



KONSERTTIÄÄNI

Elektroakustiikan haasteet nykyaikaisessa äänentoistossa

Arttu Pulkkinen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2009
Viestinnän koulutusohjelma
Digitaalisen äänen ja kaupallisen
musiikin suuntautumisvaihtoehto
Pirkanmaan ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Pirkanmaan ammattikorkeakoulu
Viestinnän koulutusohjelma
Digitaalisen äänen ja kaupallisen musiikin suuntautumisvaihtoehto

PULKKINEN ARTTU:

Konserttiääni: Elektroakustiikan haasteet nykyaikaisessa äänentoistossa

Opinnäytetyö 88 s.
Huhtikuu 2009

Opinnäytetyöni on laadullinen työelämään kohdistuva tutkimus äänentoistoon liittyvistä haasteista ja ratkaisuista. Tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa kokonaisvaltaisempi ymmärtämys, itse tekijälle ja myös lukijalle niistä ilmiöistä joita konserttiäänentoistoon sisältyy. Työn tehtävänä on opettaa ja selvittää elektroakustiikan haasteita ja etsiä niihin ratkaisumalleja.

Raportti alkaa hyvinkin perusteellisista lähtökohdista, kuten äänen fysiikasta ja etenee niiden pohjalta rakennettuihin teorioihin ja käytännön esimerkkeihin. Tutkimuksen raportin teoreettiset lähtökohdat asetettiin niin että ymmärrettävyys säilyisi asiaan perehtymättömälläkin lukijalla, mutta aiheisiin pyrittäisiin pureutumaan riittävän syvällisesti pystyen perustelemaan ja esittämään todellisia käytännön ratkaisuja.

Työ keskittyy äänentoiston signaalitien loppuosaan eli matkaan miksauspöydästä kuulijalle. Tavoitteenani ei ollut käsitellä mikrofoneja tai miksauspöydän toimintaa vaan äänentoistojärjestelmiä, niiden suunnittelua ja toteutusta. Pyrin sisällyttämään työhön otteita käytännön elämästä ja nykyaikaisista järjestelmistä. Tämä palvelee mielestäni ammattikorkeakoulun opinnäytteen tavoitteita.

Työn valmistuttua olivat käsissäni tulokset. Kirjallinen raportti onnistui mielestäni vastaamaan sille asetettuihin vaatimuksiin. Työssä olisi voinut käsitellä vielä vaikka kuinka monta eri osa-aluetta ja muuttujaa, mutta tähän en lähtenyt koska sivumäärä olisi paisunut mielestäni liian suureksi suhteessa työlle asetettuihin lähtövaatimuksiin. Halusin myös säilyttää johdonmukaisen rakenteen läpi työn.

Mielestäni sain opinnäytetyöhöni johdonmukaisen rakenteen. Suurin haaste työtä rakentaessa oli oikean teoriasyvyyden löytäminen. Yhtenäisen linjan ylläpitämiseksi oli tehtävä päätöksiä karsinnan suhteen, jolloin joidenkin teorioiden tulkinta saattaa tuottaa ongelmia alaan perehtymättömälle lukijalle. Luovutan kuitenkin lopullisen arvioinnin lukijan käsiin joka sisäistämällä ja ymmärtämällä tekstin voi ainoastaan tuottaa minulle onnistumisen.

ABSTRACT

Pirkanmaa University of Applied Sciences
PIRAMK, Virrat
Degree Programme in Media
Digital Sound and Commercial Music

PULKKINEN ARTTU: Sound Reinforcement: Electro Acoustical Challenges in a Modern Sound System

Bachelor's Thesis 88 pages
April 2009

This thesis is a qualitative working-life related study on sound reinforcement applications. The objective of the study was to yield, both the writer and the reader, better understanding of the phenomena involved in sound systems. Another goal was to figure out the challenges that hinder a good concert sound and to find solutions to face these situations.

The thesis begins with the basics of sound physics and goes on to the theories built upon, and finally presents some practical applications and example projects. The theoretical starting point of the thesis was to provide information that is understandable even to a person that is not familiar with the subject. However, the theoretical goals have to be set deep enough to provide well explainable practical solutions to those who work in the field of sound engineering.

The thesis focuses on the last part of the transmission chain in sound reinforcement, which means the point when the signal leaves the output terminals of the mixing consoles and travels all the way to the eardrums of the audience. The thesis contains information on and theories and examples of sound systems, sound system design and calibration. Practical examples are also strongly present, which, in my opinion, serves well the goals of a polytechnic thesis.

The results are well presented on the following pages. I think that I reached my theoretical goals, although I had to whittle down some areas that would have been interesting, but that is only because this is a thesis, not a book. My goal was to maintain a clear and logical structure through the whole study and I think I did well.

The hardest challenge was to find and maintain the right theoretical depth. There is much more that is not presented in this thesis but this is only because I wanted everyone to have a possibility to understand the subject and the theories. The final judgement of the success of this thesis is not in my hands, because only the reader that understands and appreciates my text can give me the satisfaction of success.

Keywords: Sound reinforcement, electro acoustics, sound system

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO.....	6
2 ÄÄNEN OLEMUS.....	7
2.1 Aallonpituus.....	8
2.2 Vaihe.....	9
3 ÄÄNI TILASSA.....	14
3.1 Ääni ulkoilmassa.....	14
3.1.1 Käänteinen neliölaki.....	14
3.1.2 Ilmankosteuden vaikutus.....	15
3.1.3 Tuulenvaikutus.....	16
3.1.4 Lämpötilakerrostumat.....	17
3.2 Ääni sisätiloissa.....	18
3.2.1 Heijastuma ja vaimentuma.....	18
3.2.2 Seisova-aalto ja huonemoodit.....	20
3.2.3 Ensiheijaste.....	21
3.2.4 Kaiunta.....	23
3.2.5 Kriittinen piste.....	24
4 DESIBELIT JA ÄÄNENPAININE.....	26
4.1 Desibeli.....	26
4.2 Yleisimmät asteikot.....	28
4.2.1 dBm.....	28
4.2.2 dBu & dBV.....	28
4.2.3 dBFS.....	29
4.2.4 dB SPL.....	30
4.3 Muotokerroin.....	31
4.4 Äänenpaine -ilmiö.....	31
4.4.1 Suunnitelmalliset haasteet.....	32
4.5 Seuranta.....	33
4.5.1 Äänenpainemittari.....	33
4.5.2 Ekvivalentti.....	35
4.6 Suosituksia äänenpaineisiin.....	37
5 KAIUTTIMIT.....	39
5.1 Elektromagneettinen muunnin.....	40
5.2 Kaiutintyyppit.....	41
5.2.1 Kartionkaiutin.....	41
5.2.2 Kotelonmerkitys.....	42
5.2.3 Kompressio-ohjain.....	44
5.2.4 Torvikuormitus.....	45
5.3 Jakosuotimet ja prosessointi.....	47
5.4 Kaiuttimen parametreja.....	49
5.4.1 Taajuusvaste.....	49
5.4.2 Tehonkesto.....	50
5.4.3 Herkkyys ja hyötysuhde.....	51
5.4.4 Impedanssi.....	53
5.4.5 Suuntaavuus.....	54
6 SIGNAALITIEN HAASTEET.....	55
6.1 Yliohjausvara ja säröytyminen.....	55

	5
6.2 Dynaaminen skaala	56
7 JÄRJESTELMÄ	58
7.1 Määrittely	58
7.2 Järjestelmänosat ja niiden tehtävät.....	61
7.2.1 Pääjärjestelmä.....	62
7.2.2 Täydentävät järjestelmät	62
7.2.2 Bassokaiutinjärjestelmät.....	63
7.3 Esimerkkijärjestelmiä	66
7.3.1 Sauna open air 2008, lava 2.....	66
7.3.2 Kauppakeskus Elon avajaiset 1.4.2009.....	68
8 JÄRJESTELMÄN KALIBROINTI	72
8.1 Mittamikrofonin sijoittelusta	73
8.2 Taajuusvaste ja ekvalisointi	75
8.3 Keskinäinen tasonsäätö.....	80
8.4 Impulssivaste ja viiveet	82
8.5 Vaihevaste ja viiveet	83
8.6 Kuuntelu.....	85
9 OPINNÄYTETYÖN KAUPALLINEN HYÖDYNTÄMINEN.....	86
10 POHDINTA	87
LÄHTEET	88

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on toimia laadullisena käytännöntyön ratkaisuihin johtavana tutkimuksena. Pyrkimyksenä työssä on käsitellä äänentoistoa näkökulmista joita nykyaikainen maailma alalle muodostaa. Työn tavoitteina on kartoittaa äänentoiston kohtaamia haasteita eri osa-alueilla ja pyrkiä tuottamaan vastauksia ja ratkaisuja joilla näihin haasteisiin vastataan.

Työn tavoitteena on myös muodostaa yhteneväinen teoriaan sidottu kokonaisuus äänentoistotyöstä, jota pystyttäisiin hyödyntämään mahdollisesti myös opetustyössä. Tästä johtuen työn teoreettisiin osioihin on pyritty löytämään helposti ymmärrettävä ja sisäistettävä rakenne. Pyrin kuitenkin käsittelemään asioita riittävän syvällisesti saavuttaen käytäntöön soveltuvia ideoita.

Olellaisena tavoitteena työlle on myös asetettu oman ammattitaidon parantaminen ja oppiminen tutkimalla työhön liittyviä ilmiöitä. Tämä antaa tutkimukselle suuntausta eräänlaiseen luulojen poistamiseen jotka mieltäni ovat vaivanneet. Perusidea on tämä: jos jokin vaikuttaa mystiseltä ja maagiselta ilmiöltä, on ainut selitys se, että sinulla ei vain ole riittäviä tietoja ja taitoja kyseisen ilmiön ymmärtämiseksi.

Työ ei sisällä mediaosiota eikä liitteitä vaan on puhdas käytännöntieteellinen tutkimusraportti jossa käsitellään äänenfysiikkaa, elektroakustiikka, eri tilojen ilmiöitä, kaiuttimien ominaisuuksia, järjestelmiensuunnittelua, sekä niiden kalibrointia. Työ käynnistyy äänelle ominaisista fysikaalisista parametreista, jotka ovat ääriolennaisia kaikelle muulle mitä työssä käsitellään.

Tutkimuksen nykyaikaisuutta on pyritty parantamaan harkituilla lähdeteoksilla. Tämän työn tapauksessa se tarkoitti satojen eurojen kirjakauppalaskua. Näin spesifioitua informaatiota alalla on yllättävän vähän tarjolla suomenkielellä. Tämä oli myös omiaan työn tavoitteitani ruokkimaan, koska halusin tuottaa sellaista käyttökelpoista tekstiä jota suomeksi ei alalta vielä ole saatavilla.

2 ÄÄNEN OLEMUS

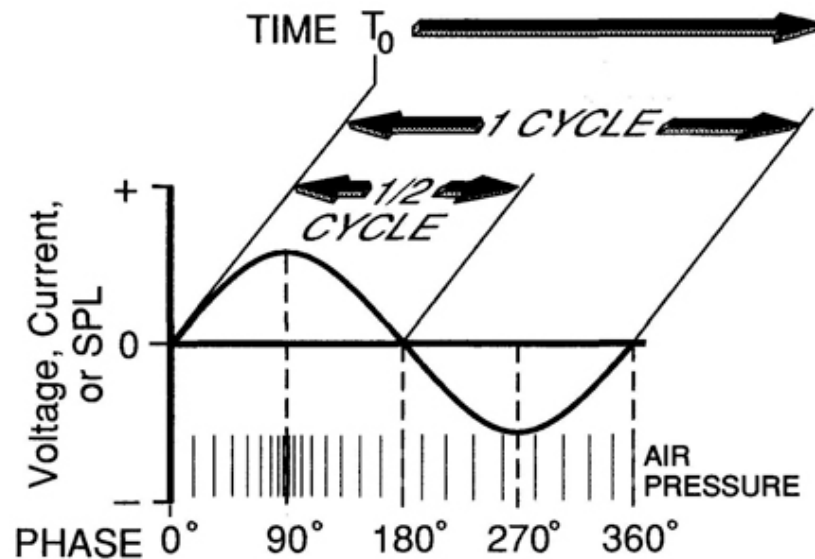
Se ääni, jonka kuulemme, on fyysikaalista kineettistä energiaa jota kutsutaan akustiseksi energiaksi. Akustinen energia taasen koostuu vaihtelevista paineaalloista fyysisessä väliaineessa, useimmiten ilmassa. (Davis ja Jones 1989, 1).

Tämän ilmiön ymmärtämiseen on hyvä käyttää joitakin vertauskuvallisia esimerkkejä. Akustinen energia syntyy samoin periaattein kuin aalto syntyy lampeen, kun jokin laite pyrkii liikuttamaan väliainetta, esimerkiksi kivi vettä. Ääni onkin hyvä mieltää aaltoliikkeenä, jossa aaltoliike alkaa nollapisteestä ja kohoaa ylöspäin ja alaspäin vuorotellen. Tätä kutsutaan vaihekierroksi, jossa aalto tekee 360° syklin. Kiven tai kaiuttimen vaikutuksesta väliaine pyrkii värähtelemään tietyllä nopeudella, joka määrää vaihekierron ajan. Tästä syntyy äänen taajuus eli hertsi -luku.

Väliaineen koostumus ja muut siihen vaikuttavat tekijät kuten lämpötila, ilmanpaine yms. vaikuttavat siihen kuinka pitkän matkan esim. metreissä yhden aaltoliikkeen 360° sykli kestää. Näin syntyy siis aallonpituus. (McCarthy 2007, 5-6).

Jokaisella ääniaallolla on siis tietty hertsiluku ja tämä käytännössä tarkoittaa sitä, kuinka monta kertaa aallon 360° sykli esiintyy sekunnin sisällä. Ilmoittaessa äänen taajuudeksi 20 Hz, tarkoittaa se 20 sykliä/sekunti. (Davis ja Jones 1989, 1-2).

Äänellä on myös voimakkuus, jota voidaan ilmoittaa erilaisilla yksiköillä. Asteikkona käytetään logaritmista desibeliasteikkoa. Akustisesta energiasta puhuttaessa mittayksikkö on dB SPL (sound pressure level). Sähköistä aaltomuotoa tarkasteltaessa mielletään äänenenergia voltteina (V), joita ilmoitetaan erilaisilla mittayksiköillä kuten: dBu (0 dBu = 0,775V), dBV (0 dBV = 1 V) (Laaksonen 2006, 96).



Kuva 1. Siniaallon yksi kokonainen sykli (Davis ja Jones 1989, 2)

2.1 Aallonpituus

Miksi meidän tulisi olla kiinnostuneita aallonpituudesta (McCarthy 2007, 5)? Mikään analysaattori tai mittalaite ei sitä kuitenkaan meille ilmoita. Järjestelmäprosessointilaitteet eivät myöskään käytä sitä parametrina. Vastaus piilee kahden äänen akustisessa summutumisessa. Aallonpituus olisi meille merkityksetön tekijä jos meillä olisi yksi kaiuttimelementti joka toistaisi kaikki kuultavat taajuudet ja se sijaitisi tyystin kaiuttomassa tilassa.

Kuten mainittu, äänennopeuteen vaikuttaa väliaineen luonne ja näin ollen aallonpituus ei ole vakio. Esimerkiksi elektronisesti matkaavan taajuuden aallonpituus on 500 000 kertaa suurempi suhteessa vastaavaan akustisesti kulkevaan taajuuteen (McCarthy 2007, 6). Jotta siis voisimme laskea akustisen äänen aallonpituuden, tulee meidän ensin selvittää äänennopeuteen vaikuttavat tekijät ja näistä laskennallisesti huomattavin on lämpötila joka huomioidaan laskennassa seuraavasti. Aallonpituus 0° lämpötilassa on 331,4 metriä/sekunti johon lisätään lämpötila kerrottuna lämpötilakertoimella ($0,607 \times$ ilman lämpötila) ja näin saadaan todellinen äänennopeus (McCarthy 2007, 6).

Lasketaan esimerkki äänennopeudelle lämpötilassa 22° :

$$331,4 \text{ metriä/sekunti} + 0,607 \times 22 = 344,75 \text{ metriä/sekunti.}$$

Nyt kun meillä on tieto äänennopeudesta voimme laskea aallon pituuden seuraavalla kaavalla:

Aallonpituus = Äänennopeus / Taajuus (Davis ja Jones 1989, 1.)

Lasketaan siis aallon pituus 100 Hz taajuudelle lämpötilassa 22°.

$344,75 \text{ m/s} / 100 \text{ Hz} = 3,4475 \text{ metriä}$.

Tämä on matemaattinen ja tarkka tapa laskea aallonpituuksia, mutta usein keikkatilanteessa sellaiseen ei ole aikaa, joten joitakin nyrkkisääntöjä on hyvä muistaa. Bob McCarthy (2007, 7) esittää kirjassaan mm. seuraavia esimerkkejä: kyynärvarren mitta on n. 1 kHz (34 cm), kädenmitta on n. 500 Hz (68 cm), rockteinin mitta maasta hartiatasolle on n. 250 Hz (136 cm). Hyvänä perusajatuksena on kätevä myös muistaa se että n. 5 ° muutos lämpötilaan aiheuttaa n. 1 %:n muutoksen äänennopeuteen.

Nyt osaamme laskea tietylle äänelle aallonpituuden ottaen huomioon muutokset ilmanlämpötilassa. Pystymme teoreettisesti hahmottamaan äänestä erimittaisia osia jotka esiintyvät aaltomaisena ilmiönä. Olemme käyttäneet laskennassa termiä Hz, joka kertoo kuinka monta kertaa jokin ääniaalto pystyy esiintymään sekunnin sisällä tehden kokonaisuudessaan 360° syklin (Davis ja Jones 1989, 1). Seuraavaksi pohditaan sitä, mikä merkitys tällä syklillä on kahden aallon summautumiseen teoreettisesti.

2.2 Vaihe

Vaihe käsite tulee englanninkielisen sanasta "phase" ja se ilmaisee ääniaallon suhdetta ajallisesti itseensä tiedettäessä kyseisen aallon aikareferenssi eli ajallinen kesto. Vaihe ilmoitetaan astelukuna. Yksi kokonainen siniaallonkierto on yhtä suuri kuin 360°. (Davis ja Jones 1989, 2)

Ääniaallon suhde omaan kiertoaikaansa on olennainen tieto tutkittaessa kahden äänen summautumista ja niiden vaikutusta toisiinsa. Aallonvaihe voi olla mitä vain välillä 0° - 360° ja ylikin, esim. 720°. Ääniaalto tavataan usein esittää

siniaallon muodossa (katso Kuva 1.), joka kuvaa yhtä taajuutta ja joka ei sisällä mitään harmonisisältöä. Tämä on suhteellisen mahdoton ilmiö luonnollisessa ympäristössä, jossa kaikki kuultava ääni on summa useista eriaikaisista/erivaiheisista äänistä ja niiden harmonioista.

Kun kaksi ääntä teoreettisesti summautuvat tismalleen samanaikaisesti eli samassa vaiheessa ($0^\circ + 0^\circ$) ja samalla voimakkuudella on summautumisen lopputuloksena 6 desibelin korotus signaalin voimakkuuteen. Jos kaksi samaa ja yhtä voimakasta ääntä summautuvat 90° vaihe-erolla on tuloksena 3 desibelin korotus signaalin voimakkuuteen. 120° vaihe-erolla summattavat signaalit synnyttävät yhtä voimakkaan loppusignaalin eli vaikutus on $+0$ ja 180° vaihe-ero aiheuttaa taasen molempien aaltojen kumoutumisen. (McCarthy 2007, 9.)

Havainnollistetaan nyt kahden saman siniaallon summautumistilanteita eri vaiheilla:

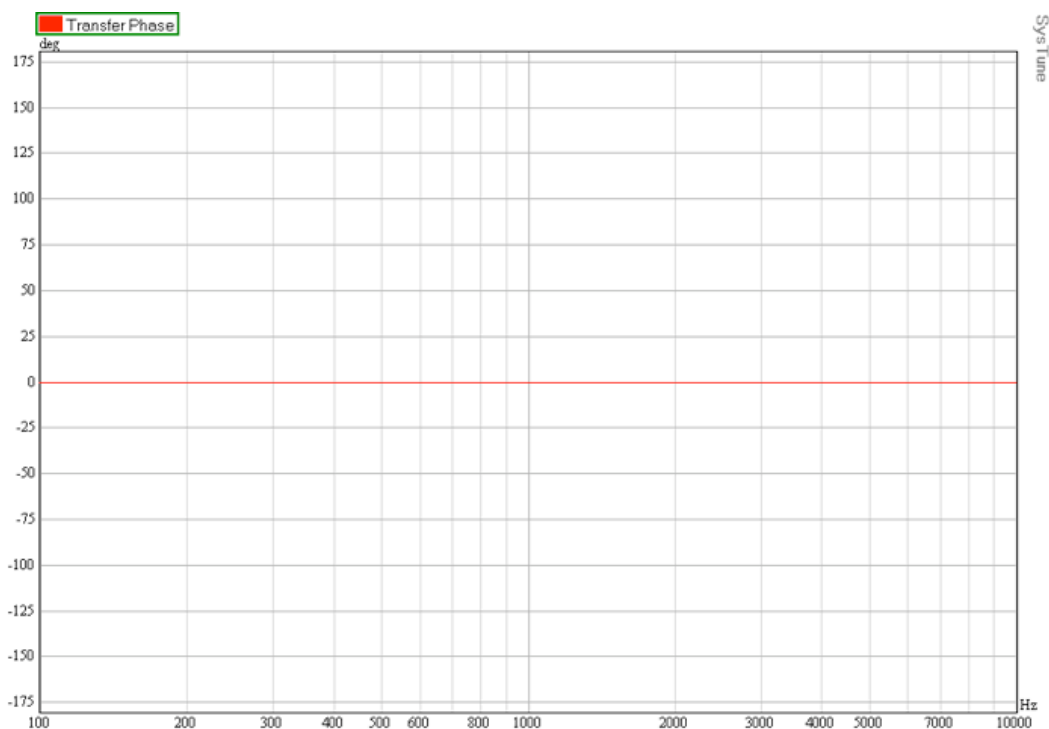
$0^\circ + 0^\circ$	\rightarrow	$+ 6 \text{ dB}$
$0^\circ + 90^\circ$	\rightarrow	$+ 3 \text{ dB}$
$0^\circ + 120^\circ$	\rightarrow	$\pm 0 \text{ dB}$
$0^\circ + 180^\circ$	\rightarrow	$- \infty \text{ dB}$
$90^\circ + 90^\circ$	\rightarrow	$+ 6 \text{ dB}$
$360^\circ + 720^\circ$	\rightarrow	$+ 6 \text{ dB}$
$180^\circ + 360^\circ$	\rightarrow	$- \infty \text{ dB.}$

On myös hyvä muistaa että vaihe ei ole sama asia kuin polariteetti. Polariteetti äänessä ilmaisee napaisuutta ja se pystytään mm. elektronisesti kääntämään jolloin saadaan 180° polariteetinkäännös. Vaikutus siniaallolle on sama kuin 180° vaiheenkäännöllä, mutta koska polariteetti ei ole aikariippuvainen kuten vaihe vaan muuttaa vain napaisuutta manipuloimatta aallon aikasuhdetta omaan referenssiaikaansa ei se näin ollen ole verrattavissa vaiheeseen. Polariteetin tunnus on \emptyset . (McCarthy 2007, 19)

Ääniaallon täyden syklin ollessa ilmiö joka tapahtuu tietyn määrän sekunnin sisällä pystymme myös laskemaan kuinka paljon on yhden syklinkesto. Äänen

taajuus voidaan esittää myös murtolukuna eli sekunninosina. Esimerkiksi 1000 Hz taajuus on 1/1000 sekuntia ja sievennettyä murtoluvun saamme tulokseksi 1 millisekunti. Tiedämme nyt siis että 1000 Hz taajuus tekee täyden 360° syklin yhden millisekunnin sisällä. Tämä on taajuuden aikareferenssi ja se on vakio. (Davis ja Jones 1989, 1)

On olemassa mittalaitteita joilla voidaan mitata kahden eri äänen vaihesuhteita, jotka ilmoitetaan taajuuksittain astelukuina eli vaihe-erona. Tällaisia laitteita käytetään mm. konserttiäänentoistolaitteita virittäessä. Mittaus on kaksikanavaista mittausta, joka tarkoittaa että on olemassa sekä mitattavakanava ja referenssikanava johon mittakanavaa verrataan (Ankert Feistel Media Group 2007, 58). Luodaanpa nyt siis katsaus vaiheeseen myös kuvallisin avuin.

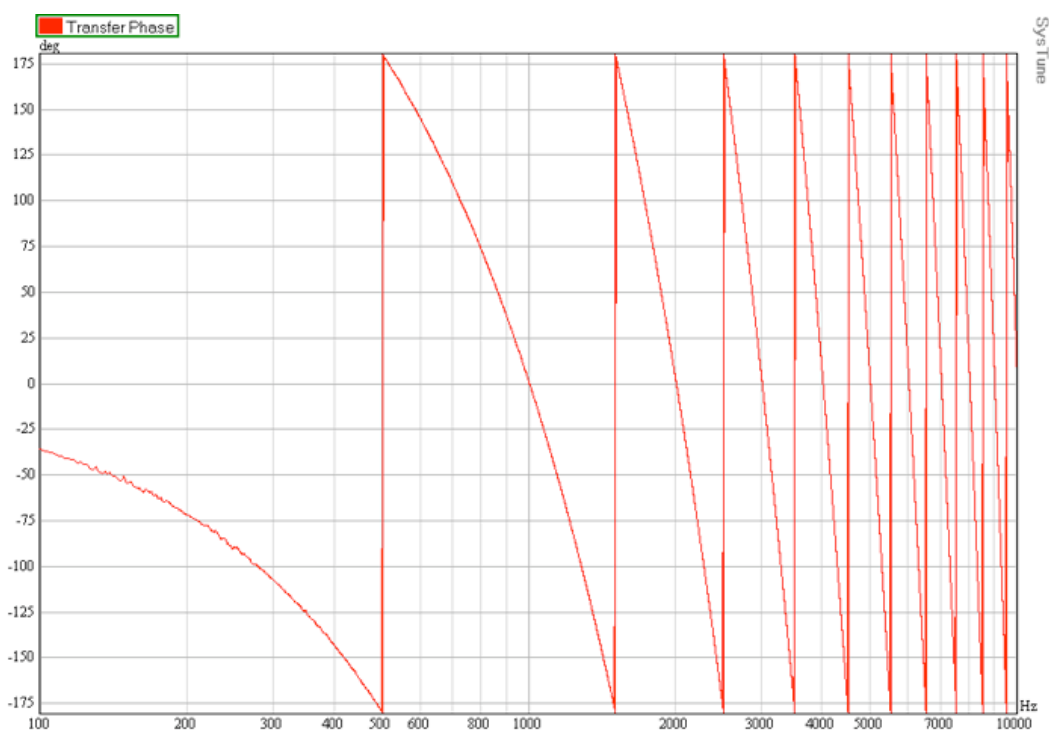


Kuva 2. Suora vaihe, $0^\circ+0^\circ$

Yllä olevassa kuvassa näemme esimerkin vaihemittalaitteen näytöstä joka on siis vertailutieto kahdesta elektronisesta signaalilähteestä. Pystyakselilla näemme asteluvun joka kertoo meille kahden signaalin välisen vaihesuhteen aiemmin esitetyn teorian pohjalta. Vaakasuunnassa kulkevat taas taajuudet 100 hertsistä 10 000 hertsiin. Punainen viiva ilmaisee mittaustulosta. (Ankert Feistel Media Group 2007, 100)

Kuvassa 2. on kyse suorasta vaiheesta, eli kahden signaalin välillä ei ole vaiheeroa ja näin ollen kaikilla taajuuksilla tapahtuu + 6 dB teoreettinen summautumisilmiö. Kyseinen ilmiö on hyvin epätodennäköinen akustisesti, koska ilma on täynnä eriaikaisia ääniä jotka moduloivat toisiaan johtuen mm. vaiheajasta.

Havainnollistaaksemme visuaalisesti ilmiön jossa kaksi eriaikaista samaa ääntä kohtaavat, päätämme viivastää toista mittauksessa käytettävää kanavaa. Aiemmin olemme esitelleet tavan laskea taajuudet sekunninosiksi ja sitä kautta löytäneet vaihekierrolle ajan. Otetaan kohde taajuudeksi 1 kHz ja viivästäään toista mittakanavaa 1 ms:n eli kokonaisen 1 kHz:n syklin verran (Kuva 3.)



Kuva 3. Vaihe-ero 1ms:n viiveellä

Aloitetaan kuvan tulkitseminen valitun taajuuden eli 1000 Hz:n kohdalta. Kuten huomaamme näyttää mittakanavalla ja referenssikanavalla olevan 0° ero kyseisellä taajuudella. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että viivästimme toista kanavaa juuri halutun syklin verran ja näin ollen 1 kHz:n taajuus ehtii tehdä täyden 360° syklin ennen summautumista mittakanavaan.

Kun katsomme taajuutta 500 Hz huomaamme siellä tapahtuvan täydellisen kumoutumisen eli 180° vaihe-eron. Tämä johtuu siitä että 500 Hz:n

vaihekierronaika onkin 2 millisekuntia ($1/500$ sekunti) ja summautuessaan 1 millisekunnin viiveellä on taajuus ehtinyt tekemään vasta puolet kokonaiskierrosta eli 180° ja näin ollen signaalit kumoavat toisensa sillä taajuudella.

Sama ilmiö tapahtuu taas taajuudella 1500 Hz ($1/1500$ sekunti) joka on taas ehtinyt tekemään kokonaisen syklin ja aloittamaan uutta tasan 180° verran eli summautuminen tapahtuu kokonaisvaihe-eron ollessa yhteensä 540° . Ilmiö tapahtuu taas kohdassa 2500 Hz jossa summautuminen tapahtuu äänen tehtyä 2 kokonaista kierrosta ja yhden puolikkaan eli 900° . Sama ilmiö jatkuu niin edelleen aina 1000 Hz:n välein. Mainittakoon myös että mm. 250 Hz:n kohdalla ilmenee 90° vaihe-ero taajuuden ollessa kokonaiskestoltaan 4 ms, koska se on ehtinyt tekemään vain yhden neljänneksen kierrosta ja näin ollen kahden kanavan summautuminen taajuudella 250 Hz on +3dB. Jos nyt katsoisimme samaa ilmiötä taajuusvasteen osalta, pystyisimme siellä toteamaan saman lopputuloksen.

Viive aiheuttaa ilmiön jossa tietyt taajuudet kumoutuvat ja tietyt taajuudet eivät ja nämä ovat täysin laskettavissa viiveajan perusteella. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä kampasuodin. Se ilmenee kahden eriaikaisen äänen summautuessa esim. suoran äänen ja heijastuksen. (Laaksonen 2006, 38–39).

Kampasuodin ilmiö esiintyy myös usein kahden kaiuttimen ollessa eri etäisyyksillä suhteessa kuulijaan ja ilmiö ”elää” sen mukaan kun kuulija vaihtaa paikkaa eli suhteellinen viive muuttuu. Näihin ongelmiin on olemassa työkaluja ja ratkaisuja joita käsitellään myöhemmin työn edetessä.

Perehdyttyämme ääniaallon ominaisuuksiin kuten aallonpituus ja vaihe voimme laskea ja arvioida kahden äänen vaikutusta toisiinsa ja pystymme purkamaan ongelmat osatekijöihin matemaattisesti. Ymmärrämme että kaksi eriaikaista ääntä synnyttävät tietynlaisia ilmiöitä keskenään. Esimerkkimme ovat kuitenkin olleet puhtaasti teoreettisia havainnollisuutensa vuoksi. Tosiasiassa se kuinka selvästi kuultavissa tällaiset ilmiöt luonnonakustiikassa ovat johtuvat mm. summautuvien äänien tasollisesta suhteesta toisiinsa ja äänien taajuussisällöstä. Taseon, taajuuksien amplitudiin, sekä taajuuteen heijastuksia

käsitellessä vaikuttaa hyvin olennaisesti heijastavanmateriaalin olemus ja sen kyky heijastaa ja vaimentaa ääntä ja eri taajuuksia. Seuraavaksi tutkimme erilaisten tosielämän materiaalien ja ilmiöiden vaikutusta äänentoistoon.

3 ÄÄNI TILASSA

Konserttiäänentoiston kannalta tulee huomioida äänenkäyttäytyminen eri rakenteellisten ja ilmastollisten vaikutusten alaisuudessa. Tutkimme seuraavassa osiossa äänen liikettä ulkoilmassa ja sisätiloissa ja pyrimme analysoimaan huomioitavimmat tekijät näiden kahden ympäristön kannalta.

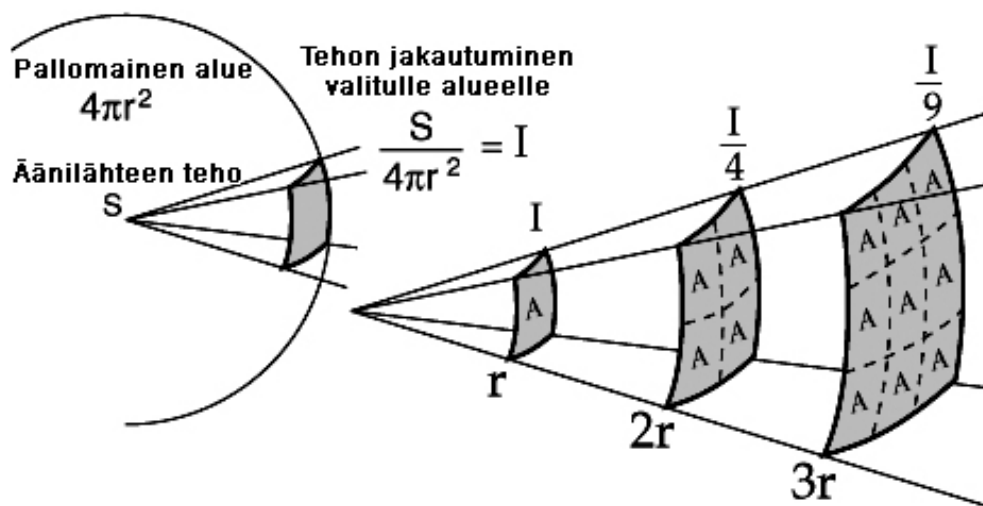
3.1 Ääni ulkoilmassa

Ulkoilmaa pidetään äänenkannalta heijastuksettomana tilana ns. ”vapaana kenttänä”, jossa kaiunnaikutusta ei huomioida ja heijastukset eivät ole yhtä suuressa roolissa kuin sisätiloissa (Davis ja Jones 1989, 43).

3.1.1 Käänteinen neliölaki

Käänteisellä neliölaila kuvataan äänenpainetason suhdetta äänilähteeseen etäisyyden kasvaessa. Tämä laki vaatii täysin toteutuakseen seuraavat olosuhteet: yksi pistemäinen äänilähde (esim. ympärisäteilevä kaiutin) ja vapaan kentän olosuhteet (ei heijastuksia). (Davis ja Jones 1989, 43.)

Laki toteaa, että äänentaso muuttuu etäisyydenneliönä, eli toisin sanoen aina matkan kaksinkertaistuessa lähteestä äänenpainetaso laskee 6 desibeliä (Davis ja Jones 1989, 43). Energia jakautuu siis nelinkertaiselle alalle matkan kaksinkertaistuessa.



Kuva 4. Käänteinen neliölaki

Esimerkiksi olemme metrin päässä äänilähteestä, jossa äänenpaine on 100 dB SPL. Ottaessamme askeleleen taaksepäin edeten kahden metrin päähän lähteestä laskee äänenpaine 6 desibeliä, eli tulos on 94 dB SPL. Jatkettaessa matkaa kahdesta metrillä neljään metriin toteutuu sama ilmiö uudestaan eli äänenpaine laskee $94 - 6 = 88$ dB SPL. Kuuden desibelin pudotus äänenpaineessa vastaa teoreettisesti suhdetta 2:1, kun taas akustisena tehohäviönä se vastaa suhdetta 4:1 (Davis ja Jones 1989, 43).

Käänteinen neliölaki koskee kaikkia taajuuksia tasaisesti. Tosin todellisuudessa ääneneteneminen ilmassa on toisille taajuuksille haastavampaa kuin toisille. Näitä haasteita voidaan selvittää tarkastelemalla ilmankosteuden, tuulen ja mm. lämpötilakerrosten vaikutusta äänenkulkuun.

3.1.2 Ilmankosteuden vaikutus

Ilma syö ääneltä energiaa vaihtaen sitä. Etäisyyksien kasvaessa ilmiö tulee esiin selvemmin ja sen vaikutus on suurempi korkeammilla taajuuksilla. Vaikutus on vartenotettava yli 2 kHz:n taajuuksilla (Davis ja Jones 1989, 46).

Ilmankosteus vaikuttaa äänen siten, että kuivempi-ilma vaihtaa ääntä tehokkaammin kuin kosteailma. Tämä toteamus pitää paikkansa jos lämpötila on kohtalainen ja ilman kosteus väillä 30–70 %. Kylmässä lämpötilassa kuivailma omaa taas paremman äänenvälityskyvyn. (McCarthy 2007, 46)

Suomen ilmatieteenlaitoksen verkkosivujen mukaan suhteellinen ilmankosteus on pienimmillään touko-kesäkuussa ollen 65–70 % ja suurimmillaan marras-joulukuussa eli noin 90 %. Tarkastelkaamme ilmiötä siis todellisilla kosteusarvoilla, joita kesällä voi olla eli n. 70 % ja enemmän.

Meyer Sound laboratorioden tekemien testien mukaan esim. 20 °C lämpötilassa 100 metrin etäisyydellä ilmankosteudella 70 % on lähes vaimentumaton taajuusvaste aina 1 kHz:n asti jonka jälkeen se laskee 4 kHz:n kohdalla n. -4 dB SPL ja yli -10 dB SPL 8 kHz:n kohdalla ja vaimentuma 16 kHz:n kohdalla on jo -30 dB SPL. Vastaavat luvut samalla ilmankosteudella ja etäisyydellä 30 °C lämpötilassa ovat 4 kHz; -2,5 dB SPL, 8 kHz; -6 dB SPL, 16 kHz; -18 dB SPL. Lämpötilan laskiessa 10 °C on vaimentumat samalla ilmankosteudella ja etäisyydellä keskiarvallisesti suurempia kuin 30 °C lämpötilassa, mutta pienempiä kuin 20 °C lämpötilassa. Ilmankosteuden kasvaessa vaimentumat pienenevät annetuilla lämpötiloilla. (McCrathy 2007, 48)

Ylläesitetystä tuloksista voimme siis tehdä johtopäätöksen, että ilmankosteudella ja lämpötilalla voi olla huomattaviakin eli siis kuultavia vaikutuksia äänentoistojärjestelmäämme etenkin pitkillä etäisyyksillä. Kesäisin sääolosuhteet voivat muuttua radikaalistikin päivän edetessä ja näin ollen on hyvä muistaa myös se että silloin muuttuu myös ääni.

3.1.3 Tuulenvaikutus

Ulkona tuulee ja tuulella on myös vaikutusta äänenetenemiseen. Kova sivutuuli voi kääntää äänenetenemissuuntaa saaden sen kuulostamaan siltä kuin se tulisi eri suunnasta kuin alun perin oli tarkoitus (Davis ja Jones 1989, 45).

Tuulta voi olla myös eri kerroksissa jotka liikkuvat erinopeuksilla. Nämä kerrokset ilmenevät usein päällekkäin. Esimerkiksi jos yleisöalueen reunamassa on jonkin sortin aitaus, tai vaikka puita jotka suojaavat tuulelta syntyy helposti ilmiö jossa ylempi-ilmakerros pääsee liikkumaan alemmaa vapaammin saavuttaen näin korkeamman nopeuden. Ja kun tuuli pyrkii kiihdyttämään äänenetenemiseen tämä aiheuttaa taitumisilmiön (Davis ja Jones 1989, 45).

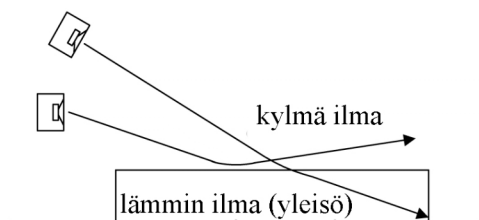
Jos ääni kohtaa vastatuulta pyrkii sen kurssi taipumaan ylöspäin ja vastaavasti myötätuulen vaikutus taivuttaa ääntä alaspäin. Sivuttaissuunnassa vaikutus tapahtuu luonnollisesti joko oikealle tai vasemmalle.

Todellisuudessa pelkästään tuulen vaikutus äänen etenemiseen on kohtalaisen minimaalinen koska tuulennopeus suhteessa äänennopeuteen on pieni. Nopeasti muuttuva tuuli voi tosin aiheuttaa kummallisia ilmiöitä esim. stereokuvaan. Suuremman vaikutuksen tuuli saavuttaa useimmiten silloin kun se kuljettaa mukanaan eri lämpöistä ilmaa muodostaen lämpötilakerrostumia. (Davis ja Jones 1989, 45)

3.1.4 Lämpötilakerrostumat

Lämpötilakerrostumien vaikutus äänen on verrattavissa tilanteisiin joissa ääni pyrkii kiertämään jonkin objektin. Tämä tapahtuu silloin kun objekti on neljänneksen aallonpituudesta tai pienempi. Ääni taittuu siirtyessään aineesta toiseen esim. ilmasta lasiin tai lävistäessään eri lämpötilat omaavia ilmakerrostumia. Ilmanlämpötilan kasvaessa kasvaa myös äänennopeus, kuten aiemmin on esitetty. Se aiheuttaa linssimäisensäntä ääneen. Kerrostumakohdassa lämpimämmän kerrostuman ääni etenee kylmempää nopeammin ja näin ollen ääni taittuu kylmemmän kerrostuman suuntaan. (Davis ja Patronis 2006, 119)

Tosielämän tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kun bändi tarkista ääniä aamulla jolloin maa on vielä kylmä edellisen yön jäljiltä, mutta aurinko taas lämmittää ylempiä kerrostumia. Tässä tilanteessa ääni pyrkii taittumaan kohti maata. Illan tullen ilman lämpötila usein laskee. Nyt konserttialue on täynnä yleisöä jotka taasen lämmittävät alempia ilmakerroksia aiheuttaen vastakkaisen ilmiön. Eli ääni pyrkii taipumaan ylöspäin. Katastrofi on valmis jos käytössä on äänentoistojärjestelmä joka on kasattu maahan eikä ripustettu. Tällöin voi käydä niin että ääni kimpoaakin yleisöstä pois päin etenkin pidemmällä etäisyyksillä, koska kulma jolla ääni kohtaa yleisön on liian pieni. Äänen taittuessa lämpötilan vaikutuksesta taittuu se pois päin yleisöstä. Ratkaisu, jolla tätä ilmiötä vastaan voidaan taistella, on ripustaa järjestelmä ja pyrkiä suuntaamaan se suuremmissa kulmassa yleisöön. (McCarthy 2007, 47-49)



Kuva 5. Lämpötilakerrostuma

3.2 Ääni sisätiloissa

Äänenkäyttäytymisen sisätiloissa suhteessa ulkoilmaan erottaa merkittävimmin nämä asiat: seinät, katto ja lattia. Nämä poistavat tai muuttavat ilmiöitä joita on esitetty ulkoilmaan liittyvinä. Muun muassa erittäin merkittävä käänteinen neliönlaki ei enää toteudu käytännössä samalla tavoin kuin ulkoilmassa johtuen heijastuksista. Tuultakaan ei sisällä suuremmin esiinny. Lämpötilakerrosten vaikutus on usein pieni riippuen toki tilankoosta ja ilmanvaihdosta ja ilmankosteus on usein tasaisempi kuin ulkoilmassa. Äänenkäyttäytymistä sisätiloissa tutkittaessa tulee meidän keskittyä seiniin. Seinät ja muut pinnat synnyttävät heijastuksia ja vaimentumia ääneen, sekä viiveitä. Nämä synnyttävät ilmiöitä joita tarkastelemme seuraavaksi.

3.2.1 Heijastuma ja vaimentuma

Kaiuttimesta seinään osuvalla äänestä tietty prosentuaalinen osa heijastuu takaisin. Se ääni joka ei heijastu vaimentuu ja muuttuu usein lämpöenergiaksi ja se ääni, joka ei muutu lämpöenergiaksi, lävistää seinämän (Davis ja Jones 1989, 53). Ääni voi kohdata myös pienempiä esteitä kuin seinät ja tällöin heijastuma tapahtuu jos este on $\frac{1}{4}$ ääniaallon pituudesta tai suurempi. Kohteen ollessa pienempi kuin $\frac{1}{4}$ aallonpituudesta tapahtuu ilmiö, jossa ääni taittuu kohteen ympäri kiertäen sen (Davis ja Patronis 2006, 119). Ilmiö on siis taajuusriippuvainen johtuen eri taajuuksien erimittaisista aallonpituuksista.

Materiaalin vaimennuskyvyille voidaan antaa kerroin joka ilmaisee vaimennussuhdetta. Kertoimen on kehittänyt Tohtori Wallace Sabine, joka esittää että avoimella neliömetrin kokoisella ikkunalla joka ei heijasta mitään ääntä on vaimennuskerroin 1 (eli 100 % / neliömetri).

Täydellisen heijastuskyvyn omaavalla materiaalilla on taasen vaimennuskerroin 0. Näin ollen kerroin on siis jotain näiden lukujen väliltä neliometriä kohden ja se on muunnos prosenttiluvusta. (Davis ja Jones 1989, 53)

Esimerkiksi, jos meillä on materiaali jonka vaimennuskerroin olisi 0,15 (15 %), voimme päätellä, että heijastuva osuus on 0,85 ääniaallon tehosta (85 %). Tämä pystytään muuttamaan desibeleiksi käyttämällä logaritmi – funktiota:

$$10 \log 0,85 = -0,7 \text{ dB}$$

Eli heijastunut ääni on 0,7 dB vaimeampi, kuin pintaan osunut ääni. (Davis ja Jones 1989, 54 ja 411–412)

Vaimentuma on siis taajuusriippuvaista vaikuttaen eri tavalla eri taajuuksiin. Rakennusmateriaaleilla on tässä suhteessa erilaisia ominaisuuksia, kuitenkin seinenvaimennuskerroin on käytännössä aina pienempi kuin 1 (Laaksonen 2006, 19). Saadaksemme jonkin sortin käsityksen eri materiaalien vaikutuksesta äänenvaimentumiseen pyrim havainnollistamaan materiaalin vaimennuskykyä taajuuksittain seuraavan taulukon avulla.

Materiaali	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
betoni lattia	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02
puu lattia	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
matto, raskas, betonilla	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
tiili, lasittamaton	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
tiili, maalattu	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
tavallinen ikkunalasi	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
puu panelointi	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
istuva yleisö*	2,5–	3,5–	4,0–	4,5–	5,0–	4,5–
	4,0	5,0	5,5	6,5	7,0	7,0

Taulukko 1. *Vaimennuskertoimet*

*Arvot ovat ”sabineja”/henkilö ja riippuvat istuinväleistä ja tuolien verhoilusta. (Davis ja Patronis, 2006, 125 – 127), (Eargle ja Foreman 2002, 411 – 413)

3.2.2 Seisova-aalto ja huonemoodit

Ääni osuessaan seinään heijastuu ja yhdistyy alkuperäiseen ääneen viiveellä, koska heijastuvan äänenkulkumatka on luonnollisesti pitempi kuin suoranäänen. Yhtyessään suoraan ääneen tapahtuu summautuminen, jonka lopputulos riippuu summautuvien äänien vaihesuhteesta ja tasosta. Heijastuvaääni voi siis vahvistaa tai vaimentaa alkuperäistä ääntä. Huomioiden vielä materiaalienvaimennuskertoimen saamme yleiskuvan siitä, minkälainen on mahdollisesti heijastuvanäänen taajuussisältö. Vahvistus tai kumoutumisefekti on voimakkainta silloin, kun huoneen kahden vastakkaisenpinnan etäisyys toisistaan on kokonaisluvullisesti jaollinen jollekin tietylle aallonpituudelle tai sen puolikkaalle (Laaksonen 2006, 15).

Jos ääniaalto mahtuu kokonaisuudessaan kahden vastakkaisenpinnan väliin yhden tai useamman kerran syntyy meille siis seisova-aalto. Ilmanpaineen kautta ajateltuna aallolla on kohtia joissa ilmanpaine on kovimmillaan ja heikoimmillaan, jotka nyt kertautuvat vahvistaen toisiansa. Tämä tapahtuu koska heijastuvat äänet osuvat samaan vaiheeseen ja pintojen etäisyys = äänen yhden (tai useamman) kokonaisen 360° :n syklin mitta. Näin ilmaan syntyy eräänlainen staattinen pulssi, jossa on matalanpaineen ja korkeanpaineen alueita. Kävellessä tällaisessa huoneessa voidaan helposti huomata kohtia, jossa ääni vaimenee ja kovenee. Nämä korkean ja matalanpaineen keskittymät esiintyvät matkalla, joka on $\frac{1}{2}$ aallonpituudesta ja etäisyys vaihtelee taajuuskohtaisesti. (Davis ja Jones 1989, 55–56)

Äänellä on huoneessa siis kohtia, joissa paine on korkeimmillaan ja alimmillaan. Niissä kohdissa, joissa aallonpaine on kovimmillaan, on ilmassa liikkuvienpartikkelien nopeus alimmillaan ja niissä kohdissa, joissa paine on alimmillaan, on partikkelien nopeus korkeimmillaan. Äänenvaimennuksen kannalta tehokkain piste vaimentavalle materiaalille olisi paikka, jossa paine on alimmillaan ja nopeus kovimmillaan. Seisovanaallon tapauksessa tällainen paikka löytyy juuri $\frac{1}{4}$ aallonpituuden päästä seinästä. Visuaalisesti ajateltuna ja verrattaessa kuvassa 1. aiemmin esitettyyn siniaallonkäyrään nämä mainitut kohdat löytyvät pisteestä jossa aalto saavuttaa ylimmän ja alimman huippunsa ja vaiheen kannalta ajateltuna ne ovat 90° ja 270° .

Vaimennusteho halutulle taajuudelle ja sen kerrannaisille on parhain silloin kun saamme materiaalin sellaiseen pisteeseen jossa ilmassa liikkuvienpartikkelien nopeus on suurin. Eli selvitämme taajuuden, jolla ilmiö tapahtuu ja laskemme sen neljänneksen aallonpituudesta ja asetamme vaimennusmateriaalimme esim. sen etäisyyden päähän seinästä. (Eargle ja Foreman 2002, 22-24)

Huonemoodit tai seisova-aalto ilmiönä ovat kuitenkin kaikkea muuta kuin yksinkertaisia. Todellisuudessa ilmiö on kolmiulotteinen jossa ensimmäinen aste on vastakkaiset pinnat (esim. seinät tai katto ja lattia) ja kaksi monimuotoisempaa, johon huomioidaan neljä eri pintaa, tai neliskulmaisen huoneen kaikki kuusi pintaa. Näin ollen todellisuudessa heijastuksia ja resonansseja syntyy useita eri taajuuksille. Ilmiö on tosin huomattavinta matalilla bassotaajuuksilla, joilla aallonpituudet ovat suurimpia. (Davis ja Jones 1989, 56)

3.2.3 Ensiheijaste

Konserttiäänentoistollisesti ensimmäinen ja myös voimakkain heijastuma on monesti erittäin merkittävä. Heijastus voi tuhota joitain taajuuksia tai vahvistaa joitain taajuuksia perin tehokkaasti riippuen jälleen summautuvienäänien vaihesuhteista ja amplitudista. Tätä on myös mahdollista käyttää hyväksi järjestelmää rakennettaessa. On hyvä painaa mieleen että esimerkiksi areenan takaseinä tuntuu bassokaiuttimelle yhtä läheiseltä, kuin vanerinpala sijoitettuna 30 cm päähän diskanttikaiuttimesta (McCarthy 2007, 143).

Kaiutin voidaan sijoittaa suoraan läheisyyteen esim. lattian kanssa jolloin lattia heijastaa välittömästi kaiuttimen toistamat taajuudet jos aallonpituus ei ole liian lyhyt. Lattialle kasatuilla bassokaiuttimilla saadaan aikaan 6 dB korostus matalille taajuuksille, koska itse lattia tuplaa kaiuttimen tuottaman äänenpaineen. Menetelmän englanninkielinen termi on "half space loading". (McCarthy 2007, 143–144)

Kaiuttimien etäisyys maasta tai muista läheisistä heijastavista pinnoista synnyttää siis heijasteen, jonka vaikutus suoraan ääneen voidaan päätellä kaiuttimen ja heijastavan pinnan etäisyyksien ja aallonpituuksien perusteella.

Heijastus tapahtuu aina viiveellä ja summautuessaan suoraan signaalin myötävaiheessa synnyttää se vahvistavanilmiön ja vastavaiheessa syntyy vaimennusilmiö.

Esimerkki

Otetaan esimerkki bassokaiuttimen asettelusta ja oletetaan, että kaiutin on täysin ympärisäteilevä (niin kuin yleensä on) ja heijastavilla seinillä on 100 % heijastus. Lämpötila on 22 ° joten äänennopeus on 344,75 m/s. Sijoitamme sattumalta kaiuttimen 1,5 metrin päähän, esimerkiksi takaseinästä. Kaiuttimemme toistoalue on esimerkiksi 30–100 Hz.

Tästä seuraa tilanne, jossa kaiuttimesta taaksepäin lähtevä ääni matkaa seinään ja heijastuu sieltä takaisin ja tämän 3 metrin matkan tekemiseen sillä kuluu 3 m: $344,75 \text{ m/s} \approx 0,0087 \text{ s} = 8,7 \text{ millisekuntia}$. Eli heijastunut ääni siis summautuu bassokaiuttimesta lähtevänäänen kanssa 8,7ms:n viiveellä. Tiedämme jo, että kaksi eriaikaista samansisältöistä ääntä aiheuttavat kampasuodin ilmiön. Nyt meidän tulee selvittää siis mille taajuudelle ilmiö on haitallisin. Tämän voimme laskea kun tiedämme, että jos jokin taajuus summautuu $0^\circ + 180^\circ$ vaihe-erolla, tulee se kumoutumaan. Laskemme mikä taajuus on 8,7ms:n aikana tehnyt 180° vaihesyklistään: $1 \text{ s}: 0,0087 \text{ s}: 2 \approx 57,47 \text{ Hz}$. Eli teoreettinen $-\infty$ desibelin vaimentuma tällä taajuudella ei välttämättä päästä bassokaiutintamme täysin oikeuksiinsa.

Ongelmaan on olemassa myös ratkaisu. Voimme, joko siirtää kaiutinta kauemmaksi seinästä, jolloin eniten kuoleutuvataajuus pienenee matkan kasvaessa tai lähemmäksi seinää, jolloin taajuus kasvaa. Olisi toivottavaa että emme heti ensimmäistenheijastusten tuhovaikutusta laskisi kaiuttimen toistoalueelle 30–100 Hz. Nopeasti laskettuna, jos puolitamme matkan 0,75 metriin osuu suurin vaimennusilmiö puolet pienemmälle aallonpituudelle eli $57,47 \text{ Hz} \times 2 = 114,94 \text{ Hz}$. Ja nyt taas seinäheijastus voimistaa alempia taajuuksia, joka voi olla toivottavaa.

3.2.4 Kaiunta

Sisätiloissa kaikuu ja kaikua mittaamaan on olemassa termi nimeltä kaiunta-aika, joka voidaan laskea tiedettäessä huoneistonmitat ja pintamateriaalien keskiarvollinen vaimennuskerroin. Kun katkaisemme äänilähteen jää tilaan usein kaikumaan ”häntä” toistetusta äänestä ja aikaa sekunteina, jonka tämä ”häntä” vie vaimentuakseen 60dB:ä kutsutaan kaiunta-ajaksi. Tämä on olennainen parametri tietää mm. musiikin tai puheen ymmärrettävyyden kannalta ja siitä käytetään lyhennettä RT_{60} . (Eargle ja Foreman 2002, 18)

RT_{60} voidaan joko mitata nykyaikaisilla mittareilla tai laskea vaikkapa Tohtori W. Sabinen kehittämällä kaavalla. Sabinen kaava antaa parhaan tuloksen kun sitä käytetään tiloissa, joiden vaimennuskerroin on alle 0,2. On olemassa myös muita kaavoja kuten Norris-Eyringin kaava, joka antaa tarkempia tuloksia huoneista joissa vaimennuskerroin on suurempi kuin 0,2. (Eargle ja Foreman 2002, 18 ja 411)

Sabinen kaava:
$$RT_{60} = \frac{0,16V}{S \bar{\alpha}}$$

V = huoneen tilavuus kuutiometreinä (m^3)

S = huoneen pinta-ala neliömetreinä (m^2)

$\bar{\alpha}$ = huoneen keskiarvollinen vaimennuskerroin

Norris-Eyring
$$RT_{60} = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

V = huoneen tilavuus kuutiometreinä (m^3)

S = huoneen pinta-ala neliömetreinä (m^2)

$\bar{\alpha}$ = huoneen keskiarvollinen vaimennuskerroin

\ln = \ln – funktio

(Eargle ja Foreman 2002, 18 ja 411), (Davis ja Jones 1989, 57)

Esimerkki: Käytetään Sabine kaavaa laskemaan kaiunta-aika tilalle, joka on 30m pitkä, 6m korkea ja 15m leveä ja keskiarvollinen vaimennuskerroin on 0,2 (esim. betoni tai tiili rakennelma)

$$V = 30\text{m} \times 6\text{m} \times 15\text{m} = 2700 \text{ m}^3$$

$$S = 30\text{m} \times 15\text{m} = 450 \text{ m}^2$$

$$\bar{\alpha} = 0,2$$

$$RT_{60} = \frac{0,16 \times 2700}{450 \times 0,2} = 4,8\text{s}$$

Sabine kaavalla saa mielestäni nopeasti ja kohtalaisen helposti laskettua suuntaa antavan kaiunta-ajan, jopa keikkatilanteessa. Norris-Eyring kaava keikalla ei todennäköisesti käytetä, koska harvemmin funktiolaskin on nykyaikana ensimmäinen työkalu tarkempaa kaiunta-aikaa analysoitaessa. Nykyisin on mittareita, joilla voidaan mitata kaiunta-aikaa saaden tarkkoja tuloksia.

Lyhyt ja keskimittainen kaiunta tasaisella taajuuskaistalla mielletään miellyttäväksi ja musikaaliseksi ilmiöksi, kun taas liiallinen kaiunta vaikeuttaa puheenymmärrettävyyttä ja tuhoaa musiikin iskuvoimaa. Kaikuvissa tiloissa, kuten vaikka lentokentillä ongelma selvyyden takia ei välttämättä ole siinä että kuulutus ei tule tarpeeksi kovaa, vaan koska tila kaikuu liikaa. Kaiunta tulee siis huomioida päästäkseen onnistuneeseen äänentoistoon sisätiloissa. (Davis ja Jones 1989, 58)

3.2.5 Kriittinen piste

Liiallinen kaiunta siis vaikuttaa äänentoistoon haitallisesti syöden siltä selkeyttä ja iskevyyttä. Todellisuudessa sisätilojen äänentoisto on aina summa suorastaäänestä ja heijasteista, sekä kaiunnasta. Ymmärrettävästi näiden suhde muuttuu, jos liikumme tilassa edestakaisin. Tätä voidaan perustella käänteisellä neliölailalla, joka vaikuttaa kaiuttimesta tulevaan suoraan ääneen, kun taas kaikuvankentän intensiteetti kaikkialla huoneessa on sama (Davis ja Jones 1989, 58).

On olemassa termi nimeltä kriittinen piste, joka ilmaisee suoranäänen ja kaikuvaäänän suhdetta. Suoranäänen laskiessa käänteisenneliönlain mukaan aina 6 dB SPL matkan kaksinkertaistuessa tulee esiin jossain vaiheessa kohta, jossa suoraääni ja kaikuvaakenttä kuuluvat yhtä kovaa. Tätä kutsutaan kriittiseksi pisteeksi ja siitä taas edelleen kauemmaksi jatkettaessa vaihtuu kaikuvaäänikentän suhde voimakkaammaksi heikentäen näin mm. puheen ymmärrettävyyttä.

Kriittistä pistettä voidaan tietyin keinoin siirtää kauemmaksi saaden näin parempi ymmärrettävyys äänijärjestelmään. Voimme käyttää kaiuttimia, joiden suuntaavuus rajautuu pienemmälle alueelle. Näin kaiuttimesta lähtevää ääntä osuu vähemmän seinille vähentäen kaiuntaa. Voimme panostaa tilan akustiikkaan, joka usein on kallein ja epätodennäköisin ratkaisu. Näin saamme suurennettua huoneiston keskiarvollista vaimennuskerrointa. (Eargle ja Foreman 2002, 21)

Itse eniten käyttämäni ja näkemäni ratkaisu on lisätä tilaan ns. viivekaiutin kriittisen pisteen paikkeille, tai hieman ennen sitä, jatkamaan päääänijärjestelmästä tulevaa suoraaääntä. Tähän asiaan palaamme myöhemmin tarkemmin.

Kriittinen piste voidaan pyrkiä löytämään huoneesta kuuntelemalla ja kävelemällä pois päin äänilähteestä, joka voi olla vaikka pääkaiuttimet. Kun kuulet, sekä kaiunnan ja suoran äänen yhtä kovaa, olet löytänyt tämän pisteen (Eargle ja Foreman 2002, 21).

Kriittinen piste voidaan laskea myös tiedettäessä huoneenmitat, materiaalien keskiarvollinen vaimennuskerroin ja kaiuttimen Q – arvo. Kaiuttimen Q – arvo on luku, joka ilmaisee kaiuttimen suuntaavuutta. Pallomaisella äänilähteen $Q=1$, puolipallon $Q=2$, neljännespallon $Q=4$ jne. Todellisuudessa tilanne ei ole näin ihanteellinen, koska suuntaavuus on aina taajuuskohtaista. (Davis ja Patronis 2006, 99–104)

Kriittisenpisteenlaskentaan on olemassa laskureita. Internetistä löytyy käyttökelpoinen laskuri osoitteesta: <http://www.mcsquared.com/critical.htm> (luettu 20.2.2009).

4 DESIBELIT JA ÄÄNENPAINEN

Olemme tutkineet äänenkäyttäytymistä eri tiloissa ja analysoineet niissä tapahtuvia ilmiöitä. Äänestä puhuttaessa kuulee usein puhuttavan desibeleistä. Tässä kappaleessa keskitynkkin desibeliasteikkoon ja pyrin analysoimaan sitä konserttiäänentoistollisesti merkittävistä näkökulmista. Perehdymme äänenpaineiden mittaamiseen konserttitilanteessa ja pyrimme löytämään syitä desibelirajoituksille ja analysoimaan niiden vaikutusta ihmisenkuuloon.

4.1 Desibeli

Äänityössä käytetään muutamia eri desibeliasteikkoja ja näille kaikille yhteistä on se, että ne ilmaisevat aina kahden asian suhdetta toisiinsa, eli toisinsanoin suhdelukua. Eli desibeli arvo on aina suhteellinen luku, mutta kysymys kuuluu että suhteellinen mihin? Kuvitellaan että meillä on laite, jonka sisäänmenotaso on 1 ja ulostulotaso on 1, on niiden välinen suhde 1:1 ja se on desibeleinä 0 dB. Ulostulevantason ollessa suurempi kuin sisäänmenevän saadaan tulokseksi positiivisia desibelilukuja, jos ulostulevataso on pienempi kuin sisäänmenevä saadaan tulokseksi negatiivinen desibeliluku, eli ilmenee häviötä. Sisään ja ulosmenevien signaalientasot eivät ole tässä tapauksessa tärkeitä vaan niiden välillä tapahtuva tasonmuutos desibeleinä. (McCarthy 2007, 10–11)

Desibeliasteikkoa käytetään, koska se on logaritminen ja sillä voidaan kuvata arvoja pienemmillä luvuilla, jotka muuten vaatisivat enemmän numeroita. Desibeliasteikon logaritminen luonne vastaa myös ihmisen tapaa kuulla asioita ja on se näin ollen parempi tapa ilmaista ääntä. (Davis ja Jones 1989, 19)

Muuntaessamme arvoja desibeleiksi on meidän käytettävä logaritmi – funktiota. Audiokäytössä tarvitsemme seuraavia kaavoja:

$$\text{Suhteellinen taso (dB)} = 20 \times \log \frac{Taso_1}{Taso_2}$$

$$\text{Suhteellinen teho (dB)} = 10 \times \log \frac{Teho_1}{Teho_2}$$

Käsitellessämme tehoa (esim. watteina) tulee meidän käyttää alempaa kaavaa, jos käsittelemme jännitettä tai akustista äänenpainetta tulee meidän käyttää ylempää kaavaa, jossa kertoimena on 20. Tämä johtuu siitä, että teho on verrannollinen jännitteenneliöön ja kaksinkertaistaessa jännitteen saamme nelinkertaisen tehon. (McCarthy 2007, 11) (Davis ja Jones 1989 19–20)

Esimerkkejä

Mikä on näiden kahden luvun erotus desibeleinä 2 wattia ja 1 watti?

$$dB = 10 \times \log(2w \div 1w)$$

$$dB = 10 \times \log 2$$

$$dB = 10 \times 0,301$$

$$dB \approx 3$$

Eli tehon kaksinkertaistuksessa tai puolittuksessa on muutos desibeleinä 3 dB. Jos vastaavaa tilannetta ajateltaisiin jännitteen tai äänenpaineen kohdalla tulisi lopputulokseksi 6 dB, koska kerroin näissä tapauksissa olisikin 20 eikä 10.

Lasketaan vielä mikä on näiden suhde desibeleinä 1000 wattia ja 100 wattia, eli suhteellinen muutoksen ollessa 1:10?

$$dB = 10 \times \log(1000w \div 100w)$$

$$dB = 10 \times \log 10$$

$$dB = 10 \times 1$$

$$dB = 10$$

Tehon siis kymmenkertaistuksessa tai tippuessa 1/10 on muutos desibeleinä 10 dB ja vastaavasti puhuttaessa jännitteestä tai äänenpaineesta on muutos 20 dB.

4.2 Yleisimmät asteikot

Desibeliemaailmassa on muutamia asteikoita, joita usein näkee käytettävän. Näillä asteikoilla eroavaisuutena on juurikin se, että mihin ne ovat verrannollisia, eli mikä on niin sanottu nolla-arvo. Esittelen nyt yleisimmät asteikot ja niiden referenssiarvot, sekä hieman historiaa.

4.2.1 dBm

Asteikko dBm ilmaisee sähköisen tehontasoa ja sen referenssi arvo on 1 milliwatti, toisin sanoen 0dBm = 1 milliwatti. Asteikko esiteltiin ensimmäisen kerran julkaisussa nimeltä "Proceedings of the Institute of Radio Engineers" vuonna 1940. Tällöin mitattiin että 600ohm vastuksen omaavasta puhelinlinjasta saatiin IRE:n referenssi taso 0,001 wattia (=1mW), kun sitä kuormitettiin 0,775 V_{rms} jännitteellä. Luku 0dBm ei siis tarkoita 0,775 volttia, kuin ainoastaan 600 ohmin vastuksella, mutta on aina kuitenkin yhtä suuri kuin 1 milliwatti. (Davis ja Jones 1989, 22)

Transistorien keksimisen jälkeen vuonna 1947 alkoi analoginen äänensiirto muuttua vähemmän tehokeskeiseksi ja laitteiden toimintamalli alkoi muuttua tehovahvistuksesta jännitevahvistukseen (Laaksonen 2006, 93–94). Näin ollen kuormitusimpedansseilla ei enää ollut niin suurta merkitystä. Merkintää dBm voi tavata putkivahvistinperiaatteella toimivissa laitteissa tai erittäin pitkien kaapelivetojen yhteydessä, jossa voi olla käytössä 600 ohmin vastuksia vähentämässä häiriöitä ja korkeidentaajuuksienhäviötä (Davis ja Jones 1989, 22).

4.2.2 dBu & dBV

Hyvin usein esiintyvä asteikko on dBu ja sen voi löytää monista mikseristä, sekä muista audiolaitteista. Audiolaitteiden keskustellessa pääsääntöisesti jännitteenmuutoksilla ja kytkeytyessä matalaimpedanssisesta lähdoista korkeaimpedanssiseen sisäänmenoihin ovat tehoarvot toisarvoista tietoa ja ne muuttuvat kiinnostaviksi vasta päätevahvistimien ja kaiuttimien välisessä liikenteessä. Asteikko dBu on kehitetty ilmaisemaan jännitteenmuutoksia ja sen

nolla-arvo on 0,775 voltia. Huom! 0dBm = 0dBu vain, jos vastus on 600 ohmia. (McCarthy 2007, 11–12) (Davis ja Jones 1989, 22)

Toinen jännitettä ilmaiseva-asteikko on dBV, joka on jo hieman harvinaisempi. Se eroaa dBu:sta sillä että sen nolla-arvo on 1 V_{rms}. Näiden kahden asteikon antamat lukemat eivät siis ole suoraan vertailukelpoisia, mutta niiden erotus voidaan laskea joka on 2,21 dB.

$$dB = 20 \times \log(1V \div 0,775V)$$

$$dB = 20 \times \log 1,29V$$

$$dB = 20 \times 0,1105$$

$$dB = 2,21$$

Jos signaalitiellä on laitteita joissa esiintyy molempia asteikkoja, tulee huomioida että 0dBV = 2,21dBu. (McCarthy 2007, 12)

4.2.3 dBFS

Digitaalinen audiolaitteisto alkaa olla jo hyvin yleistä myös konserttitilanteissa. Näin ollen on hyvä myös perehtyä hieman niiden mittareiden toimintaan. Lyhenne dBFS tulee sanoista desibeli ja "full scale" eli täysiskaala. Digitaalistenlaitteiden mittarit ovat usein toteutettu tällä periaatteella. Se tarkoittaa sitä, että ehdoton maksimiarvo on 0dBFS ja jos se taso ylittyy, on signaali käyttökeltontonta. Kaikissa analogilaitteissa on ylioheutusvaraa 0dBu tason yli, mutta digitaalisissa laitteissa ei. Niissä ääni tuhoutuu välittömästi 0dBFS:n jälkeen. (Laaksonen 2006, 138–139)

Analogisten ja digitaalisten laitteiden signaalitasojenkompensointiin on olemassa normi: IEC 60268–18. Normi on laadittu yleisradiokäyttöön ja tallenteidensiirtoon. Siinä kehoitetaan säätämään signaalitie niin, että testiäänän (1 kHz:n siniaalto) taso 0dBu analogilaitteistossa vastaisi tasoa -18dBFS digitaalilaitteistoissa. Tällaisella optimoinnilla saavutamme 18 desibelin ylioheutusvaran myös digitaalilaitteistoon.

Signaalitietä säätäessä on hyvä käyttää jatkuvaa 1 kHz:n testisignaalia, sillä usein mittarit reagoivat signaaliin eritavalla, johtuen niiden vasteajasta. Digitaaliset mittarit reagoivat nopeimpaankin tasopiikkiin, mutta esim. dBu mittari ei välttämättä edes huomaa sitä. (Laaksonen 2006, 139)

Säätäessäsi siis esim. digitaalisen miksauspöydän etuasteita on hyvä muistaa että seuraamasi mittari on usein dBFS mittari ja jos ajat signaalin 0 tasoon tarkoittaa se norminmukaisesti optimoidussa järjestelmässä dBu mittarissa tasoa +18dBu ja keikan alkaessa äänijärjestelmästä ulostuleva äänenpaine ei välttämättä ole Kuulonhuoltoliiton mieleen.

4.2.4 dB SPL

Akustisen äänen mittaroinissa käytetään eniten dB SPL asteikkoa (sound pressure level). Tämä asteikko ilmaisee siis ilmanpaineen muutoksia vallitsevassa ilmanpaineessa. Normaalin kuulovauriottoman ihmisen kuulokynnys on asteikon nolataso eli 0 dB SPL. Lineaarinen arvo sille ilmaistaan dyn/cm^2 , jossa dyn tulee englanninkielen sanasta ”dyne”. Tämä arvo 0 dB SPL:lle on $0,0002 \text{ dyn/cm}^2$ (eli 1:n microbarin paineenvaihtelu). SPL asteikon toinen pää taasen löytyy ihmisen kipukynnyksen tietämiltä, joka on noin 120–130 dB SPL. (McCarthy 2007, 14)

$$Taso(dBSPL) = 20 \times \log \frac{P}{0,0002}$$

$$P = \text{RMS paine microbareina (dyn/cm}^2\text{)}$$

Yllä oleva kaava on hyvä tietää, mutta todellisuudessa sen käyttö keikkatilanteissa on mahdotonta. Äänenpaineita ei mitata laskemalla vaan usein käytetään mittareita ja näiden mittareiden antamat lukemat muodostavat meille käsityksen äänenpaineesta. Mittareita lukiessa on hyvä muistaa että niiden antamat arvot vaihtelevat ja tämä johtuu usein kalibroinnista tai sen puutteesta. Ei siis mielestäni kannata julistaa välittömästi totuutena mittarisi antamaa tietoa, ennekuin olet kalibroinut sen sertifoidulla kalibrointilaitteella.

4.3 Muotokerroin

Mittaroinista puhuttaessa ja niitä seurattaessa on myös hyvä huomioida muotokerroin, josta käytetään englanninkielistä termiä "crest factor". Aiemmin esitetyissä luvissa on esiintynyt lyhenne: *rms*, joka tulee sanoista "root mean square" eli suomeksi neliöllinen keskiarvo. Siniaallon kohdalla se on 70,7 % aallon huippuarvosta. Usein toistetun ohjelmamateriaalin olemukseen kuuluu se, että se ei ole tasaista ja jatkuvaa, kuten siniaalto, vaan se sisältää vaihtelua. Audio, kuten musiikki sisältää kovia iskuääniä, joita sanotaan piikeiksi tai transienteiksi ja ne esiintyvät usein nopealla aikavälillä. Tällaisella materiaalilla rms arvo on noin neljänneksen piikkiarvosta. Näiden piikkien ja rms arvon välisestä suhteesta käytetään nimeä muotokerroin ja se vaihtelee ohjelmamateriaalin mukaan. Pienin mahdollinen arvo on siniaallolla, joka on 3 dB (1,414/1) ja tyypillinen arvo musiikille on 12 dB (4/1). Ja koska äänentoisto järjestelmät myös pyrkivät välittämään iskuääniä on meidän varauduttava riittävään dynaamiseen skaalaan, jotta järjestelmämme pystyvät ne myös lineaarisesti toistamaan. Yliohjausvara on siis varauduttava ja yleinen tavoite on, että kalibroitaessa signaalitietä siniaallolla tulee miellä olla vielä dynaamista skaalaa käytettävissä n. 12 desibeliä siniaallolla saavutetun nollatason lisäksi. (McCarthy 2007, 13–14) (Davis ja Jones 1989, 27)

4.4 Äänenpaine -ilmiö

Rock konsertti voi toiselle ihmiselle olla häiritsevää melua ja toiselle ihmiselle unelmien täyttymys. Äänentoistosta vastaava palvelee mielestäni välittömästi näitä jälkimmäisiä, mutta aiheuttaa myös välilliset seuraamukset ensimmäiselle ihmisryhmälle. Vastuuta ja velvollisuutta syntyy molempiin suuntiin. Paikalla olevien maksavienasiakkaiden kuuloa olisi hyvä pohtia ja pyrkiä välttämään aiheuttamasta sille tarpeettomia vaurioita, mutta toki on hyvä tiedostaa että ympäristökin voi aiheuttaa vaatimuksia äänentoiston suhteen.

Konsertteihin tarjotaan joskus äänenpainerajoituksia ja joskus ei. Harmillisen usein rajoituksen laatija tai antaja on kaupungin virkamies tai nuorisoseuran tapahtumavastaava, joiden ammattiosaaminen ja tietämys harvoin edellyttävät tällaisten rajoitusten laatimista. Rajoitusten antaminen ei kuitenkaan ole

mahdoton tehtävä ja siihen voidaan löytää järkipäisiä syitäkin. Asia, joka mielestäni vaatii tapahtumissa enemmän perehtymistä, on näiden annettujen rajoitusten ja toteutuvien äänenpaineiden mittaaminen ja analysointi, sekä niistä raportointi. Suurten tapahtumien osalta mittauksia suorittavat ammattilaiset, joilla on asiasta huipputietämys ja huippulaitteet. Todellisuuden tilanne on se että joskus rajoissa pysytään ja joskus ei. Ensiarvoisen tärkeää on kuitenkin se, että mittaamista harrastetaan ja tutkimustuloksia aiheesta syntyy ja näin ollen päättävälle taholle voidaan tarjota pätevää materiaalia päätösten tueksi.

Näen, että äänentoistosta vastaavalla henkilöllä on myös käytössään tiettyjä työkaluja äänenpaineen seurantaan ja sen hallintaan. Äänenpaineiden hallinta liittyy pääsääntöisesti äänijärjestelmään liittyviin suunnitelmallisiin ratkaisuihin ja seuranta toteutetaan usein miksauspisteessä mittareiden avustuksella.

4.4.1 Suunnitelmalliset haasteet

Konsertti voi sijaita keskellä asutusaluetta ja on ymmärrettävää että lähistöllä asuvat ihmiset eivät halua nauttia tapahtuman tarjonnasta. Voimme saada ilmoituksen, että esim. äänenpaine lähimmän asumuksen luona saa olla vain 65dBA SPL. Tällöin voimme laskea mahdollisen maksimiäänepaineen miksauspisteellä käyttäen käänteistä neliölakia. Oletetaan että miksauspiste on 30m päässä järjestelmästä ja matkaa asutukseen on 120m. Lasketaan siis käänteisesti:

$$120\text{m} - 120\text{m}/2 = 60\text{ m} \rightarrow 65\text{ dB} + 6\text{ dB} = 71\text{ dB}$$

$$60\text{m} - 60\text{m}/2 = \underline{30\text{m}} \rightarrow 71\text{ dB} + 6\text{ dB} = \underline{77\text{ dB}}$$

Tulos: Miksauspöydällä äänenpaine saisi olla 77dBA SPL.

Kuulostaa mielestäni melko haastavalta jos ajattelemme, että alle 3 metrin päässä oleva pölynimuri pystyy lähes samaan suoritukseen (Davis ja Patronis 2006, 43). Voimme vähentää asuinalueelle välittyvää meteliä pyrkimällä suuntamaan äänentoiston mahdollisimman tarkasti yleisöalueelle ja kääntämällä esiintymissuunnan kaikista kauimmaista asutusta kohden. Todellisuudessa näin usein toimitaankin, mutta sekään ei välttämättä riitä

tuottamaan meille riittävästi pelivaraa. Mielestäni tämä vastuu tuleekin siirtää konsertinjärjestäjän harteille. Tosin, hänelle ja hänen osapuolilleen on edelleen tarjottava pätevää, faktaan pohjautuvaa materiaalia elämää helpottamaan.

4.5 Seuranta

Äänentoiston ammattilainen voi ja hänen tuleekin seurata ilman partikkelien aggressiivista liikehdintää mittaroinin avulla. Tutkitaan nyt joitakin työkaluja ja niiden toimintaperiaatteita.

4.5.1 Äänenpainemittari

Äänenpainemittari antaa tiedon äänenpaineesta desibeleinä jostakin halutusta pisteestä. Mittarin antama tieto sisältää tietyn määrän taajuuksia ja tulos on näiden taajuuksien integraatio. Tulokseen voidaan vaikuttaa erinäisillä aikavakioilla, joilla äänenpainetta voidaan mitata tai eri painotuksilla jotka vaikuttavat tiettyjen taajuuksien näkyvyyttä mittatuloksessa. (McCarthy 2007, 360)

Aikavakiot mielletään dB SPL asteikon alayksiköiksi ja niitä on käytössä seuraavasti:

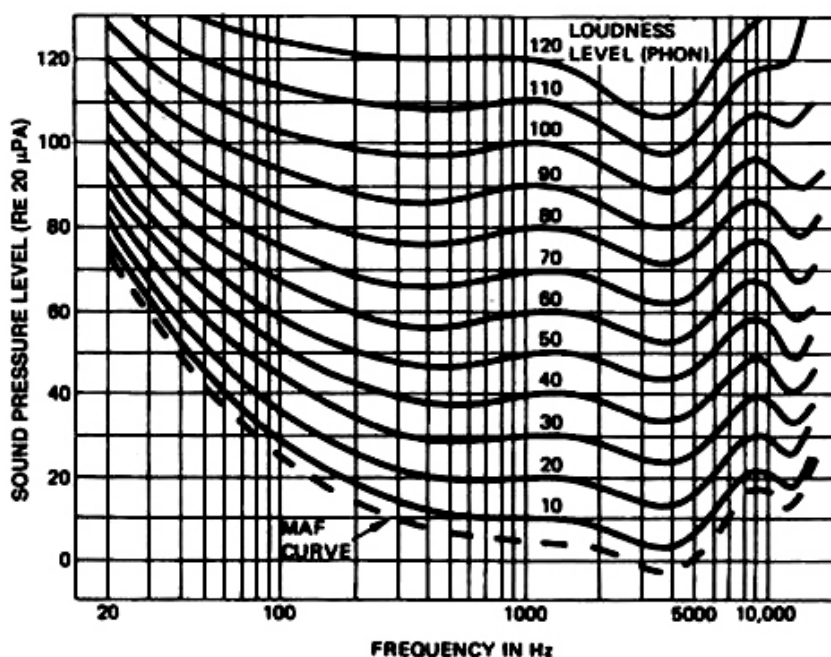
dB SPL peak: Korkein hetkellinen arvo joka saavutetaan mittauksen aikana.

dB SPL jatkuva (nopea): Antaa keskiarvon äänenpaineesta aikavakiolle 250 ms. Aikavakiolla pyritään matkimaan ihmisen kuulon havaintokykyä. Ihmisen kuulo ei havaitse äkillisiä äänentasoja, vaan vähintään n. 100 ms kestäviä tasopiikkejä.

dB SPL jatkuva (hidas): Antaa keskiarvon äänenpaineesta aikavakiolle 1 sekunti. Hitaampi aikavakio pyrkii matkimaan havaintokyvyn altistumista pitempiaikaisille äänille. (McCarthy 2007, 15)

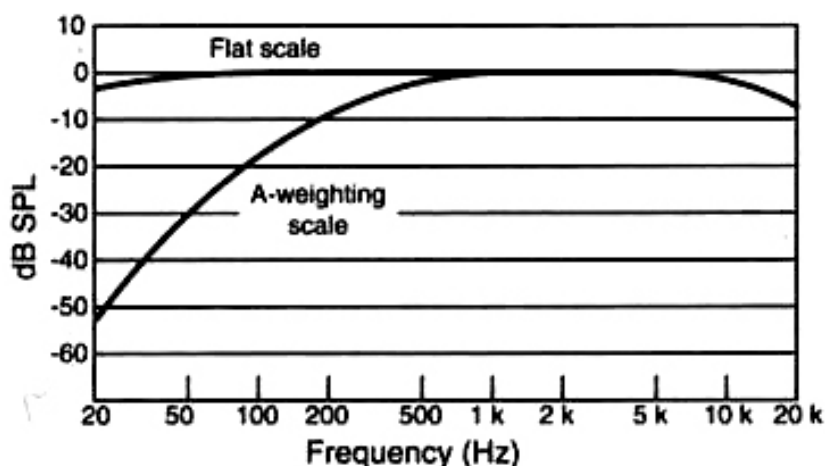
Erilaisten painotusten syntyhistorian syy liittyy ihmisen tapaan kuulla eri taajuuksia äänenpaineen muuttuessa. Herrat Robinson ja Dadson (katso kuva 6.) kehittivät vuonna 1956 käyräjärjestelmän, joka kuvaa ihmisen kuulon suhdetta taajuuksiin eri äänenpaineilla. Käyriä kutsutaan foonikäyriksi. Esimerkkinä tästä voidaan esittää, että taajuuksilla 1 kHz ja 100 Hz on 3dB:n

ero äänenpaineen ollessa 100 dB SPL, joka tarkoittaa sitä että 100 Hz:n taajuuden on oltava 3 dB kovempi, kuin 1 kHz, jotta ihminen kuulisi sen yhtä voimakkaana. Äänenpaineen laskiessa 50 dB SPL, on ero näiden kahden taajuuden välillä 8dB:ä. Näin ollen taajuuksien suhde muuttuu 5 dB esitetyillä äänenpaineilla. Näiden tutkimusten taustalta on syntynyt periaate painottaa äänenpainemittarin tulokset vastaamaan ihmisen kuulokäyrää. (Eargle ja Foreman 2002, 25-26)



Kuva 6. Robinson-Dadson käyrä

Äänenpaineesta puhuttaessa konserttitapahtumissa käytetään lähes poikkeuksetta painotusta A (katso kuva 7.), koska se vastaa eniten sitä painetta joka vallitsee ihmisen tärykalvolla. A – painotus vaikuttaa tulokseen siten, että se huomio vähemmän matalimpia taajuuksia suhteessa muihin taajuuksiin. Ihmisenkuulo reagoi myös eri kestoisiin signaaleihin niin, että esim. 2ms:n kestävä ääni kuulostaa noin 15dB:ä vaimeammalta kuin 200ms:n tai sitä pitempiketoisempääni. (Eargle ja Foreman 2002, 27–28) Näistä syistä konserttitilanteissa suositaan pitkiä aikavakioita ja useimmiten käytetäänkin 1 sekunnin aikavakioita.



Kuva 7. A-painotus ja suoraskaala

4.5.2 Ekvivalentti

Mitattaessa ääntä pelkästään SPL – mittarilla saamme arvoja tiettyjen aikavakioiden esim. 1 sekunnin mukaan. Todellisuudessa konsertit yleensä kestävät kauemmin kuin sekunnin ja näin ollen saamme useita eri voimakuisia tuloksia koko konsertin ajalta, kuten kappaleiden välissä olevat tauot jne. Näistä on usein hankalaa muodostaa keskiarvoa, jos halutaan tietää, paljonko todellinen rasitus kuulolle on tai oli.

Melun mittaamiseen on kehitelty erilaisia tapoja, joista osa perustuu keskiarvollisenenergiankonseptiin. Ajatellaan, että pystyisimme keräämään kaikki A-painotteiset tiedot äänenenergiasta tietyistä pisteistä ja tietyltä aikajaksolta. Jakso voi olla minkä mittainen tahansa esimerkiksi 5 sekuntia ja äänenpaine tällä ajanjaksolla voisi olla vaikkapa 90dBA. Nyt voimme laskea desibeleille ekvivalentin (L_{EQ}) jollekin eri ajanjaksolle esim. tunnille, joka vastaa tätä 5 sekunnin ajanjaksoa. (Davis ja Patronis 2006, 42)

L_{EQ} tulee sanoista ”equivalent level” ja laskentakaava on tämä:

$$L_{EQ} = 10 \log \left(\frac{1}{3600s} \int_0^{5s} \frac{P_A^2}{P_o^2} dt \right)$$

jossa,

P_A = akustinen paine

P_o = akustisen paineen referenssi eli 20 mikropascaliala

3600s = aika intervalli (eli esimerkin 1 h = 3600 s)

Aika monimutkaiselta näyttää ainakin allekirjoittaneelle, mutta onneksi aiheesta on olemassa hieman sievennetty versio, joka näyttää tältä ja on varsin käyttökelpoinen:

$$L_{EQ} = 10 \log \left(\frac{10^{\frac{90}{10}} \times 5s}{3600s} \right) \rightarrow L_{EQ} = 10 \log \left(\frac{5000000000}{3600s} \right)$$

$$L_{EQ} = 10 \log 1388888,89 \rightarrow L_{EQ} \approx 61,43 \text{ dBA}$$

Näin ollen käy ilmi, että 90dBA ääntä 5 sekunnin ajan vastaa 61,43dBA ääntä tunninajan. Äänenpainesuositukset kuulovaurioiden välttämiseksi on usein laadittu tietyille ajanjaksoille. (Davis ja Patronis 2006, 43)

Nykyaikaisilla mittalaitteilla voidaan mitata L_{EQ} arvoja kätevästi konserttipaikalla saaden näin ensikäden tietoa keskiarviollisista äänen aiheuttamista rasituksista, joita kuulijoihin kohdistuu. Ekvivalentin ja äänenpaineen mittaamiselle on laadittu myös erilaisia kansainvälisiä standardeja, kuten IEC-61672-1:2002 ja ANSI 1.4-1983_(R2006). (Anhert Feistel Media Group 2007, 107)

Mittauksessa mittarille ilmoitetaan haluttu aika-arvo, joka on ekvivalentin laskentaperusteena esim. 4 tuntia. Kun mittauksen käynnistää alkaa mittalaite ottaa näytteitä äänestä ja alkaa laskemaan niiden ekvivalenttia suhteessa 4:n tuntiin. Mittaus on siis jatkuva laskentaprosessi, joka tulee käynnistää ja lopettaa haluttuna ajankohtana esim. konsertin päätyttyä.

Usein käytettäessä ekvivalentteja mittaavia laitteita tulee esiin lyhenne L_{AEQ} . Tämän lyhenteen A viittaa käytettyyn taajuuspainotukseen. Huomion arvoinen asia on myös se, että logaritmin kertoimena käytetään lukua 10, koska laskennassa lasketaan akustisen energiantasoa eli tehoa. Tehon suhteita

mittaamaan desibeli on nimittäin alun alkaenkin tarkoitettu. (Davis ja Patronis 2006, 41–43)

4.6 Suosituksia äänenpaineisiin

Mikä on oikea äänenpaine keikalle? Väittäisin kysymystä huomattavasti monipuolisemmaksi, kuin se vaikuttaa. Tulisi ensinnäkin tietää kuka tai ketkä niitä ääniä synnyttävät ja kuka niiden tasosta vastaa, sekä onko niiden luonne lähempänä melua vai elämystä.

Asiaa voidaan mielestäni ajatella muutamalta eri kantilta. Vastuunamme ja tavoitteenamme on saavuttaa tasainen ja riittävä-äänentoisto koko konserttialueelle. Se ei vielä mielestäni ole mahdoton tehtävä, mutta jos ajattelemme että äänentoistomme ei saa ylittää esim. aiemmin esiteltyä 77dBA SPL tasoa alkaa tehtävä käydä perin hankalaksi. Tämän seinän meidän vastaamme rakensi ympäristön aiheuttamat vaatimukset.

Terveydelliset haitat, joita ääni voi aiheuttaa, ovat mielestäni paljon olennaisemmat, koska niiden vaikutukset ovat paljon pysyvämpiä, kuin festivaalialueen läheisyydessä asuvalle ihmiselle aiheutunut univelka liiallisen ympäristömelun seurauksena.

Kuulovaurioiden ehkäisemiseksi on myös olemassa suosituksia, joista nyt viittaaan EU direktiiviin: "Noise-Directive 2003/10/EC", joka käsittelee melulle altistumista työpaikoilla. Direktiivi antaa suuntaa-antavia desibeliarvoja tietyille ajanjaksoille, joiden ylittyessä kuulonsuojaus on suositeltavaa.

Direktiivissä todetaan yleislinjauksena, että vallitsevan äänenpaineen ja kuulonsuojauksen tuottaman vaimennuksen erotuksena syntyvä altistus ei saa olla enemmän kuin 87 dB(A). Luku viittaa normaalin 8 tunnin työpäivänä tapahtuvaa keskiarvollista altistumista. (Bauer ja Böhm 2003, 3-9)

Direktiivin mukaan kuulovaurioita alkaa syntyä hitaasti ja pidemmän altistumisen seurauksena jos taulukon 2. arvot ylittyvät.

Äänenpaine dB A	Ajanjakso
85	8 h
88	4 h
91	2 h
97	30 min
100	15 min
106	3,75 min

Taulukko 2. EU -direktiivin äänenpainetaulukko

(Bauer ja Böhm 2003, 11)

Näitä lukuja silmällä pitäen voimme konserttitilanteessa mitata ekvivalentin esimerkiksi 4 tunnin ajalta, joka siis sisältää myös päivän hiljaiset hetket eli orkesterien vaihdot ja muut vastaavat. Jos pysymme direktiivin antaman 88 desibelin alapuolella, ovat asiat mielestäni mallillaan, jos ajatellaan vaikkapa miksauspisteessä (jossa mittaus todennäköisesti tapahtuu) olevan työntekijän kuulovaurion mahdollisuutta.

Todellisuus on jokaiselle asiakkaalle kuitenkin eri. Oletetaan, että joku innokas fanihenkilö haluaa viettää koko festivaalipäivän esiintymislavan edessä. Tässä tapauksessa kuulovaurioiden riski kasvaa varmasti, jos kuulonsuojausta ei käytetä. Ilman äänentoistoa jo pelkkä ”rock-yhtye” kykenee saavuttamaan 110 desibelin äänenpaineen (Laaksonen 2006 25). Itse siirrän tässä vaiheessa vastuun loppukuluttajalle ja hänen valistamisensa konsertinjärjestäjälle. Itse äänentoistosta vastaava taho voi ottaa roolikseen järjestäjän valistamisen ja ehdottaa hänen suosittelleen kuulonsuojausta lavan läheisyydessä.

Äänentoistolla on mielestäni myös määrällisiä kriteerejä, jotka vaikuttavat lopulliseen äänenpaineeseen. Näillä pyrin viittaamaan tarvittavan vahvistuksen määrään suhteessa lavalta aiheutuvaan vuotoon, jotta tahdottu sanoma pystytään välittämään yleisöön. Tarkennetaan asiaa esimerkillä: Rumpali ja muu orkesteri vahvistamiseen aiheuttavat yksinään esim. 100dBA äänenpaineen lavan etureunan läheisyyteen. Oletettavaa on että ainakin laulun tulisi myös tuohon pisteeseen kuulua. Vaikka vahvistaisimme pelkän laulun eturivin yleisölle, on sen tason oltava vähintäänkin samalla tasolla kuin muun orkesterin (usein kuitenkin enemmän) ja tämä luonnollisesti nostaa

yleisäänepainetta. Tällainen tilanne on todellinen ja siinä mielestäni äänentoiston vastuu on, että laulu saadaan kuulumaan eturiviinkin ja tuo lavalta saapuva melu on orkesterin ja sitä edustavien tahojen ongelma. Äänentoiston tehtävä kun on vahvistaa ääntä ja ymmärrettävästi vaimentavan toimenpiteen suorittaminen äänijärjestelmällä on melko mahdotonta.

5 KAIUTTIMET

Olemme käsitelleet erilaisia äänentoistoon liittyviä haasteita. Siirtykäämme käsittelemään laitteita, jotka ottava haasteet vastaan eli kaiuttimia. Kaiutin on äänentoistoketjun viimeinen sähköakustinen laite, jolla on melkoinen taakka kannettavanaan. Kaiuttimen tehtävänä on elektronisen energian muuttaminen akustiseksi vahvistimen avustuksella ja pyrkiä suuntaamaan akustinen energia väliaineen, eli ilman kautta usein laajallekin yleisöalueelle. Tämän akustisen energian välittäminen tulisi tapahtua mahdollisimman tasapuolisesti kaikkialle yleisöalueille. Yksittäiselle kaiutinelementille tämä kuulostaa aika kovalta haasteelta, jos huomioidaan toistoon teoreettisesti tarvittavat taajuudet. Eli ihmisen kuuloalue, joka on kymmenen oktaavia, toisin sanoen 20 Hz – 20 kHz. (Davis ja Patronis 2006, 255)

Fysiikanlakien todellisuus ei kuitenkaan mahdollista sellaisen elementin olemassaoloa, joka kykenisi suoriutumaan kaikista tarvittavista taajuuksista tasapuolisesti ongelmitta. Tästä syystä vastuuta onkin usein jaettu eri kaiutinkomponenttien kesken, jakaen erikokoiset elementit usein kahteen tai useampaan toistoalueeseen. Näin syntyy tilanteita, jolloin toistettava kaista on jollain tapaa rajattava erilaisten suotimien avulla, päästen optimaaliseen toistoon. (Davis ja Patronis 2006, 255)

Kaiutinkomponenttien ja niiden koteloiden fyysiset ominaisuudet vaikuttavat toistettaviin taajuuksiin. Taajuuksien jakaminen oikeille elementeille oikeanlaisilla jakosuotimilla ei ole tehtävä johon olisi ryhdyttävä keikkatilanteessa. Mielestäni kuulu se suoritettavaksi kaiutINVALMISTAJIEN toimesta, joilla toimenpiteet perustuvat tutkittujen tulosten perusteella tehtyihin ratkaisuihin. Pyrin keskittymään käytännöllisempään informaatioon, joka koskettaa enemmänkin suorittavaa osapuolta. Perehdyn erilaisiin

kaiutintyyppeihin ja pyrin tuottamaan hyödyllistä informaatiota niiden käyttämiseen.

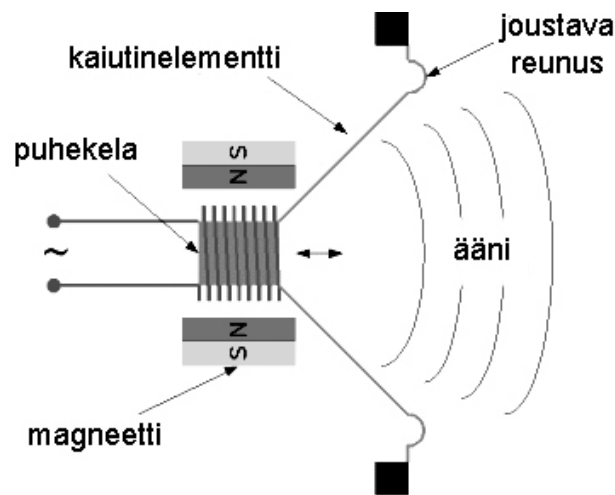
Kaiuttimet voidaan pääsääntöisesti jakaa suorasäteilijöihin ja torvikuormitettuihin kaiuttimiin. Tarkempi jaottelu riippuu elementin liikkuvanosan koosta ja muista rakenteellisista ratkaisuista. Kaiuttimista puhutaan usein toistoalueittain ja yleisesti ne jaetaan mataliin, keski- ja korkeisiin taajuuksiin. (Davis ja Patronis 2006, 255)

5.1 Elektromagneettinen muunnin

Kaiutin siis muuntaa sähköä akustiseksi ääneksi ja tämän muunnoksen aikaansaamiseksi voidaan käyttää eri metodeja. Yleisimmät alalla käytetyt ratkaisut perustuvat elektromagneettiseen muunnokseen ja piezoelektroniseen muunnokseen, joista aiempi on kaikkein yleisin. (Davis ja Jones 1989, 210)

Elektromagneettisella muunnolla toimivassa kaiuttimessa (katso kuva 8.) on eräänlainen mäntänä värähtelevä kartio, joka muodostuu magneetista ja puhekela. Tämä kartio on kiinnitetty kaiutinkomponentin runkoon joustavalla ripustuksella. (Holm ja Joenpolvi 2004, 113–114)

Sylinterin liikkeen saa aikaiseksi kaksi eri magneettikenttää, joista toinen on staattinen (magneetti) ja toinen vaihteleva (puhekela). Puhekela ja magneetin muodostamaan sylinteriin saadaan yhdensuuntaista liikettä, kun puhekelaan ruvetaan ajamaan tasavirtaa. Näin puhekelaan syntyy toinen magneettikenttä, jonka polariteetti riippuu syötetyn materiaalin polariteetista. Elektromagneettinen kenttä, jonka puhekela aiheuttaa, reagoi kiinteän magneetin kanssa. Ja koska kiinteän magneetin kiinnitys on pysyvä, pyrkii puhekela liikkumaan. Jos virran polariteetti kääntyy, niin myös elektromagneettisen kentän polariteetti kääntyy ja näin ollen puhekelan suunta muuttuu. Ja kun syötetyn virran elektroninen ”suunta” on vaihtelevaa (vaihtovirtaa), kuten äänellä on (katso kuva 1.) on puhekelan liike edestakaista. Edestakaisin liikkuva kela liikuttaa kaiutinelementtiä, joka taasen liikuttaa ilmaa muodostaen ilmanpaineenvaihtelua eli ääntä. (Davis ja Jones 1989, 210)



Kuva 8. Elektromagneettinen muunnin, kirjaimet N ja S ilmaisevat magneetin napaisuutta (North & South).

5.2 Kaiutintyypit

Erilaisten taajuuksien toistamisen tarvitaan erilaisia kaiutintyyppejä. Seuraavassa osiossa käsitelläänkin markkinoilla olevia ratkaisuja, joita kaiutinvalmistajat hyödyntävät. En käsittele kaikkia mahdollisia ratkaisumalleja, vaan eniten konserttikäytössä esiintyvät tyypit ja rakenteet.

5.2.1 Kartionkaiutin

Kartiokaiutinta eli ns. suorasäteilijää käytetään useimmiten matalien ja keskitaajuuksien toistoon (Holm ja Joenpolvi 2004, 113). Toistettavat taajuudet vaativat fyysisiä ominaisuuksia kaiuttimelta. Matalat taajuudet toistukseen vaativat saada paljon ilmaa liikkeelle ja kaiuttimen osalta se tarkoittaa sitä, että kartioin liikerata tulee olla riittävän pitkä ja kartion pinta-alan riittävän laaja, jotta halutut aallonpituudet välittyvät väliaineeseen eli ilmaan (Davis ja Jones 1989, 212). Kartiokaiuttimien kartion halkaisijat vaihtelevat 5 tuumasta (127 mm) jopa 21 tuumaan (5334 mm) riippuen toistettavasta taajuusalueesta (Eargle ja Foreman 2002, 113).

Kartionhalkaisijalla on vaikutus mm. elementinsuuntaavuuteen. Halkaisijan ollessa yhtä suuri, kuin jonkin taajuuden aallonpituus, on kaiuttimen suuntaavuus tällöin 45° . Tämä tarkoittaa, että 45° sektorin ulkopuolella

äänenpaine on pudonnut noin 6 dB. Tällaisen kaiuttimen suuntakerroin (Q) on 10. Tästä matalammilla taajuuksilla suuntakuvio laajenee kohti ympärisäteilevyyttä ja korkeammilla taajuuksilla taasen kapenee radikaalisti. (Davis ja Jones 1989, 214)

Kaiuttimen polariteetilla on todellakin merkitystä, kuten aiemmin on mainittu. Väärinkytketyt kaiutinelementit eivät ole vaihtoehto. Jos kytkentä epäilyttää, voi polariteetin helposti testata 9 voltin paristolla. Toimi näin: kytke pariston + ja – napa elementin + ja – napoihin. Nyt elementin tulisi liikkua eteenpäin eli ulospäin ja jos kytket liitännät ristiin, liikkuu elementti sisäänpäin. Sillä ei teoriassa ole merkitystä minkä värinen johto on – ja mikä +, kunhan kaikki elementit ovat kytketty samalla tavoin. Useimmiten käytetään kuitenkin punaista väriä kuvaamaan + johdinta ja mustaa kuvaamaan – johdinta. (Davis ja Jones 1989, 213)

5.2.2 Kotelonmerkitys

Kartiokaiutin vaatii järkevästi toimiakseen kotelon, joka eristää etu ja takapuolen tuottamat ilmanpaineenvaihtelut toisistaan. Ilman eristystä pyrkivät ne kumoamaan toisensa (Holm ja Joenpolvi 2004, 117). Kumoutuminen on suurinta matalilla taajuuksilla, koska ne kykenevät kiertämään elementin ja summautumaan toisella puolella syntyviin ääniin, muodostaen vaihevirheitä. Jos kiinnitämme elementin levyyn kasvaa etäisyys kaiuttimen etupuolelta takapuolelle ja vaimentuma vähenee. (Davis ja Jones 1989, 214–215)

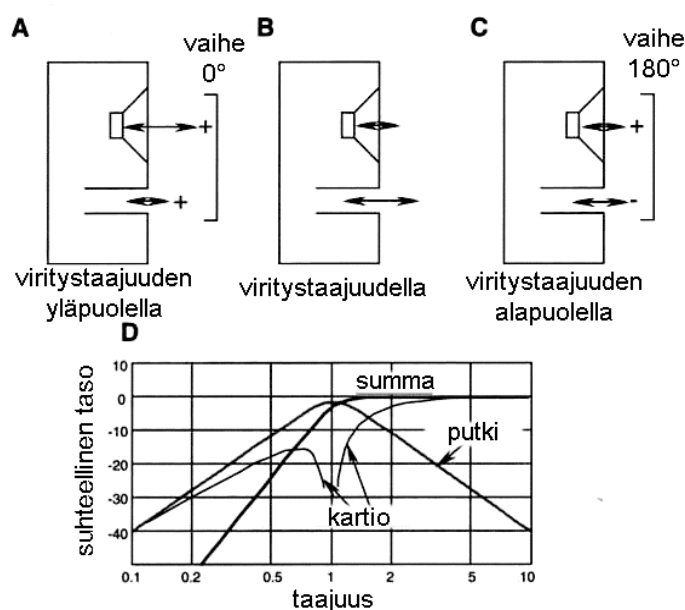
Koteloina käytetään useimmiten umpikoteloita ja ns. refleksikoteloita. Umpikotelo on siis umpinainen rakenne, johon elementti on kiinnitetty ja siinä kaikki ääni tulee kaiutinelementistä ja näin ollen kotelo itsessään ei synnytä mitään ääntä (Holm ja Joenpolvi 2004, 120).

Refleksikoteloita käytetään usein bassotaajuuksien toiston parantamiseen. Koteloiden rakenne toimii ns. Helmholtzin resonaattorina, joka tarkoittaa sitä että poiketen umpikotelosta on koteloon rakennettu lisäksi ulostuloaukko ns. refleksi-aukko/-putki kotelon sisältä. Ideana tässä on se, että elementistä taaksepäin lähtevät ääni vahvistaisi etupuolelta tulevaa ääntä. Näin

saavutetaan suurempi akustinen energia pienemmällä kartionliikkeellä. (Davis ja Jones 1989, 215–216)

Riippuen kotelon tilavuudesta ja putkesta syntyy kotelosta resonaattori jollekin tietylle taajuudelle (viritystaajuus). Tämän tavoitteena on mahdollistaa parempi matalientaajuuksientoisto ilman liiallista kartion liikepoikkeamaa (Davis ja Jones 1989, 215–216).

Kuvassa 9. näemme refleksikotelon toiminnan eri taajuuksilla. Kohdassa A on tilanne, jossa olemme viritystaajuuden yläpuolella. Tällöin refleksi-putkesta tulee vain vähän ilmaa ja resonointia ei juuri tapahdu ja näin ollen suurin ääni syntyy elementistä. Kohdassa B olemme halutulla viritystaajuudella ja nyt resonointi on suurimmillaan. Elementinliike on suhteellisen vähäistä, mutta kotelon resonointi tuottaa eniten ääntä. Eli elementti pikemminkin "ajaa" koteloa joka "ajaa" putkea, josta ääni muodostuu. Kohdassa C olemme viritystaajuuden alapuolella, jolloin elementistä tuleva ääni ja kotelonresonanssi pyrkivät kumoamaan toisensa. Tämä ongelma ratkaistaan suodattamalla pois kaiuttimelle syötetystä signaalista viritystaajuuden alapuolella olevat taajuudet. Kohdasta D näemme putken ja kartion, eli elementin säteilyntasosuhteen verrattuna viritystaajuuteen. (Eargle ja Foreman 2002, 116-117)



Huom: Taajuuden lukema 1 = viritystaajuus.

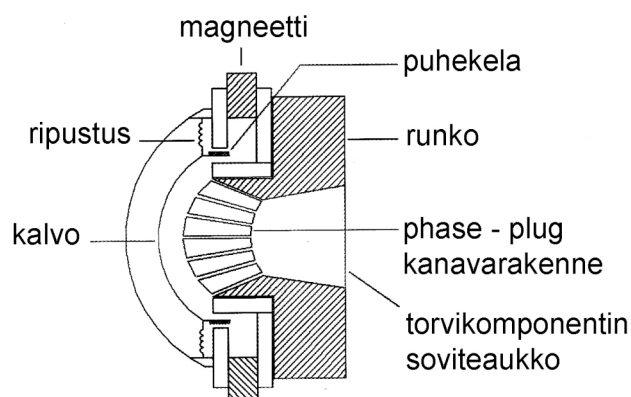
Kuva 9. Refleksikotelon toiminta

5.2.3 Kompressio-ohjain

Kompressio-ohjaimia käytetään korkeiden- ja keskitaajuuksien toistoon. Kompressio-ohjaimet toimivat samankaltaisella elektromagneettisella muunnoksella, kuin suorasäteilijätkin, mutta rakenteellisissa ratkaisuissa on eroavaisuuksia. (Holm ja Joenpolvi 2004, 114)

Äänentoistossa korkeiden taajuuksien toistoon käytetään useimmiten torvikuormitettuja kaiuttimia. Kompressio-ohjain löytyy usein tällaisen torven toisesta päästä. Ohjaimesta syntyvä ääni pakotetaan akustisesti korkean vastustuksen omaavan torveen, jolloin syntyy ilman kompressoitumista. Tästä ohjaimen nimikin on muodostunut. Kuten kuvasta 10. näemme, on kalvon halkaisija suurempi kuin kanava, johon ääntä pyritään syöttämään. (Davis ja Jones 1989, 218)

Kompressio-ohjaimen kalvolle ei liiemmin turhaa liikkumatilaa ole suotu, mutta ei se sitä myöskään tarvitse, koska toistettavat aallonpituudet ovat verrattain lyhyitä. Aallonpituuksien lyhyys aiheuttaa myös ongelman, jota ratkaisemaan on asennettu ”phase-plug” – kanavarakenne (katso kuva 10.). Tämä kanavointi tasoittaa kalvolta pyrkivien ääniaaltojen kulkuaikaeroja, jotta ne saapuisivat samanaikaisesti torvikomponentin soviteaukko. Hyvin suunniteltu vaiheplugi minimoi korkeidentaajuuksien vaihevirheet ennen torveen pääsyä. (Davis ja Jones 1989, 218)



Kuva 10. Kompressio-ohjain

5.2.4 Torvikuormitus

Kaiuttimissa käytettävillä torvirakenteilla on kaksi pääsääntöistä roolia. Ne pyrkivät suuntaamaan ääntä johonkin tiettyyn suuntaan ja jakamaan sen tietylle alalle. Ne toimivat myös akustisina impedanssinsovittajina. Vertaus voidaan tehdä perinteiseen sähkömuuntajaan, jossa ensiössä (torven alkupäässä) jännite (akustinen paine) on suuri mutta virta (ilman partikkelien liike) pieni ja taas toisiossa (torven suuaukko) jännite on pieni ja virta suuri. Näin ollen voimme päätellä, että torvikuormitetusta kaiuttimesta saadaan enemmän ääntä pienemmällä määrällä virtaa. (Davis ja Patronis 2006, 277)

Torvirakenteita äänentoistollisesti on eniten hyödynnetty korkeiden ja keskitaajuuksien toistossa. Alun alkaen torvirakenteita käytettiin suurissa elokuvanäyttämöissä jo 1930 luvulla. Näissä tiloissa äänentoiston tuli kattaa laajoja horisontaalisia aloja ja myös vertikaalinen kattavuus tuli olla riittävä, jotta kaikki yläkatsomot saatiin katettua. Silloin tiloihin suunniteltiin monisoluisia torviratkaisuja, joissa saattoi olla jopa viisi torvea vierekkäin ja kolme päällekkäin. Näissä rakenteissa suurin ongelma oli yli 2 kHz taajuuksien tasainen toisto, joissa vaihtelu saattoi olla jopa 10 desibelin luokkaa. Nykyisin tällaisia torvisuunnittelundinosauruksia näkee harvoin, jos koskaan. (Eargle ja Foreman 2002, 133).

Muita torvirakenteita on mm. eräänlaiset sektorimaisensäteilyn omaavat torvet (engl. "radial horns"). Tällainen torvi aukeaa horisontaalisti verrattain laajalle alalle, kun taas vertikaalinen aukeaminen on vähäistä (Eargle ja Foreman 2002, 133). Torven suuntaavuutta voidaan ajatella eräänlaisena kolmiulotteisena sektorina, jossa ylhäältäpäin katsottuna torvi aukeaa tietyssä kulmassa laajeten etäisyyden kasvaessa. Pystyakselilla torvi taasen pyrkii säilyttämään tasaisen suoramuodon. Näissä torvissa vertikaalinen suuntakuvio pyrkii kaventumaan tasaisesti aina 4 kHz jälkeen ja torvia usein käytetäänkin tilanteissa, joissa ei vaadita tarkkaa vertikaalista vastetta (Eargle ja Foremann 2002, 134).

Hyvin yleinen torvirakenne nykypäivänä on tasasuuntaava torvi, joka pyrkii säilyttämään sekä vertikaaliset ja horisontaaliset säteilykulmansa vakioina

mahdollisimman suurelle taajuusalueelle. Rakenteeltaan torvi muistuttaa kellomaista muotoa. (Davis ja Jones 1989, 221)

Tasasuuntaavia torvia esiintyy useiden eri valmistajien kaiuttimissa ja niitä esiintyy monissa erikokoisissa ratkaisuisissa. Torville ilmoitetaan jotkin aukeamiskulmat, jotka ilmaisevat minkäläisen, teoreettisesti taajuuksittain tasaisen, säteilyn torvi muodostaa. Vaikkakin malleja on monia, on niillä yhteisiä fysiikan aiheuttamia yhtäläisyyksiä. Torven fyysinen koko on verrannollinen suuntakuviolle tapahtuviin ilmiöihin. Torven suuaukon koosta riippuen syntyy tietylle taajuudelle kaventuma, jonka jälkeen taajuuksittain alemmas mentäessä tori menettää suuntaavuuttaan. Tämä johtuu siitä että torven fyysinen koko ei enää kykene suuntaamaan ääntä vaan ääni pyrkii taittumaan omaehtoisesti. Korkeilla taajuuksilla tulee vastaan kohta, jossa säteily pyrkii kaventumaan. Tämä kohta on riippuvainen kompressio-ohjaimen ulossäteilyaukosta ennen torvikomponentin soviteaukkoa. Mitä isompi reikä, sitä matalampi on se taajuus, jolla kaventuma alkaa tapahtua. (Eargle ja Foreman 2002, 138-139)

Torven vakiosuuntaavuuden todellinen alarajataajuus voidaan laskea yksinkertaisella kaavalla:

$$f_0 = \frac{10^6}{Xh}$$

jossa,

f_0 = alarajataajuus

X = kaiuttimelle ilmoitettu säteilykulma, jonka ulkopuolella taso vaimenee 6 dB

h = torven suuaukon mitat tuumina

Laskenta tulee suorittaa erikseen horisontaaliselle ja vertikaalisille säteilykulmille.

(Eargle ja Foreman 2002, 139)

Myös bassotaajuuksille suunnitelluissa kaiuttimissa saattaa esiintyä torvirakenteita, joilla voidaan tehostaa niidenkin toimintaa. Yllämainittuja rakenteita ei kyllä juurikaan näe. Ymmärrettävästi torvien tulisi kooltaan olla melko järjenvastaisia toimiakseen, jos huomioidaan että torven suuaukon tulisi halkaisija olla vähintään $\frac{1}{4}$ aallonpituudesta ($50 \text{ Hz} = \lambda \cdot 6,8 \text{ m} \rightarrow \frac{1}{4} = 1,7 \text{ m}$). Niinpä on olemassa ns. kaiutin koteloihin poimutettuja torvirakenteita, joilla pystytään pienentämään torven fyysistä kokoa. (Davis ja Jones 1989, 217)

Torvikuormituksella pystytään saamaan enemmän äänenpainetta pienemmällä tehomäärällä halutulle alueella ja, kun huomioidaan vielä kompressio-ohjaimen perin kelvollinen hyötysuhde, niin näiden yhteisvaikutuksella saavutetut äänenpaineet nousevat verrattain hyvinkin korkealle (Holm ja Joenpolvi 2004, 115–116). Tämä kaikki ei tietenkään tule ilman haittavaikutuksia, sillä ilmankompressoituminen ei ole lineaarinen ilmiö. Siitä johtuen torvessa tapahtuva puristautuminen aiheuttaa aina tietyn määrän säröä etenkin kovilla äänenpaineilla. Torvi itsessään voi myös aiheuttaa epämiellyttävää resonanssia tietyille taajuuksille (Davis ja Jones 1989, 221). Jätetään näiden ongelmien ratkaiseminen kaiutinvalmistajien tehtäväksi ja siirrytään miettimään kuinka esiteltyt kaiutinkomponentit muuntautuvat vaikkapa toimivaksi kokoaluekaiuttimeksi.

5.3 Jakosuotimet ja prosessointi

Aiemmin sysäsimme jakotaajuuksien suunnittelun kokonaan suoritettavaksi valmistajien toimesta. Olen edelleen asiasta samaa mieltä, kun nyt ymmärrämme edes hitusen niistä monimutkaisista akustisista haasteista, joita kaiuttimenrakentamiseen kuluu. Ihan puhtaasti autopilotilla ei tässä tilanteessa mielestäni kuitenkaan kannata liidellä, sillä loppukäyttäjän olisi hyvä ainakin tietää millä taajuuksilla jaot esim. bassokaiuttimien ja muiden järjestelmän osien välillä tapahtuu. Tämä tieto tarvitaan jotta pystytään ymmärtämään koko järjestelmän akustista käyttäytymistä. Harvemmin kaikki mahdollinen ääni, jota järjestelmä tuottaa syntyisi samassa akustisessa pisteessä.

Jakosuotimet ovat siis myös akustinen ilmiö. Se teoria joita käyttöohjekirjat tarjoaa, ei välttämättä toteudu akustisessa ympäristössä samalla tavoin. Tämä

johtuu kaiuttimiin kohdistuvista kulkuajakaaroista suhteessa kuulijaan, joka on usein tulos kaiuttimien sijoittelusta tai heijastuksista. Loppukäyttäjän on siis tiedettävä ainakin jakopisteet pystyäkseen optimoimaan järjestelmä niin, että turhilta vaihevirheiltä vältetään ja jaot toteutuvat myös käytännön elämässä. (McCarthy 2007, 87)

Kaiuttimien ja kaiutinelementtien välisten vastualueiden jakamiseen käytetään joko passiivisia tai aktiivisia jakosuotimia. Näiden eroavaisuudet ovat yksinkertaisuudessaan seuraavanlaiset. Passiivijakosuodin tarkoittaa laitetta, joka on rakennettu kaiuttimen sisälle ja se toimii kaiutintasoisella signaalilla. Suotimella ei voida korostaa, vaan kaikki korjaukset ovat luonteeltaan vaimentavia ja tämä tarkoittaa sitä, että toteutus tapahtuu epäherkimmän komponentin ehdoilla. Korostusta haluttaessa tietylle kaistalle on vaimennettava muita. Aktiivijakosuodin on taas erillisillä elektronisilla ratkaisuilla toteutettu suodin, joka operoi signaalia ennen siirtymistä tehovahvistimelle. Näin ollen haluttu taajuuskaista saa kokonaan oman vahvistinkanavan ja komponenttien välisiä suhteita voidaan muokata mielivaltaisesti. (Holm ja Joenpolvi 2004, 122–126)

Jakosuotimien tarkoitus on myös suojella kaiutinta, jottei se pyrkisi toistamaan taajuuksia, jotka ovat sille fysiikan mukaan mahdottomia. Kaiuttimia suojaamaan on myös muita laitteita mm. limitterejä. Limitterit ovat kehitetty suojaamaan kaiutinta siihen kohdistuvilta uhkilta, jotka pääsääntöisesti ovat kuumuus ja mekaaninen trauma. Limitterin tehtävä yksinkertaisuudessaan on estää liian voimakkaan signaalin pääsy tehovahvistimeen. Se ei siis salli signaalin nousta jonkin ennalta asetetun tason ylitse. Limitterin reagoimisaika vaikuttaa sen toimintaan. Suojatakseen kaiutinta lämpöhaitoilta käytetäänkin ns. RMS limitterejä, jotka pystyvät seuraamaan pitkällä ajalla tapahtuvia lämpötiloja ja niiden toiminta perustuu tehohäviön seurantaan. Mekaaninen trauma syntyy usein liiallisesta liikkeestä, joka kohdistuu kaiutinelementtiin ja on näin ollen luonteeltaan äkkipikaista. Näitä uhkia vastaan taistelevat laitteet, joita voidaan kutsua piikki ("peak") limittereiksi. Ideaalitulanteissa limitterit ovat kalibroitu toimimaan kaiutinelementtien fyysisten ominaisuuksien ehdoilla. Nykyaikaisessa kaiutinprosessoinnissa onkin jo kahdensuuntaista liikennettä vahvistimen ja kaiuttimien välillä. Tällöin mm. lämpövahingoilta suojelevat

laitteet saavat ensikädentietoa suoraan kaiuttimen ja vahvistimen välisestä liikenteestä pystyen toimimaan ikään kuin ennustaen. (McCarthy 2007, 28–30)

Nykyaikainen kaiutinprosessointi tapahtuu kaiuttimelle varta vasten suunnitellulla prosessorilla, jolloin yllämainittuja suojoitimia voidaan tehokkaasti harrastaa. Kaiutinkohtaiset prosessorit ovat nykyisin usein tietyillä tapaan suljettuja laitteita, joka tarkoittaa sitä että joihinkin asetuksiin ei ole edes mahdollista enää päästä käsiksi, kuten esim. jakotaajuudet ja jakosuotimien tyypit. Prosessointi on nykyisin yhä useamman valmistajan toimesta toteutettu digitaalisesti, joka mahdollistaa sen, että jokaiselle vahvistinkanavalle on mahdollista saada omat prosessointi parametrit (esim. taajuuskorjaimet, viiveaikojen säätömahdollisuudet jne.). Kaiuttimien vaihtuessa voidaan vahvistimesta valita suoraan sille soveltuvat tehtaalla tehdyt perusprosessointiasetukset. (McCarthy 2007, 30–31)

5.4 Kaiuttimen parametreja

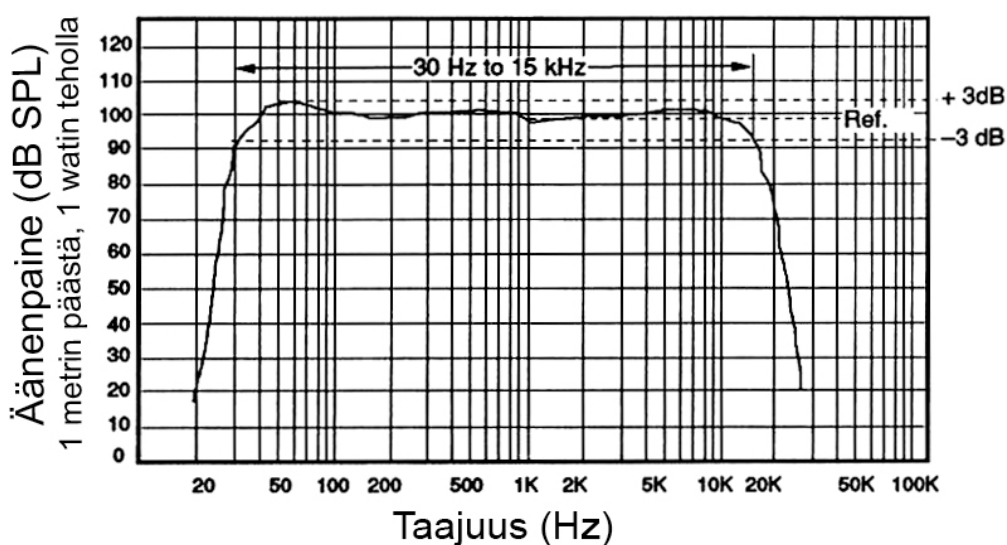
Kaiutin valmistajat monesti ilmoittavat kaiuttimelleen erilaisia ominaisuuksia ja teknisiä tietoja. Tarkastellaan seuraavassa osiossa mitä ne usein ovat ja mitä ne tarkoittavat.

5.4.1 Taajuusvaste

Taajuusvasteella tarkoitetaan taajuuksittain toteutettua vertailutietoa kahdesta signaalista. Vertailu suoritetaan kaiuttimen akselilta mitatun äänenpaineellisen arvon ja sisään syötetyn tehon välillä. (Davis ja Jones 1989, 230)

Taajuusvaste voidaan ilmoittaa esim. seuraavalla tavalla: **30 Hz – 15 000 Hz, ± 3 dB**. Tämä kertoo meille sen, että kaiutin on kykenevä toistamaan taajuudet välillä 30 Hz ja 15 000 Hz ilman sähköisiäkorjaimia. Luku ± 3 dB kertoo, että valitulla taajuuskaistalla vertailusignaalien antaman tuloksen taajuuksittainen vaihtelu mahtuu kokonaisuudessa 6dB:n kokoiseen ikkunaan. (Davis ja Jones 1989, 230)

Taajuusvaste voidaan esittää myös graafisesti (kuva 11.). Se kuvaa suhteellisen normaalin kaiuttimen taajuusvastetta. Kuvassa vaaka-akselilla on taajuudet ja pystyakselilla äänenpaine taso mitattuna metrin päässä kaiuttimesta 1 watin teholla ajettuna. Kuvitettuja taajuusvasteita tarkastellessa tulee tarkastella eritoten skaalaa, jolla tasoeroja esitellään. Esimerkkikuvassa kahden viivan väli on jo 10 dB, mikä johtaa siihen että taajuusvasteen graafinen ilme rauhoittuu ja näyttää silmällä katsottuna tasaisemmalta. Kohdatessa siis erittäin tasaiselta näyttävän taajuusvasteen voi sen tasaisuus todellisuudessa johtua tästä optisesta harhasta. (Davis ja Jones 1989, 231)



Kuva 11. Taajuusvaste

Kaiuttimen taajuusvaste luonnollisesti vaikuttaa suoraan siihen miltä kaiutin kuulostaa. Näin ollen graafinen esitys on parempi tapa kuvata kaiuttimen taajuusvastetta. Siitä voimme nähdä millä alueilla saattaa ilmentyä korostumia ja vaimentumia ja kuinka suuria ne ovat. (Davis ja Jones 1989, 231)

5.4.2 Tehonkesto

Kaiuttimelle usein ilmoitettu tehonkesto yksinkertaisuudessaan kertoo kuinka paljon kaiuttimeen saa tehoa syöttää, jotta se ei vaurioidu. Tapa millä tehonkestoja yleensä ilmoitetaan, ei sitten olekaan aina täysin sama. Kaiuttimelle ilmoitetaan usein kaksi eri tehonkesto lukua, joista toinen viittaa jatkuvaan rasitukseen ja toinen hetkelliseen rasitukseen. Kaiuttimien

käyttöohjekirjoja tarkastellessa ei usein selviä millaisella signaalilla esim. jatkuva tehonkesto on mitattu. Kyseessä voi olla yksittäinen siniaalto tai jonkin sortin ohjelma materiaali, joka pyrkii imitoimaan monimutkaista äänisignaalia (esim. musiikkia). Siniaalloilla tehtyjä mittauksia kutsutaan usein RMS arvoiksi ja niillä saadut arvot ovat usein pienempiä kuin ohjelmamateriaalilla mitatut. (Davis ja Jones 1989, 232)

Hetkellinen tehonkesto viittaa aiemminkin esiteltyyn kaiuttimeen kohdistuvaan uhkaan, joka oli liiallinen liikepoikkeama. Jatkuva tehonkesto taas viittaa kaiuttimen lämpenemisestä liittyviin haittoihin. (katso. kappale jakosuotimet ja prosessointi)

Kaiuttimen tehonkesto voi olla ilmoitettu esimerkiksi seuraavasti:

"Power handling capacity (RMS / peak 10 ms):.....400/1600 W"

(D&B Audiotechnik 2004, 7)

Tästä voimme päätellä, että mm. hetkellinen tehonkesto on mitattu 10 millisekuntia kestäväällä signaalilla.

Tehonkestoarvot ovat hyvä tietää silloin jos on tarve löytää kaiuttimeen soveltuva vahvistin. Yhteensopivuus on tärkeää, sillä jos ajamme kaiutinta liian pienitehoisella vahvistimella, ei kaiutin pääse toimimaan koko kapasiteetillään. Tämä voi johtaa siihen että pieni vahvistin ajetaan säröille, saavuttaaksemme riittävän äänentason. Vahvistimen säröytyessä saa kaiutin toistettavakseen sellaista harmonista sisältöä, joka voi johtaa ylikuumentumiseen ja sitä kautta vaurioihin. Liian suurella vahvistimella voidaan taas kaiuttimelle aiheuttaa liian suuri liikepoikkeama, joka voi johtaa taas mekaaniseen traumaan. (Davis ja Jones 1989, 232)

5.4.3 Herkkyys ja hyötysuhde

Kaiuttimella on tietty herkkyys. Se on monesti ilmoitettu äänenpainelukemana (dB SPL), joka on mitattu 1 metrin päästä kaiuttimesta ja käyttäen 1 watin vahvistusta. Tällaiseen merkintään tosin liittyy muutama ongelmakohta.

Mittamikrofoni tulisi olla sijoitettuna suoraan elementin eteen kaiuttimen akselille. Asia on yksinkertainen jos kaiuttimessa on yksi elementti ja kaskitiekaiuttimen eteen asetettaessa on sen paikka elementtien välissä. Kaiuttimet, joissa on kolme tai useampia elementtejä muodostavat ongelman sillä pieni muutos mittamikrofonin sijoittelussa muuttaa tulosta. Olemmehan kuitenkin vain metrin päässä kaiuttimesta. Myös syötetyn tehon (1 watti) toteutuminen ja sen mittaaminen ovat myös ongelma. Kaiuttimen käyttämään tehoon vaikuttaa impedanssi. Usein kaiuttimille on olemassa jokin ominaisimpedanssi (esim. 4ohm). Todellinen impedanssi kuitenkin muuttuu taajuuksittain ja näin ollen riippuen kaiuttimeen syötetyn signaalin sisältämistä taajuuksista, vaihtelee todellinen tehonkulutuskin. (Davis ja Jones 1989, 232)

Herkkyyttä ei myöskään saa sekoittaa hyötysuhteeseen, sillä riippuen kaiuttimen suuntaavuudesta suuntautuu myös sen tuottama akustinen energia. Kaiuttimella, jolla on pienempi herkkyys, mutta suuri säteilykulma, voi hyötysuhde olla suurempi kuin kaiuttimen, jonka säteilykulma pieni, mutta herkkyys suuri. Hyötysuhteella tarkoitetaan prosentuaalista arvoa suhteessa syötettyyn tehoon, jonka kaiutin kykenee muuttamaan akustiseksi tehoksi ja säteilemään sitä. Herkkyydellä on kuitenkin merkitystä, sillä jos muistamme desibeliä käsitelleestä kappaleesta että 3 dB muutokseen tarvitaan tehon kaksinkertaistuminen. Otetaan kaksi kaiutinta, joista toinen on 3 dB toista herkempi ja ajetaan sitä 50 W teholla, jotta saisimme epäherkemmästä kaiuttimesta saman äänenpaineen, on meidän ajettava sitä 100 W teholla. (Davis ja Jones 1989, 233)

Nykyaikainen ja mielestäni hyvä tapa ilmoittaa herkkyyttä ja kaiuttimen hyötysuhdetta voi olla esimerkiksi seuraavanlainen:

Max. sound pressure (single cabinet, 1 m, free field) with D12	138 dB
Max. sound pressure (single cabinet, 1 m, free field) with E-PAC	134 dB
	(SPLmax peak, pink noise test signal with crest factor of 4)
Input level (100 dB-SPL/1 m).....	-17 dBu

(D&B Audiotechnik 2004, 7)

Yllä olevat tiedot koskevat tiettyä D&B valmistajan tekemää kaiutinta ja niistä voidaan tulkita suoraan paljonko yksi kaiutin tuottaa ääntä metrin päähän vapaassa kentässä maksimissaan, kaiutinvalmistajan kahdella tarjolla olevalla vahvistimella (D12 ja E-PAC). Mittauksessa käytetty signaali on ilmoitettu olevan pink noisea, joka on siis kohinaa ja sisältää taajuudet 20 Hz – 20 kHz (Davis ja Jones 1989, 76–77). Signaalin harjakertoimeksikin on ilmoitettu 4, joka on 12dB (katso kappale 4.3). Lisäksi valmistaja on ilmoittanut, että 100dB:n äänenpaine heidän vahvistintaan käyttäen saadaan tuotettua metrin päähän, kun syötämme vahvistimeen signaalia tasolla -17dBu.

Loppukäyttäjän kannalta yllä oleva ilmoitustapa on hyvinkin hyödyllinen, jos käytössämme olisi kyseiset laitteet voisimme laskea kuinka suuren äänenpaineen saisimme tuotettua tietylle etäisyydelle. Jos vaatimuksemme olisi esimerkiksi 100 dB miksausasteeseen, joka sijaitsee 32 metrin päässä, voisimme laskea toteutuuko se käyttäen käänteistä neliölakia:

$$1\text{m} = 138 \text{ dB} - 6 \text{ dB (2m)} - 6 \text{ dB (4m)} - 6 \text{ dB (8m)} - 6 \text{ dB (16m)} - 6 \text{ dB (32m)}$$

→ **108 dB**

Tulos: Kaiutin on kykenevä selviytymään sille asettamistamme vaatimuksista.

5.4.4 Impedanssi

Impedanssi ilmaisee vaihtovirran kokonaisvastustusta virtapiirissä. Kaiuttimille usein ilmoitetaan nimellinen impedanssi, esimerkiksi 8 ohmia. Todellisuudessa impedanssi vaihtelee taajuuksittain ja kaiuttimille ilmoitettu nimellinen impedanssi onkin usein pienimmästä päästä tätä vaihtelua. Nimellinen impedanssi kuitenkin kertoo paljonko kaiutin voi tehoa vahvistimelta ottaa. Vahvistimille usein annetaan jokin maksimiteho jollain tietyllä impedanssilla, esim. 100 w 8 ohmin impedanssilla. Näin ollen 8 ohmin nimellisimpedanssin omaava kaiutin saa vahvistimelta täydet 100 w ja 16 ohmin kaiutin saa vain 50 w. Jos vahvistin vain on virransaanniltaan ja sen välittämisoiminaisuuksiltaan kykenevä voi se antaa 4 ohmin kaiuttimelle 200 w:n tehon. (Davis ja Jones 1989, 233)

5.4.5 Suuntaavuus

Erittäin olennainen tieto kaiuttimesta loppukäyttäjälle on sen suuntaavuus. Suuntaavuutta kuvataan usein asteluvuilla esim. 75° vaakasuunnassa ja 40° pystysuunnassa ja nämä ovat nimellisiä arvoja. Suuntaavuuskin vaihtelee kuitenkin taajuuksittain eikä ääni lakkaa kuulumasta, jos siirrymme tämän annetun asteluvun ulkopuolelle.

Suuntaavuuden asteluku kuvaa sitä kokonaiskulmaa, jonka ulkopuolella äänenpaine on laskenut -6 dB, kaiuttimen akselilta otettuun lukemaan verrattuna (Davis ja Patronis 2006, 99). Kaiutinvalmistajat voivat kuvata kaiuttimen suuntaavuutta eri tavoin. Tässä esimerkkinä yksi tapa:

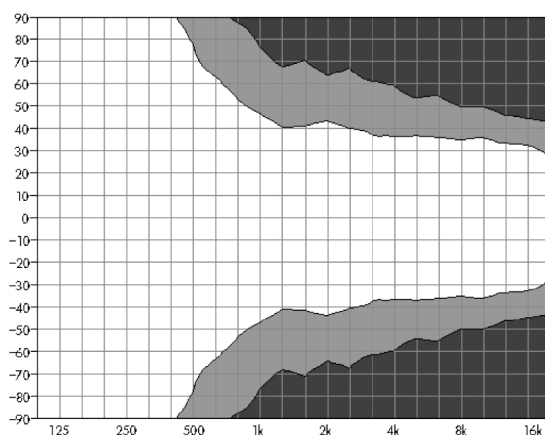


Fig. 5: Isobar diagram Q7 horizontal, standard set up

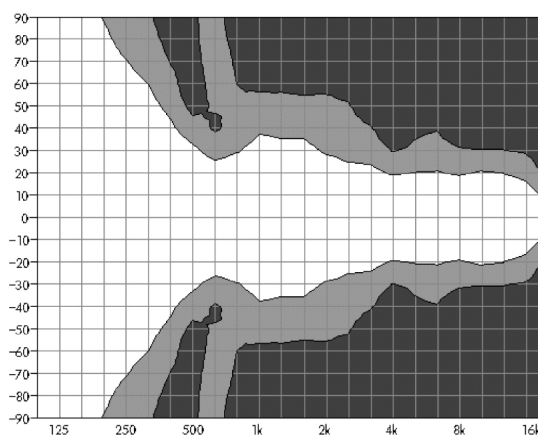


Fig. 6: Isobar diagram Q7 vertical, standard set up

Kuva 12. Q7 – kaiuttimen suuntaavuus, harmaa -6 dB, tummempi harmaa -12 dB (D&B Audiotechnik 2004, 6)

Valmistaja ilmoittaa yllä olevan kaiuttimen nimelliseksi suuntaavuudeksi 75° vaakatasossa ja 40° pystysuunnassa. Yllä olevasta kuvasta näemme kuitenkin suuntauksen toteutumisen taajuuksittain ja kuten huomaamme suuntaavuus vaihtelee. Kuvan pystyakselilla on asteluvut keskipisteen ollessa 0 ja vaak akselilla taajuudet.

Suuntaavuuden kannalta olennaista tietoa on toki se mikä on se nimellinen alue jonka kaiuttimelle voi vastuuksi langettaa. Todella tärkeää tietoa äänentoistotyössä on myös se, että miten kaiutin käyttäytyy tämän alueen

ulkopuolella. Tällä alueella on voi olla vaikkapa esiintyjät tai jotain muuta jonne äänijärjestelmän vahvistus ei ole tietoisesti suunnattu.

Puhumme siis akselin ulkopuolella olevasta äänestä ("off axis"). Kaiuttimen käyttäytymistä "off axis" alueella voidaan kuvata esimerkiksi taajuusvastekäyrillä (kts. kuva 11.) niin, että meillä on tarkasteltavana useita vastekäyriä kaiuttimen ympäriltä mitattuna. Näistä näemme mitä taajuuksia kaiutin pyrkii toistamaan nimellisen suuntimansa ulkopuolelle. Tästä voidaan puhua myös kaiuttimen "off axis" -vasteena. (Davis ja Jones 1989, 234)

6 SIGNAALITIEN HAASTEET

Äänijärjestelmille syntyy aina signaalitie, jonka ongelmia on myös hyvä tarkastella. Signaali olisi pidettävä mahdollisimman puhtaana häiriöistä ja säröytymättä läpi koko matkan. Käsitellään seuraavaksi hieman signaalitiehen liittyviä haasteita.

6.1 Yliohjausvara ja säröytyminen

Säröytyminen on tahaton tekninen muutos, joka syntyy ääniaaltoon jossain signaalitien osassa muuttaen sitä niin, että se ei enää muistuta alkuperäistä signaalia (Laaksonen 2006, 57).

Äänijärjestelmillä läpi koko signaalitien on usein jonkin suuruinen yliohjausvara (engl. "headroom"), jonka jälkeen ääni säröytyy. Yliohjausvaralla tarkoitetaan keskiverto- tai nimellistason ja hetkellisen maksimitason erotusta. Yliohjausvara on olennainen, jotta järjestelmä selviytyy myös hetkellisistä kovista äänentasoista säröytymättä. Yliohjausvaran määrä voi vaihdella ohjelmamateriaalien vaatimusten mukaan. (Davis ja Jones 1989, 35–36)

Ohjelmamateriaali koostuu usein erilaisista äänistä ja taajuuksista, joilla on erilainen muotokerroin. Usein musiikkia toistettaessa toistetaan matalia bassotaajuuksia muiden taajuuksien ohella. Kaiuttimien ja vahvistimien osalta totuus on se, että bassotaajuudet toistuakseen vaativat paljon enemmän tehoa

suhteessa korkeisiin ääniin. Näin ollen on suotavaa, että bassokaiuttimia ohjataan aktiivisen jakosuotimen välityksellä kokonaan omilla tehokkaammilla vahvistimilla, jotta vältetään säröytymiseltä. (Davis ja Jones 1989, 226)

Kaiuttimissa säröytymistä voi esiintyä eri tavoin. Yksi säröytymisen muoto on liiallinen liikepoikkeama, joka siis pakottaa kartion tekemään liikkeen, joka on sen fyysisten rajojen ulottumattomissa. Musikaalinen signaali myös vaatii kaiuttimia tuottaman mahdollisimman monia taajuuksia samanaikaisesti. Joissain tilanteissa kaiuttimessa voi kahden taajuuden vuorovaikutuksesta syntyä ylimääräisiä taajuuksia, joita kutsutaan intermodulaatioiksi ja ne ovat myös eräänlainen säröytymisenmuoto. Yksi voimakkaampi taajuus voi ajaa kaiuttimen ääri rajoille, jolloin se rasittaa kaiuttimen rakennetta aiheuttaen tilanteen, jossa tämä voimakas signaali pyrkii säröytymään ja alkaa moduloida kaikkia heikompia ohjelmamateriaalissa olevia taajuuksia. Torvikuormitteisissa kaiuttimissa intermodulaatiosäröä syntyy pääsääntöisesti ilman epälineaarista kompressoitumesta johtuen. Mitä pienempi torven alkupään suuaukko on, sitä enemmän ilma kompressoituu ja mitä kovempi äänenpaine, niin sama ilmiö tapahtuu. Kaiuttimen säröytymiseksi lasketaan myös erilaiset mekaaniset ongelmat esimerkiksi erilaiset resonanssit, joita voi syntyä kotelon rakenteissa. (Davis ja Jones 1989, 236–237)

Audiolaitteissa haitallisin ja yleisin särö on harmoninen särö (Laaksonen 2006, 57). Harmoninen särö lisää energiaa taajuuksille, jotka ovat alkuperäisen taajuuden kerrannaisia. Harmonista säröä voi esiintyä hetkellisesti tai jatkuvasti. Harmonista säröä voidaan mitata ajamalla laitteisiin siniaaltoja, eli yhtä taajuutta vaaditulla tasolla ja jos mittauksessa ilmenee lisääntyneitä taajuuksia, ovat ne todisteita harmonisesta säröstä. (McCarthy 2007, 408)

6.2 Dynaaminen skaala

Säröytymistä voi tapahtua signaalitien jokaisessa osassa. Signaalitien jokainen laite voi lisätä signaaliin häiriöääniä. Signaalitien koostuessa monista laitteista tulee meidän siis hieman perehtyä siihen kuinka saada järjestelmällemme muodostumaan optimaalinen dynaaminen toistoalue eli skaala. Dynaaminen skaala tarkoittaa maksimitason ja häiriöäänien erotusta (McCarthy 2007, 192).

Herrat Eargle ja Foreman (2002, 183) esittelevät kirjassansa suosituksen, jossa järjestelmän ylioheisuusvara ja toimintatasot määritellään miksauskonsolin ulostulojen nolla- ja maksimitasojen mukaan ja häiriötaso muodostuu mikrofoniin vahvistuksesta. Näin meille on syntynyt järjestelmän dynaaminen skaala, jonka suuruus on nyt määrätty ja eikä sitä voida enää laajentaa. Huonosti suunnitellulla signaalitien tasorakenteella sitä voidaan toki huonontaa. He suosittelevat musiikin ja puheäänentoistojärjestelmille ylioheisuusvaraksi 20 desibeliä kalibroidun nollatason lisäksi. Tämän varan tulisi säilyä läpi signaalitien. Näin saavutamme tilanteen, jolloin signaalitie ei pääse säröytymään, jonkin yksittäisen laitteen toimesta. Signaalitien loppupäätä, eli kaiutin ja vahvistin yhdistelmiä, käsitellään omana kokonaisuutenaan säätäen ne niin että muun signaalitien taso 0, eli keskivertotoimintataso, vastaa jotain tilaan suunniteltua tai annettua äänenpainetasoa.

Signaalitie on siis yhtä vahva, kuin on sen heikoin lenkki. Jokaisessa signaalitiessä sijaitsevassa laitteessa on äänen sisäänmeno ja ulostulo ja jos laitteeseen syötetty signaali poistuu samantasoisena, kun se on sisään mennyt, voidaan puhua yhteneväisestä tasosta (engl. "unity gain") (Bob McCarthy 2007, 410–411). Yhteneväinen taso yksittäisten laitteiden läpi voi toteutua mm. seuraavilla tavoilla:

- Yhteneväinen/neutrali sisään menon ja ulostulon vahvistus. Yleinen mm. laitteille, joilla on laaja dynaaminen skaala. Tällainen ratkaisu tuottaa vähiten muutosta häiriötasoon ja maksimi sisäänmeno ja ulostulo potentiaaliin.
- 20dB:n vahvistus sisään menossa ja 20dB:n menetys ulostulossa voi esiintyä laitteissa, joilla matala dynaaminen skaala. Ratkaisu johtaa 20dB:n menettämiseen maksimi sisäänmeno ja ulostulo potentiaalista ja minimaalisen häiriöäänien lisäyksen.
- 20dB:n menetys sisään menossa ja 20dB:n vahvistus ulostulossa, on vähiten suositeltava ratkaisu. Sisäänmeno ja ulostulo potentiaalisissa ei tapahdu häviötä, mutta häiriötaso nousee 20 desibeliä.

Yhteneväinen taso ei silti tarkoita ettei laitteen sisäisessä signaalitiessä olisi tasonmuutoksia suuntaan jos toiseen. Tulee muistaa, että aina kun vahvistusta lisätään, vahvistetaan myös häiriöäänä. (McCarthy 2007, 410–411)

Ilmiöitä, jotka toteutuvat jos järjestelmän dynaaminen skaala on riittämätön, voivat olla mm. seuraavat:

- Hetkelliset tasohuiput eli piikit säröytyvät ja kaiuttimet voivat vahingoittua.
- Hiljaiset kohdat ohjelmassa eivät välity, koska ne jäävät joko elektronisten- tai akustistenhäiriöäänien varjoon. (Davis ja Jones 1989, 37)

7 JÄRJESTELMÄ

7.1 Määrittely

Tässä osiossa perehdymme eri osiin josta äänijärjestelmä usein koostuu. Konserttia kun ei nykypäivänäkään toteuteta yhdellä isolla kaiuttimella, josta kaikki tarvittava ääni kuuluu, kaikkiin tarvittaviin suuntiin. Järjestelmän osittamisella on usein syynsä, jotka voidaan oivaltaa antamalla ensin järjestelmälle joitakin tavoitteita.

Äänijärjestelmän tehtävä on toteuttaa äänentoisto johonkin tiettyyn tilaan ja tämän toteutumisen tavoitteiksi annamme seuraavat:

- minimaalinen taajuusvasteellinen vaihtelu tilassa,
- minimaalinen äänenpainetasonvaihtelu tilassa,
- heijastusvaikutusten minimalisointi tilassa,
- maksimaalinen äänentoistollinen teho tilassa.

(McCarthy 2007, 315)

Tavoitteet kuulostavat tavoittelemisen arvoisilta. Näihin pääsemiseksi tulee tehdä päätöksiä. On usein tapauskohtaista kuka viimeisimmät päätökset tekee ja usein eli aina lopputulos onkin kompromissi. Kompromisseja tuleekin tehdä ja

niitä on osattava tehdä, mutta se ei tarkoita että meidän tulisi tehdä kompromisseja äänentoistollistenperiaatteidemme suhteen (McCarthy 2007, 319). Päätöksentekijällä ei ole niin suurta merkitystä, kuin itse päätöksenteon perusteella. Ja mielestäni päätöksenteon tulee olla seuraus eli vastaus ja tehdäkseen sen tulee tietää kysymys ja tavoitteet. Pääsääntöiset tavoitteet on esitelty ja tarkemmat vaatimukset ovat mielestäni tapauskohtaisia. Mietitään seuraavaksi suunnitelmallisia kysymyksiä, joita äänentoiston suunnitteluun liittyy.

Herra McCarthy (2007, 316–318) esittää kirjassaan seuraavat yhdeksän kysymystä johon olisi vastattava:

1. Kuinka monta ulostulokanavaa järjestelmä tarvitsee?

Eli kuinka monesta ulostulokanavasta äänijärjestelmä muodostuu. Esimerkkejä voi olla monojärjestelmä, joka kattaa koko yleisöalueen, tai stereojärjestelmä, jonka molemmilla kanavilla on omat toistoalueet ja osa yhteistä tai vaikkapa 5.1 äänijärjestelmä. Rajoittavina tekijöinä voidaan nähdä meidän mielikuviutus ja tilaajan budjetti.

2. Mikä on toistokanavan haluttu äänikuvallinen vastuu?

Järjestelmän joka kanavalla tulee olla paikkansa suunnitellussa äänikuvassa. Stereoparin vasemmanpuoleinen kaiutin on usein tarkoitettu stereomateriaalin vasemmankanavan toistamiseen. Samantyyppiset tarkoitukset äänikuvalliset tehtävät tulisi löytää myös muille järjestelmään liittyville kaiuttimille. Vastaus löytyy asiakkaan tarpeista ja toiveista äänikuvan toteutumisesta.

3. Mitä tiettyjä käytännön rajoituksia on otettava huomioon?

Tämä kysymys viittaa kaikkiin tapauskohtaisiin ja omalaatuisiin vaatimuksiin, jotka äänijärjestelmään kohdistuu. Kaiutinsijoitteluun voi kohdistua vaatimuksia, esim. ne eivät saa näkyä, eivät saa olla näköesteenä tai niiden tulee olla pois lavasteiden tieltä. Eli sijoittelu unelmapaikalle voi olla hankalaa. Järjestelmän käytettävyydelle voidaan asettaa haasteita, esim. sen tulisi olla monikäyttöinen,

yksinkertainen ja helposti muokattavissa, kuten jonkin monitoimitalon äänikalusto.

4. Missä sijaitsevat mikrofonit suhteessa kaiuttimen kattamaan alueeseen?

Tulee siis huomioida missä vahvistettavat mikrofonit sijaitsevat ja missä ne mahdollisesti voivat liikkua. Usein mikrofoninsijainti on tärkeämpi kuin kaiuttimen. Esimerkiksi langattoman mikrofonin omaava juontaja saattaa hyvinkin kierrellä ympäri tapahtumatiloja. Näihin tilanteisiin on valmistauduttava jotta vältetään epämiellyttäviltä akustisilta kierroilta, jotka syntyvät jos kaiuttimen toistamaa ääntä ohjautuu liiallisia määriä takaisin itse mikrofoniin.

5. Mitä on toistokanavan ohjelmamateriaali?

Toistettava materiaali luo vaatimuksia järjestelmälle. Rockmusiikki oletettavasti tarvitsee tehokkaan äänentoiston. Jotkin järjestelmän toistokanavat, kuten yleisönetuosalle tarkoitetut kaiuttimet voivat toistaakin ehkä pelkän laulun. Järjestelmän suunnittelun kannalta koskien ohjelmamateriaalia meidän on otettava huomioon seuraavat kaksi pääkysymystä: mikä on vaadittava taajuusvaste toistoalueella ja mikä on vaadittava äänenpainetaso? Näitä pohtimalla selviää tarvitseeko jotkin toistokanavat bassokaiuttimia vai onko jonkin järjestelmänosan tehtävä pelkkä puheäänentoisto.

6. Kuinka kauas toistokanavan äänen tulisi kantaa?

Jos ohjelmamateriaali antaa vastauksen koskien äänenpainetasovaatimusta, tulee meidän selvittää kuinka kauas tämä kyseinen äänenpaine on välitettävä. Voimme arvioida kuinka suurta ja tehokasta järjestelmää mahdollisesti tarvitsemme.

7. Mikä on kanavalta vaaditun kattavuusalueen muoto?

Eli minkä muotoiselle alueelle ääntä on jaettava. Muoto voi olla yksinkertainen ja symmetrinen tai sitten ei. Asiaa on tutkittava jotta osaamme varautua riittävän

kattavalla järjestelmällä ja jos yksi kaiutin ei riitä kattamaan alaa on meidän laadittava järjestelmä, jolla ala katetaan.

8. Mitkä ovat toistokanavan toistoalueen akustiset ominaisuudet?

Jokainen ulostulokanava kohtaa omanlaisensa akustiikan, joka on osa koko huoneen akustisia ominaisuuksia. Jokaisen kaiutinkanavan akustisia haasteita on tarkasteltava erikseen ja myös osana suurempaa kokonaisuutta. Pääkaiutinjärjestelmän ja huoneakustiikan yhteisvaikutus tulee arvioida erikseen pääjärjestelmän perspektiivistä. Alueille joihin tarvitaan esim. viivekaiuttimia, kohdistuu niiden tuottama suora/heijastunut ääni, mutta myös pääjärjestelmän osittainen suora/heijastunut ääni. Esimerkiksi parven alla olevat viivekaiuttimet näkevät ja kohtaavat akustisen maailman hyvin eritavalla kuin pääjärjestelmä. Toistokanavien summautuessa summautuvat myös akustiset efektit.

9. Mikä on budjetti?

Budjetti on toki myös tiedettävä edes suurin piirtein, sillä muuten myös aikaisempiin kysymyksiin on hankala löytää tarpeenmukaisia vastauksia.

Näitä kysymyksiä pyöritellessä löytää usein vastauksia siihen minkälainen lopullinen äänentoisto tulee olemaan. Vastauksia saadaan kaiuttimien sijoitteluun, määrään, kaiuttimien tyypeihin ja vaadittuihin ominaisuuksiin, sekä esim. kaiutinprosessoinnin tarpeeseen. Näihin kysymyksiin vastaamalla voimme pyrkiä suunnittelemaan järjestelmän, joka vastaa aiemmin esitettyjä tavoitteitamme ja asiakkaan tarpeita. (McCarthy 2007, 318–319)

7.2 Järjestelmänosat ja niiden tehtävät

Äänentoistojärjestelmä on kokonaisuus, joka syntyy osatekijöiden summasta. Järjestelmänosat voivat koostua yksittäisistä kaiuttimista tai esim. linjasäteilijätyyppisistä kaiutintratkaisuista. Käsitellään seuraavaksi joitakin mahdollisia järjestelmän osia ja pohditaan niiden rooleja. (McCarthy 2007, 325)

7.2.1 Pääjärjestelmä

Pääjärjestelmä on kaiutinjärjestelmä, jolla on suurin vastuu äänentoistollisesti. Sen tehtävä on kattaa suurin yleisönala ja ne alueet, joita pääjärjestelmällä ei pystytä kattamaan, jäävät erilaisten täyttöjärjestelmien vastuulle. Pääjärjestelmä konserttikäytössä toteutetaan lähes aina stereona, mutta on hyvä muistaa että usein yleisössä on harvoja kohtia joissa stereoäänikuva todellisuudessa toteutuu. Joissain tapauksissa pääjärjestelmä voi koostua useammista kaiutinyksiköistä esim. jos lava on asetettu keskelle urheiluhallia ja yleisö on jakautunut lavan ympärille. (McCarthy 2007, 322–326)

7.2.2 Täydentävät järjestelmät

Pääjärjestelmän lisäksi äänijärjestelmä voi koostua kaiutinjärjestelmistä, joiden tehtävä on palvella sitä yleisönosaa, jota pääjärjestelmä ei tavoita. Näitä alueita voi löytyä mm. sekä horisontaaliselta, että vertikaaliselta akselilta. Täydentävät järjestelmät voivat koostua yksittäisistä kaiuttimista tai erilaisista kaiutinryhmistä. Täydentäviä järjestelmiä voi olla mm:

- Sivutäyttöjärjestelmä (engl. sidefill), jonka tehtävä on jatkaa pääjärjestelmän kattavuutta horisontaalisella akselilla. Esimerkkinä voidaan mainita esim. jäähallikonsertissa sivukatsomoille suunnatut kaiutinryhmät.
- Sisätäyttöjärjestelmä (engl. infill), jonka tehtävä on myös horisontaalisen kattavuuden täydentäminen, mutta siten että kaiuttimet ovat suunnattu sisäänpäin.
- Alatäyttöjärjestelmä (engl. downfill), jonka tehtävä on jatkaa pääjärjestelmän toistoaluetta vertikaalisesti. Eli nimensä mukaisesti kaiutinryhmä pyrkii kattamaan pääjärjestelmän alapuolelle jääviä kuolleita kohteita.
- Etutäyttöjärjestelmä (engl. frontfill), jonka tehtävä on kattaa aivan etummainen yleisönala. Tehtävään käytetyt kaiuttimet sijaitsevat usein lavan reunalla. Tämä yleisönosa voitaisiin kattaa myös sisätäyttö- tai alatäyttöjärjestelmillä, mutta tällöin joutuisimme ehkä suuntaamaan kaiuttimia lähemmäs eturiviä ja samalla myös lähemmäs lavaa jolloin

akustisen kierron mahdollisuus kasvaa. Näin ollen verrattain pienempitehoiset kaiuttimet, joilla ei ole kantavuutta kovinkaan etäälle, on tilanteeseen parempi ratkaisu.

- Viivejärjestelmät (engl. delays), joiden tehtävä on laajentaa järjestelmän toistoaluetta edemmäs. Eli niiden tehtävä on tavoittaa niitä yleisön osia, joihin pääjärjestelmänäni ei enää tavoitteidemme mukaisesti yllä.

(McCarthy 2007, 325–330)

Täydentävissä järjestelmissä käytettävät kaiuttimet ovat usein kantavuudeltaan lyhyempiä, kuin pääjärjestelmässä käytetyt ja näin ollen ne voidaan määrittellä täydentäviksi järjestelmiksi, eikä moniosaiseksi pääjärjestelmäksi. (McCarthy 2007, 327)

7.2.2 Bassokaiutinjärjestelmät

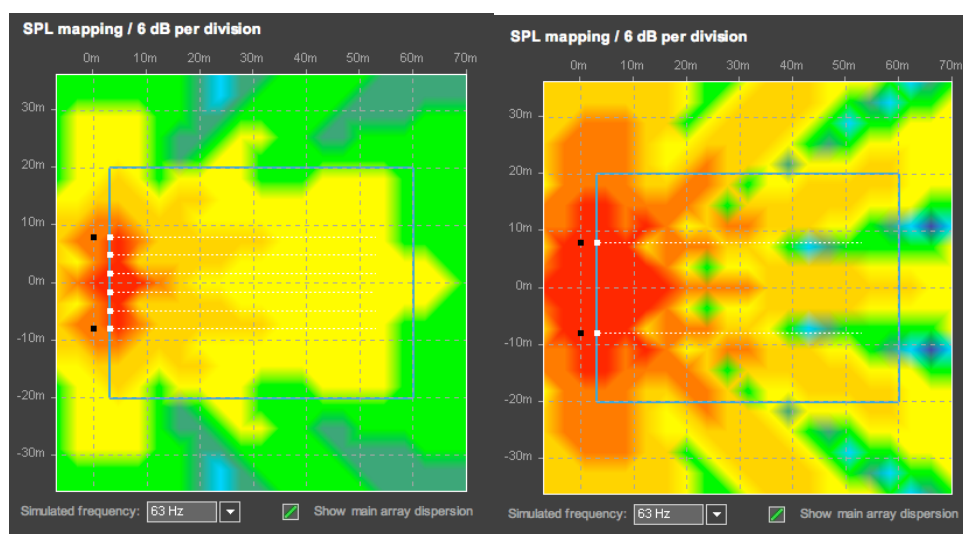
Myös bassokaiuttimista voidaan muodostaa ja muodostetaankin omia järjestelmiä, joilla on pyrkimys suunnata ääntä tietyille alueille. Erilaisten suuntaavien ja akustisen energian jakautumista tasoittavien ratkaisuiden käyttö bassokaiutuille on yleistymään päin. Tällaiset järjestelmät mahdollistavat kaksi pääsääntöistä ominaisuutta, jotka liittyvät bassokaiuttimiin. Ensinnäkin ne sijaitsevat erillisissä koteloissaan ja niiden tehtävä on usein toistaa vain pieni taajuuskaista, eli usein n. 30 Hz – 120 Hz. Toinen ominaisuus liittyy matalien taajuuksien aallonpituuteen. Matalilla taajuuksilla aallonpituudet ovat verrattain suuria ja näin ollen ovat ne myös kykeneviä kiertämään suuriakin esineitä, kuten toisia bassokaiuttimia. (McCarthy 2007, 303)

Yksittäisiä bassokaiuttimia nykypäivänä on saatavilla pääsääntöisesti ympärisäteilevinä ja cardioidi -mallisina, joka tarkoittaa sitä että kaiutin itsessään osaa suunnata suurimman osan tuottamastaan äänestä kaiuttimen etupuolelle. Tämän tyylistä suuntakuviota kuitenkin voidaan saada aikaiseksi myös ympärisäteilevillä kaiuttimilla. (McCarthy 2007, 304)

harrastettava erityistä tarkkuutta kaiuttimien välisiä etäisyyksiä suunnitellessa ja toteuttaessa. (McCarthy 2007, 304–305)

Bassokaiuttimista voidaan muodostaa myös järjestelmiä, joissa kaiuttimet ovat asetettu vierekkäin tehden niistä eräänlainen horisontaalisesti toteutuva linjasäteilijä. Näiden järjestelmien tuottamaa taajuuksien säteilymuotoa voidaan muokata asettamalla eri viiveaikoja kaiuttimiin. Suuntaavuudesta puhuttaessa on kuitenkin hyvä muista, että kaikilla jonkin taajuuden suuntaavuuteen vaikuttavilla teoilla on moninkertainen vaikutus korkeampiin taajuuksiin. Esimerkiksi vaikutus 125 Hz:n suuntaavuuteen on suhteessa nelinkertainen kuin taajuuteen 30 Hz. (McCarthy 2007, 305–308)

Linjasäteilevän bassokaiutinjärjestelmän käyttäytymistä voidaan havainnollistaa seuraavalla kuvalla:



Kuva 14. Linjasäteilevä ja kaksiosainen bassokaiutinjärjestelmä

Kuvissa on kyseessä kaksi erilaista tapaa sijoittaa bassokaiuttimet. Kuvia tulee tulkita niin, että jokainen väri edustaa tiettyä äänenpainemäärää ja värien välillä on 6 desibelin erotus. Punainen edustaa kovempaa äänenpainetta ja sininen pienempää. Tarkasteltu taajuus on 63 Hz. Sininen kehikko kuvastaa yleisöaluetta, joka on noin 40m x 60m. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on tilanne, jossa käytössämme on 6 eri bassokaiutinta ja ne ovat asetettu 3 metrin päästä toisistaan tasaisesti 16 metrin janalle. Kaiuttimien muodostamaa

suuntaavuutta on manipuloitu niin että uloimpia kaiuttimia on viivästetty 4,3 ms ja toiseksi ulompia kaiuttimia 0,8 ms, keskimmäisiä ei ollenkaan. Näin ollen saimme rakennettua verrattain tasaisen bassotaajuuksien jakautumisen yleisöalueelle.

Oikeanpuoleisessa kuvassa on taas kyse yleisemmin käytetystä tavasta sijoitella bassokaiuttimet. Kuvassa meillä on sama määrä kaiuttimia kuin aiemminkin, mutta ne ovat asetettu kuvitteellisen lavan vasemmalle ja oikealle reunalle 16 metrin päästä toisistaan, esimerkiksi pääjärjestelmän läheisyyteen. Vaikkakin punaisenväriin määrä kuvassa on huomattava, on kuvassa myös suhteellisen paljon vihreitä ja jopa sinisiä aukkoja, joka tarkoittaa sitä että matalientaajuuksientaso vaihtelee todella huomattavasti yleisöalueella. Tämä ei mielestäni ole tavoitteidemme ”minimaalinen taajuusvasteellinen vaihtelu ja minimaalinen äänenpaineen vaihtelu” mukaista. Yllä olevien kuvien simulaatiot ovat laadittu D&B Audiotechnik valmistamalla Arraycalc laskurilla ja simulaatiossa käytetyt kaiuttimet ovat ympärisäteileviä QSUB mallisia kaiuttimia.

7.3 Esimerkkijärjestelmiä

Koska kyseessä on ammattikorkeakoulun opinnäytetyö, esittelen nyt muutaman esimerkkijärjestelmän, jotta saisimme työhön myös ripauksen käytännön maailmaa. Pyrin kertomaan järjestelmien suunnittelusta ja toteutuksesta olennaisia pääpiirteitä. Kyseessä ei ole osio, josta löytyy vastaus kaikkiin aiemmin työssä esittelyihin haasteisiin, vaan pikemminkin kuvaelma käytännön toimista. Seuraavaksi seuraa siis pikemminkin näkökulmia, kuin absoluuttisia totuuksia.

7.3.1 Sauna open air 2008, lava 2.

Ensimmäinen esimerkki on Sauna open air -festivaalien kakkoslavalta vuodelta 2008. Järjestelmä koostuu kolmesta osasta, jotka ovat pääjärjestelmä, etutäyttöjärjestelmä ja bassokaiutinjärjestelmä (katso kuva 15.)



Kuva 15. Sauna open air, vuosi 2008, 2. lava

Pääjärjestelmä on ripustettu käyttäen moottorinostimia ja se käsittää 9 kappaletta d&b audiotechnik valmistajan Q1 linjasäteilijäkaiuttimia (per puoli). Näiden keskinäiset kulmat ovat säädettävissä ja ne ovat laskettu käyttäen valmistajan tarjoamaa ohjelmaa nimeltä Arraycalc (katso kuva 17.). Pääjärjestelmän lisäksi käytössä on aiemmin esiteltyjä saman valmistajan Q7 -merkkisiä pistekaiuttimia, jotka ovat suunnattu palvelemaan eturivin asiakkaita. Näiden lisäksi bassotaajuusientoisto on toteutettu käyttämällä saman valmistajan kahta eri bassokaiutinmallia, jotka ovat B2 ja QSUB. Järjestelmä sisältää yhteensä 12 kappaletta QSUB kaiuttimia ja 4 kappaletta B2 kaiuttimia. Bassokaiutinjärjestelmä on myös suunniteltu valmistajan Arraycalc ohjelmistolla jolla voimme simuloida matalien taajuuksien jakautumista eri alueille, kun sijoittelemme bassokaiuttimia esim. yllä olevalla tavalla. Ohjelmistolla voimme suunnitella esimerkiksi järjestelmiä, joilla voimme suunnata matalia taajuuksia haluamallemme alalle.

Järjestelmän prosessointi toteutetaan saman valmistajan D12 päätevahvistimissa sijaitsevilla digitaalisella prosessoinnilla ja vahvistimia

ohjataan kauko-ohjauksella miksauspisteestä käyttäen valmistajan R1 – nimistä ohjelmistoa (katso kuva 18.). Yllä olevan järjestelmäsuunnittelusta ja siihen liittyvistä laskelmista vastasi Reima Saarinen. Oma tehtäväni tässä tapauksessa oli enemmän suorittavassa roolissa ja tapahtuma-aikana seurasin mm. järjestelmän toimintaa R1 ohjelmistolla toimiessani miksausteltassa F.O.H. teknikkona (engl. ”front of house”), palvelen artistien saliäänemiksaajia.

7.3.2 Kauppakeskus Elon avajaiset 1.4.2009

Seuraava esimerkki on suhteessa hyvin erilainen tapaus. Kyseessä on Ylöjärvelle avatun uuden kauppakeskuksen avajaistapahtumasta, jossa vastasin äänentoistosta. Haasteet, joita tilaisuus asetti, olivat verrattain erilaisia kuin aiemmassa esimerkissä. Huomion arvoisimpia ovat mm. tilanmuoto ja sen jakautuminen eri osa-alueisiin. Tila, jossa esiintymislava sijaitti, oli n. 12 metriä kapea ja 50 metriä pitkä suhteellisen korkea kauppakeskuksen käytävä, jonka keskellä kasvoi puu. Tämän lisäksi käytävän keskikohdalta haarautui sivukäytävät vasemmalle ja oikealle, joista tapahtuma-alueeseen huomioitiin noin 40 metriä pitkät siivut. Toisella käytävällä oli tarjoilupöytiä ja toisella käytävällä ruokailupöytiä.

Ohjelmamateriaali oli sekä puhetta että musiikkia. Kaikuisassa tilassa ymmärrettävää on, että puheenymmärrettävyys muodostaa haasteen. Pelkkä pääjärjestelmä ei pystynyt kattamaan ymmärrettävästi koko yleisöaluetta vaan aukkoja oli paikkailtava viivekaiuttimilla. Myös kriittinen piste tuli hyvinkin pian vastaan, joten suoran äänen määrää oli saatava lisää suhteessa kaiuntaan, jotta ymmärrettävyys säilyisi.

Pääjärjestelmä koostui 6 kappaleesta Q1 linjasäteilijäkaiuttimesta per puoli. Tämän lisäksi käytössä oli Q7 kaiuttimista rakennettu etutäyttöjärjestelmä. Bassokaiutinjärjestelmä muodostui 2 kappaleesta B2 kaiuttimia ja 6 kappaleesta QSUB kaiuttimia. Bassontoistossa pyrin kapeaan ja pitkään toistomuotoon jäljitellen kapeaa tilaa ja näin ollen minimoiden seinäheijastukset. Viivekaiuttimia oli sijoitettu pitkin käytäviä ja niiden toistama ääni oli viivästetty ajallisesti pääjärjestelmästä tulevaan ääneen. Kuvassa 16. näkyvien viivekaiuttimien tehtävä on kattaa aloja joihin pääjärjestelmä ei tapaa. Toinen

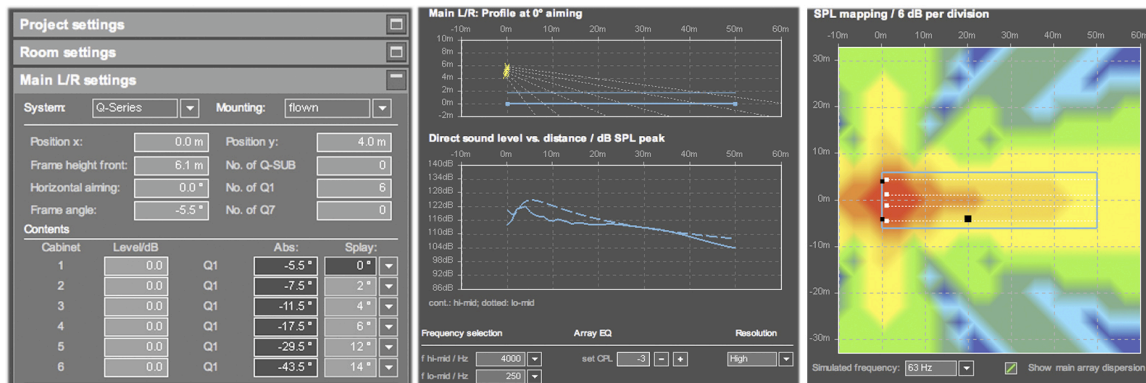
kattaa puun aiheuttamaa aukkoa ja toisen tehtävä on toistaa ääntä parvelle. Kuvassa näkyvien viivekaiuttimien lisäksi tilassa oli 8 kappaletta E0 kaiuttimia, 2 kappaletta E3 kaiuttimia ja 2 kappaletta Q7 kaiuttimia. Viivekaiuttimiin syötettiin mono signaalia, joka oli summa stereolähteestä.



Kuva 16. Kauppakeskus Elon avajaiset

Kaiuttimien väliset kulmat ja muut ripustukseen liittyvät asiat suunnittelin Arraycalc -ohjelmistolla. Kuvassa 17. on otteita kyseisestä suunnitelmasta. Ensimmäinen kuva vasemmalta kertoo kaiuttimien väliset kulma-asetukset ja mm. ripustuskorkeuden. Kulmia muuttamalla voimme vaikuttaa keskimmäisen kuvan näkymään, jossa taasen näemme äänenpaineen määrän suhteessa etäisyyteen eri taajuuksilla. Tässä tavoitteenani oli luonnollisesti mahdollisimman tasainen äänenpaine tilassa. Tarkastelussa on kaksi eri käyrää, joista katkonainen kuvaa 250 Hz:n taajuutta ja yhtenäinen kuvaa 4000 Hz:n taajuutta. Viimeisenä kuvana näemme otteen bassokaiutinjärjestelmän suuntakuviosta 63 Hz:n taajuudella. Sininen kehikko kuvaa yleisöaluetta, joka oli siis kapeahko käytävä. Bassokaiuttimet ovat sijoitettu siten että keskimmäiset 2 kappaletta B2 kaiuttimia ovat 1,2 metriä lavan keskikohdasta molemmin

puolin sijoitettuna lavan alle ja QSUB kaiuttimet ovat lavan reunoilla 4,5 metriä lavan keskikohdasta. Kaiuttimia ei ole viivästetty suhteessa toisiinsa.



Kuva 17. Arraycalc otteita: kulmat, äänenpainejakauma, bassokaiutinjärjestelmä

Arraycalc -ohjelmistoon syötetään mm. tiedot yleisöalueen koosta ja muodosta. Nämä tiedot eivät tule perustua arvauksiin, vaan mittasin tarvittavat mitat käyttäen lasermittaa. Muita tietoja, joita ohjelma tarvitsee, on mm. käytettävien kaiuttimien määrä ja merkki, sekä ripustuskorkeus. Ohjelmisto on suunnittelijan ensimmäinen optimointityökalu, jolla on erittäin merkittäviä vaikutuksia lopullisen järjestelmän toimivuuteen. (D&B Audiotechnik 2009, 8-20)

Järjestelmän prosessointi tapahtui päätevahvistimissa olevilla digitaalisilla prosessoreilla, joita ohjattiin R1 – ohjelmistolla. Ohjelma toimii siten, että käyttäjä rakentaa itse siihen haluamansa näkymän. Päätevahvistimille annetaan kullekin jokin ID numero, jonka perusteella ne tunnistetaan. Nämä numerot syötetään käsin päätevahvistimiin. Tämän jälkeen ohjelmistoon rakennetaan ohjausnäkyvä halutuille vahvistimille perustuen tähän ID numeroon. Ohjelmalla siis ohjataan vahvistimien prosessoreita, joka tarkoittaa sitä että vaikka yhteys vahvistimiin katoaa ei syötetyt ohjaustiedot katoa, vaan ne tallentuvat vahvistimen asetuksiin. Vahvistimista voidaan mm. tehdä ryhmiä, joille voidaan antaa yhtenäisiä komentoja, kuten "power off/on", eli virrat päälle ja pois. Kuvassa 18. on esimerkki kauppakeskus Elon avajaisiin tekemästäni ohjaustiedostosta. Siinä järjestelmä on ryhmitelty "master" ryhmään, joka kattaa kaikki vahvistimet ja tälle on erilaisia alaryhmiä kuten, "array" eli Q1 kaiuttimet, "subs" eli bassokaiuttimet, "frontfill" eli etutäyttökaiuttimet ja "delay" eli viivekaiuttimet. Kullekin ryhmälle on oma mm. oma vaimennuspainike ohjelmassa, joka siis vaientaa koko ryhmän kaiuttimet. Kaiutinryhmille on myös

mm. yhteisiä viivesäätimiä ja tasosäätimiä. Ohjelmiston toisella välisivulla sijaitsi vielä kaiutinryhmittäin rakennetut taajuuskorjaimet. Näillä pystyimme ekvalisoimaan kaiutinryhmiä kokonaisuutena. Kaikki tapahtumassa olleet viivekaiuttimet eivät olleet ohjausohjelman hallinnoitavana, koska ohjauksen saavuttamiseksi on vahvistimille vietävä sähkö ja signaali johto, mutta myös erillinen kaapeli ohjausta varten. Käytännön syistä jätin muutaman kauimmaisen viivejärjestelmän ilman tietokonepohjaista ohjausta. Tein tarvittavat prosessointiasetukset vahvistimen omalla käyttöliittymällä. (D&B Audiotechnik 2007, 8-34)



Kuva 18. R1 – ohjaus, Kauppakeskus Elon avajaiset

Esimerkeissä on siis molemmissa tyystin omat haasteensa, jonka takia ne työhöni valitsin. Mitään ylläesitetystä ratkaisusta ei saa pitää ainoana oikeana vaihtoehtona vaan kyse on yhdestä tavasta toteuttaa asioita. Esimerkeissäni esiintyy vain tietyn valmistajan kaiuttimia johtuen siitä, että niiden parissa olen työskennellyt eniten ja ne mielestäni edustavat nykyaikaisen äänentoiston kärkipäätä toimien näin hyvänä esimerkkinä. Vastaavia ohjelmistoja ja ratkaisuita löytyy monilta muiltakin kaiutinvaihtajilta. Eroavaisuuksia ja vaihtelevia ratkaisuja löytyy varmasti, mutta tavoitteet ovat kuitenkin usein samansuuntaisia. Kaikkien kaiuttimien kohtaamat haasteet, joita työssä on käsitelty, ovat loppujen lopuksi yhteneväiset.

8 JÄRJESTELMÄN KALIBROINTI

Olen käsitellyt osia, joista järjestelmä koostuu ja olen analysoinut äänentoistoon kohdistuvia haasteita. Nyt lopuksi olisikin hyvä käsitellä hieman keikkapaikalla tapahtuvaa järjestelmän hienosäätöä eli mittaamista, virittämistä ja kuuntelua. Jos olemme suunnitteluvaiheessa noudattaneet asettamiamme tavoitteita, on optimointi työstä tehty jo 90 % ja loput 10 % syntyvät paikanpäällä tapahtuvasta hienosäädöstä (McCarthy 2007, 426).

Myös järjestelmän hienosäätöön on hyvä asettaa tavoitteita, joita kohden johtopäätöksiä voidaan juontaa. McCarthy (2007, 425) esittää kirjassaan seuraavia tavoitteita:

- minimaalinen tason, taajuusvasteen ja heijastusvaikutusten vaihtelu yleisöalueella
- maksimaalinen selkeys, ymmärrettävyys ja suoranäänen suhde kaiuntaan
- maksimaalinen tehopotentiali (eli riittävän kovaa)
- äänikuvanhallinta, eli ääni kuuluu siellä missä haluamme.

Tavoitteet ovat yleispäteviä ja riippumattomia siitä millä keinoin niitä kohden pyritään. Mahdollisuuksia ja toimintamalleja on siis monia. On kuitenkin olemassa muutama pääsääntöinen parametri, joiden kohdalla ratkaisuja on tehtävä:

- kaiutinsijoittelun optimointi, suuntaus ja niiden väliset kulmat
- huoneakustiikan vaikutusten optimointi
- tasonsäätö
- viiveaikojensäätö
- taajuuskorjaimen säädöt eli ekvalisointi (McCarthy 2007, 426).

Yllä olevien säätöjen ei tule perustua arvailuun, vaan ratkaisuiden tulisi pohjautua mitattuihin tuloksiin ja niiden analysointiin. Näin voimme mielestäni tehdä totuuteen perustuvia harkittuja johtopäätöksiä. Kahta ensimmäistä parametria olemme tarkastelleet myös jo suunnitteluvaiheessa mm. Arraycalc

ohjelmistolla ja näin ollen lähtökohdat niiden toteutumiseen ovat mielestäni hyvät. Tässä tapauksessa mittaukset suoritettiin lasermitalla ja mallinnettiin tietokoneohjelmistolla.

Kolmen viimeisen parametrin mittaamiseen ja analysointiin tarvitsemme laitteiston, jolla voimme mitata järjestelmän akustista toimintaa ja verrata sitä määrittelemäämme referenssitietoon. Tämän toteutamme kaksikanavaisena mittauksena, joista referenssin otamme signaalitien elektronisen osan lähtöpäästä. Tässä tapauksessa miksauspöydän prosessointiin syöttämä signaali toimii referenssinämme ja vertaamme sitä kaiuttimen syöttämään akustiseen vastineeseen (McCarthy 2007, 429). Akustista ääntä mittaamme mieluiten sertifioidulla ja kalibroidulla mittalaitteistolla, eli todellisuudessa asiaan soveltuvalla kalibroidulla mittamikrofonilla.

Käsittelen asiaa käytännön kannalta käyttäen apuna aiemmin esiteltyjä esimerkkijärjestelmiä. Pyrin käymään analysoiden läpi järjestelmän mittauksia ja esittelemään mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja niihin perustuen. Mittausmenettelyn ja kalibroinninvaiheet, joita aion käsitellä, ovat taajuusvasteen, impulssivasteen, vaihevasteen ja keskinäisen tasosäädön optimointi. Mittausmenettelyn perustana käytän saamaani koulutusta (Konserttiäänentoisto ja kiertuemanagerointi 2008) ja käytännönelämässä kohtaamiani menettelytapoja, joihin yleinen käytäntö ja työnkulku pohjautuvat. Tarkemmissa johtopäätöksissä ja teorioissa pyrin viittaamaan tieteelliseen lähteeseen. Käytetty mittalaitteisto koostuu mittamikrofonista, etuasteesta/äänikortista ja mittaohjelmistosta. Mittausta harrastetaan vasta sitten kun järjestelmä on siihen valmis, eli suunnittelu ja rakennus on toteutettu ja mahdolliset viat ja ongelmat korjattu (McCarthy 2007, 424).

8.1 Mittamikrofonin sijoittelusta

Ennen kuin aloitamme mittaamisen, on meidän toki tiedettävä mistä kohtaa mittatuloksia olisi mielekästä ottaa ja tulisiko niistä muodostua jokin keskiarvo vai teemmekö päätökset yhden tuloksen perusteella. Mikrofonin sijainti voidaan jakaa seuraaviin pisteisiin:

- **"On-axis"**, eli kaiuttimen akselilla oleva alue. Tältä alueelta otamme mittatuloksia mm. ekvalisointia, tasonsäätöä, rakennellisia muokkauksi ja kaiuttimensijoittelua koskevia ratkaisuja varten. Akselilla otettavassa mittauksessa näkyy myös minimaalisesti muiden kaiuttimien ja heijastuksiensa vaikutus.
- **"Off-axis"**, eli suunnitellun raja-alueen reuna. Tämän rajan tässä tapauksessa määrittää kuuntelualue eikä kaiutin. Tällöin paikka ei välttämättä vastaa kaiuttimensäteilyalan reunamaa. Viimeiset yleisöpaikat ennen takaseinämää ovat hyvä esimerkki "off-axis" alueesta. Meidän tavoitteena on, että näille alueille suunnatun äänentoistontaso olisi mahdollisimman lähelle 6dB vaimeampi suhteessa akselilla olevaan tasoon.
- **Akustinen jakopiste**, tämä paikka mikrofonille löytyy kahden tai useamman kaiuttimen akselien väliltä. Kahden kaiuttimen toistaessa ääntä samalla tasolla löytyy tämä piste tasan niiden puolivälistä. Jos kaiuttimet toistavat ääntä eri tasolla, on piste haettava siitä kohtaa, jossa molemmat kaiuttimet on kuultavissa yhtä kovalla tasolla. Tässä pisteessä teemme tarvittavat säädöt koskien kaiuttimien välisiä vaihevasteita ja impulssivasteita.
- **Symmetriset pisteet**, eli pisteet, joille löytyy symmetriset vastineet kolmesta aiemmasta pisteestä. Näistä voidaan tehdä esim. tarkistusmittauksia akselilta tarkastellen järjestelmän elementtitoimintaan. Usein jos symmetristen akselilla olevien mittaustulokset ovat vastaavia, ovat myös ilmiöt akselin ulkopuolella vastaavanlaisia.

(McCarthy 2007, 442–443)

Mittauksia suorittaessa usein otetaan useita mittauksia joltain alalta ja näiden tuloksista muodostetaan keskiarvoinen tulkinta kuvaamaan järjestelmää. Keskiarvo voidaan muodostaa joko itse tulkitsemalla useaa mittaustulosta samanaikaisesti tai matemaattisesti laskien usean tuloksen keskiarvo. Matemaattisessa summauksessa jos yksi mittaus on huomattavasti muista eriävä voi se esim. peittää muissa mittauksissa tapahtuvia korostumia. Mittatuloksia on hyvä siis tarkastella sekä erikseen ja keskiarviollisesti. Jos useassa tuloksessa esiintyy samansuuntaista korostumaa jollain taajuudella,

voidaan toimenpiteisiin ruveta. Keskiarviollisia mittauksia voidaan suorittaa usealla mikrofoonilla samanaikaisesti tai siirtämällä yhtä mikrofoonia ja tallentamalla siitä saadut tulokset jälkitarkastelua varten. On kuitenkin hyvä muistaa, että jotta mittapisteistä otetut mittatulokset olisivat vaiheen kannalta vertailukelpoisia, on niissä huomioitava äänen käyttämä kulku-aika eri pisteisiin. (McCarthy 2007, 432–437)

Mitatessa on ymmärrettävä mistä mittatuloksessa näkyvät ilmiöt johtuvat. Prosessointiasetukset kuten ekvalisointi tai viiveet eivät ratkaise mitään, jos mittaus on epäonnistunut tai järjestelmä on viallinen. Esimerkiksi, jos kaiuttimesta 10 metrin päästä otettu mittaus näyttää saman taajuusvasteen ja tason kuin 50 metrin päästä otettu, voidaan epäillä jotain teknistä vikaa, koska korkeat taajuudet vaimenevat etäisyyden kasvaessa ja käänteinen neliölakikin on astunut voimaan. Heijastukset lattiasta saattavat ja vaikuttavatkin mittatulokseen ja yleisön ollessa salissa heijastus vaimenee tai katoaa. Myös heijastus jostain läheisestä pinnasta voi aiheuttaa selkeän kampasuodinilmiön. Näiden ilmiöiden vaikutukset tulee tiedostaa ja ne pitää osata huomioida mittatuloksia tutkiessa. (McCarthy 2007, 438–441)

Mittaohjelmissa, joissa käytetään kaksikanavaista mittausta, on usein myös matemaattisia ratkaisuja, jotka poistavat osan mittaukselle haitallisista äänistä. Tätä kutsutaan nimellä koherenssi ja se ilmaisee referenssin ja mittasignaalin sisällöllistä eroavaisuutta. Jos esim. mittamikrofooni poimii joitain ääniä, joilla ei ole mitään tekemistä mittasignaalin kanssa, tipahtaa koherenssi. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseisellä alueella olevat mittatulokset eivät ole vertailukelpoisia. Koherenssi voi tipahtaa, jos vaikka lintu laskeutuu mittamikrofonin päälle ja rupeaa laulamaan tai puskutraktori ajelee mikrofonin läheisyydessä. Koherenssia voidaan parantaa nostamalla signaalin tasoa tai odottamalla hiljaisempaa hetkeä. Koherenssi on prosenttiluku, jossa 100 % on paras. (AFMG Ahnert Feistel Media Group 2006–2007, 81–83)

8.2 Taajuusvaste ja ekvalisointi

Järjestelmän ekvalisointia on hyvä lähestyä tietyillä asenteilla. Herrat Patronis ja Davis (2006, 413–414) lainaavat kirjassaan lääketieteelliseltä veljenkunnalta

seuraavan ajattelumallin: ”First, do no harm”, joka suomennettuna tarkoittaa jotakuinkin: ”Ensinnäkin, älä tee vaurioita”. Tällä pyritään viestimään maltillista toimintatapaa, joka perustuu tutkittuun tietoon ja jossa tehtävät toimenpiteet ovat verrattain pieniä, mutta osuvia. Kaikkien toimenpiteiden jälkeen on järjestelmää kuunneltava analyttisesti, sillä tavoitteena on parantaa äänenlaatua. Jos ekvalisoinnilla on haitallisia vaikutuksia äänenlaatuun, on viritys lopetettava ja järjestelmä tutkittava. Kaikki yli 3dB:n säätöliikkeet, jonkin tietyn taajuuden korostamiseen 1/3 oktaavin alalta, voidaan lukea vakaviksi korjausliikkeiksi. Eikä esim. tällaista ”korjaavaa” toimenpidettä tule tehdä ilman vakavamielistä ja analyttistä tarkastelua sen todellisesta tarpeesta.

Koska ekvalisointia sitten tarvitaan? Omasta mielestäni silloin jos toimenpiteellä voimme saavuttaa tai päästä kohti aiemmin esitettyjä tavoitteitamme. Teoreettisesti ajateltuna ekvalisointi on tarpeetonta, jos meillä on kaiutin, joka omaa jo haluamamme taajuusvasteen ja se kattaa koko yleisöalueen niin että kaikki asiakkaat kokevat saman tason ja taajuusvasteen, eikä heijastustenvaikutus pääse haittaamaan taajuuksittaista ja tasollista vastettamme (Davis ja Patronis 2006, 414). Mielestäni ekvalisoinnille löytyy peruste, jos jokin yllä olevan teorian mukaisista muuttujista ei pidä paikkaansa.

Järjestelmästä on hyvä selvittää taajuusvaste, johon ekvalisointi perustuu. Ekvalisointiin vaikuttavat mittaukset suoritetaan kaiuttimen akselilta kahdesta syystä. Silloin ratkaisut vaikuttavat suurimmalle alalle ja ekvalisointi päätöksiin ei vaikuta kaiuttimen akselin ulkopuolinen taajuusvaste, jossa usein korkeat taajuudet vaimenevat nopeasti (McCarthy 2007, 441).

Mitatessani esimerkijärjestelmän taajuusvastetta käytän avukseni Easera systune ohjelmiston kaksikanavaista ”magnitude” – mittausta, jossa siis vertaillaan syötetyn referenssimateriaalin ja mitatun materiaalin erotusta taajuuksittain (AFMG Ahnert Feistel Media Group 2006–2007, 78–80). Mittauksissa on huomioitu äänen kulkuaikaerotukset ja mittauksessa on signaalina käytetty ”pink noisea”, joka siis on kohinaa ja sisältää taajuudet välillä 20 Hz – 20 kHz yhtenäisellä energiatasolla.

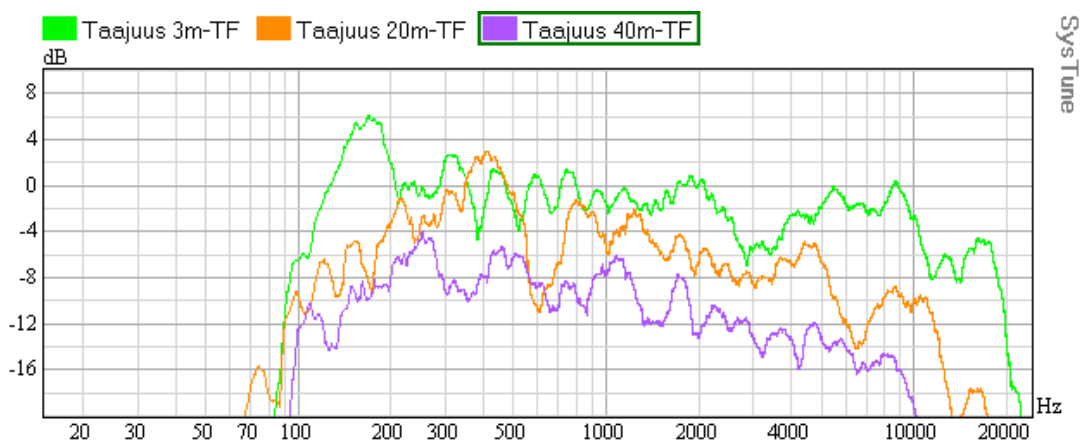
Kuvassa 19. on kauppakeskus Eloon rakentamamme pääjärjestelmän magnitude käyrä kolmelta eri etäisyydeltä ja mitattuna toisen pääkaiutinryhmän akselilta. Mitattaessa laskin ääntä ensin ainoastaan Q1 kaiuttimista ja muut järjestelmän osat olivat vaiennettuina. Todellisuudessa otin useampia mittauksia kuin 3, mutta luettavuuden vuoksi en esitteleni niitä kuvassa 19. Luettavuuden takia olen myös pyöristänyt käyrän muotoa ohjelman ”smoothing” – toiminnolla, jolla kuvissa olevat käyrät ovat pyöristetty siten että arvopisteitä sijaitsee 1/6 oktaavin välein, joiden välille käyrä piiryy (AFMG Ahnert Feistel Media Group 2006–2007, 140).

Mitä johtopäätöksiä kuvasta 19. voidaan todeta? Ymmärrettävästi alle 100 Hz ei enää paljon ääntä välity, koska siellä sijaitsee jakopiste ja siitä alemmat taajuudet toistetaan bassokaiutinjärjestelmällä. Välillä 3m – 20m yleinen taso on laskenut suhteellisen vähän, jos ajatellaan, paljonko sen tulisi käänteisenneliölain mukaan laskea. Tämä ilmiö voidaan kuitenkin selittää linjasäteilevän kaiutinjärjestelmän ominaisuudella säilyttää tasaisempi äänenpaine joillain taajuuksilla etäisyyden kasvaessa.

Linjasäteilevän kaiutinjärjestelmänteorian mukaan tasollinen lasku lähikentässä on 3dB:n matkan kaksinkertaistuksessa ja kaukokentässä normaalin 6dB:n verran. Se missä lähikenttä loppuu ja kaukokenttä alkaa on riippuvainen taajuudesta ja käytetyn linjasäteilijän korkeudesta. (Eargle ja Foreman 2002, 145) Näitä asioita voidaan laskea matemaattisesti, mutta itse suosin asian jättämistä kaiutinvalmistajien huoleksi, koska ymmärrettävästi ilmiö on monimutkainen ja sisältää paljon muuttujia. Täysin autopilotille ei taaskaan kannata vaihtaa, sillä valmistajien suunnittelemien suunnitteluohjelmien (esim. Arraycalc) huolellinen käyttö on järjestelmäsuunnittelijan ehdoton vastuu.

Käyrien 20m ja 40m välinen erotus näyttäisi olevan 6dB:n luokkaa, joten teoriolla näyttäisi olevan kosketuspinta myös käytännönelämään. Muita huomioita mielestäni on kauimmaisten mittausten laskeva korkeidentaajuuksientoisto suhteessa muihin taajuuksiin. Tähän ilmiöön kaiutinvalmistaja tarjoaa lääkkeeksi prosessoinnista löytyvää kiinteää korostusta nimeltään ”HFC”, joka on n. 11 kHz:n tienoilla ja jonka tarkoituksena on kompensoida ilman aiheuttamia vaimentumia (D&B Audiotechnik AG 2006, 6).

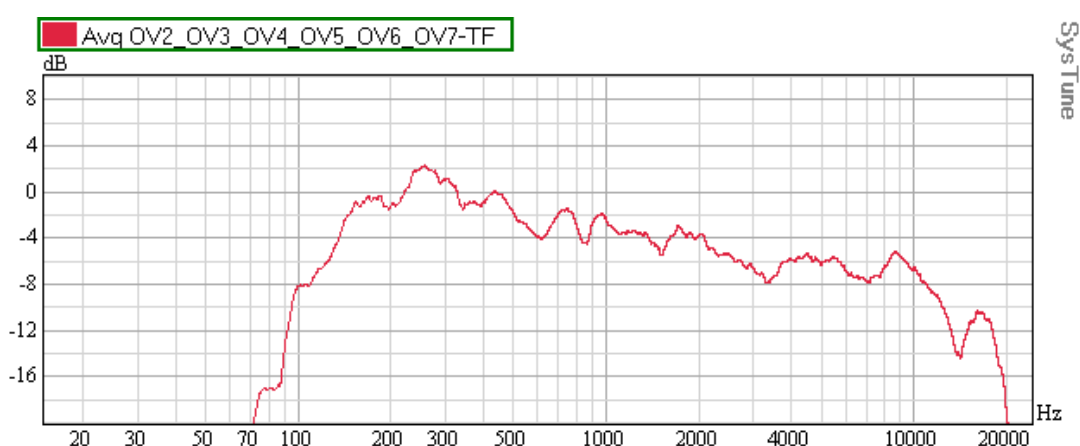
Tässä tapauksessa kytkin HFC – korostuksen päälle. Lisäksi vielä huomaan mielestäni tietynlaista trendinomaista korostumaa n. 400 – 500 Hz:n välillä, sekä 1 – 2 kHz:n välillä. Näihin en vielä kuitenkaan tällä erää puutu ennen kuin tarkastelemme kuvaa 20. jossa on kyseessä keskiarvokäyrä kuudesta eri etäisyydellä tehdystä mittauksesta välillä 3 m – 40 m.



Kuva 19. Kauppakeskus Elo: pääjärjestelmän magnitude etäisyyksiltä 3m, 20m ja 40m.

Kuvassa 20. näemme siis ohjelmiston laskeman keskiarviollisen käyrän suoritetuista mittauksista. Aika hyvät lähtökohdat mielestäni jos ajattelemme että yhtään ekvalisointi asetusta ei vielä ole asetettu. Tästä voidaan kiittää kaiutinvalmistajaa ja voimme todeta, että Arraycalcilla tehdyt suunnitelmat ovat olleet käyttökelpoisia. Joitakin asioita voidaan harkita kuitenkin hienosäädettäviksi. Keskiarvossa voidaan nähdä yleisesti hieman enemmän energiaa väillä 200 – 550 Hz, kuin sitä korkeammilla taajuuksilla. Tämä korostuma saattaa johtua järjestelmässä syntyvästä summautumisilmiöstä (engl. ”coupling”). Muistamme kaiutin osiosta, että kaiuttimien ja elementtiensuuntaavuus on taajuuskohtaista ja matalammat taajuudet leviävät verrattain suuremmalle alalle, kuin korkeammat. Näin ollen, kun järjestelmä koostuu useista kaiuttimista voi matalampien taajuuksien energia näkyä keskiarviollisesti korostuvana ilmiönä suhteessa korkeisiin taajuuksiin. Valmistaja tarjoaa tähänkin ilmiöön valmista korjausasetusta, joka on nimeltään ”CPL” ja sillä tätä ilmiötä voidaan kompensoida. Negatiiviset CPL asetukset vaimentavat taajuuksia alkaen 1 kHz:stä alaspäin, mutta kohdistuen suurimman vaimennuksen vasta 400 Hz:n alapuolelle (D&B Audiotechnik AG 2006, 6). Kuvassa 20. olevissa mittauksissa järjestelmässä on käytössä jo CPL asetus -3

dB, jonka jo Arraycalc suositteli laitettavaksi. Mittauksen perusteella voisin laittaa asetukseksi -4 dB ja kuunnella sen tekemää vaikutusta ja tarpeellisuutta. Tarjoaisin myös järjestelmälle ehkä kaksi vaimentavaa filttteriä, jotka olisivat taajuuksilla 420 Hz ja 1,8 kHz vaiennuksen määrä olisi noin 2-3 dB ja filtlerin leveys n. 1/3 – 1/2 oktaavia. Se että käyttäisinkö näitä filtttereitä, selviäisi ainoastaan kuuntelemalla niiden vaikutusta. Tehtyjen korjausten jälkeen voidaan järjestelmä toki uudelleen mitata ja todeta tapahtuneet muutokset, mutta koska käytössäni oli vain yksi mikrofoni ja mittaukset tuli ottaa yksi kerrallaan, en tähän tietenkään ryhtynyt vaan luotin korvieni kertomiin tuloksiin. Aikaakin on aina rajallisesti ja paljon muuta tehtävää.



Kuva 20. Kauppakeskus Elo: pääjärjestelmän magnitude keskiarvo 6 mittauksesta etäisyyksiltä 3m, 7m, 14m, 20m, 30m ja 40m.

Nyt oli pääjärjestelmä ekvalisoitu ja vaikkakin tilassa oli huomattavat määrät kaikua, en löytänyt mitään yksittäisiä selkeitä huonemoodeja joihin ekvalisoinnilla voitaisiin puuttua. Yleistä kaiuntaa vastaan taistelin viivekaiuttimilla.

Vielä ekvalisoinnista puhuttaessa on hyvä pohtia joitain asioita, joihin se ei välttämättä ole oikea ratkaisu. Herrat Davis ja Patronis (2006, 415) esittelevät kirjassaan seuraavat mm. tavat käyttää ekvalisaattoria väärin:

- Ekvalisaattorilla pyritään korjaamaan kampsuodinilmiön aiheuttamaa taajuusvasteenmuutosta, eikä niinkään selvitetä kampsuodinilmiönlähdettä.

- Mikrofoni / kaiutin on pöydällä ja lähellä jotain kovaa ja heijastavaa pintaa. Kyseessä on siis ensiheijastusten ekvalisointi, vaikka ratkaisu olisi pikemminkin mikrofonin / kaiuttimensiirto tai uudelleensuuntaaminen.
- Liiallisen vaimennuksen käyttö per lisätty filteri.
- Ekvalisaattorin filterin käytöllä pyritään poistamaan ongelmaa, joka johtuu mekaanisesta kierrosta.

Ekvalisoinnissa on mielestäni muistettava tavoitteet, joita aiemmin käsiteltiin ja toimenpiteet, joita tehdään, tulee olla harkittuja. Olen samoilla linjoilla Herra McCarthyn kanssa, kun hän esittää kirjassaan (2007, 429) että järjestelmän signaalitiessä on piste, jossa taide muuttuu tieteeksi. Tämän pisteen jälkeen viinilasi ja baskeri laitetaan naulakkoon ja vaihdetaan ne mittalaitteistoon ja analyttiseen ajatteluun/kuunteluun. Piste sijaitsee äänijärjestelmän signaalitiellä miksauspöydän jälkeen, mutta ennen kaiutinprosessoreita. Ekvalisoinnin vaikutuksesta mainittakoon vielä se, että liiallinen ekvalisointi ei voi parantaa äänenlaatua koko tilassa, mutta sillä voidaan huomattavissa määrin huonontaa sitä (McCarthy 2007, 459). Tämä ilmiö toteutuu jos ekvalisointipäätökset tehdään yhden pisteen perusteella, esim. miksauspisteen ja näin ollen päätökset eivät palvele koko yleisönalaa, vaan miksaajaa.

8.3 Keskinäinen tasonsäätö

Keskinäistä tasonsäätöä harrastetaan silloin, kun järjestelmä koostuu pääjärjestelmästä ja täydentävistä järjestelmistä. Kyseessä on siis kaiutinryhmien toistoalueiden äänenpainetasojen yhtenäistäminen. Tasonsäätöön tarvittavat mittaukset suoritetaan kaiutinryhmän akselilta ja kultakin kaiutinryhmältä erikseen. Tämä toimenpide palvelee esittämäämme tavoitetta: minimaalinen tason vaihtelu tilassa. (McCarthy 2007, 454)

McCarthyn (2007, 454) resepti tasonsäätöön on seuraava:

1. Avaa pelkkä dominoiva järjestelmä, eli esim. pääjärjestelmä.
2. Akselilta otettu mittatulos on nyt meidän referenssi taso.
3. Avaa pelkkä täydentäväjärjestelmä.

4. Aseta täydentävänjärjestelmän akselilta otettu mittausta vastaamaan referenssitason.
5. Jatka seuraavaan täydentävään järjestelmään samalla periaatteella.

Mittauksessa on hyvä käyttää magnitudemittausta, koska silloin näemme myös taajuuksittaisen vaihtelun siirryttäessä järjestelmästä toiseen. Mutta jos tämä ei ole mahdollista mielestäni hyviä työkaluja on myös äänenpainemittari ja korvat.

Esimerkkijärjestelmien kohdalla tasosäätöä harrastetaan pääjärjestelmän ja etutäyttöjärjestelmien välillä. Usein pyrimme ekvalisoimaan molemmat järjestelmät akselilta otetun mittatuloksen perusteella ennen tasosäätövaihetta. Näin pyrimme palvelemaan myös tavoitetta: minimaalinen taajuksittainen vaihtelu tilassa.

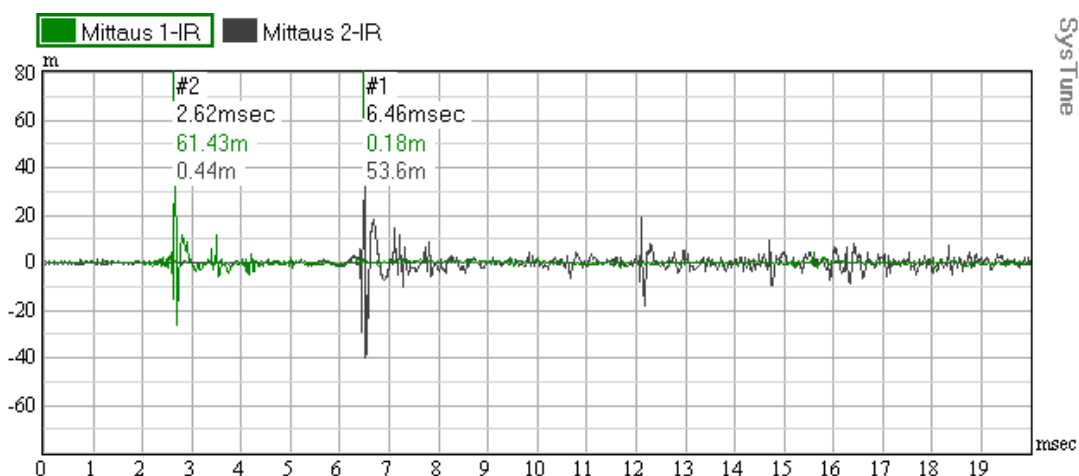
Esimerkkijärjestelmän tapauksessa tasosäätö koski kaiutinryhmiä, joiden taajuuksittainen toistovaste oli sama. Jos taas haluamme sovittaa tason järjestelmän osien välillä joiden taajuuksittaiset vastualueet ovat eriävät, on meidän katsottava referenssitason järjestelmän osille annetun jakotaajuuden mukaan (McCarthy 2007, 455). Tällöin on mielestäni myös hyvä asettaa tavoitteensa sille missä tasossa esim. bassokaiuttimet ovat suhteessa pääjärjestelmään. Tapoja on useita, joista oikeita ei mielestäni yhtään. Itse pidän tässä asiassa lähtökohtana ohjelmamateriaalin ominaisuuksia ja pyrin löytämään sille soveltuvan taajuusvasteen. Referenssilevyt ja korvat ovat myös hyviä työkaluja bassokaiuttimien tasoa pohtiessa. Jotkin asiat kuitenkin viittaavat ei onnistuneeseen tasosuhteeseen: useassa mikrofonikanavassa oleva alapäänkorostus viittaa siihen, että miksaajan mielestä alapäättä on liian vähän. Tässä on mielestäni keskustelun ja kompromissin mahdollinen paikka.

Kaiutinasettelu ja suuntauksen ollessa onnistunutta, tulisi tasosäädön jälkeen myös järjestelmienleikkauspisteessä summutuneen äänentason vastata akselilta otettua referenssiarvoa. (McCarthy 2007, 456–458)

8.4 Impulssivaste ja viiveet

Impulssivasteidenoptimointiin siirrytään kun ekvalisointi on suoritettu ja sovitettavat järjestelmien osien keskinäiset tasot ovat saatettu halutulle tasolle. Impulssivasteen mittauksen tavoitteena on asettaa järjestelmän osille viiveajat, joiden avulla niiden leikkauspisteet saadaan yhtenäisemmiksi ja näin vähennetään kampsuodinilmiötä. Toimenpiteenä impulssivasteenmittaaminen ja viiveiden asettaminen suoraviivaista hommaa. Mittaamme järjestelmien leikkauspisteessä olevan impulssivasteen molemmilta järjestelmiltä erikseen ja tämän jälkeen viivästämme enemmän saapunutta ääntä niin, että äänet saapuvat molemmista järjestelmistä samanaikaisesti. (McCarthy 2007, 463)

Selvennetään asiaa lyhyesti kuvan avuin. Kuvassa 21. näemme tyypillisen impulssivastemittauksen tuloksen. Mittauksessa on kaksi tulosta: musta ja vihreä käyrä. Ohjelma ilmoittaa meille, että mustan käyrän mittasignaali saapuu 6,46 millisekuntia myöhemmin suhteessa referenssiin ja vihreän mittauksen signaali vastaavasti taasen 2,62 millisekuntia. Nämä mittaukset voisivat olla esimerkiksi meidän esimerkijärjestelmän pääjärjestelmän ja etutäyttöjärjestelmän leikkauspisteestä, joista musta voisi olla pääjärjestelmä. Mittauksen jälkeen päätämme viivästää etutäyttöjärjestelmää $6,46\text{ms} - 2,62\text{ms} = 3,84$ millisekuntia. Nyt ääniensaapumisaika leikkauspisteeseen tulisi olla sama ja kampsuodinilmiön mahdollisuus pienempi. Samanlainen toimenpide suoritetaan viivekaiuttimille. Näille akustinen leikkauspiste löytyy samoin kuin aiemmillekin eli kuuntelemalla. (McCarthy 2007, 463–466)



Kuva 21. Impulssivaste ja viiveet, jälkimmäiset käyrät ovat huoneheijastuksia.

On myös tapauksia jossa koko äänijärjestelmää pyritään viivästämään lavalta saapuvaan ääneen. Tätä toimenpidettä voidaan harrastaa, mutta usein se perustuu kuitenkin arvauksin ja lavalta saapuvan materiaalin taajuussisältö ja vaiheet on usein melko eriävää suhteessa järjestelmäämme. Mitään ”kaunista” leikkaussaumaa ei ole odotettavissa. Tavoitteena voidaan pitää äänikuvan parempaa hallintaa ja parempaa lokalisaatiota. Toimenpide voi olla kannattava lavavuodon ollessa kova ja tällöin on hyvä muistaa ajatelma: ”jos et voi voittaa heitä, liity heihin”. (McCarthy 2007, 463)

8.5 Vaihevaste ja viiveet

Tilanne, jossa vaihevasteita tarkastellaan eniten ja pyritään sovittamaan, muodostuu niiden järjestelmien välille, joilla on eriävä taajuuksellinen vastuualue tai jos kaiutintyyppit / merkit ovat erilaisia. Eli esimerkki tapauksissa tätä toimenpidettä harrastetaan bassokaiutinjärjestelmän ja muun järjestelmän välillä. Pääjärjestelmän ja etutäyttöjärjestelmän toiminta-alue rajoittuu 100 Hz tienoille, johon tehdasasetteiset jakosuotimet ovat asennettu. Tästä eteenpäin on vastuu bassokaiuttimilla. Esimerkkitapauksissa pääjärjestelmä on ripustettuna ja bassokaiuttimet sijaitsevat maassa, joten on ymmärrettävää että niistä saapuvaäännet ovat eriaikaisia, eli viiveessä toisiinsa. Näin ollen eriäviä ovat myös äänienvaihesuhteet jakotaajuuden osalta, kuten kappaleessa 2.2 ”vaihe” esitimme.

Jakotaajuuden onnistumisen kannalta olisi toivottavaa, että vaihesumma jakopisteessä olisi mahdollisimman lähellä $0^\circ + 0^\circ$. Esimerkkijärjestelmissä tämä piste löytyy 100 Hz kohdalta. Nyt meidän tulisi viivästä toista järjestelmää, niin että summa toteutuu.

Viivästämiseen sisältyy eräs ongelma. Nimittäin kaiuttimien väliset etäisyysuhteet vaihtuvat jatkuvasti, kun kävelemme ympäriinsä tilassa. Voimme viivästä järjestelmiä niin, että vaihesumma on täydellinen ainakin yhdessä pisteessä, mutta ei kaikkialla (McCarthy 2007, 466).

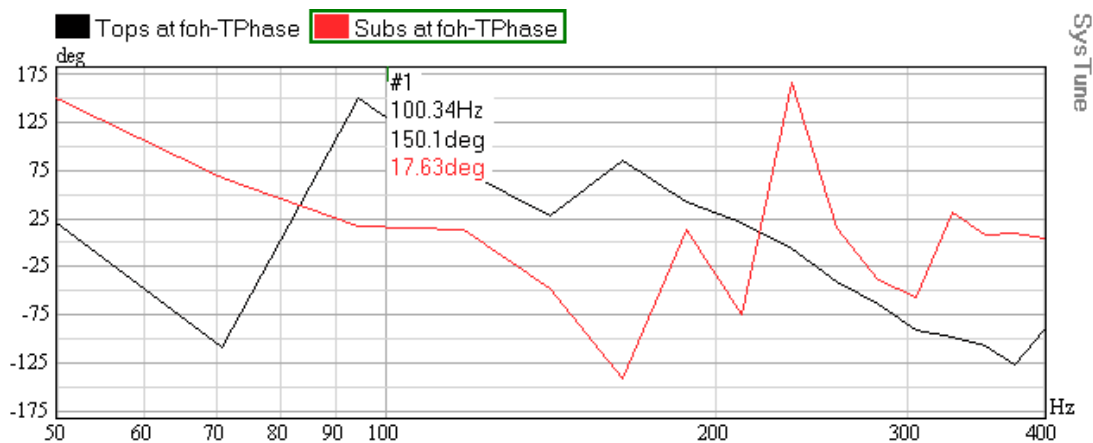
Pohtikaamme esimerkkijärjestelmiemme jakotaajuuden aallonpituutta, joka 100 Hz on noin 3,4 metriä. Tällöin 100 Hz on siis suorittanut 360° . Puolet tästä eli

180° on 1,7 metriä. Jos siis viritämme järjestelmien vaihevasteen jonkin pisteen mukaan, saamme ymmärrettävästi sinne kaikista parhaan summan eli eniten ääntä jakotaajuudelle. Tällainen piste on usein miksauspiste, jossa päätökset sisällön suhteen tehdään. Kun olemme löytäneet vaihevasteen kohdalleen, on järjestelmien etäisyysuhteilla n. 1,7 metriä liikkumatoleranssia ennen kuin 0° + 180° summautuminen tapahtuu. Pohdittavaksi jää olisiko vaihevasteen mittaamiseen paras paikka siellä missä järjestelmien keskinäisten etäisyyksien vaihtelu olisi lähimpänä keskiarvoa? Etäisyyksien muutoksiin eniten vaikuttava tekijä on tietenkin yleisöalueen muoto, etäisyys ja mahdolliset ”mäkiosuudet”.

McCarthy (2007, 466) esittää seuraavaa toimintamallia vaihevasteiden mittaamiseen:

1. Laita pelkkä pääjärjestelmä päälle ja selvitä äänenkulkuajan viive mittauspisteeseen ja kompensoi tämä mittauksessa.
2. Laita pelkkä bassokaiutinjärjestelmä päälle, mutta älä vaihda aiemmin kompensoitua viiveaikaa vaan säädä järjestelmän omaa viivettä kunnes jakotaajuudenvaiheet osuvat kohdalleen.
3. Laita nyt molemmat järjestelmät päälle ja arvio muutos taajuusvasteessa.

Tämän ohjeen mukaisesti toimin mm. Kauppakeskus Elon äänijärjestelmän kohdalla josta kuvan 22. mittaukset on otettu. Punainen viiva kuvaa bassokaiutinjärjestelmän tulosta ja mustaviiva pääjärjestelmää. Huomaamme, että jakopisteessä on nyt n. 150° + 18° summautuminen. Nyt voimme viivästä esim. bassokaiuttimia siten että, saamme 100 Hz taajuudelle 132° (150°-18°) vaihesiirron. Ja kun tiedämme että 100 Hz:n 360° kierto kestää 10 ms voimme laskea haluamamme viiveajan seuraavasti: $10\text{ms} / 360^\circ * 132^\circ \approx 3,7 \text{ ms}$. Näin summautumien tulisi olemaan lähelle 150° + 150°, eli vaiheet kunnossa. Tämän jälkeen on hyvä tarkistaa vielä muutokset taajuusvasteessa viiveillä ja ilman. Sillä jos vaiheistamisemme oli onnistunut, tulisi meillä olla jakotaajuudella enemmän energiaa viiveillä kuin ilman. Myös tarkistaminen mittarilla vaihevasteen puolelta on suositeltavaa.



Kuva 22. Kauppakeskus Elo: Vaihevaste pääjärjestelmän ja bassokaiuttimien väillä miksaus pisteessä.

Syy miksi näitä kaiutinjärjestelmiä ei viivästetty käyttäen impulssivasteen mittausta, johtuu juurikin siitä syystä, että järjestelmänosat tarjoavat tyystin eri taajuuskaistan ja näin ollen impulssivasteella saadut tulokset eivät kerro meille sitä olennaisinta, eli jakopisteen aika- eli vaihesuhdetta. (McCarthy 2007, 466)

8.6 Kuuntelu

Nyt on esitelty yksi tapa toteuttaa järjestelmän kalibrointia käyttäen apunaan mittalaitteistoa. Toimintatapaa en voi väittää oikeaksi, mutta teorioita sen takana voidaan pitää tieteellisesti huomionarvoisina. Mikään mittakalusto ei kuitenkaan yksistään tuota mitään tuloksia ellei sitä ole arvioimassa ihmisen aivot. Jokin asia mittarinnäytöllä voi näyttää hyvinkin kummalliselta ilmiöltä, mutta jos avaa silmänsä tai menee mittamikrofonin kohdalle kuuntelemaan saattaa asiaan löytyä yllättävän yksinkertainen ratkaisu. Itse tykkään kuunnella järjestelmää vielä analyttisesti referenssimusiikilla mittausten ja kalibroinnin jälkeen. Tämä johtunee siitä, että työvuosien karttuessa oppii ymmärtämään mittareiden tuloksia paremmin ja näkemään analogian käytännönelämään. Itse olen kuitenkin suhteessa (lähdeteosten henkilöihin) vähemmän mittausta harjoittanut yksilö. Lopulliset päätökseni perustuvat korvien ja aivojen yhteistyöhön, joka sinällään on myös kaksikanavaista mittausta jossa referenssinä toimii kuulomuisti referenssimusiikista ja mittasignaalina kuuloaisti. Uskon, että molempia tapoja käytettäessä, oppii myös tulkitsemaan mittatuloksiakin totuudenmukaisemmin.

9 OPINNÄYTETYÖN KAUPALLINEN HYÖDYNTÄMINEN

Opinnäytetyöhön kuuluu suunnitelma ja spekulatiota siitä, kuinka tehty urakka muuntautuu valuutaksi. Seuraavaksi pohdin oman työni kaupallisen potentiaalin hyödyntämistä.

Hahmottelen itselleni ensin kohderyhmän, johon kuuluu kustantamot, oppilaitokset ja ehkäpä suuret äänentoistolaitevuokraamot. Näillä jokaisella voi olla tyystin omat intressit opinnäytetyöni sisältämän asiasisällön hyödyntämisessä.

Kirjoja ja lehtiä julkaisevat kustannusyhtiöt ovat selkeä asiakasryhmä. Näen oman työni mahdollisuudet päätyä esimerkiksi osaksi jotain suurempaa kokonaisuutta, vaikkapa kirjaa. Teksti on kirjoitettu siten, että sen voi osittaa artikkeleihin. Näitä on mahdollista tarjota julkaistavaksi musiikki- ja äänialan lehtiin tai internetsivustoille.

Oppilaitokset muodostuvat potentiaalisiksi asiakkaikseni, koska tekemäni työ on rakenteeltaan sen luontoinen, että se voidaan suoraan kääntää oppikokonaisuudeksi. Työ itsessään tarjoaa materiaalin ja rakenteen oppikokonaisuudelle. Kurssitkin voidaan osittaa. Työn ja siinä esiintyvien lähteiden pohjalta voidaan käsitellä esim. pelkkää äänenfysiikkaa. Voin tarjota oppilaitoksille valmista kurssia materiaaleineen ja siihen pohjautuvaa opetusta.

Suurien äänentoistovuokraamoiden intressit työhöni näen työvoimakoulutuksessa. Työnantajat voivat hyödyntää työni asiasisältöä mm. rekrytoinnin yhteydessä.

Kaikki yllämainitut mahdollisuudet eivät tietenkään tule ilman uhkatekijöitä. Pidän suurimpana uhkatekijänä uskottavuusongelmaa. Olen verrattain nuori esittämään uskottavasti aiemmin käsiteltyjä teorioita. Tässä asiassa on luotettava, että tekstini on riittävän perusteltua kokeneimmallekin ihmisryhmälle.

10 POHDINTA

Työ näyttää valmistuneen, vihdoinkin. Pala, jonka haukkasin, oli suhteellisen suuri, mutta toivottavasti se kannatti. Kirjoitusprosessi oli aikaa vievää puuhaa ja työtahti olikin noin 1 raakakirjoitettu sivu kahta tuntia kohden.

Työn sisältö ja rakenne muotoutuivat jatkuvasti työn edetessä ja välillä ilmiö muistutti tarua pandoranlippaasta. Sillä kun olin aloittanut jonkin osa-alueen tutkimisen, en voinut jättää toista huomiotta ja lumipallo nytkähti liikkeelle. Tämän pallon hallinta olikin työssäni kaikkien haastavin tehtävä. Vaikka rajasin työni käsittelemään vain ja ainoastaan äänentoistoketjun viimeistä osiota. Eli matkaa miksauspöydän ulostulosta kuulijan tärykalvolle ei se osoittautunutkaan niin yksinkertaiseksi, kuin äkkiseltään voisi kuvitella.

Otin kuitenkin haasteen vastaan ja tekstin informatiivinen puoli onkin mielestäni onnistunutta. Tässä siis pääsin tavoitteeseeni vaikka aikaa kuluikin. Halusin tekstin olevan vähintäänkin vertailukelpoista suomenkieliseen muuhun alankirjallisuuteen.

Opetuskäyttöön soveltuvuudesta en kuitenkaan pysty suoranaista arviota sanomaan. Mutta vertailtasessa esim. alan suomenkieliseen kirjallisuuteen on teksti ainakin selkeästi keskittynyt yhteen musiikkibisneksen toimialaan, jolla työtä oikeasti on tarjolla.

Näin digitaalisen aikakauden tai vallankumouksen kasvattina työni voi aiheuttaa myös eriäviä mielipiteitä esimerkiksi perinteisen ”kajarijätkä” – kulttuurin edustajien riveissä. Tavoitteeni oli kuitenkin tuoda esiin nykyaikaisia toimintatapoja ja pohtia teorioita niiden takana ja etsiä ikään kuin parempaan keskiarvolliseen lopputulokseen johtavia malleja.

Työn jatkon kannalta toivon työlleni löytyvän hyötykäyttöä niin konserttiäänentoiston opintoihin ja itse työelämään. Itselläni tämä tarkoittaa nyt toistaiseksi sitä, että laitan kynän nurkkaan ja tartun vaihteeksi laatikon kahvaan, koska teoria ilman käytäntöä on tarpeetonta nippelitietoa.

LÄHTEET

Anhert Feistel Media Group. 2007. Easera Systune: Software manual. Tulostettu 16.3.2009. <http://www.renkus-heinz.com/systune/index.html>

Bauer, H., Böhm, H. 2003. Noise-Directive 2003/10/EC. Tulostettu 9.3.2009. www.era.eu.org/02/downloads/ERA_am05directive.pdf

Blomberg, E., Lepoluoto, A. 1992-2005. Audiokirja: Audiotekniikka ammattilaisille ja kehittyneille harrastajille. Kappale 4., Sähköakustiikka Verkkojulkaisu. Tulostettu 16.3.2009. <http://ari.lepoluo.to/audiokirja/>.

McCarthy, B. 2007. Sound systems: Design and optimization. Modern techniques and tools for sound system design and alignment. Oxford UK: Elsevier.

Davis, D., Patronis, E. 2006. Sound system engineering. Third edition. Oxford UK: Elsevier.

Davis, G., Jones, R. 1989. Sound reinforcement handbook. Second edition. Milwaukee: Hal Leonard

D&B Audiotechnik GmbH. 2006. General information. Q1 Manual. Version 2.1. Tulostettu 30.7.2007 <http://www.dbaudio.com/en/doc/manuals/speakers/>

D&B Audiotechnik GmbH. 2004. General information. Q7 Manual. Version 2.7. Tulostettu 30.7.2007. <http://www.dbaudio.com/en/doc/manuals/speakers/>

D&B Audiotechnik GmbH. 2007. General information. R1 Version 1.0.x Manual. Tulostettu 30.11.2007 <http://www.dbaudio.com/en/doc/manuals/remote/>

D&B Audiotechnik GmbH. 2009. J, Q, T-Series system design d&b Arraycalc V5. TI 385, 2.0 EN. Tulostettu 21.11.2008 <http://www.dbaudio.com/en/doc/white/loudspeakers/>

Foreman, C., Eargle, J. 2002. Audio engineering for sound reinforcement. Milwaukee: Hal Leonard.

Holm, J., Joenpolvi, M. 2004. Äänentoistojärjestelmät: Kaiuttimet osio. 107 – 150. 2., Uusittu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

IEC, International standard. 2002. Electroacoustics: Sound level meters. Part 1: Specifications. Tulostettu 9.3.2009. webstore.iec.ch/preview/info_iec61672-1%7Bed1.0%7Den_d.pdf

Ilmatieteen laitos. 2009. Nykyinen ilmasto - Ilman kosteus. Luettu 13.2.2009 www.fmi.fi/ilmastonmuutos/suomessa_4.html

Laaksonen, J. 2006. Äänityön kivijalka. Helsinki: Idemco Oy, Riffi-julkaisut