

Lyhyt johdatus kommunikaatioakustiikkaan

Lyhennetty kirjasta:
Kommunikaatioakustiikka
Matti Karjalainen

Teknillinen korkeakoulu
Signaalinkäsittelyn ja
akustiikan laitos

Rajusti lyhennetty versio kurssille
ELEC-C7110 Informaatioteknologian perusteet (5 op)

Ville Pulkki

Alkuperäinen kirja saatavissa:
<https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-89.3320/materiaali>

Sisältö

1	JOHDANTO	5
2	HYÖDYLLISTÄ TAUSTATIETOA	9
2.1	Äänen synty, säteily ja eteneminen	9
2.1.1	Äänen eteneminen	10
2.1.2	Heijastuminen, absorptio ja läpäisy	11
2.1.3	Tahtuminen ja taipuminen	11
2.1.4	Diffraktio	12
2.1.5	Äänen käyttäytyminen suljetussa tilassa	12
2.2	Acoustic measures and quantities	14
2.2.1	Sound pressure	14
2.2.2	Sound pressure level	15
2.2.3	Computation with amplitude and level quantities	15
2.3	Sähköakustiikka	16
2.3.1	Kaiuttimet	17
2.3.2	Kuulokkeet	18
2.3.3	Mikrofonit	18
2.4	Digitaalinen signaalinkäsittely (DSP)	19
3	KUULON RAKENNE JA TOIMINTA	23
3.1	Korvan rakenne	23
3.2	Ulkokorva	23
3.3	Välikorva	25
3.4	Sisäkorva	26
3.4.1	Basilaarikalvon toiminta	28
3.5	Kuulon perusominaisuudet	28
3.5.1	Kuuloalue ja vakioäänekkyyskäyrästä	29
3.6	Peittoilmiö ja kuulon selektiivisyys	31
3.6.1	Peittoilmiö taajuusalueessa	32
3.6.2	Aikapeitto	32
3.6.3	Kuulon taajuusselektiivisyys	33
3.7	Kuulon ominaisuuksien merkitys äänen pakkauksessa	34

Luku 1

JOHDANTO

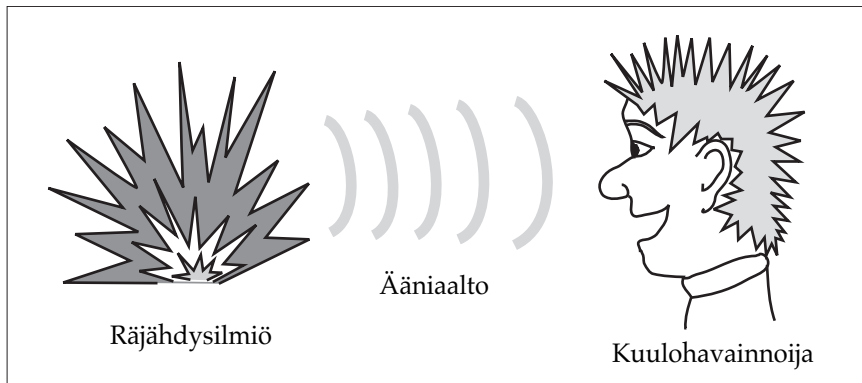
Tehokas aistien käyttö ja kommunikaatio muodostuivat varhain evoluution ja eloonjäämisen edellytyksiksi eläinmaailmassa. Näkö- ja kuuloaistit täydentävät toisiaan siten, että näköaisti tekee verraten täsmällisen ympäristön kuvauksen optiikan lakeihin perustuen, kun taas kuulo on yleensä epätarkempi kohteiden sijainnin suhteen, mutta akustiikan lakeihin perustuen riippumattomampi fyysikaalisista rajoituksista kuten havaittavan kohteen ja havaitsijan välisistä esteistä. Näköaisti on monesti hallitseva kuuloon nähden, jos kohde on selvästi näkyvässä tai liikkuva, kun taas kuulo voi tuoda merkittävää informaatiota, vaikka näkökentässä ei tapahdukaan mitään. Kaikissa tilanteissa aistien välinen integraatio, ts. niiden tuoman informaation sujuva yhdistäminen, on ominaista eläville olioille, paitsi silloin kun eri aistien antama tieto on keskenään ristiriitaista.

Kuuloaistin käytön kaksi perusmuotoa ovat ympäristöön *orientoituminen* ja äänellä tapahtuva *kommunikaatio*. Ensin mainittua esiintyy jo verraten varhaisessa vaiheessa eläinten evoluutiota. Se on saavuttanut hämmästyttävän kehittyneitä muotoja kuten lepakon kuuloaisti. Ultraääniä lähettämällä ja vastaanottamalla lepakko muodostaa näköaistimusta vastaavan 'kuvan' ympäristöstään, kyeten lentämään nopeasti vaikeidenkin esteiden muodostamassa ilmatilassa. Monilla eläimillä kuulo on myös herkempi tai paikantamisen suhteen tarkempi kuin ihmisellä. Kuuloaisti on tärkeä vaaratilanteiden ennakoinnissa tai saalista metsästettäessä.

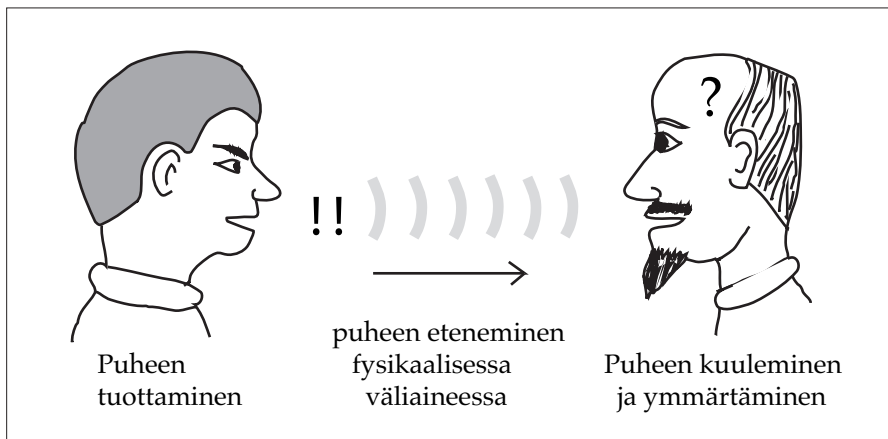
Ääni on erinomainen väline viestintään. Ääntely on helppo keino varoittaa muita eläimiä tai ilmaista olosuhteisiin tai yksilön olotilaan liittyviä seikkoja. Eleet ja ilmeet voivat tulla kysymykseen vain, jos visuaaliselle viestinnälle on olemassa esteetön näkyvyys. Ääni sen sijaan kantautuu kauas ja välittyy näköesteidenkin ympäri. Äänen heikkoutena on, että siitä ei jää mitään fyysistä jälkeä, joten eläimet eivät kykene käyttämään ääntä viestien tallentamiseen eli siirtämiseen ajassa.

Myös ihminen käyttää ääntä sekä orientoitumiseen että viestintään. Ympäristöön orientoituminen on usein vaistonvaraista, ei-tietoista toimintaa. Vastaanotamme koko ajan runsaasti ääninformaatiota, josta suurin osa jää aktiivisesti havaitsematta. Odottamattomat tai erityisen huomion kohteena olevat äänet voimme havainnoida varsin tarkkaan ja muistaa ne aikojen päästä. Esimerkiksi kuvan 1.1 mukaisessa tilanteessa äkillinen räjähdysääni voi pelästyttää tai muuten kiinnittää huomion ääneen tai sen kohteeseen. Jos ääni on häiritsevä tai niin voimakas, että siitä on haittaa kuuloaistille, kutsutaan ääntä *meluksi*.

Ihminen on kehittänyt äänellä tapahtuvan viestinnän huomattavasti pidemmälle kuin mikään muu eläin. Vaikka esimerkiksi delfineillä on ilmeisen kehittynyt ääniviestintä, jopa eräänlainen



Kuva 1.1: Kommunikaatiotilanne, jossa informaatio tarkasteltavasta kohteesta välittyy äänen avulla.



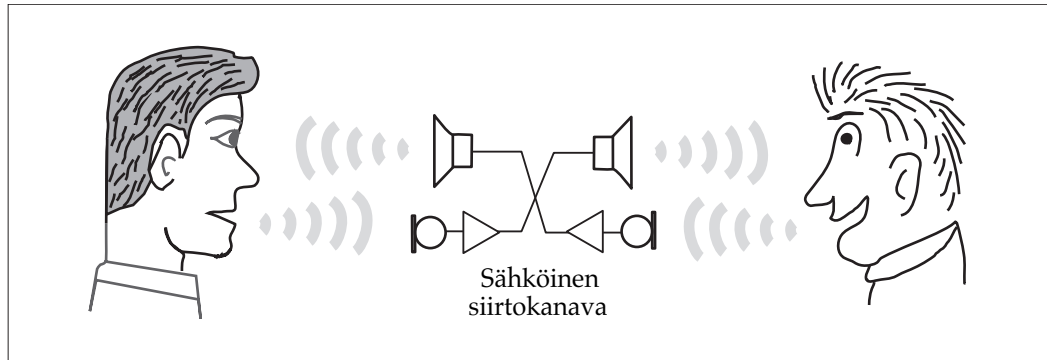
Kuva 1.2: Puhekommunikaatiotilanne kahden henkilön välillä.

‘puhekieli’, on ihmisen kieleen perustuva kommunikaatio ilmeisen ainutlaatuinen. Ääntely kehittyi jossain vaiheessa ilmaisuksi, joiden varaan rakentui *puhekieli*. Tämä edellytti sekä puheen tuottamisen motoriikan kehittymistä että kuulon kykyä eritellä kielellinen sisältö puheäänestä. Vasta myöhemmin ihminen keksi kirjoituksen, ja joillekin kielille on vielä nykyäänkin olemassa vain puhuttu muoto.

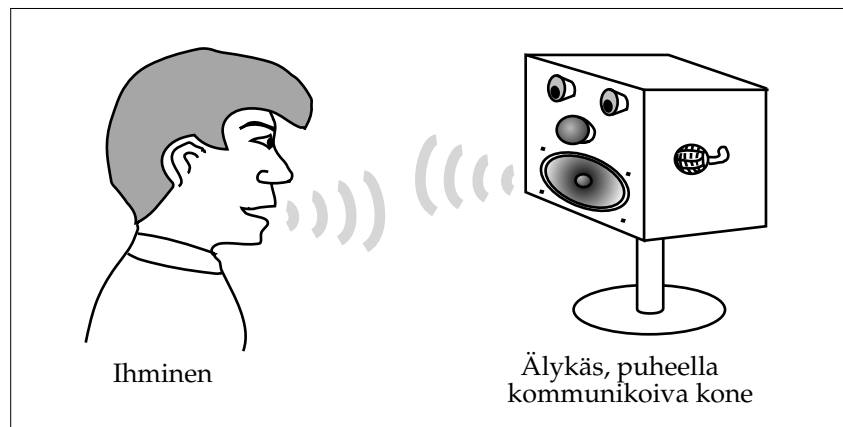
Puhe on nopea ja joustava tapa ilmaista enemmän tai vähemmän täsmällinen, kielellisesti strukturoitu viesti, johon voi lisäksi sisältyä runsaasti ei-kielellistä informaatiota mm. puhujan identiteetistä ja emotionaalisesta tilasta (kuva 1.2). Puhe voi välittyä verraten luotettavasti vaikeissakin akustisissa olosuhteissa ja näköyhteydestä riippumatta. Edellytyksenä on, että puhe ja kuulo toimivat moitteettomasti, yhteisesti tunnettua kieltä ja murretta käyttäen.

Ihminen on kehittänyt myös toisen merkittävän äänellä tapahtuvan kommunikaatiomuodon, *musiikin* [1, 2]. Se ei kuljeta samalla tavalla kielellisiä ja käsitteellisiä merkityksiä kuin puhe (lukuunottamatta mahdollisia laulun sanoituksia), vaan se pyrkii välittämään elämyksiä ja esteettisiä kokemuksia. Toki musiikilla voi olla hyvinkin voimakas merkityksiä välittävä rooli, jos se liittyy yhteiseen kokemus- tai kulttuuritaustaan.

Ihminen ei ole tyytynyt pelkkään akustiikan lakien mukaan tapahtuvaan kommunikointiin, missä viestin välittyminen paikan suhteen on rajoittunutta ja ajan suhteen jokseenkin mahdoton-



Kuva 1.3: Puhekommunikaatiotilanne teknisen välityskanavan kautta.



Kuva 1.4: Ihmisen ja koneen välinen puhekommunikaatiotilanne.

ta. Ottaen avuksi sähkötekniikan, elektroniikan ja tietotekniikan keinot ihminen on parantanut ratkaisevasti ääniviestinnän mahdollisuuksiaan. Ensimmäinen askel tähän suuntaan oli *puheli-* *men* ja pian tämän jälkeen *radion* keksiminen. Äänivärähtelyt muutettiin vastaaviksi sähköisiksi värähtelyiksi, jotka elektronisen *vahvistimen* keksimisen jälkeen voitiin siirtää mielivaltaisen matkan päähän (kuva 1.3). Pian keksittiin myös *äänien tallennus*, ensin mekaanisena (fonografi, levysoitin), sittemmin sähkömagneettisena (nauhuri), ja nykyisin puhtaasti elektronisena digitaalisessa muodossa. Tämä merkitsee mahdollisuutta siirtää ääni-informaatiota ajassa, digitaalisen tallenteen tapauksessa virheettömästi periaatteessa mielivaltaisen ajanjakson yli. *Äänentoisto* sähköisestä signaalista akustiseksi tapahtuu joko kaiuttimien tai kuulokkeiden avulla.

Tietotekniikan kehityksen kautta on tullut mahdolliseksi myös *ihmisen ja koneen välinen kommunikaatio* ääntä, erityisesti puhetta käyttäen (kuva 1.4). Kone voi tuottaa puhetta *puhesynteesin* avulla ja tunnistaa ihmisen lausumia sanoja tai viestejä automaattisen *puheentunnistuksen* avulla. Tämä edellyttää paitsi äänisignaalien kehittynyttä käsittelyä, myös informaatiotekniikkaa, jolla luonnollisen kielen rakenteiden ja merkitysten käsittely on mahdollista.

Kommunikaatioakustiikka

Äänellä tapahtuva kommunikaatio ja siihen liittyvä teknologia on laaja ja monitahoinen aihepiiri, jonka hallitsemiseksi täytyy tuntea monia tieteen ja tekniikan alueita. Tästä johtuen ei ole mahdollista koostaa yksiin kansiin esitystä, joka käsittelee kattavasti kaikki ääniviestinnän osa-alueet. Jo pelkästään ääni fysikaalisena ilmiönä on aihe, josta on kirjoitettu lukemattomia sekä teoreettisia että käytännön sovelluksia koskevia kirjoja. Myöskin puhekommunikaatiosta ja siihen liittyvästä tekniikasta on runsaasti kirjallisuutta. Sama pätee edelleen kuuloa koskevaan tietoon.

Tämän kirjan tavoitteena on antaa yleiskuva äänellä tapahtuvan kommunikaation keskeisistä käsitteistä, teorioista, malleista ja sovelluksista¹. Kirjassa paneudutaan siihen, kuinka informaatiota välittävät äänisignaalit syntyvät, millaisia ominaisuuksia niillä on, ja kuinka ne vastaanotetaan. Varsinkin kuulon toiminta ja siihen liittyvät tekniset sovellukset ovat tarkastelun keskipisteessä. Sen sijaan fysikaalinen akustiikka, signaalinkäsittelyn menetelmät ym. erityisalueet on käsitelty vain siinä laajuudessa, että aihepiiristä muodostuu kokonaiskuva. Näitä erityisaiheita voi opiskella lisää seuraamalla lähdeviittauksia.

Tämän kirjan nimeksi on valittu '*Kommunikaatioakustiikka*'. Se kuvaa kahta äänellä tapahtuvan viestinnän keskeistä käsitettä, *kommunikaatiota* ja *akustiikkaa*. Kirjan aihepiirit on valittu siten, että siinä tulisivat käsitellyiksi ne perustiedot, joiden varaan äänellä tapahtuvan viestinnän tekniset välineet ja järjestelmät rakentuvat. Silti se ei käsittele niinkään teknisiä menetelmiä ja ratkaisuja kuin yleisiä toiminnallisia periaatteita, tapahtuivatpa ne teknisin välinein tai ilman.

Tässä lyhennelmässä esitetään kevyt johdatus ääneen fysikaalisina ilmiöinä sekä kuulemiseen. Jos tämä esitys innostaa, niin suosittelimme alkuperäiseen teokseen tutustumista, joka on saatavissa kansilehdellä mainitussa web-osoitteessa. Siihen liittyy myös S.89-3320 Kommunikaatioakustiikka -niminen kurssi.

¹Englanninkielinen kokoomateos aiheesta on viite [3].

Luku 2

HYÖDYLLISTÄ TAUSTATIETOA

Sana *ääni*, erityisesti englannin kielen termi *sound*, voi tarkoittaa sekä fysikaalista ilmiötä että subjektiivista ääniaistimusta. Tähän perustuu ristiriitaiselta vaikuttava filosofinen kysymys “Jos metsässä kaatuu puu ja kukaan ei ole kuulemassa, syntyykö siitä ääni?” Kun tämä ääni-sanan kaksijakoisuus — objektiivinen ja subjektiivinen merkitys — otetaan huomioon, tulee edellä esitetystä kysymyksestä huomattavasti vähemmän ristiriitainen. Voimmehan sijoittaa metsään esimerkiksi videokameran tai muita rekisteröintilaitteita, joiden tallenteista havaitsemme fysikaalisen äänen syntyneen aina puun kaatuessa. Subjektiivisen äänielämyksen syntymiseen tarvitaan kuulija.

Englannin kielessä on toinenkin ääntä tarkoittava sana, *voice*, joka viittaa lähinnä ihmisääneen (puhe ja laulu). Tälläkin käsitteellä on objektiivinen ja subjektiivinen puolensa, vaikka sen tuottamiseenkin tarvitaan ihminen (tai elävä olento).

Äänenkäsittely tietokoneilla ja signaaliprosessoreilla on laajentanut edelleen näiden käsitteiden alaa. Ääni — sekä *sound* että *voice* — voi olla myös pelkkä lukuono tai muu tietorakenne prosessorin muistissa ainakin siinä mielessä, että se voi olla peräisin todellisesta äänilähteestä tai se voidaan muuntaa kuultavaksi ääneksi.

Tässä luvussa tarkastellaan luonnon ja ihmisen tuottamaa ääntä ja sen fysikaalisia ominaisuuksia, joilla on merkitystä äänellä tapahtuvassa kommunikaatiossa.

2.1 Äänen synty, säteily ja eteneminen

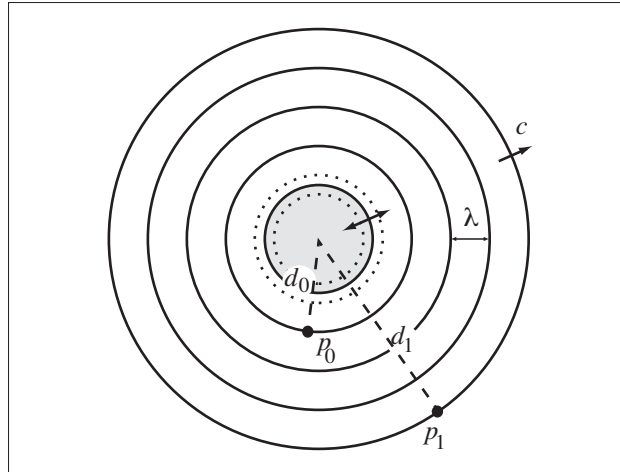
Ääni alkuperäisimmässä muodossaan, ilmassa etenevänä aaltoliikkeenä, syntyy useimmiten mekaanisen värähtelyn seurauksena. Poikkeuksina tästä perussäännöstä voidaan mainita esimerkiksi ilmavirtauksen aiheuttama kohina tai vaikkapa salama, missä ilman nopeasta lämpenemisestä purkauksessa johtuva laajeneminen aiheuttaa voimakkaan ääniaallon.

Äänen käyttäytymistä ilman tai veden kaltaisessa homogeenisessä väliaineessa, *fluidissa*, esittää yleinen aaltoyhtälö (yksiulotteisena, x = paikka, t = aika, p = äänipaine)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

joka voidaan tulkita muodostuneen siten, että jokainen äärimmäisen pieni palanen väliainetta toimii hitauden omaavana massapartikkelina¹, ja että partikkelien välillä vaikuttavat jousimaiset

¹ $F = m \cdot a$ eli voima = massa kertaa kiihtyvyys.



Kuva 2.1: Pallosäteilijän aiheuttama palloaaltokenttä.

voimavaikutukset². Nämä kaksi komponenttia edustavat liike-energiaa ja potentiaalienergiaa, joiden summa häviöttömässä väliaineessa pysyy vakiona.

Kaavan (2.1) osittaisdifferentiaaliyhtälön käsittely löytyy esimerkiksi lähteistä [4] ja [5]. Helppotajuinen johdanto äänen aaltoliikeominaisuuksiin on esitetty mm. viitteessä [6]. Muita suositeltavia fysikaalisen akustiikan ja sovellusalueiden teoksia ovat mm. [7–15]. Tässä yhteydessä ei ole tarpeen perehtyä matemaattis-fysikaaliseen akustiikkaan ja teknisiin yksityiskohtiin, vaan riittää, kun luonnehdimme ääniaallon käyttäytymistä pääpiirteittäin.

Kaavan (2.1) aaltoyhtälössä muuttujana on *äänipaine*³ p , joka edustaa ilmanpaineen poikkeamaa tasapainoarvostaan. Äänipaineen p mittayksikkö on Pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$). Koska kuuluvat äänet ovat paineeltaan suuruusluokkaa 10^{-5} – 10^2 Pa, on kätevää ilmoittaa äänen voimakkuus *äänipainetason* L_p avulla *desibeleinä* (dB)

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2.2)$$

missä p_0 on referenssiarvo $20 \mu\text{Pa}$. Se vastaa likimain hiljaisinta kuultavissa olevaa ääntä taajuudella 1 kHz. Kuulo pystyy käsittelemään ääniä, joiden äänipainetaso on välillä 0–130 dB. *Taajuus* ilmoittaa, kuinka monta värähdysjaksoa tapahtuu sekunnissa. Sen mittayksikkö on Hertsi (Hz).

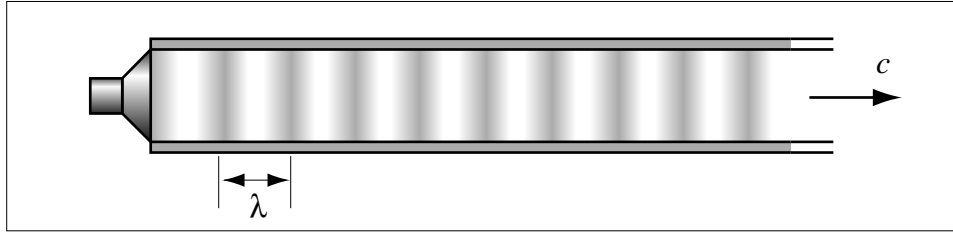
2.1.1 Äänen eteneminen

Häiriö tasapainoasemaan nähden väliaineessa eli paineen poikkeama staattisesta arvostaan saa aikaan aaltoliikkeen, joka etenee nopeudella c , kts. kaavan (2.1) oikea puoli. Äänen nopeus ilmassa on noin 340 m/s ja riippuu hieman lämpötilasta. Esimerkiksi pienikokoinen, taajuudella f sykkivä pallo tai pistemäisen pieni säteilijä saa aikaan *palloaallon* kuvan 2.1 mukaisesti. Samassa värähtelyn vaiheessa olevien aaltorintamien väli on aallonpituus λ , jolle pätee

$$\lambda = c/f. \quad (2.3)$$

² $F = k \cdot x$ eli voima = jousivakio kertaa poikkeama tasapainoasemasta.

³Suomen kielessä on käytössä sekä *äänipaine* että *äänepaine*.



Kuva 2.2: Tasoaalto tasapaksussa putkessa.

Palloaallon äänenpaine vaimenee edetessään. Tämä johtuu siitä, että yksi etenevä ”pallon-pinta” kantaa mukanaan tietyn määrän energiaa, ja koska pallon pinta-ala ($4\pi r^2$) kasvaa suhteessa etäisyyden neliöön, jakautuu energia laajemmalle ja laajemmalle alueelle. Äänenpaine on taas suoraan verrannollinen energian neliöjuureen, ja se vaimenee taas kääntäen suhteessa etäisyyteen (ns. $1/r$ -laki). Usein akustiikassa mitataan palloaallolle äänenpaine p_0 etäisyydellä d_0 , ja tehtävänä on laskea äänenpaine p_1 etäisyydellä d_1 . Tätä varten voidaan johtaa kaava

$$p_0 d_0 = p_1 d_1, \quad (2.4)$$

josta saadaan suoraan

$$p_1 = \frac{d_0}{d_1} p_0. \quad (2.5)$$

Eli, mitä kauempana ollaan, sitä pienempi on äänenpaine. Etäisyyden kaksinkertaistaminen puolittaa äänenpaineen, ja etäisyyden puolittaminen kaksinkertaistaa äänenpaineen.

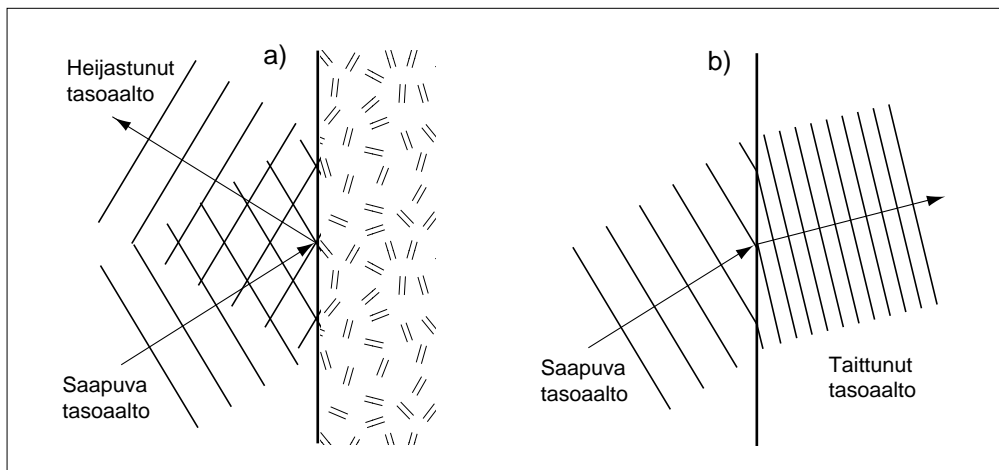
Toinen tärkeä aaltoliikkeen erikoistapaus on *tasoaalto*, joka ei vaimene ollenkaan edetessään. Riittävän kaukana pallosäteilijästä pienellä pinnalla tarkasteltuna aalto on lähellä tasoaaltoa. Tasapaksussa putkessa voi edetä vain tasoaalto, mikäli taajuus on niin pieni, että putken poikkimitta on pieni aallonpituuteen verrattuna. Kuvassa 2.2 on luonnehdittu akustista aaltoliikettä putkessa.

2.1.2 Heijastuminen, absorptio ja läpäisy

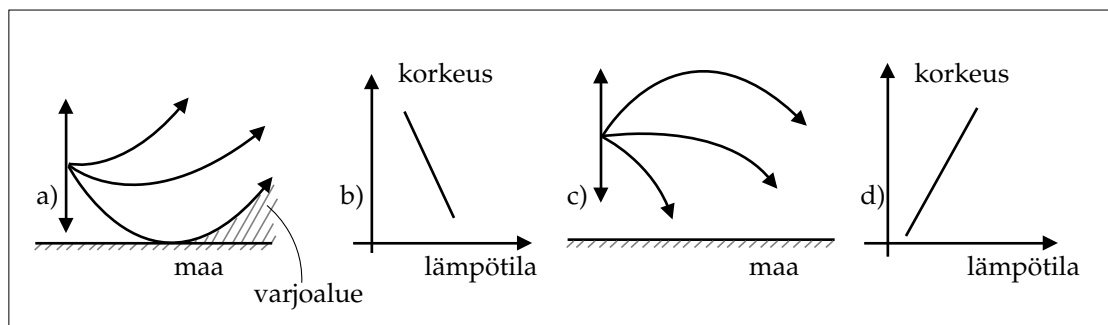
Kun aaltoliike kohtaa kovan pinnan kuten seinän, osa aaltoliikkeen energiasta *heijastuu* takaisin ja osa jatkaa toisessa väliaineessa tai absorboituu eli muuttuu lämmöksi. Kuvassa 2.3a on luonnehdittu tasoaallon käyttäytymistä peiliheijastuksen tapauksessa, jolloin tulo- ja lähtökulmat ovat yhtä suuret. Heijastuvan aallon voimakkuutta suhteessa saapuvan aallon voimakkuuteen (amplitudiin) kuvataan *heijastuskertoimella* (reflection coefficient) ja absorboituvaa osuutta aallon energiasta *absorptiokertoimella* (absorption coefficient).

2.1.3 Taittuminen ja taipuminen

Kuvasta 2.3b nähdään aallon *tauttuminen*, kun se kohtaa toisen väliaineen rajapinnan. Tulo- ja lähtökulmien (sinien) suhde riippuu äänen nopeuksista ko. väliaineissa (Snellin laki). Jos väliaineen ominaisuudet muuttuvat asteittain kuten esimerkiksi ilmakehässä, riippuu ääniaaltojen käyttäytyminen äänennopeuden ja siten lämpötilan profiilista kuvan 2.4 mukaisesti. Aaltoliike taipuu normaalisti ylöspäin, mutta lämpötilaprofiilin inversiotapauksessa maanpintaa kohti.



Kuva 2.3: a) Tasoaallon heijastuminen kovasta seinäpinnasta ja b) taittuminen kahden eri väliaineen rajapinnassa.



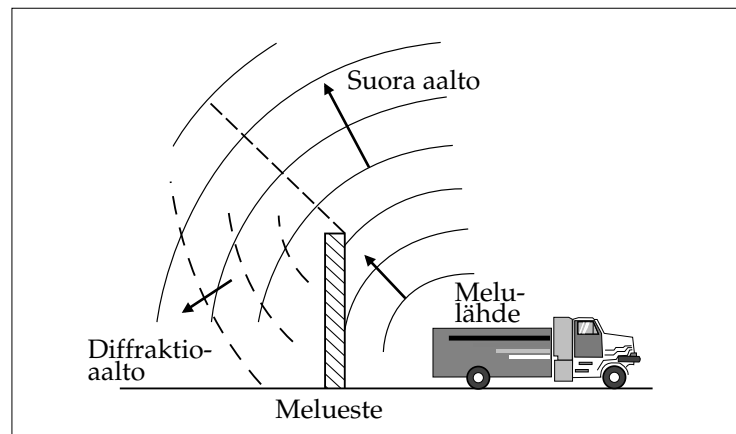
Kuva 2.4: Äänen taipuminen ilmakehässä eri lämpötilaprofiileilla: a & b) normaalitilanne, jolloin lämpötila laskee ylöspäin, c & d) inversiotilanne, jolloin lämpötila kasvaa ylöspäin ja ääniaallot kaareutuvat alaspäin.

2.1.4 Diffraktio

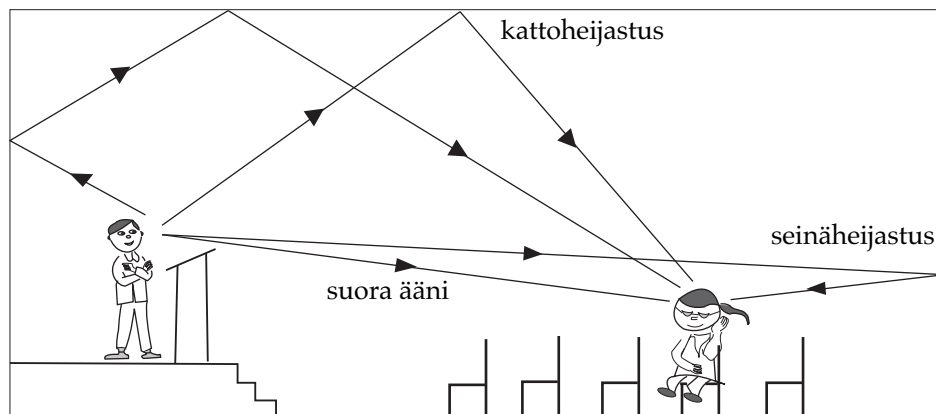
Kun esineen mitat ovat aallonpituuden suuruusluokkaa ja ääniaalto kohtaa ko. esineen, tapahtuu *diffraktio* (diffraction). Se on matemaattisesti hankalasti käsiteltävä ilmiö. Esine tai sen reuna toimii eräänlaisena sekundäärisenä eli toisioäänilähteenä. Tyypillinen esimerkkitapaus on kuvan 2.5 esittämä meluste, missä katkoviivalla on merkitty diffraktioaaltoa. Hyvin pienillä taajuuksilla (= aallonpituus hyvin suuri) seinäke ei juuri estä äänen etenemistä sen taakse. Hyvin suurilla taajuuksilla (= aallonpituus hyvin pieni) puolestaan syntyy varjoalue (kuten valolla) ja vain pieni määrä ääntä diffraktoituu reunan ympäri. Kun este on aallonpituuden kokoluokkaa, pääsee osa äänestä kiertämään esineen.

2.1.5 Äänen käyttäytyminen suljetussa tilassa

Suuri osa äänikommunikaatiosta tapahtuu sisällä suljetuissa tiloissa kuten tavallisessa olohuoneessa, puheauditoriossa, konserttisalissa, toimistossa, jne. Tilan seinät aiheuttavat *heijastuksia*



Kuva 2.5: Äänen diffraktio esteen reunasta.

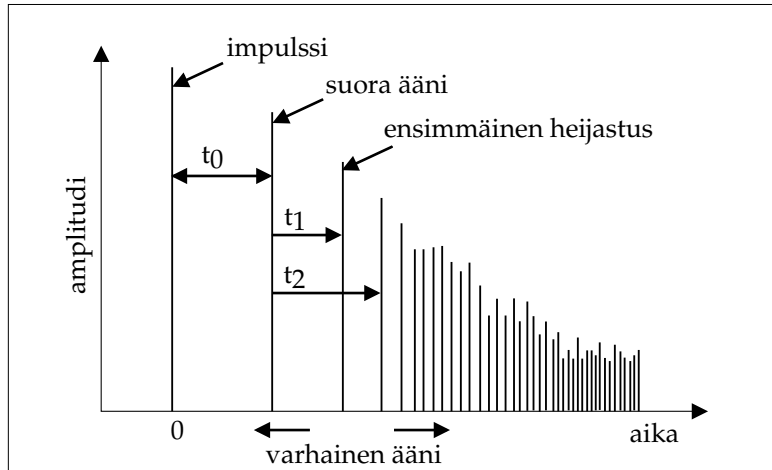


Kuva 2.6: Äänen kulkureittejä huoneessa äänilähteestä kuulijalle, kun oletetaan, että äänen etenemistä voidaan kuvata sädeperiaatteella.

(reflection) ja *jälkikaiuntaa* (reverberation), jotka vahvistavat ja värittävät ääntä, mutta liiallisina tekevät äänestä epäselvän. Puhe- tai musiikkikommunikaation kannalta akustinen tila tulee suunnitella siten, että ääni saapuu kuulijalle kyllin voimakkaana ja selkeänä ja ylittää riittävästi taustamelun tason.

Kuvassa 2.6 on hahmoteltu äänen etenemistä suljetussa tilassa äänilähteestä kuulijalle. Suoran äänen jälkeen saapuu joukko varhaisia heijastuksia seinien, katon ja lattian kautta, sitten tihevä määrä moninkertaisia heijastuksia, jotka muodostavat jälkikaiunnan. Äänilähteen osalta merkittäviä tekijöitä ovat syntyvän äänisignaalin luonteen lisäksi myös lähteen suuntaavuusominaisuudet. Esimerkiksi kaiuttimet voivat kuulostaa erilaisilta huonetilassa, vaikka niiden säteily pääakselilla kuulijaa kohti olisi samanlainen.

Äänen saapumista kuulijalle ajan funktiona voidaan havainnollistaa kuvan 2.7 periaatekaavion avulla. Kuulijalle etenee ensimmäiseksi suora ääni, sitten ensimmäisen kertaluvun heijastukset seinistä, katosta ja lattiasta, ja tämän jälkeen yhä useamman heijastuksen läpikäyneet äänet. Kuvasta nähdään näin syntyvä *reflektogrammi* eli vaste ajan funktiona periaatteellisesti esitettynä. Varhaiset heijastukset — puheella n. 50 ms saakka ja musiikilla noin 100 ms alusta



Kuva 2.7: Impulssimaisen äänen saapuminen kuulijalle ajan funktiona (= impulssivaste) suljetussa tilassa periaatteellisesti esitettynä.

— parantavat äänen kuuluvuutta, mutta myöhempi osa, jälkikaiunta, liian voimakkaana esiintyessään on haitallista.

Huoneen tai salin tärkein yksittäinen tunnusluku on *jälkikaiunta-aika* T_{60} , joka ilmoittaa, missä ajassa tilaan tuotettu äänikenttä vaimenee 60 dB sen jälkeen, kun äänen tuottaminen lakkaa. Jälkikaiunta-aika saadaan kaavasta

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{S} \quad (2.6)$$

missä V on huoneen tilavuus ja S absorptioala eli tilan kaikkien pintojen absorption aiheuttama, täydellistä absorptiota vastaavan pinnan ala. Se lasketaan kaavasta

$$S = \sum a_i A_i \quad (2.7)$$

missä A_i on pinnan i pinta-ala ja a_i on pinnan absorptiokerroin. Absorptiokertoimet ovat lukuja välillä 0...1, ja ne on taulukoitu tai mitattavissa eri pintamateriaaleille.

Konserttisalin jälkikaiunta-ajan tulisi olla tilan koosta riippuen noin kaksi sekuntia tai vähän alle, kun taas puheauditoriossa koon mukaan suuruusluokkaa 0.5...1 sekuntia.

2.2 Acoustic measures and quantities

Acoustics is a branch of physics and its applications where a set of concepts, variables, quantities, and measures are used to characterize waves, fields, and signals. Some of the most important physical measures and quantities are mentioned here.

2.2.1 Sound pressure

The most important physical measure in acoustics is *sound pressure*. Pressure in general describes force per area in Pascal units [Pa] = [N/m²]. Sound pressure is the deviation of pressure

from static pressure in a medium, most often in the air, due to sound wave, in a specific point of space. Sound pressure values in the air are typically much smaller than the static pressure. Sounds that the human hearing can deal with are within range of $20 \cdot 10^{-5} \dots 50$ Pa.

Sound pressure is an important measure also due to the fact that it can be registered easily. A good condenser microphone can transform sound pressure to electric signal (voltage) with high accuracy.

2.2.2 Sound pressure level

Because sound pressure varies in a large range of Pascal units, it is found more convenient to use a logarithmic unit, *decibel* [dB]. The ratio of two amplitudes, A_1 and A_2 , in decibels is computed by

$$L = 20 \log_{10}(A_2/A_1) \quad (2.8)$$

and it is used widely in acoustics, electrical engineering, and telecommunications. Some decibel values that are good to remember are

ratio	decibels
1/1	0
2/1	$\approx 6.02 \approx 6$
$\sqrt{10} \approx 3.16$	10
10/1	20
1/10	-20
100/1	40
1000/1	60

In acoustics the concept of decibel is used in a special way. If the denominator A_2 in Eq. (2.8) is a fixed reference, decibels are then absolute *level* units. A reference sound pressure $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa is used so that *sound pressure level* (SPL) L_p [dB] is obtained from

$$L_p = 20 \log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (2.9)$$

This value of p_0 is selected so that it roughly corresponds to the threshold of hearing, i.e., the weakest sound at 1 kHz frequency that can just be noticed. Human hearing is able to deal with sounds in the range of 0–130 dB, from threshold of hearing to threshold of pain. SPL values in dB are more convenient to remember than sound pressure values in Pascal units. Some typical sound pressure levels are shown in Fig. 3.10

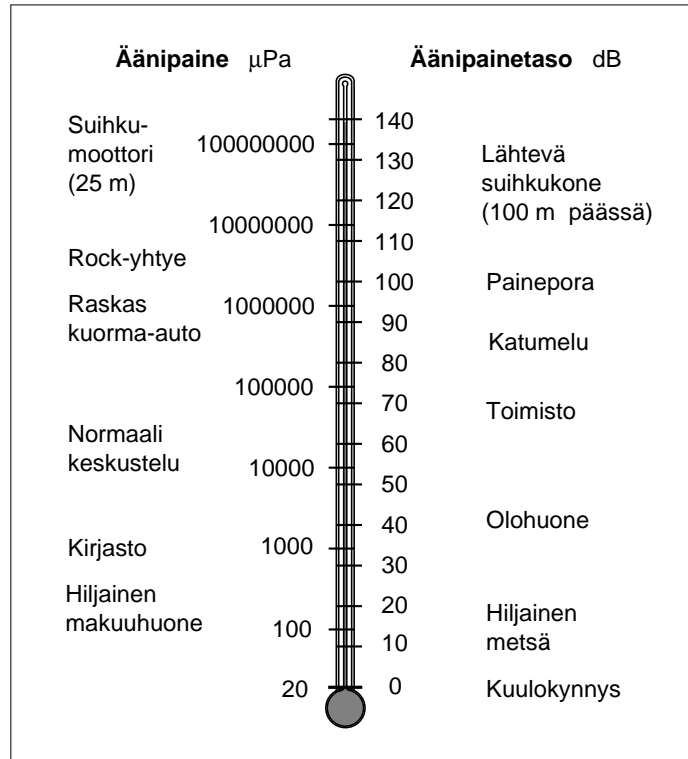
SPL values can be converted to sound pressure by the inverse of Eq. (2.9) as

$$p = p_0 10^{L_p/20} \quad (2.10)$$

2.2.3 Computation with amplitude and level quantities

When two or more sounds contribute to a sound field, they can result in different ways to the total field. From the point of view of any single time moment the pressure values sum up⁴. Resulting amplitude or RMS values and level quantities can be categorized in following cases

⁴This linear superposition of waves is valid in the air at normal sound levels. Nonlinearities may appear elsewhere, for example in sound reproduction systems.



Kuva 2.8: Typical sound levels found in environment.

1. Sound sources are *coherent* if they or their partials have same frequencies. Depending on their phase difference they can
 - add constructively if they have same phase
 - add destructively if they are in opposite phase
 - in other cases the result depends on the amplitudes and phases of the components.
2. Sound sources are *incoherent*, i.e., frequencies do not coincide, in which case the powers of the signals are summed.

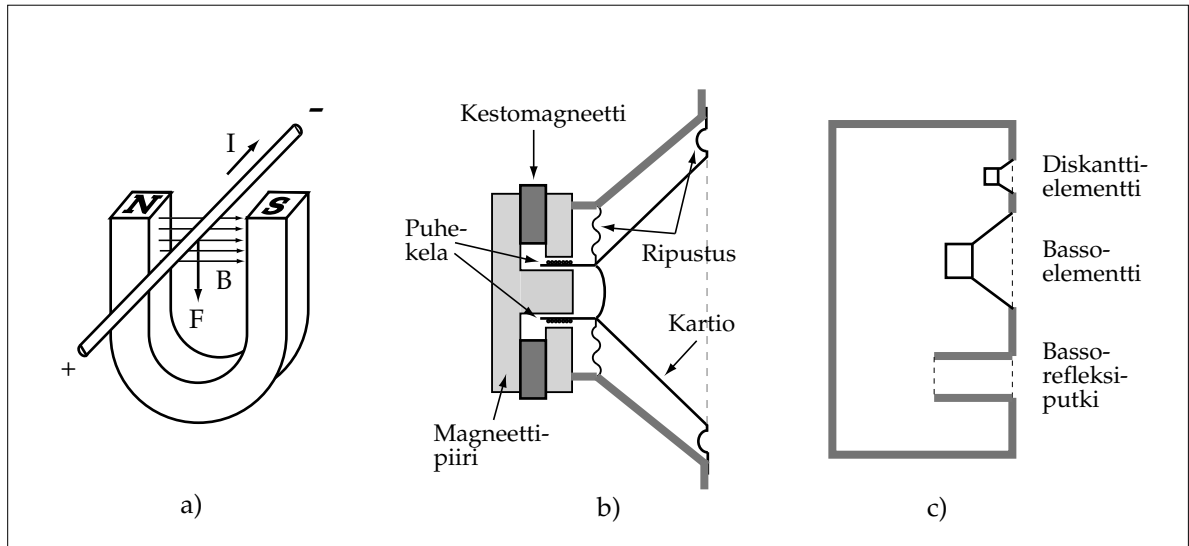
When two coherent signals with same amplitude A sum up constructively, the resulting signal has amplitude $2A$ which means increase of level by $20 \log_{10}(2A/A) \approx 6$ dB. If two incoherent signals are added, the resulting level will increase by $10 \log_{10}(2A^2/A^2) \approx 3$ dB.

In a general case of incoherent sounds, with sound levels L_1 and L_2 , the resulting level, based on addition of powers, will be

$$L_{tot} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_1 + P_2}{P_0}\right) = 10 \log_{10}(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) \quad (2.11)$$

2.3 Sähköakustiikka

Sähköakustiikka (electroacoustics) liittyy ilmiöihin, joiden avulla sähköiset värähtelyt tai signaalit voidaan muuntaa akustisiksi tai päinvastoin. Tämä on hyvin tärkeä alue modernin kommunikaatiotekniikan ja äänentoiston kannalta, sillä ääni välitetään, tallennetaan ja



Kuva 2.9: Dynaamisen kaiuttimen toimintaperiaate: a) magneettikentässä B olevaan johtimeen, jonka virta on I ja pituus kentässä on l , vaikuttaa voima $F = BIl$, b) tyypillinen kaiutinelementin rakenne sekä c) koteloitun kaksitiekkaiuttimen (bassorefleksikotelo) rakenne.

käsitellään lähes aina sähköisessä muodossa. Myös mittausten ja tutkimuksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää voida muuntaa akustiset signaalit ja mitattavat suureet sähköiseen muotoon ja päinvastoin.

2.3.1 Kaiuttimet

Sähköisen signaalin muuntaminen akustiseksi ääneksi tapahtuu kaiuttimien tai kuulokkeiden avulla. *Kaiutin* (loudspeaker) on yhdestä tai useammasta kaiutinelementistä tehty, yleensä koteloitu kokonaisuus, jota ohjataan tehovahvistimella (päätevahvistimella), ja joka säteilee ympäristöönsä tarkoituksenmukaisen äänikentän.

Lähes kaikki käytännön kaiutinelementit perustuvat kuvan 2.9a mukaiseen sähködynaamiseen periaatteeseen. Magneettikentässä olevaan sähköjohtimeen vaikuttaa voima, joka on verrannollinen magneettikentän voimakkuuteen, virran suuruuteen (sekä suuntaan) ja johdon magneettikentässä olevan osan pituuteen. Kun tämä periaate kehitetään kypsempään muotoon, saadaan kuvan 2.9b mukainen dynaamisen kaiutinelementin perusrakenne. Siinä johdin on kierretty puhekelaksi kestopagneetin ilmväliin. Jännite puhekelan navoissa saa aikaan virran, joka aiheuttaa puhekelaa poikkeuttavan voiman. Puhekela puolestaan liikuttaa kartiota, joka pystyy poikkeuttamaan liikkeessaan ilmaa ja saa aikaan ääniaallon. Kartio on ripustettu reunoistaan ja puhekelan läheltä siten, että se pääsee helposti liikkumaan.

Pelkkä kuvan 2.9b mukainen elementti ei yleensä kelpaa sellaisenaan kaiutintratkaisuksi, koska pienillä taajuuksilla, missä kartion mitat ovat pieniä aallonpituuteen verrattuna, äänipaine-ero kartion reunojen ympäri pääsee kumoutumaan ja äänen säteily jää heikoksi. Tämän estämiseksi elementti tulee koteloida. Tavanomaisimmat ratkaisut ovat umpikotelo ja bassorefleksikotelo. Ensin mainittu on muuten suljettu kotelo paitsi aukko elementin asennusta varten. Kuvassa 2.9c esitetty tapaus on bassorefleksikotelo, missä on elementtien lisäksi eril-

linen refleksiaukko tai -putki, jonka ansiosta kotelosta tulee Helmholtz-resonaattori. Sopivasti toistotaajuusalueen alapäähän viritettynä resonanssi vahvistaa pienten taajuuksien toistoa.

Yksittäisellä kaiutinelementillä on erittäin vaikea saada toistetuksi laadukkaasti koko kuultava taajuusalue. Tämän vuoksi on tavanomaista tehdä laatukaiuttimet kaksi- tai kolmitiekaiuttimina, joissa sähköisen jakosuotimen avulla eri taajuusalueet ohjataan kukin omaan elementtiinsä tai elementtiryhmäänsä. Tällöin kukin elementti voidaan optimoida oman taajuuskaistansa toistamiseen mahdollisimman hyvin.

Tyypillisen kaiuttimen sähköakustisen muunnoksen hyötysuhde on huono, monesti yhden prosentin luokkaa tai pienempi. Jos kaiuttimeen syötetään sähköistä tehoa esimerkiksi 50 Wattia, saadaan akustista tehoa vain noin puoli Wattia. Tavanomaisessa kuunteluhuoneessa tämä on riittävä määrä saamaan aikaan kuulon kannalta kyllin voimakas ääni esimerkiksi musiikkia kuunneltaessa.

Eräs kaiuttimen merkittävä ominaisuus on äänisäteilyn suuntaavuus. Varsinkin tilassa, missä jälkikaiunta on voimakasta, on edullista tehdä kaiutin suuntaavaksi siten, että säteily sivuille ja taakse on vähäisempää. Tällöin suoraan kuulijalle saapuva ääni vahvistuu suhteessa seinien kautta tuleviin heijastuksiin ja jälkikaiuntaan. Jos halutaan erittäin hyvin hallittu äänikenttä kuulijan pään kohdalle, esimerkiksi kuulon toimintaa koskevissa tutkimuksissa, on kaiuton huone ja hyvälaatuinen kaiutin paras ratkaisu (vaihtoehtona on kuulokkeilla tehtävät kokeet). Kaiuton huone on tila, missä seinät on päällystetty hyvin ääntä absorboivalla materiaalilla, joka usein on asennettu kiilan muotoisina kappaleina seinille.

2.3.2 Kuulokkeet

Kaiutinten ohella toinen tapa muuntaa sähköinen äänisignaali korvin kuultavaksi on *kuulokkeet* (headphones, earphones). Äänentoistossa ne ovat käytössä lähinnä kannettavien laitteiden yhteydessä. Kuulontutkimuksessa kuulokkeilla on tärkeä asema, koska huolellisesti tehtynä niillä voidaan hallita korvaan saapuva äänisignaali erittäin hyvin.

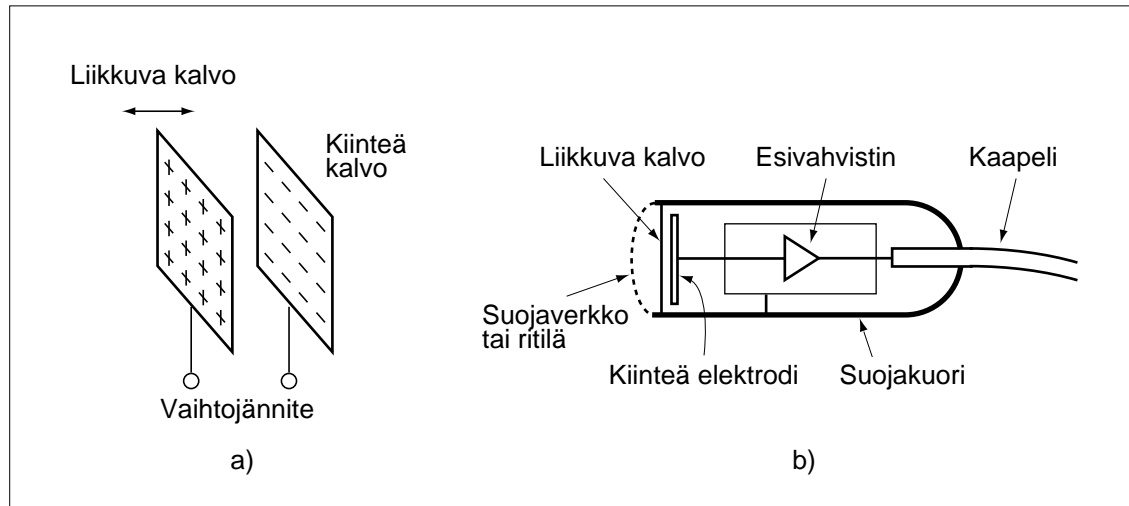
Kuulokkeet perustuvat yleensä joko sähködynaamiseen muuntimeen (pienikokoinen ja pienitehoinen kaiutin) tai sähköstaattiseen periaatteeseen (käänteinen kondensaattorimikrofonin toiminnalle, kts. seuraava kohta).

Korvaan kytkeytymisen kannalta kuulokkeita on monenlaisia. Erilaiset nappikuulokkeet ovat pienikokoisia ja kytkeytyvät suoraan korvakäytävään. Korvanpäälliskuulokkeet nojaavat korvalehtiin. Kuppikuulokkeet ulottuvat koko ulkokorvan yli siten, että ne sulkevat sisäänsä korvalehden ja nojaavat päähän korvalehtien ympärillä.

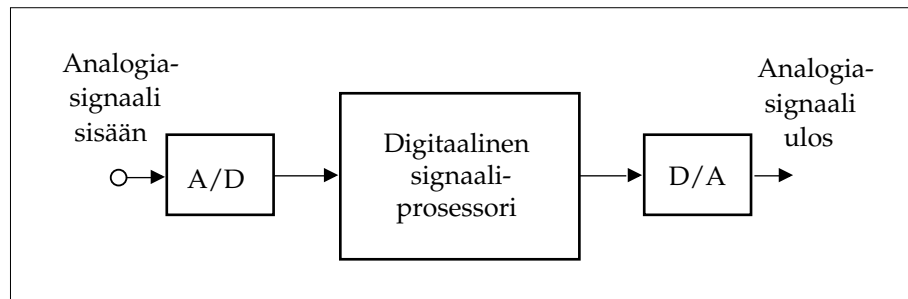
2.3.3 Mikrofonit

Mikrofonin (microphone) tehtävänä on muuntaa ilmassa tapahtuvat äänivärähtelyt vastaaviksi sähköisiksi signaaleiksi, yleensä jännitteeksi. Tavoitteena on, että tämä muunnos tapahtuisi ilman vääristymiä halutulla audiotajuusalueella, esim. 20 Hz - 20 kHz, taajuudesta kyllin riippumattomana ja ilman kuultavia epälineaarisia vääristymiä.

Mikrofonien toteuttamiseen on olemassa monia periaatteita, joista laatumikrofoneissa yleisimmin käytettyjä ovat sähköstaattinen ja sähködynaaminen muunnin. Jälkimmäinen on sama kuin kaiuttimen periaate kuvassa 2.9, mutta käänteisesti käytettynä ja kyllin pienikokoiseksi toteutettuna.



Kuva 2.10: Kondensaattorimikrofonin a) toimintaperiaate ja b) tyypillinen rakenne.



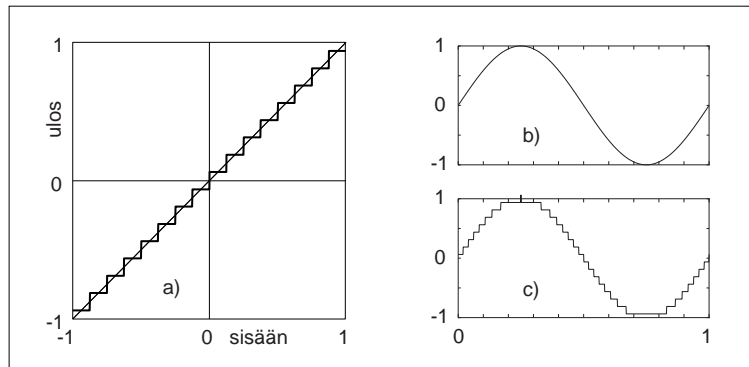
Kuva 2.11: Digitaalisen signaalinkäsittelyn toteuttaminen analogiasignaaleille: A/D-muunnos, signaaliprosessori, D/A-muunnos.

Edellisessä tapauksessa eli *kondensaattorimikrofonissa* (condenser microphone) ilmanpaineen vaihteluiden seurauksena värähtelevä kalvo, joka on staattisella sähkövarauksella varautunut kondensaattorin liikkuvana elektrodina (kuva 2.10a), aiheuttaa elektrodien välille vaihtelevan jännitteen. Kuvassa 2.10b on hyvälaatuisen kondensaattorimikrofonin tyypillinen rakenne. Mikrofonikapselille tarvitaan ulkoa tuotu polarisaatiojännite sähköisen varauksen tuottamiseksi. Toinen vaihtoehto on käyttää pysyvän varauksen aikaansaamiseksi eristeenä kalvojen välissä elektrettimateriaalia. Näin saatavat *elektrettimikrofonit* (electret microphone) ovat nykyisin hyvin laajassa käytössä mm. puhelimissa.

Kondensaattorimikrofonin antama jännite vahvistetaan yleensä mikrofonikapselin yhteydessä olevalla esivahvistimella, koska signaalin siirtäminen häiriöttömästi ei muuten onnistuisi.

2.4 Digitaalinen signaalinkäsittely (DSP)

Digitaalinen signaalinkäsittely (digital signal processing, DSP) [16–18] perustuu diskreettiaikaisuuteen ja numeeriseen laskentaan. Mikäli käsiteltävä signaali on alunperin analoginen (aikajatkua), se tulee muuntaa digitaaliseksi *A/D-muunnoksella* (analogia-



Kuva 2.12: Analogiasignaalin kvantisointi (PCM-koodaus) neljän bitin tarkkuudella eli 16 diskreetillä tasolla: a) kvantisoinnin ominaiskäyrä, b) analoginen sinisignaali, c) kvantisoitu sinisignaali.

digitaalimuunnoksella), ja vastaavasti digitaalinen signaali voidaan palauttaa analogiseksi *D/A-muunnoksella*. Varsinainen DSP-laskenta tehdään signaaliprosessorilla, joka voi olla erityispiiri, ohjelmoitava signaaliprosessori tai yleiskäyttöinen prosessori (kuva 2.11).

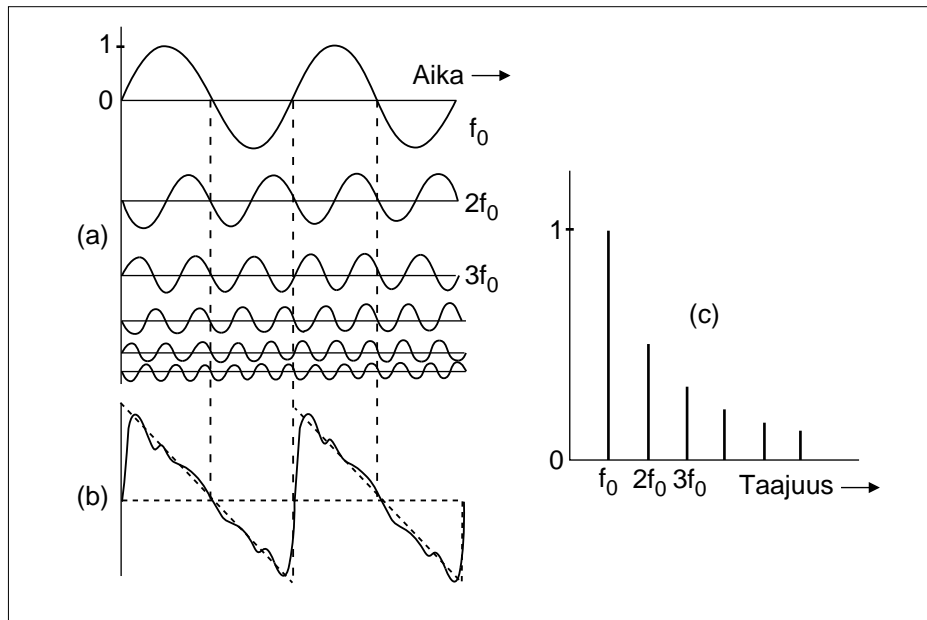
Muunnoksissa täytyy ottaa huomioon Nyquistin näytteenottoteoreema, ts. analoginen signaali kuvautuu diskreetiksi virheettömästi vain jos *näytetaajuus* (sample rate) on vähintään kaksi kertaa suurin signaalissa esiintyvä taajuus. Tämän rajataajuuden yläpuoliset signaalikomponentit *aliasoituvat* (aliasing) eli peilautuvat *Nyquist-taajuuden* (= puolet näytetaajuudesta) alapuolelle vääristyneinä signaalikomponentteina. Tämän estämiseksi A/D-muuntimet varustetaan yleensä aliasoitumisen estosuotimilla ja D/A-muuntimet vastaavasti rekonstruktiosuotimilla, jotka poistavat Nyquist-taajuuden yläpuoliset signaalikomponentit. Digitaalinen signaalinkäsittely on siis kaistarajoitettua.

Käytännössä usein käytettyjä näytetaajuuksia ovat 44.1 kHz (CD-levy, kuluttaja-audio), 48 kHz (ammattiaudio), 32 kHz (vähemmän vaativa audio), 22 kHz (multimedia), sekä 8–16 kHz (puhe). Puhelinkaista 300–3400 Hz edellyttää n. 8 kHz näytetaajuuden.

A/D- ja D/A-muunninten käyttämä numeerinen signaalinäytteiden esitysmuoto on yleensä ns. PCM-koodi. Jokainen aikanäyte *kvantisoidaan* eli muunnetaan binääriluvuksi, jonka tarkkuuden määrää muunnoksen bittimäärä. Kuvassa 2.12 on esitetty muunnoksen periaate, kun se suoritetaan neljän bitin (16 tason) tarkkuudella. Analogiasignaalin arvot kuvautuvat siis diskreeteiksi lukuarvoiksi, jolloin mahdollisia tasoja on 2^n kpl, missä n on bittimäärä. Muunnoksen suorittama *kvantisointi* aiheuttaa kohinanomaista virhettä, ja siksi voidaan puhua kvantisointikohinasta. *Signaali-kohinasuhde* paranee 6 dB jokaista lisäbittiä kohden, joten usein käytetty 16 bitin muunnostarkkuus (esim. CD-levy) antaa maksimissaan noin 96 dB SNR-suhteen. Koska kuulon dynamiikka-alue⁵ on noin 130 dB, vaatisi tämä jopa yli 22 bitin tarkkuuden. Puheen PCM-koodaukseen käytetään yleensä 8 bitin muunnosta logaritmisella amplitudin kvantisoinnilla (log-PCM), mikä vastaa kuulohavainnon kannalta 11–12 bitin lineaarista PCM-koodausta.

Digitaalisen signaalinkäsittelyn etuja analogiseen verrattuina ovat mm. suurempi tarkkuus ja se, että samalla piirillä (signaaliprosessorilla) voidaan tehdä rajaton määrä erilaisia signaa-

⁵*Dynamiikka* = käyttökelpoinen signaalitason vaihtelualue ylioheijautumisen ja taustahäiriöiden asettaman pohjatason välillä.



Kuva 2.13: Kolmioaallon Fourier-hajotelma taajuuskomponentteihinsa. a) Kuusi harmonista äänestä. b) Äänesten summa, joka approksimoi kolmioaaltoa. c) Äänesten amplitudit esitettynä spektrinä taajuusakselilla.

linkäsittelytoimintoja, kunhan se vain ohjelmoidaan tarkoitukseen sopivasti. Esimerkiksi reaaliaikainen spektrianalyysi voidaan toteuttaa nopean Fourier-muunnoksen eli FFT:n avulla. Spektrianalyysissä äänisignaali jaetaan eri taajuuskomponentteihin, eli sinimuotoisiin signaaleihin, joilla on taajuus sekä amplitudi.

Kuvassa 2.13 on esimerkinomaisesti esitetty kolmioaallon syntyminen Fourier-synteesillä siniäänistä (ääneksistä). Kolmioaalto on ns. harmoninen ääni, joka koostuu ääneksistä, joiden taajuudet ovat kokonaislukusuhteissa toistensa kanssa. Useat musiikkiäänet sekä puheen vokaalit ovat myös harmonisia ääniä. Harmonisista komponenteistaan (6 harmonista). Tämä signaalipari voidaan toiseen suuntaan tulkita Fourier-analyysinä. Mikä tahansa tietyt jatkuvuusominaisuudet omaava signaali voidaan mielivaltaisella tarkkuudella esittää osakomponenttien summana.

Luku 3

KUULON RAKENNE JA TOIMINTA

Ihmisen kuulojärjestelmä [19–22] muistuttaa rakenteeltaan ja toiminnaltaan monien eläinlajien kuulojärjestelmää. Herkkyydeltään ja ympäristön seurannan kannalta ihmisen kuuloaisti ei aina pysty kilpailemaan eläinten kanssa, mutta sillä on ainutkertainen erityistehtävä ja kyky: puheäänien analyysi ja tunnistaminen.

Kommunikaatioakustiikan kannalta kiinnostavinta on perehtyä niihin kuulon ominaisuuksiin, jotka ovat inhimillisille kommunikaatiotavoille luonteenomaisimpia. Tässä luvussa tarkastellaan kuulojärjestelmän *anatomista* rakennetta ja *fysiologista* toimintaa sekä kuulon perusominaisuuksia. Anatomian ja fysiologian kohteena on korvan rakenne, akustinen ja mekaaninen äänen välitystapa sekä kyky muuntaa äänivärähtelyt hermoimpulsseiksi [19]. Kommunikaatioakustiikan kannalta vielä keskeisempää on tarkastella niitä laajempia toiminnallisia ominaisuuksia, joita tutkitaan *psykoakustiikassa*. Sen kohteena on selvittää ääniärsyksen ja sen psyykkisten vasteiden välisiä lainalaisuuksia [23, 24].

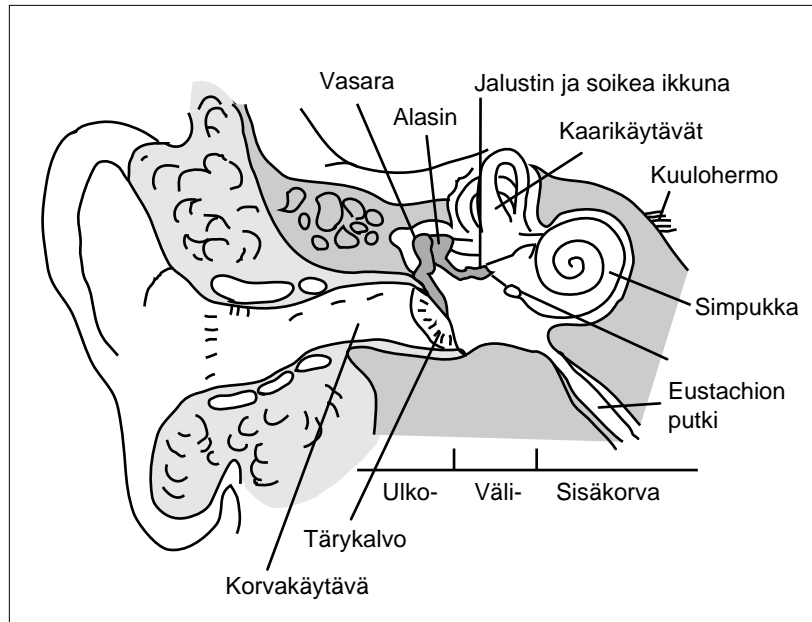
3.1 Korvan rakenne

Ihmisellä kuten useimmilla eläimilläkin on kaksi korvaa. Korvan tehtävänä on vastaanottaa ilmassa etenevä ääniaalto ja välittää se sopivien vaiheiden kautta *kuulohermostoon* analysoitavaksi. Kahden korvan edullisuus yhteen verrattuna perustuu äänen tai äänilähteen suunnan tarkempaan analysoitavuuteen ja toisaalta kuulon parempaan luotettavuuteen, koska yhden korvan vaurioituminen ei tee kuulojärjestelmää toimintakyvyttömäksi.

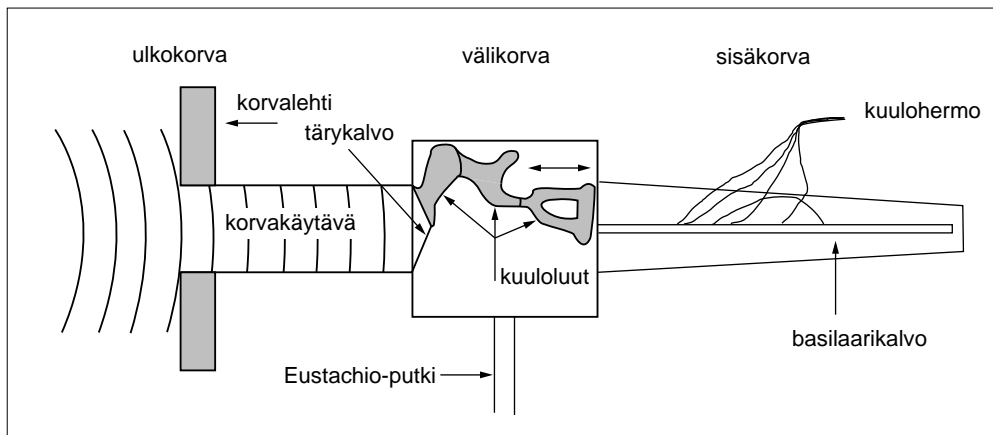
Kuvassa 3.1 on esitetty halkileikkaus ihmisen ääreiskuulosta. Korva voidaan jakaa *ulko-*, *väli-* ja *sisäkorvaan*, joilla kullakin on oma tehtävänsä ja erilainen toimintatapansa. Kuvassa 3.2 on korvan rakenne pelkistetty kaavamaisemmaksi, jotta toiminnallisesti tärkeät kokonaisuudet voitaisiin paremmin havaita.

3.2 Ulkokorva

Ulkokorvan osat ovat *korvalehti* (engl *pinna*) ja *korvakäytävä* (ear canal). Rajapinnan välikorvaan nähden muodostaa *tärykalvo* (eardrum). Ulkokorva on passiivinen ja lineaarinen



Kuva 3.1: Korvan halkileikkaus, josta ilmenevät ulko-, väli- ja sisäkorva.



Kuva 3.2: Pelkistetty kaavio korvan rakenteesta.

järjestelmä, jossa äänen käyttäytyminen noudattaa puhtaasti akustisia lainalaisuuksia. Passiivisuus tarkoittaa sitä, että ulkokorva ei mitenkään 'reagoi' äänelle eikä analysoi sitä vaan ainoastaan välittää ja suodattaa ääntä välikorvaan.

Korvalehden vaikutus on merkittävä suurilla taajuuksilla. Jos korvalehti puuttuisi ja pää olisi säännöllinen pallo, ei olisi mahdollista erottaa etuviistosta (esim. 45°) tai symmetrisesti takaviistosta (135°) saapuvia ääniä toisistaan. Korvalehti aiheuttaa erilaisen vasteen edestä ja takaa saapuville äänille ja parantaa näin suuntakuuloa. Kuulo oppii käyttämään hyväkseen varsin pieniäkin ulkokorvan ja pään aiheuttamia äänen muokkaantumisia. Kokeellisesti on todettu, että jos ulkokorvan vaste muuttuu, vaikeutuu kuulon suunta-analyysi huomattavasti. Esimerkiksi kuulokekuuntelussa ääni paikantuu pään sisään korvien väliselle alueelle, koska kuulo ei saa

akustista informaatiota äänilähteen tarkempaa paikantamista varten.

Korvakäytävää (ear canal) voidaan likimäärin pitää kovaseinäisenä akustisena putkena, jonka keskimääräinen pituus on noin 22,5 mm ja halkaisija noin 7,5 mm. Käytävän tilavuus on noin 1 cm^3 . Näin muodostuva akustinen siirtolinja on päätetty tärykalvon akustisella impedanssilla.

Tärykalvo (tympanic membrane) muuntaa korvakäytävän kautta saapuvan, ilmassa etenevän aaltoliikkeen mekaaniseksi värähtelyksi kuuloluuketjuun. Tärykalvo värähtelee herkästi, vaikkakaan sen akustinen impedanssi ei ole sovitettu korvakäytävän impedanssiin. Taajuusalueella 600 Hz – 8 kHz tärykalvon impedanssin itseisarvo on noin 2–4 kertaa korvakäytävän akustinen impedanssi. Pienille taajuuksille mentäessä impedanssin reaktiivinen osa kasvaa voimakkaasti.

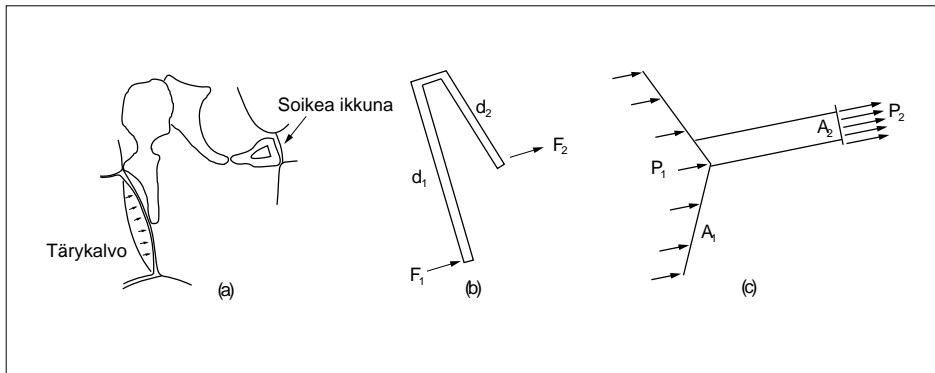
3.3 Välikorva

Välikorva ulottuu tärykalvosta sisäkorvan ns. soikeaan ikkunaan ja äänen välittymisen kannalta tärkeimmät osat siinä ovat ns. *kuuloluut*: *vasara* (malleus), *alasin* (incus) ja *jalustin* (stapes), kts. kuvat 3.1 ja 3.2. Välikorvan tehtävänä on impedanssisovitus ulkokorvan ilman ja sisäkorvan nesteen välillä; nesteen karakteristinen impedanssi on noin 4000-kertainen ilman karakteristiseen impedanssiin nähden. Kuuloluuketju toimii mekaanisena impedanssimuuntajana, joka muuntaa pienen paineen ja suuren hiukkasnopeuden (ilmassa) suureksi paineeksi ja pieneksi hiukkasnopeudeksi (nesteessä), kuva 3.3. Vasara ja alasin eivät liiku toisiinsa nähden, paitsi hyvin voimakkailla matalilla äänillä.

Välikorvan toiminta muuntajana perustuu pääasiassa siihen, että jalustimen ala (noin 3 mm^2) on huomattavasti tärykalvon alaa (noin 65 mm^2) pienempi. Tärykalvo ei kuitenkaan värähtele mäntämäisesti, joten sen ekvivalenttinen ala on fysikaalista pienempi. Em. muuntosuhteen lisäksi kuuloluut toimivat vipuna, jonka ‘vipusuhde’ on noin 1,3. Välikorvan kokonaismuuntosuhte, so. soikean ikkunan ja tärykalvon äänipaineiden suhde on noin 18. Ilman välikorvan aiheuttamaa soikean ikkunan paineen kasvua sisäkorvan soikealla ja pyöreällä ikkunalla olisi sama paine, joten sisäkorvaan välittyvän äänienergian määrä olisi hyvin pieni. Hyötysuhde on tärkeä riittävän kuuloherkyyden syntymiseksi. Kuulon äärimmäisen herkkyyden havainnollistamiseksi voidaan todeta, että keskitaajuuksilla (1–4 kHz) tärykalvon liike kuulokynnyksellä eli heikoimmalla havaittavalla äänellä on vain 10^{-10} – 10^{-9} cm eli murto-osa vetyatomin halkaisijasta!

Välikorvan ja nielun välisen *Eustachion putken* (Eustachian tube, kuvassa 3.1) tehtävänä on tasata ulko- ja välikorvan välille esimerkiksi välikorvan tulehduksessa, nieltäessä, tai korkealla lennettäessä syntyvä staattinen paine-ero. Paine-ero poikkeuttaa tärykalvoa tasapainoasemastaan, jolloin kiristyvän tärykalvon impedanssi kasvaa ja impedanssiepäsovituksesta johtuen kuulon herkkyys alenee varsinkin pienillä taajuuksilla.

Stapediusrefleksillä tarkoitetaan jalustimeen kiinnittyvän stapedius-lihaksen supistumista, joka tapahtuu noin 80 dB äänepainetasolla joidenkin kymmenien tai satojen millisekuntien viiveellä äänen alkamisesta. Refleksi jäykistää kuuloluuketjun, jolloin kuulon herkkyys alenee pääasiassa matalilla äänillä:



Kuva 3.3: Välikorvan kuuloluut: a) todellinen rakenne, b) yksinkertaistettu vipumalli ja c) pinta-alasuhteiden aiheuttama impedanssisovitus (painesovitus).

500 Hz: 12–15 dB

1,5 kHz: 0–6 dB

≥ 2 kHz: 0 dB

Stapediusrefleksin tarkoituksena lienee korvan suojamekanismina toimiminen. Sen suojaava vaikutus on kuitenkin vähäinen, koska korkeat äänet eivät vaimene ja koska impulssimaisilla äänillä refleksi vaikuttaa vasta impulssin edettyä jo sisäkorvaan. Eräillä ihmisillä on kyky vaitonvaraisesti supistaa stapedius-lihasta.

Stapediusrefleksi on helpohkosti todennettavissa tärykalvon akustisen impedanssin kasvuna, joten sitä voidaan käyttää luotettavana todistuksena äänen etenemisestä kuulohermotasolle. Refleksi syntyy, vaikka sen aiheuttava ääni tulisi vain toiseen korvaan. Tällöin äänelle altistetuissa korvassa refleksi syntyy äänipainetasoa nostettaessa aikaisemmin kuin toisessa korvassa; ero on muutamia desibelejä.

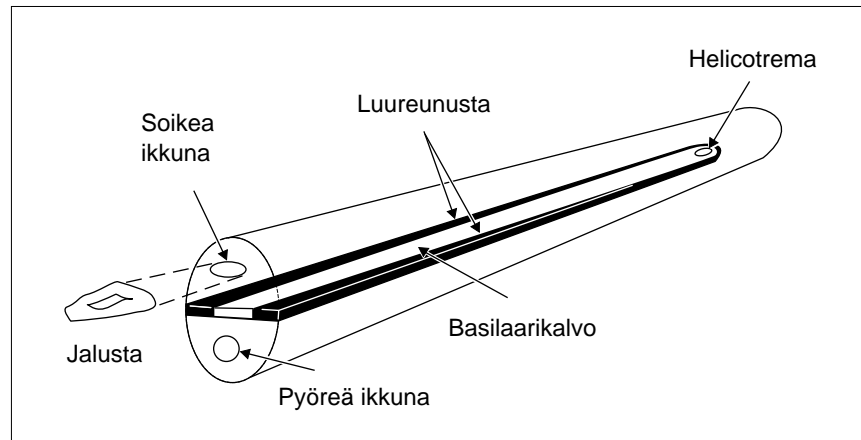
3.4 Sisäkorva

Sisäkorvan [19] kuuloa palveleva osa on nesteen täyttämä *simpukka* (*cochlea*)¹. Simpukka on yhteydessä välikorvaan soikean ja pyöreän ikkunan kautta. Soikeaa ikkunaa peittää jalustin ja pyöreää ikkunaa kimmoisa kalvo. Simpukka on kierteellä oleva elin, jossa on noin 2,7 kierrosta, ja jonka pituus on noin 35 mm. Kun kuvitellaan simpukka oikaistuksi, saadaan kuvan 3.4 kaaviomainen esitys. Simpukan poikkileikkaus puolestaan on kuvassa 3.5.

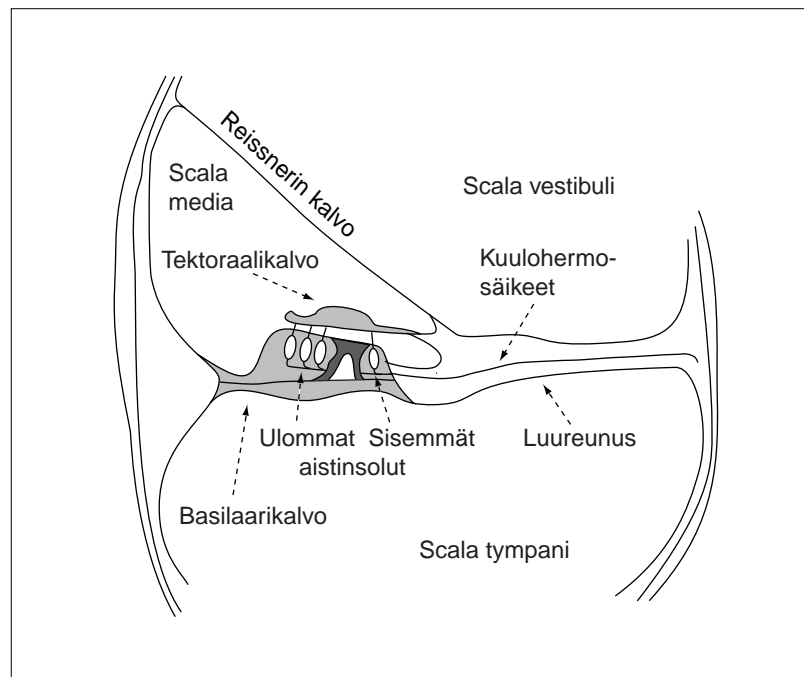
Jalustimen liike saa simpukan nesteen värähtelemään, jolloin myös siinä sijaitseva *basilaarikalvo* (*basilar membrane*) alkaa värähdellä. Basilaarikalvon laidassa oleva *Cortin elin* (*organ of Corti*) sisältää useita rivejä *aistinsoluja* (*hair cell*), jotka toimivat värähtelylle herkkinä reseptoreina eli ne muuntavat liikeinformaation hermoimpulsseiksi kuulohermoon. Aistinsoluja ovat *sisemmät aistinsolut* (*inner hair cells*) yhdessä rivissä (n. 3500 solua) ja *ulommat aistinsolut* (*outer hair cells*), joita on useammassa rivissä. Yhteensä aistinsoluja on noin 20 000–30 000 kappaletta ja ne sijaitsevat likimain vakioitiheydellä yli basilaarikalvon.

Simpukka on erittäin monimutkainen ja herkkä elin. Basilaarikalvon lisäksi sen sisällä on ns. *Reissnerin kalvo* ja *tektoraalikalvo*. Kalvojen rajaamissa lokeroissa olevilla nesteillä

¹Sisäkorvassa sijaitsevat myös tasapainoelimet, mutta näillä ei kuulon kannalta ole juurikaan merkitystä.

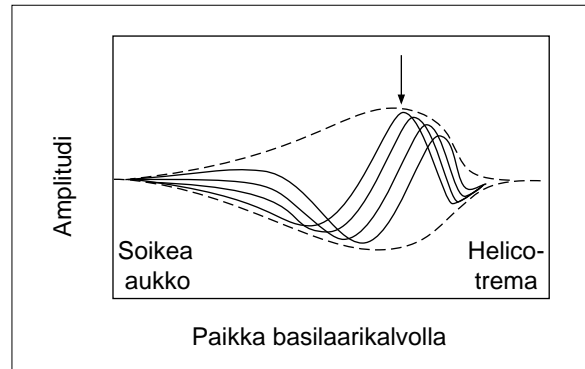


Kuva 3.4: Oikaistuksi kuvitellun simpukan periaatteellinen rakenne.



Kuva 3.5: Simpukan poikkileikkaus.

on erilaiset kemialliset koostumukset, jolloin niiden välille muodostuu potentiaalieroja. Aistinsolujen yläpäässä on tietyn taivutusjäykkyyden omaavien hiusmaisten säikeiden muodostamat 'tupsut', jotka ovat kontaktissa tektoraalikalvoon. Kun basilaarikalvo liikkuu simpukkaan saapuneen värähtelyn vaikutuksesta (pystysuunnassa kuvassa 3.5), syntyy basilaari- ja tektoraalikalvojen välille sivuttainen liike-ero, joka puolestaan taivuttaa aistinsolujen hiussäikeitä. Tämä aiheuttaa aistinsoluissa aktiviteettia, jonka seurauksena ne lähettävät impulsseja *kuulohermon* (auditory nerve) säikeisiin ja näin viestittävät ylemmille tasoille tietoa basilaarikalvon värähtelyn paikasta, tavasta ja amplitudista.



Kuva 3.6: Kulkuaallon ajallinen eteneminen basilaarikalvolla ja värähtelymaksimin muodostuminen.

3.4.1 Basilaarikalvon toiminta

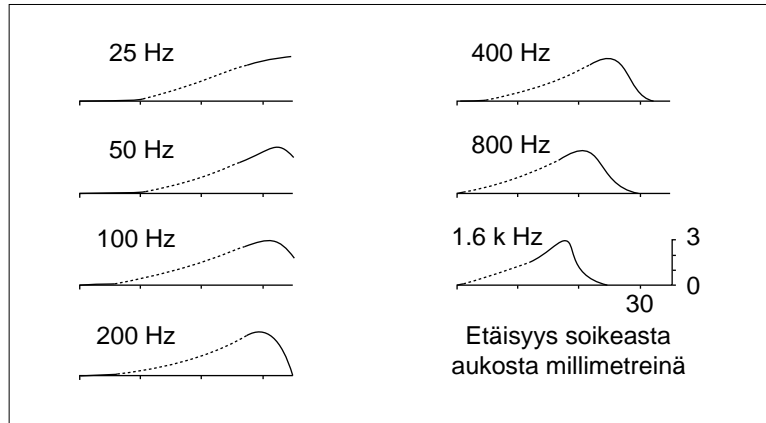
Basilaarikalvo on pitkä ja kapea kalvo, jonka massa- ja joustavuusominaisuudet muuttuvat tarkastelukohdan mukaan. Alkupäässä (lähellä ikkunoita) se on kapea ja kevyt kun taas loppupäässä (helicotrema) se on leveämpi ja samalla joustavampi ja massiivisempi. Se toimii mekaanisena siirtolinjana, jonka ominaisuudet muuttuvat paikan funktiona. Tämän lisäksi, ulommat aistinsolut osallistuvat aktiivisesti värähtelyyn. Ne voimistavat kalvon liikettä omalla resonanssitaajuudellaan.

Kun välikorvasta saapuva ääni liikuttaa jalustinta ja tämän seurauksena aiheuttaa paineaallon simpukan nesteeseen, syntyy basilaarikalvoon *kulkuaalto* (traveling wave). Syntyvä kulkuaalto etenee soikean ikkunan päästä kohti *helicotremaa*. Koska basilaarikalvon ominaisuudet muuttuvat paikan funktiona, kalvon kukin kohta reagoi eri tavalla eritaajuisiin ääniin. Korkeilla taajuuksilla kulkuaalto vahvistuu (resonoi) kalvon alkupäässä, jonka jälkeen aalto vaimenee nopeasti. Keskitäajuuksilla aalto etenee kalvon keskipaikkeille, jossa maksimivärähtely syntyy, ja jälleen aalto vaimenee pian. Matalimmilla taajuuksilla aalto kulkee yli kalvon ja vahvistuu vasta sen loppupäässä. Kuva 3.6 esittää tietyn taajuisen aallon etenemistä ja värähtelyvaihetta eri ajan hetkinä.

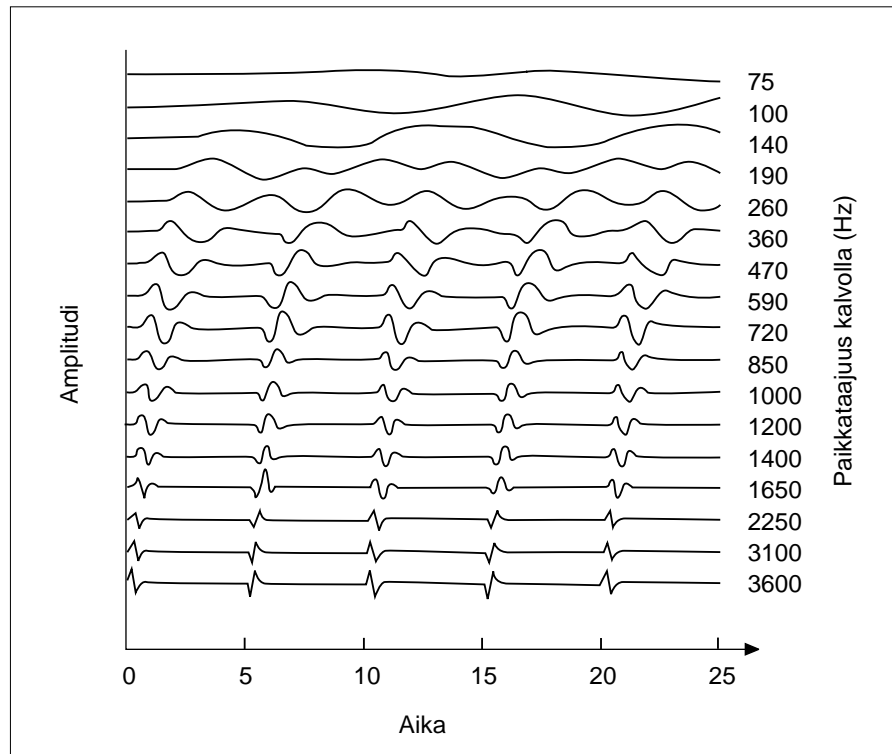
Värähtelymaksimin paikka on osoitettu nuolella. Kuvassa 3.7 nähdään värähtelyamplitudin jakautuminen basilaarikalvolle muutamalla eri taajuudella. Kuva 3.8 esittää impulssijonon aiheuttamaa värähtelyvastetta (tietokonesimulaatio) ajan funktiona basilaarikalvon eri kohdissa. Tästä näkyy selvästi kunkin kohdan taajuusselektiivisyys ja erilainen viive eri kohtiin.

3.5 Kuulon perusominaisuudet

Tässä kappaleessa tarkastellaan kuulon tärkeimpiä yleisominaisuuksia: mm. mikä on *kuuloalue* eli millä taajuuksilla ja voimakkuustasoilla kuulo pystyy toimimaan, sekä eräitä muita peruskäsitteitä.



Kuva 3.7: Basilaarikalvon värähtelyamplitudijakaumia eritaajuisilla äänillä (Békésyn mukaan).

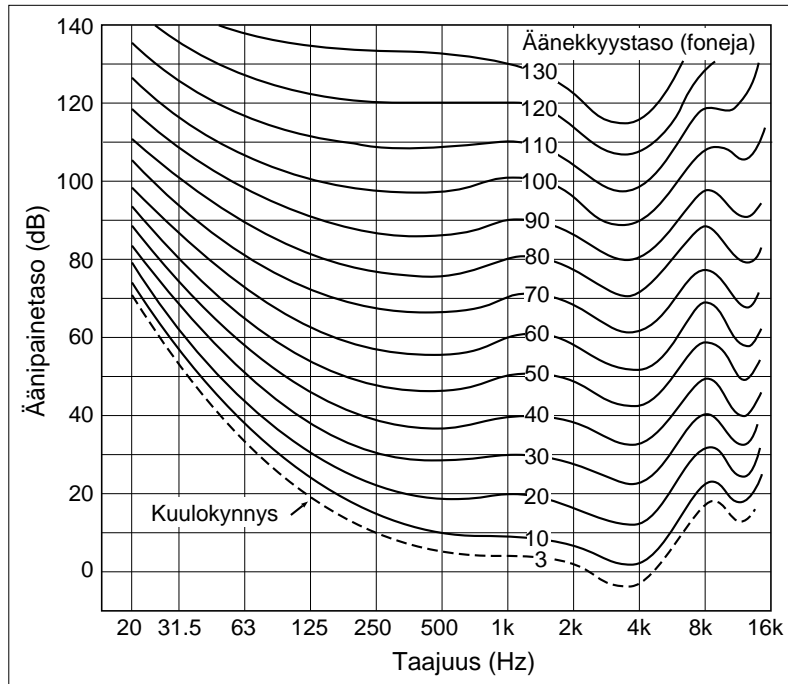


Kuva 3.8: Impulssijonoherätteen periaatteellinen eteneminen ja aikavaste basilaarikalvon eri kohdissa.

3.5.1 Kuuloalue ja vakioäänekkyyskäyrästä

Ihmisen kuulo on kehittynyt vastaanottamaan ilmassa eteneviä ääniaaltoja, jotka taajuutensa ja äänipaineen osalta rajoittuvat kuvan 3.9 kuuloalueen puitteisiin, ts. niiden voimakkuus äänipaineena rajautuu kuulokynnyksen ja kipurajan välille vertikaalisuunnassa sekä ala- ja ylärajataajuuksien välille horisontaalistasoilla.

Kuulokynnys eli heikoimman kuultavissa olevan äänen *äänipaine* p_0 1 kHz:n taajuudella on $20 \mu\text{Pa}$, mikä arvo on valittu desibeliasteikon nollakohtaksi *äänipainetasoa* L_p (sound



Kuva 3.9: Vakioäänekkyysskäyrästä, jonka ääriajat rajoittavat kuuloalueen. Käyrästä määritetty vapaakenttäolosuhteissa.

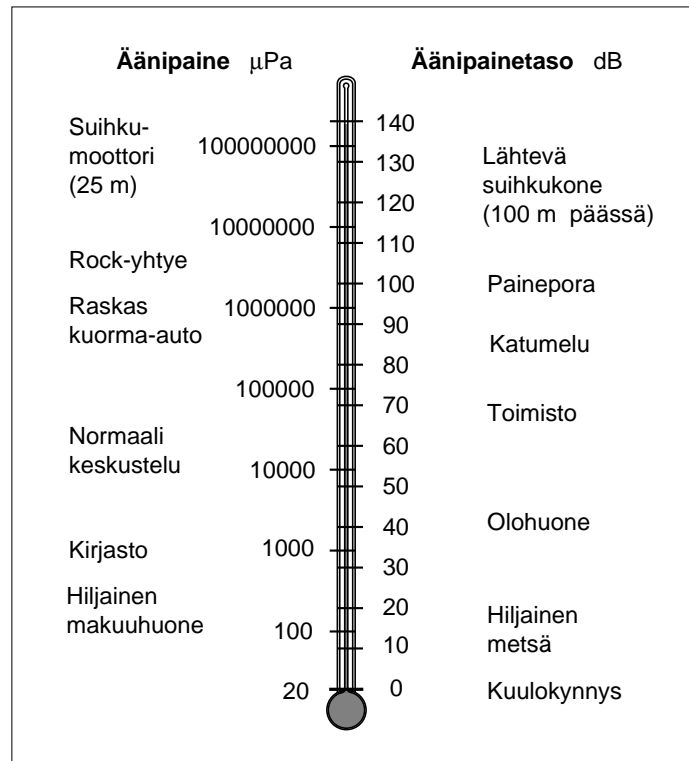
pressure level, SPL) mitattaessa:

$$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0) \quad (3.1)$$

Voimakkain ääni, mitä kuulo pystyy mielekkäästi käsittelemään, vastaa *kipurajaa* (n. 130 dB, n. 63 Pa, taajuudella 1 kHz). Tätä voimakkaammat äänet koetaan lähinnä vain kipuaistimuksena ja tällöin kuulon välittömän vaurioitumisen riski on suuri. Kuulokynnyksen ja kipurajan välinen alue määrittelee kuulon *dynamiikan* eli voimakkuusvaihtelualueen, joka ilmaistaan desibeleinä. Kuvassa 4.18 on esitetty vertauskuvallisesti 'äänenvoimakkuuslämpömittari', joka suhteuttaa tyypillisiä ääniä desibeliasteikolle.

Kuultavien äänten taajuusalue ulottuu välille n. 20 Hz – 20 kHz. Alaraja vaihtelee määritelmästä riippuen välillä 16–20 Hz ja yläraja 16–22 kHz. Alarajataajuuden alittavia ääniä kutsutaan *infraääniksi* ja ylärajan ylittäviä *ultraääniksi*. Kyllin voimakkaat infra- ja ultraäänit havaitaan, mutta ne eivät välttämättä muodosta selvää kuulohavaintoa. Esimerkiksi pienillä taajuuksilla kuvan 3.9 käyrästä voidaan ekstrapoloida infraäänille melko lineaarisesti ja todeta, että aina 4–5 Hz:n taajuuteen saakka kyllin voimakas ääni voidaan aistia ilman että se ylittää kipurajan. Samoin taajuusalueen yläpäässä nuorilla kuuloalue saattaa ulottua voimakkailla äänillä yli 20 kHz:n taajuuksiin, kun taas vanhoilla ihmisillä voivat jo 10–15 kHz:n äänet jäädä kuulematta.

Kuvassa 3.9 vaaka-akselina on logaritminen taajuusasteikko (taajuuden mittayksikkönä hertsi, Hz). Logaritmisesta asteikosta käytölle on perusteensa, koska se kuvaa kuulon taajuuserottelukykyä paremmin kuin lineaarinen asteikko. Akustisissa mittauksissa noudatetaan usein myös logaritmista asteikkoa.

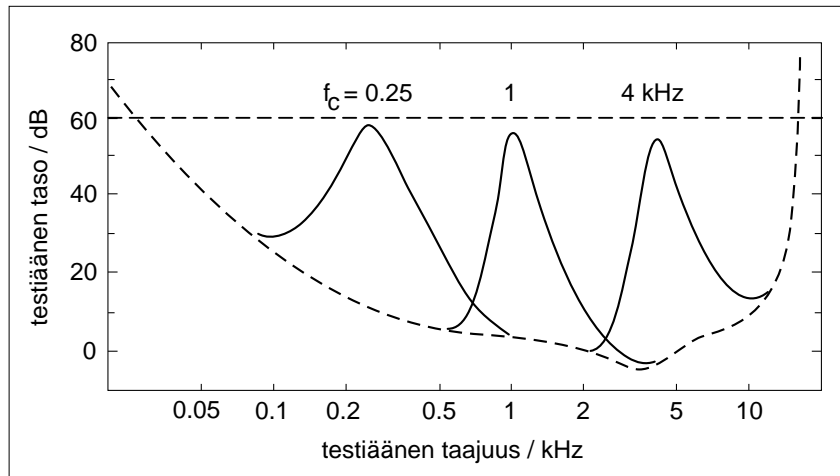


Kuva 3.10: ‘Äänenvoimakkuuslämpömittari’ eli tyypillisiä äänipainetasoja desibeliasteikolla.

Kuvaa 3.9 kutsutaan *vakioäänekkyyskäyrästöksi*, koska sen jokainen käyrä ilmaisee kullakin taajuudella sen äänipainetason siniääneksellä, joka aiheuttaa yhtä voimakkaan kuuloaistimuksen kuin vertailuääni taajuudella 1 kHz. Käyrästö määrittelee *äänekkyystason* (loudness level) käsitteen. Kullakin käyrällä vallitsee tietty äänekkyystaso. Äänekkyystason yksikkö on *foni* (phon), ja se on lukuarvona sama kuin yhtä äänekkään 1 kHz:n äänoksen äänipainetaso desibeleinä. Niinpä esimerkiksi 60 fonin äänekkyystaso taajuudella 20 Hz edellyttää lähes 100 dB:n äänipainetason, kun 1 kHz:n taajuudella riittää 60 dB. Äänekkyystaso on tyypillinen psykoakustinen suure, sillä se kuvaa subjektiivisesti koettavaa aistimuksen voimakkuutta. Äänekkyystasolle on olemassa vastaava absoluuttinen suure, jota kutsutaan *äänekkyysdeksi* (loudness), ja jonka mittayksikkö on *soni* (sone). Yksi soni vastaa 40 fonia ja 10 fonin lisäksi kaksinkertaistaa sonimäärän.

3.6 Peittoilmiö ja kuulon selektiivisyys

Psykoakustiikan keskeisimpiä käsitteitä ovat *äänekkyys*, *äänenkorkeus*, *äänenväri* ja äänen *subjektiivinen kesto*. Näiden ymmärtäminen helpottuu, jos ensin tarkastellaan kokeelliselta pohjalta kahta kuulolle ominaista ilmiötä, peittoilmiötä ja kuulon taajuusselektiivisyyttä.



Kuva 3.11: Kapeakaistaisen kohinan (peittoääni) aiheuttamia peittokuulokynnyskäyriä kun peittoäänen keskitaajuus on 250 Hz, 1 kHz tai 4 kHz ja taso 60 dB.

3.6.1 Peittoilmiö taajuusalueessa

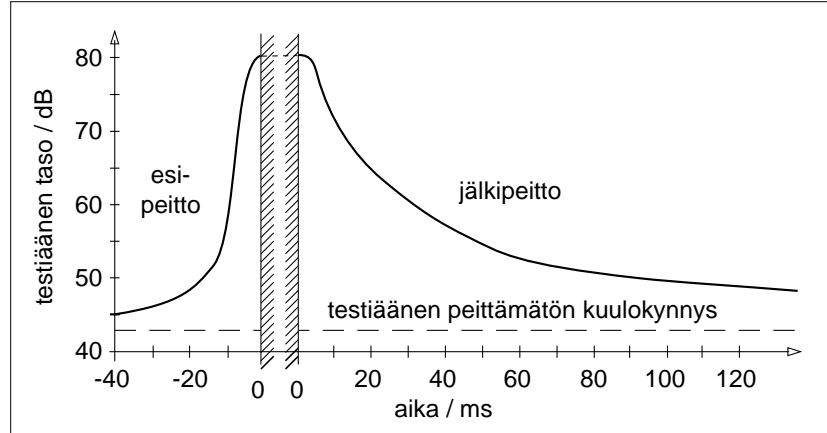
Heikomman äänen peittyminen kokonaan tai osittain kyllin voimakkaan peittävän äänen läsnäollessa on arkikokemuksesta tuttu havainto. Ilmiö sinänsä on ominainen kaikille teknisillekin järjestelmille, joiden tehtävänä on ilmaista heikko signaali voimakkaamman häiriösignaalin alta. Kuulojärjestelmässä peittoilmiö on merkittävä tekijä, jonka tunteminen auttaa ymmärtämään monia kuulon ominaisuuksia ja toisaalta sitä voidaan käyttää hyväksi mm. audiosignaalien ja puheen koodauksessa. Peittoilmiötä voidaan parhaiten kuvata peittokuulokynnyskäyrän avulla, ts. kuinka *peittoääni* vaikuttaa *testiäänen* havaittavuuskynnykseen.

Kohinan aiheuttama peittovaikutus

Selkeä kuva peittoilmiön luonteesta saadaan, kun peittoäänenä käytetään kapeakaistaista kohinaa. Tällöin peittokuulokynnyskäyrät muodostuvat kuvan 3.11 mukaisiksi. Esimerkiksi kohina, jonka keskitaajuus on 1 kHz, kaistaleveys noin 160 Hz ja äänipainetaso 60 dB, aiheuttaa hieman epäsymmetrisen käyrän, jonka huippu on taajuudella 1 kHz ja muutaman desibelin peittoäänen tason alapuolella. Vastaavasti 250 Hz keskitaajuudella ja 100 Hz kaistaleveydellä sekä 4 kHz keskitaajuudella ja 700 Hz kaistaleveydellä saadaan samantapaiset peittokuulokynnyskäyrät.

3.6.2 Aikapeitto

Peittoilmiötä on edellä tarkasteltu vain jatkuvilla äänillä. Peittovaikutus leviää paitsi taajuusalueessa (taajuuspeitto), myös aika-alueessa (aikapeitto). Samoin peittoäänen ja testiäänen kestot vaikuttavat ilmiön käyttäytymiseen. Kuvassa 3.12 nähdään yleiskuva aikapeitosta sekä ennen peittoääntä eli *esipeitto* (premasking) ja sen päätyttyä eli *jälkipeitto* (postmasking). Kokeessa koehenkilö kuuntelee kyllin pitkää (> 200 ms) peittoääntä, esimerkiksi valkoista kohinaa, jota ennen tai sen jälkeen sijoitetaan testiäänenä lyhyt sinipurske. Tehtävänä on hakea testiäänen havaittavuuden kynnystaso kullakin testiäänen sijoittelulla. Jälkipeitto on ilmiönä merkittävämpi ja johdonmukaisemmin käyttäytyvä kuin lyhytvaikutteinen esipeitto.



Kuva 3.12: Kuulon aikapeitto-ominaisuudet (esipeitto ja jälkipeitto). Varjostetut viivat edustavat peittoäänen alku- ja loppuhetkiä. Peittoääni kestää vähintään 200 ms.

3.6.3 Kuulon taajuusselektiivisyys

Kuvan 3.11 peittokuulokäyrästä antaa viitteitä siitä, että kapeakaistainen ääni aiheuttaa taajuusympäristöönsä peittovaikutusta ja saattaisi myös rajoittaa kuulon taajuusselektiivisyyttä eli kykyä eritellä lähekkäin sijaitsevia osäänneksiä.

Kuulon taajuusselektiivisyys ja resoluutio (erottelukyky) liittyy läheisesti myös äänenkorkeusasteikkoihin. Kuulon taajuusresoluution mallintamisessa käsitteet *Bark-kaista* ja *ERB-kaista* kilpailevat oikeaoppisemman käsitteen paikasta. Tässä lyhennelmässä esitellään ERB-kaista ja vastaava ERB-asteikko, jotka on ilmeisesti paremmin perusteltuja kuulontutkimuksen näkökulmasta [25], mutta varsinkin teknisten sovellusten osalta kriittinen kaista ja Bark-asteikko ovat toistaiseksi vallitsevia.

Viimeisimmän käsityksen mukaan basilaarikalvon resonointipaikka x [mm] ja taajuus f [Hz] ovat nisäkkäillä Greenwoodin [26] kaavan mukaisissa suhteissa

$$f/\text{Hz} = A(10^{ax} - k) \quad (3.2)$$

ja käänteiskaava

$$x = (1/a) \log_{10} \frac{(f + kA)}{A} \quad (3.3)$$

missä ihmiselle $A = 165,4$, $a = 0,06$ ja $k = 1$. Tämä on sopusoinnussa ERB-resoluution mukaan saatavan *ERB-asteikon* (ERB-rate scale, R_{ERB}) kanssa. Tämän mukaan $1 \text{ ERB} \leftrightarrow 0,9 \text{ mm}$ basilaarikalvolla. ERB-kaista keskitajuuden f_c funktiona saadaan

$$ERB = 24,7 + 0,108 f_c \quad (3.4)$$

josta johtamalla ERB-asteikkoa approksimoi kaava

$$R_{ERB} = 21,3 \log_{10}(1 + f/228,7 \text{ Hz}) \quad (3.5)$$

ja tämän käänteisfunktiona

$$f/\text{Hz} = 228,7 (10^{R_{ERB}/21,3} - 1) \quad (3.6)$$

3.7 Kuulon ominaisuuksien merkitys äänen pakkauksessa

Kuulon ominaisuuksien tunteminen mahdollistaa äänen pakkaamisen hyvin pienellä bittimäärällä. Ääni jaetaan taajuuskaistoihin, ja peittoilmiötä käyttäen estimoidaan mitä informaatiota tarvitsee välittää mahdollisimman hyvän laadun tuottamiseksi. Tunnetuimpia koodekkeja ovat esimerkiksi MPEG1-Layer 3 (mp3) ja Advanced audio coding (AAC). Häviölliset koodekit tuottavat usein riittävää äänenlaatua, tosin kriittisessä vertailussa alkuperäisen version kanssa voidaan usein kuulla eroja.

Häviöllisten koodekkien esittely mahdollisti musiikin ja audion ylipäänsä siirron Internetin yli, mikä johti mullistukseen musiikkiteollisuudessa. Vielä 90-luvulla CD-levy oli tärkein tuotteiden myyntikanava, josta melko nopeaan tahtiin siirryttiin musiikin jakeluun Internetin kautta.

Kirjallisuutta

- [1] D. J. Levitin, *This is Your Brain on Music — The Science of a Human Obsession*. PLUME, 2006.
- [2] S. Mithen, *The Singing Neanderthals — The Origins of Music, Language, Mind, and Body*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2006.
- [3] J. Blauert, ed., *Communication Acoustics*. Springer, 2005.
- [4] P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*. Princeton, New Jersey: McGraw-Hill, 1968.
- [5] W. C. Elmore and M. A. Heald, *Physics of Waves*. New York: Dover Publications, Inc., 1969.
- [6] T. D. Rossing, R. F. Moore, and P. A. Wheeler, *The Science of Sound*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 2001, 3rd edition.
- [7] M. J. Crocker, ed., *Encyclopedia of Acoustics, vol. 1-4*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [8] A. D. Pierce, *Acoustics, An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Woodbury, New York: Acoustical Society of America, 1989.
- [9] L. L. Beranek, *Acoustics*. Cambridge, Massachusetts: Acoustical Society of America, 1986.
- [10] L. L. Beranek, *Acoustical Measurements*. Cambridge, Massachusetts: Acoustical Society of America, 1988.
- [11] M. Tohyama, H. Suzuki, and Y. Ando, *The Nature and Technology of Acoustic Space*. London: Academic Press, 1995.
- [12] Z. Maekawa and P. Lord, *Environmental and Architectural Acoustics*. London: E & FN Spon, 1994.
- [13] L. Cremer and H. Muller, *Principles of Applications of Room Acoustics, vol. 1-2*. London: Applied Science Publishers, 1982.
- [14] J. Toivanen, *Teknillinen akustiikka*. Espoo: Otakustantamo, 1976.

-
- [15] A. Halme, *Rakennus- ja huoneakustiikka*. Espoo: Otakustantamo, 1976.
- [16] A. V. Oppenheim, A. Willsky, and I. Young, *Signals and Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1983.
- [17] S. Mitra and J. Kaiser, eds., *Handbook of Digital Signal Processing*. Wiley-Interscience, 1993.
- [18] J. Strawn, ed., *Digital Audio Signal Processing, An Anthology*. Willian Kaufmann Inc., 1985.
- [19] J. O. Pickles, *An Introduction to the Physiology of Hearing*. London: Academic Press, 2008, 3rd edition.
- [20] A. N. Popper and R. R. Fay, eds., *The Mammalian Auditory Pathway: Neurophysiology*. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [21] W. L. Gulick, G. A. Gescheider, and R. D. Frisina, eds., *Hearing — Physiological Acoustics, Neural Coding, and Psychoacoustics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- [22] T. Jauhiainen, *Kuulo ja viestintä*. Helsinki: Yliopistopaino, 1995.
- [23] B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing*. London: Academic Press, 2003, 5th edition.
- [24] H. Fastl and E. Zwicker, *Psychoacoustics — Facts and Models*. Berlin: Springer-Verlag, 2007, 3rd edition.
- [25] B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, “A Revision of Zwicker’s Loudness Model,” *Acta Acustica – Acustica*, vol. 82, pp. 335–345, 1996.
- [26] D. D. Greenwood, “A Cochlear Frequency-Position Function for Several Species – 29 years later,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, no. 6, pp. 2592–2605, 1990.