

Risto Jussila

Makuuhuoneesta äänen jälkituotantotilaksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Medianomi

Elokuva ja televisio

Opinnäytetyö

11.11.2016

| | |
|--|--|
| Tekijä(t) Otsikko | Risto Jussila Makuuhuoneesta äänen jälkityötilaksi |
| Sivumäärä Aika | 37 sivua 11.11.2016 |
| Tutkinto | Medianomi |
| Koulutusohjelma | Elokuva ja televisio |
| Suuntautumisvaihtoehto | Äänisuunnittelu |
| Ohjaaja | Lehtori Aura Neuvonen |
| <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia äänen fysikaalisia ominaisuuksia sekä kuuloon liittyviä ilmiöitä, jotka ovat huoneakustiikan ymmärtämisen ja tutkimisen kannalta välttämättömiä. Tutkimuksessa selvitettiin, miten ääni käyttäytyy erilaisissa tilanteissa ja mitä akustisia ilmiöitä tulee ottaa huomioon, kun äänilähde sijoitetaan suljettuun tilaan. Näiden ilmiöiden vaikutuksiin perehdyttiin tekemällä akustisia mittauksia makuuhuoneesta äänen jälkitöihin soveltuvaksi konvertoidussa tilassa, joka akustoitettiin laajakaistaisilla vaimennuselementeillä.</p> <p>Akustoinnin ja akustisten ilmiöiden vaikutusta tutkittiin vertailemalla tilan sointia ennen vaimennuselementtien asennusta ja vaimennuselementtien asennuksen jälkeen. Erot soinnissa todennettiin mittamikrofonilla sekä huonemittauksia varten suunnitellulla tietokoneohjelmistolla, jolla huoneen taajuusvaste ja jälkikaiunta-aika saatiin helposti vertailtaviksi graafisiksi kuvaajiksi siniaaltopyyhkäisymittauksilla.</p> <p>Mittaustuloksista ilmeni, että huonemoodit ja kaiuttimien sijoittelu määrittelivät pääasiassa huoneen taajuusvasteen akustoinnista riippumatta, vaikka varhaisten heijastuksien aiheuttama interferenssi vähenikin huomattavasti. Suurin mittaustuloksista havaittava muutos tilan akustiikassa oli jälkikaiunta-ajan merkittävä lyheneminen ja tasoittuminen koko mitattavalla taajuusalueella.</p> <p>Opinnäytetyö pyrki tuomaan tärkeimmät huoneakustiikkaan vaikuttavat äänen fysikaaliset ilmiöt ja niiden todentamismenetelmät helposti lähestyttävään muotoon ja käytännön tasolle, jotta niistä olisi hyötyä esimerkiksi alan harrastajille tai opiskelijoille, jotka ovat aikeissa rakentaa äänen jälkitöihin soveltuvia tiloja.</p> | |
| Avainsanat | Ääni, Kuunteluhuone, Tarkkaamo, Akustiikka, Akustointi, Taajuusvaste, Jälkikaiunta |

| | |
|--|---|
| Author(s) Title | Risto Jussila From Bedroom to Sound Post-Production Room |
| Number of Pages Date | 37 pages 11 Nov 2016 |
| Degree | Bachelor of Arts |
| Degree Programme | Film and Television |
| Specialisation option | Sound Design |
| Instructor | Aura Neuvonen, Lecturer |
| <p>The primary aim of this Bachelor's thesis is to research physical properties and human perception of sound, which are essential to understanding and studying room acoustics. The thesis examines how sound waves behave in various situations, and what acoustic phenomena should be taken into account when the sound source is placed in a confined space. Making acoustic measurements in a bedroom, which is converted into sound post-production room, inspects the effects of these phenomena. The room is acoustically treated with broadband absorbers.</p> <p>The effects of the absorbers and acoustic phenomena are investigated by comparing the timbre of the room before and after the acoustical treatment. Differences are verified with a measurement microphone and acoustic measurement software, which produces comprehensible and comparable graphs out of the room's frequency response and reverberation time with sine-sweep measurements.</p> <p>Measurement results point out that room modes and speaker placement mainly defines the room's frequency response regardless of acoustic treatment, even though comb filtering caused by early reflections is greatly reduced. The main noticeable result of the acoustical treatment is significantly shortened and flattened reverberation time throughout the whole measured frequency band.</p> <p>The thesis aims to bring about the most important and relevant physical phenomena of sound affecting room acoustics into readily accessible and practical form so that it could be of use to students and hobbyists building or converting existing spaces to audio post-production rooms.</p> | |
| Keywords | Sound, Listening Room, Control Room, Acoustics, Acoustic Treatment, Frequency Response, Reverberation |

Sisällys

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Ääni ja akustiikka | 2 |
| 2.1 | Äänen perusteet | 2 |
| 2.1.1 | Mitä ääni on? | 2 |
| 2.1.2 | Siniaalto | 3 |
| 2.1.3 | Jakso, vaihe ja taajuus | 5 |
| 2.1.4 | Desibeli, kuuleminen ja taajuusvaste | 9 |
| 2.1.5 | Äänen nopeus ja aallonpituus | 12 |
| 2.2 | Akustiikan perusteet | 13 |
| 2.2.1 | Huoneakustiikka | 13 |
| 2.2.2 | Huonemoodit | 14 |
| 2.2.3 | Heijastuminen, diffraktio ja absorptio | 16 |
| 2.2.4 | Ensiheijastukset ja jälkikaiunta | 20 |
| 3 | Makuuhuoneesta äänen jälkityötilaksi | 22 |
| 3.1 | Huone ja sen ominaistaajuudet | 22 |
| 3.1.1 | Kuuntelujärjestelmä ja sen sijoittelu | 24 |
| 3.1.2 | Akustiikkaelementit ja niiden sijoittelu | 26 |
| 3.2 | Akustiset mittaukset | 30 |
| 3.2.1 | Huoneen taajuusvaste | 31 |
| 3.2.2 | Huoneen iskuäänivaste ja jälkikaiunta-aika | 33 |
| 4 | Pohdinta | 36 |
| | Lähteet | 38 |

1 Johdanto

Työskenneltäessä äänen parissa yhdeksi merkittävimmistä asioista muodostuvat äänen fysikaaliset ilmiöt ja niiden ymmärtäminen. Kuunteluhuoneiden ja äänen jälkityötilojen on tarkoitus toimia tiloina, joissa ääntä voi tarkastella kriittisesti. Äänen tulisi siirtyä kaiuttimista kuulijalle mahdollisimman muuttumattomana. Huoneakustiikkaan liittyvät ongelmat siirtyvät helposti loppumediaan, joten akustiikan vaikutus työskentelyolosuhteisiin on hyvin keskeinen. Suunniteltaessa ja rakennettaessa äänitöihin soveltuvaa työhuonetta tulee ottaa huomioon myös muutakin kuin taajuusvasteeltaan tasaisten tarkkailukaiuttimien hankkiminen.

Opinnäytetyössäni haluan selvittää, mitä ovat äänen fysikaaliset peruspilarit hyvän huoneakustiikan takana. Haluan perehtyä myös siihen, miten ääni käyttäytyy erilaisissa tilanteissa ja mitkä ovat suurimmat akustiset haasteet etenkin pienissä suljetuissa huoneissa. Työn alkupuolella tutkin, mitkä seikat vaikuttavat eniten kuunteluympäristön akustiikkaan, ja myöhemmässä osiossa mittaan, miten rakentamani akustiikkaelementit vaikuttavat makuuhuoneesta konvertoidun tilan sointiin ja työskentelyolosuhteisiin ennen ja jälkeen akustoinnin.

Tutkimuskohteena on tavanomainen kerrostaloasunnon makuuhuone, jonka tiheät ja hyvin ääntä heijastavat pintamateriaalit, varsin epäoptimaaliset mittasuhteet ja pieni tilavuus ovat erittäin haastavia akustiikan ja huoneen soinnin kannalta. Huoneen akustointi toteutettiin aikaisemmin suunnittelemallani ja rakentamallani itsestään seisovalla modulaarisella akustointijärjestelmällä.

Akustoinnin vaikutuksia tutkittiin vertailemalla tilan sointia ja taajuusvastetta ennen akustiikkaelementtien asennusta ja elementtien asennuksen jälkeen. Erot todettiin suorittamalla akustiset mittaukset tähän tarkoitukseen tehdyllä mittausohjelmistolla ja mittaamikrofonilla. Kuunteluhuoneen äänilähteistä tuotettiin puhdas siniaaltopyyhkäisy 20 Hz:n ja 20 kHz:n välillä, jolla mittaustulokset saatiin havainnollistettua graafiseen helpommin ymmärrettävään muotoon.

2 Ääni ja akustiikka

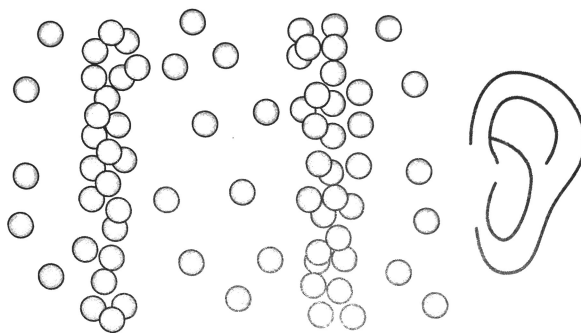
2.1 Äänen perusteet

Tässä luvussa tarkastellaan ääneen fysikaalisia perusteita, jotka ovat välttämättömiä tämän oppinäytetyön tutkimuksen ja aineiston ymmärtämisen kannalta.

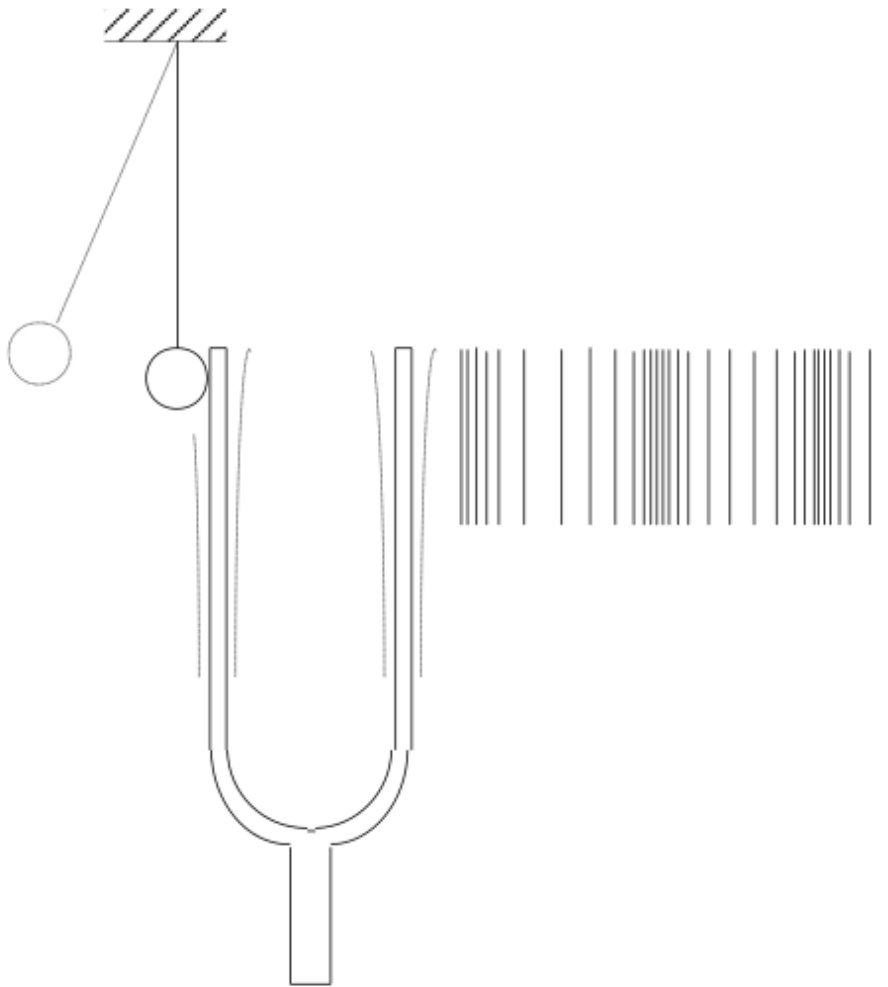
2.1.1 Mitä ääni on?

Ääni on luonteeltaan säännöllistä ja edestakaista aaltoliikettä, jonka lähteenä on jokin värähtelevä kappale. Tämä värähtely voi edetä erilaisissa väliaineissa, ja matkallaan myös siirtyä väliaineesta toiseen. Ihmisen kuultavissa oleva ääni on ilmanpaineen värähtelyä, jonka ihmisen kuulojärjestelmä aistii. Äänilähde synnyttää värähdelleessään ilmanpaineen liikettä, jossa vuoron perään ilmamolekyylit tihentyvät ja harventuvat. Ilmamolekyylit liikkuvat edestakaisin työntäen toisiaan, jolloin syntyy ketjureaktio ja ääni etenee. Tämän värähtelyn nopeus aistitaan joko matalana äänenä (hidas värähtely) tai korkeana äänenä (nopea värähtely). Ääniaallot syntyvät lähes poikkeuksetta mekaanisen värähtelyn seurauksena äänilähteistä. Esimerkiksi kitaran ääni alkaa kitaran kielten värähtelystä, pasuunan ääni soittajan huulien värähtelystä ja ihmisen puhe äänihuulien värähtelystä. (Laaksonen 2013, 4–5; Karjalainen 2000, 4; Hartmann 2013, 9.)

Ilmanpaineen tihentymisen ja harventumisen vuorottelusta havainnollistava esimerkki on lyömäsoittimen kalvo, joka kapulalla lyötäessä aiheuttaa edestakaista ilmanpaineen värähtelyä. Kalvon liikuessa alaspäin ilmanpaine sen yläpuolella laskee, kun taas kalvon liikuessa ylös ilmanpaine kasvaa. (Laaksonen 2013, 5.)



Kuvio 1. Ilmanpaineen värähtelyä, jonka ihmisen korva aistii äänenä (Laaksonen 2013, 5).

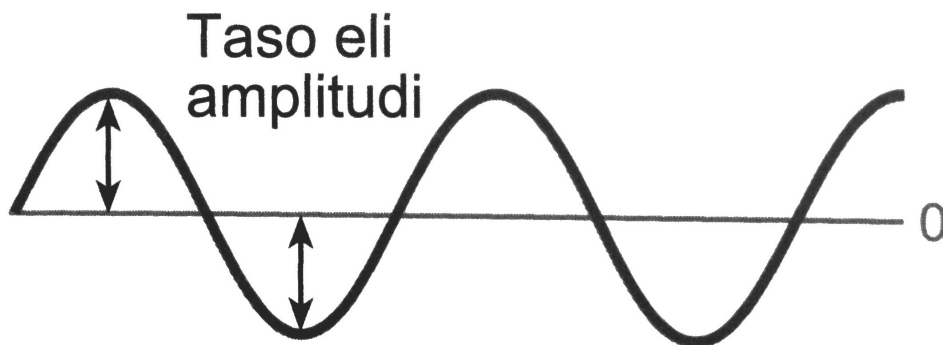


Kuvio 2. Ääniraudan tankojen värähtely aiheuttaa ympärivään ilmaan painevaihteluita eli ääniaaltoja (Riionheimo 2011).

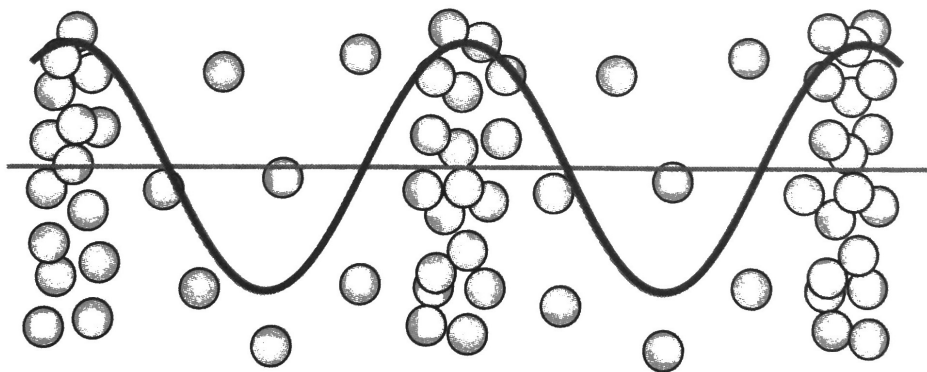
2.1.2 Siniaalto

Ääntä, ja kaikkea muuta harmonista värähtelyä, voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata siniaallolla (engl. sine wave). Puhtaita siniaaltoja ei luonnossa sellaisenaan esiinny, mutta kaikki äänet on mahdollista kuvata siniaalloilla, joilla on eri taajuus, vaihe ja taso (Everest 2001, 12). Siniaalto saa nimensä matemaattisen sin-funktion graafisesta muodosta. Äänen rakennetta tarkastellessa on aaltomuoto hyvä graafinen tapa tarkastella ilmanpaineen tasoa (engl. amplitude) eli äänenvoimakkuutta ajan funktiona. Äänen taso eli energia on maksimaalinen siniaallon sekä positiivisessa että negatiivisessa

huipussa, ja minimissään nollassa, jolloin äänellä ei ole energiaa. (Laaksonen 2013, 6–7, 12.)

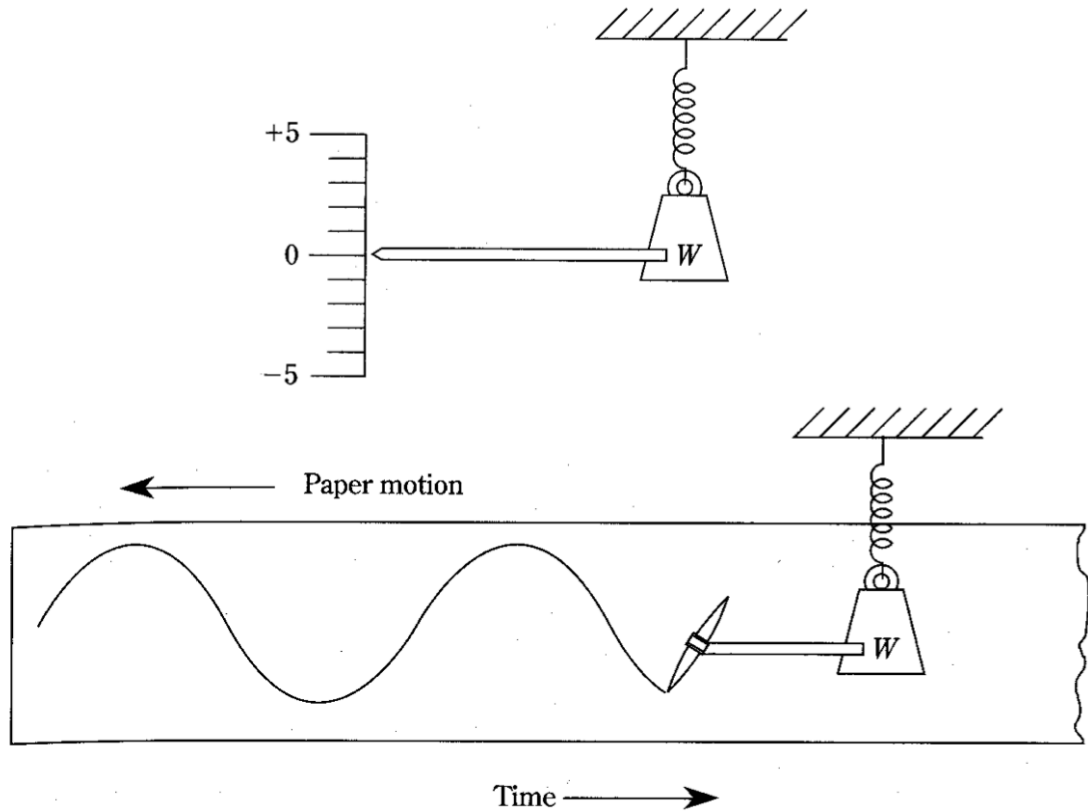


Kuvio 3. Sinaallon taso eli amplitudi kuvastaa äänen voimakkuutta (Laaksonen 2013, 7).



Kuvio 4. Äänen aiheuttama ilmanpaineen tihentymät ja harventumat kuvattuna siniaaltona (Laaksonen 2013, 6).

Kuviossa 5 jousessa roikkuva paino värähtelee harmonisesti sen luonnollisella taajuu-
della, mikäli painoa vedetään alas tasapainopisteestä (nollassa) ja se päästetään irti.
Paino jatkaa liikettä pystysuunnassa pisteen molemmin puolin teoreettisesti äärettö-
mään, jos mikään muu ulkopuolinen voima ei värähtelyyn vaikuta. Kun paino liikkuu
tasapainopisteen yläpuolelle, on sen siirtymä positiivinen. Vastaavasti painon liikkues-
sa tasapainopisteen alapuolelle on sen siirtymä negatiivinen. Kuviossa 5 painoon kiin-
nitetty kynä piirtää tasaisella nopeudella liikkuvaan paperiliuskaan viivaa, joka on sini-
aaltoa. Syntyneen siniaaltokuvaajan positiivisen ja negatiivisen huipun välinen siirtymä
on amplitudi eli taso. Kuvio havainnollistaa erittäin hyvin harmonisen liikkeen ja siniaal-
lon yhteyttä. (Hartmann 2013, 9–10.)



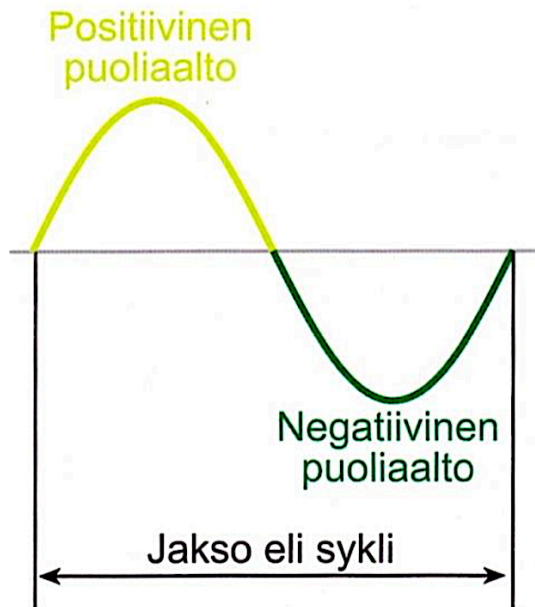
Kuvio 5. Liikkuvaan painoon (W) kiinnitetty kynä piirtää liikkuvaan paperiin siniaaltoa (Everest 2001, 2).

2.1.3 Jakso, vaihe ja taajuus

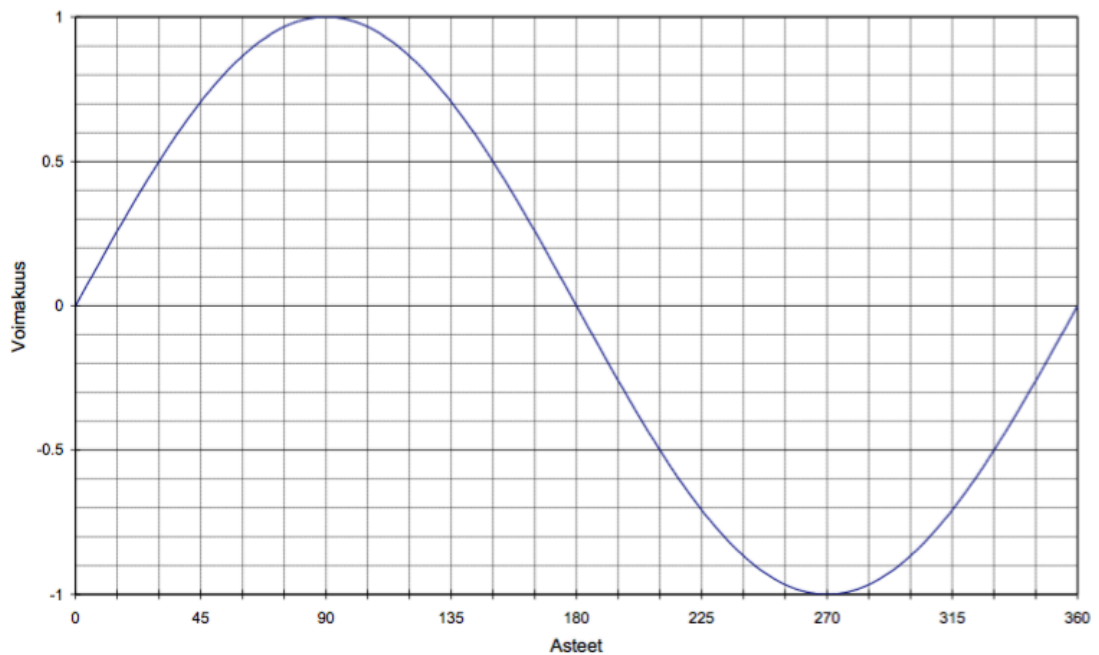
Siniaallon muotoisen värähtelyn toistuvuutta kutsutaan käsitteellä jakso (engl. cycle). Yksi kokonainen jakso (kuvio 6) eli kokoaalto rakentuu yhdestä positiivisesta ja yhdestä negatiivisesta puoliaallosta, jonka jälkeen värähtely toistuu samanlaisena. Jakso mitataan aallon nollatasosta, josta amplitudi alkaa nousta positiiviseksi, aina seuraavaan vastaavaan kohtaan. Aallon vaiheella (engl. phase) kuvataan jakson eri kohtia, ja sitä voidaan ilmaista asteluvuilla. Yhden kokonaisen jakson pituus on 360° . Kuviossa 7 näkyy kokoaallon kaikki vaiheet astelukuina. Äänen taso on korkeimmillaan jakson 90° kohdalla (jota kutsutaan myös $\frac{1}{4}$ -aalloksi) ja 270° kohdalla (jota kutsutaan $\frac{3}{4}$ -aalloksi), ja nollatasossa kohdissa 0° ja 180° . (Laaksonen 2013, 6–7; Everest 2001, 10.)

Kun useampi ääniaalto yhdistyy keskenään (esimerkiksi huoneessa jossa on 2 äänilähdettä), niiden väliset vaihe-erot vaikuttavat siihen, miten ne summautuvat toisiinsa. Mikäli kaksi ääniaaltoja ovat täysin identtiset amplitudiltaan, vaiheeltaan ja taajuudel-

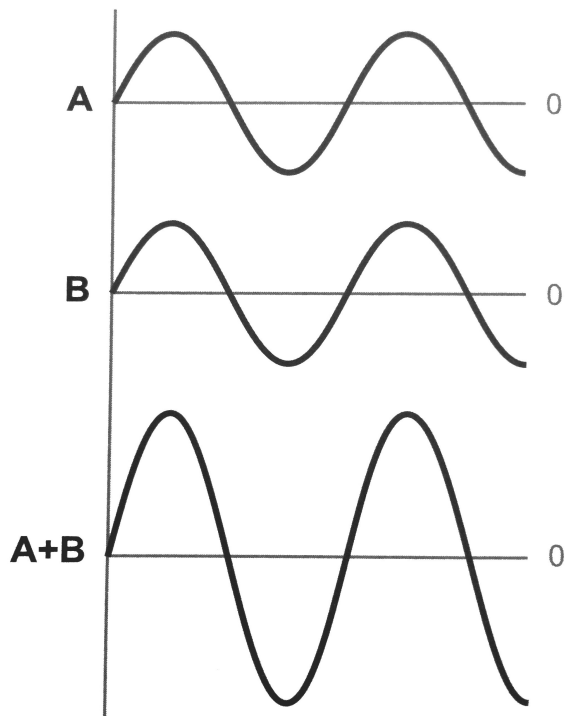
taan, summautuvat ne täydellisesti kaksinkertaistaen tason (kuvio 8). Jos toinen aalloista on alkanut 180° myöhemmin ja aalto on vastavaiheessa toiseen nähden, aallot kumoavat toisensa ja lopputuloksena on hiljaisuus (kuvio 9). Mikäli ääniaaltojen vaiheerot ovat jotakin tältä väliltä, tapahtuu vain osittaista summautumista tai kumoutumista. (Laaksonen 2013, 9–11.)



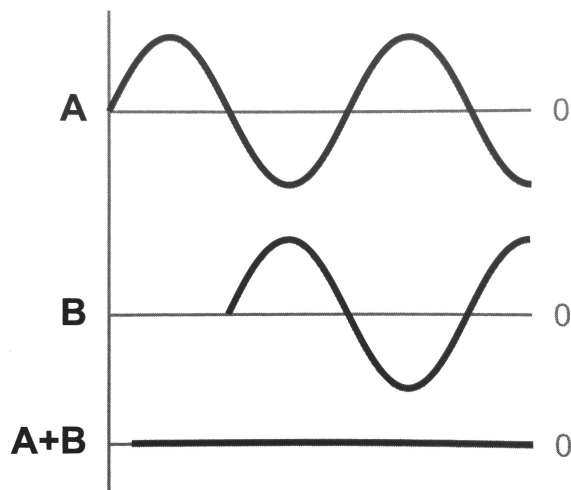
Kuvio 6. Siniaallon yksi jakso koostuu puoliaalloista (Laaksonen 2013, 7).



Kuvio 7. Siniaallon vaiheet (Riionheimo 2012).



Kuvio 8. Kahden identtisen samanvaiheisen ääniaallon summautuminen (Laaksonen 2013, 10).

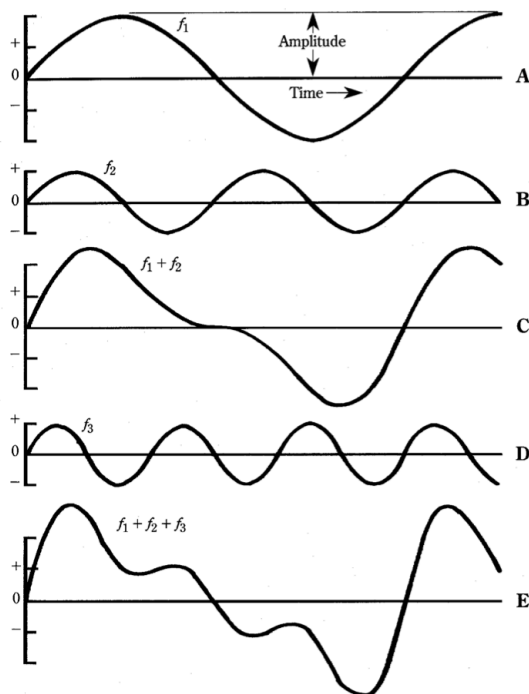


Kuvio 9. Kahden identtisen vastavaiheisen ääniaallon summautuminen eli kumoutuminen (Laaksonen 2013, 11).

Taajuudella (engl. frequency) tarkoitetaan kuultavan äänen korkeutta, toisin sanoen sitä, kuinka nopeasti ääniaallon syklit seuraavat toisiaan ja värähtelevät. Korkeat taajuudet värähtelevät nopeasti, ja ne kuullaan korkeina ääнинä. Näitä kutsutaan myös diskanttiaäniksi. Matalat taajuudet taas ovat hitaita värähtelyitä, ja ne kuullaan basso-

ääninä. Taajuuden mittayksiköksi on vakiintunut hertsi (lyhenne Hz), joka tarkoittaa kuinka monta täyttä sykliä ääni värähtelee yhden sekunnin aikana. Ihmisen kuuloalueen sanotaan normaalesti ulottuvan 20 hertsistä 20 kilohertsiin, mutta käytännössä kuuloalue voi vaihdella suurestikin yksilöiden välillä. Esimerkiksi iän tai meluallistuksen myötä kuuloalueen yläraja voi laskea merkittävästi. Kaikki äänityö tehdään kuitenkin pääasiassa tämän teoreettisen 20 Hz:n ja 20 kHz:n audiotajuusalueen (engl. audio band) sisällä. (Laaksonen 2013, 7.)

Taajuuden muuttuminen oktaavilla (engl. octave) tarkoittaa taajuuden muutosta kerrottuna tai jaettuna kahdella. Esimerkiksi taajuuden noustessa 100 hertsistä yhden oktaavin on taajuus 200 Hz, kahden oktaavin nousu on 400 Hz ja kolmen oktaavin 800 Hz. Vastaavasti 100 hertsistä oktaavi alaspäin on 50 Hz. Muut kuin teoreettiset puhtaat siniäänit koostuvat aina monista yhtä aikaa soivista eri taajuuksista, jotka voidaan jakaa yksittäisiin osavärähtelyihin. Näitä värähtelyitä kutsutaan joko harmonisiksi osavärähtelyiksi eli osasäveliksi (engl. harmonics) tai yläsäveliksi (engl. overtone), ja niiden voidaan matemaattisella Fourier-analyysillä todeta olevan puhtaita siniääniksiä. (Hartmann 2013, 14; Laaksonen 2013, 8–9.) Kuviossa 10 näkyy, kuinka perustaajuus ja kaksi seuraavaa osasäveltä summautuvat toisiinsa.



Kuvio 10. Perustaajuuden (f_1) ja kahden osasävelen (f_2 ja f_3) summautumien esitettyä ajan funktiona (Everest 2001, 13).

2.1.4 Desibeli, kuuleminen ja taajuusvaste

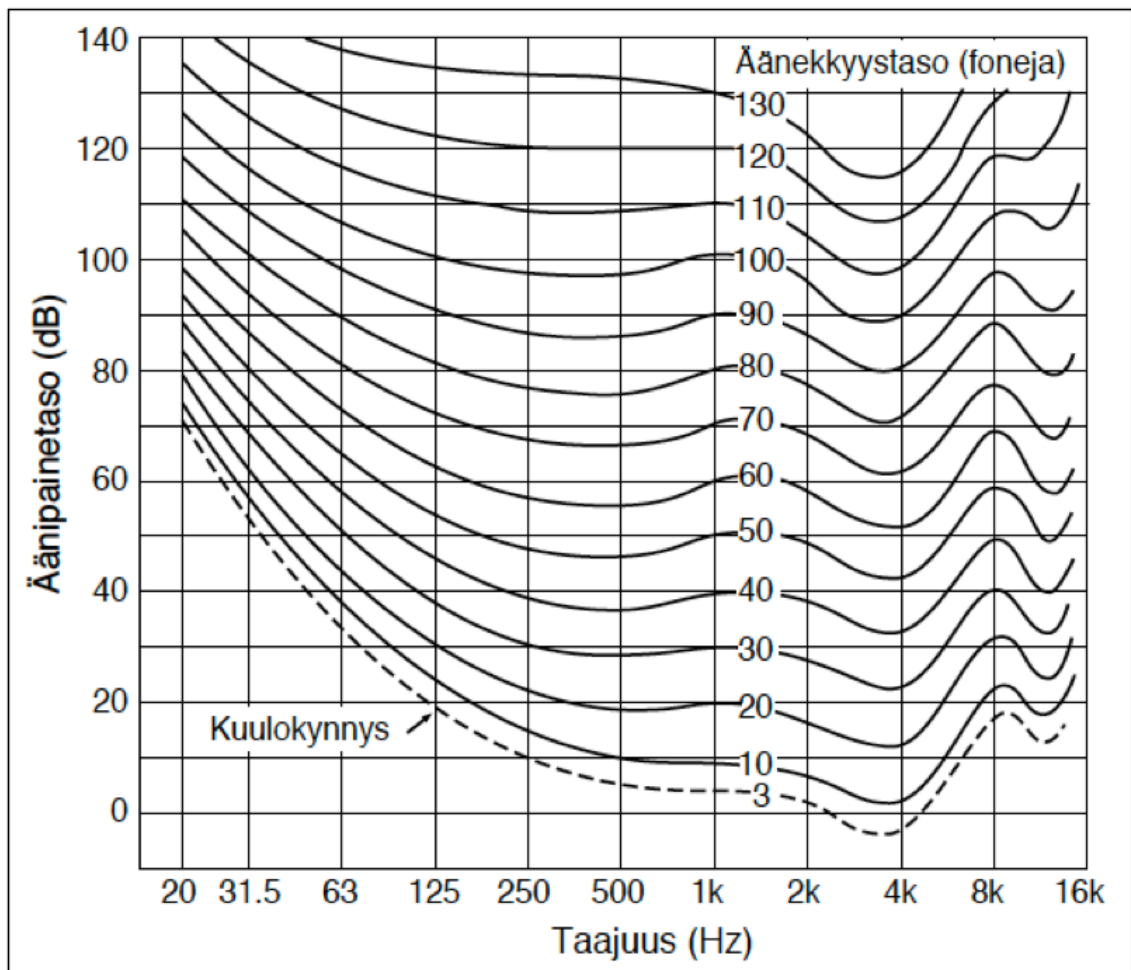
Äänen voimakkuus on suoraan verrannollinen ilman painevaihteluihin, jonka äänilähde saa aikaan. Fysiikassa äänipaineen mittayksikkö on Pascal (N/m^2 , lyh. Pa). Pienin äänipaineen muutos, jonka ihmiskorva voi kuulla, on noin $0,00002 \text{ N/m}^2$ eli $20 \text{ }\mu\text{Pa}$, jota kutsutaan kuulokynnykseksi. Kuulon kipukynnys on taas jo yli 60 Pascalia, joten kuuluvan äänen mittaluvut vaihtelevat erittäin laajalla alueella. Tämän takia äänenvoimakkuuksien vertailun helpottamiseksi on otettu käyttöön desibeliasteikko (lyh. dB), joka on logaritminen. Desibeli yksikkönä itsessään ei mittaa mitään tiettyä asiaa, vaan se on matemaattinen kahden saman yksikön omaavan suureen suhde toisiinsa. Lisäämällä desibeliyksikön perään tiettyjä lisäkirjaimia määritetään se, mitä vertaillaan. Äänipainetasoa (engl. sound pressure level, lyh. SPL) vertailtaessa desibeliasteikko on suhteutettu ihmisen kuulokynnykseen, joten tällöin 0 dB SPL on $20 \text{ }\mu\text{Pa}$. (Karjalainen 2000; Laaksonen 2013, 24–25; Everest 2001, 33–34.)

Koska desibeliasteikko on logaritminen, ei desibeliarvoja voi laskea suoraan yhteen. Jos esimerkiksi kaksi erilaista 60 dB SPL äänilähdettä yhdistää, äänipainetaso nousee kolmella desibelillä. Mikäli äänilähteet ovat taas täysin korreloivia ja samassa vaiheessa, äänipainetaso nousee kuudella desibelillä. Vaihesuhteista riippuen äänet voivat yhdistyä toisiinsa myös kumoten, kuten kuviossa 9 havainnollistettiin. Keskivertoilmi- sen sanotaan kuulevan vasta noin 3–4 desibelin ja sitä suurempia tasoeroja, mutta äänenvoimakkuuden subjektiiviseen kokemiseen joko kaksinkertaisena tai puolittuneena tarvitaan noin 10 desibelin muutos. (Riionheimo 2011; Laaksonen 2013, 24–27.)

Taulukko 1. Esimerkkejä äänenpainetasoista desibeleinä (Laaksonen 2013, 25).

| | |
|-----------------------|--|
| 0 dB SPL | Ihmisen kuulokynnys |
| 10 dB SPL | Tuuleton metsä maaseudulla |
| 20 dB SPL | Kuiskaus |
| 30 dB SPL | Äänitysstudion taustakohina |
| 40 dB SPL | Olohuone |
| 50-60 dB SPL | Normaali keskustelu |
| 70 dB SPL | Toimisto |
| 80 dB SPL | Katuliikenne |
| 90 dB SPL | Kuorma-auto |
| 100 dB SPL | Ohiajava juna |
| 110 dB SPL | Rock-yhtye |
| 120 dB SPL | Suihkukone lähtökiidossa |
| 120-130 dB SPL | Kipuraja |
| 140 dB SPL | Välittömän kuulovaurion vaara |
| 150 dB SPL | Kuoroutuminen |
| 180-200 dB SPL | Avaruusaluksen kantoraketin lähtöäänäni |

Johtuen ihmisen korvakäytävän resonoinnista 2,5–3 kHz:n taajuudella on korvan herkkyyksin erilainen eri taajuuksilla. Korva on huomattavasti vähemmän herkkä bassotaajuuksille ja korkeille diskanttitaajuuksille kuin keskiäänille matalilla äänenpainetasoilla. Vuonna 1933 kuulotutkijat Harvey Fletcher ja Wilden Munson kehittivät äänekkyyss-käsitteen (engl. loudness) ja kuvaajan, jolla havainnollistetaan kuulon epälineaarisuutta taajuuden ja äänipaineen välillä. Äänekkyytason yksikkö on foni (engl. phon), ja se kertoo, kuinka voimakas on äänen oltava eri taajuuksilla, jotta sen subjektiivinen voimakkuus on sama kuin 1 kHz:n äänellä. (Laaksonen 2013, 29; Hartmann 2013, 125–128.)



Kuvio 11. Äänekkyysskäyrästä esittää korvan taajuusvasteen vaihtelua ja äänekkyytason suhdetta äänipainetasoon (Riionheimo 2011).

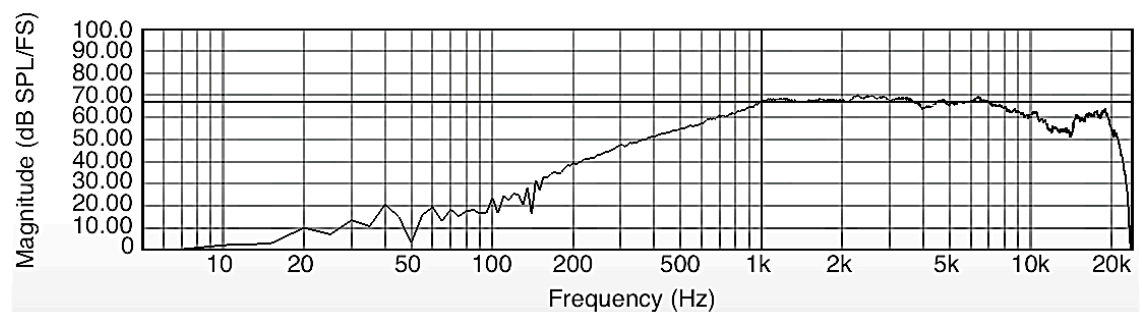
Sen lisäksi, että ihmiskuulon taajuuserottelu vaihtelee äänenvoimakkuudesta riippuen, vierekkäisten taajuuksien erottaminen toisistaan riippuu siitä, millä taajuuksilla äänet ovat ja soivatko ne yhtä aikaa vai eivät. Aivomme käsittelee yhtä aikaa soivia ääniä

kokonaisuutena, joka jakautuu erillisiin taajuuskaistoihin. Näitä kutsutaan kriittisiksi kaistoiksi (engl. critical bands). Matalilla taajuuksilla erottelu on hyvinkin tarkkaa, kun taas korkeilla diskanttiäänillä vaadittavat korkeuserot ovat hyvinkin suuria. Saman kriittisen kaistan sisällä soivista äänistä voimakkaampi ääni peittoaa hiljaisemman alleen. Tätä ilmiötä kutsutaan peittoilmiöksi, jota käytetään hyödyksi muun muassa myös mp3 -enkoodauksessa. (Laaksonen 2013, 30–31.)

Aikaisemmin kuvioissa 3–10 äänipaineen värähtelyä kuvattiin ajan funktiona. Äänipainetta voidaan myös kuvata taajuuden funktiona, kuten kuviossa 11, ja se onkin yleisin tapa tarkastella taajuusjakaumaa eli taajuusvastetta (engl. frequency response). Tarkasteluun vaaditaan spektrianalysointilaitteita (engl. spectrum analyzer) eli tosiaika-analysointilaitteita (engl. Real Time Analyzer, lyh. RTA), jonka generoimassa kuvaajassa taajuus on kaistoina (kuvio 12) x-akselilla vasemmalta matalista taajuuksista oikealle korkeisiin taajuuksiin. Y-akselilla on puolestaan äänenvoimakkuus desibeleinä. (Laaksonen 2013, 165.) Jokaisella äänilähteellä ja audiolaitteella on omat tyypilliset taajuusjakaumansa. Esimerkiksi mikrofoneja ja tarkkaamokaiuttimia suunniteltaessa usein pyritään tasaiseen taajuusvasteeseen, mutta komponenttieroit ja muut fyysiset rajoitteet aiheuttavat spektriin poikkeamia. Kuviossa 13 on esimerkiksi puhelimen mikrofonilla äänitetyn äänen taajuusvaste, joka on hyvinkin diskanttipitoinen.

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----|------|----|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|---------------------|
| Terssikaistat | 10 | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | Hz jne. 20 kHz asti |
| Oktaavikaistat | 16 | 32 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 16000 | Hz |

Kuvio 12. Yleensä ääneen liittyvissä mittauksissa taajuusvaste esitetään oktaavikaistoina tai 1/3-oktaavikaistoina eli terssikaistoina. Nämä kaistat on määritelty ISO 3741:2010 standardissa. (Riionheimo 2011.)



Kuvio 13. Puhelimen mikrofonilla äänitetyn äänen taajuusvaste (Faber Acoustical 2013).

2.1.5 Äänen nopeus ja aallonpituus

Äänen etenemisnopeus ilmassa ei ole vakio, vaan se vaihtelee jonkin verran ilman lämpötilan sekä kosteuden mukaan. Kuivassa 20 °C:n ilmassa äänen nopeus on noin 344 metriä sekunnissa. Koska ääni on pitkittäistä aaltoliikettä, voi se edetä myös muissa väliaineissa, kuten kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa. Taulukossa 2 on esimerkkejä äänen nopeudesta eri väliaineissa. (Riionheimo 2011.)

Taulukko 2. Äänen nopeuksia eri väliaineissa (Riionheimo 2011).

| | |
|------------------|-----------------|
| Ilma 20°C | 344 m/s |
| Vesi 13°C | 1441 m/s |
| Jää | 3200 m/s |
| Kova lasi | 6000 m/s |
| Graniitti | 6000 m/s |
| Betoni | 3100 m/s |
| Tiili | 3700 m/s |
| Teräs | 5100 m/s |
| Lyijy | 1200 m/s |
| Alumiini | 5200 m/s |

Äänen aallonpituuteen vaikuttaa sekä äänen nopeus väliaineessa että sen taajuus. Äänen aallonpituus (eli yksi sykli) voidaan laskea kuvion 14 kaavalla, jossa λ on aallonpituus, c on äänen nopeus ja f on taajuus. Näin ollen esimerkiksi ilmassa 200 Hz:n ääniaallon pituus on 1,72 metriä. (Laaksonen 2013, 13–14.)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Kuvio 14. Aallonpituuden laskukaava.

2.2 Akustiikan perusteet

Opinnäytetyössä käsiteltiin aikaisemmin äänen fysikaalisia ominaisuuksia sekä kuuloon liittyviä asioita, jotka ovat akustiikan ymmärtämisen ja tutkimisen peruspilareita. Ääniaaltojen liikkeen, heijastumisen ja vaimentumisen periaatteiden tunteminen on tärkeää kuunteluhuoneita suunniteltaessa, ja se myös auttaa akustiikkamittausten tulosten tulkitsemisessa. Tässä luvussa perehdytään näihin äänen ilmiöihin.

2.2.1 Huoneakustiikka

Täysin vapaassa ulkoilmassa, jota voidaan kutsua myös vapaaksi kentäksi (engl. free field), ääni säteilee lähteistä aina pallomaisesti kaikkiin suuntiin, mikäli äänilähde sen mahdollistaa. Etäisyyden kasvaessa äänilähteeseen äänitaso pienenee. Kun etäisyys kaksinkertaistuu vapaassa kentässä, äänitaso laskee 6 dB (Riionheimo 2011). Se, kuinka paljon erilaiset akustiset esteet vaikuttavat äänen kulkuun, riippuu taajuuden (eli aallonpituuden) ja akustisen esteen koon välisestä suhteesta. Myös esteen rakenne, massa ja tiheys vaikuttavat. Matalien taajuuksien aallonpituudet ovat niin pitkiä, että ne voivat suuriakin esteitä kohdatessaan kiertää ne vaivatta edeten pallomaisesti, kun taas diskanttitaajuuksien lyhyet aallonpituudet ovat äärimmäisen suuntaavia, ja riippuen akustisen esteen koosta heijastuvat tai vaimentuvat helposti. Ihmisen kuuloalueen ääripäiden aallonpituuksien erot ovat hyvinkin suuret, ja ne on esitetty taulukossa 3. (Riionheimo 2011; Laaksonen 2013, 14.)

Taulukko 3. Ihmisen kuuloalueen ääripäiden aallonpituudet.

| | |
|-----------------------------|----------------|
| 20 Hz | 17,2 m |
| 20 000 Hz eli 20 kHz | 1,72 cm |

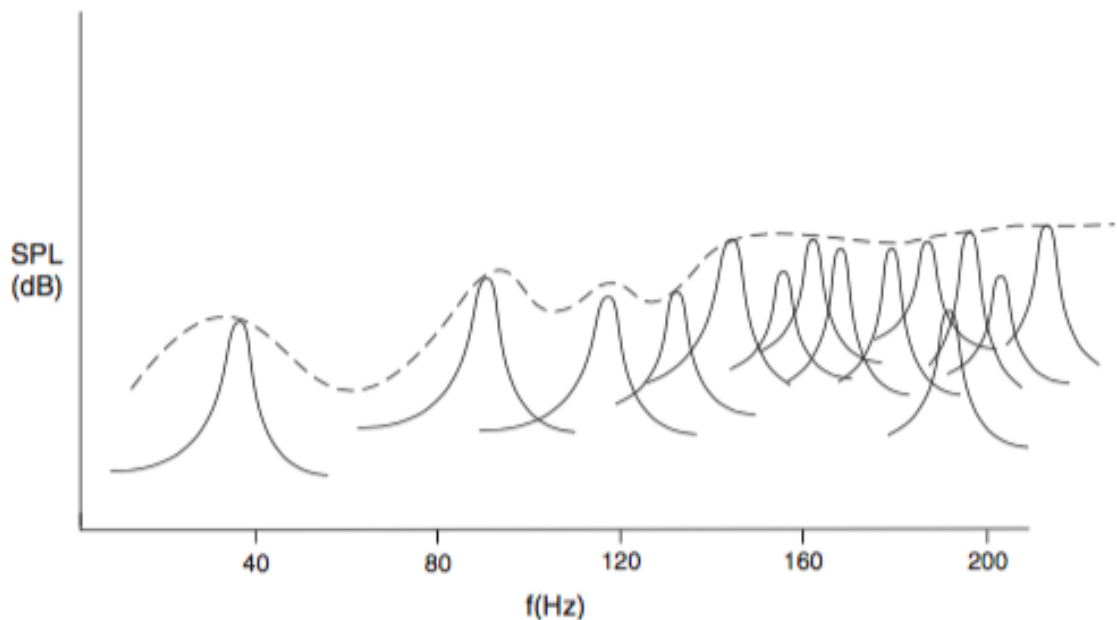
Suljetuissa tiloissa ääni käyttäytyy edetessään olennaisesti erilaisesti kuin vapaassa kentässä. Myös yleisimmät äänilähteet säteilevät taajuudesta riippuen joko suuntaavasti tai pallomaisesti. Useimmissa tiloissa on heijastavia pintoja ja äänilähteen suoran äänen lisäksi kuulemme heijastuneita ääniä, jotka vaikuttavat huoneen taajuusvasteeseen. Tutkimusalueena huoneakustiikka tutkii juurikin äänen käyttäytymistä suljetuissa tiloissa. (Hartmann 2013, 159.)

Hyvän huoneakustiikan määrittäminen on äärimmäisen vaikeaa, sillä se riippuu täysin siitä, mikä on akustoitavan tilan käyttötarkoitus. Konserttisalilla ja luokkahuoneella on

täysin omat vaatimuksensa, ja hyvä akustiikka esimerkiksi kotiteatterissa on pääsääntöisesti aina mieltymys- ja tottumuskysymys. Kuunteluhuoneiden ja äänitarkkaamoiden tapauksessa on kuitenkin olemassa yleisesti käytössä olevia standardeja, jotka määrittelevät näiden akustiikkaa, sillä kuunteluhuoneissa ääntä olisi pystyttävä käsittelemään kriittisesti ja kaiuttimista tulevan äänen tulisi päätyä kuulijan korvaan mahdollisimman muuttumattomana. Yleisimmin käytettävät standardit ovat *EBU (European Broadcasting Union) Tech 3276* ja *ITU-R (International Telecommunication Union Recommendations) BS.1116-3*, jotka ovat sisällöltään ja vaatimuksiltaan hyvin samankaltaiset.

2.2.2 Huonemoodit

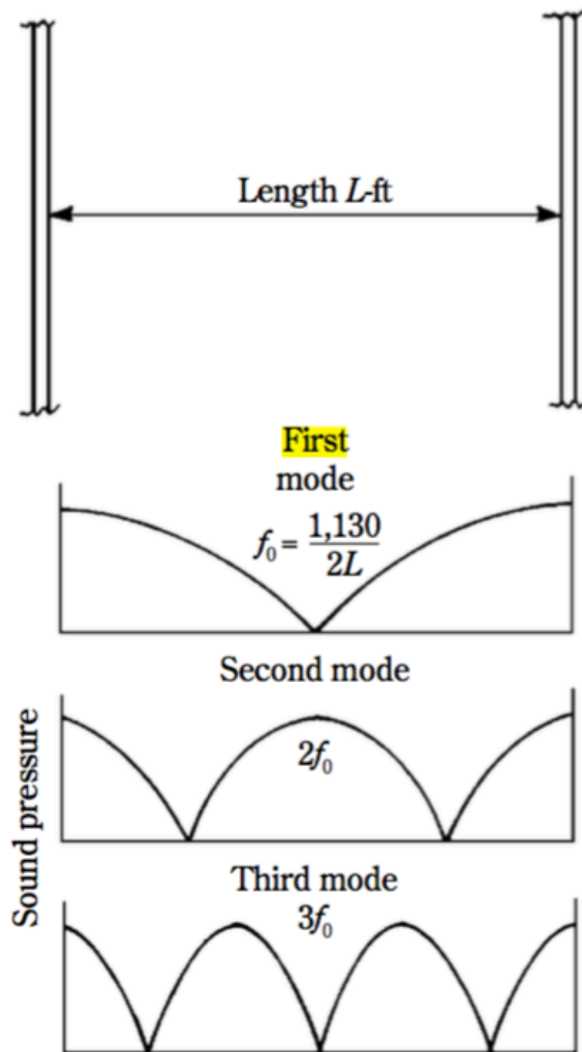
Matalien taajuuksien pitkien aallonpituuksien takia tyypillisin pienten huoneiden akustinen ongelma on huonemoodit (engl. room mode) eli ominaistaajuudet. Huonemoodilla (jota voidaan kutsua myös huoneresonanssiksi tai seisoviksi aalloiksi) tarkoitetaan, että huonegeometrian seurauksena esiintyy tilanne, jolloin huoneeseen mahtuu vain yksi tai muutama ääniaalto. Näiden ääniaaltojen ominaistaajuudet määräytyvät suoraan huoneen mittasuhteista, ja ne korostuvat etenkin huoneissa, joissa kaksi vastakkaista rajapintaa ovat keskenään samansuuntaisia ja hyvin ääniaaltoja heijastavia.



Kuvio 15. Tyypillisen huoneen moodien jakautuminen matalilla taajuuksilla (Newell 2012, 100).

Kuten aikaisemmin totesimme, kahden ääniaallon summautuessa voivat ne yhdistyä toisiinsa eri vaiheessa. Tällöin heijaste ja suora ääni joko vahvistavat tai vaimentavat

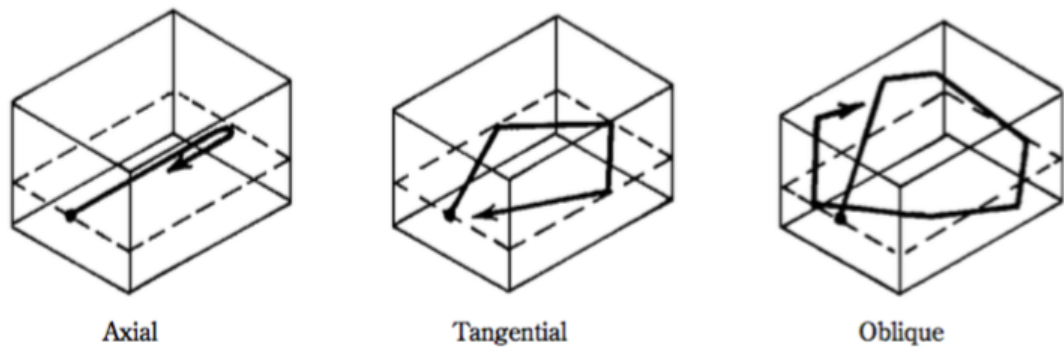
toistensa amplitudeja eri paikoissa huonetta. Tämä tapahtuu voimakkaimmillaan silloin, kun jokin huoneen vastakkaisien pintojen etäisyyksistä toisistaan on sama kuin tietyn taajuuden aallonpituus. Kun kahden ääntä heijastavan pinnan välimatka on puolet jostakin aallonpituudesta, synnyttää seisova aalto huoneen keskelle kohdan, jossa kyseinen taajuus vaimenee huomattavasti. Mikäli jokin huoneen mitta on tasan sama, kuin jonkin taajuuden aallonpituus, aiheuttaa huoneresonanssi kahteen kohtaan vaimeneman (nollakohta, engl. null) ja kolmeen kohtaan vahvistuman (maksimi, engl. peak), jonka näemme kuviossa 16. (Riionheimo 2011; Laaksonen 2013, 14–15.)



Kuvio 16. Kahden seinän välinen aksiaalimoodi ja sen 2 seuraavaa kerrannaista (Everest 2001, 323).

Huonemoodit eivät synny ainoastaan kahden samansuuntaisen rajapinnan välille, vaan moodityppejä on kolme erilaista: aksiaali eli vaakasuuntainen, tangentiali eli sivuava,

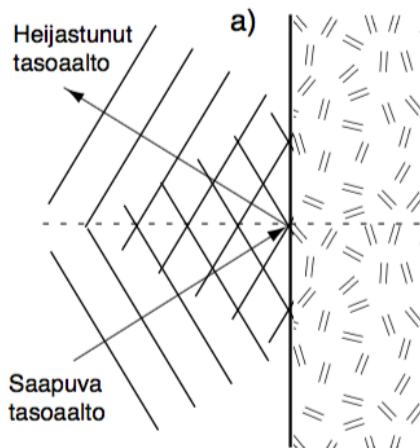
ja oblique eli viistosuuntainen. Aksiaalimoodit syntyvät kahden seinäpinnan välille, tangentiaalimoodit kaikkien samantasoisien seinäpintojen välille ja obliquemoodit kaikkien seinäpintojen välille. Näistä kolmesta voimakkaimpia resonansseja aiheuttavat aksiaalimoodit. Kaikkien huoneresonanssien maksimit sijoittuvat aina huoneen rajapintoihin muiden maksimikohtien lisäksi. Täten esimerkiksi akustiikkaelementtien sijoittelua suunniteltaessa nämä paikat ovat varsin otollisia. Vastaavasti kuunteluhuoneessa kaiuttimien ja kuuntelupisteen sijaintia valittaessa tulisi moodien maksimi- ja nollakohtia välttää. Jokaisessa huoneessa on tietty rajataajuus, jonka yläpuolella moodien vaimentumia ja korostumia on niin tiheässä, ettei niiden vaikutus yksittäisessä kohdassa ole enää merkittävä. (Riionheimo 2011; Laaksonen 2013, 15–16.)



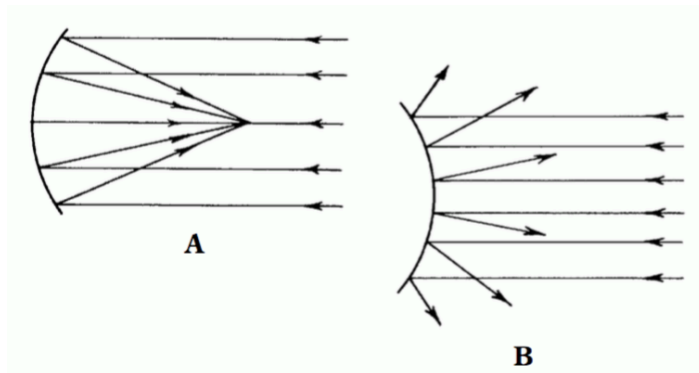
Kuvio 17. Aksiaali, tangentiaali ja obliquemoodit (Everest 2001, 323).

2.2.3 Heijastuminen, diffraktio ja absorptio

Kohdatessa jonkin tasaisen pinnan, ääniaallot käyttäytyvät periaatteessa samalla tavalla kuin valo osuessaan peilaavaan pintaan, eli heijastuvat (engl. reflection). Ääniaalto heijastuu pinnasta samassa kulmassa, kuin siihen osuu. Se, mitkä taajuudet heijastuvat, riippuu täysin aallonpituuden ja pinta-alan suhteesta sekä pintamateriaalista ja sen tiheydestä. Mikäli pinta on riittävän suuri verrattuna ääniaallon pituuteen, aalto heijastuu. Jos taas pinta on riittävän pieni, ei sillä ole suurta vaikutusta aallon etenemiseen. Huoneakustiikassa alle 300–400 Hz:n taajuuksien voidaankin yleisesti ajatella käyttäytyvän kuin aallot ja tätä korkeampien taajuuksien kuin säteet. Suljetussa tilassa säde voi heijastua lukuisia kertoja pintojen välillä, kunnes se vaimenee. Säteen osuessa epätasaiseen pintaan ja heijastuessa eri suuntiin tulosuunnasta riippumatta kutsutaan sitä hajoamiseksi eli diffuusioksi. (Riionheimo 2011; Everest 2001, 236.)



Kuvio 18. Ääniaalto heijastuu kovasta seinäpinnasta (Karjalainen 2000).



Kuvio 19. Osuessaan epäsuoriin pintoihin ääniaallot hajoavat (Everest 2001, 286).

Kun ääniaalto kohtaa jonkin esteen, jossa on aukko, ääni siirtyy aukosta pinnan toiselle puolelle. Mikäli aukko on suuri verrattuna äänen aallonpituuteen, koko ääniaalto siirtyy sen läpi. Jos aukko on pieni ja aallonpituus suuri, ääni taipuu ja leviää esteen toisella puolella kuin aukon paikalla olisi uusi äänilähde. Esteen reunat toimivat ikään kuin sekundääriäänilähteinä. Tätä ääniaallon taipumisilmiötä kutsutaan diffraktioksi. Hyvä havainnollistava esimerkki on teiden varsilla olevat meluesteet. Suurilla aallonpituuksilla melueste ei liiemmin estä äänen taittumista sen taakse, mutta korkeilla taajuuksilla ääniaallot käyttäytyvät kuin valonsäteet siihen osuessaan, luoden varjoalueen sen taakse. Mikäli äänen aallonpituus on esteen kokoluokkaa, osa äänestä pääsee taittumaan sen taakse. Diffraktio- ja heijastumisilmiöt vaikuttavat myös kaiuttimien suuntaavuuteen eri taajuusalueilla, kuten kuviosta 19 näemme. (Riionheimo 2011; Karjalainen 2000, 21–22.)



Freq $\approx 20 - 400$ Hz
Spread $\approx 360^\circ$



Freq ≈ 400 Hz – 2,5 kHz
Spread $\approx 120^\circ$



Freq $\approx 2,5 - 10$ kHz
Spread $\approx 40^\circ$



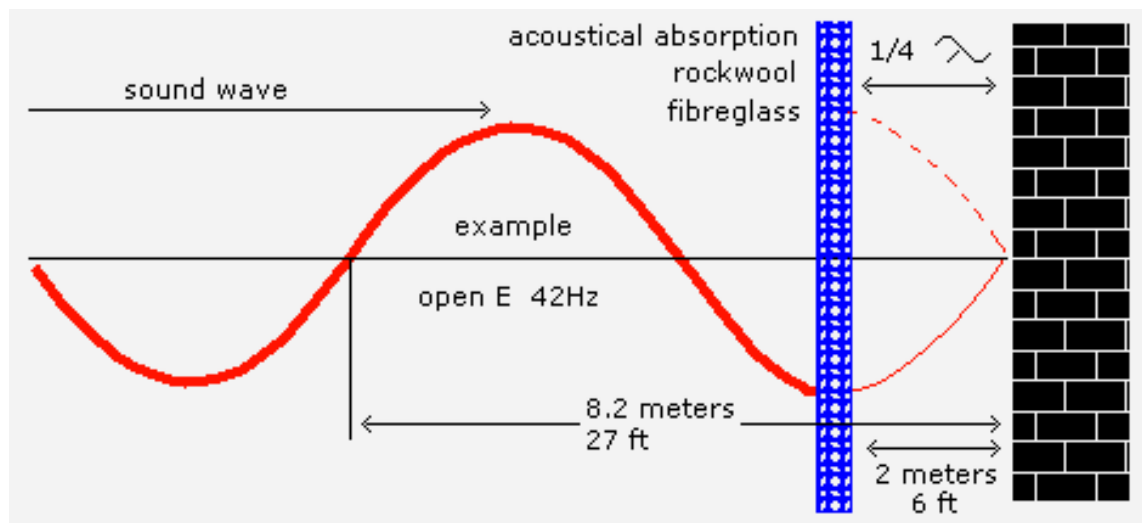
Freq $\approx 10 - 20$ kHz
Spread $\approx 10^\circ$

Kuvio 20. Genelecin studiomonitorien suuntaavuus eri taajuuksalueilla (Genelec 2015, 23).

Ehkä tärkein huoneakustiikan hyödyntämä ilmiö äänen etenemisessä on ääniaaltojen vaimeneminen eli absorptio. Ääniaaltojen täydellinen heijastuminen jostakin pinnasta on lähinnä teoreettista, ja käytännössä kaikki pintamateriaalit vaimentavat aaltoja jonkin verran. Äänen vaimenemista voidaan ilmaista vaimenemiskertoimella (engl. absorption coefficient), jossa 0 tarkoittaa äänen täydellistä heijastumista ja sitä suuremmat arvot äänen vaimenemista. Vaimennuskerroin voi myös olla yli 1 johtuen äänipaineen logaritmisuudesta. Äänen vaimeneminen perustuu pääasiassa äänienergian muuttumi-

seen lämmöksi, lukuun ottamatta tilannetta jossa ääniaalto siirtyy tilasta toiseen, esimerkiksi avoimesta ikkunasta ulos huoneesta.

Absorboivista materiaaleista kaikista yleisimmin käytetään huokoisia materiaaleja (engl. porous absorber), kuten lasivillaa, kivivillaa tai muita kuitulevyjä. Äänen vaimeneminen huokoisen materiaalin sisällä perustuu kitkahäviöihin ilmanpaineen liikkumassa suurien sisäisten pintojen läpi, jolloin äänienergia muuttuu lämpöenergiaksi. Tämä johtuu siitä, että ilmamolekyylit pääsevät liikkumaan huokoisen materiaalin läpi huomattavasti rajoitetummin kuin vapaassa ilmassa. Täten huokoisen materiaalin tiheys ja paksuus vaikuttaa suuresti äänen absorboitumisen määrään. Koska heijastuessaan pinnasta ääniaallon molekyylin liike (engl. velocity) on maksimaalinen neljäsosa-aallonpituuden kohdalla, vaimentavan materiaalin paksuuden lisäämisen vaihtoehtona on myös ilmaraon kasvattaminen esimerkiksi kivivillasta tehdyn akustiikkaelementin ja seinän välillä. Tämä nostaa materiaalin vaimennuskerrointa matalilla taajuuksilla ja vähentää massan tarvetta niitä vaimentaessa. (Newell 2012, 110–111; Kuttruff 2009, 177–188.)

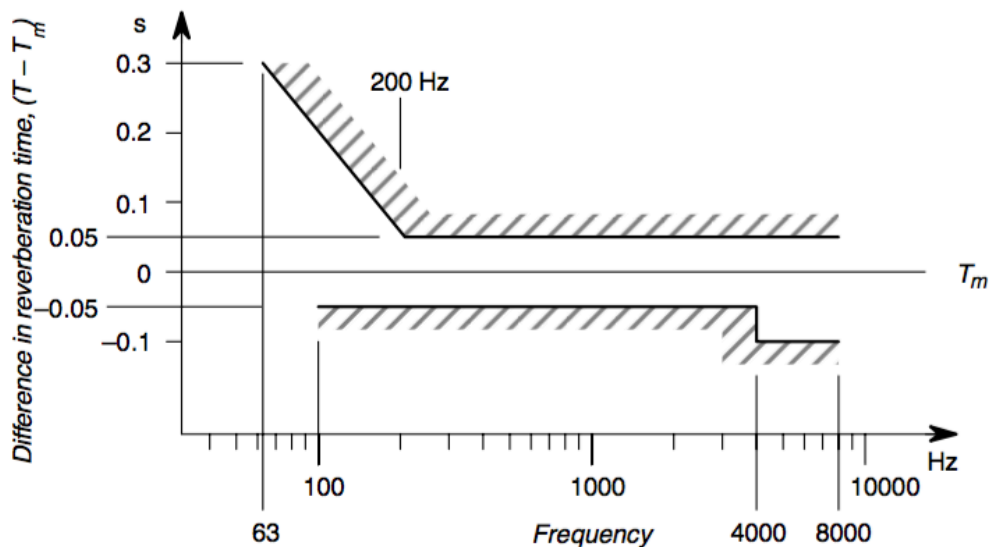


Kuvio 21. Neljäsosa-aallonpituuden vaikutus absorptioon (Burnett 2008).

Kuviossa 21 on 42 Hz:n ääniaalto, jota on tarkoitus vaimentaa. 42 Hz:n värähtelyn aallonpituus on noin 8,2 metriä. Efektiiviseen vaimennukseen ei kuitenkaan tarvita aallonpituuden paksuista vaimennusmateriaalia, vaan noin 2 metrin eli neljäsosa-aallonpituuden etäisyydelle seinästä sijoitettu absorberi riittää, sillä 42 Hz:n taajuuden ilmamolekyylin liike on maksimaalinen tässä kohdassa.

2.2.4 Ensiheijastukset ja jälkikaiunta

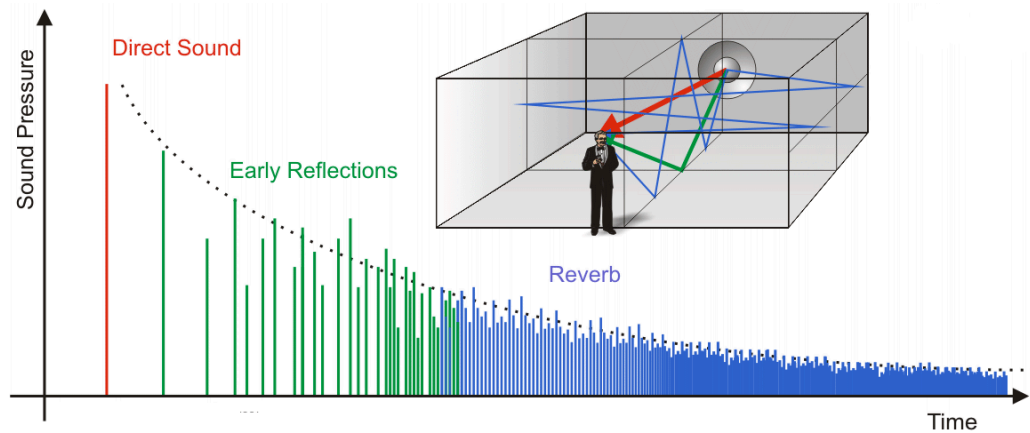
Äänilähteestä syntyneen impulssin heijastuessa suljetussa tilassa eri pintojen välillä useita kertoja syntyy heijasteiden ja viiveiden summasta hajallinen eli diffuusi äänikenttä (engl. reverberation). Tätä kutsutaan jälkikaiunnaksi. Huoneakustiikassa tätä jälkikaiuntaa mitataan RT_{60} -arvolla, joka kertoo missä ajassa diffuusi äänikenttä vaimenee 60 dB siitä hetkestä lähtien, kun äänilähteen tuottama ääni lakkaa. Kuunteluhuoneiden ja äänitarkkaamoiden jälkikaiunta-aikaan löytyy ohjearvoja sekä EBU Tech 3276- että ITU-R BS.1116-3 -standardeista, ja ne on sidottu hyväksyttävien ääriarvojen rajoissa huoneen tilavuuteen. Molemmissa standardissa huoneen jälkikaiunnan ohjearvon sekunneissa 200 Hz:n ja 4 kHz:n välillä voi laskea kaavalla $T_m = 0.25(V/V_0)^{1/3}$, jossa T_m on RT_{60} , V on huoneen tilavuus kuutiometreinä, ja V_0 on referenssihuoneen tilavuus 100 m^3 . Laskettu jälkikaiunta-aika saa vaihdella eri taajuuksilla kuvion 22 antamissa rajoissa. (Laaksonen 2013, 18; EBU 1998, 6; ITU 2015, 14.)



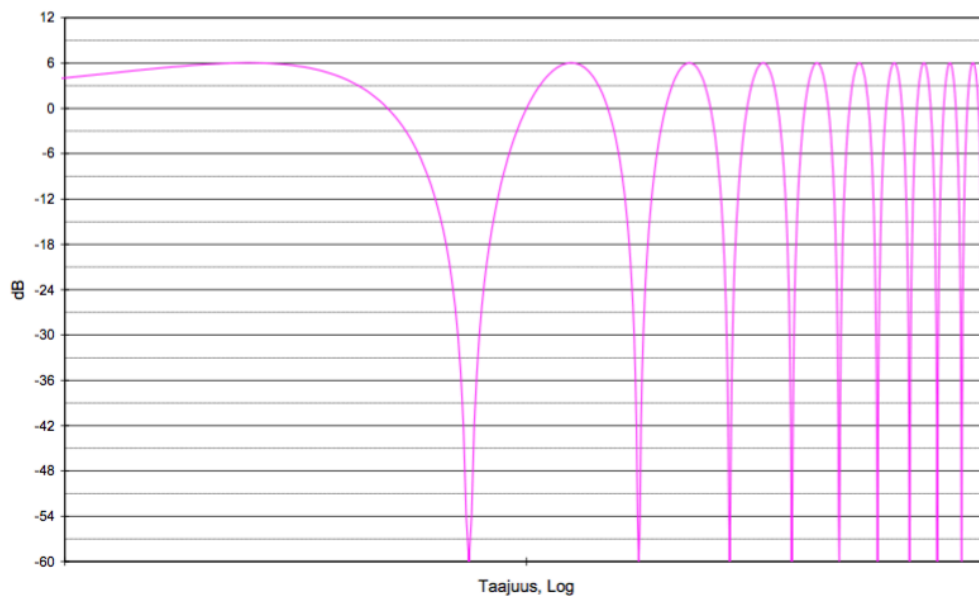
Kuvio 22. EBU Tech 3276 -standardin jälkikaiunta-ajan toleranssit sekunneissa taajuuden funktiona (EBU 1998, 6).

Jälkikaiunta voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri osaan (kuvio 23), suoraan ääneen (engl. direct sound), varhaisiin tai ensiheijasteisiin (engl. early reflections tai first reflections) ja diffuusiin äänikenttään (engl. reverb). Äänilähteen sijaitessa lähellä heijastavaa pintaa saavuttaa ääni ensimmäisenä suoraan kuulijan. Tämän jälkeen saapuva ääni on lähimmistä pinnoista heijastunutta ja pidemmän matkan kulkenutta, jota kutsutaan varhaisiksi tai ensimmäisiksi heijasteiksi. Varhaiset heijasteet saapuvat kuulijalle

viivästyneenä ja vaihe-erossa suoraan ääneen verrattuna, joten summautuessaan tietyt taajuudet kumoutuvat ja tietyt vahvistuvat. Tämän summautumisen aiheuttamaa interferenssiä taajuusvasteeseen kutsutaan kampsuodatukseksi (engl. comb filtering), ja se tapahtuu, kun suoran ja heijastuneen ääniaallon vaihe-ero on puolet aallonpituudesta. Kumoutuvan perustaajuuden lisäksi myös sen kerrannaistaajuudet vaimentuvat, ja näiden välissä olevat myötävaiheiset taajuudet vastaavasti vahvistavat toisiaan (kuvio 24). Diffuusilla äänikentällä taas tarkoitetaan moninkertaisten heijasteiden ja viiveiden yhdistelmää. (Laaksonen 2013, 37–39; Everest 2001, 493–494; Newell 2012, 107.)



Kuvio 23. Äänen saapuminen kuulijalle suljetussa tilassa ajan funktiona (Karagiozov 2014).



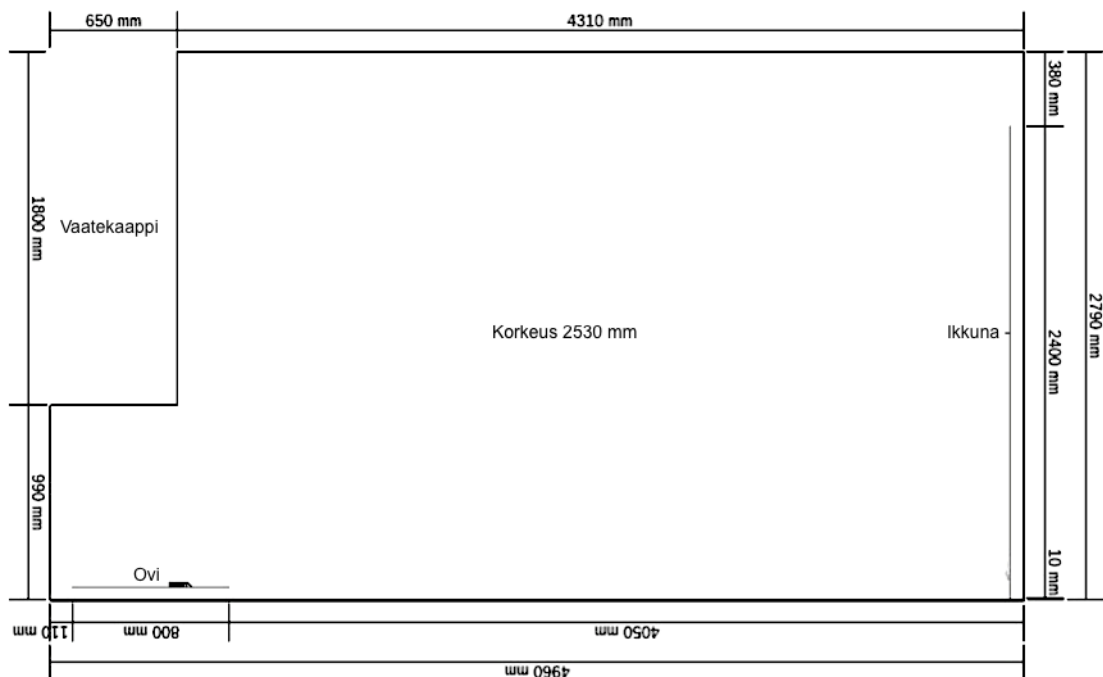
Kuvio 24. Heijastuneen äänen aiheuttamaa interferenssiä taajuusvasteeseen (Riionheimo 2011).

3 Makuuhuoneesta äänen jälkityötilaksi

Tämä luku käsittelee tutkimuksen kohteena olevan makuuhuoneen muuttamista äänen jälkitöihin soveltuvaksi kuunteluhuoneeksi. Akustoinnin vaikutuksia tarkastellaan mitaamalla ja vertailemalla tilan sointia ja taajuusvastetta ennen ja jälkeen muutoksen.

3.1 Huone ja sen ominaistuuudet

Muutoksen kohteena on pinta-alaltaan noin 14 neliömetrin kokoinen tavanomainen kerrostaloasunnon makuuhuone, jonka tilavuus on 35m³. Pintamateriaalit ovat 60-luvun tapaan betonia ja Siporex-harkkoa. Lattia on hiekan päällä kelluva betonilaatta, joka on päällystetty askeläänieristeellä ja laminaatilla. Huone on suorakulmainen särmiö. Etuseinällä on suuri ikkuna ja takaseinällä vapaasti seisova vaatekomero. Kulku huoneeseen tapahtuu vasemmalla takana sijaitsevasta puisesta ovesta.



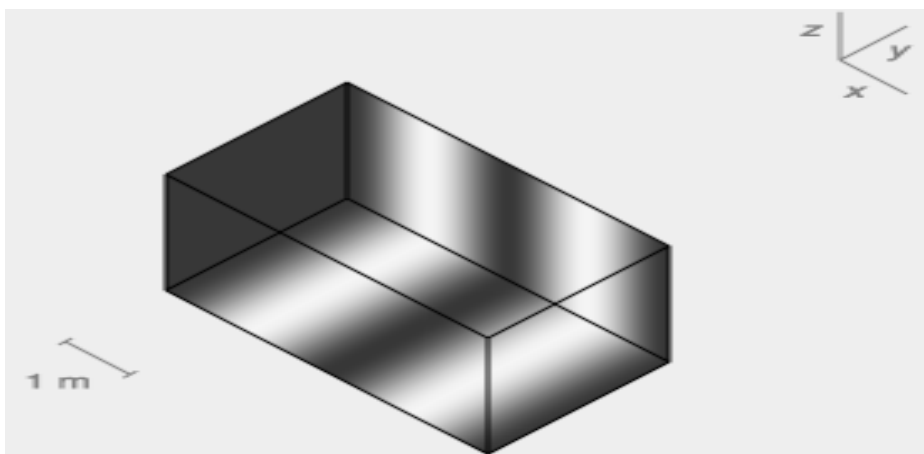
Kuvio 25. Huoneen mitat.

Koska huoneen kaikki vastakkaiset rajapinnat ovat rakenteellisesti hyvin tiheitä ja heijastavia pintoja sekä keskenään saman suuntaisia, on se erittäin otollinen akustisesti ongelmallisille huonemoodeille. Kun tarkastellaan tarkemmin huoneen geometrisia suhteita, nähdään kuinka jokainen huoneen eri mitoista on hyvin lähellä toisiaan tai tois-

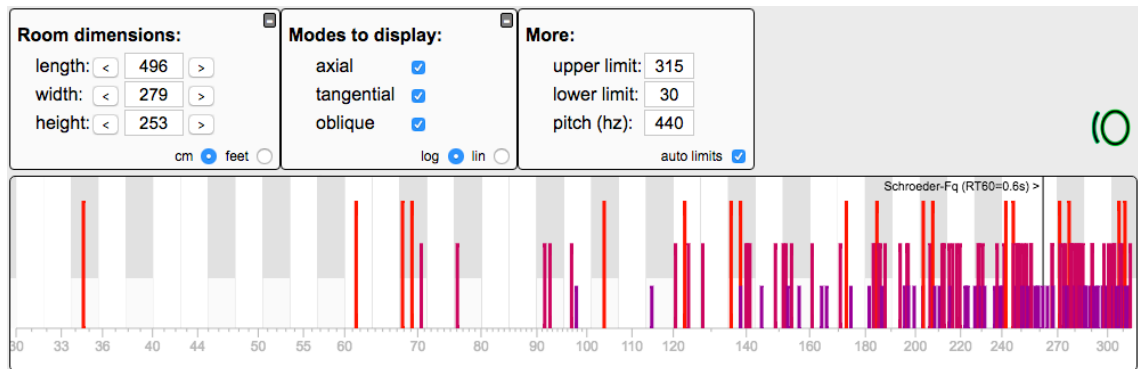
tensa kerrannaisia. Tästä seuraa se, että myös eri pintojen väliset seisovat aallot ja niiden harmoniset kerrannaiset sijoittuvat hyvin lähelle toisiaan, jolloin huonemoodit eivät jakaudu tasaisesti ja ovat selkeästi kuultavissa erikseen matalilla taajuuksilla. Koska huone on varsin pieni kooltaan, näiden matalien ominaistaajuuksien aiheuttama vääristymää taajuusvasteessa on äärimmäisen vaikea korjata ilman massiivisia akustointiratkaisuja. Koska pieni tila ei anna tällaisille mahdollisuutta, huonemoodit sanelevat pääasiassa tilan sointia matalilla taajuuksilla akustoinnista riippumatta. ITU-R BS.1116-3 -standardista löytyy ohjearvoja referenssikuunteluhuoneiden mittasuhteille, joita noudattamalla pitäisi saavuttaa kohtalaisen yhtenäisen matalien ominaistaajuuksien jakauma. Huoneen mittasuhteiden optimaalisuutta voi tarkistaa kaavalla $1.1w/h \leq l/h \leq 4.5w/h - 4$, jossa w on huoneen leveys, l on huoneen pituus ja h on huoneen korkeus. Kaavan totuusarvon tulisi olla tosi (1). Tutkimuksen kohteena olevan huoneen tapauksessa kaavan ehdot eivät täyty, joten totuusarvo on epätosi (0). (ITU 2015, 13.)

$$1.1 \times 2,79\text{m}/2,53\text{m} \leq 4,96\text{m}/2,53\text{m} \leq 4.5 \times 2,79\text{m}/2,53\text{m} - 4 \text{ eli } 1,21 \leq 1,96 \leq 0,96 = 0$$

Yksinkertaisten suorakulmaisen särmiön muotoisten huoneiden ominaistaajuuksien selvittämiseen löytyy verkosta useita ilmaisia työkaluja. Näillä on mahdollista laskea moodien tarkat teoreettiset taajuudet ja esittää ne graafisesti esimerkiksi äänipaineen huippu- ja nollakohtien sijaintina huoneessa kolmiulotteisesti, kuten kuviossa 26, tai vaihtoehtoisesti taajuuden funktiona, kuten kuviossa 27.



Kuvio 26. 62Hz aksiaalimoodi kuvattuna äänipaineen tihtymänä ja harventumina kolmiulotteisesti (Hunecke 2016). Sama moodi taajuuden funktiona löytyy kuviossa 27 (toinen palkki vasemmalta).



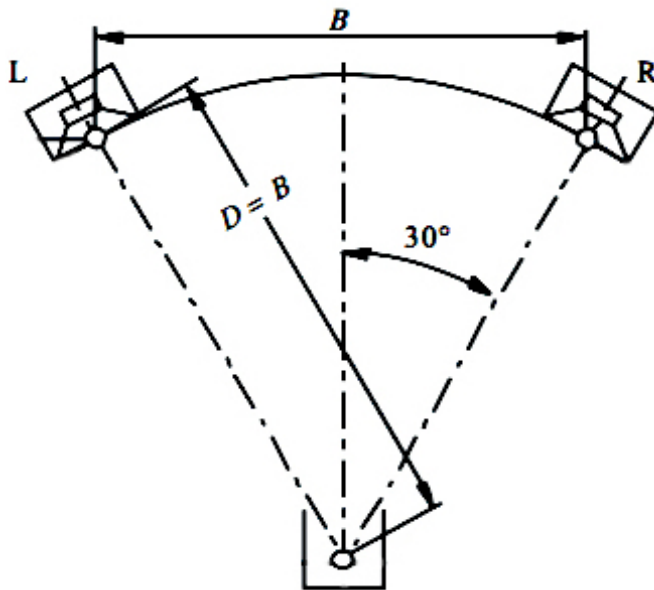
Kuvio 27. Tutkittavan huoneen ominaistajuudet välillä 30–315Hz. Korkeimmat palkit kuvaavat voimakkaimpia aksiaalimodeja, keskipitkät tangentiaalimodeja ja lyhyimmät heikoimpia obliquemodeja (Amroc 2016).

3.1.1 Kuuntelujärjestelmä ja sen sijoittelu

Studioissa käytettäviä aktiivikaiuttimia kutsutaan myös monitoreiksi eli tarkkailukaiuttimiksi. Hyvän monitorin tärkein ominaisuus on mahdollisuus toistaa suurta dynamiikka-aluetta mahdollisimman tasaisesti värittämättä laajalla taajuuskaistalla, jotta kuunneltava materiaali välittyy mahdollisimman todenmukaisena kuuntelijalle. Hifi-kaiuttimet eivät pääsääntöisesti sovellu tarkkailukaiuttimiksi, sillä niissä on usein tasaisen taajuusvasteen sijaan pyritty miellyttävään sointiin. Tarkkailukaiuttimien ja kuuntelupisteen oikeaoppinen sijoittelu on myös äärimmäisen tärkeää, sillä se vaikuttaa suuresti huoneen taajuusvasteeseen sekä stereokuvaan.

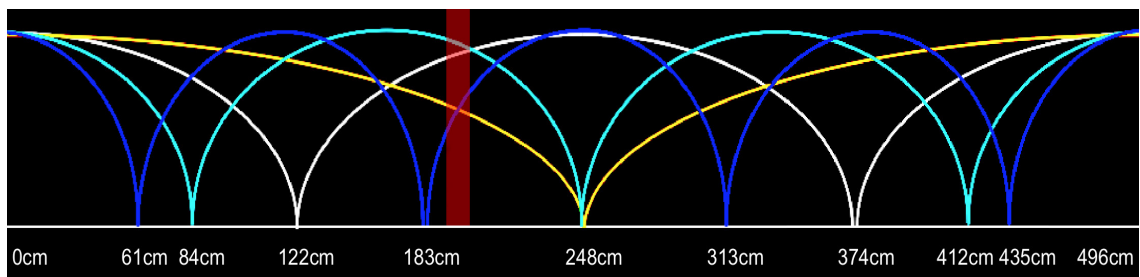
Yksi yleisesti käytetyimmistä ohjeista hyvän kuuntelupisteen sijainnin löytämiseen huoneissa on akustikko ja studiosuunnittelija Wes Lachotin kehittämä *38 prosentin sääntö*, jossa riippumatta huoneen koosta teoreettisesti paras kuuntelupiste sijaitsee aina 38 prosentin etäisyydellä etu- tai takaseinästä. Teorian mukaan tästä pisteestä löytyy paras kompromissi huonemoodien maksimien ja nollakohtien välillä. (Winer 2012, 506–507.) Kaiuttimien tulee sijaita symmetrisesti huoneen keskilinjan suhteen, jotta stereokuva pysyy mahdollisimman häiriöttömänä, ja erilaisten heijastuksien aiheuttamat interferenssit eivät muuta taajuusvastetta eri kanavien välillä merkittävästi. Mikäli monitorit ovat liian lähellä toisiaan, stereokuvasta tulee helposti kapea ja epäselvä. Mikäli kaiuttimet ovat taas liian etäällä toisistaan, stereokuva on liian laaja ja siitä puuttuu selkeä keskikohta. Kuuntelupisteen ja kaiuttimien tulisi muodostaa tasasivuinen kolmio, jonka

kantakulma on 60 astetta, kuten kuviossa 28 on esitetty. Kaiuttimet tulee suunnata kuuntelupistettä kohti. (ITU 2015, 18–19; Genelec 2015, 5–6.)



Kuvio 28. Tasakylkisen kolmion muotoinen kuunteluasetelma, jossa kuuntelukulma on 60 astetta. Kaiuttimien välinen etäisyys on sama kuin kaiuttimien ja kuuntelijan välinen etäisyys. (ITU 2015, 19.)

Akustisesti tyydyttävää kuuntelupistettä etsiessä standardien ja yleisesti toimiviksi todettujen ohjeiden lisäksi osviittana voi käyttää myös aikaisemmin mainittuja ominaisuuksilaskureita. Kuviossa 29 on esitetty 4 ensimmäistä laskennallista pituussuuntaista aksiaalimoodia tutkittavasta huoneesta. Kuvioon on merkattu huonemoodien maksimien ja nollakohtien kannalta optimaalisin kuuntelupiste punaisella palkilla, kun on otettu huomioon myös vaadittu minimietäisyys tarkkailukaiuttimiin. 38 prosentin sääntöä käyttäessä optimaalinen piste sijaitsee 188 cm:n kohdalla, joten laskureiden avulla päätelty teoreettisesti paras kuuntelupiste on käytännössä samassa kohdassa. Lopulliseksi mittaus- ja referenssikuuntelupisteeksi otettiin 195 cm etuseinästä.



Kuvio 29. Huoneen pituussuuntaiset moodit ja optimaalinen kuuntelupiste.

Tarkkailukaiuttimina muutoksen kohteena olevassa huoneessa on aktiiviset Genelec 8050B -2-tiekaiuttimet, joiden taajuusvaste on erittäin tasainen, vain ± 2 dB 38 hertsin ja 20 kilohertsin välillä. Kaiuttimet on sijoitettu niin, että ne muodostavat referenssikuuntelupisteen kanssa tasasivuisen kolmion, jonka sivujen pituudet ovat 140 cm.



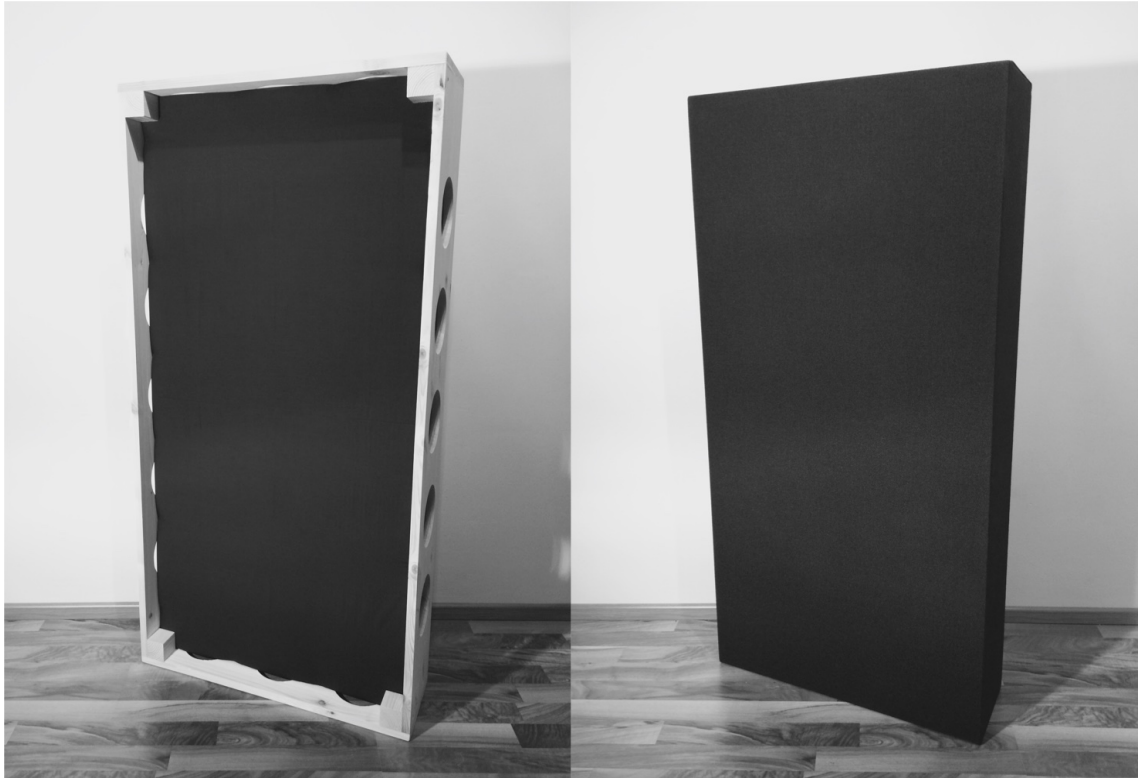
Kuvio 30. Mittaus- ja kuuntelujärjestelmän sijoittelu tyhjässä huoneessa.

Genelec 8050B -kaiuttimissa on erilaisia taajuusvastesäätimiä, joilla voidaan kompensoida kuuntelutilan akustisista ominaisuuksista tai kaiuttimien sijoituksesta aiheutuvia toistovirheitä. Kaikki säätimet on jätetty mittauksien ajaksi pois päältä, jolloin kaiuttimet toistavat tasaisella taajuusvasteella. Näin kaikki mahdolliset akustiset ongelmat tulevat selkeästi esiin mittaustuloksissa.

3.1.2 Akustiikkaelementit ja niiden sijoittelu

Huoneen akustointi on toteutettu itse suunnitellulla ja rakennetulla vapaasti seisovalla modulaarisella järjestelmällä, joka koostuu 25:stä 1236x636x200 mm:n laajakaistaisesta absorberimoduulista. Moduulirakenne mahdollistaa lukuisien erilaisten kokoon-

panojen kasauksen riippuen tilan muodosta ja käyttötarkoituksesta kullakin hetkellä. Absorberit koostuvat verhoillusta puurungosta, jonka sisällä on 150 mm:n paksuudelta tiheää Paroc COS 5 -kivivillaa. Rungossa on sisäänrakennettu 50 mm:n ilmarako sekä lukuisia reikiä absorptiokertoimen ja vaimennuspinta-alan maksimoimiseksi. Yhden moduulin paino on 12,5 kg.



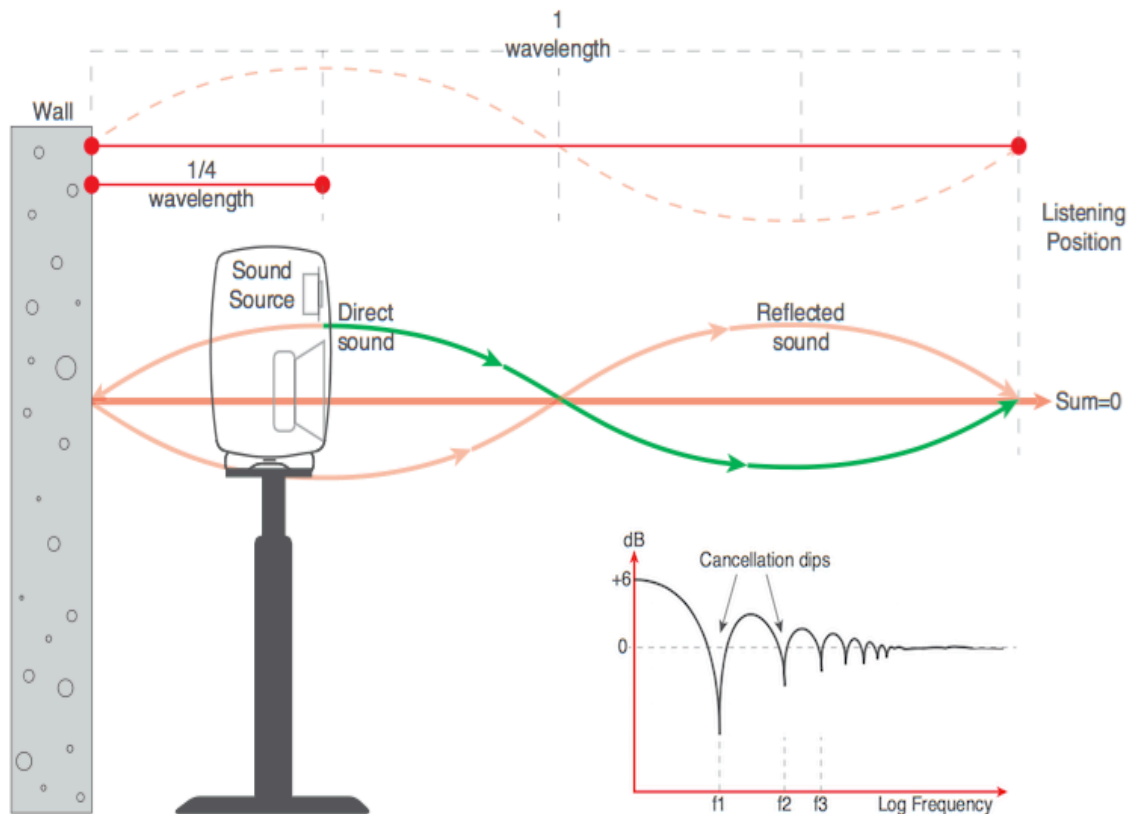
Kuvio 31. Absorberimoduulin rakennetta (vasemmalla) ja valmis moduuli (oikealla).

Vaikkakin huoneessa on tutkimuksen tekohetkellä stereofoninen äänentoisto, moduulit on sijoitettu huoneessa siten, että kaikki ensimmäisten heijastusten pisteet seinissä ja katossa on akustoitu ottaen huomioon myös 5.1 surround -äänijärjestelmän asennus tulevaisuudessa. Ainoastaan suuren vaatekomeron peittämä takaseinä on täytynyt jättää täysin akustoitamatta. Uskon kuitenkin, että täysi 65 senttimetrin syvyinen vaatekomero toimii varsin tehokkaasti laajalla taajuusalueella vaimentavasti referenssikuuntelupisteen takana, mikäli suuren liukuoven jättää auki.

Koska huoneresonanssien maksimit sijoittuvat aina huoneen rajapintoihin ja niiden yhtymäkohtiin, elementit on asennettu lattiasta kattoon asti, jolloin vaimennuspinta-ala on saatu maksimoitua, ja normaalisti hukkatilana olevat kulmat on saatu hyötykäyttöön. Samoin kaiuttimien takana ja katossa – jossa tilaa on yleensä riittämiin – moduulit on

otettu reilusti irti pintamateriaalista, jolloin niiden efektiivisyys matalilla taajuuksilla kasvaa. Kattoelementit on roikotettu 15 cm irti katosta, jolloin vaimennuksen kokonaispaksuudeksi ilmarakojen kanssa tulee 35 cm, kun taas monitorien takana sijaitsevat moduulit ovat irti seinästä 35 cm.

Käytännössä etenkin kaiuttimien takana olevasta mahdollisimman tehokkaasta absorptiosta on paljon hyötyä, sillä pallomaisesti säteilevien matalien taajuuksien heijastuessa etuseinästä takaisin kuulijalle syntyy vastavaiheessa summautuvien ääniaaltojen seurauksena interferenssiä taajuusvasteeseen. Tämän interferenssin taajuus on suoraan verrannollinen kaiuttimen etäisyyteen seinästä, ja se on helposti laskettavissa aallonpituuden laskukaavalla $\lambda = c/f$. Taajuus, jonka neljäsosa-aallonpituus on kaiuttimen ja seinän välinen etäisyys, kumoutuu. Kuviossa 32 tämä on havainnollistettu graafisesti. Vaikka tämä ilmiö muokkaa huoneen taajuusvastetta hyvin samaan tapaan kuin huoneen ominaistaajuudet, on se helposti ilman laskemistakin erotettavissa näistä pienellä testaamisella. Mikäli mitattaessa huonetta vaimenema liikkuu taajuusvastekuvaajassa, kun kaiuttimia siirretään eri kohtaan pituussuunnassa, kyseessä ei ole huonemoodi.



Kuvio 32. Neljäsosa-aallonpituuden etäisyydestä aiheutuva kumoutuminen (Genelec 2015, 25).

Usein pienellä laskutoimituksella on kuitenkin helpompi tarkistaa jo ennen mittauksia, millä taajuusalueella on odotettavissa kaiuttimien sijoittelusta johtuvaa vaimentumaa. Esimerkkinä tutkittavassa huoneessa monitorien akustinen keskipiste on 85 cm etäisyydellä etuseinästä. 85 cm on neljäsosa 3,4 metrin ääniaallosta, jolloin kumoutuva perustaajuus voidaan laskea seuraavasti:

Jos $3,4 = 344/f$ niin $3,4f = 344$ joten $f = 344/3,4 = 101\text{Hz}$.

Kuviossa 33 näkyy valmiina asennettuna tutkimuksen kohteena olevan huoneen modulaarinen akustointijärjestelmä. Mittaus- ja referenssi kuuntelupiste sekä tarkkailukaiuttimet sijaitsevat täsmälleen samoissa paikoissa kuin tyhjässä huoneessa, jotta mittaus tulosten vertailu on mahdollista.

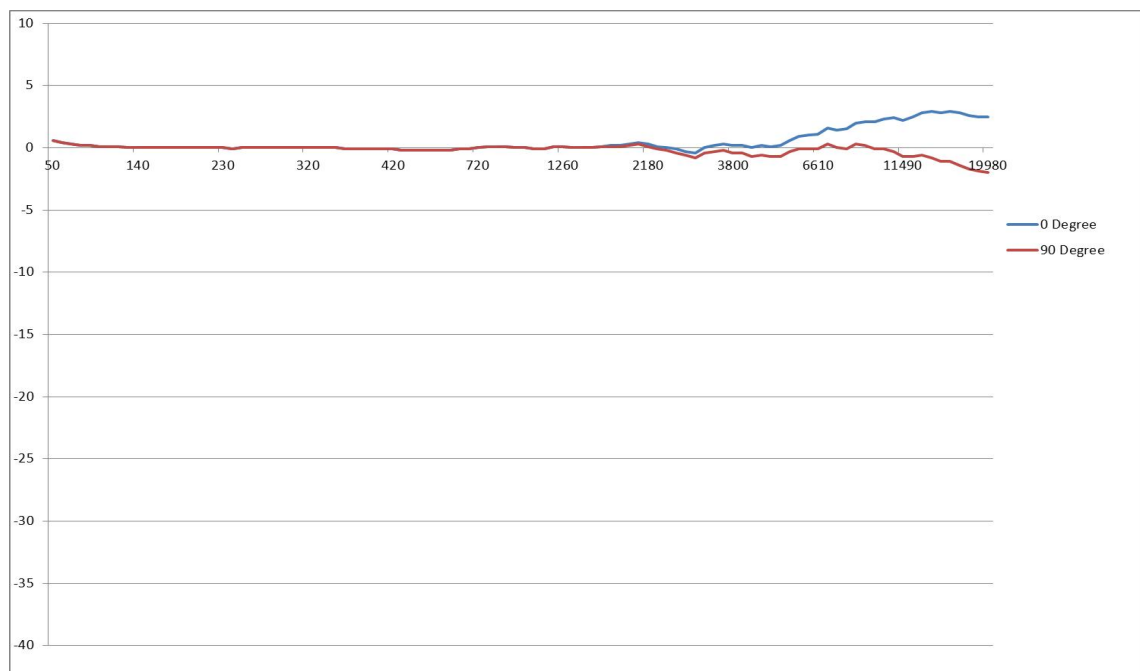


Kuvio 33. Huone akustoinnin jälkeen.

3.2 Akustiset mittaukset

Vaikka yksittäisten akustisten ilmiöiden tutkiminen ja laskeminen on verrattain yksinkertaista, ääniaaltojen liike, leviäminen ja absorptio komplekseissa suljetuissa tiloissa on kuitenkin niin monimutkaista, että tarkka matemaattinen mallintaminen äärimmäisen vaikeaa. Tämän takia akustisista mittauksista on tullut tärkein ja luotettavin menetelmä tilojen sointia ja taajuusvastetta tutkittaessa. Tilan mittaamiseen vaaditaan ainoastaan tietokone ja tilanmittausohjelmisto, mittamikrofoni, etuasteellinen äänikortti sekä äänilähde. Tilanmittausohjelmistolla pystytään mittaamaan ja muuttamaan helposti tutkittavaan graafiseen muotoon erilaisia tilan akustisia ominaisuuksia, kuten huoneen taajuusvastetta, iskuäänivastetta ja jälkikaiunta-aikaa.

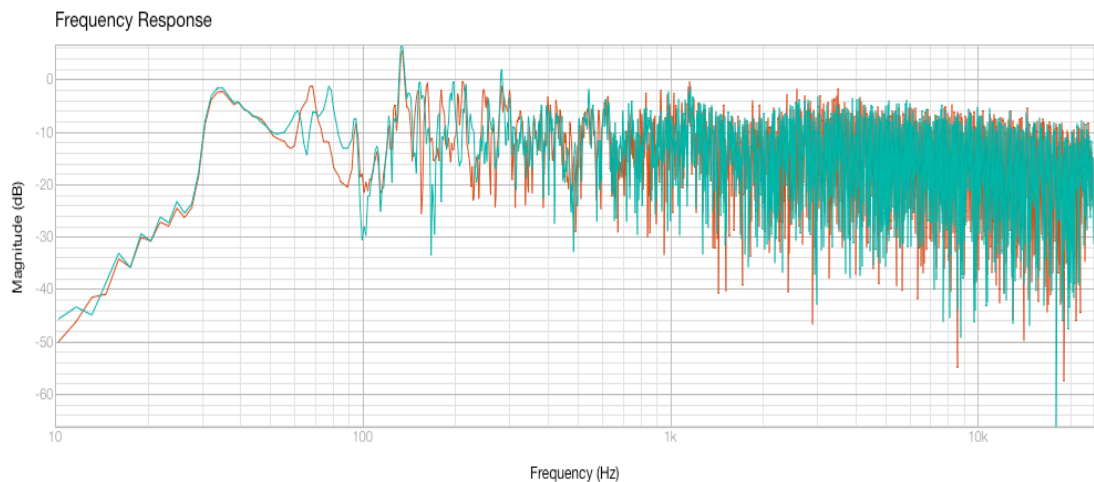
Tutkimuksen kohdetta mitattaessa käytettiin natiivia Fuzz Measure 4 -ohjelmistoa Mac OS X:lle ja Beyerdynamic MM1 -mittamikrofonia. Mikkietuasteena oli RME Fireface 800 -äänikortin oma etuaste, joka on varsin neutraali ja kohinaton. Mittamikrofonille sai valmistajalta yksilöllisen taajuusvasteen sarjanumeroa vastaan sekä 0 asteen että 90 asteen kulmalle (kuvio 34). Mittaukset tehtiin siniaaltopyyhkäisyllä (engl. Sine Sweep) 20 Hz:n ja 20 kHz:n välillä 90 asteen mikrofonikulmalla. Ulkoisten häiriötekijöiden minimoimiseksi ne toistettiin 4 kertaa, joista keskiarvoistettiin graafiset kuvaajat. Kuvajissa on esitetty sekä oikea että vasen kanava samaan aikaan.



Kuvio 34. Beyerdynamic MM1 -mittamikrofonin taajuusvaste (Beyerdynamic 2016).

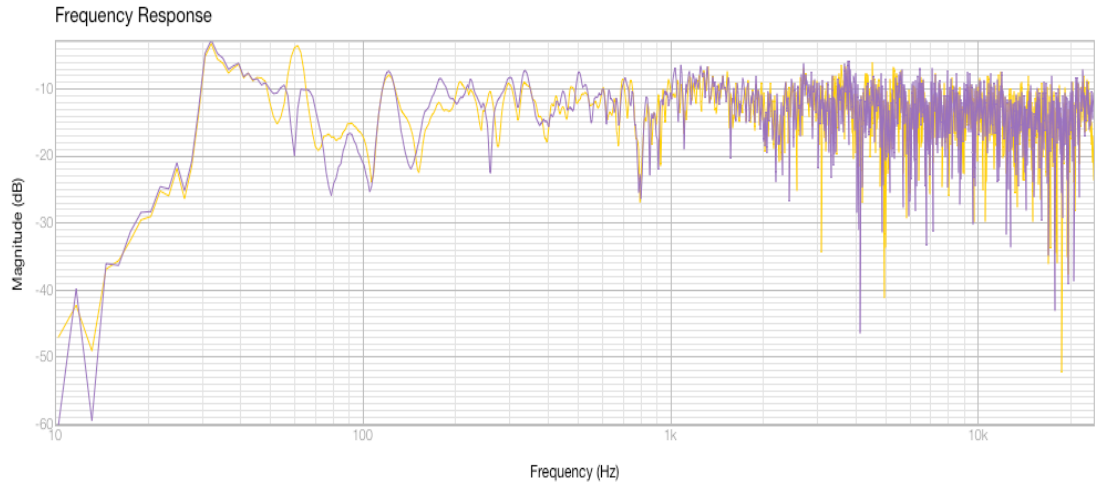
3.2.1 Huoneen taajuusvaste

Kuviosta 35 nähdään, että varhaiset heijastukset huoneen akustoimattomista pinnoista aiheuttavat huomattavasti interferenssiä kampsuodatuksen muodossa taajuusvasteeseen 100 hertsistä ylöspäin. Matalilla taajuuksilla voimakkaimmat aksiaaliset huonemoodit muokkaavat myös taajuusvastetta merkittävästi. Pituussuuntainen 34 Hz:n ominaistajuus ja sen harmoniset kerrannaiset näkyvät selkeästi kuvaajassa korostumina. 120 Hz:n kohdalla sijaitseva piikki taas johtuu sivuseinien välisestä aksiaalimoodista, sillä kuuntelu- ja mittauspiste sijaitsee keskellä huonetta moodin maksimikohdassa. Kuten jo aikaisemmin laskimme, kaiuttimien sijoittelu 85 cm:n etäisyydelle etuseinästä pitäisi aiheuttaa vaimentuman taajuusvasteeseen 101 Hz:n kohdalle. Tämä on selkeästi nähtävissä mittaustuloksista.



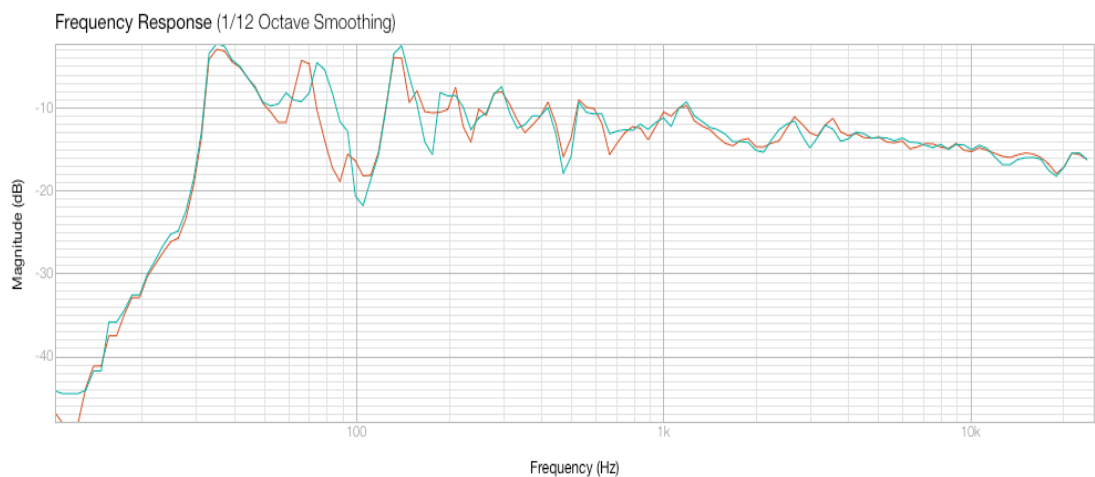
Kuvio 35. Huoneen taajuusvaste ilman tasausta ennen akustointia.

Kuviossa 36 on akustoidun huoneen taajuusvaste ilman tasausta. Kuvaajasta näemme, että kampsuodatus on vähentynyt huomattavasti koko taajuusalueella, ja tämän seurauksena huonemoodien vaikutus matalilla taajuuksilla näkyy kuvaajasta selkeämmin. Jonkin verran interferenssiä on edelleen ylemmillä taajuusalueilla, johtuen akustoimattomien pöytä- ja lattiapintojen aiheuttamista varhaisista heijasteista. Vaikka kampsuodatus on vähentynyt korkeilla taajuuksilla tasaamattomissa mittaustuloksissa huomattavasti, otettaessa kuulon kriittiset kaistat sekä peittoilmiön huomioon, ei sillä ole suurta merkitystä huoneen kokonaissointia tarkasteltaessa, sillä tasatut mittaustulokset kuvastavat paremmin ihmiskuulon erottelukykä.

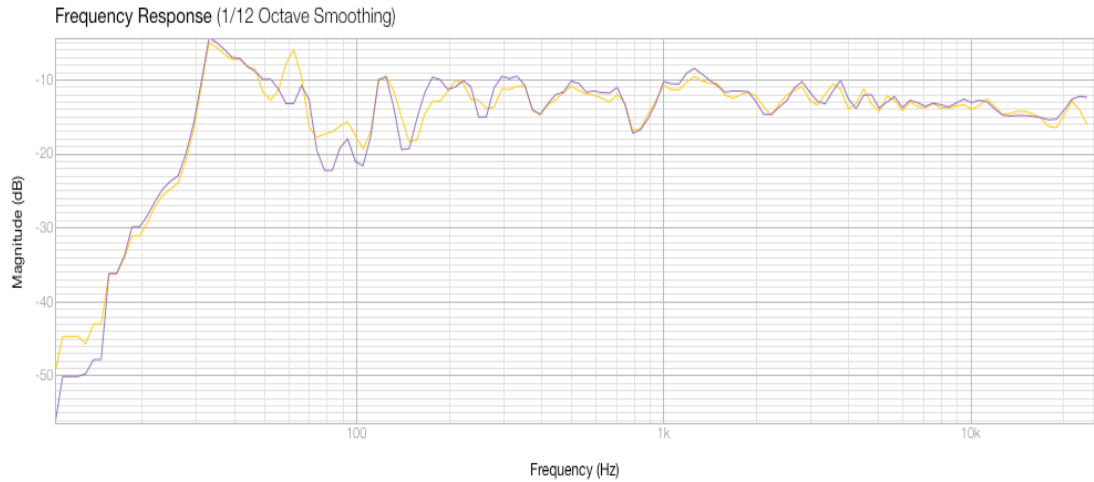


Kuvio 36. Huoneen taajuusvaste ilman tasausta akustoinnin jälkeen.

Kuvioissa 37 ja 38 on esitetty huoneen taajuusvasteet 1/12 oktaavin tasauksella ennen ja jälkeen akustoinnin. Taajuusvasteita vertailtaessa huomaamme, että merkittävää eroa pienen tasoittumisen lisäksi ei kuvaajissa ole, ja huonemoodit sekä kaiuttimien sijoittelu määrittelevät hyvin pitkälti huoneen taajuusvasteen akustoinnista riippumatta. Suurin yksittäinen näkyvä muutos on sivusuuntaisen aksiaalimoodin aiheuttaman 120 Hz:n korostuman vaimentuminen seitsemällä desibelillä. Akustiikkaelementtien pakkaus ilmarakojen kanssa on täten varsin riittävä vaimentamaan näinkin alhaisia taajuuksia efektiivisesti.



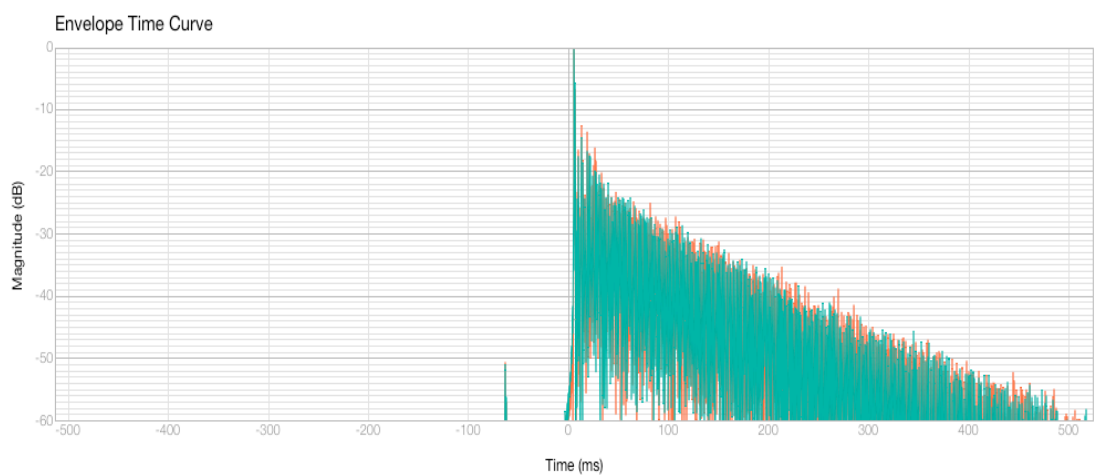
Kuvio 37. Huoneen taajuusvaste 1/12 oktaavin tasauksella ennen akustointia.



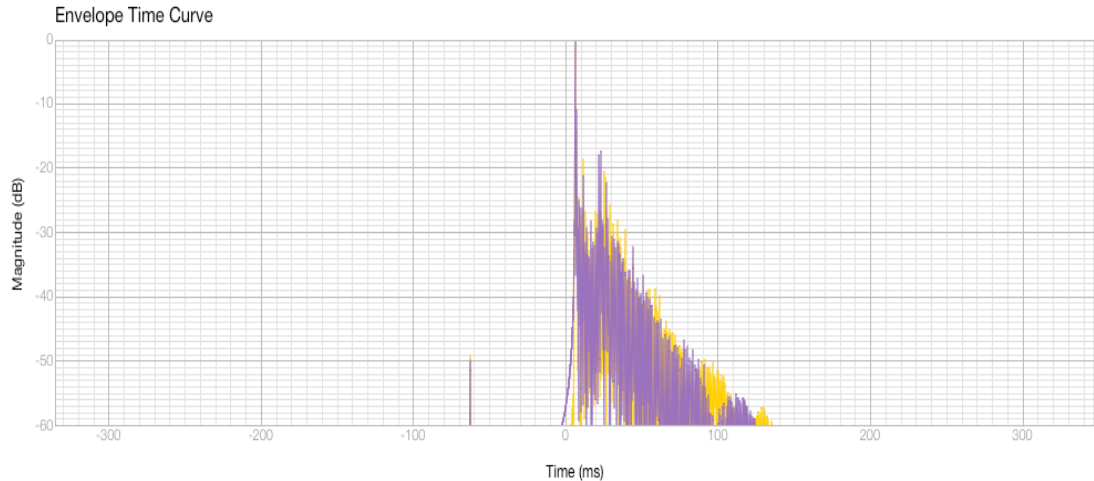
Kuvio 38. Huoneen taajuusvaste 1/12 oktaavin tasauksella akustoinnin jälkeen.

3.2.2 Huoneen iskuäänivaste ja jälkikaiunta-aika

Huoneen iskuäänivastetta mitattaessa huomataan, että akustoimattomassa huoneessa (kuvio 39) diffuusi äänikenttä alkaa heti impulssin (0 ms) jälkeen viiveettä, ja se kestää vaimentua 60 desibeliä noin puoli sekuntia. Akustoidussa huoneessa (kuvio 40) nämä interferenssin kannalta kaikista haitallisimmat varhaiset heijastukset ovat vaimentuneet huomattavasti aikavälillä 0–20 ms, ja hajallinen äänikenttä on lyhentynyt noin 140 millisekuntiin.

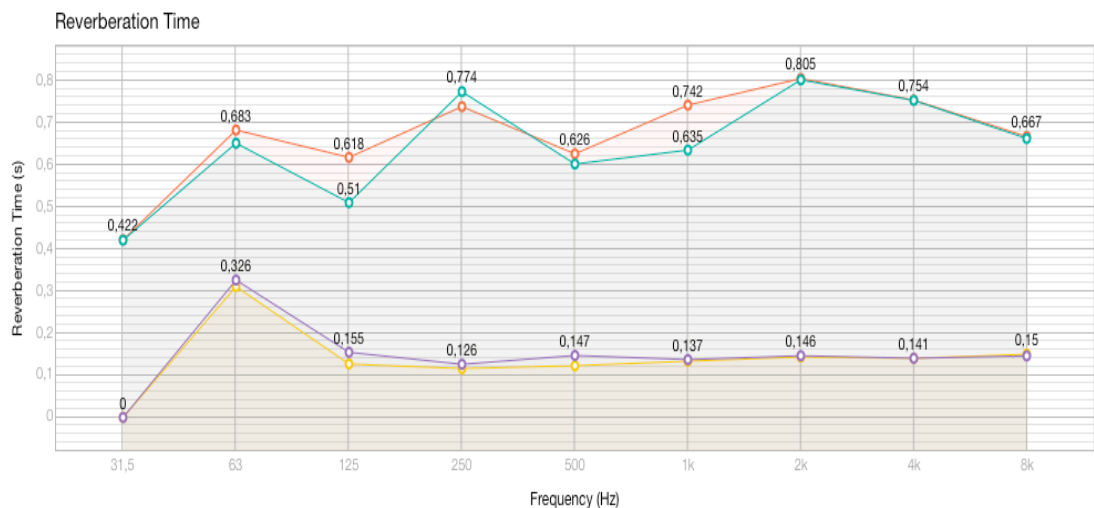


Kuvio 39. Akustoimattoman huoneen iskuäänivaste.



Kuvio 40. Akustoidun huoneen iskuäänivaste.

Tarkastellessa tutkittavan huoneen RT_{60} -aikaa oktaavikaistoittain 31,5 Hz:n ja 8 kHz:n välillä, huomaamme akustoinnin lyhentäneen jälkikaiunta-aikaa merkittävästi koko mitattavalla taajuusalueella. Ennen akustointia jälkikaiunta-aika vaihteli 0,4 sekunnista jopa 0,8 sekuntiin kriittisimmällä kuuloalueella. Tämä on huoneen tilavuuteen sidottuihin ohjearvoihin nähden liian pitkä. Akustoinnin jälkeen RT_{60} lyheni huomattavasti ja tasoittui yhtäläiseksi 1,4 sekuntiin 125 Hz:n yläpuolella. Matalampien taajuuksien RT_{60} puolittui 0,3 sekuntiin akustoimattoman huoneen mittaustuloksiin verrattuna.

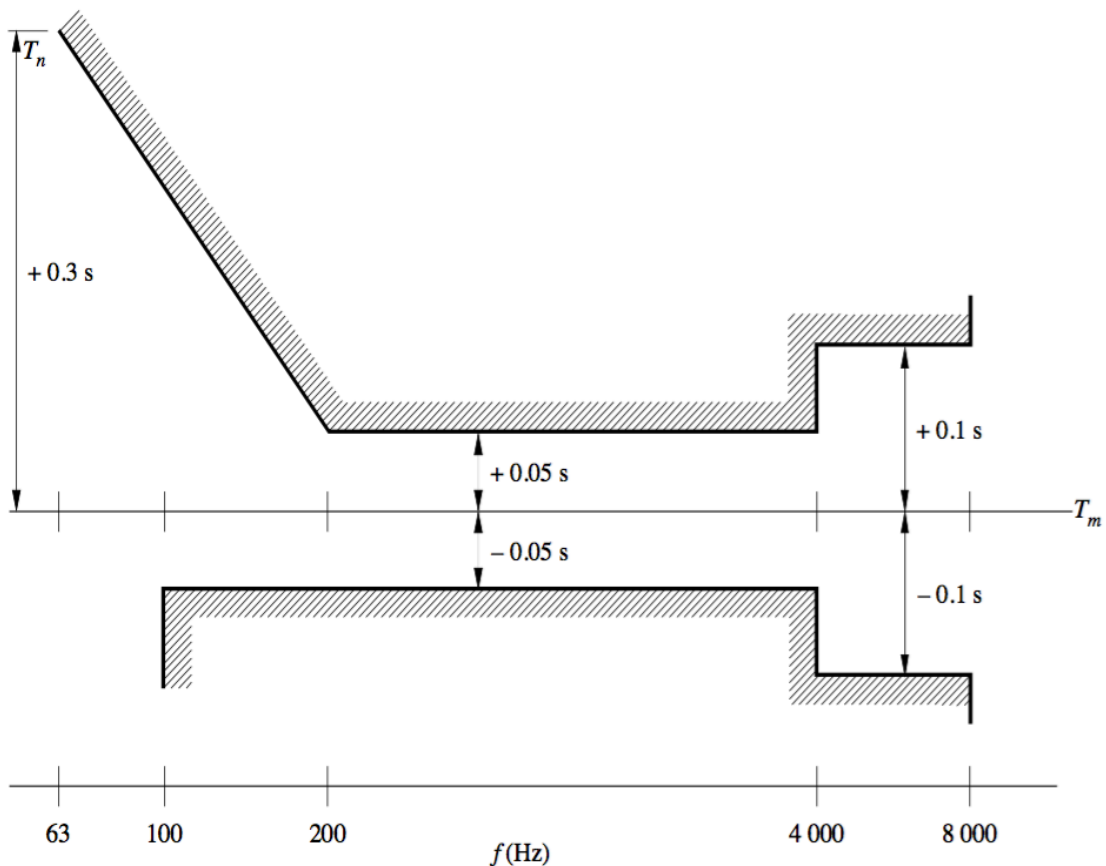


Kuvio 41. Akustoinnin vaikutus huoneen RT_{60} -aikaan. Oranssi ja turkoosi väri on jälkikaiunta-aika ennen akustointia, violetti ja keltainen väri akustoinnin jälkeen.

ITU-R BS.1116-3 -standardin mukaan huoneen tilavuuteen sidotun jälkikaiunta-ajan ohjearvon 200 Hz:n ja 4 kHz:n välillä voi laskea $T_m = 0.25(V/V_0)^{1/3}$ kaavalla, jossa T_m on RT_{60} , V on huoneen tilavuus kuutiometreinä, ja V_0 on referenssihuoneen tilavuus 100 m³ (ITU 2015, 14). Tutkittavan huoneen ohjearvo voidaan siis laskea seuraavasti:

$$RT_{60} = 0.25(35\text{m}^3/100\text{m}^3)^{1/3} = 0,176\text{s}$$

Verrattaessa laskettuun ohjearvoon, mitattu jälkikaiunta-aika saa vaihdella kuvion 42 raja-arvojen puitteissa. Huomaamme että akustoidun huoneen RT_{60} on täysin standardin ohjearvojen mukainen koko mitattavalla taajuusalueella. Akustointielementtien huomattavin vaikutus tilan akustiikkaan on jälkikaiunta-ajan merkittävä tasoittuminen ja lyheneminen. Huonetta varten suunniteltu ja rakennettu modulaarinen akustointijärjestelmä on siis erittäin efektiivinen ja mitoitettu oikein vaimennuspinta-alaltaan.



Kuvio 42. ITU-R BS.1116-3 -standardin jälkikaiunta-ajan vaihtelun raja-arvot (ITU 2015, 14).

4 Pohdinta

Opinnäytetyössäni tutkin äänen fysikaalisia ominaisuuksia sekä kuuloon liittyviä ilmiöitä, jotka ovat huoneakustiikan ymmärtämisen ja tutkimisen kannalta välttämättömiä. Halusin selvittää, miten ääni käyttäytyy erilaisissa tilanteissa ja mitä akustisia ilmiötä tulee ottaa huomioon, kun äänilähde sijoitetaan suljettuun tilaan. Koska ääni käyttäytyy olennaisesti erilaisesti kaiuttomassa vapaassa kentässä suljettuihin tiloihin verrattuna, perehdyin ääniaaltojen etenemisen, heijastumisen ja vaimentumisen periaatteisiin, jotka ovat huoneakustiikan peruspilareita. Näiden ilmiöiden vaikutuksia tutkin tekemällä akustisia mittauksia tavanomaisesta kerrostaloasunnon makuuhuoneesta äänen jälki-työtilaksi konvertoidussa huoneessa.

Tutkimuksen kohde oli akustisesti erittäin haastava, sillä sen tiheät ja hyvin ääntä heijastavat betoniseinät yhdistettynä varsin epäoptimaalisiin mittasuhteisiin ja pieneen tilavuuteen aiheuttivat varsin otollisen ympäristön ongelmallisten huonemoodien syntymiselle. Toteutin huoneen akustoinnin aikaisemmin suunnittelemani ja rakentamalani itsestään seisovalla modulaarisella akustointijärjestelmällä, ja tutkin sen vaikutuksia vertailemalla tilan taajuusvastetta sekä jälkikaiunta-aikaa ennen ja jälkeen akustoinnin.

Totesin erot tekemällä akustisia mittauksia Fuzz Measure 4 -ohjelmistolla ja Beyerdynamic MM1 -mittamikrofonilla. Tein mittaukset siniaaltopyyhkäisyllä 20 Hz:n ja 20 kHz:n välillä, ja tulokset keskiarvoistettiin ohjelmallisesti useista mittauksista ulkoisten häiriötekijöiden minimoimiseksi. Genelec 8050B -aktiivikaiuttimien taajuusvastesäätimet jätin mittauksien ajaksi pois päältä, jotta kaikki mahdolliset akustiset ongelmat tulisivat selkeästi esiin.

Mittaustuloksista tuli esille, että vaikka tasaamattomissa taajuusvastekuvaajissa varhaisten heijastuksien aiheuttama interferenssi väheni korkeilla taajuuksilla huomattavasti, huonemoodit ja kaiuttimien sijoittelu määrittävät pääasiassa huoneen taajuusvastetta akustoinnin riippumatta. Kaiuttimien uudelleensijoittelulla ja taajuusvastesäätimillä voisi olla mahdollista tulevaisuudessa korjata tilan akustisista ominaisuuksista ja kaiuttimien sijoittelusta aiheutuvia toistovirheitä matalilla taajuuksilla. Lisääkustoinnilla olisi myös varmasti mahdollista puuttua huoneen ongelmallisiin pituussuuntaisiin aksiaalimoodeihin, mutta tämä vaatisi referenssi kuuntelupisteen takana sijaitsevan vaatekomeron korvaamista massiivisella vaimentimella.

Suurin mittaustuloksista havaittava muutos tilan akustiikassa oli jälkikaiunta-ajan merkittävä lyheneminen ja tasoittuminen koko mitattavalla taajuusalueella. Huoneen RT_{60} -aika akustoinnin jälkeen oli täysin kuunteluhuoneille ja tarkkaamoille asetettujen standardien ohjearvojen mukainen. Tutkimukseni osoittaa pienien huoneiden olevan varsin otollisia ainoastaan laajakaistaisilla absorbereilla toteutettavalle akustoinnille.

Tutkimuksessani halusin tuoda tärkeimmät huoneakustiikkaan vaikuttavat äänen fyysiset ilmiöt ja niiden todentamismenetelmät helposti lähestyttävään muotoon ja käytännön tasolle, jotta niistä olisi mahdollisimman paljon hyötyä esimerkiksi alan harrastajille tai opiskelijoille, jotka ovat aikeissa rakentaa äänen jälkitöihin soveltuvia tiloja.

Lähteet

Amroc – the room mode calculator. <http://amroc.andymel.eu/> (Luettu 19.7.2016).

Burnett, John 2008. Lenard Audio Institute.
http://education.lenardaudio.com/en/04_acoustics_3.html (Luettu 18.7.2016).

European Broadcasting Union 1998. Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic. Tech 3276 2nd edition. <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf> (luettu 18.7.2016).

Everest, F. Alton 2001. Master Handbook of Acoustics. 4. painos. New York: McGraw-Hill.

Faber Acoustical 2013. IOScope 3.0 Iphone built-in mic frequency response.
<http://blog.faberacoustical.com/2013/ios/iphone/ioscope-3-0-updated-for-ios-7> (Luettu 15.7.2016).

Genelec 2015. Monitor setup guide.
http://www.genelec.com/sites/default/files/media/Studio%20monitors/Catalogues/genelec_monitor_setup_guide_2015.pdf (Luettu 17.7.2016).

Genelec 2016. Data Sheet Genelec 8050B Active Monitoring System.
http://www.genelec.com/sites/default/files/media/Studio%20monitors/8000%20Series%20Studio%20Monitors/8050B/8050b_datasheet_c.pdf (Luettu 18.7.2016).

Hartmann, William M. 2013. Principles of Musical Acoustics. New York: Springer.

Hunecke, Jörg 2016. Room Eigenmodes Calculator.
<http://www.hunecke.de/en/calculators/room-eigenmodes.html> (Luettu 19.7.2016).

International Telecommunication Union 2015. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems. Recommendation ITU-R BS.1116-3. http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-3-201502-I!!PDF-E.pdf (Luettu 19.7.2016).

Karagiozov, Hristo 2014. Lecture 6 – Reverberation. <http://karagioza.com/?p=676> (Luettu 18.7.2016).

Karjalainen, Matti 2000. Hieman Akustiikkaa. Teknillinen korkeakoulu.
<http://www.cs.tut.fi/sgn/arg/akusem/akuintro.pdf> (Luettu 15.7.2016).

Kuttruff, Heinrich 2009. Room Acoustics. 5. painos. London: Spon Press.

Laaksonen, Jukka 2013. Äänityön kivijalka. Helsinki: Riffi-julkaisut.

Newell, Philip 2012. Recording Studio Design. 3. painos. Oxford: Focal Press.

Riionheimo, Janne 2012. Akustiikka-opintojakson luennot marraskuussa 2012 ja luentomateriaalit. Luentomateriaali tekijän hallussa.

Winer, Ethan 2012. *The Audio Expert: Everything You Need to Know About Audio*. 1. Pianos. Oxford: Focal Press.