka.



Figur 87: 3D QRD, RPG Skyline.



Figur 88: Diffusorer i innspillingsrom.

8.2.5.1 Spredningskoeffisient

Spredningskoeffisienten s er et enkelt mål på den lydsprende egenskapen til en flate ved en gitt frekvens (ofte oppgitt innenfor oktavbånd). Denne koeffisienten tilsvarer absorpsjonskoeffisienten α , men kan minne mer om Q -faktor for høyttaler, bare motsatt. Spredningskoeffisienten, s , sier noe om hvor stor andel av lyden som fortsetter i spekulær retning og brukes blant annet ved datasimulering av rom, se kapittel 9 for mer detaljer. Likning (29) viser definisjonen til s hvor E_{spek} er energien til den spekulære refleksjonen fra flaten og E_{tot} er den totale energien reflektert fra flaten.

$$s = 1 - E_{\text{spek}}/E_{\text{tot}} \quad (29)$$

s står for «scattering» (spredning). $s = 1$ tilsvarer at ingenting av den reflekterte lyden går i spekulær retning (sjelden tilfellet i praksis). $s = 0$ tilsvarer en fullstendig spekulær refleksjon, det vil si ingen spredning/diffusjon. Spredningskoeffisienten sier ingenting om hvordan den reflekterte lyden fordeler seg i ulike retninger (akkurat som Q -verdi til høyttaler sier lite om faktisk direktivitet).

8.3 Absorpsjon av lyd

Å absorbere betyr å sugе opp eller ta opp i seg. Når lyd blir absorbert blir den «sugd opp» i form av at lydenergien blir omgjort til varmeenergi når den blir absorbert. Vi vil ofte absorbere lyd for eksempel for å fjerne refleksjoner/vegger vi gjerne skulle vært foruten. Et rom hvor alle vegger/refleksjon er dempet veldig godt ned (men ikke fullstendig i praksis) kalles et ekkofritt rom, se figur 89. Slike rom brukes som nevnt til å studere direktelyd fra høyttaler eller refleksjonsbidrag fra flater eller generere kunstig genererte lydfelt ved hjelp av høyttalere som vist i figur 89. Dersom den reflekterende flaten er fullstendig hard, vil all energi reflekteres. Ved bruk av elastiske og porøse materialer, vil ikke all lydenergien bli reflektert. Noe vil bli absorbert. For oss som er inne i rommet vil det som transmitterer også kunne betraktes som absorbert. Men ikke for de som befinner seg utenfor rommet (for eksempel naboen).



Figur 89: Ekkofritt rom.

Absorpsjonskoeffisienten, α , forteller oss hvor stor andel av lydenergien som blir absorbert (evt. også transmittert). $\alpha = 0$ (0 %) representerer ingen absorpsjon, mens $\alpha = 1$ (100 %) representerer at alt blir absorbert. Reflektert energi er lik $(1 - \alpha)$ ganger energien til innfallende lydbølge.

8.4 Tre hovedmekanismer for absorpsjon av lyd

Vi har tre hovedmekanismer for å absorbere lydenergi:

- Bremse ned luftpartiklene når de svinger fram og tilbake med lydbølgen. Dette har best effekt for steder for luftpartiklene svinger mest fram og tilbake (høyest partikkelhastighet). Slike absorberer kalles friksjonsabsorbenter.
- Gjøre en reflekterende flate elastisk noe som vil redusere trykket som kan oppstå ved flaten. Lydbølgen vil miste energi ved å dytte mot den elastiske flaten. Lydabsorpsjonen vil være høyest ved resonansfrekvens til den elastiske flaten.
- Helmholtzresonans vil også hindre maksimal oppbygging av trykk når lydbølgen treffer flaten. Også denne type absorberer har høyest absorpsjon ved resonansfrekvensen.

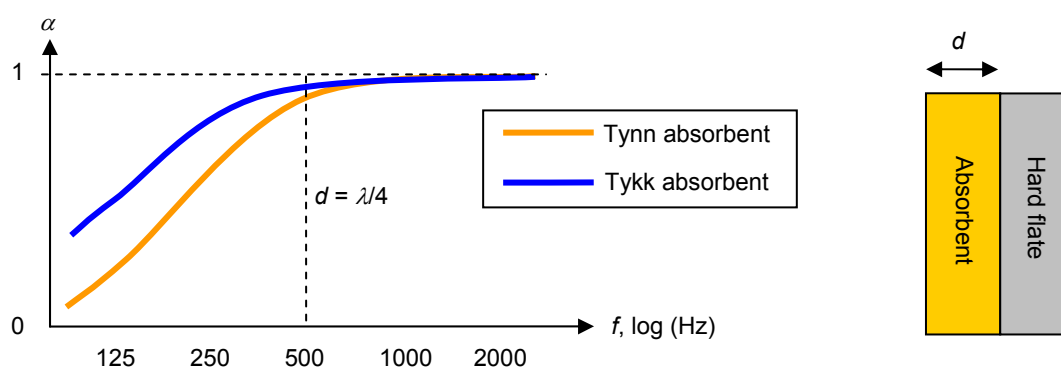
Den første hovedmekanismen går inn under porøse og mikroperforerte absorberer. De to siste hovedmekanismene går inn under resonante absorberer (panel og Helmholtz).

8.5 Friksjonsabsorbenter

8.5.1 Porøs absorberer – nedbremsing av luftpartiklene

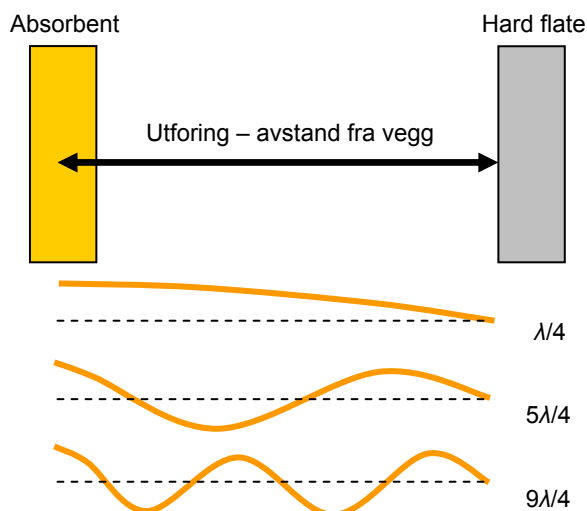
Ved å ha et porøst materiale lydbølgen må gå gjennom, vil vi bremse ned luftpartiklene når de flytter seg på grunn av lydbølgen. Dette «spiser» opp energien til lydbølgen og omdanner lydenergi til varmeenergi. Men fordi lydenergien i seg selv er veldig lav, er det ikke snakk om stor varmeutvikling. Eksempler på slike materialer er mineralull (som Glava), steinull (som Rockwool), foam (skumplast) og tekstiler/teppe (Molton). Kompakt (tung) mineralull (for eksempel markplate med en tetthet lik 130 kg/m^3) vil være mer effektiv som lydabsorbent sammenliknet med løs.

Helt inntil en vegg vil ikke luftpartiklene bevege seg i lydbølgen. For lydbølger mellom vegger vil luftpartiklene ha høyest hastighet på en kvart bølgelengdes ($\lambda/4$) avstand fra veggene, spesielt for stående bølger, som beskrevet i kapittel 3. Dette fører til at absorpsjonen vil avhenge av frekvens. En porøs absorberer vil være mest effektiv en $\lambda/4$ fra en hard reflekterende flate i rom. Siden dette kravet er vanskelig å oppfylle for lavfrekvente lydbølger (lang bølgelengde) vil absorberende egenskap til porøse absorberer falle for lavere frekvenser. Figur 90 viser absorpsjonskoeffisienten α til en tynn og en tykk porøs absorberer montert rett inntil en hard flate. Vi ser at den tykke varianten gir bedre absorpsjon i bassen fordi kravet til at absorberer skal være ved $\lambda/4$ avstand fra den harde flaten er her bedre oppfylt ved lave frekvenser.

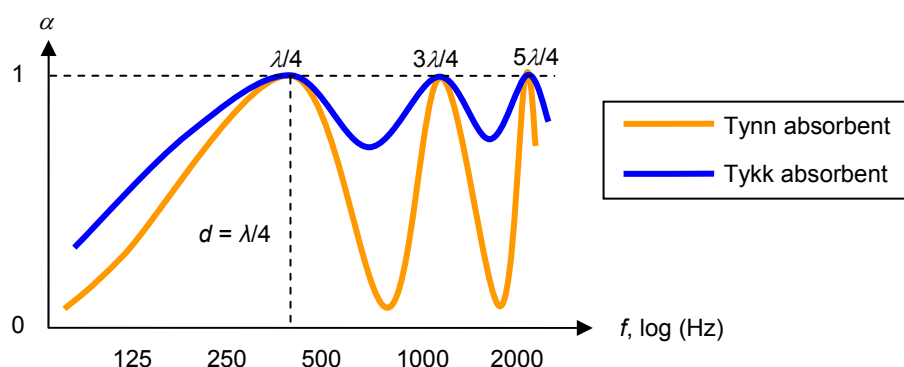


Figur 90: Absorpsjonskoeffisient, α , til en tynn og tykk porøs absorberer inntil hard vegg.

Dersom vi setter absorbenten litt ut fra veggen, som vist i figur 91, vil absorbenten gi maksimal absorpsjon for den frekvensen hvor absorbentens avstand til den harde flaten tilsvarer $\lambda/4$. Men også ved de overharmoniske frekvensene hvor vi har et heltall ganger en hel bølgelengde, λ , pluss $\lambda/4$, som skissert i figur 92. Figur 92 viser absorpsjonskoeffisienten som funksjon av frekvens for situasjonen i figur 91.



Figur 91: Porøabsorbent plassert med avstand til hard flate.

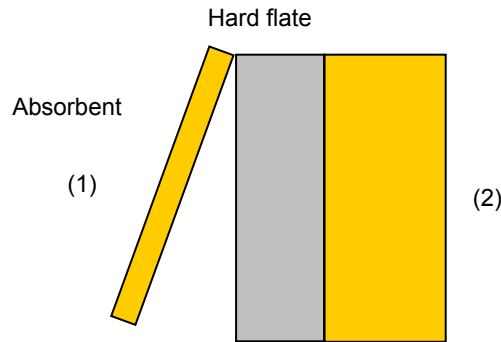


Figur 92: Absorpsjonskoeffisient, α , til porøabsorbent plassert med avstand til hard flate.

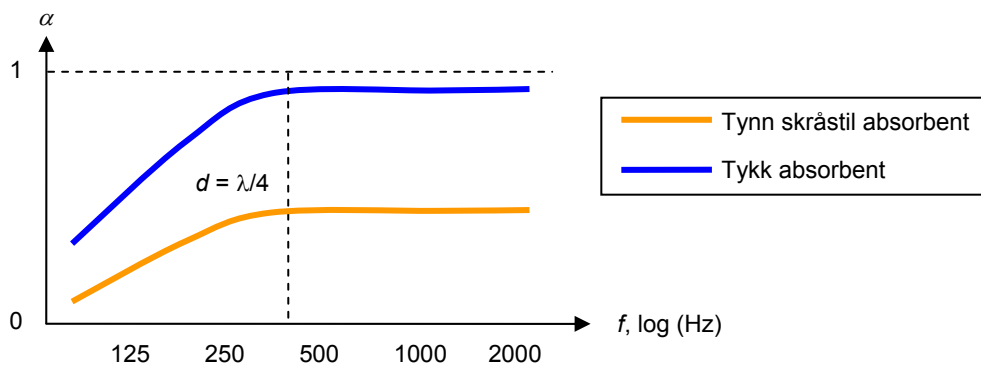
Basert på den veldig frekvensvarierende absorpsjonsevnen i figur 92 kan det virke lurt å skråstille absorbenten slik at avstanden til den harde flaten vil variere. I figur 93 er det vist to alternativer: skråstilt tynn plate (1) og en tykk plate (2) satt inntil en hard flate. Figur 94 viser skisse av forventet absorpsjonsevne for de to alternativene. Å skråstille tynne plate vil føre til mindre variasjon til α , men vi vil samtidig (dessverre) ofte også miste de høyeste verdiene for α , siden vi ved hver enkelt frekvens kun har en liten andel av absorbenten som befinner seg innenfor $\lambda/4$ ved den aktuelle frekvensen. Forskjellen mellom de to alternativene er ikke så mye formen på absorpsjonskurven ved ulike frekvenser, men generell absorpsjonsevne. Ofte har vi ikke anledning eller tilgang til å bruke tykke absorbenter. Dersom vi kun har tilgang til tynne plater kan det være strategisk å plassere absorbenten som i venstre del av figur 93, fordi det gir en mer lavfrekvent og jevnere absorpsjon enn å direkte montere absorbenten til veggen. Ved å plassere absorbenten i hjørner kan vi få et hulrom med varierende dybde bak absorbenten uten å stjele for mye plass fra rommet, se figur 95.

I figur 91 så vi på lydbølger som hadde en retning vinkelrett mot det absorberende materialet. Lyd som går på skrå inn i materialet kan absorbere litt lenger ned i frekvens, fordi lydbølgen får en

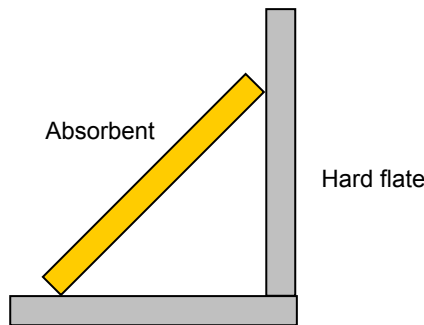
lenger avstand å tilbakelegge inne i materialet, som forsøkt illustrert i figur 96. For lyd i rommet som kommer fra alle mulige retninger (diffus lyd) vil vi få betydelig absorpsjon også ved frekvenser litt under $\lambda/4 = d_1$.



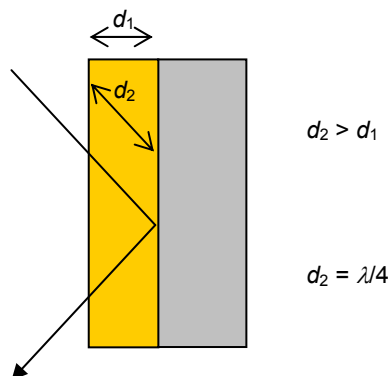
Figur 93: Tynn skråstilt (1) og tykk (2) porøabsorbent.



Figur 94: Absorpsjonskoeffisient, α , til tynn eller tykk skråstilt porøabsorbent.



Figur 95: Skråstilt porøabsorbent inntil hjørne.



Figur 96: Lyd med skrått lydinnfall mot porøabsorbent.

Når lydinnfallet blir veldig skrått i forhold til materialet, (betegnet «grazing incidence» på engelsk) vil lydbølgen kun streife borti absorbenten, se figur 97. Med et slikt lydinnfall vil de fleste porøabsorbenter få lavere absorpsjonskoeffisient sammenliknet med lydinnfall rett mot eller med diffust lydinnfall. Dette kan være nyttig å være klar over, fordi vi i denne spesielle situasjonen vil få dårligere absorpsjon enn hva for eksempel databladet til absorbenten skulle tilsi.



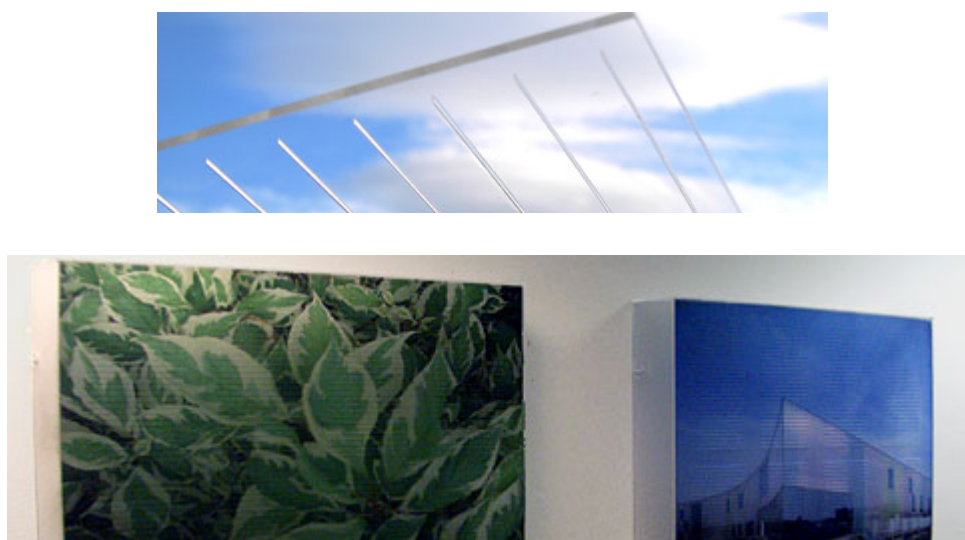
Figur 97: Lydbølge med veldig skrått (streifende) lydinnfall mot porøabsorbent.

Under er det listet opp en oppsummering av noen av anbefalingene ved bruk av porøabsorbenter:

- Det er en fordel å ha absorbenten utforet fra veggen. Dette kan være lett å oppnå i hjørner i rommet.
- Tykkere materiale vil føre til at absorpsjonen blir med bredbåndet, mer effektiv i bassen.
- Som regel er det vanskelig å få til god absorpsjon i dyp bass. Å oppnå dette krever tykk absorbent og/eller at absorbenten er montert langt fra reflekterende vegg/himling.
- Å skråstille absorbent inntil vegg fører til at absorpsjon innenfor et bredere frekvensområde, men totalt sett får vi mindre absorpsjon sammenliknet med å bruke en tykkere plate.
- Absorpsjonen avhenger av retningen til innfallende lyd. Lyd som streifer forbi absorbenten absorberes ofte dårligere.
- Ved å dele opp det absorberende materiale i mange små biter øker den totale absorpsjonen. Alle sidekanter på materialet bidrar med absorpsjon.

8.5.2 Mikroperforerte absorbenter

Plater som er mikroperforert (hull/slisser) vil absorbere lyd. Vi kan da for eksempel lage lydabsorberende glass og kunst, se figur 98. Lydenergien blir omgjort til varme i mikroperforeringen, og ofte er det et hulrom bak som gir Helmholtzresonans (se delkapittel 8.6.2).



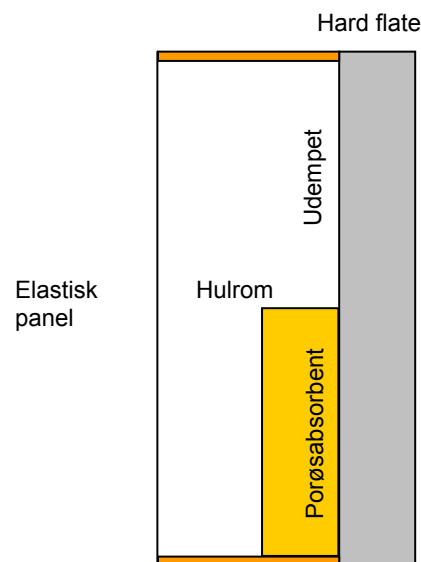
Figur 98: Mikroperforerte plater.

8.6 Resonante absorbenter

Resonante absorbenter absorberer også godt inntil veggen, i motsetning til en porøabsorbent. Vi kan dermed absorbere bass bedre uten å ha absorbenten montert langt fra veggen. Slike absorbenter kalles ofte «bass traps»/«bassfeller». Ved å endre på dimensjoner til absorbenten kan absorbenten «tunes» til å absorbere bestemte frekvenser.

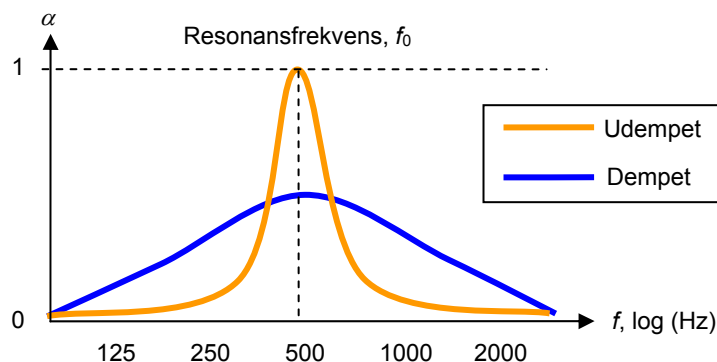
8.6.1 Panelabsorbent

En panelabsorbent er basert på mekanisk resonans. Panelet er elastisk og sammen med hulrommet bak panelet vil panelet svinge som et lodd hengt opp i en fjær, se figur 99. Vi vil ha én resonansfrekvens bestemt av massen til panelet og volumet til hulrommet. Større masse eller større hulrom bak panelet bidrar begge til lavere resonansfrekvens for panelet. NB! Vi må ha lufttett hulrom for at lufta i hulrommet skal bli komprimert og fungere elastisk. Er det hull inn til hulrommet vil ikke luften bli komprimert når panelet presser mot hulrommet.



Figur 99: Oppbygging til panelabsorbent.

Figur 100 viser absorpsjonsegenskapene til panelabsorbent. Ved å dempe ned hulrommet akustisk ved hjelp av porøabsorbent blir absorpsjonen mer bredbåndet, men får lavere verdi ved resonansfrekvensen f_0 . Dette tilsvarer EQ med høy/lav Q-faktor. Damping av hulrommet fører til økt Q-faktor.



Figur 100: Absorpsjonskoeffisient, α , til panelabsorbent.

Likning (30) viser hvordan resonansfrekvensen f_0 kan regnes ut.

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (30)$$

m er flatevekten til panelet (kg/m^2),

d er dybden til hulrommet (m).

Typiske flatevekter:

1 mm finérplate har en flatevekt på $0,5 \text{ kg/m}^2$

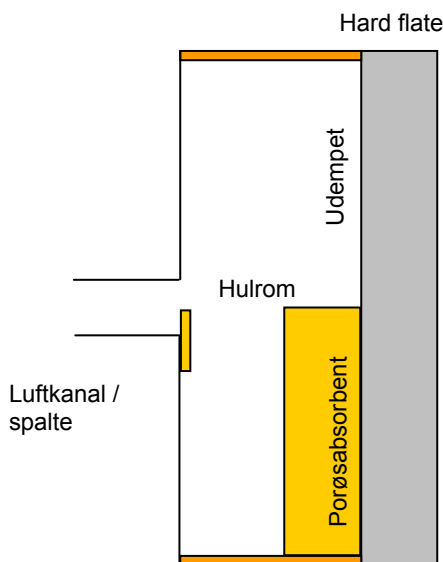
1 mm gipsplate har en flatevekt på $0,9 \text{ kg/m}^2$

1 mm sponplate har en flatevekt på $0,6 \text{ kg/m}^2$

100 mm betong har en flatevekt på 240 kg/m^2

8.6.2 Helmholtz-absorbent

En Helmholtz-absorbent er basert på hulromsresonans og er en variant av mekanisk resonans. En tom ølflaske er et eksempel på Helmholtz-resonans. Lufta i luftkanalen (flaskehalsen) oppfører seg som en masse (et lodd) og hulrommet bak (selve flasken) oppfører seg som en fjær (som for en panelabsorbent), se figur 101 for oppbygging. Å plystre baserer seg også på en Helmholtz-resonans ut fra en liten luftkanal formet med leppene og hulrommet inne i munnen. Som vist i figur 101 plasseres det gjerne et porøst materiale ved enden av luftkanalen for å øke strømningsresistansen og absorpsjonsevnen. En Helmholtzabsorbent vil ha en resonansfrekvens bestemt av volumet og tverrsnittsarealet til luftkanalen i tillegg til volumet til hulrommet. Større luftkanal fører til lavere resonansfrekvens (mer masse), mens større hulrom fører til lavere resonansfrekvens (lavere stivhet). Også her må vi passe på at hulrommet er tett, slik at lufta i hulrommet blir komprimert og vi kan utnytte luftas elastiske egenskaper. Absorpsjonsegenskapene til en Helmholtz-absorbent er i prinsippet lik en panelabsorbent, se figur 100.



Figur 101: Oppbygging av en Helmholtz-resonator med én luftkanal.

Likning (31) viser hvordan resonansfrekvensen f_0 kan regnes ut.

$$f_0 = 54,6 \cdot \sqrt{\frac{S}{t \cdot V}} \quad (31)$$

S er tverrsnittsarealet til luftkanalen (m^2),

t er lengden til luftkanalen (m),

V er volumet til hulrommet (m^3).

I stedet for én luftkanal kan vi ha mange kanaler ofte i form av en perforert plate (mange sirkulære eller firkantede luftkanaler) eller spaltepanel (mange smale luftkanaler). Likning (32) viser formel for utregning av f_0 i et slikt tilfelle.

$$f_0 = 5,49 \cdot \sqrt{\frac{p}{d \cdot t}} \quad (32)$$

p er perforeringsgraden (%), det vil si andel åpningsareal i forhold til arealet til hele platen,
 d er hulromsdybden (m),
 t er lengden til luftkanalen (m).

Udempet resonans gir veldig smalbåndet resonans (høy Q-verdi), men også lang tidsrespons for både panel og Helmholtz-absorbent. Dette skjer også med EQ'er satt opp med høy Q-verdi. Denne tidsresponsen («gjenklangen»/«resonansen») kan bli sjenerende dersom dempingen er for lav. Vi kan sjekke hvor dempet resonatoren er ved å lage en impulsiv lyd eller bevegelse på eller ved absorbenten.

Fordeler og begrensninger med resonante absorbenter:

- Vil være mest effektive inntil veggen, også ved lave frekvenser.
- Kan tunes til å absorbere ved bestemte frekvenser.
- For udempet konstruksjon vil absorpsjonen bli smalbåndet, men høy absorpsjonskoeffisient ved resonansfrekvensen. Ved å dempe ned hulrommet (med porøabsorbent) blir absorpsjonen mer bredbåndet, men får lavere absorpsjonskoeffisient ved resonansfrekvensen (trade-off mellom båndbredde og absorpsjonskoeffisient).
- Påliteligheten til formler for utregning av f_0 vil ikke alltid gi et svar som stemmer med virkelig konstruksjon. Effekten av avstiving og neddemping for resonante absorbenter er ikke så lett å tallfeste uten mer avanserte beregningsverktøy og detaljerte data fra produsenter. Ofte er det vanskelig å få testet om absorbenten faktisk absorberer slik vi håper på, se mer detaljer under.

8.7 Effekten av møbler, tekstiler og eggekartonger

Vanlige tiltak for enkelt og billig å fikse på vanskelige akustiske forhold er møblering, tekstiler og eggekartonger. Møbler og tekstiler vil i hovedsak fungere som porøabsorbenter, så sant skumplast og tekstiler er slik at de slipper lydbølgen inn i materialet. Visse skumplasmaterialer har lukkede celler og tekstiler kan være så tettvevd eller ha et annet materiale framfor seg (for eksempel plasduk på sofaputer) som gjør at materialet i hovedsak kun reflekterer lyd. En enkel test er å forsøke å blåse gjennom materialet. Dersom du kan gjøre dette uten nevneverdig pustemotstand er materialet åpnet nok til at lydbølgen når inn og kan bli absorbert. Denne sammenhengen forklarer også hvorfor vi aldri bør male lydabsorberende plater av porøst materiale. Malingen fører til at absorbentene i stedet blir så å si fullreflekterende.

Eggekartonger er en klassiker innen akustikktiltak og består av tynn papp med ca. 6 cm høye kiler. I forhold til diffusjon på grunn av introduserte faseforskjeller (delkapittel 8.2.1.2) vil vi kunne få betydelig diffusjon for frekvenser hvor bølgelengde er mindre enn 24 cm, det vil si over ca. 1,4 kHz.

Pappen vil være noe fleksible, men på grunn av veldig liten tyngde og sjelde noe tett hulrom kan vi neppe regne med at vi får noen betydelig membranabsorpsjon innenfor det hørbare området, men muligens noe i diskant. Ut fra dette kan vi si at dersom et rom består av harde jevne vegger, kan eggekartonger hindre sjerende refleksjoner i diskanten. Siden eggekartonger er så billig å få tak i og dermed er lett å dekke en stor andel av veggearealet kan den lille effekten vi kan forvente fra eggekartonger allikevel kunne bli betydelig, så sant vi har så å si ingen absorpsjon eller diffusjon i utgangspunktet. Men har vi noe diffusjon og absorpsjon fra før vil eggekartonger neppe gi stor forandring.

8.8 Måling av absorpsjonskoeffisient

For å måle absorpsjonskoeffisienter etter standard metode plasseres absorbenten vi vil teste i et veldig klangfullt rom (*klangrom*, «*reverberation chambers*») med en del lyddiffuserende paneler/objekter. I slike rom vil Sabines formel være rimelig gyldig. Ved å måle etterklangstid med og uten absorbent kan vi finne økt absorpsjonsareal A forårsaket av absorbenten. Basert på overflatearealet S til absorbenten kan vi regne ut α ut fra $\alpha = A/S$.

I et veldig diffust rom skal i prinsippet plassering og fordeling av absorbenten ikke ha noe å si. I laboratiemålinger av absorbenter har man som standard at absorbenten plasseres på ett felt samlet på en av flatene i rommet. Men diffraksjonseffekter ved kantene til materialet vil påvirke målt absorpsjonskoeffisient. Denne effekten fører til målt α kan bli over 1 og at målt α vil kunne bli noe annet om vi måler med mange små fordelte flater av absorbenten sammenliknet med én stor flate. Se Appendix i læreboka for målt α for ulike materialer og avstand til reflekterende flate med mer.

Siden skikkelig måling av absorpsjonsegenskapene krever et spesielt laboratorium kan det være vanskelig å få målt konstruksjoner man lager selv. Det vil være mulig å få en idé om hva α er ved å måle nivået til refleksjoner fra materialer en ønsker å teste (se under for noe mer detaljer), men dette gir sjelden nøyaktige resultat.

8.9 Nivå til refleksjoner

Nivået til en refleksjon er styrt av hvor stor andel av energien til innkommende lydbølge som blir absorbert. Dersom vi vet absorpsjonskoeffisienten og det som kalles spredningskoeffisienten kan vi finne nivået til spekulær refleksjon. Eller vi kan gjøre motsatt: Ved å måle nivåer til refleksjoner kan vi regnes oss tilbake til disse koeffisientene. Polariteten til en refleksjon vil være lik direktelyden for harde flater, mens absorberende materialer kan innføre faseskift.

Likning (33) viser hvordan nivået til en refleksjon blir dempet på grunn av materialets absorpsjonskoeffisient α for tilfeller hvor diffusjon ikke er betydelig. Basert på formelen vil $\alpha = 0,5$ gi oss en nivåreduksjon på 3 dB. Denne formelen vil ikke ha noen løsning dersom α er over 1, siden dette vil føre til logaritmen av et negativt tall. Dette kan være tilfelle for visse materialer basert på laboratiemålinger (se over).

$$\Delta L = 10 \cdot \log_{10}(1 - \alpha) \quad (33)$$

9 SIMULERING AV ET ROMS AKUSTISKE RESPONS

For å beregne akustisk respons og oppnå et anslag av rommet ekkogram, ikke bare etterklangstid og totalt nivå må vi bruke programvare som kan gjør modellering av hele rommet. I slike programmer har vi også mulighet til å utforske effekten av geometri og få innblikk i retning til ulike refleksjoner. Disse programmene er som regel ikke gratis da de i hovedsak er utviklet for akustikere og de som prosjekterer og installerer/leverer lydsystemer. Disse beregningsverktøyene er basert på å behandle reflekterte lydbølger som om de var lysbølger, det vil si metoder fra geometrisk akustikk. Bølgeeffekter som diffraksjon og stående bølger og faseinformasjon til bølgene blir i utgangspunktet inkludert kun i begrenset grad, men vi kan emulere diffraksjons-effekter til en viss grad og med god erfaring kan man få akseptabelt samsvar mellom beregnede og målte forhold. Som en tommelfingerregel kan vi fra og med oktavbåndet 500 Hz for store rom få ok gyldighet ut fra å betrakte lydbølger som lysstråler. Dette fører til at rom som skal simuleres bør være så store at stående bølger ikke forventes å være noe stort problem (se kapittel 2), og resultater for lave frekvenser er minst pålitelige fra slike simuleringsverktøy.

Grunnen til at bølgefenomener ikke er inkludert i disse beregningsverktøyene er at det krever svært stor databehandlingskapasitet for å beregne alle de reflekterte bølgene i rommet. I etterklangslyd har vi mange tusen bølger som dukker opp til et gitt øyeblikk. For å klare å beregne alle disse refleksjonene er faseinformasjon utelatt og bølgene blir kun representert som lysstråler. For modellering av høyttalere og små rom er det etter hvert blitt mulig å gjøre datasimulering av lydbølger ved hjelp av BEM (*Boundary Element Method*) som gir en mer korrekt fysisk modellering. Vi kan eventuelt gjøre utregninger selv «på papiret» i forhold til rommoder og kamfiltereffekter.

Fordi man kun delvis kan få med riktige effekter av diffraksjon lages det fortsatt skalamodeller av planlagte rom. Dette gjøres ved å bygge en modell for eksempel i skala 1:8 eller ned i 1:50. I skalamodellering klarer vi ikke modellere med noe særlig annet enn en omnidireksjonell kilde (ofte en gnistkilde), siden det er dyrt og vanskelig å lage hele høyttalersystem i skala 1:8 eller mindre. Eksempler på skalamodeller er beskrevet i blant annet Barron (2010) og Dammerud (2009).

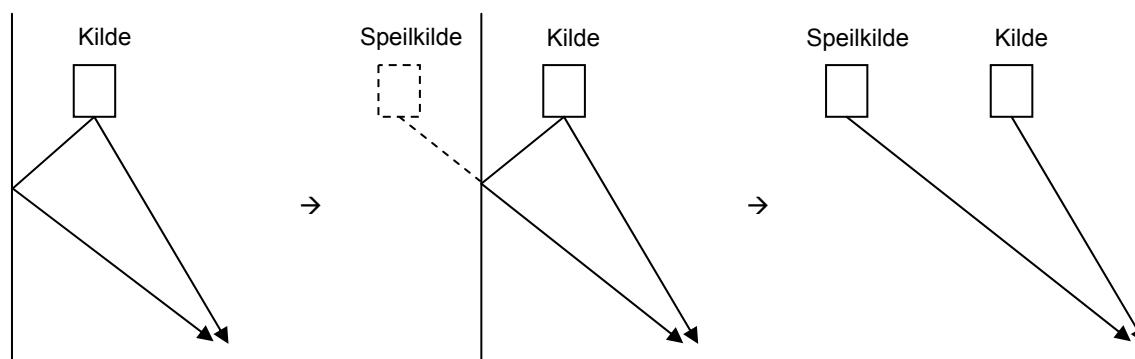
De fleste modelleringsprogram for lyd i store rom baserer seg på det som kalles speilkildemetoden og strålegangsmetoden. Speilkildemetoden erstatter reflekterende flater med speilkilder og brukes for de aller tidligste refleksjonene fra rommet (sjelden høyere refleksjonsorden enn 2, det vil si refleksjoner som har gått vi maksimalt to flater). I speilkildemetoden vil det være mulig å ta med faseforhold. Strålegangsmetoden ser på lyd som lysstråler.

Under følger mer informasjon knyttet til speilkildemetoden, strålegangsberegninger og inn- og utdata fra beregningsverktøy for lyd i store rom. Til slutt er det listet opp vanlig utfordringer og fordeler med disse verktøyene sammen med noen eksempler på eksisterende produkter på markedet som er mye i bruk.

9.1.1 Speilkildemetoden

Med speilkildemetoden erstattes en reflekterende flate med en såkalt speilkilde. Dette er forsøkt illustrert i figur 102. Med mange reflekterende flater og høyere ordens refleksjoner blir det veldig mange speilkilder. Høyere ordens refleksjoner går via mer enn én reflekterende flate mellom kilde og mottaker. For eksempel vil en 2. ordens refleksjon gå via to reflekterende flater på sin vei fra

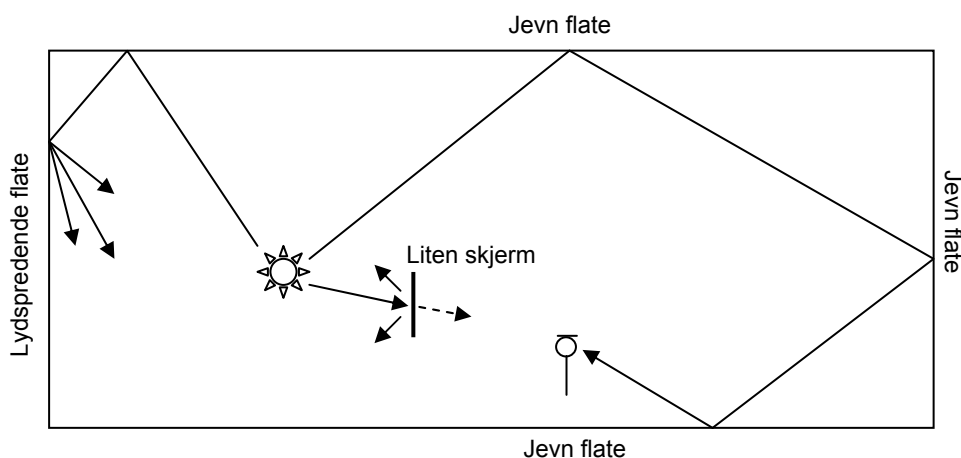
lydkilde til mottaker – for eksempel to vegger eller via gulvet og én vegg. Som regel vil vi med denne metoden begrense oss til å studere refleksjoner opp til en refleksjonsorden mellom 1. og 3.



Figur 102: Speilkildemetoden.

9.1.2 Strålegangsmetode

Strålegangsmetoden er del av geometrisk akustikk. Med strålegangsmetode sender man en virtuell laserstråle ut fra lydkilden i en bestemt retning ut fra lydkilden. Figur 103 viser hvordan ulike stråler går ut fra en lydkilde og forplanter seg ut i rommet. For å dekke lyd i alle retninger fra lydkilden trenger man mange stråler i alle mulige forskjellige retninger, i de fleste tilfeller mange tusen stråler for å få resultater som noenlunde tilsvarer virkeligheten. Dersom man vet direktiviteten til lydkilden kan man justere styrken til laserstrålen ut fra retningen laserstrålen har ut fra kilden. Så følger man hver enkelt stråle rundt i rommet til nivået er blitt ubetydelig. Når strålen treffer en reflekterende overflate brukes Snells lov til å finne retningen strålen fortsetter i. Når strålen treffer en diffuserende flate vil en andel av lydenergien forsvinne over i diffus etterklanglyd (basert på spredningskoeffisienten s for flate) hvor det ikke lenger ført noe informasjon om retning til lyden (kun en felles «pott» basert på alle bidra fra diffuserende flater). På denne måten får vi med effekten av lydspredende/diffuserende overflater. Måten dette er implementert på varierer mellom de ulike simuleringsprogrammene. Ved å ha transparente og lydspredende flater kan man også delvis få med effekten av diffraksjon. Ved en gitt mottakerposisjon sjekker man hvilke stråler som passerer til enhver tid og finner totalt oppsamlet etterklanglyd. Dette blir grunnlaget for rommets impulsrespons og blir som regel kombinert med resultatet fra speilkildemetoden.



Figur 103: Strålegangsmetode.

9.1.3 Inndata

Det første som må gjøres når en ønsker å simulere lyd i et rom er å bygge en geometrisk modell av rommet. Den geometriske modellen lages i selve simuleringsprogrammet eller eksterne tegneprogram som CAD eller SketchUp. Deretter må de akustiske egenskapene til hver enkelt flate beskrives. Når vi lager den geometriske modellen er hovedmålet å lage en geometrisk beskrivelse som er tilstrekkelig for å kunne simulere akustiske forhold. Svært detaljerte modeller vil ofte ikke være nødvendig fordi lydbølgene ikke nødvendigvis vil «se» alle de små detaljene. I tillegg kan små detaljer heller representeres i form av øke de lydspredende egenskapene til én jevn flate. Dette bidrar også til at simuleringen vil gå raskere siden det er færre flater å ta med i strålegangsberegningen. Noe av utfordringen (trikset) med å lage selve den geometriske modellen vil være å lage en modell som er godt tilpasset begrensningene i beregningsmetodene i simuleringsprogrammet.

De akustiske egenskapene til flatene i rommet vil være absorpsjonskoeffisient (λ), spredningskoeffisient (s) og eventuelt også transmisjonskoeffisient (τ) for flater som skal regnes som akustisk delvis gjennomsiktige (på grunn av diffraksjon). Spredningskoeffisienten er lik 0 for en flate som er helt flat og jevn (ikke-spredende), mens en verdi lik 1 vil representere en flate som sprer lyden jevnt i alle retninger. En bestemt direktivitet/polarplot til lydspredningen er som regel antatt av simuleringsprogrammet.

Etter at selve rommet er beskrevet må lydkilder plasseres inn. Egenskaper som direktivitet, nivå, eventuell tidsforsinkelse og så videre må angis. Direktivitet til mange musikkinstrumenter er kjent og mange høyttalerprodusenter utgir datafiler som beskriver de akustiske egenskapene til høyttalerne som direktivitet med mer. Det er etablert et standard filformat for høyttalerdata, CLF – Common Loudspeaker Format. Disse filene kan importeres inn i simuleringsverktøyet. Simuleringsverktøyene har også sine egne dataformat.

9.1.4 Utdata

Simuleringsprogrammet vil generere en impulsrespons for en gitt mottakerposisjon. Ut fra denne impulsresponsen regner man ut romakustiske parametere eller man kan auralisere responsen på samme vis som ved måling i eksisterende rom. Det er lett å lage oversikt over resultater for hele publikumsarealet. I tillegg kan man undersøke refleksjoner i detalj og sjekke retning til refleksjoner med mer.

9.1.5 Utfordringer

Typiske utfordringer når vi bruker simuleringsverktøy basert på geometrisk akustikk:

- Ta stilling til hvor detaljert den geometriske modellen skal være.
- Ta stilling til absorberende, diffuserende og transparente egenskaper til overflater og objekter i rommet.
- Ta stilling til hvordan man skal emulere diffraksjon ved hjelp av sprednings- og transmisjonskoeffisienten.

Å vite svarene til disse problemstillingene krever god erfaring med simuleringsverktøy og å kjenne godt til begrensninger og muligheter.

9.1.6 Fordeler

På moderne datamaskiner er det rimelig raskt å gjøre strålegangsberegninger. En stor sal vil kunne modelleres typisk i løpet av mindre enn en time. For datamodeller vil det være lett å gjøre endringer i salens design i motsetning til skalamodellering. I datamodeller kan vi modellere med høyttalerdata fra virkelige høyttalere.

9.1.7 Eksempler på programvare

Programvare for simulering av lyd i rom er utviklet primært for PC. For store rom (geometrisk akustikk):

- EASE
- CATT-Acoustic
- ODEON

EASE har lenge vært «standarden» for simulering lydsystemer, mens CATT-Acoustic og Odeon er mye brukt når man skal undersøke ren akustisk respons. Men disse to programmene har også kommet med gode muligheter for simulering av lydsystemer. Man kan laste ned gratis demo-versjoner av disse programmene.

For simulering av forhold i små rom (BEM):

- ABEC (gratis)

10 KONTROLL AV STØY

Støy er ofte definert som uønsket lyd og har som regel lav informasjonsverdi. Støy vil lett maskere/overdøve eller forstyrre vårt fokus på de lydene vi ønsker/trenger å høre. For studio og konsertsaler er det vesentlig at rommet er stille (uten forstyrrende støy fra for eksempel ventilasjonsanlegg eller veitrafikk). Hvor mye støy vi har vil være påvirket av lydisolasjon og støy fra tekniske installasjoner som ventilasjonsstøy. Dette er beskrevet i mer detalj under.

10.1 Luftlyd, trinnlyd og vibrasjoner

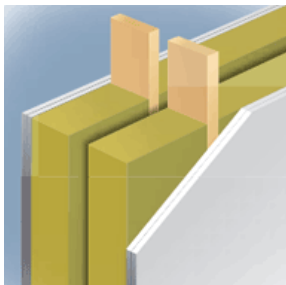
Luftlyd er lydbølger i lufta. Disse lydbølgene vil sette konstruksjoner i bygget i bevegelse og dermed skape «overhøring» av lyd fra ett rom til et annet. Trinnlyd er lyd fra personer som går på gulvet til rom i andre deler av bygget. Trinnene setter konstruksjoner direkte i bevegelse (ikke lydbølger via lufta). Vibrasjoner tilsvarer trinnlyd ved at konstruksjoner i bygget settes direkte i fysisk bevegelse/vibrasjon av vibrerende objekt/konstruksjon. Vibrasjoner er også knyttet til svingninger med frekvens under det hørbare (ca. 20 Hz). Med god lydisolasjon er alle disse lydveiene godt forhindret eller dempet.

10.2 Lydisolasjon

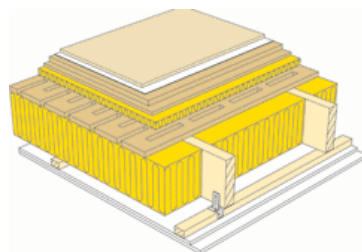
For å unngå at lyder utenfra når inn til vårt rom må vi ha tilstrekkelig lydisolasjon. Lydisolasjon oppnås som regel ved å skille overflatene til rommet mest mulig fysisk fra resten av bygget. Veggene kan ha atskilte stenderverk, gulvet kan være flytende (elastiske materialer under gulvet, som mineralull), himling opphengt i elastiske metallprofiler og bruk av materialer som ikke lett stråler ut lyd (ofte gips). Mineralull brukes blant annet for å dempe ned resonanser i hulrom og gi et elastisk gulv. Eksempler på lydisolerende konstruksjoner er vist i figur 104. Tunge konstruksjoner vil også forbedre isolasjonen, siden tunge materialer motsetter seg svingninger på grunn av sin treghet. Ofte vil lydisolasjonen være mest begrenset ved lave frekvenser, på grunn av begrenset tyngde til byggekonsstruksjon eller på grunn av vibrasjonsoverføringer i bygget fra for eksempel tog/trikk/vei. Åpninger, som gjennomføringer i vegg for kabler og rør kan også føre til lydlekkasjer.

Lydisolasjon måles i antall dB som konstruksjonen klarer å dempe lyden med. For isolasjon av luftlyd betegnes denne reduksjonen i dB som R_w .

Atskilte gipsvegger med mineralull



Flytende gulv



Himling festet med lydprofiler



Figur 104: Lydisolerende konstruksjoner.

10.3 Ventilasjonsstøy, støy fra utstyr

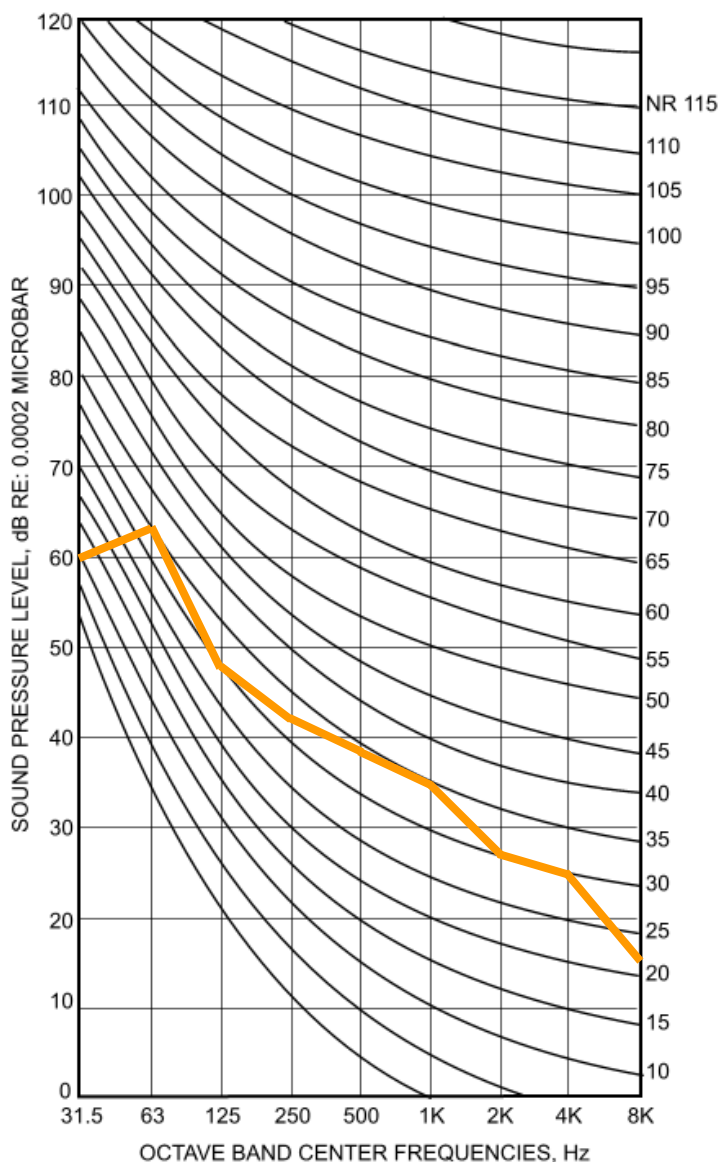
Utstyr som befinner seg i rommet vårt kan gi uønsket, som datamaskiner, og ventilasjonskanaler. Ved å ha et eget maskinrom for støyende utstyr blir bakgrunnsstøynivået i rommet mye lavere. Ved

å feste vibrerende utstyr med elastisk opplagring vil vi unngå vibrasjonsstøy. Ventilasjonskanaler kan dempes ned med egne dempeledd, som for en eksospotte på bil.

10.3.1 Noise rating (NR)-kurver

Noise rating brukes for å vurdere bakgrunnsstøynivået som i utgangspunktet er målt i dB SPL. Hvilken «klasse» en gitt bakgrunnsstøy tilhører kan finnes ut fra et standard sett av «Noise rating curves» – NR-kurver. Disse NR-kurvene brukes som krav og dokumentasjon av bakgrunnsstøy for eksempel i konsertsaler.

Dersom et rom tilfredsstillende for eksempel NR-50 skal ingen målte oktavgbåndsverdier i dB SPL for bakgrunnsstøyen overgå den kurven som definerer NR-50, se figur 105. Vi ser at kurvene til de ulike NR-klasse tillater høyere nivåer ved lavere frekvenser. Dette er basert på vår hørsels følsomhet ved ulike frekvenser (NR-kurvene er grove, forenklede varianter av Fletcher Munson-kurvene). I figur 105 er det vist et eksempel på målt bakgrunnsstøy som kvalifiserer til NR-35. For kontrollrom er det i ITU-R BS.1116-1 satt minimum NR-10 og maksimum NR-15 som grense.



Figur 105: NR-kurve og eksempel på målt bakgrunnsstøynivå som kvalifiserer til NR-35.

11 PROBLEMLØSING INNEN ROMAKUSTIKK

Når noe ikke fungerer som ønsket/forventet er det viktigste først å stille riktig diagnose på problemet. (Generell problemhåndtering: PARK – Problem, Analyse, Respons, Konsekvens.)

Vanlige problemer med lyd i rom:

- Rommoder
- Tidlige refleksjon som gir kamfiltre eller forstyrrer retningsopplevelse
- Ekko
- Etterklang
- Støy utenfra/lydlekkasje til naboer
- Bakgrunnsstøy

Vanlige løsninger på problemene:

- Absorpsjon
 - Porøs
 - Mikroperforerte
 - Panel
 - Helmholtz
- Diffusjon
 - Brutte eller buede til flater (vinklet, konveks, konkav, unngåelse av fokuspunkt).
 - Objekter/flater med begrenset størrelse.
 - Flater med ulike deler som skaper faseforskjeller til reflektert lyd (som QRD).
- Endre romform, -størrelse og proporsjoner
- Plassering av lydkilder og lyttere/mikrofoner
- Lydisolering, demping av ventilasjonsanlegg og vibrasjonsisolering.

Absorpsjon versus diffusjon vil ofte i stor grad dreie seg om i hvilken grad vi ønsker en hørbar etterklang fra rommet (for eksempel detaljrikdom versus å ha et bra representativt lytterom), hvor stort budsjett vi har og hvor mye plass i rommet som er tilgjengelig for nødvendige konstruksjoner.

Å fikse det svakeste leddet vil gi mest positiv uttelling. For eksempel aksielle moder versus kamfilter versus romgeometri. Eller etterklangstid versus kamfilter versus kritisk avstand. Ut fra å anslå de ulike effektene eller gjøre målinger, kan vi ha en formening om hva som er det svakeste leddet.

Det er viktig også å være klar over at noen effekter av reflektert lyd og interferens kan bli mer betydningsfulle når vi demper ned et roms akustiske respons i forsøk på å forbedre forholdene. Ved forståelse av underliggende effekter og forhold kan vi lettere ha en riktig forventning om hva vi

kan oppnå når vi gjør tiltak/endringer, og forsøke å tilrettelegge tiltak i forhold til de underliggende effektene. Dette vil øke sjansene for at penger vi investerer i tiltak fører til mest mulig forbedring av forholdene.

12 LITTERATUR

- Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R., & Gade, A. C. (2010). Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *J. Acoust. Soc. Am.* **127**(1). Se <http://www.emu.dk/gym/fag/mu/opslag/akustik/JASA.pdf>
- Barron, M. (2005). Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoust. Sci. & Tech.* **26**, 2. Se http://chomikuj.pl/cli/Akustyka/Barron+-+Using+the+standard+on+objective+measures+for+concert+auditoria*2c+ISO+3382*2c+to+give+reliable+results,142570456.pdf
- Barron, M. (2007). When is a concert hall too quiet? *Proc. ICA 2007*, Madrid. Se http://www.akutek.info/Papers/MB_too_quiet_ICA2007.pdf
- Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2. utgave. London: Spon Press.
- Beranek, L. L. (2008). Concert Hall Acoustics—2008. *J. AudioEng. Soc.*, Vol. 56, No. 7/8. Se <http://www.leoberanek.com/pages/concerthalls2008.pdf>
- Beranek, L. L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, 2. utgave. New York: Springer.
- Cavanaugh, W. J., Tocci, G. C., & Wilkas, J. A. (2009). *Architectural Acoustics: Principles and Practice*, 2. utgave. Wiley: New York.
- Cox, T. & D'Antonio (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*, 2. utgave, Oxon: Taylor & Francis.
- Dammerud, J. J. (2009). *Stage Acoustics for Symphony Orchestras in Concert Halls*. PhD-avhandling, University of Bath, England. Se <http://stageac.wordpress.com/phd>
- Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2009). *Master Handbook of Acoustics*, 5. utgave. New York: McGraw-Hill.
- Griesinger, D. (2005). The Physics and Psychophysics of surround recording part 2. AES Tokyo Convention. Se http://www.davidgriesinger.com/Physics_and_psycho2.ppt
- Griesinger, D. (2010). The Relationship between Audience Engagement and the ability to Perceive Pitch, Timbre, Azimuth and Envelopment of Multiple Sources. *Proceedings of ISRA 2010*, Melbourne. Se http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ISRA2010/Papers/O6.pdf
- Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics*, 5. utgave. New York: Spon press.
- Lokki, T., Pätynen, J., Tervo, S., Siltanen, S., & Savioja L. (2011). Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *J. Acoust. Soc. Am.*, **129**(6). Se <http://dx.doi.org/10.1121/1.3579145>
- Long, M. (2013). *Architectural Acoustics*, 2. utgave. Burlington: Elsevier Academic Press.
- Neubauer, R., & Kostek, B. (2004). Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption. Ingolstadt: Consulting Bureau. Se http://sound.eti.pg.gda.pl/papers/prediction_of_reverberation_time.pdf

Newell, P. (2011). *Recording Studio Design*, 3. utgave. London: Focal Press.

Patronis, E, & Davis, D. (2006). *Sound System Engineering*, 3. utgave. New York: Focal Press.

Rossing, T. D. (ed.) (2007). *Springer Handbook of Acoustics*, New York: Springer.

Toole, F. E. (2008). *Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms*. New York: Focal Press.

13 FIGURKILDER

Figur 2: Hentet fra <https://en.wikipedia.org/wiki/File:BodyPlanes.jpg>

Figur 3: Hentet fra http://www.gearslutz.com/board/attachments/studio-building-acoustics/236527d1306312954-making-sense-modes-standing-waves-bass-traps-acoustics_07_modes_1.jpg

Figur 7: Hentet fra <http://www.mcsquared.com/metricmodes.htm>

Figur 8: Hentet fra http://www.realtraps.com/art_modes_1f.gif

Figur 9: Hentet fra http://www.realtraps.com/spl_3b.gif

Figur 27: Hentet fra <http://www.hispasonic.com/blogs/acustica-salas-control/35975>

Figur 30: Newell, P. (2011). *Recording Studio Design*. 3. utgave, Focal Press: London.

Figur 31: Newell, P. (2011). *Recording Studio Design*. 3. utgave, Focal Press: London.

Figur 32: Hentet fra http://cdn.avforums.com/b/b8/b8fa32f0_vbattach218958.jpeg

Figur 33 og 34: Hentet fra http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-!!!PDF-E.pdf

Figur 35: Newell, P. (2011). *Recording Studio Design*. 3. utgave, Focal Press: London.

Figur 37: Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2. utgave, Spon Press: London.

Figur 40: Hentet fra <http://academic.reed.edu/humanities/110tech/theater.html>

Figur 41: Venstre del hentet fra <http://www.visitoslo.com/en/product/?TLp=183361>. Høyre del hentet fra ukjent kilde.

Figur 42: Hentet fra <http://www.photosight.org/photo.php?photoid=42130#>

Figur 43: Venstre del hentet fra <http://bilingualnews.files.wordpress.com/2013/06/la-scala-milano7.jpg>. Høyre del hentet fra http://www.statsbygg.no/System/21155/StoreSal2_600_0.jpg

Figur 45: Hentet fra <http://www.guardian.co.uk/music/tomserviceblog/2008/sep/29/classical.music.musikverein>

Figur 46: Hentet fra http://www.kulturforum-berlin.de/extrafenster/engl_philharmonie.html

Figur 47: Hentet fra <http://musikkogdrill.files.wordpress.com/2012/02/festkonsert-2.jpg>

Figur 48: Hentet fra http://www.nytimes.com/2007/04/14/arts/design/14hall.html?_r=0

Figur 49: Hentet fra http://www10.aeccafe.com/blogs/arch-showcase/files/2011/04/Atelier_Thomas_Pucher_Sinfonia_Varsovia_002.jpg

Figur 50: Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R., & Gade, A. C. (2010). Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *J. Acoust. Soc. Am.* **127**(1).

Figur 51 til 62: Eksportert fra måleprogrammet WinMLS 2004.

Figur 64 og 65: Eksportert fra måleprogrammet WinMLS 2004.

Figur 69: Eget foto.

Figur 70 og 71: Eksportert fra måleprogrammet WinMLS 2004.

Figur 86: Hentet fra ukjent kilde.

Figur 87: Hentet fra

<http://i299.photobucket.com/albums/mm295/VinceHoffman/DIYSkylineDiffusor03.jpg>

Figur 88: Hentet fra http://proaudiotoys.com/images/RPG_Skyline_Diffusor_System.jpg

Figur 89: Hentet fra ukjent kilde.

Figur 89: Hentet fra <http://nickseaver.net/hssp/2009/images/anechoic.jpg>

Figur 98: Hentet fra <http://www.deamp.com>

Figur 104: Hentet fra <http://www.glava.no>

Figur 105: Basert på bilde hentet fra http://www.industrialacoustics.com/uk/reference/bluebook/F-9_graph.gif