

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Janne Nummela

SÄHKÖAKUSTINEN HARJOITUSSALI SINFONIAORKESTERILLE

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 12. kesäkuuta 2001.

Työn valvoja

Professori Matti Karjalainen

Työn ohjaaja

DI Tapio Lokki

Tekijä: Janne Nummela
Työn nimi: Sähköakustinen harjoitussali sinfoniaorkesterille

Päivämäärä: 12. kesäkuuta 2001 **Sivumäärä:** 82

Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Professuuri: Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka koodi: S-89

Työn valvoja: Professori Matti Karjalainen

Työn ohjaaja: DI Tapio Lokki

Tässä diplomityössä on esitetty sähköakustisen harjoitussalin prototyyppi sinfoniaorkesterille. Sähköakustinen harjoitussali on konserttisalia huomattavasti pienikokoisempi ja rakennuskustannuksiltaan edullisempi. Prototyyppi perustuu uuteen katkaistun salin konseptiin, jolla orkesteriharjoitussali toteutetaan markkinoilla olevista pienemmistä sähköakustisista harjoitushuoneratkaisuista poikkeavalla tavalla.

Katkaistun salin konseptissa konserttisalin yleisötilan akustista vaikutusta ääneen simuloidaan kaiuttoman seinän ja aktiiviakustisen järjestelmän yhdistelmällä. Lavatila on identtinen konserttisalin kanssa. Kaiuton seinä pystytetään lavan eteen katkaisemaan sali toisen penkkirivin kohdalla. Sähköakustisen järjestelmän kaiuttimet sijoitetaan rivistöksi kaiuttomalle seinälle.

Työssä on tehty yleiskatsaus sähköakustisten järjestelmien teoriaan ja historiaan. Prototyypin kannalta keskeisiä tutkimusongelmia ovat akustisen takaisinkytketymisen hallinta, äänen väritymä, keinotekoisien kaiunnen äänenlaatu ja mikrofoniin sekä kaiuttimien määrä ja sijoittelu.

Suoritetun tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että sähköakustiikan avulla on edullisesti toteutettavissa selvästi toimivampi ja monipuolisempi harjoitusympäristö kuin samankokoisella perinteisesti akustoidulla harjoitustilalla.

Avainsanat: sähköakustiikka, aktiiviakustiset järjestelmät, akustinen takaisinkytketyminen, aikavarianssi, äänen väritymä, harjoitushuone, diffuusi äänikenttä, lava-akustiikka

Author: Janne Nummela
Title of thesis: Electroacoustic Rehearsal Room for a Symphony Orchestra
Date: June 12th, 2001 **Number of pages:** 82

Department: Electrical and Communications Engineering
Professorship: Acoustics and Audio Signal Processing code: S-89

Supervisor: Professor Matti Karjalainen

Instructor: M.Sc. Tapio Lokki

Music rehearsal rooms are sometimes used, instead of concert halls, by symphony orchestras in everyday rehearsals. In this thesis, a new system configuration for a rehearsal room is introduced. A rehearsal room with an electro-acoustic enhancement system offers a compact and advantageous alternative rehearsal environment for symphony orchestra.

The proposed prototype is based on the new concept of "truncated hall". A truncated hall can be realized using a highly absorbing wall in place of the first seating rows, the stage architecture being identical with that of a full-size concert hall. Thus only the sound coming from the audience area back to the stage has to be created with an electroacoustic enhancement system. Reverberation enhancement is applied in order to achieve as natural concert hall acoustics as possible. Loudspeaker arrays are located on the highly absorbing wall.

This work discusses the theoretical, historical and practical aspects of electroacoustic enhancement systems. Important advantages and problems such as control of stability and coloration in electroacoustic systems, sound quality of artificial reverberation as well as the location and number of loudspeakers and microphones, are reviewed.

Based on presented research, we may assume that using active systems it is possible to realize, with considerably low costs, a rehearsal environment which is more useful and versatile than a passive one with the same dimensions.

Keywords: electroacoustic, reverberation enhancement system (RES), acoustic feedback, gain before instability (GBI), time variance, diffuse sound field

A l k u l a u s e

Tämä diplomityö on tehty osana "Tila-akustiikan hallinta" (TAKU) tutkimushanketta. TAKU on Tekesin (Teknologian kehittämiskeskus) "Värähtelyn ja äänen hallinta"-teknologiaohjelmaan kuuluva nelivuotinen tavoitetutkimushanke. Hankkeessa on mukana alan johtavat suomalaiset tutkimuslaitokset ja useita alalla toimivia yrityksiä. Hanke jakautuu useaan eri kokonaisuuteen, joissa tutkitaan mm. akustisia materiaaleja, työkoneiden ohjaamoakustiikka, äänitarkkaamoiden akustiikan hallintaa ja saliakustiikkaa. Toteutettu tutkimus edustaa näiden tutkimushankkeiden joukossa kokeellisinta osa-aluetta. Aihe muotoutui vuoden 1998-99 aikana musiikkitalo-projektin yhteydessä. Aiheen liittäminen TAKU-projektiin oli professori Matti Karjalaisen ehdotus.

Projektin tukiryhmän jäseniä professori Matti Karjalaista, DI Henrik Mölleriä (Insinööritoimisto Akukon Oy) ja DI Veikko Hyvöstä (Genelec Oy) kiitän tutkimusideoista.

Erityiset kiitokset kuuluvat työni ohjaajille, DI Tapio Lokille ja TkT Lauri Saviojalle, jotka lukivat käsikirjoitusta sen valmistumisvaiheissa ja jaksoivat kiinnittää huomiota eri tasoilla ilmenneisiin puutteisiin. Kiitän heitä myös käyttöön saamistani Matlab-rutiineista, sekä DIVA-projektin yhteydessä kehitetystä säteenseuranta- ja auralisaatiomallista, jolla katkaistun salin analysointi helpottui.

DI Riitta Väänästä kiitän moitteettoman jälkikaiunta-algoritmin kehittämisestä, ja DI Jarmo Hiipakkaa algoritmin aikavarianttiin toteutukseen johtaneesta ideasta sekä koko Tietoliikenne- ja multimedialaboratorion tutkijakuntaa lukuisista signaalinkäsittelyyn ja yleishyödyllisiin aiheisiin liittyvistä neuvoista.

Kiitokset myös Yleisradio Oy:lle, Genelec Oy:lle, Akukon Oy:lle ja Teatterikorkeakoululle yhteistyöstä ja välineiden lainaamisesta.

Vanhempiani kiitän tuesta ja ymmärtämyksestä.

Hausjärvellä 27. toukokuuta 2001

Janne Nummela

Sisällysluettelo

1 Johdanto	1
1.1 Aiempi tutkimus	1
1.2 Työn sisältö	2
 2 Huoneakustiikka	 4
2.1 Äänen käyttäytyminen suljetussa tilassa	4
2.2 Huonevaste	7
2.2.1 Huonesiirtofunktio (RTF)	8
2.3 Äänikenttä konserttisalissa	9
2.4 Diffuusi äänikenttä	11
2.4.1 Energiatarkastelu ja pintaominaisuudet	13
2.4.2 Tasapainotila	14
2.5 Jälkikaiunta-aika	15
2.5.1 Jälkikaiunta-ajan laskukaavat	15
2.5.2 Jälkikaiunta-ajan määrittäminen mittaamalla	16
2.6 Saliäänenlaadun käsitteitä	16
2.7 Geometrisen akustiikan menetelmiä	17
2.8 Lava-akustiikka	18
2.8.1 Esiintymislavalle asetettuja vaatimuksia	20
2.8.2 Lavan mitat, soittajien sijainti ja nostimet	21
2.8.3 Lavan seinät ja katto	21
2.8.4 Lavan lattia	22
 3 Sähköakustinen järjestelmä	 23
3.1 Järjestelmäluokitus	23
3.2 Regeneratiivinen monikanavajärjestelmä	26
3.3 Energiapohjainen tarkastelu	28
3.4 Aktiiviakustisen järjestelmän stabiilisuus	29
3.4.1 Simulaatio	31

4 Järjestelmäsuunnittelu ja äänen väritymä

4.1	Äänen väritymä	33
4.1.1	Äänen väritymä keinoitekoisessa kaiunnassa	34
4.1.2	Äänen väritymä äänentoistossa	34
4.1.3	Äänen väritymä akustisessa takaisinkytketyisessä	35
4.2	Mikrofonien sijoittelu, lukumäärä ja tyyppi	36
4.2.1	Mikrofonit lähteen lähikentässä	36
4.2.2	Mikrofonit diffuusissa äänikentässä	36
4.3	Kaiuttimien sijoittelu ja lukumäärä: äänen lokalisaatio	37
4.4	Vahvistustaso	39
4.4.1	Kanavien lukumäärä	39
4.5	Muita näkökohtia aktiiviakustisen järjestelmän suunnittelussa	40

5 Signaalinkäsittely 42

5.1 Aikavarianttien järjestelmien kehitys	43
5.2 Lineaariset aikavariantit komponentit.	44
5.3 Vaihekulmamodulaattorit	45
5.3.1 Vaihemodulaatio	46
5.3.2 Viivemodulaatio	47
5.3.3 Taajuusmodulaatio.	48
5.3.4 Taajuussiirto.	48
5.3.5 Amplitudimodulaatio.	48
5.4 Takaisinkytkettyneen signaalin kumoaminen tulosignaalista . . .	49
5.5 Keinotekoinen kaiunta.	50
5.5.1 Takaisinkytketty viiveverkko (MFDN).	52

5.6	Jälkikaiunnan luonnollisuus	53
6	Katkaistun salin konsepti	55
6.1	Toimintaperiaate	55
6.2	Katkaistun salin tietokonesimulaatio	57
6.3	Kaiuton seinä ja sähköakustinen järjestelmä.	58
6.4	Pohdintoja	59
7	Prototyyppi	62
7.1	Rakenne	62
7.1.1	Kaiuton seinä	62
7.1.2	Järjestelmä.	63
7.2	Signaalinkäsittely	66
7.2.1	Testatut kaiunta-algoritmit	67
7.3	Huoneakustiset mittaukset.	69
7.4	Pohdintoja	71
7.5	Yhteenveto.	73
8	Yhteenveto ja päätelmät	74
8.1	Jatkotutkimuksen kohteita	74

Symboliluettelo

A	pinta-ala (suorakulmainen huone)
a_a	ilman absorptiokerroin
B	keskimääräinen ääni-intensiteetti seinäpinnoille
B_w	kaistanleveys
c	äänen nopeus ilmassa
E	yksikkömatriisi
f_g	Schroederin taajuus
G_{alg}	takaisinkytkentäsilmuikkavahvistus
G_{ML}	vahvistusmatriisi
$h(t)$	impulssivastefunktio
H_{del}	kaiuttimen ja mikrofonin aikaviivettä kuvaava siirtofunktio
H_{EA}	järjestelmän elektroakustisen osan siirtofunktio kuuntelupisteeseen
H_{FIR}	kumoamissuotimen siirtofunktio
H_{FIR}	FIR-suotimen siirtofunktio
H_{HPF}	ylipäästösuotimen siirtofunktio
H_{LM}	siirtofunktio kaiuttimesta mikrofoniin
H_{LPTV}	lineaarisen periodisesti aikavariantin suotimen siirtofunktio
H_{LR}	siirtofunktio kaiuttimesta kuuntelupisteeseen
H_{rev}	kaikualgoritmia kuvaava siirtofunktio
H_{SM}	siirtofunktio lähteestä mikrofoniin
I	ääni-intensiteetti
$I(j, x)$	ääni-intensiteettifunktio
k	seinäheijastusten keskimääräinen lukumäärä
L_x	huoneen leveys
L_y	huoneen pituus
L_z	huoneen korkeus
m	mikrofonien lukumäärä
m^2	tehovahvistuskerroin
n	kaiuttimien lukumäärä
P_L	kaiuttimen säteilemä teho
P_o	lähteen ääniteho
$R(w)$	signaali kuuntelupisteeseen
R_0	kaiuntasäde
S	huoneen kokonaisabsorptioala
$S(w)$	lähdesignaali
S_L	silmuikkavahvistus
T_{60}	jälkikaiunta-aika
V	huoneen tilavuus
w	huoneen energiatiheys
w_s	huoneen energiatiheys tasapainotilassa
$x(t)$	tulosignaali
$y(t)$	järjestelmä vaste

Lyhenneluettelo

A/D	analogi-digitaalimuunnos
ACS	Acoustic Control System
AM	amplitudimodulaatio
ARS	active reverberation systems
CPU	keskusprosessoriyksikkö (central processing unit)
D/A	digitaali-analogimuunnos
DIVA	Digital Interactive Virtual Acoustics
DIVA-TI	aikainvariantti kaikualgoritmi
DIVA-TV	aikavariantti kaikualgoritmi
DM	viivemodulaatio (delay modulation)
DSB-(SC)	kaksisivukaistamodulaatio (double sideband suppressed carrier)
DSP	digital signal processing
EQ	Ekvalisaattori
FFT	nopea Fourier-muunnos (fast Fourier transform)
FIR	äärellinen impulssivaste (Finite Impulse Response)
FM	taajuusmodulaatio (frequency modulation)
FS	taajuussiirto (frequency shift)
GBAA	vahvistus ennen kuultavia ilmiöitä (gain before audible artefacts)
GBI	vahvistus ennen epästabiilisuutta (gain before instability)
IACC	korvien välinen ristikorrelaatio (inter aural cross correlation)
IRMA	Impulse Response Measurement Application
LARES	Lexicon Active Room Enhancement System
LPTV	lineaarinen priodisesti aikavariantti suodin (linear periodically time-variant filter)
MFDN	takaisinkytketty viiveverkko (multiple feedback delay networks)
MLG	keskimääräinen silmukavahvistus (mean loop power gain)
MLS	mean least sequence
MTF	modulaatiosiertofunktio (modulation transfer function)
PM	vaihemodulaatio (phase modulation)
RES	reverberation enhancement systems
SSB	yksisivukaistamodulaatio (single sideband)
TeaK	Teatteri Korkeakoulu
TKK	Teknillinen Korkeakoulu
VRAS	Variable Room Acoustic System
Yle	Suomen Yleisradio

1 Johdanto

Aktiiviakustisella järjestelmällä (reverberation enhancement system, RES) tarkoitetaan suljettua tilaa, jossa äänikenttää muokataan käyttämällä sähköakustisia muuntimia, käytännössä kaiuttimia ja mikrofoneja sekä signaalinkäsittelyä. Aktiiviakustisia järjestelmiä on asennettu konserttisaleihin jo 1960-luvulla. Suomessa aktiiviakustiikka on käytössä muutamissa konserttisaleissa. Maailmalla tällaiset järjestelmät ovat yleisempiä. Aktiiviakustiikkaa perustellaan monikäyttöisyydellä ja taloudellisuudella. Aktiiviakustiikalla pyritään myös korjaamaan epäonnistuneen akustiikkasuunnittelun virheitä.

Harvinaisempi aktiiviakustiikan sovelluskohde on harjoitustilat. Paras hyöty hyvästä konserttisalista saadaan, jos orkesteri voi harjoitella esiintymistilassa tai akustisesti esiintymistilaa vastaavassa tilassa. Harjoitussalia tarvitaan, koska konserttisaleilla on usein suuri käyttöaste, samoista harjoitustiloista riippuvaisia orkestereita saattaa olla useampia. Toisaalta orkesteriharjoituksia ei voi joustavasti järjestää mielivaltaiseen vuorokaudenaikaan (Suomessa ei toistaiseksi ole orkesteriharjoittelua sääteleviä työaikalakeja (Rajamaa, 1998)).

Täysimittaisen konserttisalin rakentaminen harjoituskäyttöön on taloudellisesti suuri investointi. Myös tilan puute kaupungin asemakaavassa tekee harjoitussalista ajattelemisen arvoisen vaihtoehdon. Täysimittaista konserttisalia tilavuudeltaan paljon pienempi orkesteriharjoitussali on kuitenkin usein kompromissi ja tuottaa akustiikan lisäksi ongelmia esimerkiksi isojen soitinten siirtelyn kannalta.

Tämä diplomityö on tehty osana Tekesin ja suomalaisten yritysten rahoittamaa TAKU-tutkimushanketta. Ensisijainen tavoite on ollut kokoavan perustutkimuksen tekeminen olemassa olevista aktiiviakustisista järjestelmistä, sekä niiden avulla toteutetuista harjoitushuoneista. Toiseksi on pyritty kehittämään mahdollisimman hyvin nykyistä tietämystä vastaava aktiiviakustisen orkesteriharjoitussalin prototyyppi. Ajateltuna kohteena on ollut Helsinkiin rakennettava musiikkitalo.

1.1 Aiempi tutkimus

Aktiiviakustisia harjoitushuoneita on esitetty ja osa niistä on nykyisin kaupallisen tuotetuksen asteella. Erityisesti orkesteriharjoituskäyttöön tarkoitettuja harjoitussaleja ei varsinaisesti ole tutkittu aiemmin. Wengerin V-Room (Wenger, 1996) on USA:ssa patentoitu pieni harjoitushuoneratkaisu, jossa huone ja järjestelmän asentaminen huoneeseen on esitetty yksityiskohtaisesti. Patentti ei käsitä aktiiviakustista järjestelmää, joten käytettäväksi ehdotetaan jotakin kaupallista järjestelmäratkaisua, kuten Lexiconin LARES (Griesinger, 1995) tai LCS:n (LCS, 2000) Variable Room Acoustics System (VRAS), jossa sovelletaan Polettin (1993, 1994a, 1995, 1998) Assisted Reverberation System konseptia. Nämä ovat toteutustavaltaan regeneratiivisia (rege-

nerative) laajakaistaisia monikanavajärjestelmiä, eli akustisen takaisinkytketymisen takia jossain määrin itseään vahvistavia. Suuri osa aihepiirin tutkimuksesta liittyy takaisinkytkettyjen aktiiviakustisten järjestelmien stabiilisuustarkasteluun.

Parkin ja Morgan (1970) ratkaisivat takaisinkytketymisongelman käyttämällä kapeakaistaisia vahvistuskanavia Assisted Resonance järjestelmässään. Tekniikka on jäänyt kuitenkin paljolti kuriositeetiksi. Regeneratiivinen laajakaistainen järjestelmä on nykyisin tavallisin aktiiviakustisen järjestelmän toteutusmalli, johon myös tässä työssä keskitytään.

Regeneratiivisissa monikanavajärjestelmissä on akustista takaisinkytkentää tyypillisesti rajoitettu aikavarianttien suotimien avulla. Monet aikavarianttien menetelmien perusideat on patentoitu jo ennen 1930 lukua. Zwicker käytti vuonna 1928 liikkuvia mikrofoneja (Nielsen, 1996). Schroeder (1959) kehitti vuonna 1959 taajuussiirtoon (frequency shift, FS) perustuvan aikavariantin suotimen, joka on edelleenkin etenkin puheäänien vahvistamisessa käytetty menetelmä. Tätä tekniikkaa ovat tutkineet Schroederin ohella Tapio (1965), Tilse (1975) ja Pesko (1977). Mishin (1958), Guelke ja Broadhurst (1971) tutkivat vaihemodulaation (phase modulation, PM) mahdollisuuksia aikavarianssin toteuttamiseen. Signaalin vaihetta 180 muuttavan vaihemodulaation samoin kuin algoritmin, jolla voidaan ehkäistä signaaliin mahdollisesti syntyviä nap-sahduksia esitti Fasbender (1984). Ahnert on esittänyt (1981) aikavariantin menetelmän, jossa eri mikrofoniin signaalit kytketään tiettyihin kanaviin ja kytkentää muutetaan ajan funktiona. Nämä varhaiset tutkimukset, kuten myös Ahnertin ja Reichardtin (1981) tutkimukset perustuivat analogiatekniikkaan.

Digitaalitekniikan myötä järjestelmien laatu ja muunneltavuus ovat parantuneet huomattavasti. Viime vuosina on julkaistu ainoastaan muutamia tutkimuksia aikavariantteista järjestelmäsovelluksista. David Griesinger julkaisi 90-luvun aikana useita tutkimuksia aiheesta (Griesinger, 1991, 1995a, 1995b, 1995c), mutta varsinaisia toteutuksia ei näissä tutkimustuloksissa esitetä. Peter Svensson julkaisi aktiiviakustisia järjestelmiä ja lineaarisia aikavariantteja suotimia (linear time-variant filter, LTV) käsittelevän väitöskirjansa vuonna 1994. Svenssonin ja sittemmin Nielsenin (1996, 1999) tutkimukset vaihemodulaatiosta ja viivemodulaatiosta (delay modulation, DM) edustavatkin alan tämän hetken tietämystä.

1.2 Työn sisältö

Työ on jäsennetty seuraavasti. Luvut 2 - 5 käsittävät aihepiirin teoriaosuuden ja luvuissa 6 ja 7 keskitytään sovellukseen.

Luvussa 2 esitellään suljettuun tilaan muodostuva äänikenttä fysikaalisena ilmiönä sekä yksinkertaistettuja tarkastelumalleja. Impulssivasteen ja huonevasteen määritelmät kerrataan sekä esitetään äänikentän muodostuminen konserttisaliin. Saliakustikassa tärkeää diffuusin äänikentän käsitettä ja siihen liittyviä apukäsitteitä luonnehditaan perusteellisesti. Esitetään äänikentän diffuusiusoletukseen perustuva äänikentän energiapohjainen tarkastelutapa, sekä tästä johdettavat jälkikäiunta-ajan, tasapainotilan (steady-state-condition) määritelmät sekä tilastollisen akustiikan numeeriset laskentamenetelmät. Lopuksi esitellään lava-akustiikkaan liittyvää problematiikkaa.

Luvussa 3 esitetään äänenvahvistusjärjestelmien yleinen luokitus, hieman poiketen Kleinerin ja Svenssonin (1995) esityksestä. Luvussa keskitytään regeneratiivisen järjestelmätoteutuksen yleiseen analyysiin, sekä esitetään energiapohjaisen stabiilisuus-analyysin perusteet. Lopuksi perehdytään takaisinkytkettyjen aikainvarianttien (LTI) ja aikavarianttien (LTV) järjestelmien stabiilisuustarkasteluun.

Luvussa 4 käsitellään aktiiviakustisen järjestelmän suunnittelua, äänen väritysmää ja akustisen takaisinkytketymisen passiivista hallintaa.

Luvussa 5 käsitellään takaisinkytketymisen aktiivista hallintaa digitaalisin signaalin-käsittelymenetelmin, tehdään katsaus aikavarianttien järjestelmätoteutusten historiaan ja esitetään tyypilliset aikavarianssin toteutusperiaatteet yleisellä tasolla. Lopuksi luodaan katsaus kaiunta-algoritmien kehitykseen ja nykyisiin toteutustapoihin.

Luvussa 6 esitellään uusi katkaistun salin konsepti aktiiviakustisen orkesteriharjoitus-salin toteuttamiseksi. Katkaistun salin konseptissa harjoitussali on konserttisalin esiintymislavan kopio. Konserttisali on siis ikään kuin katkaistu toisen penkkirivin paikkeilta. Kun salin etuseinä toteutetaan kaiuttomaksi, on saliin muodostuvan äänikentän energiatiheys aina pienempi kuin todellisessa konserttisalissa. Katkaistun salin impulssivaste ja energiatiheys saadaan vastaamaan konserttisalia lisäämällä jälkikaiuntaa aktiiviakustisella järjestelmällä.

Luvussa 7 esitetään katkaistun salin prototyypin rakenne ja siitä saadut kokemukset. Prototyyppi pystytettiin Yleisradion suureen studioon M2, joka pääpiirteissään on konserttisalin lavan kokoluokkaa (tilavuus 1920 m³). Järjestelmällä testattiin sekä kaupallista LARES järjestelmää että omaa DIVA kaiunta-algoritmitoteutusta. Järjestelmän äänenlaatua arvioitiin muusikkojen lausuntojen ja mittausten perusteella.

Päätelmät ja yhteenveto esitetään luvussa 8.

2 Huoneakustiikka

Suljetun tilan, kuten huoneen tai konserttisalin akustiikka riippuu tilan arkkitehtonisesta muodosta sekä pintojen akustisista ominaisuuksista. Kuulijan havaitsema ääni on yhdistelmä suoraa ääntä (direct sound), seinä-, lattia- ja kattoheijastuksia (reflections) sekä heijastuksia esineistä, jotka ääni kohtaa ennen saapumista kuulijalle. Moninkertaiset vaimenevat heijastukset sekoittuvat jälkikaiunnaksi (reverberation). Heijastukset ja jälkikaiunta sekä vahvistavat että värittävät ääntä, mutta liiallisina tekevät äänestä epäselvän. Musiikkikäyttöön tarkoitettu akustinen tila on suunniteltava niin, että ääni saapuu kuulijalle kyllin voimakkaana ja selkeänä sekä ylittää riittävästi taustamelutason.

Tässä luvussa esitellään suljettuun tilaan muodostuva äänikenttä fysikaalisena ilmiönä sekä yksinkertaistettuja tarkastelumalleja. Impulssivasteen ja huonevasteen määritelmät kerrataan sekä esitetään äänikentän muodostuminen konserttisaliin. Saliakustikassa tärkeää diffuusin äänikentän käsitettä ja siihen liittyviä apukäsitteitä luonnehditaan perusteellisesti. Lisäksi esitetään äänikentän diffuusiusoletukseen perustuva äänikentän energiapohjainen tarkastelutapa, sekä tästä johdettavat jälkikaiunta-ajan, tasapainotilan (steady-state-condition) määritelmät sekä tilastollisen akustiikan numeeriset laskentamenetelmät. Tasapainotilan määritelmä on olennainen tarkasteltaessa diffuusiin äänikenttään kytketyn aktiiviakustisen järjestelmän stabiiliusominaisuuksia. Lopuksi esitellään lava-akustiikkaan liittyvää problematiikkaa.

2.1 Äänen käyttäytyminen suljetussa tilassa

Ääni etenee ilmassa pitkittäisinä (longitudinal) paineaaltoina, jotka määräytyvät taajuutensa, amplitudinsa ja suuntansa suhteen. Vapaassa kentässä ääni leviää ympäristöönsä, äänipaineen vaimetessa $1/r$ -lain mukaisesti. Tämä tarkoittaa, että äänipaine on kääntäen verrannollinen etäisyyteen äänilähteestä. Etäisyyden kaksinkertaistuessa äänipainetaso laskee 6 dB. Suljetussa tilassa huoneen rajapinnat estävät ääniaallon vapaan etenemisen. Rajapinnoista ääniaalto heijastuu vaimentuen taajuusriippuvasti pinnan absorptio-ominaisuuksien mukaan.

Suljettua tilaa, esimerkiksi konserttisalia, voidaan tarkastella kolmiulotteisena resonaattorijärjestelmänä. Tilaan muodostuu ominaismuotoja eli moodeja, joilla kullakin on tietty taajuus- sekä paikkajakauma tilassa. Kolmiulotteisilla resonaattoreilla värähtelevien ominaismuotojen tiheys kasvaa taajuuden funktiona nopeammin kuin 2D- ja 1D-resonaattoreilla. Myös soittimien kaikukopat ovat resonaattoreita. Kaikukopan rakenteen (2D) ja ilmatilan (3D) resonanssit kytkeytyvät toisiinsa ja ääni säteilee sekä värähtelevistä pinnoista että ilmaaänenä kannen aukoista. Puurakenteisen konserttisalin akustiikkaa ei voi suoraan verrata puurakenteisen soittimen akustiikkaan. Konserttisalissa ratkaisevaa on pintojen akustiset ominaisuudet: ilmaääni ei kytkeydy puurakenteisiin samassa suhteessa kuin esimerkiksi sellossa (vaikka tila väritykseltään

vastaisikin soittimen lakattua puupintaa). Vaikka huoneessa ääni kytkeytyy aina jonkin verran seinärakenteisiin, on seinien resonansseista takaisin ilmatilaan kytkeytyvä äänienergia joka tapauksessa pieni.

Huoneeseen muodostuva äänikenttä on aina jossain määrin kaiuntainen ja diffuusi. Äänikenttä on tavallisesti monimutkainen; se koostuu lukuisista eri suuntiin kulkevista aalloista. Ominaismuotojen määrittely on differentiaaliyhtälön avulla yksinkertaista, mikäli differentiaaliyhtälö on helposti muodostettavissa. Näin on yksinkertaisille perusgeometrioille. Suurin osa konserttisaleista, kirkoista ja luentosaleista ovat geometrialtaan lähellä suorakulmaista laatikkoa. Kun tilan muoto poikkeaa yksinkertaisesta perusgeometriasta vähän, voidaan alinta moodia kunkin sivun suunnassa arvioida käyttäen yksinkertaisen tilan mallia.

Ajatellaan jäykkäseinäistä suorakulmaista huonetta, jonka mitat ovat L_x , L_y ja L_z . Huoneen rajapinnoilla hiukkasnopeuden normaalikomponentti on nolla. Äänipaineen aaltoyhtälö voidaan kirjoittaa suorakulmaisessa koordinaatistossa

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0, \quad (2.1)$$

missä k on vakio (ominaisarvo). Muuttujat ovat separoituvia suorakulmaisten koordinaattien suhteen, mikä tarkoittaa, että ratkaisu voidaan löytää erikseen kaikille kolmelle tekijälle:

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z). \quad (2.2)$$

Kun tulo (2.2) sijoitetaan aaltoyhtälöön (2.1), saadaan kolme differentiaaliyhtälöä ja niille erilliset reunaehdot. Esimerkiksi p_1 :n tulee toteuttaa yhtälö

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0, \quad (2.3)$$

reunaehdoilla

$$\frac{dp_1}{dx} = 0, \text{ kun } x = 0 \text{ ja } x = L_x. \quad (2.4)$$

Yhtälöt muodostetaan analogisesti funktioille $p_2(y)$ ja $p_3(z)$, jolloin vakiot ovat

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2. \quad (2.5)$$

Yhtälöiden ratkaisut ja ominaisarvojen määrittely sivuutetaan tässä, mutta niihin voi tutustua esim. lähteessä (Kuttruff, 1991:56).

Aaltoyhtälön ratkaisu voidaan ilmaista kolmen kosinifunktion tulona, jotka ilmaisevat äänipaineen riippuvuuden kustakin koordinaattisuunnasta

$$p(x, y, z) = D \cos\left(\frac{l\pi}{L_x}x\right) \cos\left(\frac{m\pi}{L_y}y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_z}z\right). \quad (2.6)$$

Yhtälössä D on vakio, L_x , L_y ja L_z ovat suorakulmaisen huoneen mitat sekä l , m ja n kokonaislukuja. Yhtälö (2.6) kuvaa kolmiulotteista seisovaa aaltoa. Äänipaineen aika-riippuvuuden kuvaamiseksi yhtälö voidaan kirjoittaa tekijän $\exp(i\omega t)$ avulla (eli $\cos x = (e^{ix} + e^{-ix})/2$, kts. Kuttruff, 1991:58). Erilaisilla kertaluvuilla l , m ja n , yhtälö (2.6) kuvaa huoneen resonanssien eli ominaismuotojen äänipainejakaumaa tilassa (Kuttruff, 1991).

Huoneen yksittäiset ominaistajuuudet saadaan Rayleighin kaavasta:

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}, \quad (2.7)$$

missä c on äänen nopeus ilmassa. Ominaistajuuksista käytetään vakiintuneesti myös nimitystä mooditajuuus. Kertaluvut ilmoittavat kuinka monta ominaismuodon puoliaaltoa on tilan kunkin sivun matkalla (Rayleigh, 1896:70; Rossing, 1990:496; Backman, 1998). Kun jokin arvoista l , m tai n on yksi ja muut nolliä, vastaa tämä matalinta ominaistajuutta kuhunkin koordinaattisuuntaan.

Jotta ominaismuotojen jakauma olisi taajuusalueessa tasainen myös pienillä taajuuksilla, on suositeltavaa, etteivät huoneen mitat olisi samoja tai toistensa yksinkertaisia kokonaislukumonikertoja. Ominaismuotojen jakauma ei ole yleensä ongelma konserttisaleissa ja vastaavissa suurissa huonetiloissa, joissa ominaismuotojen tiheys on jo pienimmillä kiinnostavilla taajuuksilla ($< 500\text{Hz}$) suuri. Ongelmat tulevat esiin pienissä tiloissa, joissa pienitajuiset, muista erillään olevat ominaismuodot ovat selvästi havaittavissa erikseen. Toisaalta suuremmilla taajuuksilla kovin lähekkäin osuvat ominaismuodot aiheuttavat ääneen häiritsevää väritystä. Kirjallisuudessa on esitetty mittasuhteita (Taulukko 2.1), joilla vältetään taajuusalueessa liian läheiset ominaismuodot ja näin edesautetaan diffuusin äänikentän syntymistä.

Taulukko 2.1: Ominaistajuuksijakauman kannalta suositeltavia tilan mittasuhteita (Backman, 1998).

Lähde	Mittasuhteet
ASHRAE	1:1,17:1,47
	1:1,45:2,10
Bolt	1:1,28:1,54
IAC	1:1,25:1,60
Sepmeyer	1:1,14:1,39
1: $\sqrt[3]{2}$: $\sqrt{2}$	1:1,26:1,41

Suorakulmaisessa tilassa osa ominaistajuuksista on ryhmiteltävissä sarjoiksi, joissa ylemmät taajuudet ovat alemman kokonaislukumonikertoja. Tällöin herätesignaalin osuessa jonkin resonanssin kohdalle myös kaikki herätteen monikerrat ovat resonanssien kohdalla. Suorakulmaisesta poikkeavissa tiloissa resonanssit saattavat sijaita epä-

säännöllisemmin taajuusakselille jakautuneina, jolloin tällaisia ongelmia ei välttämättä esiinny.

Suorakulmaisessa tilassa, jonka yksi seinä on vino (alle 15 astetta), todellinen alin ominaistajuus poikkeaa vain pari prosenttia keskimääräisen mitan avulla lasketusta. Yhdensuuntaisten pintojen välttäminen rakenteissa (huoneet, kaiutinkotelot ym.) ei siis poista resonansseja, vaan niiden laskeminen ainoastaan tulee vaikeammaksi (Backman, 1998).

Todellisten huoneiden ja konserttisalien äänikentän kuvaaminen analyyttisten abstraktioitten mallina on laskennallisesti erittäin raskasta. Fysikaalisten ilmiöiden tutkimiseen analyyttinen tarkastelu sopii hyvin. Perusgeometrioista poikettaessa aiheutuu aina kompleksisuuden kasvuun verrannollinen havainnollisuuden menetys.

Aaltoyhtälöille voidaan löytää numeerisia ratkaisuja menetelmillä, joista yleisimpiä ovat äärellisten elementtien menetelmä (finite element method, FEM) ja reunaelementtimenetelmä (boundary element method, BEM) sekä differenssimenetelmät, kuten aika-alueen differenssimenetelmä (finite difference time domain, FDTD). Aaltoyhtälön ratkaisuun perustuvissa menetelmissä suurin rajoitus on laskentakapasiteetin tarve (Lokki, 1997). Käytännössä näitä menetelmiä voidaan käyttää vain pienillä taajuuksilla, esimerkiksi auton sisätilassa alle 500 Hz taajuuksilla. Usein äänikentän käyttäytymistä pystytään luonnehtimaan vain suurta informaatiomäärää rajusti tiivistävillä, esimerkiksi tilastollisilla menetelmillä.

2.2 Huonevaste

Lineaarisella aikainvariantilla (linear time invariant, LTI) fysikaalisella järjestelmällä on neljä pääominaisuutta:

1. Fysikaalisesti toteutettavissa (realisoituva): kausaalisuus, ei vastetta ennen herätettä.
2. Parametreiltaan vakio: impulssivastefunktio ei riipu tulossignaalin ajanhetkestä.¹
3. Stabiili: tulossignaali tuottaa rajoitetun vasteen.²
4. Lineaarinen: additiivinen ja homogeeninen, $x_1 + x_2 \Rightarrow y_1 + y_2$ ja $cx \Rightarrow cy$, missä c mielivaltainen vakio.

Kuttruffin (1991) mukaan huoneakustiikan tärkeimpiä tavoitteita on määritellä sellaisia objektiivisia käsitteitä, joilla on mahdollista ilmaista suhde huoneen geometrian ja kuulovaikutelman välille.

Impulssivastefunktio $h(t)$, josta toisinaan käytetään myös lyhennystä impulssivaste, on huoneakustiikan tärkein käsite. Se on aika-alueen funktio, joka sisältää täydellisen

1. Aktiiviakustisessa aikavariantissa järjestelmissä tämä ehto ei ole voimassa sillä tällainen järjestelmä ei ole parametreiltaan vakio.
2. Aktiiviakustisissa järjestelmissä saattaa esiintyä epästabiilisuutta akustisen takaisinkytytymisen takia.

informaation fysikaalisen (LTI) järjestelmän käyttäytymisestä ja vasteesta mille tahansa herätteelle. Lähteen ja havaintopisteen välisestä (mitatusta tai simuloidusta) impulssivastefunktiosta voidaan määrittää äänen käyttäytyminen ja siten myös esimerkiksi tilan akustiset ominaisuudet. Binauraalinen (kaksikorvainen) impulssivastefunktio sisältää periaatteessa kaiken informaation siitä, miten jokin lähde havaitaan kuuntelupisteessä.

Mille tahansa mielivaltaiselle tulosignaali $x(t)$ saadaan järjestelmävaste $y(t)$ superpositio- eli konvoluutiointegraalina (Nielsen, 1996:140; Lahti, 1995)

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau . \quad (2.8)$$

Taajuusvastefunktio. Fysikaalisten järjestelmien dynaamisia ominaisuuksia kuvataan tavallisimmin käyttäen jotakin yksikköimpulssivastefunktion $h(t)$ lineaarista integraalimuunnosta kuin impulssivastetta itseään. Tämä tapahtuu esimerkiksi integroimalla signaali aika-alueen yli painotettuna funktiolla, joka sisältää uuden muuttujan ja aikamuuttujan. Ideaalisten järjestelmien käytännössä tavoitelluille vastineille on hyödyllisintä ja tehokkainta käyttää Fourier-muunnosta, joka tuottaa suoraan esityksen taajuusalueessa. Yksikköimpulssivastefunktion, jolle $h(t) = 0$ kun $t < 0$, *Fourier-muunnos* on

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} h(\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (2.9)$$

ja se on nimeltään taajuusvastefunktio (Lahti, 1995).

2.2.1 Huonesiirtofunktio (RTF)

Huonesiirtofunktio, eli huonevaste on huonetilan kahden pisteen välinen impulssivastefunktio. Impulssivastefunktion (neliön) visuaalisesta esityksestä, eli reflektogrammista, harjaantunut akustikko voi lukea huoneen akustiset ominaisuudet pääpiirteittäin. Mittausjärjestelyä sekä tilan geometrisia ja materiaaliominaisuuksia koskeva tieto on avuksi analyysissä. Impulssivastefunktion aikarakenne ei ole välttämättä yksikäsitteisesti tulkittavissa, sillä eri etäisyyksillä olevista pinnoista tulevat varhaiset ja korkeamman asteen heijastukset voivat osua impulssivasteessa samaan ajankohtaan. Mittauspisteiden lukumäärä ja paikkahajonta helpottavat tulkintaa. Myös äänilähteen ja mikrofoniin suuntaavuuksia voidaan käyttää hyväksi ilmiöiden erottelun helpottamiseksi.

Impulssivastefunktiosta voidaan lukea:

1. Varhaisten heijastusten voimakkuussuhteet suoraan ääneen.
2. Varhaisten heijastusten keskinäiset voimakkuussuhteet, aikavälillä, jolloin voidaan olla varmoja, ettei päällekkäisyyttä esiinny. Yksittäisen etenevän ja heijastuvan ääniaallon voimakkuuteen vaikuttavat ilman ja heijastuspinnan

absorptiosuhteet, sekä äänen etäisyysvaimennus. Jos etäisyys lähteestä tai mittapistestä heijastuspintaan on pitkä (ts. tila suuri) vähenee heijastuksen vaikutus impulssivastefunktioon. Useamman kertaluvun heijastuksissa tämä vaikutus tietenkin korostuu.

3. Miten varhaiset heijastukset ovat jakautuneet aikaan. Onko havaittavissa periodisuutta, noudattaako heijastusten jakauma jotakin tilastollisuutta. Jos mittaustilanne tunnetaan, voidaan heijastuksen esiintymisajankohdasta kenties päätellä, millä etäisyydellä olevasta pinnasta heijastus on tapahtunut. Heijastuksen voimakkuus voi auttaa kertaluokan päättelyssä.

Tärykaiku ilmiönä aiheutuu huonetilaan syntyvistä periodisista heijastuksista kahden samansuuntaisen seinän ollessa suhteellisen lähellä toisiaan tai huoneen muotojen ollessa muuten hyvin säännölliset. Nopeasti toistuva tärykaiku koetaan äänen väritymänä. Jo yksi voimakas heijastus riittää aiheuttamaan subjektiivisesti koetun väritymän, varsinkin musiikissa (jolloin signaalissa on paljon periodisia komponentteja). Toisaalta subjektiivisesti kuultu erillinen kaiku ei välttämättä esiinny impulssivastefunktiossa yhtenä voimakkaana heijastuksena, vaan saattaa muodostua monista vaimeammista heijastuksista, jotka kuulojärjestelmämme aikaresoluutiosta johtuen kuullaan yhteensummautuneina.

Autokorrelaatioanalyysi on eräs tapa selvittää impulssivastefunktion periodisuusomaisuuksia, satunnaisuutta tai pseudo-satunnaisuutta. Epäsäännöllisesti jakautuneet komponentit kerääntyvät piikiksi autokorrelogrammin alkuun ja jäljelle jäävät periodiset heijastukset muodostavat maksimeja periodin pituuden mukaisille etäisyyksille funktion alusta. Schroeder (1981) on ottanut ensimmäisenä käyttöön modulaatiosiirotfunktion (MTF) käsitteen (valkoiselle kohinalle), joka on myös eräänlainen kuvaus impulssivastefunktion temporaalisesta rakenteesta.

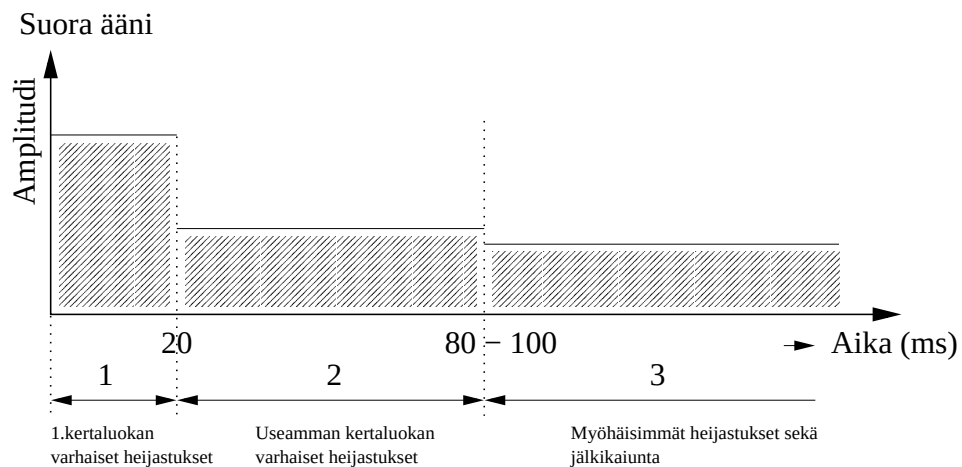
Reflektogrammin lukeminen helpottuu huomattavasti, mikäli analyysin kannalta turhaa, havainnollisuutta heikentävää informaatiota redusoidaan. Redusointimenelmä riippuu siitä, mitä tietoa impulssivastefunktioista halutaan. Funktion verhokäyrän määrittäminen on tyypillisin reduktio. Käytännössä tämä tehdään *Hilbert-muunnoksen* avulla. Hilbert-muunnoksella reaalisesta aicasignaaliin lasketaan kompleksinen osa. Reaalisen osan Hilbert-muunnos on siis tämä niin kutsuttu kompleksinen osa (kompleksisuudelle ei tässä ole varsinaisesti fysikaalista tulkintaa). Verhokäyrä saadaan kompleksisen signaalin itseisarvona. Perinteinen reaalisen signaalin neliöinti ja verhokäyrän tasoitus keskiarvoistamalla (eli suodattamalla) saattaa johtaa tärkeän tiedon katoamiseen tangentin kulmakertoimen jyrkissä muutostilanteissa (transientit, alukkeet). Impulssivasteen verhokäyrää voidaan tarkastella taajuuskaistoittain ajamalla signaali suodinpankkirakenteen lävitse erillisiin suodinkanaviin.

2.3 Äänikenttä konserttisalissa

Saliakustiikka eriytyi omaksi osa-alueeksi hieman yli sata vuotta sitten. Teoreettisen pohjan loi Harvardin yliopiston apulaisprofessori Wallace Clement Sabine. Hän kehitti diffuusia äänikenttää koskevat lainalaisuudet tutkimuksessaan, joka sai alkunsa tarpeesta parantaa epäonnistuneen luentosalin akustiikkaa. Myöhemmin Sabine suunnitteli Boston Symphony Hall:n akustiikan. Kokeellisilla tutkimuksillaan Sabine määritteli jälkikäiunta-aikaa diffuusissa äänikentässä kuvaavan yhtälön (2.23).

Jotta tilan jonkin fysikaalisen ominaisuuden muutos olisi akustisesti havaittava, muutoksen täytyy olla suhteellisen suuri. Pienillä materiaalien absorption muutoksilla tai pienten pintojen sijoittelulla ei yleensä saada aikaan akustisesti merkittävää muutosta. Akustisten perusominaisuuksien hallinnassa on enemmän kysymys suurista linjoista kuin detaljeista. Myös monikäyttöisyyteen pyrkivässä aktiiviakustiikassa toimintaperusperiaate on vivahde-eroja olennaisempi.

Huoneakustiikasta viimeisen viiden vuosikymmenen aikana saadun kokemuksen perusteella on impulssivaste totuttu jakamaan yleensä kuvan 2.1 mukaisesti kolmeen aikajaksoon: suoraan ääneen, varhaisiin heijastuksiin (0 - 100 ms) ja jälkikaiuntaan (100 ms:sta eteenpäin). Esitetyt aikarajat liittyvät erityisesti musiikkiin. Puheella on tyypillisesti varhainen ääni (0 - 50 ms) ja jälkikaiunta (> 50 ms) impulssivasteesta (Kleiner ja Svensson, 1995). Aikarajat liitetään tässä kullekin signaalityypille ihanteellisiin olosuhteisiin. Varhaisten heijastusten esiintymistiheys ja esiintymisjakso ovat tilan, ei signaalin ominaisuuksia. Kullakin jaksolla on oma merkityksensä subjektiivisen äänenlaadun kannalta. Impulssivasteen osien ajalliset rajaukset vaihtelevat jonkin verran eri tekijöiden esityksissä.



Kuva 2.1: Suljetuissa tiloissa kuultavan äänen aika-alueen jaksotus.

Suora ääni (kuva 2.2a) Ellei suora ääni ole peittynyt muilla varhaisen äänikentän komponenteilla, äänilähde lokalisoituu tilassa suoran äänen mukaan. Tätä kutsutaan ensimmäisen aaltorintaman säännöksi (law of the first wavefront, presedenssi, Haas-efekti). Heijastusten vaikutus äänen lokalisoitumiseen on eräs nykyinen tutkimusalue.

Suoran äänen vahvistaminen on tarpeellista mikäli 1) lähde on liian hiljainen, toisin sanoen ei kuulu; 2) suorassa äänessä vaikuttaa selvästi havaittava seat-dip ilmiö (Takahashi, 1997); 3) tila on äärimmäisen suuri; 4) tai kun esitys tapahtuu ulkoilmassa (Kleiner ja Svensson, 1995).

Kohtuuttoman suuret äänipainetasot tai epämiellyttäväksi koettu kirkkaus (clarity) saattavat edellyttää suoran äänen ja varhaisten heijastusten vaimentamista suhteessa ennallaan pysyvään jälkikaiuntaan. Perinteisin menetelmin tämä ei ole mahdollista. Sali voidaan kuitenkin vaimentaa ääntä absorboivalla materiaalilla ja sekä varhaiset heijastukset että jälkikaiunta voidaan tuottaa keinotekoisesti halutuissa voimakkuussuhteissa.

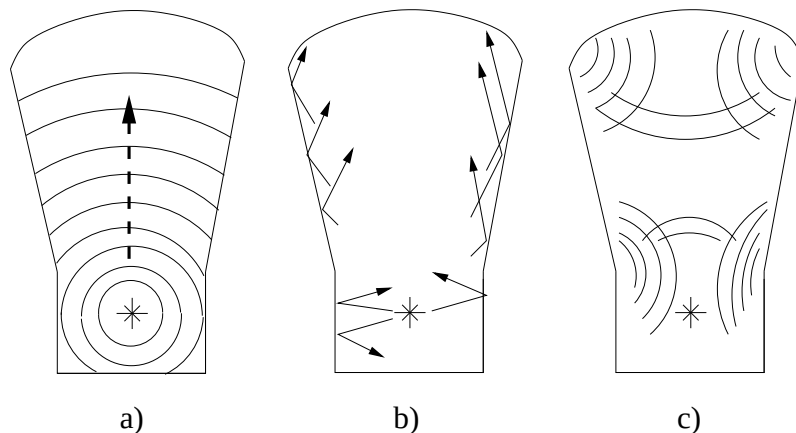
Varhaiset heijastukset (kuva 2.2b) Äänikentän koettuun ympäröivyyteen vaikuttavat ratkaisevasti ensimmäisen ja toisen kertaluokan heijastukset. Tämä osa (mukaan luetuna suora ääni) muodostaa yleensä valtaosan äänikentän energiasta 1000 - 3000 hengen konserttisaleissa. Varhaisten heijastusten suhde muihin aika-alueen komponentteihin on kriittinen. Monissa leveissä saleissa saattaa ympäröivyyks olla huono johtuen vähäisistä sivuseinien ja katon heijastuksista, tai sivuseinillä olevista ääntä absorboivista parvekkeista (Griesinger, 1995c).

Jälkikaiunta (kuva 2.2c). Lahti (1995) on luonnehtinut jälkikaiuntaa seuraavasti: ”Jälkikaiunta tietyssä pisteessä on äänilähteen (tai -lähteiden) sijaintipaikkojen, huoneen ja tarkastelupisteen sijainnin yhdessä määräämä ominaisuus. Pelkästään huoneen kuvaamiseen tarvitaan keskiarvoistusta yli erilaisten äänilähde-kuuntelupisteparien.” Jälkikaiunta on sikäli riippuvainen myös äänilähteestä, että suuntaavuus vaikuttaa syntyvään äänikenttään ja sen vaimenemiseen. Lahti jatkaa: ”Jälkikaiunnalle voidaan käyttää myös vaihtoehtoja, signaali- ja systeemiteoriaan sopivaa määritelmää: se on äänilähteen, huoneen ja tarkastelupisteen sijainnin yhdessä muodostaman järjestelmän impulssivasteen (neliön) verhoikäyrä.”

Nykyisin ollaan selvillä, että konserttimusiikissa koettu akustiikka on paljolti riippuvainen varhaisten heijastusten vaimenemisominaisuuksista (decay), sekä kuulijan korviin saapuvien äänisignaalien ristikorrelaatiosta (interaural cross-correlation, IACC). Korvien välinen ristikorrelaatio kuvaa koettua tilavaikutelmaa. Varhaisten heijastusten vaimenemisnopeus ja jälkikaiuntaisen äänen suhteellinen taso ovat kriittisiä kun tarkastellaan konserttisalin akustiikan kokonaisvaikutelmaa (Griesinger, 1995c).

2.4 Diffuusi äänikenttä

Diffuusi äänikenttä muodostuu suuresta määrästä satunnaisista suunnista saapuvia ääniaaltoja (vrt. kuva 2.2c), jotka ovat keskenään korreloimattomia. Nämä ääniaallot ovat huoneen rajapinnoista tapahtuvia heijastuksia. Yksittäisen tasoaallon kokonaisheijastusenergia on diffuusien ja peiliheijastusten summa. Diffuusin heijastuksen kerroin määritellään tasaisesti jakautuneen äänienergian ja Snellin lain mukaan heijastuneen energian suhteena. Snellin lain mukaan, saapuva säde ja heijastuva säde ovat samassa kulmassa pinnan normaalin nähden.



Kuva 2.2: a) Suoran äänen muodostama äänikenttä, b) varhaisten heijastusten äänikenttä, c) jälkikaiuntainen äänikenttä.

Ääni-intensiteetti on diffuusissa äänikentässä suunta- ja paikkariippumaton, ja kuten energiatiheys, se on koko tilavuudessa vakio, eli nolla. Energiaa ei siis tilastollisesti virtaa mihinkään suuntaan.

Kaikille tiloille voidaan arvioida taajuus, jonka yläpuolisella taajuusalueella ominaistaajuustiheyden voidaan olettaa olevan riittävä diffuusiusoletuksen tekemiseen. Tätä taajuutta kutsutaan Schroederin taajuudeksi, ja se voidaan laskea kaavalla

$$f_g = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}, \quad (2.10)$$

jossa RT_{60} on jälkikaiunta-aika ja V huoneen tilavuus. Isossa konserttisalissa Schroederin taajuus on niin alhainen, että äänikenttä voidaan olettaa diffuusiksi kuuloalueella.

Diffuusin äänikentän muodostuminen riippuu pelkästään huoneen geometriasta sekä pintaominaisuuksista. Myös äänikenttää hajottavat esineet ovat heijastusvaikutukseltaan merkittäviä. Jotta ääniaalto siroaisi esteestä, tulee esteen olla dimensioiltaan aallonpituuden luokkaa tai suurempaa. Diffuusin äänikentän muodostumista edesauttaa, jos ääntä sirottavia pintoja on tilassa tasaisesti.

Huoneen äänikenttä voi olla kaiuntainen olematta silti diffuusi. Tällöin kaiunnan loppuosassa on havaittavissa periodisia komponentteja. Jälkikaiunnan ja jälkikaiunta-ajan käsitteet edellyttävät (määritelmänsä mukaisesti, luku 2.5) vaimenevan äänikentän olevan tilastollisilta ominaisuuksiltaan diffuusi. Jos yksittäisen tasoaallon taajuusvaste oletetaan tasaiseksi ja mukaan otetaan sen lattiaheijastus (toinen tasoaalto, hieman viivästettynä), tapahtuu spektrin kampasuodattuminen (resonanssitaaajuudet riippuvat aaltojen välisestä etäisyydestä aika-alueessa). Ideaalisessa diffuusissa äänikentässä aika-alueen periodisuudet kumoutuvat, koska yksittäisellä tasoaallolla on tilastollisesti suuri määrä heijastuksia, tällöin myös taajuusvaste on tilastollisesti tasainen.

Aika-alueen ongelmalliset ilmiöt (temporal artefacts) havaitaan yksittäisinä kaikuina, tärykaikuna (flutter echo), tai äänen väritymänä. Mikäli huoneeseen tuotetaan keino-tekoista jälkikaiuntaa, saattavat aika-alueen ilmiöt johtua tilan geometrian lisäksi keino-tekoisen jälkikaiunnan laadusta tai kaiuttimien huonosta sijoittelusta.

Diffuusissa äänikentässä on lähteen huoneeseen tuottama energiatiheys kaiuntasäteen (critical distance) ulkopuolella keskimäärin vakio. Huoneen kaiuntasäde on se etäisyys äänilähteestä, jolla suoran säteilyn ja kaiuntakentän energiat ovat yhtä suuret. Kaiuntasäde on suljettuun tilaan muodostuvan diffuusin äänikentän ominaisuus. Kaiuntasäde R_o yksittäiselle äänilähteelle saadaan kaavasta

$$R_o = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{S_A}{\pi}}, \quad (2.11)$$

jossa S_A on huoneen absorptioala. Jos äänikenttä ei ole täysin diffuusi, voidaan todellinen kaiuntasäde arvioida laskukaavalla saatua suuremmaksi. Vapaassa kentässä kaiuntasäde ei ole määritelty, mutta sen voi ajatella olevan ääretön, koska S_A on ääretön.

Kaiuntasäde ei ole määritelmänsä mukaisesti suuntariippuva, vaikka huoneen rajapintojen absorptiosuhteet olisivatkin ratkaisevasti toisistaan poikkeavia. Jos suuressa huoneessa on esimerkiksi yksi täydellisesti ääntä vaimentava pinta (huonetilavuus suuri verrattuna jälkikaiunta-aikaan) on kenties syytä olettaa, että huoneeseen muodostuva äänikenttä ei ole täysin diffuusi.

Suora ääni vaimenee $1/r$ -lain mukaisesti koko tilassa. Diffuusissa äänikentässä suoran äänen suhde kaiuntaiseen ääneen pienenee kaiuntasäteen ulkopuolella etäisyyden funktiona, kokonaisäänekkyyden pysyessä suhteellisen vakiona. Diffuusin äänikentän kokonaisäänekkyyys siis vaimenee $1/r$ -lain mukaisesti välillä $0 < r < R_0$ ja on vakio kun $r > R_0$.

Diffuusin äänikentän teoriaa on sovellettu yleisesti suljetun tilan äänikentän ominaisuuksien arvioimiseksi. Diffuusi äänikenttä on tavallaan lähtökohtana akustiseen suunnitteluun. Diffuusiusoletuksen ollessa voimassa todellisen monimutkaisen äänikentän akustisia tunnuslukuja voidaan estimoida yksinkertaisilla laskukaavoilla.

Erityisiin kaiuntahuoneisiin voidaan tuottaa melko tasainen diffuusi äänikenttä. Eikä tavallisissa huoneissakaan diffuusiusoletuksen tekeminen yleensä johda ratkaisevaan virheellisyyteen.

2.4.1 Energiatarkastelu ja pintaominaisuudet

Energiatarkastelu mahdollistaa kaksi perustavaa yksinkertaistusta:

1. Aaltoteorian keskeiset käsitteet interferenssi ja diffraktio voidaan jättää huomiotta. Jotta interferenssi (eli vaihesuhteet) olisi mahdollista jättää huomiotta, on seinäheijastusten oltava keskenään epäkoherentteja, eli äänikentän on oltava diffuusi. Tällöin energioita ja intensiteettejä voidaan summata.
2. Diffraktio voidaan jättää huomiotta mikäli äänikenttää ei tarkastella seinäpintojen välittömässä läheisyydessä. Huoneakustiikan suunnittelun ja arvioimisen kannalta tämä ei aina ole tarpeenkaan.

Kun suuntariippuva ääni-intensiteettifunktio $I(\varphi, \zeta)$ (jossa φ on kiertokulma ja ζ avaruuskulma) integroidaan yli jokaisen kenttäsuunnan saadaan kokonaisenergiatiheydelle lauseke

$$w = \frac{4\pi I}{c}, \quad (2.12)$$

jossa I on suuntariippumaton ääni-intensiteetti ja c äänen nopeus ilmassa (Kuttruff 1991).

Kuttruffin (1991) mukaan tilan pinta-alkioon dS yhden sekunnin aikana kohdistuva äänienergia on $\pi I dS$ mikäli I on suuntariippumaton. Keskimääräinen intensiteetti seinäpinoille $\bar{B}$ (irradiation strength) saadaan jakamalla tämä energia dS :llä:

$$\bar{B} = \pi I. \quad (2.13)$$

Diffuusissa äänikentässä I samoin kuin $\bar{B}$ ovat vakioita yli koko seinäpinnan. Kaavoista (2.12) ja (2.13) saadaan suhde

$$\bar{B} = \frac{c}{4}w. \quad (2.14)$$

Yleisesti voidaan sanoa, että mitä vähemmän absorptiota, sen parempi diffuusi äänikenttä muodostuu, koska kaiuntakentässä äänienergia on tällöin suurin. Heijastuspinnan aallonpituuksien suuruusluokkaa olevat epätasaisuudet takaavat tilastollisesti tasaisemman energijakauman. Diffuusin äänikentän oletus ei päde tilassa, jota rajoittaa heijastus- tai absorptio-ominaisuuksiltaan suuntariippuvia seinäpintoja.

2.4.2 Tasapainotila

Tasapainotilan (steady state condition) käsite on aktiiviakustisten järjestelmien tarkastelun kannalta olennainen, koska siitä voidaan johtaa järjestelmän energiapohjaiseen stabiilisuustarkasteluun sopiva lauseke. Tällöin tarkastellaan nimenomaan kaiuntaisen, diffuusin äänikentän kautta kaiuttimesta mikrofoniin siirtyvää äänienergiaa (reverberative path), eikä juurikaan suoraa ääntä (direct path). Edellä mainitun erottelun on tehnyt Schroeder (1964).

Yhtälö (2.14) mahdollistaa äänikentän vaimenemisen ja energiatheyden tarkastelun tasapainotilassa. Tällöin diffuusiin äänikenttään tuodaan koko ajan tasaisesti äänienergiaa, ja kentän tilastollinen käyttäytyminen oletetaan ajan suhteen vakiintuneeksi. Diffuusin äänikentän energiatiheys w oletetaan huoneessa vakioksi (ainakin kokonaislähteen kaiuntasäteen ulkopuolella). Huoneessa äänilähteelle saadaan tasapainoyhtälö

$$V \frac{\partial w}{\partial t} = P_0 - SB, \quad (2.15)$$

jossa V on huoneen tilavuus, P_0 on lähteen ääniteho, S on huoneen absorptiopinta-ala ja $\bar{B}$ on keskimääräinen intensiteetti seinäpinnoille. Yhtälöistä (2.14) ja (2.15) nähdään, että tasapainotilan energiatiheys on

$$w_s = P_0 \frac{4}{cS}. \quad (2.16)$$

Aaltoteoriassa tasapainotila määritellään kenttäpisteessä amplitudiltaan ja vaiheeltaan satunnaisesti jakautuneiden saman taajuuksien aaltojen äänipaineiden superpositiona (Kuttruff, 1991:68).

2.5 Jälkikaiunta-aika

Huoneen tai salin tärkein yksittäinen tunnusluku on jälkikaiunta-aika (reverberation time, RT_{60}), joka ilmoittaa, missä ajassa tilaan tuotettu äänikenttä vaimenee 60 dB eli teho vaimenee miljoonasosaan alkuperäisestä, äänen tuottamisen lakattua. Konsertti-

salin jälkikaiunta-aika tulisi tilan koosta riippuen olla noin kaksi sekuntia ($\pm 0.5s$), kun taas puheauditoriossa koon mukaan suuruusluokkaa 0.5-1 sekuntia.

2.5.1 Jälkikaiunta-ajan laskukaavat

Jälkikaiunta-aika on objektiivinen mittaluku, joka korreloi subjektiivisen kaiuntaisuuden mittaluvun kanssa. Seuraavassa esitellään lähtökohtia, joista Eyringin ja Sabinen lausekkeet jälkikaiunta-ajoille johtuvat. Kuttruff (1991) määrittelee heijastusten kokonaisenergian tietyssä pisteessä ajan funktiona seuraavasti

$$E(t) = E_0 \exp \{ [-\alpha_a c + \bar{k} \ln(1 - \bar{\alpha})] t \}, \quad (2.17)$$

jossa α_a on ilman absorptiokerroin, c on äänen nopeus ilmassa ja

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{A} \sum A_i \alpha_i \quad (2.18)$$

huonepintojen keskimääräinen absorptiokerroin kun seinäheijastus tapahtuu keskimäärin $\bar{k}$ kertaa sekunnissa, A_i on kunkin homogeenisen pintamateriaalin ala ja A suorakulmaisen huoneen kokonaisseinäpinta-ala.

Heijastusten keskimääräinen lukumäärä sekunnissa voidaan ilmaista kaavalla

$$\bar{k} = \frac{c}{2} \left(\frac{1}{L_x} + \frac{1}{L_y} + \frac{1}{L_z} \right) = \frac{cA}{4V}, \quad (2.19)$$

jossa L_x , L_y ja L_z ovat huoneen dimensiot ja V on huoneen tilavuus. Sijoittamalla $\bar{k}$ kaavaan (2.17) saadaan

$$E(t) = E_0 \exp \left[-ct \frac{4\alpha_a V - A \ln(1 - \bar{\alpha})}{4V} \right]. \quad (2.20)$$

Kun heijastusten kokonaisenergia on vaimentunut miljoonasosaan alkuperäisestä saadaan jälkikaiunta-ajalle lauseke:

$$RT_{60} = \frac{1}{c} \frac{24V \ln 10}{4\alpha_a V - A \ln(1 - \bar{\alpha})}, \text{ josta} \quad (2.21)$$

$$RT_{60} = 0.163 \frac{V}{4\alpha_a V - A \ln(1 - \bar{\alpha})}. \quad (2.22)$$

Kaava (2.22) tunnetaan Eyringin jälkikaiuntakaavana. Käytännön tilanteissa on melko turvallista olettaa, että $\bar{\alpha}$ (< 1) on pieni, jolloin logaritmi kaavassa (2.22) voidaan kehittää sarjaksi. Korkeamman asteen termien huomiotta jättämisellä päästää kuuluisaan Sabinen jälkikaiuntakaavaan,

$$RT_{60} = 0.163 \frac{V}{4\alpha_a V + A\bar{\alpha}} \quad (2.23)$$

(Kuttruff, 1991:117).

Ratkaisemalla Sabinen kaava (2.23) huoneen keskimääräisen absorptioalan $S_A = A\bar{\alpha}$ suhteen ja sijoittamalla yhtälöön (2.11) saadaan käytännössä erittäin hyödyllinen kaava huoneen kaiuntasäteelle tilavuuden ja jälkikaiunta-ajan funktiona

$$R_{tot} = 0.1 \sqrt{\frac{V}{\pi T_{60}}} . \quad (2.24)$$

2.5.2 Jälkikaiunta-ajan määrittäminen mittaamalla

Yksittäinen impulssivastefunktio ilmaisee ainoastaan tietyn kaiutinpisteen ja mikrofonipisteen välisen systeemin siirtofunktion huonetilassa. Jälkikaiunta tietyssä pisteessä on äänilähteen tai -lähteiden sijaintipaikkojen, huoneen ja tarkastelupisteen yhdessä määräämä ominaisuus. Pelkästään huoneen kuvaamiseen tarvitaan keskiarvoistusta yli erilaisten äänilähde-kuuntelupisteparien. Vielä tarkemmin jälkikaiunta on riippuvainen myös äänilähteestä, koska sen suuntaavuus vaikuttaa syntyvään äänikenttään ja sen vaimenemiseen (Lahti, 1995).

Jälkikaiunta-aika voidaan määrittää Schroederin esittämällä, yleisesti tunnetulla menetelmällä. Schroederin menetelmässä herätteenä on pseudosatunnainen kohinasignaali, ja sen kantava idea on vaivalloisen paikkakeskiarvoistamisen ekvivalenttisuus aika-keskiarvoistamiseen. Menetelmällä jälkikaiunta-ajan mittaus sekä määrittäminen helpottuu ja tarkkuus paranee olennaisesti.

Jälkikaiunta-ajalle voidaan laskea estimaatti käyttäen Sabinen kaavaa (2.23) ja verrata sitä todellisesta salista mitattuun aikaan. Esimerkiksi huoneen kokonaisabsorptioalaa voidaan arvioida ratkaisemalla kaava (2.23) absorptioalan suhteen ja sijoittamalla mitattu tulos siihen.

2.6 Saliäänienlaadun käsitteitä

Barron (1971) on osoittanut, että suoran, varhaisen ja jälkikaiuntaisen äänen keskinäisiä suhteita muuntelemalla voidaan vaikuttaa ratkaisevasti subjektiiviseen havaintoon. Perinteiset saliäänienlaadun tunnusluvut on määritetty standardissa ISO3382. Tässä esitellään muutamia aktiiviakustiikan yhteydessä käytettyjä tunnuslukuja.

Varhainen jälkikaiunta-aika (early decay time, EDT) lasketaan neliöidyn impulssivasteen logaritmisesta energian vaimenemiskäyrästä (energy decay curve, EDC) ja on määritelmänsä mukaisesti kuusi kertaa (vert. RT_{60}) se aika, jossa verhoikäyrä vaimenee 0 - 10 dB.

Selvyys (Clarity) kuvaa äänten erottumista toisistaan ja sille on määritetty objektiivinen mittaluku

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt}, \quad (2.25)$$

missä $h^2(t)$ on huoneen neliöity impulssivaste.

Kaiuntaisuus (reverberance, running reverberance) kuvaa huoneen jälkikaiunnasta musiikin soidessa syntyvää subjektiivista vaikutelmaa. Griesinger (1995c, 1995d) on Gaden (1989a, 1989b, 1992, katso kaavat 2.24-2.26) jälkeen tutkinut kaiuntaisuuden havaitsemista ja esittänyt, että kaiuntaisuutta (RR) ja salin tukivaikutusta muusikon instrumentille voidaan estimoida yhdellä objektiivisella tunnusluvulla vertaamalla salin impulssivasteen ensimmäisen 160 ms äänienergiaa seuraavaan, pelkästään salin heijastuksista aiheutuvaan 160 ms periodin äänienergiaan,

$$RR = RR_{160} = 10 \cdot \log \frac{\int_{160ms}^{320ms} p(t)^2 dt}{\int_0^{160ms} p(t)^2 dt}. \quad (2.26)$$

Salin heijastuksista aiheutuva äänienergia vaikuttaa ratkaisevasti muusikon salista saamaan tukivaikutukseen.

2.7 Geometrisen akustiikan menetelmiä

Akustiikan laskennallisilla menetelmillä on mahdollista mallintaa määrätyn tilan fysi-kaalista käyttäytymistä, analyyttisesti tai tilastollisesti. Tämä vastaa keinoitekoisesti luotua koeympäristöä, jossa voidaan suorittaa virtuaalisia mittauksia, jotka muutoin, ilman olemassa olevaa tilaa, olisivat mahdottomia. Huonetilan kaltaista monimutkaista akustista järjestelmää, varsinkaan jos tila poikkeaa yksinkertaisesta perusgeometriasta, ei ole helppo lähestyä teoreettiselta kannalta. Malliajattelu helpottaa ja varmentaa suunnittelua.

Geometrisen akustiikan peruslähtökohta on, että äänen aallonpituudeksi oletetaan lähes nolla. Tällöin ääni käyttäytyy säteittäisenä, kuten valo, ja äänen aaltoluonne jätetään huomiotta. Geometrisen akustiikan laskentamenetelmät eivät itsestään tuota diffraktiota, diffuusiota ja interferenssiä, jotka aiheutuvat äänen aaltoluonteesta. Näitä ilmiöitä täytyy mallintaa erikseen. Geometrisen akustiikan laskentamenetelmiä on yleisesti käytössä kaksi, säde- ja kuvalähdemenetelmä (Lokki, 1997).

Sädemenetelmä (ray-tracing) on käytetyin laskentamenetelmä tietokoneavusteisessa akustiikan suunnittelussa. Sädemenetelmällä lasketaan yleensä oktaavi- tai terssikaistoittain akustisia tunnuslukuja. Sädemenetelmän suosio perustuu tietokonegrafiikassa tehtyyn tutkimukseen ja kehitykseen. Sädemenetelmä mahdollistaa useiden fysi-kaalis-akustisten ilmiöiden, kuten seinien absorption ja diffuusion sekä ilman absorption mal-lintamisen (Lokki, 1997).

Sädemenetelmässä lähetetään yleensä pistemäisestä lähteestä joukko äänisäteitä, joiden etenemistä seurataan tutkittavassa tilassa. Säteet heijastuvat rajapinnoista peiliheijastuksina. Rajapinnalla säteen energiaa voidaan vähentää pinnan akustisten ominaisuuksien mukaan. Tulosten keräämiseksi tilaan sijoitetaan yksi tai useampia kuuntelupisteitä, joiden läpi kulkevat äänisäteet rekisteröidään, jolloin saadaan tilan energiavasteet kyseisissä pisteissä (Lokki, 1997).

Kuvalähdemenetelmässä (image source method) äänisäteiden heijastusreittejä vastaavat kuvalähteet etsitään peilaamalla oikeaa lähdettä jokaisen pinnan suhteen. Näin saadaan kaikki mahdolliset varhaiset heijastukset mukaan laskentaan, mutta esimerkiksi diffuusien heijastusten toteuttaminen on hyvin hankalaa. Tämän vuoksi kuvalähdemenetelmää käytetään yleensä yhdessä jonkin diffuusia jälkikäiuntaa tuottavan algoritmin kanssa (Lokki, 1997; Vian ja Martin, 1992; Jot *et al.*, 1995).

2.8 Lava-akustiikka

Hyvässä konserttisalissa esiintymislava ja sali ovat yksi ja sama toisistaan erottamaton tila. Lavalla olevilla muusikoilla on kuitenkin oman soittonsa ja muiden soiton kuulemisen kannalta hieman erilaiset kriteerit kuin yleisöllä. Luonnollisesti sekä soittajien että yleisön on syytä kuulla musiikki kaikkine eroineen sekä kokonaisuutena että yksityiskohtaisena; niin ajassa kuin tilassa; niin emotionaalisesti kuin analyttisesti. Saliakustiikan ja esiintymislava-akustiikan erottaminen tehdään ennen kaikkea käsitteellisen selvyyden takia, näkökulman määrittämiseksi. Ihanteellisessa konserttisalissa tällaiseen erotteluun ei pitäisi olla syytä.

Saliakustiikassa on keskitytty pääasiassa yleisötilan näkökulmaan; takaamaan, että kuulijoilla olisi tarjolla ihanteelliset akustiset olosuhteet. Soittajien olosuhteita on pidetty enemmänkin itsestään selvyyksinä, sivutuotteina. Vasta viimeisen 20-30 vuoden aikana on tehty tutkimusta myös esiintymistilassa, lavalla tai orkesterisyvennyksessä olevien muusikoiden spesifien akustisten olosuhteiden selvittämiseksi ja parantamiseksi.

Soittajille akustiikka vaikuttaa vahvasti siihen, miten musiikkiesitys luodaan. Se vaikuttaa ohjelmistoon, esityskäytäntöön (tempoihin ja dynamiikkaan), soittajien tekniikkaan ja tulkinnan yksityiskohtiin, kuten esimerkiksi kenraalipaussien pituuteen. Esiintyjän akustisen ympäristön tulee olla sellainen, että hän pystyy tuottamaan parhaan mahdollisen esityksen kuulijan kuultavaksi. Tällöin akustiikka ei saa aiheuttaa äänen ja tulkinnan tuottamista häiritseviä ilmiöitä, kuten kaikuja, häiritsevän voimakkaita heijastuksia tai äänen väritymistä. Lisäksi soittoympäristön tulee tukea muusikon tuottamaa ääntä. Salin tulee toimia soittimen akustisena jatkeena. Yhteissoitto asettaa soittoympäristölle omat vaatimuksensa. Yhteissoitto edellyttää tiivistä kontaktia soittajien välillä. Jos lavaolosuhteiden vähimmäisvaatimuksena pidetään, että kaikkien lavallaolijoiden tulee nähdä kapellimestari ja kapellimestarin tulee kuulla kaikki lavallaolijat, edellyttää onnistunut yhteissoitto sitä, että soittaja kuulee selkeästi sekä oman soitinryhmänsä että koko yhtyeen äänen. Meyerin (1994) mukaan akustiset olosuhdevaatimukset lavalla voidaan jakaa kolmeen laatutasoon:

1. Soittajan (vastaavasti laulajan) tulee kyetä soittamaan virheettömästi. Tämä edellyttää sopivaa balanssia suhteessa muihin soittajiin. Mikäli oman soitti-

men ääni kuuluu liian hyvin, syntyy helposti rytmillisiä ongelmia. Jos taas oman soittimen ääni on liian hiljainen, kärsii intonaatio, josta seuraa harmoniaongelmia.

2. Soittajan (kuten myös laulajan) tulee kyetä muodostamaan hyvälaatuista ääntä. Äänen tuottamiseen vaikuttaa se, minkälaisen vasteen tila antaa soittimen äänestä ja miten helpolta soittaminen tai laulaminen tilassa tuntuu. Hyvä vaste vaikuttaa muusikon varmuuteen, jolloin kiinniottojen ja artikulaation tarkkuus paranee. Lisäksi hyvälaatuinen ääni laajentaa käytettävää dynaamista aluetta ilman, että voimakkaat äänet kuulostavat raaoilta (tai väkinäisiltä) tai hiljaiset äänet epävarmoilta. Tällä laatutasolla edellytetään myös, että soittajien keskinäinen kuuluvuus mahdollistaa kokoonpanon eri osien dynamiikan (tasapainon) hallinnan.
3. Kolmannella, ihanteellisimmalla laatutasolla tavoitteena on koko orkesterin soinnin luominen. Tämä muodostuu yhtenäisestä dynamiikan ajallisesta hienorakenteesta ja yhteisesti tuotetusta artikulaatiosta varsinkin soitinryhmien sisällä. Orkesterin soinnin kannalta on tärkeää myös kapellimestarin kuulema sointikuva, jonka perusteella hän arvioi orkesterin esitystä konserttitallassa.

Näistä vaatimustaso 1. on lähinnä kuvitteellinen pelote, jolla on tarkoitus luoda mielikuva pohjanoteerauksesta, alimmasta mahdollisesta laatutasosta. Mikäli soittaja ei kuule itseään on soittaminen syytä keskeyttää asian tutkimiseksi.

Parin viime vuosikymmenen aikana lava-akustiikan mittaamenetelmiä on tutkinut tanskalainen Anders Gade (1989). Gade on pyrkinyt selvittämään muusikkojen subjektiivisen tarpeen ja lavalle muodostuvan äänikentän välistä suhdetta. Gade on esittänyt objektiivisia mittalukuja, jotka kuvaavat akustisia olosuhteita konserttisalin lavalla. Mittaluvut lasketaan määrätyistä pisteistä mitatuista huoneen impulssivasteista. Varhainen lavatukisuhde

$$ST_{early} = 10 \log 10 \frac{\int_{20ms}^{100ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} h^2(t) dt}, \quad (2.27)$$

kuvaa yhteissoiton helppoutta (kykyä kuulla muut orkesterin jäsenet). Lavatukisuhde

$$ST_{total} = 10 \log 10 \frac{\int_{20ms}^{1000ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} h^2(t) dt}, \quad (2.28)$$

kuvaa muusikon kykyä kuulla oma instrumenttinsa. Myöhäinen lavatukisuhde

$$ST_{late} = 10 \log 10 \frac{\int_{100ms}^{1000ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} h^2(t) dt}, \quad (2.29)$$

kuvaa puolestaan kaiuntaisuuden vaikutelmaa lavalla. Kaavojen (2.25 -2.29) osittainen päällekkäisyys kuvaa aihepiirin toistaiseksi vakiintumatonta määrittelykäytäntöä.

Esiintyjien kannalta salin merkittävimmät ominaisuudet löytyvät lavalta ja sen välittömästä läheisyydestä, joka voi toisinaan olla koko sali, mikäli lavaa ei voida rakenteellisesti erottaa salista. Toisaalta muusikon mielikuvaan äänenväristä ja kaiunnasta vaikuttaa aina myös salin jälkikaiuntainen vaste lavalle.

Noin 150-300 ms aikajaksolla tulevien voimakkaiden yksittäisten heijastusten merkitystä akustiseen äänenlaatuun ei vielä riittävästi tunneta. Keskustelussa on esiintynyt ajatus, että nämä heijastukset olisivat hyvälle akustiikalle merkityksellisiä. Tämä on jatkossa olennainen tutkimusaihe. Mikäli näillä heijastuksilla on merkitystä, on saliakustiikan suunnittelu kuviteltua monimutkaisempaa.

2.8.1 Esiintymislavalle asetettuja vaatimuksia

Orkesterisoittajien on todettu kyselytutkimuksissa pitävän parhaina lavaolosuhteita, joissa varhaiset heijastukset tulevat 17-35 ms suoran äänen jälkeen. Herkkyys heijastusten suuntariippuvuuden aistimiseen on instrumenttikohtaista. Muun orkesterin energian suhde omaan instrumenttiin tulisi olla -15dB: n ja +5 dB:n välillä. Orkesterin soittajille salin jälkikaiunta-ajan merkitys on toissijainen. Sen sijaan eduksi on, jos lavan EDT on vähintään 70% koko salin RT:stä (Gade, 1989).

Solistisessa roolissa jälkikaiunta-ajan merkitys on suurempi kuin yhteissoitossa. Solistin äänikuvan kannalta merkittäviä ovat varhaiset heijastukset (<150 ms), jotka yhdistävät suoraa ja heijastuvaa ääntä. Ensimmäinen heijastus saisi olla viivästynyt korkeintaan 35 ms (Gade, 1989).

Kuorolaulajille jälkikaiunta-aika on tärkein akustisia olosuhteita määrittävä ominaisuus. Sen lisäksi lavalla EDT:n tulisi olla salin jälkikaiunta-ajan luokkaa. Voimakkaat varhaiset heijastukset ennen 30 ms tai 60 ms:n jälkeen ovat eduksi. Sen sijaan n. 40 ms kohdalle osuvat varhaiset heijastukset tuntuisivat heikentävän preferenssiä verrattuna siihen, että varhaiset heijastukset puuttuisivat kokonaan. Muun kuoron äänienergian suhde (total energy ratio) omaan ääneen tulisi olla -15dB: n ja +5 dB:n välillä (Gade, 1989).

Laulusolistit tarvitsevat muusikoista eniten jälkikaiunnan kuulovaikutelmaa (auditory impression of reverberation). Laulajat suosivat myöhäisempiä heijastuksia välillä 60 ms -120 ms ja sen jälkeenkin, sillä oma ääni peittää helposti tätä varhaisemmat heijastukset. Varhaiset heijastukset, jotka tulevat n. 25 ms suoran äänen jälkeen voimakaimmasta kaiuntakentän suunnasta, voivat myös tukea laulamista (Gade, 1989).

2.8.2 Lavan mitat, soittajien sijainti ja nostimet

Gade (1989) on todennut, että yli 8 m etäisyydellä suoran äänen viive alkaa vaikeuttaa yhteissoittoa. Siten ideaalisesti kaikkien lavalla olijoiden tulisi olla toisistaan korkeintaan tämän matkan päässä ja esim. kapellimestarin etäisyys kaikkiin soittajiin pitäisi olla alle 8 m.

Pienen lavan etuja ovat läheisyys ja helppo yhteissoitto, mutta ongelmaksi muodostuvat kovaäänisten soittimien, esim. vaskien ja lyömäsoitinten äänen aiheuttama peitto ja jopa kuulovaurioriski. Nykyiset työmukavuus- ja -turvallisuusvaatimukset myös edellyttävät soittajille runsaammin lattiatilaa kuin esimerkiksi sata vuotta sitten. Vertailukohteiksi voidaan mainita vaikkapa Wienin Musikvereinsaal (v.1870), jonka lava on 130 m^2 ja Münchenin Philharmonie Gasteig (v. 1985), jonka lava on 250 m^2 . Gaden mukaan (1993) 100 soittajan orkesteri tarvitsee lavapinta-alaa n. 150 m^2 , sekä ylimääräisiä neliöitä solisteille ja kulkureitteihin. Tämän lisäksi lavan etulattiaan tulisi jättää ainakin 1 m levyinen kaistale vapaaksi lattiaheijastuksia varten. Nämä lisäneliöt vievät n. 40 m^2 ja kuoroa varten tarvitaan n. 50 m^2 lisää. Jotta etäisyydet lavalla eivät kasvaisi liian suuriksi, ei lava saa olla liian leveä eikä syvä. Sopiva lavan leveys voisi olla esim. n. 17 m ja syvyys n. 11 m (190 m^2 lava).

Pienemmille kokoonpanoille tulisi olla mahdollisuus pienentää lavan mittoja esimerkiksi siirreltävillä seinillä. Orkesterin tulisi sijoittua lavalla mieluummin taakse kuin aivan eteen. Tällöin pienelläkin kokoonpanolla pystytään hyödyntämään kaikkien ympäröivien pintojen heijastukset (varsinkin takaseinä) ja etulavasta saadaan lattiaheijastuksia yleisöalueelle.

Portaittain nouseva lava helpottaa yhteissoittoa, kun suora ääni kulkeutuu kaukana toisistaan istuville soittajille vapaasti vaimentumatta edessä istuviin soittajiin. Varsinkin suurilla orkestereilla vaimentuneen suoran äänen viivettä on vaikea paikata vielä viivästyneemmällä ja vaimentuneemmalla heijastuksilla (Gade, 1989).

2.8.3 Lavan seinät ja katto

Lavan läheisyydessä seinäpintojen tulee palvella esiintyjien tarvitseman heijastuskentän tuottamista. Saliin on hyvä tuottaa myös muita kuin lateraalisia heijastuksia ja luonnollisesti tärykaiun ja äänen fokuoimisen mahdollisuus tulee minimoida.

Lavan seinien ja katon muodon ja sijoitusten tulee olla sellaiset, että lava on samaa yhtenäistä tilaa muun salin kanssa. Siten käytettäessä esimerkiksi teatterinäyttämöä orkesterilavana orkesterikuoren eli liikuteltavien seinien käyttäminen on välttämätöntä.

Katto on tärkein varhaisia heijastuksia lavalle tuottava pinta. Jos lavan katto on liian korkealla, kuten esim. lavastetornissa tai kokonaiskorkeudeltaan korkeassa konserttisalissa, voidaan tarvittavat heijastukset tuottaa lavan yläpuolelle ripustettavien heijastavien elementtien, "pilvien" tai "kanoopin" avulla (Gade, 1989).

2.8.4 Lavan lattia

Lavan lattiataason korkeutta määritettäessä sekä lavan että katsomon istumajärjestelyt tulee ottaa huomioon. Liian korkea lava voi estää näkyvyyden katsomosta orkesterin keskiosiin. Lavan lattian tulisi olla vähintään 0,5 m katsomon lattiaa ylempänä, jotta solisti pääsee riittävästi esille, mutta yleensä yli 1,2 m on liian paljon eturivien näkölinjan kannalta.

Nakanishi & al. (1999) ovat tutkineet lavan lattian rakenteen vaikutusta syntyvään äänikenttään soittimilla, jotka ovat sellon tapaan mekaanisessa kontaktissa lattiaan. Ver-

rattaessa kiinteää lattiaa korotettuun lavaan, jonka alapuolella on ilmatila voidaan todeta, että puinen korotettu lava vahvistaa säteilevää ääntä jopa 6 dB verrattuna kiinteään betonilattiaan. Tämän on mainittu tuottavan “lämpimän soundin”. Sen lisäksi levyabsorbtio aiheuttaa vaimennusta jollakin taajuudella ja ilmatilan akustiset resonanssit aiheuttavat vaimennusta ja vahvistusta taajuusriippuvasti.

3 Sähköakustinen järjestelmä

Saliäänen kaiuntaominaisuuksia ja selkeyttä on jo kohta neljän vuosikymmenen ajan parannettu aktiiviakustisilla järjestelmillä (reverberation enhancement systems, RES). Yleisesti ottaen kaiuntaominaisuuksia ei ole voitu muuttaa ratkaisevasti aiheuttamatta äänikenttään taajuusalueen vääristymää. Sähköisesti muunneltavaan saliakustiikkaan on suhtauduttu sekä yleisön että muusikoiden keskuudessa varauksin. Nykyisillä DSP-tekniikoilla on jo mahdollista kamppailla ennakkoluuloja vastaan.

Yleinen syy aktiiviakustisten järjestelmien käytölle on salin monikäyttöisyyden lisääminen. On syntynyt monitoimitalokonsepti (multipurpose hall). Varsinkin pienille kaupungeille tämä on edullinen tapa toteuttaa yleiskäyttöinen tila esimerkiksi teatteri, konserttimusiikki- ja oopperakäyttöön. Harjoitussalit ovat uusimpia aktiiviakustiikan sovelluskohteita. Niissä tarkoituksena on saada suhteellisen pieni tila kuulostamaan suurelta konserttisalilta. Pienissä tiloissa suoran äänen vahvistaminen ei yleensä ole tarpeen, absorptiopinta-alan lisääminen sitä vastoin parantaa äänen selvyyttä.

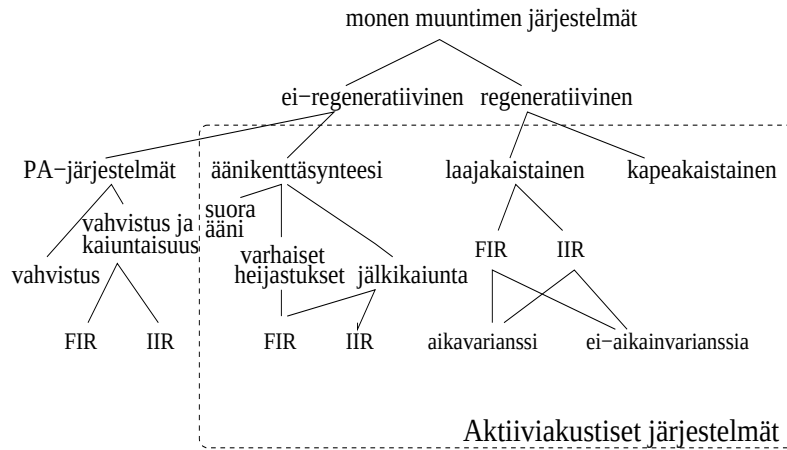
Luvussa esitetään äänenvahvistusjärjestelmien yleinen luokitus, hieman poiketen Kleinerin ja Svenssonin (1995) esityksestä. Pääosin keskitytään regeneratiivisen järjestelmätoteutuksen yleiseen analyysiin, sekä esitetään energiapohjaisen stabiilisuusanalyysin perusteet. Lopuksi perehdytään takaisinkytkettyjen LTI- ja LTV-järjestelmien stabiilisuustarkasteluun.

3.1 Järjestelmäluokitus

Kuvassa 3.2 on yleinen äänentuottojärjestelmien luokitus. Aktiiviakustisilla järjestelmillä pyritään ennen muuta vaikuttamaan huonetilan akustisiin ominaisuuksiin, ei vahvistamaan suoraa ääntä. Aktiiviakustinen järjestelmä on käytännössä aina monen muuntimen järjestelmä. Vahvistuskanavia on korkealaatuisissa järjestelmissä useita. Mikrofonit sijaitsevat niissä yleensä vähintään huoneen kaiuntasäteen etäisyydellä äänilähteestä. Akustisen takaisinkytketymisen takia ne aina jossain määrin vahvistavat tuottamaansa ääntä.¹

1. Kirjallisuudessa (esim. Svensson, 1994) käytetään yleisesti termejä regeneratiivinen (regenerative) ja ei-regeneratiivinen (non-regenerative). Poletti käyttää samoista asioista nimitystä non-in-line (regenerative) ja in-line systems (non-regenerative).

Äänentuottojärjestelmien luokitus



Kuva 3.1: Äänilähteiden vahvistamiseen ja huonetilan akustisten ominaisuuksien muuntamiseen tarkoitetut järjestelmät.

Regeneratiivisissa kapeakaistaisissa järjestelmissä kanavia saattaa olla useita kymmeniä tai jopa satoja. Regeneratiivinen järjestelmä on huoneen kanssa akustisesti sarjaan kytketty. Akustiset muuntimet ovat yleensä vähintään huoneen kaiuntasäteen etäisyydellä kuulihoista ja soittajista. Akustista takaisinkytkentymistä käytetään hyväksi jälkikaiunnan tuottamiseen, erillisiä kaikulaiteita ei juuri käytetä. Stabiilisuusongelmat sekä spektrin väritymä (kts. kappale 4.1) ovat kääntäen verrannolliset kanavien lukumäärään. Suuri määrä kanavia puolestaan tarkoittaa suurta investointia. Assisted Resonance (Parkin & Morgan, 1970) on esimerkki järjestelmästä, jossa akustinen takaisinkytkentä on ainoa käytetty viivelinja. Kapeakaistaisia kanavia on käytössä suuri määrä riittävän vahvistuksen tuottamiseksi. Yksittäisen kanavan vahvistus säädetään niin, että järjestelmä pysyy kaikissa tilanteissa selvästi stabiilina.

Regeneratiivinen laajakaistainen järjestelmä on nykyisin tavallisin aktiiviakustisen järjestelmän toteutusmalli. Näissä järjestelmissä kaiunta toteutetaan käytännössä aina keinotekoisesti. Luonnollisen kuuloisen kaiun tuottaminen on oma taiteenlajinsa (kts. luku 5.). Kaikulaiteen lisääminen järjestelmän siirtofunktioon vaikeuttaa akustisesta takaisinkytkentymisestä aiheutuvia ongelmia. Akustista takaisinkytkentää joudutaan aina jollakin tapaa rajoittamaan. Rajoitusmenetelmien, kuten aikavarianttien suodinten heikkoutena on se, että ne tuottavat jonkin verran vääristymää signaaliin. Näitä vääristymiä pystytään kuitenkin hallitsemaan helpommin kuin epästabiilisuudesta aiheutuvia, eikä niitä yhtä helposti havaita subjektiivisessa kuuntelussa. Luvuissa 4 ja 5 käsitellään takaisinkytkentymisen rajoitusmenetelmiä.

Huoneen impulssivasteen manipuloiminen akustisesti sarjaan kytketyllä regeneratiivisella järjestelmällä ei ole varhaisen energian osalta täysin ekvivalenttinen huoneen fyysikaalisten ominaisuuksien muuttamisen kanssa.¹ Huoneen fyysikaalisia ominaisuuksia

1. Kuttruff (1991:128) on esittänyt akustisesti kytkettyjen huoneiden teorian.

muutettaessa säilyy impulssivasteen verhoikäyrä aina lähes eksponentiaalisena. Verhoikäyrän muuttuminen ei-eksponentiaaliseksi (broken decay) on varsinkin kapeakaistaisten regeneratiivisten järjestelmien heikkous.

Ei-regeneratiivisesta (non-regenerative) akustiikan parantamiseen tarkoitetusta järjestelmästä esimerkkinä voidaan mainita 1980-luvun lopulla Berkhoutin (Berkhout, 1988, 1993) kehittämä aaltoteoriaan pohjautuva äänikenttäsynteesi. Siinä yksittäiset kaiuttimet on korvattu kaiutinrivistöillä (arrays), jotka synnyttävät kenttään aaltorintamia (wave front) todellisten tai nk. käsitteellisten lähteiden (notional sources) kautta. Toisin kuin tavanomaiset lähestymistavat, äänikenttäsynteesi toteuttaa tilayhtälön ratkaisun, joka tuottaa huoneeseen alkuperäistä kenttää identtisesti kaikissa havaintopisteissä vastaavan kentän (Reijnen, 1995). Tämä asettaa järjestelmälle kovia vaatimuksia (sekä tutkimus- että laitteistomielessä), ja edellyttää laboratoriomaisesti hallittuja olosuhteita. Kaupallisista järjestelmistä ACS:ssä (Acoustic Control Systems) de Vriesin (2000) mukaan sovelletaan äänikenttäsynteesin periaatetta. ACS:n valmistaja ei ilmoita miten äänikenttäsynteesiä on järjestelmässä sovellettu. Järjestelmän signaalinkäsittelyn ydin perustuu luultavasti viivelinjoihin, joiden avulla kaiuttimista saliin säteilevä ääni saadaan vastaamaan heijastuksia, jotka olisivat ikään kuin peräisin todellisen salin ulkopuolelle pystytetyn suuremman salin seinistä. ACS pohjautuu 1980-luvun loppupuolella kehitettyyn analogiseen tekniikkaan ja on selvästi regeneratiivinen järjestelmä (mikrofonit kaiuntasäteen ulkopuolella soittajista) mikä näyttää olevan ristiriidassa äänikenttäsynteesin peruslähtökohdan, eli ei-regeneratiivisuuden kanssa. Jos mikrofonit ovat kaiuntasäteen ulkopuolella soittajista, voidaan huoneen vaikutus ehkä poistaa signaalista dekonvoluomalla, ja näin synnyttää ikään kuin ei-regeneratiivinen järjestelmä. Takaisinkytketymisen vaaraa tämä ei kuitenkaan poista. Äänikenttäsynteesiä ovat käsitelleet Berkhout (1988, 1992, 1993, 1997, 1998), De Vries, Boone ja de Bruijn (1995, 1998).

PA-laitteistot voidaan mainita esimerkkeinä ei-regeneratiivista äänen vahvistusjärjestelmistä. Niillä pyritään ensisijaisesti vahvistamaan suoraa ääntä, mutta myös kaiuntaisuuden lisääminen on mahdollista ja helppoa. Tällöin kaikkialgoritmi on kuitenkin enemmän vahvistettavaa signaalia kuin huoneen akustisia ominaisuuksia manipuloiva efekti. Äänilähde pyritään yleensä äänittämään yhdellä tai useammalla lähimikrofonilla, jolloin suoran äänen suhde mikrofonin poimimaan vahvistettuun ääneen tulee mahdollisimman suureksi. Voidaan käyttää suuntaavia tai muuten lähteen ulkopuoliselle äänelle epäherkkiä mikrofoneja, kuten kontakti- tai pietsomikrofoneja. Valtaosa äänestä suunnataan kuulijoihin, pois lähteestä ja sitä äänittävästä mikrofonista.

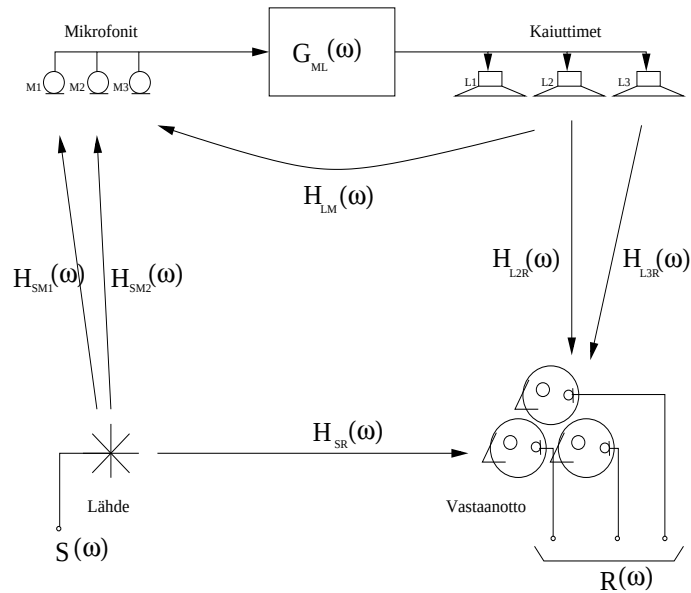
Passiiviakustiset järjestelmät. Saliin kytkettävä järjestelmä voi olla akustinen tila (kaikukammio) tai mekaaninen (jousi- ja levykaiut). Myös liikutettavilla seinäpaneeleilla voidaan toteuttaa akustiikaltaan muunneltava sali. Ylimääräisen säätelyvaivan lisäksi tämä aiheuttaa näkyviä muutoksia salin sisustukseen. Mekaniikassa saatetaan käyttää sähköisiä sensoreita tai ohjauslaitteita. Mekaaniset muutokset ovat kuitenkin hitaita. Muita passiiviakustisia järjestelmiä ovat elektroakustiset muuntimet, jotka toimivat resonaattoreina muuntaen huoneen ominaisuuksia (Kleiner, 1995). Kiinnostavia välimuotoja ovat aktiiviset kaiuntajärjestelmät (active reverberation systems, ARS)¹,

1. Määritelmä on kirjoittajan oma. Esimerkiksi Meynial (1999) käyttää lyhennettä ARS (=RES) kakista aktiiviakustisista järjestelmistä. Meynial on eräs CARMEN-järjestelmän kehittäjiä.

joilla vahvistetaan olemassa olevia seinäheijastuksia, mutta ei varsinaisesti lisätä jälkikaiuntaa. Ranskalainen CARMEN on esimerkki tällaisesta.

3.2 Regeneratiivinen monikanavajärjestelmä

Kuvassa 3.2 on esitetty aktiiviakustisessa järjestelmässä normaalisti esiintyvät siirtofunktiot. Riippuu järjestelmän toteutuksesta ja huoneen akustisista ominaisuuksista millaiset muodot kukin siirtofunktio saa. Olennaista on, että kukin siirtofunktioista esiintyy kaikissa aktiiviakustisissa järjestelmissä. Simulaatiossa voidaan kutakin siirtofunktiota kuvata impulssivasteena kahden pisteen välillä.



Kuva 3.2: Aktiiviakustisen järjestelmän yleinen kuvaus (Svensson, 1995).

Regeneratiivisessa järjestelmässä mikrofonit (kuva 3.2) ovat lähteen kaiuntakentässä. Järjestelmään kuuluu m mikrofonia, joista saatava signaali viedään kanavakohtaiselle prosessointiyksikölle, josta käsiteltyt signaalit johdetaan n kaiutinkanavaan. Prosessointi on käytännössä jälkikaiunnan luomista sekä akustisen takaisinkytytyksen ehkäisemistä. Prosessointi aiheuttaa signaaliin aina jonkin verran vääristymää.

Kaavan (2.8) konvoluutiointegraali voidaan toteuttaa lineaariselle aikainvariantille (LTI) järjestelmälle yksinkertaisena kertolaskuna taajuusalueessa

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega). \quad (3.1)$$

Monikanavajärjestelmässä siirtofunktio lähteestä kuuntelupisteeseen voidaan esittää näiden välisen siirtofunktion ja aktiiviakustisen järjestelmän kokonaissiirtofunktion summana (Svensson, 1995)

$$H_{tot} = H_{SR} + H_{EA} \quad (3.2)$$

ja H_{EA} voidaan esittää eksplisiittisesti käyttämällä sopivia siirtofunktioita

$$\mathbf{H}_{EA} = \mathbf{H}_{LR} \bullet [(\mathbf{E} - \mathbf{G}_{ML} \mathbf{H}_{LM})^{-1} \mathbf{G}_{ML} \mathbf{H}_{SM}], \quad (3.3)$$

jossa $\mathbf{H}_{LR} = n$ kaiuttimesta yhteen kuuntelupisteeseen muodostettujen siirtofunktioiden $H_{LR}(\omega)$ ($n \times 1$) vektori,

$\mathbf{E} = (n \times n)$ yksikkömatriisi,

$\mathbf{G}_{ML}$ = vahvistusmatriisi, m mikrofonista n kaiuttimeen muodostettujen siirtofunktioiden $G_{ML}(\omega)$ ($n \times m$) matriisi,

$\mathbf{H}_{LM}$ = n kaiuttimesta m mikrofoniin muodostettujen siirtofunktioiden $H_{LM}(\omega)$ ($m \times n$) matriisi,

$\mathbf{H}_{SM}$ = lähteestä m mikrofoniin muodostettujen siirtofunktioiden $H_{SM}(\omega)$ ($m \times 1$) vektori,

n = kaiuttimien lukumäärä,

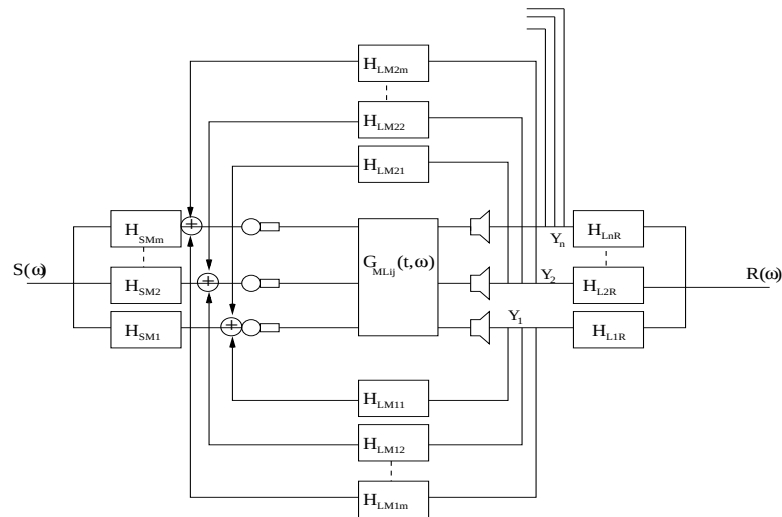
m = mikrofonien lukumäärä,

$\bullet$ = pistetulo.

Järjestelmän epästabiilisuus ja siitä aiheutuva väritymä kuvautuu yhtälön (3.3) rekursiiviseen osaan

$$\frac{1}{(\mathbf{E} - \mathbf{G}_{ML} \mathbf{H}_{LM})}. \quad (3.4)$$

Jos $\mathbf{G}_{ML}$:n m tuloa miksataan keskenään jossakin suhteessa, on kysymyksessä koherentti järjestelmä. Useimmat regeneratiiviset järjestelmät ovat jossakin määrin kohe-



Kuva 3.3: Järjestelmän kokonaissiirtofunktion lohkokaavio.

rentteja. Ei-koherentti järjestelmä on tavallaan yksinkertaisin erikoistapaus m

mikrofoni- ja n kaiutinkanavaisesta koherentista järjestelmästä, jossa $m = n$. Ei-koherentissa järjestelmässä $G_{MLij} = 0$, kun $i \neq j$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$. Toisin sanoen jokainen mikrofoni/kaiutinkanava toimii itsenäisesti, yksi tulo vastaa yhtä lähtöä (Kleiner, 1995). Matriisin tulojen ja lähtöjen välille saadaan kuvan 3.3 mukaisesti riippuvuudet:

$$\begin{cases} G_{ML11}(SH_{SM1} + Y_1H_{LM11} + Y_2H_{LM21} + \dots + Y_nH_{LMn1}) = Y_1 \\ G_{ML22}(SH_{SM2} + Y_1H_{LM12} + Y_2H_{LM22} + \dots + Y_nH_{LMn2}) = Y_2 \\ \dots \\ G_{MLmn}(SH_{SMm} + Y_1H_{LM1m} + Y_2H_{LM2m} + \dots + Y_nH_{LMnm}) = Y_m \end{cases}, \quad (3.5)$$

($S = S(\omega)$). Koko järjestelmän vaste havaintopisteeseen saadaan lineaarisen yhtälöryhmän ratkaisusta summana

$$Y_1H_{L1R} + Y_2H_{L2R} + \dots + Y_nH_{LnR} = R(\omega), \quad (3.6)$$

josta elektroakustisen järjestelmän siirtofunktio lähteestä vastaanottopisteeseen

$$\frac{R(\omega)}{S(\omega)} = H_{EA}. \quad (3.7)$$

3.3 Energiapohjainen tarkastelu

Energianäkökulmasta aktiiviakustinen monikanavajärjestelmä on suoraviivainen analysoitava. Energia-analyysi perustuu energiatihedysten tai neliöidyn paineen keskiarvoistukseen yli tarkasteltavan taajuusalueen (Svensson, 1994).

Jos jokainen kaiutin säteilee saman tehon P_L , saadaan yhtälö (2.15) muotoon

$$V \frac{\partial}{\partial t}(w) = P_0 + nP_L - S_A w \frac{c}{4}, \quad (3.8)$$

missä V on huoneen tilavuus, w on äänikentän energiatiheys, S_A on huoneen kokonaisabsorptioala, c äänen nopeus ilmassa, P_0 lähteen ääniteho, P_L on järjestelmäkaiuttimen ääniteho. Kaiuttimen säteilemä ääniteho saadaan kanavan tehovahvistuskertoimen μ^2 avulla

$$P_L = w\mu^2. \quad (3.9)$$

Tehovahvistuskerroin kuvaa kanavan aiheuttamaa lisäystä huoneen kokonaisenergiatiheyteen. Tämä riippuu järjestelmän kaikista ominaisuuksista, ei yksinomaan vahvistusmatriisista G_{ML} .

Yhtälöistä (3.8) ja (3.9) saadaan järjestelmän vahvistaman äänikentän stationaarinen energiatiheys tasapainotilassa

$$w_{S,on} = P_0 \frac{4}{cS_A} \frac{1}{1 - n \frac{4\mu^2}{S_A c}} = w_{S,off} \frac{1}{1 - n\beta_{av}^2}, \quad (3.10)$$

jossa kanavien keskimääräinen tehovahvistus (Svensson, 1994)

$$\beta_{av}^2 = \frac{4\mu^2}{S_A c}. \quad (3.11)$$

Yhtälöstä (3.10) saadaan monikanavajärjestelmän kokonaistehovahvistukselle lauseke vahvistetun ja vahvistamattoman järjestelmän energiatiheyksien suhteena (vert. tehosuhteen neliöön)

$$G_p = \frac{w_{S,on}}{w_{S,off}} = \frac{\tilde{p}_{on}^2}{\tilde{p}_{off}^2} = \frac{1}{1 - n\beta_{av}^2}. \quad (3.12)$$

Yhtälössä oletetaan huoneen äänikenttä aina diffuusiksi. Yhtälö (3.12) kuvaa järjestelmän kokonaisvahvistusta kanavien määrän ja tehovahvistuskertoimen funktiona. Tulon $n\beta_{av}^2$ lähestyessä yhtä järjestelmä muuttuu epästabiiliksi (järjestelmän energiatiheys kasvaa äärettömiin, käytännössä kierto saturoituu jollekin tasolle). Tällöin epästabiilisuus on laajakaistaista. Tutkittavaksi jää kuinka hyvin yhtälö pitää paikkansa, jos äänikenttä ei ole diffuusi ilman järjestelmää.

3.4 Aktiiviakustisen järjestelmän stabiilisuus

Aktiiviakustinen järjestelmä huoneessa on tyypillisesti monen akustisen takaisinkytkentäsilmukan yhdistelmä (multi-feedback system). Tällaisen järjestelmän teoreettinen analysointi on hankalaa. Jos järjestelmä sijoitetaan tilaan, joka on pinnoiltaan täysin vaimennettu, muodostuu akustisesti takaisinkytkettyvään äänen siirtotie suoraan kaiuttimen ja mikrofonin välille. Tällöin analyttinen tarkastelu on periaatteessa mahdollista. Mikäli huone on kaiuntainen ja varsinkin kun huoneen äänikenttä on diffuusi, muodostuu kaiuttimien ja mikrofonien välille siirtotie myös diffuusin äänikentän kautta (Nielsen, 1999; Schroeder, 1964).

Jokaisen reaalisen aktiiviakustisen järjestelmän silmukkavahvistuksella S_L on raja-arvo, jolla taajuusvasteen maksimeissa syntyy kontrolloimaton positiivinen takaisinkytkentä kaiuttimien ja mikrofonien välille. Tällöin yksittäisen maksimitaajuuden vaimenemisaika (decay) pitenee aiheuttaen samalla äänen väritymää. Tämä ilmiö määrittelee käytännössä suurimman mahdollisen vahvistuksen. Väritymää esiintyy käytännössä noin 10 dB ennen kuin järjestelmä muuttuu epästabiiliksi (gain before instability, GBI). Nyquistin stabiilisuusehdoksi saadaan

$$\text{Re}[G_{ML}H_{LM}] < 1, \quad (3.13)$$

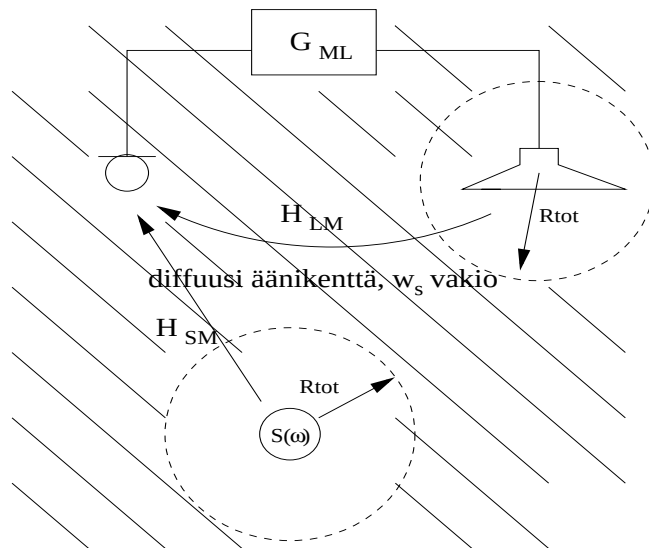
kaikilla taajuuksilla. Kanavan suurin mahdollinen vahvistus riippuu aina huoneen jälkikaiunta-ajasta ja kanavan kaistanleveydestä.

Takaisinkytkennän ja äänen väritymän ongelma on LTI-suotimilla hyvin tunnettu. Aktiiviakustisen järjestelmän yksittäinen vahvistuskanava on tyypillinen positiivisesti takaisinkytketty silmukka. Tälle silmukalle voidaan määritellä siirtofunktio (open loop transfer function), joka ilmaisee silmukan taajuusvasteen. Avoimen silmukan siirtofunktio määritellään

$$S_L(f) = G_{ML}(f)H_{LM}(f), \quad (3.14)$$

missä G_{ML} on vahvistusmatriisi. Avoimen silmukan siirtofunktiota kutsutaan myös usein silmukavahvistukseksi (loop gain). Koska takaisinkytkentäsilmutuksessa huonevaste ei ole vakio (ilmankosteus, ilmavirtaukset, liikkuvat ihmiset ym.), myöskään silmukavahvistus ei ole vakio. Kuvan 3.4 takaisinkytketyn yksikanavaisen järjestelmän siirtofunktio saadaan kaiuttimesta mikrofonille kytkeytyvän signaalin ja mikrofonille saapuvan hyötysignaalin suhteena:

$$G_{ML, closed} = \frac{G_{ML}}{1 - G_{ML}H_{LM}}. \quad (3.15)$$



Kuva 3.4: a) Yksikanavainen järjestelmä diffuusissa äänikentässä. R_{tot} on kaiuntasäde järjestelmän ollessa käytössä. Diffuusin äänikentän energiatiheys on vakio (kuten myös S_L) kaikkialla kaiuttimen ja äänilähteen kaiuntasäteiden ulkopuolella.

Keskimääräiselle silmukavahvistukselle (mean loop power gain, MLG) voidaan määritellä tehollisarvo

$$MLG = \overline{|S(f)|^2}, \quad (3.16)$$

keskiarvoistamalla kiinnostavan taajuusalueen ylitse. Monikanavajärjestelmälle tämä saadaan paikkakeskiarvoistamalla jokaisen vahvistuskanavan suhteen (Svensson, 1995II)

$$MLG_{av} = \langle |G_{ML}H_{LM}|^2 \rangle. \quad (3.17)$$

Schroeder on määrittänyt odotusarvon RTF:n huippuarvon ja keskiarvon suhteelle (peak to mean ratio, P2M)

$$\left(P2M = 10 \log \left(\frac{\max(|S(f)|^2)}{MLG} \right) \right) = 10 \log(\log(B_w RT_{60})) + 3.6 \text{ dB} \quad (3.18)$$

missä B_w on tarkasteltava kaistanleveys (Nielsen, 1999).

Nyquistin stabiilisuusehdosta (kaava (3.13)) Schroeder on määrittänyt odotusarvon suurimman mahdollisen silmukkavahvistuksen arvolle GBI (gain before instability),

$$GBI = 10 \log(MLG) [\text{dB}]. \quad (3.19)$$

Jos silmukkavahvistus tunnetaan, saadaan

$$GBI = -10 \log \frac{\max(|S(f_0)|^2)}{MLG} [\text{dB}], \quad (3.20)$$

missä f_0 on taajuuksien joukko, jolla $S(f)$ on reaaliarvoinen. Schroeder on määritellyt edelleen GBI:lle odotusarvon diffuusissa äänikentässä

$$\langle GBI \rangle = -10 \log \left(\left[\log \left(B_w \frac{RT_{60}}{22} \right) \right] - 3.8 [\text{dB}] \right) \quad (3.21)$$

Kaavan (3.19) mukaan yksittäisellä huonesiirtofunktion $|H_{LM}|^2$ mooditaajuudella epästabiilisuus saavutetaan todellisuudessa noin 10dB matalammilla silmukkavahvistuksen tasolla kuin mitä laajakaistaisessa keskiarvotarkastelussa käy ilmi. Kun laajakaistainen silmukkavahvistus määritellään keskiarvona yli koko taajuusalueen, taajuusvasteen maksimien merkitys siinä vähenee. Subjektiiivisessa kuuntelussa taajuusvasteen maksimit ovat kuitenkin aina merkityksellisiä.

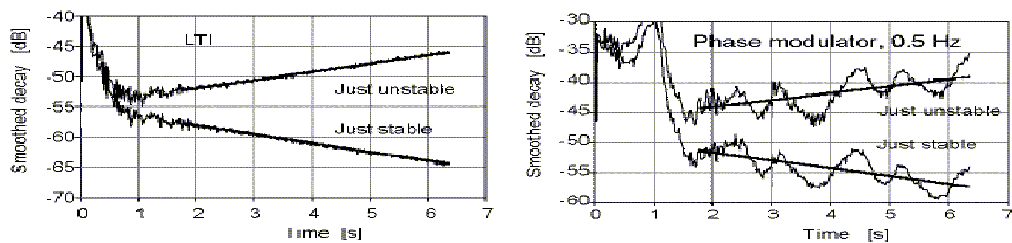
Yllä olevat odotusarvot pätevät siis ainoastaan diffuusiin äänikenttään, joka voidaan olettaa huoneen Schroederin taajuuden (kaava (2.10)) yläpuolisilla taajuuksilla päteväksi. LTI-järjestelmien stabiilisuuden ennustamiseksi esitettyjä kriteereitä ei voi suoraan hyödyntää LTV-toteutuksien analysointiin, mutta esimerkiksi GBI:n määritelmä on pääpiirteissään yleispätevä (Nielsen, 1999).

3.4.1 Simulaatio

Aktiiviakustisen järjestelmän toimintaa tutkittiin kuvan 3.3 mukaista systeemiä simuloimalla. Malli ratkaisee käytännössä kaavan (3.5) lineaarisen yhtälöryhmän tuntemattomien $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n$ suhteen ja tekee sijoitukset kaavaan (3.6) taajuustasossa, jolloin saadaan koko n -kanavaisen ei-koherentin (yksinkertaisin tapaus) järjestelmän siirto-

funktio. Laskenta tehtiin MATLAB-ympäristössä, TKK:n luentosalista T3 mitatuilla todellisilla impulssivasteilla. Mittaukset tehtiin simulaation tarpeisiin sopivasti MLSSA-järjestelmällä, asennetun järjestelmän lähde-, kuuntelu-, mikrofoni- ja kaiutin pisteistä vastaavista paikoista. Sekä mittauksissa että simulaatiossa näytteenottotaajuus oli 44.1 kHz, mikä simulaatiota ajatellen on turhan suuri: koko taajuuskaistaa ei tarvita, 0-5 kHz kaista olisi Svenssonin (1995) mukaan riittävä. Laskentatehon menetytys alkoi tuntua kanavien määrän lisääntyessä. Kanavien määrän ollessa yli neljä lineaarisen yhtälöryhmän ratkaisun (kaava 3.6) pituus ja samalla laskenta-aika kasvoivat liian suuriksi.

Simulaatio vahvisti käsitystä siitä, miten järjestelmän tuottama ääni värityy vahvistusta lisättäessä, ja muuttuu lopulta epästabiiliksi. Lopputulosta saatettiin kuunnella asetamalla herätteeksi kaiuttomassa huoneessa äänitettyä musiikkia. Simulaatiotapa todettiin kuitenkin laskentatarpeen puolesta epätydyttäväksi todellisten koherenttien järjestelmien analysointiin.



Kuva 3.5: Simulaatiosta saatu lähtösignaali kun tulona käytetään yksikköimpulsseja. Kuvassa a) on käytössä tavallisia LTI suotimia ja kuvassa b) on käytetty vaihemodulaatiota, takaisinkytkeytymisen ehkäisemiseksi. Yksikköimpulssin taso on 0dB, hieman jälkeen ajanhetken $t=0$. Lähtösignaali on konvoluoitu 2.5ms suorakaideikkunalla ennen piirtoa. Kummassakin kuvassa on esitetty kaksi vahvistustasoa 0.4 dB:n erolla, joista voimakkaampi aiheuttaa järjestelmän muuttumisen epästabiiliksi. Suorat viivat ilmaisevat vaimenemiskäyrän trendin (kuva Svenssonilta (1995), vastaa toteutettuja simulaatioita).

4 Järjestelmäsuunnittelu ja äänen värittyminen

Vähäinenkin subjektiivisesti havaittava äänen värittyminen saattaa tehdä muuten toimivan aktiiviakustisen järjestelmän käyttökelvottomaksi. Järjestelmän osatekijöiden keskinäistä vaikutusta ei ole aina helppo ennustaa. Mikäli tilaan tarvittava kaiuntaisuuden lisäys on niin vähäistä, että järjestelmä pysyy selvästi stabiilina, on suunnittelu suoraviivaista: käytetään vain mahdollisimman laadukkaita komponentteja. Useimmiten tämä ei vielä riitä, vaan äänen väritystä kaikesta huolimatta esiintyy. Tällöin takaisinkytkemistä voidaan ehkäistä:

1. Mikrofonien ja lähteen välistä etäisyyttä pienentämällä.
2. Mikrofonien ja järjestelmäkaiuttimien välistä etäisyyttä kasvattamalla.
3. Suuntaamalla mikrofonit ja kaiuttimet pois päin toisistaan.
4. Alentamalla järjestelmän vahvistustasoa.
5. Kasvattamalla kanavien lukumäärää.
6. Luomalla aikavarianssia (amplitudi-, taajuus-, vaihe- ja viivemodulaatiot) järjestelmän siirtofunktioon.
7. Kumoamalla takaisinkytketynyt signaali tulosignaalista.

Tässä luvussa käsitellään äänen väritystä ja akustisen takaisinkytkemisen passiivista hallintaa (kohdat 1 - 5). Luvussa 5 käsitellään akustisen takaisinkytkemisen aktiivista hallintaa digitaalisin signaalinkäsittelymenetelmin (kohdat 6 ja 7).

4.1 Äänen värittyminen

Väri (color) viittaa visuaaliseen havaintoon, valon spektriin, joka heijastuu havaintokohteesta. Käsite on vakiintunut myös musiikin ja akustiikan terminologiaan. Puhutaan sointiväristä (timbre). Sointiväri on ero, joka kuullaan perustaajuudeltaan (mikäli se on määriteltävissä) sekä voimakkuudeltaan yhdenmukaisissa äänissä. Äänenväriä viitataan äänen spektrirakenteeseen.

Luonnollisilla äänillä on monimutkainen spektrirakenne, siis luonnostaan jokin sointiväri. Ainoastaan synteettisesti tuotettu puhdas sini-aalto on "väritön", mutta akustisesti muunnettuna tämäkin ei ole yhtä puhtaan luonnon kuin sen matemaattinen abstraktio. Toistettaessa äänen spektrirakenne suodattuu siirtotien (mikrofonien, järjestelmän, kaiuttimien ja huoneen) siirtofunktioiden mukaisesti.

Äänen väritykselle on pyritty määrittelemään subjektiivisia mittasuureita (Nielsen, 1996). Näillä pyritään kuvaamaan eroa, joka äänessä havaitaan verrattuna sen normaali-

liin, neutraaliin alkuperään verrattuna. Mittasuureiden tulisi siis välittää kuulijalle tietoa siitä minkä verran kuultava ääni kuulostaa siltä, miltä sen tulisi kuulostaa (Nielsen, 1996).

4.1.1 Äänen väritymä keinotekoisessa kaiunnassa

Tavallisesti huonesiirtofunktio (RTF) on väistämättä jonkin verran epätasainen, mutta tätä ei normaalisti kuulla äänen väritymänä. Huonesiirtofunktio voidaan ajatella suodattimena (yksinkertaisena viivelinjana). Viivelinjan resonanssitaajuudet voidaan ilmaista seuraavasti

$$f_n = n f_s D, n = 1, 2, \dots, D-1, \quad (4.1)$$

Missä f_s on näytteenottotaajuus ja D on suotimen viive (näytettä). Tällaista suodinrakennetta kutsutaan FIR kampasuotimeksi (Orfanidis, 1996). Sen taajuusvasteeseen muodostuu vaimennukset jokaisen resonanssitaajuuden maksimin väliin intervallitain yli koko taajuusalueen. Todellinen RTF on yleensä hyvin monimutkainen viivelinja.

Konserttisaleissa yksittäisiä kaikuja, tärykaikua ja muita kampasuodattumista aiheuttavia ilmiöitä pyritään välttämään. Kampasuodattumisesta aiheutuva väritymän havaintokynnys kasvaa kun viive D pienenee. Tämä osaltaan selittää miksi hyvin voimakkaat, mutta lähekkäin olevat epätasaisuudet huonesiirtofunktion taajuusvasteessa eivät välttämättä aiheuta havaittavaa väritymää ääneen (Kuttruff, 1991: VII.3).

Nielsen (1996) mainitsee Kuhlin (1968) tutkimuksen, jossa on todettu, että jälkikaiunnan mooditiheyden tulee olla suurempi kuin 3/Hz oktaavikaistalla 1 kHz:n ympäristössä, jotta havaittavalta väritymältä välttyttäisiin. Yhden kHz:n kummankin puolen vaatimus lievenee. Tulos perustuu subjektiivisiin kokeisiin ja oletukseen ihmisen kuulojärjestelmän rajallisesta taajuusresoluutiosta. Jos puheeseen tai musiikkiin lisätään mooditiheydeltään riittämätöntä keinotekoisia kaiuntaa värityy ääni metallisen kuuloiseksi.

4.1.2 Äänen väritymä äänentoistossa

Kaiutinäänentoistossa syntyvien resonanssien havaittavuus on tarkoin tutkittu akustikan osa-alue. Toole ja Olive (1988) ovat osoittaneet, että resonanssin havaittavuus riippuu ominaistajuuden Q -arvosta. Q -arvo (quality factor) ilmaisee resonanssin terävyyden (sharpness). Q -arvo määritellään tyypillisesti resonanssitaajuuden f_0 ja resonanssin huipun leveyden Δf suhteena, $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$. Pienen Q -arvon resonanssit ovat äänentoistojärjestelmässä (päinvastoin kuin signaaleissa) helpoimmin havaittavia. Havaittavuus laskee n. 3dB aina kun resonanssin Q -arvo kaksinkertaistuu. Resonanssien erottuminen riippuu myös käytetystä herätesignaalista. Valkealla tai vaaleanpu naisella kohinalla äänentoistojärjestelmän resonanssit erottuvat selvimmin, puheella ja musiikilla on korkeampi erottumiskynnys (Nielsen, 1996, 1999; Rossing, 1990).

4.1.3 Äänen väritymä akustisessa takaisinkytketyisessä

Hitaasti vaimenevat tai soimaan (kiertämään) jäävät metallisen kuuloiset taajuudet (ringing tones) ovat ensimmäinen takaisinkytketyn akustisen järjestelmän epästabiiliisuuden ilmenemismuoto. Vaikka MLG (mean loop gain) olisikin pääasiallisesti alle GBI:n, voi stabiili järjestelmä tuottaa subjektiivisesti havaittavaa äänen väritymä. Väritymä esiintyy yleensä paljon laajakaistaista epästabiiliisuutta aiemmin, mikä johtuu huonevasteen mooditaajuuksien korostumisesta.

Akustisesta takaisinkytketyisessä syntyvässä väritymässä Q-arvo on yleensä paljon suurempi ja vaimenemisaika pidempi kuin äänentoistojärjestelmän tuottamassa väritymässä. Äänentoistojärjestelmästä mahdollisesti aiheutuva väritymä kertaantuu akustisessa takaisinkytketyisessä. Värityneen audiosignaalin yksittäiset pistetaajuudet korostuvat luonnottomasti. Kun resonanssitaajuuden energia kasvaa yli peittokynnyksen, ääni kuullaan. Kukin harmoninen synnyttää oman peittovaikutuksensa, jotka summautuvat yhtenäiseksi peittokäyräksi (Karjalainen, 1999). Taajuuspeitto ja aikapeitto ovat käsitteitä, jotka kuvaavat ihmisen kuulojärjestelmästä aiheutuvia psyykoakustisia ilmiöitä.

Transienttisignaaleilla aika-alueen ilmiöt ovat merkityksellisiä. Impulssi- tai kohinaherätteen jälkeen huoneen ja aktiiviakustisen järjestelmän yhdistelmä vaimenee ominaistajuuksiensa mukaisesti. Ratkaiseva on resonanssin huipun leveys Δf . Hyvin kapea resonanssitaajuus (siis suuri Q-arvo) saattaa vaimenemisverhokäyrässä muodostua häiritsevästi kuuluvaksi vaikka se ei energiansa puolesta erityisesti erottuisi järjestelmän siirtofunktiosta (Nielsen, 1996).

Nielsen (1996) mainitsee Kuttruffin ja Hesselmannin (1977) tutkimuksen, jonka mukaan subjektiivisissa testeissä äänen väritymä havaittiin kohina-testisignaaleilla joissaakin järjestelmissä jo 12dB alle GBI:n. Musiikissa väritymän esiintyminen riippuu signaalista. Laulussa väritymä on osoittautunut kaikkein selvimmän havaittavaksi, kun taas esimerkiksi klassisella kitaralla väritymä ei havaita ennen kuin vahvistus on lähellä GBI:tä (Svensson, 1994).

Puheäänessä väritymä on yleensä helposti kuultavissa. Vähäisempi periodisuus (kvasi-periodisuus), tauot ja transientit sekä nopeat modulaatiot tekevät puheesta laulua vaikeamman tapauksen. Monofoniset soittimet ovat laulun kanssa paljon saman kaltaisia, mutta amplitudin verhokäyrän vaimeneminen (decay) on usein poikkeavaa. Tämä riippuu soittimesta, taajuudesta ja soittotyylistä. Väritymän kuuluminen vaihtelee paljon soitinkohtaisesti (Nielsen, 1996).

Nielsenin (1996) mukaan äänen väritymä saattaa luoda miellelyhtymän odottamattomaan, epäharmoniseen soittimeen, joka on yhdistetty alkuperäiseen ääneen. Tällöin on luultavaa, että äänen väritymä ei kyetäkään selittämään pelkästään objektiivisin mitasuurein. Korkeamman tason kognitiiviset prosessit ja auditorisen järjestelmän epälineaarisuudet näyttävät liittyvät asiaan (Nielsen, 1996).

4.2 Mikrofonien sijoittelu, lukumäärä ja tyyppi

Aktiiviakustiset järjestelmät ovat tyypillisesti regeneratiivisia järjestelmiä. Tällöin järjestelmämikrofonit on yleensä sijoitettu vähitään huoneen kaiuntasäteen etäisyydelle lähteestä. Järjestelmämikrofonit asennetaan esiintymislavan läheisyyteen siten, että koko äänilähde (esim. orkesteri) saadaan äänitetyksi mahdollisimman täydellisesti. Kaiuttimien sijoittelu sekä huoneen ominaisuudet vaikuttavat mikrofonien sijoitteluun lavalle. Esimerkiksi ACS:ssä mikrofonit on sijoitettu lavan yläpuolelle 5-8 metrin korkeuteen. Järjestelmässä on tyypillisesti yksi mikrofoni 8 - 10 aktiivisessa käytössä olevaa lavaneliometriä kohden. Kaupallisissa toteutuksissa käytettävien mikrofonien lukumäärät vaihtelevat kahdesta (LARES) aina useisiin kymmeneen (Assisted Resonance). ACS:ssä tyypillisiä lukumääriä ovat 12, 18, 24, 30, 36, 42 ja 48.

4.2.1 Mikrofonit lähteen lähikentässä

Suora ääni voidaan parhaiten äänittää lähteen lähelle sijoitetuilla, suunnatuilla mikrofoneilla. Tällöin suoran äänen voimakkuus suhteessa orkesterikuoresta saataviin varhaisiin heijastuksiin ja muihin äänikentän komponentteihin on mahdollisimman suuri. Tätä tapaa käytetään tyypillisesti ei-regeneratiivisissa järjestelmissä.

Lähimikityksessä on kuitenkin ilmeisiä ongelmia. Jokainen mikrofoni varaa yhden sisäänmenokanavan, ja jos lähteitä on monta (kuten orkesteri) kasvaa kanavien määrä suureksi. Jos käytetään jokaiselle soittimelle erillistä kontaktimikrofonia, syntyy miittämistä ja johdottamisesta kaaos. Voidaan tietenkin käyttää soittajien yläpuolelle asennettuja mikrofoneja¹, jolloin yksittäisten soittimien äänet pystytään äänittämään lähes yhtä tarkasti kuin kontaktimikrofoneillakin, mutta soitinten vaivalloinen miksaaminen tulisi näin ollen tehdä erilaisten suuntakuvioiden takia erikseen joka kerta kun soittajat vaihtavat paikkaa. Matriisin tiheys, eli mikrofonien lukumäärä riippuu mikrofonien suuntakuvioista ja etäisyyksistä soittajiin. Mitä suuntaavampia ja lähempänä soittajia mikrofonit ovat sen enemmän niitä tarvitaan.

Mikrofonimatriisi voi olla asennettu myös korkeammalle, diffuusiin äänikenttään, soittajien yläpuolelle, jolloin ongelmat ovat periaatteessa samat, paitsi että miksaaminen helpottuu. Soittajien yläpuolelle sijoitetun mikrofonimatriisin ongelmana on aina se, että soittimien luonnolliset suuntakuviot ja keskinäiset voimakkuussuhteet menetetään sellaisina kuin ne normaalisti kuullaan saliin.

4.2.2 Mikrofonit diffuusissa äänikentässä

Järjestelmän suunnittelu helpottuu huomattavasti, jos mikrofonit voidaan sijoittaa lähteen kaiuntakenttään, eli vähintään kaiuntasäteen R_0 etäisyydellä lähteestä. Useimmat aktiiviakustiset järjestelmät ovat kaiuntakentässä äänittäviä, eli regeneratiivisia järjes-

1. Mikrofonit voidaan jakaa tilaan rivistöksi. Varsinaisten mikrofoni-ryhmien avulla voidaan toteuttaa muodoltaan epätavallisia suuntakuvioita, ja vahvistaa lähteen signaalikohinasuhdetta joko suuntakuviota tarkentamalla tai häiriölähteitä vaimentamalla. Suuntakuvioilla voidaan myös vahvistaa suoran äänen suhdetta kaiuntaiseen ääneen. Mikrofoniryhmällä koko orkesterin äänen poimiminen on hankalaa ja siksi mikrofoniryhmä ei välttämättä sovellu harjoitussaliin.

telmiä. Tällöin akustista takaisinkytketymistä esiintyy aina jonkin verran. Diffuusin äänikentän teorian mukaisesti (luku 2.) on lähteen huoneeseen tuottaman äänikentän energiatiheys kaiuntasäteen ulkopuolella keskimäärin vakio. Tämä tarkoittaa, että mikrofoneille saapuu enemmän huoneen pinnoista heijastuvaa äänienergiaa kuin suoraa äänienergiaa lähteestä. Suora äänihän vaimenee periaatteessa etäisyyden funktiona $1/r$ -lain mukaisesti, eli suoran äänen merkitys kaiuntaiseen äänen verrattuna pienenee etäisyyden funktiona.

Jos järjestelmän äänikenttään tuottama energia on keskimäärin yhtä suuri jokaisessa kenttäsuunnassa, niin Griesingerin (1991) mukaan voidaan olettaa, että kardioidimikrofoni olisi kolme kertaa herkempi suoralle äänelle suhteessa kaiuntaiseen kuin pallokuviainen. Tämä tuottaa geometrian perusteella silmukavahvistukselle kertoimen $\sqrt{3}$ ja hyperkardioidi kertoimen $\sqrt{2}$.¹

Monosignaalien miksaaminen yhteen ennen kaiuntaisuuden lisäämistä lisää järjestelmän akustista takaisinkytketymistä. Mikäli korrelaatiota esiintyy mikrofonisignaalien välillä, kasvaa epästabiilisuuden vaara entisestään. Jos mikrofonit ovat niin kaukana toisistaan, että niiden takaisinkytkentäsilmut ovat toistensa kanssa vain vähän korreloivia, voidaan mikrofonien äänittämät signaalit summata yhteen. Kahden mikrofonin miksaaminen samaan kanavaan huonontaa GBI-arvoa joka tapauksessa -3 dB (Griesinger, 1991). Keskimääräiselle silmukavahvistukselle saadaan tällöin kerroin $\sqrt{3/m}$, missä m on kardioidimikrofonien lukumäärä (Griesinger, 1991).

4.3 Kaiuttimien sijoittelu ja lukumäärä: äänen lokalisaatio

Järjestelmän tuottama kaiuntainen äänienergia voi vaihdella salin eri osissa. On kuitenkin tärkeää, ettei ääni lokalisoitu erityisesti minnekään, varsinkaan yksittäisiin kaiuttimiin. Kaiuttimia tulee olla riittävästi ja riittävän tiheässä.

Aktiiviakustisissa järjestelmissä käytetään pääsääntöisesti suuntaamattomia kaiuttimia. Kaiuttimien suuntaavuudella on kuitenkin etunsa. Suuntaavien kaiuttimien säteilykeiloja voidaan säätää pois järjestelmämicrofoneista.² Sama vaikutus saadaan aikaan lisäämällä kaiuttimien ja mikrofonien välistä etäisyyttä tai estämällä fysikaalisella, ääntä absorboivalla rakenteella suoran äänen säteileminen mikrofoneille. Ääntä siirtyy joka tapauksessa diffuusin äänikentän kautta kaiuttimilta mikrofoneille.

Aktiiviakustisella järjestelmällä on mahdollista tuottaa yhdenmukainen (uniform) jälkikaiunta koko kuuntelualueelle (coverage patterns) käyttäen suurta määrää tasaisesti koko kuuntelualueen yli jaettuja suuntaamattomia kaiuttimia, tai viemällä kaiuttimet suhteellisen etäälle kuuntelualueelta. Kuulijoiden lähelle (<7m) sijoitettujen kaiuttimien on syytä olla mahdollisimman tasaisesti (ympäri tai puoliavaruuteen)

1. Järjestelmämicrofonina voitaisiin periaatteessa käyttää mikrofoniryhmää, jolla on nollakohтия järjestelmäkaiuttimien suunnissa, jolloin mikrofoniryhmä ei olisi herkkä kaiuttimien suunnalta tulevalle äänisignaalille. Aktiiviakustisessa järjestelmässä on kuitenkin aina useita kaiuttimia, joita kaikkia on mahdotonta sijoittaa mikrofoniryhmän nollakohtiin. Toisaalta kysymyksessä on ainoastaan suoran äänen siirtotie. Diffuusin äänikentän kautta äänienergia säteilee mikrofoneille joka tapauksessa.
2. Goodwin ja Elko (1992) ovat esittäneet aikavariantin toteutuksen, jossa suuntaavan kaiuttimiryhmän pääkeila on vakio, mutta sivukeilojen suuntaavuutta muutellaan ajan funktiona.

säteileviä. Jos kaiuttimet saadaan kauemmaksi ($>8\text{m}$) voidaan näistä vaatimuksista joustaa. Pääsääntöisesti kaiutin on sitä vähemmän suuntaava mitä pienemmät ovat sen dimensiot verrattuna kiinnostaviin aallonpituuksiin. Säännöllisellä kaiutinmatriisilla on aina tietty suuntaavuus vaikka käytettäisiin suuntaamattomia kaiuttimia, varsinkin jos kaiuttimiin syötetään identtisiä signaaleita. Suuntaavuudesta aiheutuvia ongelmia voidaan välttää:

1. Sijoittamalla matriisi sinne mistä ääni luonnollisesti säteilee (eli lähteen tai kuvalähteen suuntaan).
2. Sijoittamalla kaiuttimet siten, että koko kuuntelualueelle saadaan tuotettua mahdollisimman tarkasti halutunlainen äänikenttä.
3. Käyttämällä mahdollisimman pieniä kaiutinelementtejä.
4. Sijoittamalla elementit epäsäännölliseen muotoon.
5. Tuottamalla ei-korreloivaa signaalia vierekkäisiin elementteihin.

Suoraa ääntä ja varhaisia heijastuksia lisäävissä järjestelmissä on vaikea toteuttaa yhdenmukaista äänikenttää koko kuuntelualueelle. Tämä johtuu kaiuttimien keskinäisistä interferensseistä sekä suuntaavuuksista. Tästä saattaa seurata suoran äänen ja varhaisten heijastusten sekä jälkikaiun suhteiden vaihtelu paikan suhteen. Myös äänilähteen ja järjestelmän tuottaman äänen välinen voimakkuussuhde muuttuu radikaalimmin paikan suhteen kuin luonnollisessa passiiviakustiikassa (suoran ja heijastuneen äänen suhde). Jos tila on ahdas, muodostuu yksittäisten kaiuttimien läheisyydessä oleva alue kriittiseksi (Kleiner, 1995). Suoran äänen ja varhaisten heijastusten vahvistamista tarvitaan lähinnä suurissa, akustiikaltaan puutteellisissa tiloissa. Kaiuttimia on tällöin säännöllisesti ympäri salia ja signaali johdetaan kaiuttimiin etäisyyden mukaisesti viivästettynä. Parvekkeiden alle kaiuttimia sijoitetaan tiheämmin tasaisen äänikentän luomiseksi. Suoran äänen vahvistus ja varhaisten heijastusten mallintaminen ovat aina kyseenalaisia järjestelmällä, jossa ei käytetä lähimikitystä.

Ympäröivyyden ja varhaisten heijastusten tuottaminen edellyttää kaiuttimien suhteellisen suurta etäisyyttä kuulijoihin. Ympäröivyyden tuottaminen saattaa olla hankalaa, koska järjestelmäkaiuttimet käyttäytyvät enemmän tai vähemmän yksittäisinä heijastuspintoina. Tyydyttävän akustiikan saavuttamiseksi tulisi heijastusten olla diffuuseja. Tämä edellyttää epäsuoraa äänensäteilyä diffusorien kautta tai suurta kaiuttimien lukumäärää (Kleiner, 1995).

Pienemmissä tiloissa ei suora ääni välttämättä vaimene merkittävästi ja varhaisten heijastusten esiintyminen riippuu paljolti huoneen pintamateriaaleista ja geometriasta. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että pienissä akustisissa tiloissa on yleensä aina riittävästi varhaista äänenenergiaa, tällöin voidaan jälkikaiuntaa lisätä tehokkaasti aikavarianteilla järjestelmätoteutuksilla (Griesinger, 1995b).

Myös muuta kuin lateraalista äänenenergiaa tarvitaan diffuusin äänikentän synnyttämiseen, siksi salin kattoon on tyypillisesti sijoitettu kaiuttimia. Mikäli on tarpeen vahvistaa bassotaajuuksia, voidaan aktiiviakustiseen järjestelmään lisätä subwoofereita, kuitenkin vähäisempi määrä kuin kattokaiuttimia (Griesinger, 1995b). Riippuen paikasta yksittäinen subwoofer herättää huoneeseen tietyt moodit. Kun subwoofereita on useampia eri paikoissa, tasoittuu huonevaste. Eri kaiuttimet herättävät eri moodeja.

Tätä 3D-tilannetta voidaan havainnollistaa 2D-metallilevyllä, jota herätetään koputteleamalla eri kohdista. Äänenväri vaihtelee riippuen siitä osuuko heräte moodin solmu-kohtaan vai ei. Huoneessa tämä ongelma esiintyy pienillä taajuuksilla, jolloin huoneen mooditiheys on pieni.

Jos järjestelmässä käytetään aikavarianssia akustisen takaisinkytketymisen rajoittamiseen, on vahvistusmatriisi pyrittävä kytkemään niin, että vierekkäisiin kaiutinkanaviin tulee tilastollisesti toisistaan poikkeava aikavarianssi. Tämä tuottaa suuremman määrän erilaisia siirtoteitä kaiuttimien ja mikrofoni- välille sekä lisää lähekkäin olevien kaiuttimien välistä dekorrelaatiota. Myös GBI paranee.

Kaiuttimien on syytä olla laadultaan mahdollisimman hyviä, ympärisäteileviä ja taajuusvasteen tulee olla tasainen säteilyalueella (uniform power response). Taajuusvasteen vääristymät kaiuttimissa kertaavat vaikeasti hallittavaa akustista takaisinkytketymistä (Griesinger, 1995b; Svensson, 2000). Ainoan ongelman tässä suhteessa muodostaa laadukkaiden kaiuttimien korkea hinta.

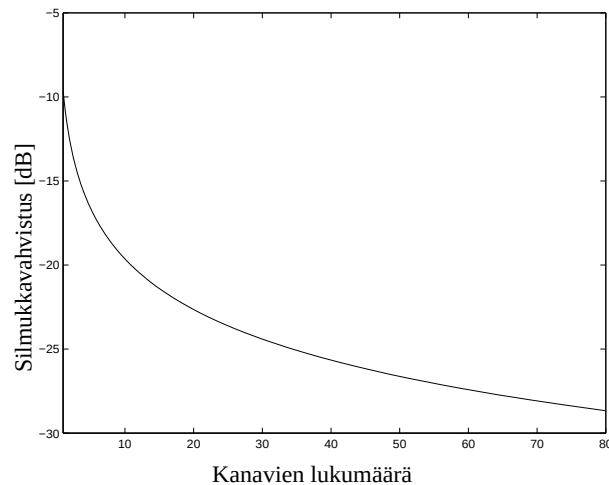
4.4 Vahvistustaso

Aktiiviakustisella järjestelmällä tulisi pystyä tuottamaan äänipainetasoja, jotka vastaavat konserttisalin kaiuntaisuuden (luku 2.6) tasoja. Griesingerin (1995b) mukaan tämä tarkoittaa (pienehkössä tilassa) noin 100 dB energiatasoa, kun oletetaan, että orkesteri parhaimmillaan tuottaa noin 115 dB äänienergiaa. Lisäksi kaiuntaista ääntä tulisi pystyä tuottamaan heikentämättä musiikin selkeyttä ja äänenlaatua, mieluummin päinvas-toin.

Liiallinen kokonaisäänekkyys on ongelma pienissä tiloissa, kuten harjoitussaleissa. Aktiiviakustisella järjestelmällä lisätään jälkikaiun tasoa suhteessa muihin aika-alueen komponentteihin. Äänen kaiuntaisuutta on vaikea lisätä, lisäämättä samalla kokonaisäänekkyyttä. Pienissä tiloissa ainoa vaihtoehto kokonaisäänekkyuden hillitsemiseksi on huoneen absorptiopinta-alan lisääminen.

4.4.1 Kanavien lukumäärä

Järjestelmällä saavutettava kokonaisvahvistus (GBI) on verrannollinen itsenäisten mikrofoni-/kaiutinkanavien lukumäärään. Kaupallisista järjestelmistä esimerkiksi Philipsin MCR:ssä käytetään yksinomaan tätä menetelmää akustisen takaisinkytketymisen ehkäisemiseksi. Griesinger (1991) kommentoi, että tyydyttävä äänenlaatu on tällä tavoin mahdollista saavuttaa kunhan käytössä on 50-1000 kanavaa. Suuri kanavamäärä aiheuttaa tietenkin merkittäviä lisäkustannuksia.



Kuva 4.1: GBI yksittäisen järjestelmäkanavan kaistanleveyden funktiona (kaavasta 3.22), kun jälkikaiunta-aika 2 s.

Kuva 4.1 esittää vahvistuskanavamäärän funktiona yksittäiseen (kapeakaistaiseen) vahvistuskanavaan tarvittavan silmukkavahvistuksen, järjestelmän tuottaman äänitehon ollessa vakio. Nähdään, että kapeakaistaisia kanavia tarvitaan ainakin 10 -20, jotta yksittäisen kanavan vahvistusta voidaan laskea GBI:n parantamiseksi. Kun kuuloalue jaetaan suoraviivaisesti kanavien lukumäärällä saadaan yksittäisen kanavan kaistanleveydeksi alle 2kHz. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Lexiconin LA-RES:ssä, jossa akustista takaisinkytketymistä rajoitetaan aikavarianssin avulla, laajakaistaisten vahvistuskanavien lukumäärä on 4.

4.5 Muita näkökohtia aktiiviakustisen järjestelmän suunnittelussa

Visuaalisen ja auditiivisen kokemuksen välinen ristiriita on keskustelussa yhä useammin esiintyvä kysymys. Aktiiviakustiikan ei ole erityisesti syytä tulla huomatuksi tai kuulluksi vaan ainoastaan koetuksi. Jos tuotetun akustiikan ominaisuudet vastaavat likimain tilan geometrisia mittasuhteita, ei suurempaa ristiriitaa visuaalisen ja auditiivisen kokemuksen välille synny, ellei järjestelmä ole erityisen kohinainen tai muuten häiritsevän näkyviin asennettu (Kleiner, 1995).

Liikkuvilla äänilähteillä on yleensä välttämätöntä käyttää lähimikrofoneja. Suoran äänen vahvistamiseen tai varhaisten heijastusten tuottamiseen tarkoitetun järjestelmän äänen ei tulisi vääristyä lähteen liikkeessa. Tällaisen järjestelmän toteuttaminen on vaikeaa, mistä syystä aktiiviakustisten järjestelmien suosio teattereissa ja oopperoissa on ollut vähäistä (Kleiner, 1995).

Järjestelmäkohina. Tarvittava, laaja dynamiikka-alue saattaa muodostaa kohinaongelmia. Parhaissa perinteisissä konserttisaleissa dynamiikka-alue ulottuu alle 15dB:stä yli 110dB:iin. Jos käytetään digitaalista signaalinkäsittelyä tulee bittiresoluution olla riittävä. On erityisen tärkeää, ettei transienttikohinasignaaleja, impulsseja ym. pääse syntymään. Kaiuttimien tulee olla laadukkaita, äänen väritymän, lineaarisen ja epäli-

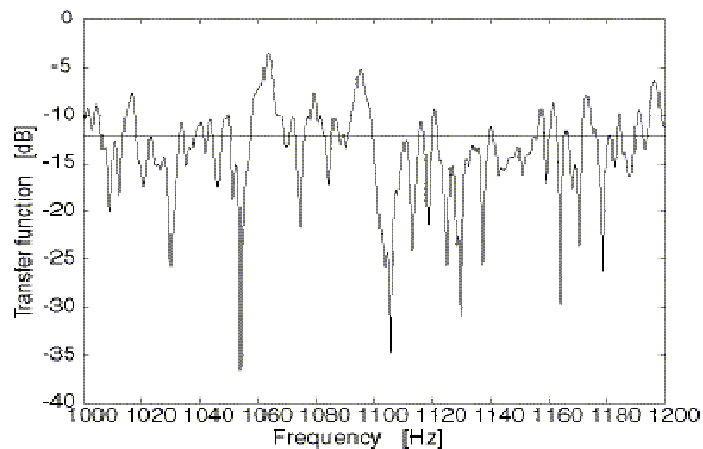
neaarisen särön olematonta. Kaiuttimien on syytä olla samanlaisia, jotta samaa ekvalisointialgoritmia voidaan käyttää kaikille kaiuttimille (Kleiner, 1995).

Elinkaari konserttitalilla saattaa olla vuosisatoja. Aktiiviakustiikan elinkaari ei todennäköisesti ole näin pitkä. Aktiiviakustiikan hyviä puolia on korvattavuus saatavissa olevalla paremmalla järjestelmällä. Huono puoli on se, että aina syntyy tarve parempaan järjestelmään (Kleiner, 1995).

Yleinen hyväksyntä. Aktiiviakustinen järjestelmä on potentiaalinen syy ääni-ilmiöille, jotka eivät esiinny luonnollisessa äänikentässä. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmä on äärimmäisen herkkä suunnittelukriteereille ja asetetuille parametreille (Kleiner, 1995).

5 Signaalinkäsittely

Huoneessa, johon muodostuu diffuusi äänikenttä, saattavat huonesiirtofunktion korostumat olla luokkaa 10 dB (kuva 5.1). Tämä rajoittaa järjestelmän silmukavahvistusta. Aikavariantteja menetelmiä on käytetty järjestelmien stabiloimiseksi ja äänen väritymän ehkäisemiseksi. Aikavariantit menetelmät perustuvat tyypillisesti vaihekulmamodulaatioihin. Modulaatiolla pyritään levittämään takaisinkytkentäsilmaan $G_{ML}H_{LM}$ taajuusvasteen maksimien energia tasaisemmin taajuusalueeseen, jotta korostumat eivät johtaisi äänen väritymiseen.



Kuva 5.1: Suuren huoneen taajuusvaste kahden pisteen välillä. Piikkien tasot ylittävät keskimääräisen tason yli 10 dB (kuva, Svensson, 2000).

Aikavarianssilla voidaan korjata ainoastaan akustisesta takaisinkytketymisestä aiheutuvaa epästabiilisuutta, ei parantaa äänenlaatua. Aikavarianssin käyttö ei sinänsä ole aktiiviakustisen järjestelmän laadun mittapuu; ilmanakin voidaan tulla toimeen, mutta yleensä tämä nostaa järjestelmän muita kustannuksia. Aikavarianssi toteutetaan tyypillisesti suoraan kaiunta-algoritmiin. Viivemodulaatiolle (DM, delay modulation) tämä on suoraviivaista, muissa tapauksissa hankalampaa. Nykyisin tavallisen PC-tietokoneen prosessoriteho riittää tarvittavaan signaalinkäsittelyyn, joten kustannukset pysyvät kohtuullisina.

Tässä luvussa tehdään katsaus aikavarianttien järjestelmätoteutusten kehitykseen ja esitetään tyypilliset aikavarianssin toteutusperiaatteet yleisellä tasolla. Myös takaisinkytkettyneen signaalin kumoaminen järjestelmän tulosta esitetään eräänä vaihtoehtona. Lopuksi luodaan katsaus kaiunta-algoritmien kehitykseen ja nykyisiin toteutustapoihin.

5.1 Aikavarianttien järjestelmien kehitys

Monet aikavarianttien menetelmien perusideat ovat patentoitu jo ennen 1930-lukua. Zwicker käytti vuonna 1928 liikkuvia mikrofoneja (Nielsen, 1996). Schroeder kehitti vuonna 1959 taajuussiirtoon (frequency shift, FS) perustuvan aikavariantin suotimen, joka on edelleenkin etenkin puheäänien vahvistamisessa käytetty menetelmä (6dB parannus silmukavahvistukseen). Musiikkikäyttöön FS ei sovellu, koska lähtö on alati hieman epävireessä tulon kanssa. Tätä tekniikkaa ovat tutkineet Schroederin ohella Tapio (1965), Tilse (1975) ja Pesko (1977). Mishin (1958), Guelke ja Broadhurst (1971) ovat tutkineet vaihemodulaation (phase modulation, PM) mahdollisuuksia aikavarianssin toteuttamiseen (n. 3-4dB:n parannus silmukavahvistukseen). Signaalin polariteettia vaihtelevan vaihemodulaation, samoin kuin algoritmin, jolla voidaan ehkäistä signaaliin mahdollisesti syntyviä napsahduksia, esitti Fasbender (1984). Nishinomiya (1968) testasi kokeellisesti PM:n kanssa ekvivalenttisen taajuusmodulaation (FM) ominaisuuksia.

Ahnert on esittänyt (1981:81, Nielsen, 1996 nojalla) aikavariantin menetelmän, jossa eri mikrofoniin signaalit kytketään tiettyihin kanaviin ja kytkentää muutetaan (cross-fading) ajan funktiona. Nielsenin (1996) mukaan näin saadaan esimerkiksi kymmenen mikrofoniin avulla jopa 7dB:n parannus GBI:hin. Nielsenin mukaan menetelmä on toimiva, kun käytetään useaa mikrofonia yhden äänilähteen äänittämiseen lavalla, aktiivikustisiin järjestelmiin menetelmää ei suositella. Nämä varhaiset tutkimukset perustuivat analogiatekniikkaan.

Digitaalitekniikan myötä järjestelmien laatu ja muunneltavuus ovat parantuneet huomattavasti. Goodwin ja Elko (1992, Nielsen, 1996 nojalla) ovat esittäneet aikavariantin toteutuksen, jossa suuntaavan kaiutinmatriisin pääkeila on vakio, mutta sivukeilojen suuntaavuutta muutellaan ajan funktiona. Viime vuosina on julkaistu ainoastaan muutamia tutkimuksia aikavarianteista toteutuksista. David Griesinger julkaisi 90-luvun aikana useita aiheita sivuavia tutkimuksia (Griesinger, 1991, 1995a, 1995b, 1995c), mutta varsinaisia toteutuksia ei näissä tutkimustuloksissa esitetä¹. Peter Svensson julkaisi aktiivikustisia järjestelmiä ja lineaarisia aikavarianteja suotimia (linear time-variant filter, LTV) käsittelevän väitöskirjansa vuonna 1994. Svenssonin ja sittemmin Nielsenin (1996, 1999) tutkimukset vaihemodulaatiosta (PM) ja viivemodulaatiosta (delay modulation, DM) edustavatkin alan kattavinta tietämystä².

1. Julkisuudessa aiheesta puhutaan paljon, mutta sanotaan vähän. Syynä on kaupallisuus. Griesinger työskentelee laitevalmistaja Lexiconin palveluksessa. Nielsen (1996) on ainoana esittänyt toteutuksia, jotka nekin ovat luonteeltaan teoreettisia yksinkertaistuksia. Kaupallisten tahojen ja akateemisen maailman välinen puoliavoimuus on omiaan ehkäisemään hyödyllisen tutkimuksen edistymistä.
2. Griesinger (2000) on esittänyt yhtyvänsä Svenssonin (1995, 1999) tutkimuksen päälinjoihin, mutta antaa ymmärtää, että Lexiconin viivemodulaatioon (DM) perustuvaa LARES järjestelmä on toteutustavaltaan kehittyneempi. Tällä mielipiteellä saattaa olla perusteita, sillä kaupallinen LARES järjestelmä on kokemusten mukaan toimivaksi havaittu. Kiinnostus LARES:ia kohtaan on kasvamassa maailmalla.

5.2 Lineaariset aikavariantit komponentit

Modulaatiossa kantaaltosignaalin ominaisuuksia muutetaan moduloivan signaalin tahdissa. Tietoliikennejärjestelmissä moduloiva signaali on yleensä tulosignaali, kun taas aikavarianteissa järjestelmissä se generoidaan. Yleisesti voidaan kirjoittaa

$$y(t) = f(x(t)), \quad (5.1)$$

missä $x(t)$ on moduloiva signaali ja $y(t)$ on moduloitu signaali. Modulaatiossa kantaallon amplitudi, vaihe, tai hetkellinen taajuus muuttuu (yleensä lineaarisesti) moduloivan signaalin funktiona. Lineaarissa modulaatiossa moduloivan signaalin spektri siirtyy sellaisenaan tai suodatettuna kantaaltotaajuuden ympäristöön (Halme, 1996).

Aikavarianteissa järjestelmissä kantaaltosignaali on tulosignaali, ei mikään yksikäsitteisesti määritelty funktio. Parametreja ei päästä suoralta kädeltä säätämään. Tällöin yhtälö (5.1) muuttuu ongelmalliseksi. Lineaarinen periodisesti aikavariantti suodin (LPTV) on periaatteessa eräs tapa tulosignaalin parametrisoimiseksi, ja näiden parametrien muuttamiseksi ajan funktiona. Parametrusointi tapahtuu käytännössä taajuusvastefunktion avulla.

Lineaarinen aikavariantti suodin aiheuttaa sivukaistojen (sidebands) syntymisen, eli diskreettien taajuuskomponenttien sarjat, tulosignaalin taajuuksien ympärille. Sarjan komponenttien välit ovat modulaatiotaajuuden monikertoja. Ei-periodinen LTV suodin aiheuttaa jatkuvan sivukaistojen jakauman.

Periodisten aikavarianttien järjestelmien $h(t, \tau)$ erikoistapauksessa järjestelmän taajuusvaste voidaan kirjoittaa painotettuna ja siirrettynä versiona tulovasteesta:

$$Y(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G_k(\omega - k\omega_p) X(\omega - k\omega_p) \quad (5.2)$$

missä $G_0(\omega)$ on kantaalto ja $G_k(\omega)$ on sivukaistojen siirtofunktio. Tämä on laajennus tulon ja lähdön suhteelle, joka voidaan tyypillisesti kirjoittaa LTI järjestelmälle (Nielsen, 1996).

Yksittäisen takaisinkytkentäsilman yhtälön (3.15) geometrinen sarjakehitelmä voidaan kirjoittaa auki

$$\mathbf{G}_{ML, closed} = \mathbf{G}_{ML} + \mathbf{G}_{ML}^2 \mathbf{H}_{LM} + \mathbf{G}_{ML}^3 \mathbf{H}_{LM}^2 + \dots, \quad (5.3)$$

jossa $\mathbf{G}_{ML}$ sisältää aikavariantin suodinrakenteen ($\mathbf{H}_{LPTV}$), jolloin siirtofunktio on kaiken aikaa asteittaisen muutoksen tilassa. Aikavarianssin ollessa periodista, modulaatiotaajuudet ovat diskreettejä. LPTV erikoistapauksessa $\mathbf{G}_{ML}$ voidaan kehittää diskreettien harmonisten komponenttien (sidebands) sarjaksi (Svensson, 1994). Periodisuusoletus ei ole kovin suuri rajoitus, sillä kompleksisempia modulaatioita voidaan aina approksimoida periodisilla. Svensson on myös tutkinut pseudo-satunnaisilla modulaatiofunktioilla toteutetun aikavarianssin ominaisuuksia (Svensson 1994), mutta to-

teaa (Nielsen ja Svensson, 1999), ettei monimutkaisemmilla funktioilla saavuteta juurikaan etua. Yhtälöt (2.8) ja (3.1) voidaan vastaavasti kirjoittaa aikavariantille suotimelle

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(t, \tau) x(t - \tau) d\tau \quad \text{ja} \quad (5.4)$$

$$Y(\omega) = \sum_m H_m \left(\omega - m \frac{2\pi}{T_{mod}} \right) \times X_m \left(\omega - m \frac{2\pi}{T_{mod}} \right), \quad (5.5)$$

missä $H_m(\omega) = \hat{H}_m(m, \Delta\Omega, \omega)$ ovat LPTV-suotimen m :nen sivukaistan siirtofunktio, missä $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ T_{mod} on modulaation jaksonaika ja $\Delta\Omega = 2\pi/T_{mod}$. Modulaatiokomponentit lisääntyvät merkittävästi kun aikavarianssin modulaatiotaajuus kasvaa 0.5-1Hz alueelta 1-2Hz alueelle (Svensson, 1994).

5.3 Vaihekulmamodulaattorit

Vaihe- (PM), viive- (DM) ja taajuusmodulaatio (FM) sekä taajuussiirto (FS, frequency shift) ovat vaihekulmamodulaattorien (angle modulators) päätyypit ja tarjoavat kukin eri näkökulman samaan asiaan. FS on PM:n erikoistapaus, ja DM on PM lineaarisesti taajuusriippuvalla modulaatioindeksillä. FM:n ja PM:n ero ymmärretään kun muistetaan, että taajuus voidaan määritellä vaiheen aikaderivaattana

$$\omega = \frac{d}{dt} \phi(t). \quad (5.6)$$

Olennaista on mitä parametreja kullakin tekniikalla pystytään ohjaamaan ja millaisia subjektiivisesti kuuluvia modulaatiokomponentteja (side bands) tekniikka aiheuttaa signaaliin. PM on teoriassa taajuusriippumaton ja se takaa laajakaistaisen signaalin kaikilla taajuusalueilla yhtä suuren suojan takaisinkytketymistä vastaan. Tästä syystä Svensson (1992, 1994, 1995, 1996) ja Nielsen (1996, 1999) ovat kohdistaneet siihen kiinnostusta. Svenssonin (1995) mukaan DM, jossa modulaatioindeksi ei ole lineaarisesti taajuusriippuva, saattaa olla optimaalinen tapa yli 500-700 Hz taajuuksilla. Muita menetelmiä kuten PM tai signaalin kumoaminen tulosignaalista täytyy käyttää pienillä taajuuksilla.

Vaihekulmamodulaattorit moduloivat tulosignaalin hetkellistä vaihekulmaa määrätyn modulaatiofunktion $\theta(t)$ mukaisesti. Esimerkiksi kompleksiselle sinimuotoiselle tulo-signaalille voidaan kirjoittaa:

$$x(t) = \exp(j\omega t) \Rightarrow y(t) = \exp(j\theta(t))x(t) = \exp(j\omega t + j\theta(t)). \quad (5.7)$$

Tapaus poikkeaa tyypillisestä tietoliikennejärjestelmäsovelluksesta siten, että kantoaaltona on nyt informaatio-signaali (vert. kaava 5.1). Modulointi vaikuttaa kaikkiin $x(t)$:n taajuuskomponentteihin erikseen. Nielsenin (1996:164) mukaan modulaatio-

funktion aaltomuodolla (kohina, saha-aalto, kanttiaalto) ei ole suurta merkitystä GBI:n kannalta, joten sinimuotoinen modulaatiofunktio on luontevin valinta.

Tajuusalueessa modulaatiosta (aika-alueen kertolaskusta) tulee konvoluutio (Nielsen, 1996):

$$y(t) = \exp(j\theta(t))x(t) \leftrightarrow (Y(\omega) = F\{\exp(j\theta(t))\} \otimes X(\omega)). \quad (5.8)$$

Modulaatiomenetelmät voidaan jakaa periaatteessa kahteen ryhmään: yksisivukaista-modulaatioihin (single sideband, SSB) ja monisivukaistamodulaatioihin (multiple sideband), joista erikoistapauksena kaksisivukaistamodulaatio (double sideband suppressed carrier, DSB-SC)). Edellistä ryhmää edustaa taajuussiirto (FS), muut tekniikat kuuluvat jälkimmäiseen. SSB on ekvivalenttinen taajuussiirron kanssa. Yksisivukaistamodulaatioiden analysointi on takaisinkytketyssä akustisessa järjestelmässä yksinkertaisempaa kuin monisivukaistamodulaatioiden. Kaikille modulaatiotyypeille saadaan GBI:n teoreettiseksi maksimiarvoksi (Schroeder, 1964; Nielsen, 1996:143):

$$GBI = 10 \log \overline{|S(f)|^2} < 2.5 \text{ dB} . \quad (5.9)$$

Nielsen (1996:163) on saavuttanut kokeissaan suurimmaksi GBI arvoksi noin -4 dB, joka on kaukana teoreettisesta maksimista. Svensson on raportoinut -1 dB maksimi arvon GBI:lle.

Seuraavassa esitellään lyhyesti pääasiassa Nielsenin (1996) esityksen pohjalta tavanomaiset modulaatiomenetelmät, joista vaihe- ja viivemodulaatiot ovat aktiiviakustisissa järjestelmissä eniten käytetyt.

5.3.1 Vaihemodulaatio

Vaihemodulaatio on vaihekulmamodulaatioiden perustyyppi. Kulmamodulaatiofunktio voidaan kirjoittaa

$$\theta(t) = \beta m_p(t), \quad (5.10)$$

missä $m_p(t)$ on vaihemodulaatiofunktio. β on modulaatioindeksi (modulation index), joka ilmaisee vaiheen poikkeaman (deviation) radiaaneina. Tavallisesti $m_p(t)$ on yksinkertainen periodinen funktio, esimerkiksi $m_p(t) = \sin(\omega_m t)$, missä ω_m on modulaatiotaajuus. Kaavasta (5.8) saadaan ulostulospektri:

$$(Y(\omega) = F\{\exp(j\theta(t))\} \otimes X(\omega)) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) X(\omega - k\omega_m), \quad (5.11)$$

missä $J_k(\beta)$ on ensimmäisen lajin Besselin funktio asteluvulla k . Yhtälö (5.11) muistuttaa yhtälöä (5.5). Sivukaistojen voimakkuudet on annettu Besselin funktiona, joka saa argumenttina modulaatioindeksin.

Nielsen (1996) on esittänyt DSP-toteutuksen vaihemodulaatiolle.

5.3.2 Viivemodulaatio

Viivemodulaatio on viive, joka vaihtelee pituuden τ_0 ympärillä modulaatiofunktion $m_d(t)$ mukaan

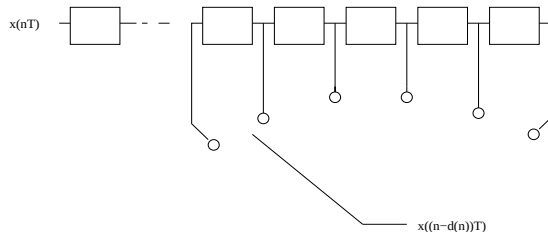
$$d(t) = \tau_0 + \Delta\tau m_d(t), \quad (5.12)$$

missä $\Delta\tau$ on viivepoikkeama. Tämä on ekvivalenttinen vaihemodulaation kanssa seuraavasti

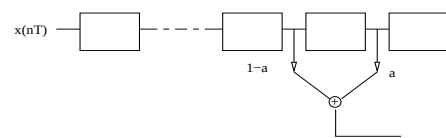
$$m_p(t) = -m_d(t), \quad \beta = \omega\Delta\tau = 2\pi f\Delta\tau. \quad (5.13)$$

Viivemodulaatio on siis taajuusriippuva vaihemodulaatio ja modulaatioindeksi riippuu kanta-aaltotaajuudesta f .

Nielsen (1996) on esittänyt kuvan 5.2 mukaisen yksinkertaisen DSP toteutuksen viivemodulaatiolle.



Kuva 5.2: Viivemodulaattori.



Kuva 5.3: Viiveiden interpolaatio.

FIR-suodintoteutuksissa suodinkertoimien muuttaminen ei onnistu yksinkertaisesti, vaan parametrien tosiaikaiseen säätämiseen tarvitaan interpolointia. Gardnerin mukaan pienitaajuuksien modulaatioiden toteuttamiseen riittää normaali lineaarinen interpolaatio (kuva 5.3). Suurempitaajuuksien modulaatioiden toteuttamiseksi soveltuu esimerkiksi korkeamman asteen Lagrange-interpolaattori. Viivemodulaatio aiheuttaa luonnollisesti taajuusmodulaatiota myös IIR-toteutuksessa. Jos modulaation suuruus tai taajuus ovat liian suuria, kuuluu lopputulos epämiellyttävästi jälkikaiunnassa. Varsinkin pianomusiikissa tämä saattaa olla erityisen herkästi kuultavissa. Suodinkertoimien modulaatiotaajuuden on syytä olla audiotaajuuksien alapuolella, jotta vältetään epäharmonisten sivukaistojen syntyminen. Amplitudin aaltoilua (undulation) saattaa esiintyä mikäli modulaatiotaajuus on liian alhainen ja viiveen muutosamplitudi (depth) liian suuri. Gardnerin mukaan suurin sallittu taajuusmodulaatio saa olla enintään muutamia oktaavin sadasosia, ja modulaatiotaajuus luokkaa 1Hz.

5.3.3 Taajuusmodulaatio

Signaalin hetkellinen taajuus on vaiheen aikaderivaatta. Vaihemodulaatio on ekvivalenttinen taajuusmodulaation kanssa hetkellisen taajuuden muutoksen kautta seuraavasti:

$$f(t) = \frac{\beta}{2\pi} m_f(t), \quad m_f(t) = \frac{\partial}{\partial t} m_p(t). \quad (5.14)$$

5.3.4 Taajuussiirto

Taajuussiirto on ekvivalenttinen vaihemodulaation kanssa lineaarisen ja rajoittamattoman vaihemodulaatiofunktion välityksellä

$$\theta(t) = \beta m_p(t) = \pm 2\pi f_s t, \quad (5.15)$$

missä f_s on taajuussiirto (Hz).

Schroederin (1964) mukaan taajuussiirrolla voidaan parantaa järjestelmän stabiilisuutta noin 10dB. Suoran äänen ja moduloidun äänen huojunnasta (beating) johtuen järjestelmän vahvistusta voidaan lisätä käytännössä vain noin 6dB. Myös Nielsenin (1996:159, 1999) tekemät kokeet tukevat tätä käsitystä. Schulz (1972) ja Ahnert (1975) ovat kuuntelukokein todenneet taajuussiirron epäsopivaksi musiikkisignaaleille (Nielsen, 1996 mukaan).

5.3.5 Amplitudimodulaatio

Amplitudimodulaatio ei varsinaisesti kuulu kulmamodulaatioihin, mutta tulkoon silti lyhyesti esitellyksi tässä yhteydessä. Amplitudimodulaatio voidaan kirjoittaa

$$y(t) = (1 + k m_a(t)) x(t), \quad (5.16)$$

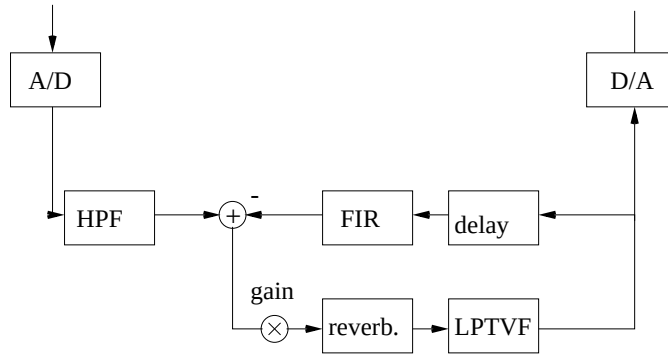
missä $m_a(t)$ on rajoitettu amplitudimodulaatiofunktio ja k on modulaatiokerroin (modulation factor). Sinimuotoisella modulaatiofunktiolla tämä säilyttää kantoaallon muuttumattomana, mutta tuottaa kaksi voimakkuudeltaan k :hon verrannollista sivukaistaa. DSB- (SC) (double sideband suppressed carrier) modulaatio saadaan jos kantoaaltoa ei käytetä:

$$y(t) = m_a(t) x(t). \quad (5.17)$$

Schulz (1972) ja Ahnert (1975) ovat kuuntelukokein todenneet amplitudimodulaation samoin kuin taajuussiirron epäsopivaksi musiikkisignaaleille (Nielsen, 1996 mukaan).

5.4 Takaisinkytkettyneen signaalin kumoaminen tulosignaalistista

Takaisinkytkettyneen signaalin kumoaminen (cancelation) LPTV järjestelmän tulosta on eräs tapa rajoittaa järjestelmän akustista takaisinkytkeytymistä alle 500 Hz taajuuksilla.



Kuva 5.4: Järjestelmä-matriisin $\mathbf{G}_{MLij}$ yhden kanavan lohkokaavio.

Kuvan 5.4 mukaisen järjestelmän siirtofunktio saadaan muotoon

$$G_{MLij}(\omega) = \frac{g H_{rev} H_{LPTV} H_{HPF}}{g H_{rev} H_{LPTV} H_{del} H_{FIR} + 1}. \quad (5.18)$$

$\mathbf{G}_{MLij}$ on järjestelmä-matriisin yksittäisen kanavan, $i = k, j = p$ lohkokaaavion yleinen esitys, jossa H_{HPF} on ylipäästösuodin, jonka jälkeen jälkikaiunta-algoritmi H_{rev} ja aikavarianssia kuvaava suodin H_{LPTV} . Viive H_{del} kuvaa äänen kulku-aikaa kaiuttimen ja mikrofonin välillä. H_{FIR} on kanavakaiuttimen ja -mikrofonin välisen siirtofunktion H_{LM} alkuosasta redusoitu FIR suodin. Ideaalitilanteessa kun FIR suodin lähestyy siirtofunktiota H_{LM} , lähestyy silmukavahvistus nollaa.

Signaalin kumoutuminen voidaan määritellä mikrofonista tulevan signaalienergian y_0 ja kumoamisen (tosiaikaisen vähennyslaskun) jälkeisen signaalienergian y_1 suhteena. Gardner on osoittanut tämän suhteen olevan ideaalitilanteessa ekvivalentti todellisen, mitatun huonevasteen H_{LM} ja siitä katkaistun FIR-suotimen H_{FIR} signaalienergioiden suhteen kanssa.

Jotta kaiuttimesta mikrofonille tulevan signaalin kumoaminen tulosta olisi teknisesti mahdollista:

1. Kaiuttimen ja mikrofonin välisen akustisen järjestelmän, jota siirtofunktio H_{LM} kuvaa, tulee olla lineaarinen. Normaalisti aktiiviakustinen järjestelmä voidaan otaksua melko hyvin lineeriseksi, sikäli kuin kaiuttimet, mikrofonit, vahvistimet ja A/D ja D/A muuntimet sekä itse huone ovat mallinnettavissa lineaarisina systeemeinä.
2. Kaiuttimen ja mikrofonin välisen akustisen järjestelmän tulisi olla aikainvariantti. Monen kaiuttimen ja muutaman mikrofonin yhdistelmä huonetilassa, jossa on paljon varhaisia heijastuksia, ja liikkuvia ihmisiä, lämpötilan vaihtelua ja ilmanvaihtoa, mikrofonit suuntaavia ja suhteellisen etäällä kaiuttimista, ei ole kovinkaan aikainvariantti. Tällöin on mahdollista soveltaa adaptiivisia

menetelmiä.

3. Tulee huomioida tarkkuus, jolla siirtofunktio H_{LM} on mitattu.
4. H_{LM} :n ei tule olla kompleksinen. Mitä vaimennetumpi tila, sen lyhyempi jälkikaiunta-aika ja siten myös paremmat edellytykset signaalin kumoamiselle.
5. Laskentakapasiteetin tulee olla riittävä. Nykyisillä menetelmillä (PC) on mahdollista laskea noin 128000 asteisia FIR-suotimia tosiaikaisesti.
6. Jokaiseen erilliseen mikrofonikaiutinkanavaan tarvitaan oma prosessointi.

Signaalin kumoaminen 500-700 Hz suuremmilla taajuuksilla on tilastollisesti melko epävarmaa. Tätä suuremmilla taajuuksilla voidaan käyttää aikavariantteja menetelmiä. Kumoamismenetelmä voi aiheuttaa kiusallisia ilmiöitä. Kapeakaistaisella signaalilla, mikrofonin ollessa jollakin taajuudella (seisovan aallon) paineen napakohdassa, korostuu moodin vaikutus. Myös laajakaistaisella signaalilla jotkut taajuudet tulevat korostumaan, mutta kokonaisvaikutus on vaimentava. Goertzin (1995) mukaan vaimennusta GBI:hin saadaan parhaimmillaan 6dB, kunhan käytössä on adaptiivinen suodin ja aikariippumattomat olosuhteet. Goertzin (1995) artikkelista selviää, että kumoaminen toimii sitä paremmin, mitä lähempänä mikrofonin on kaiuttimia. Tällöin suoran äänen osuus on suurempi kuin kaukana kaiuntasäteen ulkopuolella ja tuo kumoaminen tehoa juuri impulssivasteen alkuosaan (suoraan ääneen). Tulosignaalin kumoamismenetelmää käyttää kaupallisista järjestelmistä ainakin ranskalainen Carmen. Regeneratiiviseen aktiivikustiseen järjestelmään menetelmä soveltuu huonosti.

5.5 Keinotekoinen kaiunta

Kaiunta-algoritmiin toteutetulla LTV-suotimella pyritään ensisijaisesti rajoittamaan akustista takaisinkytketymistä, toiseksi pyritään parantamaan kaiunta-algoritmin impulssivasteen loppuosan diffuusiutta. Taajuusvasteen värityksen ja kuuluvan periodisuuden (fluttering) väheneminen parantaa algoritmin äänenlaatua. Aikavarianssin käyttö ei kaikissa tapauksissa paranna äänenlaatua. Esimerkiksi pianomusiikissa on havaittu ongelmia.¹

Keinotekoisien kaiunnen tulee aktiivikustisessa järjestelmässä olla mahdollisimman korkealaatuista: järjestelmä on herkkä vahvistamaan kaikkia värityksiä ja akustiikan epäluonnollisuuksia. Suoraviivaisin tapa lisätä digitaalisen audiosignaalin kaiuntaisuutta on tehdä signaalille aika-alueen konvoluutio jollakin todellisen huoneen impulssivasteella. Kaikulaite lisää käytännössä aina järjestelmän silmukavahvistuksen taajuusvasteen $G_{ML}H_{LM}$ epätasaisuutta, koska takaisinkytketymisestä aiheutuu kahden kaiuntaprosessien konvoluutio. Tästä seuraa pienempi GBI. Silmukavahvistusfunktion epätasaisuuksia tasoittavan aikavarianssin toteuttaminen kaiunta-algoritmiin saattaa parantaa tuntuvasti järjestelmän stabiilisuusominaisuuksia.

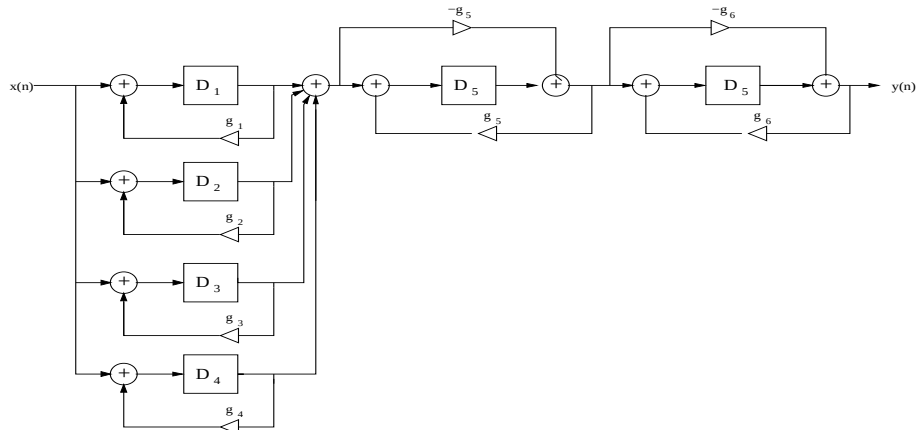
Jos jotakin erityistä kaiuntaa halutaan mallintaa tarkasti, tarjoaa FIR-ratkaisu takaisinkytkettyihin äärettömän impulssivasteen (IIR) algoritmitoteutuksiin verrattuna käytän-

1. Tanskalaisen TC-electronicsin uusimmissa kaikualgoritmeissa voi valita pianomusiikille option, jossa aikavarianssi on poissa käytöstä.

nössä paremman lähtökohdan. FIR suodin voi olla synteettisesti toteutettu (ei mitattu), jolloin sen ominaisuuksia päästään parametrisesti muokkaamaan, FIR-suodin on käytännössä jono viiveitä, joita voidaan hallita erillisinä. Aika-alueen konvoluutio vaatii kuitenkin suurta laskentakapasiteettia. FIR-toteutukset eivät ole suosittuja kaikulaiteissa tosiaikaisuusvaatimuksen takia: muutaman sadan tapin FIR-suotimia on mahdollista laskea aika-alueessa nykyisillä kellotaajuuksilla, mutta pituus ei riitä koko jälkikaiuntaisen tilan impulssivasteen laskemiseen. Esimerkiksi kahden sekunnin mittainen impulssivaste vaatii 44.1 kHz näytteenottotaajuudella 88200 laskentaoperaatiota yhtä sisääntulevaa näytettä kohti.

Konvoluution voi tehdä myös FFT:n avulla taajuusalueessa suoraan kertolaskuna, jolloin operaatioita tarvitaan sisääntulevaa näytettä kohden vähemmän, mutta tästä aiheutuu tosiaikaisissa sovelluksissa pitkä viive. Viivettä voidaan vähentää erilaisilla rinnakkaisprosessointitekniikoilla (overlap-add ja overlap-save algoritmit). Impulssivaste voidaan myös hajauttaa suodinpankkirakenteiksi (Reijnen, 1995, Schoenle, 1993, Gardner, 1995 & 1998). Reijnen (1995) esittämässä menetelmässä FIR-tyyppinen suodatus tehdään kertolaskuna taajuusalueessa. Viive saadaan varsin lyhyeksi (luokkaa 2.6 ms tavanomaisella CPU:lla) laskemalla rinnan eri pituisia impulssivasteita. Tällaisella FIR-toteutuksella voidaan käytännössä korvata kaikki IIR-toteutukset.

Suurin osa digitaalisista kaikulaitteista perustuu edelleen kuvan 5.5 mukaisiin, Schroederin 60-luvulla esittämiin kaikulaiteisiin. Artikkelissaan (1962c) Schroeder analysoi todellisen huoneen luonnollisen kaiunnan ominaisuuksia ja esittää suodinrakenteen, jolla noita ominaisuuksia voidaan jäljitellä keinotekoisesti. IIR-kaiunta-algoritmit ovat aina kampsuotimista ja kampa-kokopäästösuotimista koostuvia rakenteita. Kampa- ja kokopäästösuotimet ovat takaisinkytkettyjä rakenteita, niillä on siis äärettömän pituinen vaimeneva impulssivaste. Kampsuodin tuottaa signaaliin tasaisen resonanssirakenteen. Kokopäästösuodin taas omaa kompleksisen vaihevasteen, mutta säilyttää alkuperäisen signaalin magnitudivasteen ennallaan. Tasainen magnitudivaste on kuitenkin subjektiivisesti hieman harhaan johtava käsite. Ihmisen kuulojärjestelmä perustuu erittäin lyhyen ajan (10ms) taajuusanalyysiin. Kokopäästösuotimen matemaattinen ominaisuus $|H(e^{j\omega})| = 1$ taas on määritelty äärettömän integrointiajan kautta. Käytännössä kokopäästösuodin tuottaa värittyneen ja saman kuuloisen signaalin kuin kampsuodin. Kampa- ja kokopäästösuodinrakenteiden rinnan-, sarjaan- ja takaisinkytkeminen aiheuttaa vaimenevan impulssijonon tiheyden kasvun, eli keinotekoisien heijastusten kumuloitumisen.



Kuva 5.5: Schroederin vuonna 1962 esittelemä kaiunta-algoritmi.

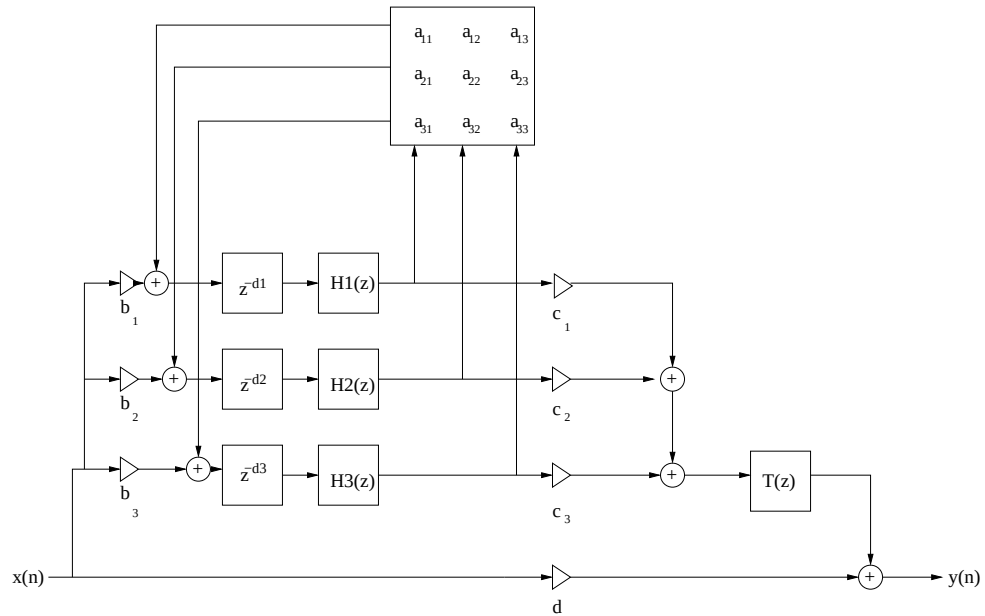
5.5.1 Takaisinkytketty viiveverkko (MFDN)

Stautner ja Puckette (1982) ehdottivat unitaarisen¹ takaisinkytkentämatriisiin avulla toteutettua MFDN (multiple feedback delay networks) verkkoa, joka toimii nelikanavaisena kaikulaitteena. Takaisinkytkentämatriisiin A avulla jokainen anto y_i voidaan kytkeä takaisin jokaiseen ottoon. Jos A on diagonaalinen, kytketään anto y_i takaisin ainoastaan ottoon x_i , jolloin rakenne vastaa Schroederin rinnakkaisista kampsuotimista tehtyä kaiuntalaitetta. Jos A ei ole diagonaalinen ja viiveet m_i valitaan järkevästi, voi rakenteella saavuttaa selvästi suuremman heijastustiheyden kuin rinnakkaisilla kampsuotimilla. Järjestelmän stabiilisuus on taattu, jos A valitaan unitaarisen matriisin ja itseisarvoltaan ykköistä pienemmän kertoimen g tuloksi (Gardner, 1998).

1. Lineaarinen ja aikavariantti järjestelmä, jossa on N kappaletta tuloja ja lähtöjä, määritellään unitaariseksi, jos se säilyttää kaikkien mahdollisten tulosisignaalien kokonaisenergian.

Samoin matriisi M on unitaarinen, jos $\|Mu\| = \|u\|$ kaikille vektoreille u (vektorin u energia $\|u\|^2$ säilyy M :llä kerrottaessa). Unitarisuusehdon voi kirjoittaa myös muodossa

$M^T M = M M^T = I$, I :n ollessa yksikkömatriisi. Voidaan osoittaa, että kahden unitaarisen matriisin tulo on myös unitaarinen, joten kahden unitaarisen järjestelmän sarjakytkentä on unitaarinen (Gardner, 1998).



Kuva 5.6: 3 x 3 MFDN verkko, alipäästösuodin $H_i(z)$ ja taajuuskorjain $T(z)$.

Jotin (1992) ehdottamalla takaisinkytkettyä viiveverkkoa hyväksikäyttävällä kaikulaierakenteella (kuva 5.6) on kaksi merkittävää perusominaisuutta, ensinnäkin järjestelmän aika- ja muototiheys voidaan saada halutunlaiseksi, toiseksi voidaan taata, ettei ääni värity jälkikaiunnassa. Toisaalta kaikulaitteelle voidaan määrätä halutunlainen taajuusriippuva jälkikaiunta-aika sekä taajuusvasteen verhoikäyrän funktio. Lisäämällä absorptiohäviötä häviöttömään prototyyppiin saadaan aidon kuuloista kaiuntaa. Kuvas-
vassa 5.6 $H_i(z)$ ovat taajuusriippuvaa absorptiota mallintavia suotimia. Korjaussuodin $T(z)$ tasaisen kokonaisspektrin verhoikäyrän kompensoimiseksi ei kuulu alkuperäiseen Jotin kaikulaitteeseen (Väänänen, 1997).

Jotin ja Chaignen (1991) mukaan viivelinjojen z^{-d_i} pituudet tulisi valita siten, että ne ovat lähellä toisiaan äänen väritymän estämiseksi. Schroeder (1962) ehdottaa, että pisimmän ja lyhyimmän viivelinjan suhde ei saisi olla enempää kuin 3:2. Schroederin (1962) mukaan viivelinjojen pituuksien tulisi olla käytetyllä näytteenottotaajuudella alkulukuja, jotta heijastukset eivät summautuisi päällekkäin ja aiheuttaisi voimakkaita piikkejä aikata-
son vasteessa.

5.6 Jälkikaiun luonnollisuus

Jälkikaiun luonnollisuudella (naturalness) viitataan yleensä keinotekoisuuden subjektiivisesti havaittaviin vaikutuksiin jälkikaiunnassa (Meynial, 1999). Modulaation aiheuttamat vaikutukset ovat päinvastaisia väritymän aiheuttamille, joita kuullaan yleensä transienttisignaaleilla. Svenssonin (1995) mukaan paljon transienteja sisältäville signaaleille, esimerkiksi puheelle voidaan väritymää ehkäistä modulaatioilla hyvin, kun taas soitinäänten ja laulun moduloimattomissa kestoissa (containing sustained unmodulated tones) modulaatioiden vaikutukset ovat helposti kuultavissa. Modulaatioiden havaittavuus on soitinriippuvaista. Jos soitinäänessä ei luonnostaan ole modulaatioita, havaitaan aikavarianssi helpommin. Samoin musiikkikappaleiden loppuissa

modulaatiot saattavat erottua. Eri modulaatiotekniikat vaikuttavat hieman eri tavoin. Moduloimaton yksittäinen sini-ääni on pahin kuviteltavissa oleva tapaus. Haitallisuus riippuu myös ohjelmana olevasta musiikkimateriaalista, ja materiaalin vaatimasta pie-
teetistä (Nielsen, 1996).

Nielsen (1996) on koonnut kirjallisuuskatsauksen aiheeseen liittyvistä kuuntelukokeista, sekä esittänyt myös omia tuloksia. Nielsenin (1996:160) tekemien kokeiden perusteella modulaatiotaajuuden tulee olla mielellään 2-3 Hz (eikä missään tapauksessa yli 5 Hz). GBI kasvaa monotonisesti modulaatioindeksin funktiona, mutta modulaatioindeksin ei kuitenkaan tule olla (modulaatiotekniikasta riippuen) 3-4 rad suurempi. Modulaatioista aiheutuvia väritymiä ei juurikaan kuulla yli 500 Hz taajuuksilla. Tästä päätellen 500 Hz taajuusalueen alapuolella tulisi pyrkiä käyttämään muita menetelmiä (Svensson, 1995).

Vaikka GBI on osoittautunut hyödylliseksi määritelmäksi, olisi LTV-järjestelmiä pyrittävä jatkossa arvioimaan mieluummin sen mukaan kuinka paljon vahvistusta saavutetaan ennen subjektiivisesti kuultavia ilmiöitä (gain before audible artefacts, GBAA). On yleisesti tiedossa, että ilman aikavariantteja toteutuksia väritymä havaitaan jo 12 dB ennen GBI:tä. Tässä 12 dB:n marginaalissa saavutettavia parannuksia tulisi kyetä arvioimaan.

Jälkikaiun luonnollisuuteen vaikuttavat myös spatiaaliset ilmiöt kuten äänen lokalisoituminen ja levittäytyminen tilaan. Kaiunta-algoritmisuunnittelussa korreloimattomien lähtösignaalien tuottamisella viitataan tilantunnon säätämiseen stereokuvassa. Dekorreloidut ulostulot voidaan ottaa esimerkiksi MFDN-verkon lähdeistä. Jos kaksi identtistä kaiuntaista signaalia toistetaan samaan aikaan eri suunnista, saapuvat signaalit havaitsijalle hieman erivaiheisina: tapahtuu kampasuodattuminen. Riippuen vaihe-erosta, eri komponentit interferoivat eri tavoin. Jos erivaiheisten äänten saapumiskulma on riittävä, kampasuodattuminen havaitaan myönteisenä (signaalista riippuen) äänikentän leviämisenä, selvää interferenssi-ilmiötä ei tällöin synny. Aktiiviakustisissa järjestelmissä korreloimattomia signaaleita käytetään lähekkäin olevilla kaiuttimilla lähinnä lisäämään järjestelmän diffuusiota, estämään kaiutinsignaalien interferenssiä ja kumoutumista eli äänen väritymistä (paikka-aliasoitumista).

6 Katkaistun salin konsepti

Aktiiviakustisella järjestelmällä varustetut harjoitushuoneet ovat viime vuosina saavuttaneet suosiota esimerkiksi musiikkioppilaitoksissa. Kysymys on ollut lähinnä pienistä yhdelle tai muutamalle soittajalle tarkoitetuista harjoitusluokista¹. Orkesteriharjoitussaleihin aktiiviakustiikkajärjestelmiä ei tiettävästi ole asennettu. Esityksen harjoittaminen lopulliseen muotoon riippuu aina yksilöllisesti konserttisalin akustiikasta, painopisteen ollessa musiikkiteoksen (eikä salissa) soittamisessa.

Orkesteriharjoitushuoneita käytetään yleensä salien puutteen tai suuren käyttöasteen takia. Käyttämällä orkesterikuoreissa kovaa pintamateriaalia saadaan varhaisia heijastuksia riittävästi, mutta samalla jälkikaiun osuus kasvaa liikaa. Tästä aiheutuu äänikentän epätarkoituksenmukaisen suuri energiatiheys. Tämä voidaan välttää lisäämällä ääntä absorboivaa materiaalia, jolloin akustiikka sekä arkkitehtuurin visuaalinen ja tilallinen tunnelma poikkeavat paljon konserttisalista. Tällaisessa tilassa saattaa olla sinänsä kohtalainen akustiikka, mutta konserttisalin korvaavana ainoana harjoitustilana se on huono vaihtoehto.

Uudessa katkaistun salin konseptissa harjoitussali on konserttisalin esiintymislavan kopio. Konserttisali on siis ikään kuin katkaistu toisen penkkirivin paikkeilta. Kun salin etuseinä toteutetaan kaiuttomaksi, on saliin muodostuvan äänikentän energiatiheys aina pienempi kuin todellisessa konserttisalissa. Katkaistun salin impulssivaste ja energiatiheys saadaan vastaamaan konserttisalia lisäämällä jälkikaiuntaa aktiiviakustisella järjestelmällä.

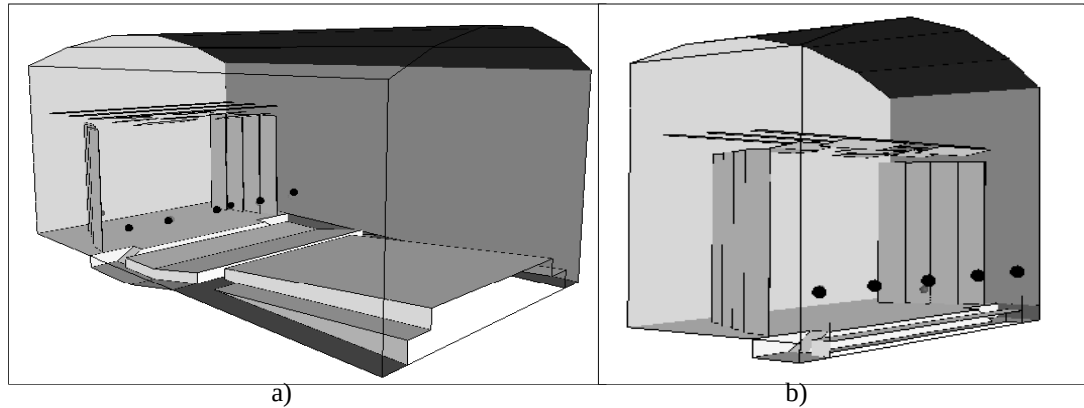
6.1 Toimintaperiaate

Katkaistun salin konsepti on esitetty kuvassa 6.1b. Katkaistu sali on kopio konserttisalin lavasta (kuva 6.1a). Myös lavan yläpuoliset pilvet sijaitsevat samoin kuin konserttisalissa. Pilvien yläpuolista tyhjää tilaa ei harjoitussalissa välttämättä tarvita, joten se voidaan korvata ääntä diffusoivalla ja absorboivalla materiaalilla ja näin saadaan huoneesta samalla matalampi.

Katkaistu sali simuloi konserttisalin akustiikkaa. Muusikot ja kapelimestari asettuvat huoneeseen kuten konserttisalin lavalle. Huoneen geometriset ja pintaominaisuudet

1. Aloittelevalle soittajalle pienen harjoittelutilan akustinen "kuivuus" saattaa olla innostusta latistava tekijä. Edistyneemmille esiintyjille harjoittelu hankalissa akustisissa olosuhteissa saattaa kehittää tottumuksia, jotka eivät esiintymistilanteessa ole toivottavia. Toisinaan suhteellisen pehmeä-äänisillä instrumenteilla pienessä huoneessa harjoittelu saattaa tyydyttävästi vastata esiintymistilannetta. Harjoitustiloissa äänekkyystaso on usein paljon esiintymistilannetta suurempi. Soittajan joutuessa skaalaamaan dynamiikka-alueensa uudeleen esiintymistilan vaatimuksiin, tuskin syntyy mielenkiintoista musiikillista lopputulosta (Griesinger, 1995).

ovat samat kuin konserttisalissa. Orkesterikuori aiheuttaa konserttisalin lavan kanssa identtiset varhaiset heijastukset. Muusikot ja kapellimestari kuulevat itsensä ja toisensa tässä suhteessa samoin kuin lavalla.



Kuva 6.1: Säteenseurantamenetelmällä simuloitu salimalli a) koko sali b) katkaistu sali.

Suhteellisen pienessä harjoitussalissa, yhden seinän ollessa täysin vaimentava, on mooditiheys pienillä taajuuksilla paljon harvempi kuin suuressa konserttisalissa. Pienen huoneen Schroeder-taajuus nousee suhteellisen korkeaksi, joten kenttää ei voida pitää diffuusiona ainakaan pienillä taajuuksilla. Tuottamalla diffuusia jälkikaiuntaa aktiiviakustisella järjestelmällä saadaan mooditiheys vastaamaan todellisen salin olosuhteita, ainakin tilastollisesti. Käytännössä salin kattorakenteista ja takaseinästä tulee lavalle jonkin verran varhaisia heijastuksia. Jos jonkin erityisen salin akustiikkaa tahdotaan mallintaa yksityiskohtaisesti, tulee nämä heijastukset ottaa huomioon.

Aktiiviakustisen järjestelmän mikrofonit sekä kaiuttimet asennetaan lähelle kaiutonta seinää. Diffuusin jälkikaiuntaisen energian pääosa tuodaan siis lavalle samasta suunnasta kuin konserttisalissakin. Äänikentän suuntaominaisuudet vastaavat vaikutelmaa konserttisalin lavalla.

Suoran äänen, varhaisten heijastusten ja jälkikaiunnan keskinäisten suhteiden säätäminen on järjestelmän kriittisin ominaisuus. Suhteiden on oltava vakioita koko salissa. Niistä riippuu paljolti soittajien kyky soittaa tarkoissa keskinäisissä voimakkuussuhteissa.

Kun lavan varhaiset heijastukset, jälkikaiunta sekä äänenpainetasot ovat sopivat ja lava tukee soittinääntä, on soittaminen helpompaa, eikä kuuluakseen tarvitse pinnistellä (Meyerin (1994) 2. laatutaso, luvussa 2.8). Varhaisten heijastusten puute vaikuttaa inтонаatioon heikentävästi, lava-akustiikka ei tällöin tue riittävästi soittinääntä.

Griesingerin (1995b) mukaan tilantuntuun (spaciousness) vaikuttaa eniten aikavälillä 2 ms - 80 ms esiintyvät varhaiset heijastukset ja niistä muodostuva lateraalinen kokonaisenergia. Koska orkesterikuori on suora kopio konserttisalista, voidaan olettaa, että tilantuntu katkaistussa salissa vastaa melko hyvin konserttisalin lavaolosuhteita.

Katkaistun salin konseptilla voidaan toteuttaa:

1. Yhden tai useamman olemassa olevan salin akustinen toisinto. Jos tietty sali tahdotaan mallintaa tarkasti, on lavasta luotava tarkka kopio. Aktiiviakustisen järjestelmän ollessa käytössä harjoitustilaan voidaan luoda tietyn salin tunnistettava sointi. Mooditiheys sekä mooditaajuudet vastaavat likimain todellisia saliolosuhteita.
2. Akustiikan muuntaminen eri aikakausien musiikkityylejä vastaavaksi.
3. Äänitysstudio.
4. Akustinen koelaboratorio huone- ja saliakustiikan tutkimukseen.
5. Elektroakustisen musiikin, pienimuotoisten tanssiesitysten, teatterin ja taideperformanssien esitystila.

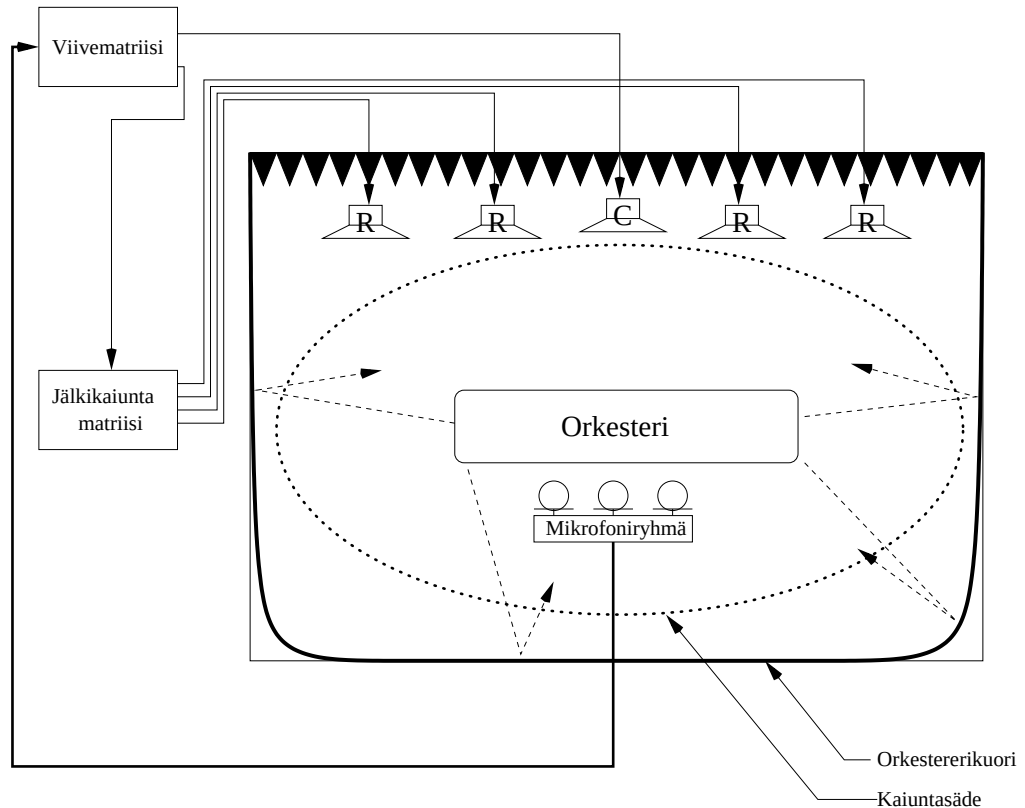
6.2 Katkaistun salin tietokonesimulaatio

Katkaistun salin käyttäytymistä tutkittiin säteenseurantamenetelmällä (kuvalähdemenetelmällä laskenta-aika olisi kasvanut merkittävästi). Toteutettiin kaksi kuvan 6.1 mukaista yksinkertaistettua mallia, toinen kokonaisesta salista ja toinen katkaistusta salista.

Huolimatta säteenseurantamenetelmän teknisistä puutteista (luku 2.7) kuvaa se kuitenkin tyydyttävästi katkaistun salin akustista käyttäytymistä. Mallista saatua impulssivastefunktiota $h(\tau)$ voidaan verrata konserttisalista mitattuihin impulssivasteisiin, tai kahta simuloitua vastetta (koko sali ja katkaistu sali) voidaan verrata toisiinsa. Varhaisen energian vasteiden tulisi kummassakin tapauksessa olla identtiset. Molemmissa saleissa oli samat pintamateriaalit, lukuunottamatta katkaistun salin etuseinää (kuva 6.1b), jonka absorptiokerroin oli mallissa yksi.

Mittaustuloksia mallinnetusta konserttisalista ei ollut käytettävissä, joten voitiin vertailla ainoastaan kokonaisen salin ja katkaistun salin simulaatioista saatuja impulssivasteita. Jo kuvan 6.2 mukaisesta geometriasta voidaan päätellä, että varhaiset heijastukset esittävät katkaistun salin jälkikaiunnassa pääosaa. Niiden jälkeen kaiunta nopeasti vaimenee heijastusenergian absorboituessa salin täysin vaimennettuun etuseinään. Kummassakin simulaatiossa impulssivasteiden alkuosat vastaavat lähes identtisesti toisiaan (kuva 6.3). Mittaustulos olisi saattanut ilmentää mahdollisesti salista lavalle saapuvia yksittäisiä voimakkaita heijastuksia. Toisaalta simuloitu sali on koettu akustiikaltaan niin diffuusiksi, ettei tällaisia korostumia aika-alueen vasteessa kenties lainkaan ole nähtävissä.

Tulokset simulaatioista yhdestä ympärisäteilevästä lähteestä viiteen pallokuvioiseen vastaanottopisteeseen on esitetty kuvassa 6.3. Energia-aikavasteet osoittavat odotetusti, että varhaisen energian osuudet ovat samat kummassakin salissa, mutta 200 ms jälkeen heijastustiheys katkaistussa salissa laskee voimakkaasti, ja ainoastaan muutamia heijastuksia esiintyy 400 ms jälkeen. Nämä aikarajat ovat riippuvaisia lavan dimensioista.



Kuva 6.2: Katkaistu sali. Lavan orkesterikuori ja kattopilvet ovat kopio oikean salin lavasta. Salista lavalle tuleva jälkikaiunta toteutetaan aktiivikustisella järjestelmällä. Kaiuttimien merkinnät: R = jälkikaiunta, eli salin vaste lavalle, C = kattoheijastukset (tarvittaessa, jos ei pilviä). Varhaiset heijastukset saadaan orkesterikuoresta.

Simulaatio tukee oletusta, että mikäli harjoitushuone on täydellinen kopio vastaavan salin lavasta, on myös impulssivasteen varhainen osa salin kanssa identtinen, ja siis myös kuulovaikutelma on sama kaikissa kuuntelupisteissä.¹ Salista tulevat varhaiset heijastukset esittävät silmämääräisesti arvioiden melko olematonta osaa.

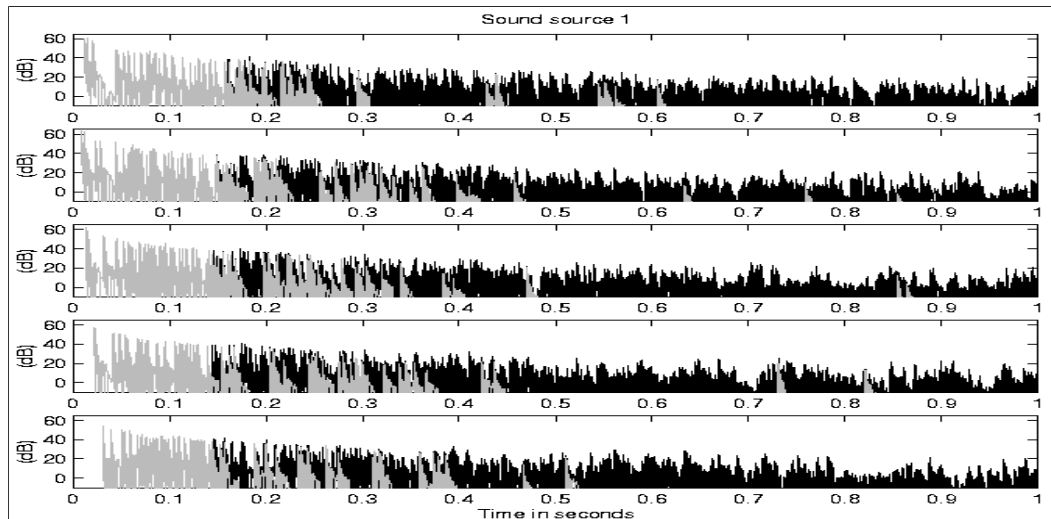
Mallin perusteella on vaikea arvioida katkaistun salin äänikentän todellista diffuusiutta, jossa on, kuten vasteiden loppuosista voidaan päätellä, eroja kokonaiseen saliin. Malliin ei kuitenkaan ole implementoitu diffraktiota, joten tulokset ovat siinä suhteessa kyseenalaisia.

6.3 Kaiuton seinä ja sähköakustinen järjestelmä

Absorptiosuhteeltaan lähellä yhtä olevan seinän toteuttaminen on vaativa tehtävä, varsinkin pienillä taajuuksilla. Seinämateriaalin valinta edellyttää huolellista tutkimusta, jotta teknisten vaatimusten ohella kustannukset tai tilavaatimukset eivät muodostuisi kohtuuttomiksi.

Järjestelmäkaiuttimet ja -mikrofonit asetetaan välittömästi kaiuttoman seinän tuntumaan. Yksi mikrofoni asetetaan kapellimestarin yläpuolelle noin 3.5 m korkeuteen, ja tarvittaessa lisämikrofoni 5 - 7 metriä (lavan koosta riippuen) kummallekin sivulle. Orkesterin balanssi on paras juuri kapellimestarin kohdalla. Teoriassa kahden

1. Paitsi kaiuttoman seinän lähellä.



Kuva 6.3: Simuloidut energia-aikavasteet viidestä pallokuvioisesta kuuntelupisteestä, katkaistusta salista (harmaa kuvaaja) ja koko salista (musta kuvaaja).

mikrofonin pitäisi riittää orkesterin äänittämiseen. Esimerkiksi Finlandiatalon uudessa sähköakustisessa järjestelmässä on käytössä ainoastaan yksi mikrofoni.

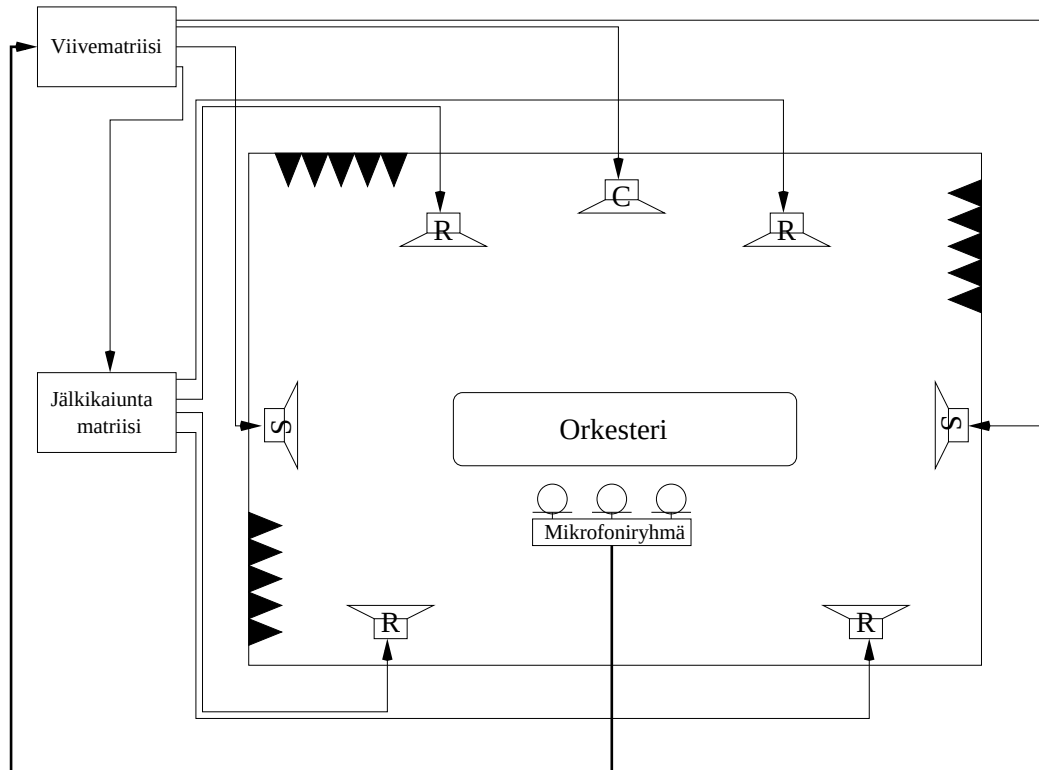
Jotta vältetään korostamasta lähellä olevia soittimia tulee mikrofonit sijoittaa kaiuntasäteen etäisyydelle lähimmistä soittajista. Mitä kauempana mikrofonit ovat soittajista sen enemmän ne poimivat järjestelmäkaiuttimista tulevaa ääntä. Takaisinkytkentää ehkäistään käyttämällä suuntaavia mikrofoneja, aikavarianssia, ja kenties jonkinlaisia ääntä absorboivia peitteitä mikrofoniin takana.

Koska dynamiikka-alue ulottuu alle 15 dB:stä aina 110 dB:iin, on kaiuttimien, mikrofoniin, vahvistimien, muuntimien jne. oltava laadukkaita. Signaalikohinasuhteiden tulee olla huippuluokkaa. Esivahvistetuissa kaiuttimissa tämä ei yleensä ole ongelma.

Kaiuttimet asetellaan täysin vaimennetulle seinälle symmetriseksi kolmiriviseksi matriisiksi. Vierekkäisiin kanaviin prosessoidaan keskenään korreloimaton signaali, joten paikka-aliasoitumista tuskin ilmenee luonnollisilla signaaleilla.

6.4 Pohdintoja

Orkesteriharjoitushuonesuunnittelun lähtökohtana oli kuvassa 6.4 esitelty monitoimisalin konsepti. Harjoitushuoneena monitoimisali on joustava vaihtoehto, sillä huone on täysin akustoitettu ja kaikki varhaiset heijastukset sekä jälkikaiunta tuotetaan keinotekoisesti. Esimerkiksi Wengerin patentoitu ja kaupallinen harjoitushuonekonsepti on juuri tällainen (Wenger, 1996). On luultavaa, että monitoimikonseptillä olisi vaikea tuottaa luonnollista tilantunnon vaikutelmaa orkesteriharjoitushuoneeseen varhaisen heijastusten mallintamiseen liittyvän hankaluuden takia. Lisäksi puhtaasti keinotekoisien kaiun varassa oleminen asettaa kaikualgorithmille ja järjestelmälle muita suuria vaatimuksia. Regeneratiivinen aktiivikustinen järjestelmä soveltuu kuitenkin erinomaisesti jälkikaiuntaisen äänen tuottamiseen.



Kuva 6.4: Monitoimisali. Salista lavalle tuleva jälkikaiunta, sekä orkesterikuoren varhaiset heijastukset toteutetaan aktiiviakustisella järjestelmällä. Huone on täysin akustoitua ääntä absorboivalla materiaalilla. Kaiuttimien merkinnät: R = jälkikaiunta, eli salin vaste lavalle, S = varhaiset heijastukset ja C = kattoheijastukset.

Syntyi luonteva ajatus katkaistun salin konseptista. Ajatus todettiin taloudellisesti realistiseksi, jopa edulliseksi, sekä suhteellisen yksinkertaiseksi toteuttaa prototyyppiasenteelle.

Kaiuttimien sijoittaminen pelkästään etuseinään näytti itsestään selvältä: juuri sieltä salin jälkikaiuntainen äänienergia lavalle konserttisalissakin säteilee. Mikrofonien sijoittaminen taas tuotti päänvaivaa. Mahdollisuuksina pohdittiin suurehkon 6-12 mikrofonin matriisin sijoittamista joko soittajien yläpuolelle tai etuseinään kaiuttimien kanssa. Mikrofonimatriisin sijoittaminen soittajien yläpuolelle hylättiin, koska soittimien todelliset säteilykuvion ja äänenvärit menetetään. Lisäksi yläpuoliset mikrofonit edellyttäisivät miksausta joka kerta kun soittajat siirtyvät, koska soittimien keskinäiset balanssit ylöspäin ovat erilaiset kuin vaikkapa kapellimestarin korokkeelle.

Mikrofonimatriisin sijoittamista etuseinään pidettiin hyvänä ajatuksena. Kaiuton seinä ajateltiin akustisena muuntimena, joka lisää mikrofoneille saapuvaan ääniaaltoon vaikutuksen, jonka konserttisali ääneen aiheuttaa. Todettiin kuitenkin, että tällä tavoin takaisinkytketymisongelmat muodostuvat liian suuriksi: mikrofonit olisivat paljon lähempänä järjestelmäkaiuttimia kuin soittajat. Varsinkin kauimmaisat soittajat jäisivät katveeseen. Ratkaisuna ehdotettiin vähäistä määrää mikrofoneja kapellimestarin korokkeen yläpuolelle, jota voidaan oikeutetusti pitää orkesterin balanssin referenssipisteenä.

Seuraavassa katkaistun salin tarjoamia etuja orkesterikäytössä:

1. Keinotekoisesti tarvitsee tuottaa vain diffuusia jälkikaiuntaa, vältetään hankala varhaisten heijastusten mallintaminen.
2. Varhaiset heijastukset ovat identtiset konserttisalin kanssa.
3. Kytkeytyjen huoneiden teorian mukainen jälkikaiunnan verhoikäyrän muuttuminen ei-eksponentiaalisesti vältetään, koska suoraa ääntä ja varhaisia heijastuksia ei vahvisteta.
4. Lavan äänikentän spatiaalisuus (suuntavaikutelma) säilyy luonnollisena, keinotekoisesti tuotettu kaiunta ei vahingossakaan lokalisoidu väärin paikkoihin.
5. Äänikentän energiatasot eivät nouse liian suuriksi suhteellisen pienestä tilavuudesta huolimatta.
6. Temporaalet ilmiöt voidaan minimoida oikealla orkesterikuoren suunnittelulla.
7. Lava vastaa visuaalisesti (muuten kuin etuseinän osalta) todellista konserttisalia.

7 Prototyyppi

Katkaistun salin prototyyppi pystytettiin Yleisradion suureen M2-studioon, joka on pääpiirteissään konserttisalin lavan kokoluokkaa (tilavuus 1920 m^3). Järjestelmällä testattiin sekä kaupallista LARES järjestelmää että omaa DIVA-kaiunta-algoritmito-
teutusta. Järjestelmän äänenlaatua arvioitiin muusikkojen lausuntojen ja mittausten pe-
rusteella.

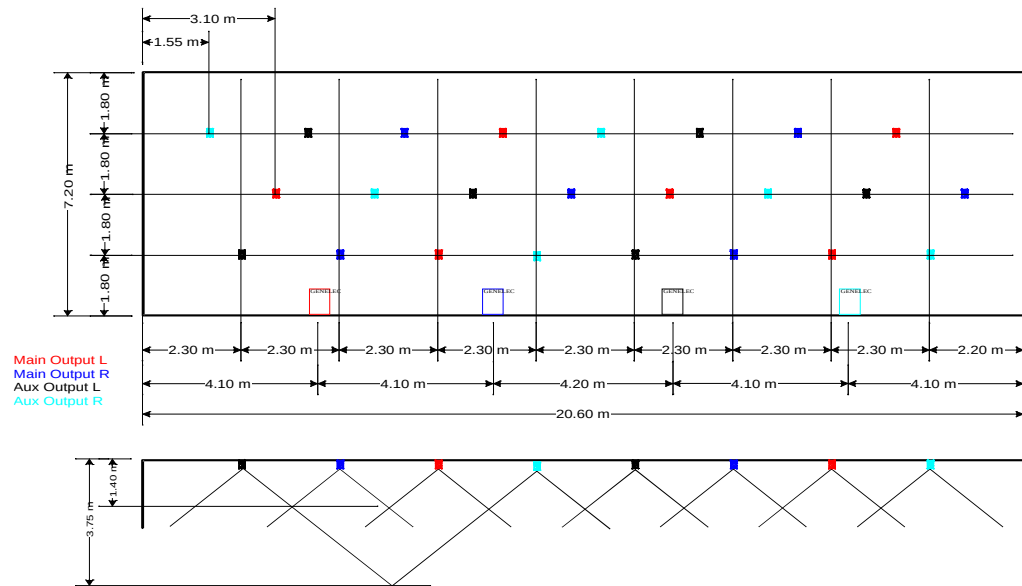
7.1 Rakenne

Yleisradion M2-studio on kahdesta Yle:n suuresta äänitysstudiosta suurempi, pinta-
alaltaan noin 300 m^2 (korkeus 7 m). Huone on taajuusvasteeltaan erittäin tasainen ja
äänikenttä erittäin diffuusi. Jälkikaiunta aika RT_{60} studiossa on normaalisti noin 1.2 s
(keskitaajuuksilla, 500-2000 Hz). Mittaus perustuu Yle:n Olli Salmensaaren mittauk-
siin vuodelta 1996. Schroederin taajuus on 50 Hz, jota suuremmilla taajuuksilla ääni-
kenttää voidaan siis pitää diffuusina. Huone on äänitystarkoitukseen hyvä: akustisia
ongelmia ei juuri esiinny. Kysymyksessä oli siis ihanteellinen koeympäristö, tosin ei
tavanomaisen konserttisalin lavaa täysin vastaava: huone oli ehkä hieman liian leveä,
mutta ei tarpeeksi syvä. Studion äänikenttä eroaa lavasta lähinnä heijastustiheyden ja
heijastusten suunnan suhteen. Salista akustisesti erotetun lavan heijastustiheys ei ole
yhtä suuri kuin koko salin.

7.1.1 Kaiuton seinä

Studion toiselle suurelle seinälle pystytettiin Yleisradiolta käyttöön saatujen trussiteli-
neiden (yleensä valojärjestelmien runkoina) varaan noin $20 \times 5 \text{ m}$ kooltaan oleva ääntä
absorboiva seinä. Seinämateriaalina käytettiin raskaita Molton-teatteriverhoja
(Teak:ista lainassa). Verhoja aseteltiin kolmeen kerrokseen, noin puolen metrin etäi-
syydelle toisistaan. Aikaansaatu seinä ei vastannut ideaalista täysin vaimentavaa sei-
nää, mutta takasi tyydyttävän vaimennuksen 0.2- 5 kHz taajuusalueella. Mikrofoneille
ja kaiuttimille valittiin pysyvät sijainnit, joihin ei kajottu testauksen aikana. Kaksi kar-
dioidimikroфонia sijoitettiin kapellimestarin paikalle noin 3.5 m korkeuteen. Ääntä ab-
sorboivalle seinälle sijoitettiin hieman epäsäännöllisin välein (vert. kuva 7.1) 24
järjestelmäkaiutinta ja 4 subwooferia.

Studion jälkikaiunta-aika oli verhon kanssa mitattuna noin 0.9 s. Schroederin taajuus
verhon kanssa 43 Hz. Verhon suunnasta ei juuri ääntä säteile, joten äänikentän inten-
siteetti ei ole keskimäärin nolla vaan äänienergiaa virtaa kaiuttomaan seinään, ääni-
kenttä ei siis ole diffuusi. Verho vaimensi suuria taajuuksia niin paljon, ettei
merkittävää jälkikaiuntaa havaittu juuri ollenkaan yli 2 kHz taajuuksilla.



Kuva 7.1: Värilliset neliöt esittävät Genelecin 1029A (24kpl) järjestelmäkaiuttimia mikrofonitelineiden varassa Molton-verhojen edessä. Neljä keskenään dekorreloitua järjestelmälähtöä tuodaan kaiuttimille siten, että vierekkäisiin kaiuttimiin tulee aina toisistaan poikkeavat signaalit. 1094A (15") subwoofert ovat Molton-verhojen takana.



a)



b)



c)

Kuva 7.2: Genelecin aktiivinen kaksitiekaiutin 1029A, subwoofer 1094A sekä Neumannin U 89 i mikrofoni.

7.1.2 Järjestelmä

Järjestelmäkaiuttimet sijoitettiin kolmeen tasoon tavallista tukevampien mikrofonitelineiden varaan aivan verhojen eteen kuvan 7.1 mukaisesti. Äärimmäisen kompakti alumiinirunkoinen Genelecin 1029A (24kpl, kuva 7.2a) on aktiivinen kaksitiekaiutin (kummalekin kanavalle omat vahvistimet jakosuotimen jälkeen), joka soveltuu lähikenttätarkkailukaiuttimeksi sekä kotiteatteri- että "surround sound"-tarkoituksiin. Neljä keskenään dekorreloitua järjestelmälähtöä tuotiin kaiuttimille siten, että vierekkäisissä kaiuttimissa oli aina eri signaalit. Kaiuttimessa on aktiivinen crossover-

ominaisuus, joten johdotus voitiin tehdä suoraan kanavan kaiuttimesta toiseen. Tämä helpotti paljon 24 kaiuttimen yhdistämistä järjestelmään.

Pienikokoisen 1029A-kaiuttimen taajuusvaste ei ymmärrettävästi ole tasainen kovin pienille taajuuksille (-3dB 68Hz:llä), joten äänentoistoa täydennettiin Genelecin 1094A (15") subwoofereilla (4kpl, kuva 7.2b) (29-80 Hz, +/- 2.5 dB). Subwooferit sijoitettiin Molton-verhojen taakse.

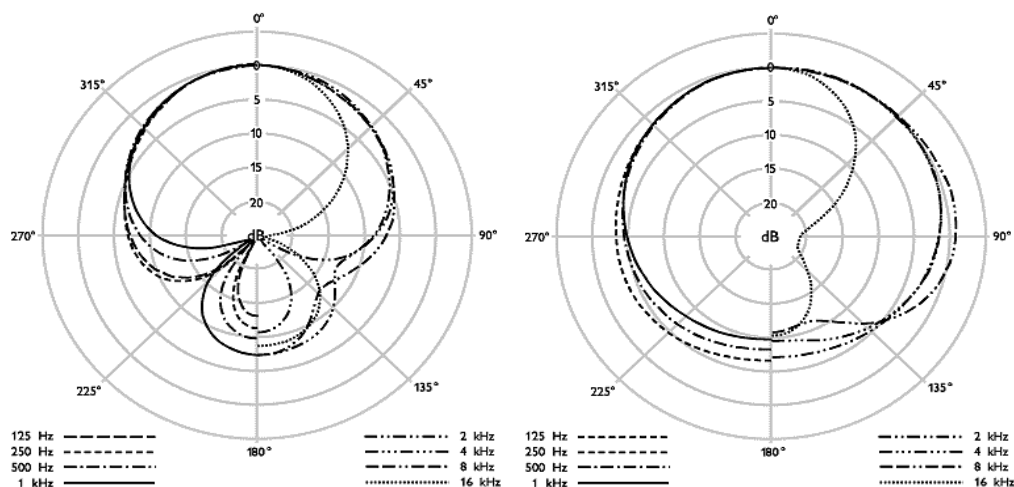
Koska kaiuttimet ovat täysin vaimennetulla seinällä, säteilee keinotekoisesti tuotettu kaiuntainen ääni oikeasta suunnasta, eikä lokalisaatiovirhettä tapahdu. Jälkikaiunnan taso voi silti olla liian suuri suhteessa orkesterikuoresta tuleviin varhaisiin heijastuksiin. Pienten kaiuttimien ollessa melko tasaisesti puoliavaruuteen säteileviä (paitsi suorilla taajuuksilla) saavutetaan äänikenttään melko hyvä kattavuus. Noin 3-4 m päässä seinästä yksittäiset kaiuttimet eivät enää lokalisoitu erillisiksi, seinä ja sali soi enemmänkin yhtenä kokonaisuutena.

Äänenlaadultaan ja signaalikohinasuhteeltaan Genelecin aktiivikaiuttimet ovat huipuluokkaa. Tämä on tarpeen ottaen huomioon normaalin sinfoniaorkesterin dynamiikka-alueen (15 dB - 110 dB). Tavallisen konserttisalin taustakohina on aina vähintään 10dB suuruusluokkaa. Yleisradion M2-studio oli tässä suhteessa erittäin hiljainen, 30 kaiuttimen hurinaa ei silti kyennyt juuri kuulemaan.

Mikrofoneina päädyttiin käyttämään kahta suuntaavaa Neumannin U89i yleiskäyttöistä studiomikrofonia (kuva 7.2c). Mikrofonin suuntakuvio on säädettävä, joten erilaisia asetuksia voi kokeilla mikrofoniin lukumäärän mukaan. Käytössä oli kaksi mikrofonia ja suuntakuvio oli säädetty superkardioidiksi (kuva 7.3a). Säättömahdollisuutena olisi ollut myös laajakulma suuntakuvio (kuva 7.3b), jota suositellaan käytettäväksi äänitetäessä suuria äänilähteitä. Tätä ei kuitenkaan kokeiltu kierron vaaran takia. Ilmeni, että kaksi superkardioidimikrofonia ei kenties ollut aivan riittävä määrä koko salin äänittämiseen. Lisää olisi tarvittu kaksi, kenties neljä mikrofonia. Täytyy kuitenkin muistaa, että mikrofoniin lisääminen samoihin vahvistuskanaviin lisää järjestelmän takaisinkytkentää.

U 89 i-mikrofonilla on erittäin tasainen diffuusin äänikentän vaste kaikilla suuntakuvioilla. Tämä on erityisen tärkeä ominaisuus silloin kun mikrofonia käytetään kaiuntaisessa kentässä ja heijastuksia tulee monesta suunnasta. Esivahvistetun mikrofoniin dynamiikka-alue, jolloin signaali säilyy säröytymättömänä, on 134 dB. Tämä riittää sinfoniaorkesterin äänittämiseen.

Mikrofonit sijoitettiin kapellimestarin korokkeen yläpuolelle, noin 3.5 m korkeuteen lattiapinnasta. Periaatteessa orkesterin balanssin pitäisi olla paras juuri tällä kohtaa. Jotta välttyttäisiin korostamasta lähellä olevia soittimia, tulisi mikrofonit periaatteessa sijoittaa vähintään huoneen kaiuntasäteiden etäisyydelle lähimmistä soittajista.



Kuva 7.3: Mikrofonin suuntakuviot: superkardioidi ja laajakulma.

Studion kaiuntasäde on normaalisti (kaava 2.24) 2.3 m, verhon kanssa 2.6 m ja järjestelmän kanssa 1.6 - 1.8 m (RT_{60} 1.9 - 2.5 s). Mikrofonien etäisyys lähimmästä järjestelmäkaiuttimesta oli 2.5 m. Lähimmät soittajat ovat kapellimestarista tyypillisesti 2 - 4 metrin etäisyydellä. Tällöin mikrofonien etäisyys lähimmistä soittajista on luokkaa 5 m ja kauimmaisista soittajista luokkaa 9 m.

Mikrofonin ja kaiuttimen sijoittaminen lähekkäin aiheuttaa kanavakaiuttimesta mikrofonikanavaan kytkeytyvän äänisignaalin melko voimakkaan tason suhteessa hyötysignaaliin. Tämä ei kuitenkaan aiheuttanut vakavia ongelmia akustiseen takaisinkytkeytymiseen. Kummastakin järjestelmästä (LARES ja oma prototyyppi) saatiin riittävä GBI. Omalla prototyypillä päästiin testaamaan järjestelmää ilman aikavarianssia ja todettiin, että ääni värittyä selvästi jo melko pienellä vahvistuksella. Suhteellisen pienellä modulaatioindeksin arvolla saatettiin todeta värityksen katoavan. Varsinaisia modulaation aiheuttamia vääristymiä ei havaittu.

Mikrofonin takana olevia järjestelmäkaiuttimia voisi suunnata pois mikrofoneista tai siirtää toisaalle. Tätä kokeiltiin, mutta parannusvaikutusta on vaikea arvioida. Mikrofonien taakse on mahdollista asettaa kaiuttimista tulevaa ääntä varjostavaa absorboivaa materiaalia, samoin myös mikrofonien alapuolelle, ettei kapellimestarin ääni vahvistu luonnottomasti.



a)



b)

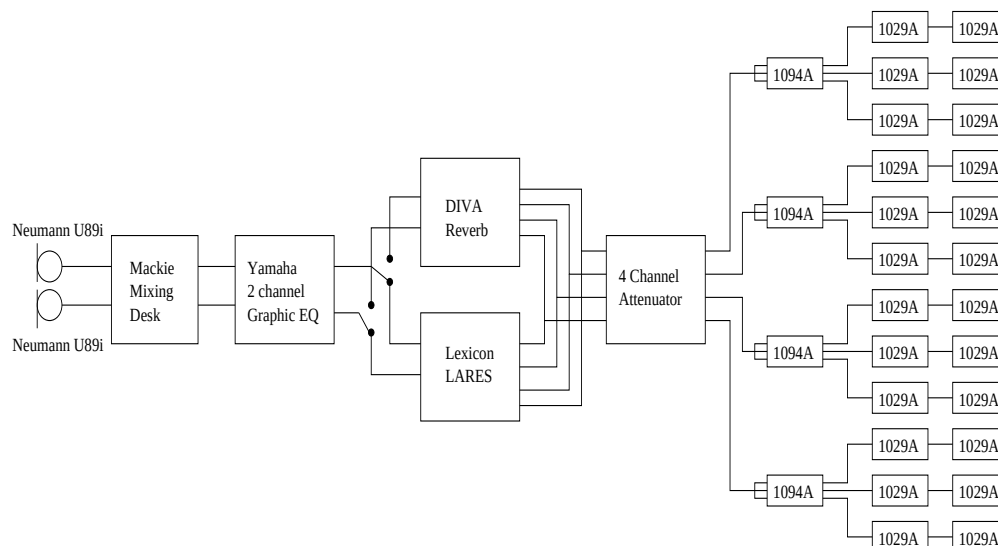
Kuva 7.4: Kaiuton seinä a) pystytysvaiheessa, b) lopullisessa muodossa.

Kaiuton seinä havaittiin akustisesti varsin kiinnostavaksi elementiksi (kuva 7.4). Seinän lopullinen toteuttaminen edellyttää perusteellista pintamateriaalitutkimusta, ettei seinästä tule massiivinen taikka kustannuksiltaan kallis. Absorptiosuhteen on syytä olla lähellä yhtä aina 50 Hz:iin asti.

Seinän visuaalisuuteen ei prototyyppiasteella paljon panostettu. Pienet 1029A Genelec-kaiuttimet olivat elementissään eripituisten telineiden varaan kohotettuina. Kaiuttimien näkyvyyttä ei ensisilmäyksellä koettu välttämättä negatiiviseksi.

7.2 Signaalinkäsittely

Kuvassa 7.5 on esitetty prototyypin aktiiviakustisen järjestelmän kaavakuva. Mikrofonien sisääntulon jälkeen, ennen prosessointiyksikköä oli parametrinen Yamaha EQ. Ekvalisoinnilla rajoitetaan huonevasteen mooditaajuuksilla olevia korostumia ja ehkäistään silmukkavahvistusfunktion kertaautuvan taajuusvääristymän syntymistä. Ekvalisaattorin kalibroiminen saliin toteutettiin terssikaistoittain käyttäen vaaleanpunaista kohinahäätettä. Ekvalisaattorin tuloista oli suuria taajuuksia vaimennettu (EQ HI 12 kHz, -6 dB). Näin toteutetulla ekvalisoinnilla kyettiin tasoittamaan taajuusvasteeltaan melko virheettömän tilan taajuusvasteen trendi erittäin hyvin. Ongelmallisemmissa tiloissa voidaan turvautua signaalinkäsittelyyn ja toteuttaa adaptiivisia huonevasteen ekvalisoimismenetelmiä (kts. Mourjopoulos, 1994). Adaptiivisilla silmukkavahvistusfunktioita mallintavilla suotimilla (Goertz, 1995) on myös pyritty hallitsemaan takaisinkytkettyyn signaaliin korostuvia huippuja.



Kuva 7.5: Prototyypin aktiiviakustisen järjestelmän kaavakuva.

7.2.1 Testatut kaiunta-algoritmit

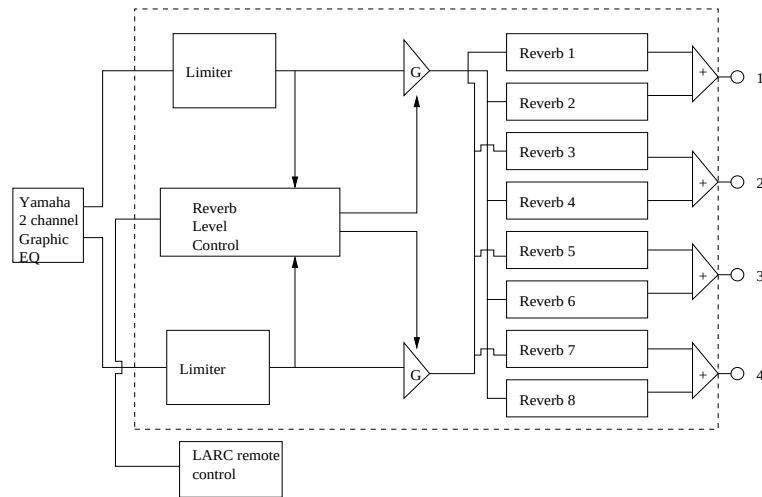
Yhdessä LARES prosessorissa (kuva 7.6) on kaksi tuloa, neljä lähtöä ja kahdeksan vaiheiltaan ja parametreiltaan toisistaan poikkeavaa aikavarianttia kaiunta-algoritmia. Aikavarianssi voidaan implementoida kaiunta-algoritmiin monin tavoin: viivelinjojen pituuksia moduloimalla, aikavarianteilla suotimilla (FM, PM, kts. Nielsen(1996)) tai FIR-suotimien interpolaatiolla. LARES:ssä aikavarianssi on toteutettu viivemodulaationa (kts. luku 5.3.2.)(Griesinger, 1995b). Kummastakin tulosta ohjataan neljä signaalia erillisille kaiunta-algoritmeille. Kahdesta eri kanavan kaiutetusta signaalista miksataan aina yksi lähtö (kuva 7.6).¹

Kaksi muuta testattua kaiunta-algoritmia (aikainvariantti DIVA-TI ja aikavariantti DIVA-TV) on kehitetty TKK:lla DIVA-tutkimushankkeessa. Prototyypissä käytetty algoritmi (Väänänen *et al.*, 1997) on esitetty kuvassa 7.7. Aikavarianttia algoritmia ei ole vielä julkaistu.

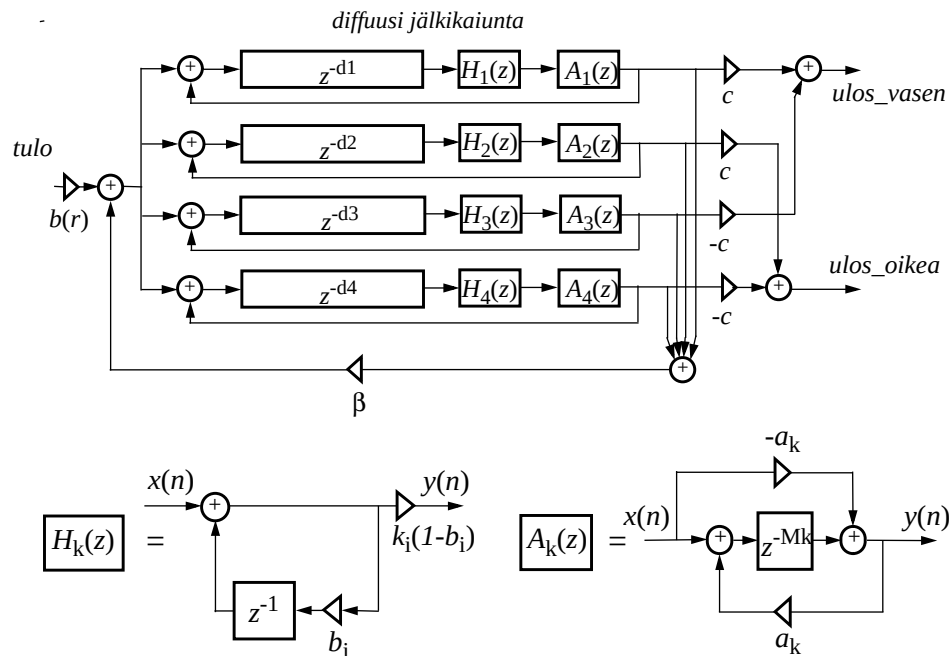
DIVA-TI ja DIVA-TV algoritmeissa toteutetaan rinnakkaisten viivelinjojen takaisinkytkeminen tuloihin MFDN-matriisin avulla. Jo neljällä rinnakkaisella viivelinjalla saadaan luonnollisen kuuloinen jälkikaiunta, nopeasti saavutettava runsas heijastustiheys sekä kaiunnan säädeltävyys muutamalla havainnollisella parametrilla (kuva 7.7). Algoritmin lähdekoodin avoimuus oli suuri etu. Korreloimattomia lähtösignaaleita voitiin johtaa suoraan viivelinjoista eri lähtökanaviin. Myös aikavarianssi toteutettiin suoraan kaikualgoritmiin yksinkertaisena kampa-kokopäästösuotimen takaisinkytkentäkertoimien modulointina (Hiipakka, 2000).

1. Periaatteessa tyydyttävä tilantuntu voitaisiin toteuttaa käyttäen 5-7 kanavaa, jotka on poikkeutettu toisistaan ainoastaan ajassa muutaman millisekunnin viiveellä (korvienvälisen aika-viiveen ollessa alle 1ms, vert. IACC). Yksi aktiivisen järjestelmän etu on mahdollisuus tuottaa suuntaavuusominaisuuksiltaan hallittua jälkikaiuntaa. Muita tekniikoita lähtösignaalien dekorreloimiseksi on ehdottanut esimerkiksi Schroeder (1962c) ja Jot (1992).

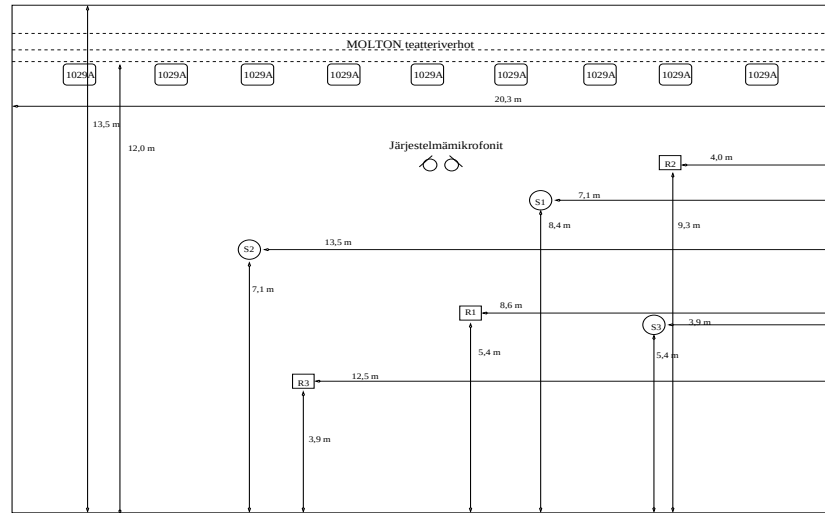
LARES järjestelmä Pasilassa



Kuva 7.6: Kaavakuva LARES-järjestelmästä (Griesinger, 1995).


 Kuva 7.7: Diffuusia jälkikaiuntaa tuottavan algoritmin lohkokkaavio. Viivelinjoja voi olla myös useampia, mutta jo neljällä saadaan realistisen kuuloinen jälkikaiunta (Väänänen *et al.*, 1997). Jokaisen viivelinjan z^{-d_i} päässä oleva alipäästösuodin $H(z)$ jäljittelee seinien ja ilman absorptiota aiheutuvaa äänen taajuusriippuvaa vaimenemista. Kampa-kokopäästösuotimen $A(z)$ tarkoituksena on kasvattaa heijastustiheyttä.

7.3 Huoneakustiset mittaukset



Kuva 7.8: Lähdepisteet (S1, S2 ja S3) sekä mittauspisteet (R1, R2 ja R3).

Eri järjestelmäratkaisujen tutkimiseksi toteutettiin huoneakustisia mittauksia. Mittausten toteuttaminen ei ollut suoraviivaista, koska käytössä oli kaksi aikavarianttia järjestelmää. Aikavariantille järjestelmälle ei voida yksikäsitteisesti määrittää impulssivastefunktiota, mutta energia-aikamielessä voidaan aikavarianttia järjestelmää tarkastella. Tästä seuraa, että yleisesti käytettyä MLS mittaustekniikkaa ei voitu soveltaa. Mittauksissa käytettiin perinteistä tekniikkaa, jossa heräte poistetaan dekonvoluomalla mittaustalasta. Dekonvoluutio voidaan kirjoittaa taajuustasossa

$$h(t) = IFFT \left[\frac{FFT(y(t))}{FFT(x(t))} \right], \quad (7.1)$$

missä $x(t)$ on heräte ja $y(t)$ mitattu vaste. Mittaukset ja signaalinkäsittely tehtiin TKK:lla kehitetyllä (Peltonen, 2000) *Impulse Response Measurement Application* (IRMA) PC-sovellusohjelmalla, jonka signaalinkäsittely tapahtuu Matlab-ympäristössä.

Aikavariantille järjestelmälle vaihtoehtoisena mittausmenetelmänä tulee ensimmäiseksi mieleen klassinen pistoolinlaukausmenetelmä. Pistoolinlaukausta ei kuitenkaan voitu käyttää herätteenä Yle:n studiossa liian suuren äänenpaineen takia. Pistoolilla saatetaan konserttisalissa saada erittäinkin hyvä dynamiikka-alue. Mittaussignaalina käytettiin logaritmisesti taajuusalueessa (80 - 6000 Hz) nousevaa sinimuotoista herätettä. Signaali syötettiin järjestelmään neljästi peräkkäin ja vaste laskettiin kolmannesta, näin eliminoitiin signaalin alun ja lopun transienttien vaikutus. Lähdekaiuttimena käytettiin Genelecin 1029A mallia, kunnollisen ympärisäteilevän lähteen puutteessa, mikrofona B & K:n mittamikrofonia. Lähde- ja mittapisteet noudattelivat Gaden (1989b) esittämiä (kuva 7.8).

Perinteiset akustiset tunnusluvut kuten RT_{20} , EDT, C_{80} on määritelty passiivisia akustisia järjestelmiä varten, eivätkä juuri tarjoa lisätietoa aktiiviakustisten järjestelmien erityisominaisuuksista, kuten äänen väritymästä, luonnollisuudesta (naturalness of reverberation, viittaa modulaatiosta aiheutuviin vääristymiin) sekä jälkikaiunnan lokalisoitumisesta (Meynial, 1999). Mitatuista impulssivasteista kuitenkin laskettiin jälkikaiunta-aika (RT_{20}), varhainen vaimenemisaika (early decay time, EDT) sekä selvyys (clarity, C_{80}), sillä ensinnä haluttiin tutkia järjestelmän käyttäytymistä aivan perinteisestä näkökulmasta.

1. EDT - Subjektiiivisessa kuuntelussa parhaiksi todetuissa järjestelmissä (LARES ja DIVA-TV) saatiin EDT:ksi noin 1 s (500 - 2000 Hz).
2. RT_{20} - Jälkikaiunta ajat (LARES ja DIVA-TV) noudattelivat tavanomaisia konserttisalissa mitattuja tuloksia.
3. C_{80} - Selvyysarvot olivat turhan korkeita (kauttaaltaan yli 4 dB) jos verrataan vastaaviin arvoihin hyvistä konserttisaleista. Mittaustulosten suuruus saattaa myös johtua lähteen suuntaavuudesta. Beranekin (1996) mukaan hyväksyttävät arvot asettuvat -4 dB ja +4 dB:n välimaastoon.

Gaden (1989) mukaan optimaalinen arvo ST_{early} arvolle sinfoniaorkesterilla on -13 dB:stä -11dB:iin. Katkaistussa salissa keskimääräinen ST_{early} arvo oli noin -14.5 dB, mikä osoittaa, että impulssivasteen varhaisen osan energia olisi ollut liian vähäinen. ST_{late} ja ST_{total} olivat melko samanlaisia kaikilla järjestelmillä ja jopa järjestelmien ollessa poissa päältä. Ainoastaan lähdepisteessä S1 havaittiin eroja järjestelmän ollessa päällä ja poissa päältä. Tämä viittaa siihen, että järjestelmämikrofonien määrä ei ollut riittävä koko lavan kattamiseen. Lokki (2000) on esittänyt yksityiskohtaisemman selvityksen mittauksista.

Yleisesti ottaen mittaustulokset vastaavat subjektiiivisessa kuuntelussa saatua kokemusta prototyypistä. Yleisesti arvioitiin, että LARES ja DIVA-TV kuulostavat melko luonnollisilta. Jotkut jopa esittivät, että ääni on liian selvä, mikä näyttäisi pitävän yhtä C_{80} - mittaustulosten kanssa. Järjestelmän äänenlaadun lopulliseksi arvioimiseksi vaadittaisiin kuitenkin monipuolisia ja pidempiaikaisia käyttö- ja mittauskokemuksia.

Äänen väritymää, luonnollisuutta ja jälkikaiunnan lokalisoitumista ei objektiivisesti erikseen mitattu. Kenelläkään projektiin osallistuneella ei ollut paljon aiempaa kokemusta aktiiviakustisista järjestelmistä, joten perusasioissa oli tarpeeksi hallitsemista ja tämä sinänsä laaja ja vaativa aihe jätettiin myöhempien tutkimusten huoleksi.

Nielsen (1996) on esittänyt menetelmän aktiiviakustisten järjestelmien väritymän objektiiviseen arviointiin. Nielsenin esittämät modulaatiosiirtofunktiot (modulation transfer function, MTF) sopivat aikavarianttien järjestelmien analysointiin. Mutta kuten Nielsen itse tähdentää, käytettäessä lähteenä musiikkisignaalia on kaiuntaisen äänen erottaminen lähdesignaalista ongelma. Meynial (1999) on esittänyt vähemmän rajoittuneen menetelmän väritymän analysoimiseksi.

7.4 Pohdintoja

Kaikulaitteiden tasot säädettiin sopivaksi subjektiivisen kuuntelun perusteella. Tällöin aikainvariantti, DIVA-TI algoritmi toimi hyvin lähellä kiertorajaa ja selvää väritymää havaittiin. Aikainvariantti algoritmi todettiin tarkoitukseen soveltumattomaksi ja aikavarianssi saatettiin todeta välttämättömäksi. DIVA-TV algoritmilla samoin kuin LARES:lla vahvistusta saatiin riittävästi, eikä väritymää havaittu.

Koska varhaiset heijastukset saatiin suoraan huoneen pinnoista, oli DIVA-TV:n impulssivasteesta varhaiset heijastukset eliminoitu, jolloin vaste saatiin noin 50ms viivästyneenä. Voitettu viive voidaan käyttää algoritmin heijastustiheyden kasvattamiseen, jolloin lähdöstä saadaan erittäin diffuusia jälkikaiuntaa. Tätä ei prototyypissä toteutettu. Viiveen vaikutus havaittiin luonnollisemman kuuloisena kaiuntana vertailtaessa LARES:iin, jossa viivettä ei (algoritmi suljettu) ollut mahdollista asettaa. Muita omalla kaiunta-algoritmilla saavutettuja etuja verrattuna LARES:iin:

1. Algoritmin lähdekoodi on avoin, joten parannuksia ja parametrisäätöjä päästään tekemään helposti.
2. Ilman varhaisia heijastuksia kahden vierekkäisen, samaa signaalia toistavan kaiuttimen kampasuodattumisen vaara on pieni. Järjestelmän lähdöt voidaan ottaa suoraan MFDN-verkon dekorreloiduista ulostuloista, jolloin vierekkäisille kaiuttimille saadaan keskenään kaksi hyvin vähän keskenään korreloivaa diffuusia jälkikaiuntasignaalia.
3. Samaan kaiuntaisuuteen tarvittava GBI voi olla matalampi kuin LARES:ssa, jolla tuotetaan myös varhaisia heijastuksia, joten aikavarianssin modulaatioindeksi voi myös olla pienempi ja modulaatiosta aiheutuvia vääristymiä ilmenee vähemmän.
4. Kaikualgoritmin FIR-toteutus on periaatteessa mahdollinen. FIR-toteutusten (nykyisin pieni) viive ei haittaa, koska kaiuntaa tarvitsee tuottaa vasta varhaisen heijastuksen jälkeen.
5. Ei kaiuntaisen verhoikäyrän rikkoutumista (broken decay).¹
6. Toteutuskustannuksiltaan paljon halvempi.

Sekä LARES-järjestelmän että prototyypin äänenlaatua testattiin subjektiivisesti. Testitilanne oli vapaamuotoinen ja henkilöt saattoivat liikkua tilassa vapaasti. Tehtiin seuraavia havaintoja:

1. Käytetyllä kaiutintihedellä (kuva 7.1), kuulijan (soittajan) oli syytä olla vähintään 4 m etäisyydellä kaiuttomasta seinästä, jolloin yksittäiset kaiuttimet eivät enää lokalisoituneet.

1. Kun kaikualgoritmistä jätetään suora ääni sekä varhaiset heijastukset kokonaan pois ja keskitytään tuottamaan pelkkää jälkikaiuntaa, säilyy sarjaan kytketyn huoneen impulssivasteen verhoikäyrän muoto likimain luonnollisena. Järjestelmän impulssivasteen verhoikäyrä säilyy eksponentiaalisena kunhan diffuusin jälkikaiunnan verhoikäyrä on säädetty sopivaksi suhteessa varhaisiin heijastuksiin (kts. Kuttruff, 1991:131).

2. Yksi mikrofoni suoraan kapellimestarin yläpuolelle asennettuna ei ehkä riitä koko tilan kattavaan äänittämiseen. Kaksi tai neljä lisämikrofonia on luultavasti tarpeen. Teorian mukaan kaiuntasäteen ulkopuolella olevien lähteiden pitäisi olla mikrofoniin kannalta ekvivalenttisia etäisyydestä riippumatta, käytäntö ei täysin tukenut tätä näkemystä. Huoneen leveys vaikeutti koko tilan kattamista kahdella mikrofonilla.
3. Studio vastasi soinniltaan keskikokoista konserttisalia ja järjestelmä paransi eri puolille tilaa sijoittuneiden soittajien keskinäistä kuuluvuutta.
4. Sekä LARES että prototyyppi arvioitiin äänenlaadultaan kelvollisiksi, eikä modulaatiovääristymää havaittu. DIVA-TV kaiunta-algoritmia pidettiin äänenlaadultaan hieman selvempänä kuin LARES:ia. Tämä saattoi johtua LARES:in suuremmista modulaatioindekseistä, mikä takaa toisaalta paremman turvan takaisinkytketymiselle. Ongelma vain on, ettei LARES:in parametreja pääse säätämään avoimesti.
5. Sekä LARES:lla että DIVA-TV algoritmilla ei ilmennyt ongelmia akustisen takaisinkytkennän kanssa. LARES:in toiminta-alue oli kaukana alle GBI:n eikä minkäänlaista väritystä havaittu. DIVA-TV:n toiminta-alue sitävastoin oli lähempänä GBI:tä, jolloin kysymys värityksen havaitsemisesta ei ollut täysin kiistaton. DIVA-TV:n modulaatioindeksiä on mahdollista kasvattaa, mutta säätöihin ei kajottu testauksen aikana. Myöskään erilaisia modulaatio-
taajuuksia ei testattu, vaan luotettiin Svenssonin (1995) esittämään 3 Hz optimiarvoon. Luonnollisen akustiikan tuottamiseksi DIVA-TV:n GBI arvioitiin riittäväksi, eikä väritystä havaittu.
6. Yleisradion M2-studion äänenlaatu arvioitiin hyväksi, äänikenttä koettiin erittäin diffuusiksi ennen kaiuttoman seinän pystyttämistä. Käytössä LARES sai arvostelua siitä, että sen kaiku-algoritmissa olivat mukana myös varhaiset heijastukset ja salin vaste vaikutti siinä heräävän luonnottoman aikaisiin. Prototyypin algoritmissa oli ensimmäisiä heijastuksia viivästetty noin 50 ms. Tämä yksinkertainen idea sai kiitosta.
7. Soittajalle akustiikan subjektiivisesti koettu ”kuivuus” saattaa olla ratkaiseva ongelma. Tämä riippuu paljolti soittimesta. Havaittiin, että esimerkiksi soolopianistille ei ollut suurtakaan merkitystä, oliko järjestelmä päällä vai pois päältä. Pianon kaikupohjan sointi ja kaiuntaisuus peitti huoneessa muodostuvaa kaiuntaisuutta. Täytyy kuitenkin muistaa, että YLE:n studio ei ollut akustisesti täysin kuiva tila. Oletettuja aikavarianssista johtuvia ongelmia, johtuen pianon jatkuvasti värähtelevästä rakenteesta, ei havaittu.
8. Tilantuntuun (spaciousness) katsomossa vaikuttaa eniten 2ms - 80ms esiintyvistä varhaisista heijastuksista muodostuva lateraalinen kokonaisenergia. Tilantuntua on tutkittu lähinnä katsomossa, ei lavalla. Studiotalasta on vaikea arvioida kuinka hyvin se tilantunnun puolesta vastaisi jonkin konserttisalin lavaolosuhteita. Tätä kysymystä päästään tutkimaan vasta kun rakennetaan tietyn salin lavan identtinen kopio.
9. Pienestä tilasta huolimatta kohtuuttoman suurta kokonaisäänekkyyttä ei havaittu. Toisaalta prototyyppiä ei päästy testaamaan sinfonia-orkesterilla (johtuen muusikoiden huonosta tavoitettavuudesta kesäloma-/esiintymiskautena). Koska suoraa ääntä ei vahvistettu ja yksi seinä oli täysin vaimennettu,

on oletettavaa, että kokonaisäänekkyyys on enintään samaa luokkaa kuin studiassa normaalisti.

7.5 Yhteenveto

Prototyypin perusteella katkaistun salin konsepti on käytännössä toimiva ja kustannuksiltaan mahdollinen orkesteriharjoitussaliratkaisu. Hankintahinnaltaan kallis LARES voidaan korvata omalla algoritmilla, jolle riittää tavallisen PC-tietokoneen laskentateho.

Järjestelmäprototyypin pystyttäminen YLE:lle mahdollistui kesälomista johtuvan käyttötaun takia. Prototyypin pystyttäminen äänitysstudioon ilmensi käyttömahdollisuudet selvästi. Perinteisen orkesteriharjoittelun lisäksi tällainen tila tarjoaisi hyvät olosuhteet äänitysten tekemiseen, sekä säveltäjille ja orkesterinjohtajille loistavan musiikillisen koelaboratorion. Myös huone- ja saliakustiikantutkimukseen sali tarjoaisi mahdollisuuden. Aktiiviakustiikalla varustetun salin saattaa myös kuvitella toimivaksi elektro-akustisen musiikin, pienimuotoisten tanssiesitysten, musiikkiteatterin ja avantgarde-taideperformanssien esitystilana pienelle yleisölle.

Orkesteriharjoitussalissa aktiiviakustiikan rooli on ennen kaikkea taata luonnollisen kuuloinen akustiikka yhtäaikaaisesti kohtalaisilla äänenpainetasoilla. Äänen kaiuntaisuutta voidaan lisätä lisäämättä kokonaisäänekkyyttä: tämä on aktiiviakustiikan tärkein ominaisuus pienessä tilassa. Tärkeää on myös ristikuuluvuus, joka konserttisalin lavan muotoisessa harjoitushuoneessa ei kenties ole tyydyttävä ilman aktiiviakustiikka (tätä ei kuitenkaan päästy tyydyttävästi testaamaan). Jälkikaiun laatu korostuu yksittäisten soittajien soitossa, sooloissa ja dynaamisesti vaihtelevissa sekä hiljaisissa osuuksissa.

8 Yhteenveto ja päätelmät

Tässä työssä on pyritty kokoamaan aktiiviakustisiin järjestelmiin ja saliakustiikkaan liittyvää kirjallisuutta ja luomaan orkesteriharjoitussalin tarpeisiin sopiva teoreettinen ja tiedollinen perusta. Toiseksi on pyritty kehittämään orkesteriharjoitussalin prototyyppi. Ajateltuna kohteena on ollut Helsinkiin rakennettava uusi musiikkitalo.

Prototyyppiä kutsutaan katkaistun salin konseptiksi. Siinä konserttisalin katsomon akustinen vaikutus on korvattu lavan eteen pystytetyllä kaiuttomalla seinällä ja aktiiviakustisella järjestelmällä. Näin impulssivasteen varhainen osuus, suora ääni ja varhaiset heijastukset ovat konserttisalin kanssa identtiset. Tämä merkitsee sitä, että ainoastaan heijastukset, jotka saapuvat konserttisalin katsomosta lavalle luodaan keinoitekoisesti. Kaiuton seinä pitää myös harjoitussalin äänipainetasot kohtuullisina.

Katkaistun salin prototyyppi asennettiin Yleisradion suureen äänitysstudioon (20 x 13 x 7 m). Yksi seinä (20 x 7 m) verhottiin raskailla teatteriverhoilla, jolloin se oli melko kaiuton 200 Hz taajuudesta ylöspäin. Prototyyppiä arvioitiin sekä mittausten että muusikoiden lausuntojen perusteella.

Prototyypillä pystyttiin varmentamaan tarvittavien mikrofoniin ja kaiuttimien määrät ja paikat. Samoin aikavarianssin käyttö järjestelmän akustisen takaisinkykeytymisen rajoittamisessa osoittautui välttämättömäksi. Kaiken kaikkiaan prototyyppi osoittautui toimivaksi, esimerkiksi Sibelius-Akatemian rehtori Rajamaan johtama vierailijaryhmä suhtautui järjestelmään kiinnostuksella ja arvioi sitä positiivisin lausunnoin. Järjestelmä helpotti yhteissoittoa, tuki yksittäistä soittajaa ja osoittautui monin tavoin hyödylliseksi. Varsinaisiin heikkouksiin ei vielä paljonkaan ehditty saada tuntumaa.

Suoritetun tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että aktiiviakustiikan avulla on edullisesti toteutettavissa selvästi toimivampi ja monipuolisempi harjoitusympäristö kuin samankokoisella perinteisesti akustoidulla harjoitustilalla.

8.1 Jatkotutkimuksen kohteita

Lukuisia yksityiskohtaista tutkimusta vaativia kysymyksiä jäi tämän tutkimuksen piirissä selvittämättä. Jatkossa tulisi pyrkiä tekemään tutkimusta ainakin seuraavilla osaluilla:

1. FIR-pohjaiset kaiunta-algoritmitoteutukset.
2. Kaiuttoman seinän materiaalien sekä seinän rakenteen perusteellinen tutkimus.
3. 150-300 ms aikajaksolla tulevien voimakkaiden yksittäisten heijastusten merkitys akustiseen äänenlaatuun. Missä suhteessa nämä heijastukset ovat

hyvälle akustiikalle merkityksellisiä.

4. Kuinka paljon 100 - 300 ms aikavälille sattuvia heijastuksia saadaan salista, kattorakenteista sekä takaseinästä, ja kuinka paljon nämä vaikuttavat lavalla havaittuun akustiikkaan.
5. Tulisiko 100 - 300 ms aikavälille sattuvia (muita kuin lateraalisia) heijastuksia tuottaa korkealle sijoitetuilla kaiuttimilla.
6. Vaikka GBI (gain before instability) on osoittautunut hyödylliseksi määritelmäksi, olisi LTV-järjestelmiä pyrittävä jatkossa arvioimaan sen mukaan, minkälainen vahvistus saavutetaan ennen subjektiivisesti kuultavia ilmiöitä. Toisaalta yleisesti on tiedossa, että ilman aikavariantteja toteutuksia väritymä havaitaan jo 12 dB ennen GBI:tä. Tässä 12 dB:n marginaalissa saavutettavia parannuksia tulisi kyetä arvioimaan.

“Rajattomuus taas, ja mikä tahansa rajaton määrä ovat omiaan tekemään ihmisestä rajattoman taitamattoman tutkimaan asiaa kuin asiaa.” Platon: Filebos

L ä h d e v i i t t e e t

- Ahnert, W., Reichardt, W. 1981. Grundlagen der Beschallungstechnik, S. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- Alonso, M., Finn, E. 1983. Fundamental University Physics. 2nd edition. Volume II Fields and Waves. Addison-Wesley publishing company.
- Backman, J. 1998. Akustiikan perusteet II. Opintomoniste. Otapaino.
- Barron, M. 1971. The subjective effects of first reflections in concert halls, J. Sound Vib., 15, 4.
- Barron, M. 1993. *Auditorium acoustics and architectural design*. Lontoo, E & FN Spon.
- Berkhout, A.J., Vries, D. de ja Boone, M.M. 1980. A new method to acquire impulse responses in concert halls. J. Acoust. Soc. Am. vol. 65, s. 411-417.
- Berkhout, A.J. 1988. A holographic approach to acoustic control. J. Acoust. Soc. Am. vol. 36, s. 9777-9795.
- Berkhout, A.J., Vries, D. de, Hemingway, J.R. ja Griffien, A. 1988. Experience with the Acoustical Control System ACS. Proc. AES 6th Int. Conference on Sound Reinforcement, Nashville, USA.
- Berkhout, A.J., Vries, D. de ja Vogel, P. 1992. Use of wave field synthesis for natural reinforced sound. Prepr. 3299 92nd AES convention, Wien, Itävalta.
- Berkhout, A.J., Vries, D. de ja Vogel, P. 1992. Wave front synthesis: a new direction in electroacoustics. Prepr. 3379 93th AES convention, San Francisco, USA.
- Berkhout, A.J., Vries, D. de ja Vogel, P. 1993. Acoustic control by wavefield synthesis. J. Acoust. Soc. Am., 93(5), s. 2764-2776.
- Berkhout, A.J., Start, E.W., Roovers, M.S. ja de Vries, D. 1997. In situ measurements on a wave field synthesis system for sound enhancement. Prepr. 4454 102nd AES Convention, Munchen, Saksa.
- Berkhout, A.J. 1998. A wavefield approach to multichannel sound. Prepr. 4714 104th AES Convention, Amsterdam, Hollanti.
- Berkhout, A.J., Vries, D. de. 1998. Simulation of impulse responses in enclosed spaces. Prepr. 4714 104th AES Convention, Amsterdam, Hollanti.
- Boone, M.M. Verheijen, E.N.G. ja Tol, P.F. van. 1995. Spatial sound field reproduction by wavefield synthesis. J. Audio Eng. Soc., 43(12), s. 1003-1012.

- Boone, M. M., Verheijen, E.N.G. ja Tol, P.F. van. 1998. Sound reproduction applications with wave field synthesis. 104th AES Convention, Amsterdam, Hollanti.
- Bradley, J.S. 1975a. The in-channel response of an electroacoustic feedback channel. *Acustica* vol. 32. s. 1-12.
- Bradley, J.S. 1975b. The response of an electroacoustic feedback channel with a remote source or a remote receiver. *Acustica* vol. 32, s.13-22.
- Bruijn, W.P.J. de, Piccolo, T. ja Boone, M. M. 1998. Sound recording techniques for wave field synthesis and other multichannel sound systems. 104th AES Convention, Amsterdam, Hollanti.
- Fasbender, J. 1984. Zur kontrolle der akustischen ruckkopplung in beshallungsanlagen. Ph.D. thesis, Technischen Hochschule Aachen.
- Gade, A.C. 1989a. Acoustical survey of eleven European concert halls – a basis for discussion of halls in Denmark. Tanskan Teknillinen Korkeakoulu, Raportti 44.
- Gade, A.C. 1989b. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: Methods and Laboratory Experiments. *Acustica* vol. 69, s.193-203.
- Gade, A.C. 1989c. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: field Experiments and Synthesis of Results. *Acustica* vol. 69, s. 249-262.
- Gardner, W. G. 1992. The virtual acoustic room. Master's thesis, MIT Media Lab. <http://kdm.www.media.mit.edu/~billg/projects.html#var>
- Gardner, W. G. 1998. Reverberation algorithms. In Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics, ed. M. Kahrs, K. Brandenburg, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Goertz, A. 1995. An adaptive subtraction filter for feedback cancellation in public address sound system. Proc.of the 15th International Congress on Acoustics, vol. IV, s. 69-72, Trondheim, Norja.
- Goodwin, M., Elko, G. 1992. Beam dithering: Acoustic feedback controll using a modulated-directivity loudspeaker array. *J. Audio Eng. Soc.* vol. 40, s. 1064-1076.
- Griesinger, D. 1991. Improving room acoustics through time-variant synthetic reverberation. Esitetty 90 Conv. AES, Preprint 3014, *J. Audio Eng. Soc.* vol. 39, s.380.
- Griesinger, D. 1995a. Design and performance of multichannel time variant reverberation enhancement system. Proc. of Active 95, Newport Beach, USA, s. 1203-1212.
- Griesinger, D. 1995b. Further developments in the design, implementation, and performance of time variant acoustic enhancement system. Lexicon manual.
- Griesinger, D. 1995c. How loud is my reverberation. 98st Conv. AES, Preprint 3943 (B3), Pariisi, Ranska.

- Griesinger, D. 1995d. Further investigation into the loudness of running reverberation. Proceedings of the Institute of Acoustics (UK) conference.
- Guelke, R. W., Broadhurst, A.D. 1971. Reverberation time control by direct feedback. *Acoustica* Vol. 24, s. 33.
- Halme, S. J. 1996. Televiestintäjärjestelmät. Opintomoniste, TKK.
- Hiipakka, J. 2000. Efficient and parametric time variant reverberator for room acoustics modeling. Suullinen keskustelu.
- Häggman, S-G. 1995. Signaalit ja järjestelmät. Opintomoniste, TKK.
- Jacobsen, F. 1979. The diffuse sound field. *Raportti 27*, akustiikan laboratorio, Tanskan Teknillinen Korkeakoulu.
- Jot, J. M., Chaigne, A. 1991. Digital delay network for designing artificial reverberators. Preprint 3030 (E-2). 90th AES Convention, Pariisi, Ranska.
- Jot, J. M. 1992. Design and implementation of a sound spatializer based on physical and perceptual models. PhD thesis, Telecom Paris.
- Järvinen, A. 1996. Aktiiviakustiikka - saliakustiikan aktiivinen hallinta. *Aktiivinen äänenhallinta*. TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 40, Espoo, Suomi, s. 147.
- Karjalainen, M. 1999. Kommunikaatioakustiikka. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Raportti 51.
- Kleiner, M., Svensson, P. 1995. Review of active system in room acoustics and electro-acoustics. *Proc. of Active 95*, Newport Beach, USA, s.39-54.
- Kuhl, W. 1968. Notwendige eigenfrequenzdichte zur vermeidung der klangfärbung von nachhall. Proc. of the 6th International Congress on Acoustics, Tokio, Japani, s. E-69-72.
- Kuttruff, H. 1991. Room acoustics, (3.ed.) Elsevier Applied Science, Lontoo / New York.
- Lahti, T. 1995. Akustinen mittaustekniikka. TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 38, Espoo, Suomi.
- LCS. 2000. <http://www.lcsaudio.com/home.html>.
- Lokki, T. 1997. Virtuaaliääniympäristön luominen konserttisalin laskennalliseen malliin. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Sähkö ja tietoliikennetekniikan osasto.
- Lokki, T. 2000. Results of the room acoustical measurements of TAKU/Ssali prototype. (TAKU projektiraportti).
- Meyer, J. 1994. Understanding the orchestral stage environment from the musician's, singer's and conductor's point of view. J of WC Sabine Centennial Symposium, Massachusetts, USA, p. 93-96.

- Meynial, X., Vuichard, O. 1999. Objective measure of sound coloration in rooms. *Acustica*, Vol. 85 s. 101-107.
- Miracles, fairy tales. Acoustic Control System B.V. [online, referenced 15.10.1999]. Available in HTML format at <<http://www.acs-bv.nl/Main1/Download/dowfr.html>>.
- Mishin, L. N. 1958. A method for increasing the stability of sound amplification systems. *Sov. Phys. Acoust.* 4, s. 64-71.
- Mourjopoulos, J. 1994. Digital equalization of room acoustics. *JAES*, Vol. 42, No.11.
- Nakashini, S. Sakagami, K., Daido, M. ja Morimoto, M. 1999. Acoustic properties of a cavity backed stage floor: A theoretical model. *Appl. Acoust.* 57, s. 17-24.
- Nelson, P.A. Elliot S.J. 1993. *Active Control of Sound*. Academic Press.
- Nielsen, J. L. 1996. Control of stability and coloration in electroacoustic systems in room. Dr.ing. Thesis, Dept. of Telecommunications, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norja.
- Nielsen, J. L. Svensson U.P. 1999. Performance of some linear time-varying systems in control of acoustic feedback. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 106(1) july s.240-254.
- Nishinomiya, G. 1968. Improvement of acoustic feedback stability of public address system by warbling. *Proc. of the 6th International Congress of acoustics*, Tokio, Japani, E-93-96.
- Orfanidis, S. J. 1996. *Introduction to signal processing*. Prentice Hall International. Inc.
- Parkin P. H., Morgan K. 1970. "Assisted Resonance" in The Royal Festival Hall, London:1965-1969. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 48, no.5(1), s.1025-1035.
- Peltonen, T. 2000. A multichannel measurement system for room acoustics analysis. Diplomityö, TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio.
- Pesko, F. 1977. Verringerung der akustischen ruckkopplung durch phasenmodulation. *Proc. of the 9th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espanja, s. 764.
- Poletti, M. A. 1993. On controlling the apparent absorption an volume in Assisted Reverberation Systems. *Acustica*, vol. 78, s. 61-73.
- Poletti, M. A. 1994a. Colouration in Assisted Reverberation Systems. *Proc. of the IEEE ICASSP-94*, vol. ii, s. 269-272.
- Poletti, M. A. 1994b. The performance of the new Assisted Reverberation System. *Acta Acustica*, vol. 2, s. 511-524.
- Poletti, M. A. 1995. A unitary reverberator for reduced colouration in assisted reverberation system. *Proc. of the 1995 International Symposium on Active Control of sound and vibration*, Newport Beach, California, s. 1223-1232.

- Poletti, M. A. 1998. The analysis of a general Assisted Reverberation System. *Austica*, vol. 84 s. 766-775.
- Poletti, M. A. 2000. The stability of single and multichannel sound systems. *Acutica*, vol. 86, s. 163-178.
- Rajamaa, L., Tawastjerna, E.T. 1998. Keskustelua musiikkitalosta. <http://www.siba.fi/Musiikkitalo/keskustelu.html>.
- Rayleigh, J.S.W. 1896. *The Theory of Sound*, vol. 2. Macmillan Company, uusintapainos Dover, New York, 1945.
- Reijnen, A.J., Vries, D.de ja Schonewille, M.A. 1994. The wave field synthesis concept applied to generation of reflections and reverberation, publ.122 Ned. Akoestisch Genootschap.
- Reijnen, A.J., Sonke, J-J., ja Vries, D.de. 1995. New developments in electro-acoustic reverberation technology. Prepr. 3978 98th AES convention, Pariisi, Ranska.
- Riederer, K. 1996. Transfer function measurements in audio. *Digitaaliaudion signaalinkäsittelymenetelmiä*. TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 41, Espoo, Suomi, s. 181.
- Rossing, T. D. 1990. *The Science of Sound*, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company.
- Schoenle, M., Flienge, N. ja Zoelzer, U. 1993. Parametric approximation of room impulse responses by multirate systems, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) Proceedings, Minneapolis, USA, s. I-153-I-156.
- Schröder, M.R. 1959. Improvement of acoustic feedback stability in public address systems. Proc. of the 3rd International Congress on Acoustics, s. 771-775, Stuttgart, Saksa.
- Schröder, M.R. Kuttruff, K.H. 1962a. On frequency response curves in rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 34, s. 76-80.
- Schröder, M.R. 1962b. Frequency correlation function of frequency responses in rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 34, s.1819-1823.
- Schröder, M.R. 1962c. Natural sounding artificial reverberation, *J. Aud. Eng. Soc.* vol. 10(3), s. 219-223.
- Schröder, M.R. 1964. Improvement of acoustic feedback stability by frequency shifting. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 36, s. 1718-1724.
- Schröder, M.R. 1981. Modulation transfer functions: definitions and measurement. *Acustica*, vol. 49, s. 179 - 182.
- Stautner, J. and Puckette, M. 1982. Designing multichannel reverberators. *Computer Music Journal*, 6(1). s. 52-65.

- Svensson, P., Kleiner, M. ja Dalenbäck, B-I. 1992. A study of periodically time-variant electroacoustic reverberation enhancement and public address systems. Preprint 3378 93th AES convention, San Francisco, USA.
- Svensson, P. U. 1994. On reverberation enhancement in auditoria. Ph.D. thesis, Department of Appl. Acoustics, Chalmers University of Technology, Gothenborg, Ruotsi.
- Svensson, P. U. 1995. The use of time-varying filters for acoustic feedback control. Proc. of Active 95, Newport Beach, USA, s. 941-950.
- Svensson, P. U. 2000. Enhanced reverberation in concert halls. Seminar on Concert Hall Acoustics. TKK.
- Start, E.W., Valstar, V.G. ja Vries, D. de. 1995. Application of spacial bandwidth reduction in wave field synthesis, prepr.3972 98th AES convention, Pariisi, Ranska.
- Takahashi, D. 1997. Seat dip effect: the phenomena and the mechanism. J. Acoust. Soc. Am. vol. 102 (3), s. 1326-1334.
- Tapio, E. 1965. Frekvensforflytning i lydforsterkningsanlegg. Master's thesis. Dept. of Telecommunications, Norwegian institute of Technology.
- Tilse, U. 1975. Messung der akustischen ruckkopplung mit phasenmodulation. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin.
- Toole, F.E, Olive, S.E. 1988. The modification of timbre by resonances: perception and measurement. J. Aud. Eng. Soc. vol. 36, s. 122-141.
- Uusitupa, T. 1998. Kaiunta-algoritmit. Signaalinkäsittely audiotekniikassa, akustiikassa ja musiikissa. Äänenkäsittelyn seminaari. TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 50, Espoo, Suomi, s. 277.
- Veneklasen, P. S. 1974. Design considerations from the viewpoint of the professional consultant. Auditorium Acoustics, Proc, ICA-74 Satellite Symposium, Edinburgh, Hollanti.
- Wenger. 1996. Acoustical virtual environment. United States Patent no. 5.525.765, heinäkuu 11.
- Vogel, P. Vries, D. de. 1994. Electroacoustic system response in a hall : a convolution of impulse sequences. J. Aud. Eng. Soc. vol. 42, s. 684-690.
- Vries, D. de. 2000. Active reverberation systems for auditoria, workshop, 108nd AES Convention, Pariisi, Ranska.
- Väänänen, R., Välimäki, V. ja Huopaniemi, J. 1997. Efficient and parametric reverberator for room acoustics modeling. In Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC'97), Thessaloniki, Kreikka, s. 200-203.
- Zacharov, N. 1998. Strategies for loudspeaker and room equalisation. *Signaalinkäsittely audiotekniikassa, akustiikassa ja musiikissa*. Äänenkäsittelyn seminaari.

TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 50, Espoo, Suomi, s. 235.