

HIEMAN AKUSTIIKKA

Matti Karjalainen

Teknillinen korkeakoulu

16. lokakuuta 2000

Sisältö

1	ÄÄNI JA VÄRÄHTELY	4
1.1	Värähtely \rightarrow ääni \rightarrow kuulo	4
1.2	Värähtely ja ääni fysikaalisina ilmiöinä	5
1.2.1	Yksinkertainen värähtelyliike	5
1.2.2	Resonanssi	7
1.2.3	Massa-jousi-järjestelmät	8
1.2.4	Ominaisvärähtely ja moodi	9
1.2.5	Aaltoliike	10
1.2.6	Aallon heijastuminen ja seisova aalto	11
1.3	Akustiikassa käytettävät suureet	11
1.3.1	Ääni ja värähtely signaalina	11
1.3.2	Äänipaine	12
1.3.3	Äänipainetaso	12
1.3.4	Äänitaso	13
1.3.5	Hiukkasnopeus	13
1.3.6	Äänilähteen teho ja hyötysuhde	13
1.3.7	Tehotaso	14
1.3.8	Äänen intensiteetti	14
1.3.9	Intensiteettitaso	14
1.3.10	Tasosuureilla laskeminen	14
1.4	Ääniaaltoihin liittyviä ilmiöitä	15
1.4.1	Aaltoliike fluidissa	15
1.4.2	Palloaalto	15
1.4.3	Tasoaalto ja aaltoliike putkessa	16
1.4.4	Aaltoliike kiinteissä aineissa	18
1.4.5	Heijastuminen, absorptio ja läpäisy	18
1.4.6	Taivuttuminen ja taipuminen	20
1.4.7	Sironta ja diffraktio	21
1.5	Äänen käyttäytyminen suljetussa tilassa	21
1.5.1	Äänikentän syntyminen	22
1.5.2	Jälkikaiunta	23
1.5.3	Äänikentän voimakkuus suljetussa tilassa	23
1.5.4	Suljetun tilan moodit	24
1.6	Sähköakustiikka	24
1.6.1	Kaiuttimet	25
1.6.2	Kuulokkeet	26
1.6.3	Mikrofonit	26
1.7	Fysikaalisen ja teknillisen akustiikan osa-alueita	27
2	KUULON RAKENNE JA TOIMINTA	28
2.1	Korvan rakenne	28
2.2	Kuulon perusominaisuudet	31
2.2.1	Kuuloalue ja vakioäänekkyyskäyrästä	31
2.3	Psykoakustiikkaa	34
2.3.1	Peittoilmiö	35

2.3.2	Äänenkorkeus	35
2.3.3	Äänekkyys ja äänekkyystaso	36
2.3.4	Äänenväri	37
2.3.5	Äänen subjektiivinen kesto	37
2.3.6	Terävyys	37
2.3.7	Vaihteluvoimakkuus	37
2.3.8	Karheus	37
2.3.9	Tonaalisuus	37
2.3.10	Häiritsevyys	38
2.4	Melu	38
2.4.1	Melun ja äänen vaikutus kuuloon	38
2.4.2	Kuulon suojaaminen	39
2.5	Äänenlaatu	40
3	ÄÄNI SIGNAALEINA JA SIGNAALINKÄSITTELY	41
3.1	Ääni signaalina	41
3.2	Signaalinkäsittelyn peruskäsitteitä	42
3.2.1	Lineaarisuus ja aikainvarianttisuus	42
3.2.2	Fourier-analyysi ja -synteesi	43
3.2.3	Spektrianalyysi	45
3.2.4	Z-muunnos	46
3.2.5	Aika-taajuusesitykset	47
3.2.6	Auto- ja ristikorrelaatio	48
3.3	Digitaalinen signaalinkäsittely (DSP)	49
3.3.1	Digitaalisuodatus	51
3.3.2	Signaali-kohinasuhde	52

1 ÄÄNI JA VÄRÄHTELY

1.1 Värähtely \rightarrow ääni \rightarrow kuulo

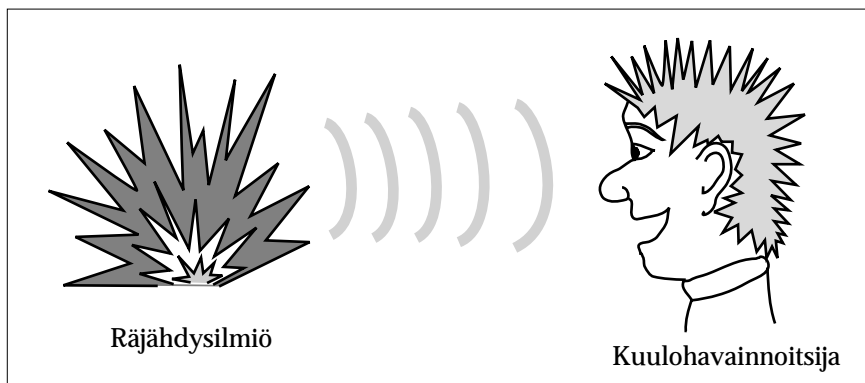
Ääni voidaan määritellä kahdesta eri näkökulmasta lähtien. Fysikaalisesti ääni on *aaltoliikettä* tai *värähtelyä*, mutta kuulon kannalta se on kuulojärjestelmässä syntyvä aistimus. Nämä kaksi äärinäkökulmaa ovat huomattavan erilaisia, josta voi johtua sekaannusta, ellei käsitteen kulloinenkin käyttötapa ole kaikille selvä.

Kuvassa 1 on luonnehdittu erästä äänitapahtumaa, missä fysikaalinen ilmiö synnyttää aaltoliikkeen, joka sitten etenee kuulijalle ja aiheuttaa kuuloaistimuksen.

Koska useimmissa tapauksissa äänen (fysikaalisena aaltoliikkeenä) energia on verraten pieni sen aiheuttaman ilmiön energiatasoon nähden, ei ääni sinällään ole kovin tärkeä esimerkiksi koneiden toiminnan kannalta. Sensijaan sen aiheuttamat vaikutukset ihmiseen tai elollisiin olioihin kuuloaistin kautta voivat olla merkittävät, jonka vuoksi esimerkiksi melusta ja sen torjunnasta ollaan kiinnostuneita. Ihmisen kuulo on siis useimmiten se kriteeri ja ‘mittari’, jonka mukaan ääni-ilmiöitä, mm. koneiden synnyttämää melua tulee viime kädessä arvioida.

Ääni aaltoliikkeenä ilmassa syntyy lähes poikkeuksetta mekaanisen värähtelyn seurauksena. Kun koneen osat värähtelevät, välittyy se joko suoraan tai välillisesti ilmaan ja saa aikaan aaltoliikkeen. Vain harvoissa tapauksissa ääni syntyy ei-mekaanisen ilmiön (esim. salama tai sähköpurkaus) seurauksena. Esimerkiksi soittimissa kieli, kaukupohja tai värähtelevä kalvo säteilee äänen. Puhe syntyy äänihuulten värähtelyn katkoessa keuhkoista tulevaa ilmavirtaa. Myös äänentoistossa ääni synnytetään käytännössä aina kaiuttimilla, joissa sähköisesti aiheutettu kalvon mekaaninen liike välittyy ilmaan aaltoliikkeeksi.

Koneiden synnyttämä ääni koetaan yleensä ei-toivottavana eli meluna, joka voi liian voimakkaana olla ihmisen kuuloa vaurioittavaa, mutta jo vähemmän äänekkäänä häiritsevää tai kiusallista. Toisaalta liikkuvien tai mekaanisten koneiden toiminta ja toimivuus ilmenevät niiden synnyttämän äänen kautta, joten koneääni sisältää myös hyödyllistä informaatiota. Joissakin tilanteissa se voidaan kokea jopa miellyttävänä, samaan tapaan kuin musiikki. Äänen vaikutukset ihmiseen ovat monitahoisia ja niitä tulee tarkastella tapauskohtaisesti. Äänen, erityisesti melun vaikutusta kuuloon tarkastellaan myöhemmin.



Kuva 1: Tilanne, jossa fysikaalinen ilmiö (räjähdys) synnyttää ääniaallon ilmaan, tämä etenee kuulijalle ja synnyttää ääniaistimuksen/havainnon eli tuo informaatiota sekä sattaa aiheuttaa haittavaikutuksia.

1.2 Värähtely ja ääni fysikaalisina ilmiöinä

Tässä luvussa tarkastellaan värähtelyä ja ääntä fysikaalisina ilmiöinä. Yksityiskohtaisempaa teoriaa löytyy mm. viitteistä [1, 2, 3, 4, 5].

Värähtelyn tai äänen synnyttävää tekijää (esim. voima) kutsutaan usein *herätteeksi*. Värähtely tai aaltoliike voi edetä väliaineessa, vahvistua *resonanssi-ilmiöiden* vaikutuksesta, vaimentua *häviöiden* johdosta (muuttuminen esim. lämmöksi) tai muuntua lukuisien eri ilmiöiden kautta muuksi energiamuodoksi. Energian säilyvyyden lain mukaisesti energiaa ei voi hävitä tai syntyä tyhjästä; se vain muuttaa muotoaan. Värähtely- ja aaltoliikkeet voidaan usein palauttaa seuraavaan malliin, missä kaksi energiamuotoa, potentiaali- ja liike-energia vuorottelevat.

1.2.1 Yksinkertainen värähtelyliike

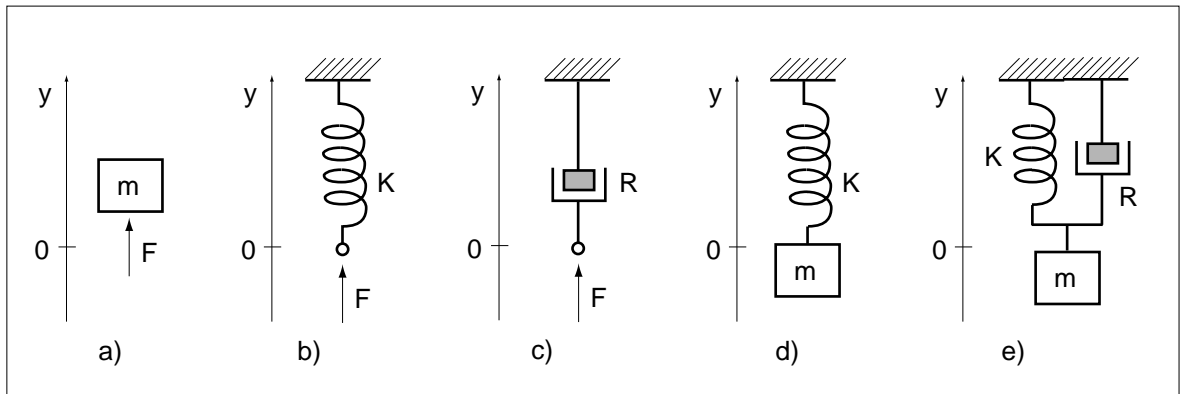
Yksinkertaisin värähtelijä saadaan yhdistämällä ideaalinen massa ja jousi kuvan 2a,b,d mukaisesti. Massapartikkelille pätee joka ajan hetkellä

$$F = ma = m\ddot{y} \quad (1)$$

missä F on voima [N, Newton], m on massa [kg] ja $a = \ddot{y} = d^2y/dt^2$ on massahiukkasen kiihtyvyys [m/s^2] ja y on sen paikka [m] kuvaava muuttuja. Voima on siis suoraan verrannollinen massan ja kiihtyvyyden tuloon. Ideaalijouselle puolestaan pätee

$$F = -Ky \quad (2)$$

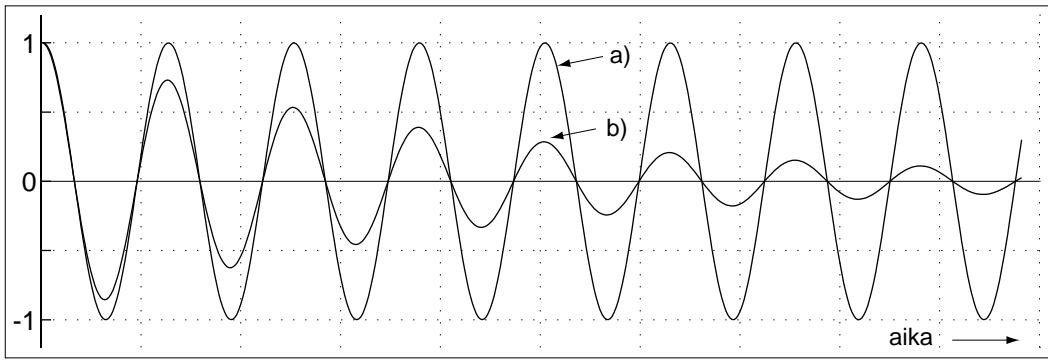
missä K on jousen jäykkyyttä kuvaava *jousivakio* [N/m] ja y on jousen poikkeama tasapainotilasta.



Kuva 2: a) Massa, b) jousi, c) vaimennin, e) massa-jousi-värähtelijä ja d) vaimennettu massa-jousi-järjestelmä.

Äänen ja värähtelyn yhteydessä ollaan kiinnostuneita liikkeestä, dynaamisista tapahtumista ja voimavaikutuksista. Staattiset voimat eivät kiinnosta, elleivät ne välillisesti aiheuta värähtelyä tai vaikuta värähtelyn ominaisuuksiin. Ääneksi kutsutaan varsinaisesti vain kuulon taajuusalueella 20 – 20000 Hz (jaksoa sekunnissa) esiintyviä värähtelyjä.

Matemaattisesti yksinkertaisin tapaus mekaanisesta värähtelijästä on kuvan 2d ideaalinen *massa-jousi-järjestelmä*, joka approksimoi monia käytännön tapauksia. Siinä ideaalinen massapartikkeli on kiinnitetty ideaalijousen kautta paikallaan pysyvään kohteeseen.



Kuva 3: Yksinkertaisen massa-jousi-värähtelijän liike ajan funktiona a) häviöttömässä ja b) häviöllisessä tapauksessa.

Jos massaa poikkeutetaan tasapainoasemastaan ja päästetään vapaasti värähtelemään, on syntyvän värähtelypoikkeaman y aikafunktio kuvan 3a mukainen ja noudattaa yhtälöä¹.

$$y(t) = A \cos \omega_0 t = A \cos 2\pi f_0 t \quad (3)$$

missä A on värähtelyn suurin poikkeama, *amplitudi* eli laajuus, f_0 on värähtelyn *ominaistaajuus* ja $\omega_0 = 2\pi f_0$ on vastaava *kulmataajuus*. Massa-jousi-järjestelmän ominaistaajuus saadaan yhtälöstä

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4)$$

Minkä tahansa jaksollisen värähtelyn taajuuden f [Hz] ja jakson pituuden T [sekuntia] välillä on suhde

$$f = 1/T \quad (5)$$

Käytännön värähtelijöissä on mukana aina myös häviöitä (kuva 3b), joiden aiheuttama voima F_r on verrannollinen lähinnä liikenoiteuteen $v = \dot{y} = dy/dt$:

$$F_r = R \dot{y} \quad (6)$$

missä R on häviökerroin. Tällöin syntyvä värähtely vaimenee eksponentiaalisesti ajan funktiona² (kuva 3b), ts.

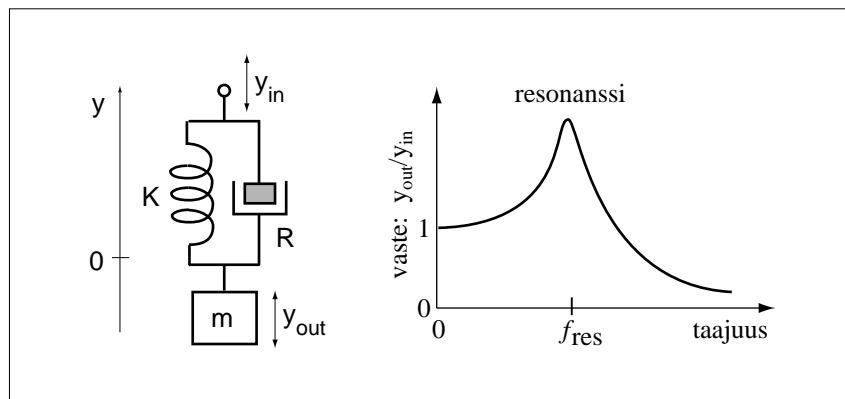
$$y(t) = A e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t + \phi) \quad (7)$$

missä $\alpha = R/2M$ on häviöiden aiheuttaman värähtelyn vaimenemisen nopeutta kuvaava kerroin ja $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$. Huomaa, että värähtelytaajuus on hieman erilainen kuin häviöttömässä tapauksessa ja alkuvaihekulma $\phi \neq 0$. Häviöt muuttavat liike-energiaa useimmiten lämmöksi, mutta siirtyminen voi tapahtua myös muuhun muotoon (esim. sähköiseksi). Tärkeä erikoistapaus on se, jossa värähtely saa aikaan akustisen aaltoliikkeen, mitä kautta mekaaninen värähtely tai osa siitä muuntuu akustisen aaltoliikkeen energiaksi³.

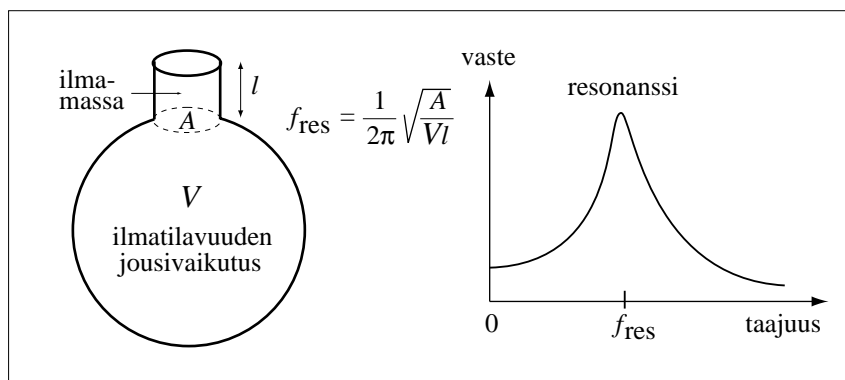
¹Tämä kosinifunktioratkaisu seuraa massa-jousi-järjestelmän toimintaa kuvaavan differentiaaliyhtälön $m\ddot{y} + Ky = 0$ ominaisratkaisuna, kun alkuehtona on poikkeama A ja nopeus nolla.

²Tämä ratkaisu puolestaan seuraa häviöisen massa-jousi-järjestelmän differentiaaliyhtälön $m\ddot{y} + R\dot{y} + Ky = 0$ ominaisratkaisuna.

³Myös akustinen aaltoliike on perusluonteeltaan mekaanista liikettä, mutta on käytännöllistä tarkastella sitä omana energiamuotonaan.



Kuva 4: Massa-jousi-järjestelmässä syntyvä resonanssi-ilmiö. Kun jousen yläpäätä liikuttetaan sinimuotoisesti eri taajuuksilla (heräte), vahvistuu massan liike (vaste) resonanssitaajuuden lähetyvillä herätteeseen nähden.



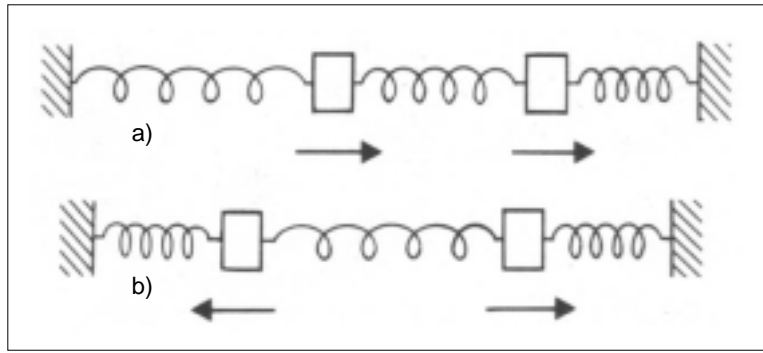
Kuva 5: Helmholtz-resonaattorin (a) rakenneperiaate, (b) periaatteellinen vaste herätteeseen eri taajuuksilla.

1.2.2 Resonanssi

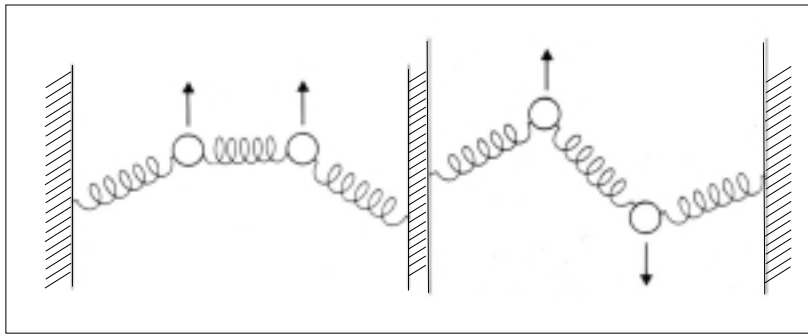
Edellisessä kohdassa esitelty yksinkertainen järjestelmä värähtelee kaikkein mieluiten sille ominaisella taajuudella f_o tai sen lähitaajuuksilla. Jos ko. massa-jousi-yhdistelmää pakko-ohjataan jousen yläpäätä vakioamplitudisella liikkeellä eri taajuuksilla, noudattaa maspartikkelin liikepoikkeama kuva 4 mukaista käyttäytymistä. Kun värähtely voimistuu järjestelmälle ominaisella taajuudella, sanotaan, että järjestelmä resonoi tai että sillä on *resonanssi* tällä alueella. Tällaista järjestelmää kutsutaan *resonaattoriksi*.

Resonanssi on usein esiintyvä ilmiö, josta voi olla haittaa tai hyötyä tapauksesta riippuen. Kun halutaan vahvistaa ääntä tai värähtelyä, esimerkiksi soitinten ääntä, ovat resonanssi-ilmiöt käyttökelpoisia. Toisaalta voimakas resonanssi voi saada koneen osan liikeamplitudin kasvamaan vaarallisen suureksi tai melun vahvistumaan voimakkaaksi. Tällöin tulee pyrkiä vaimentamaan resonanssit siten, että niistä ei ole haittaa laiteen toiminnalle tai sen aiheuttaman äänen kautta ihmisille.

Yksinkertainen mutta akustiikassa tärkeä resonaattori on *Helmholtz-resonaattori*, jonka periaate on esitetty kuvassa 5. Siinä suljetussa tilavuudessa (V) oleva ilma toimii puristuessaan ja laajetessaan jousena ja kaula-aukossa oleva ilma liikkuvana massana, jo-



Kuva 6: Pitkittäiset värähtelymoodit kahden massan järjestelmässä.



Kuva 7: Poikittaiset värähtelymoodit kahden massan järjestelmässä.

ten resonanssikäyttäytyminen vastaa yksinkertaista massa-jousi-järjestelmää⁴. Resonanssitaaajuus saadaan kaavasta

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}} \quad (8)$$

missä c on äänen nopeus ilmassa (n. 340 m/s), A astian kaulan poikkipinta-ala, V astian tilavuus ja l kaulan pituus.

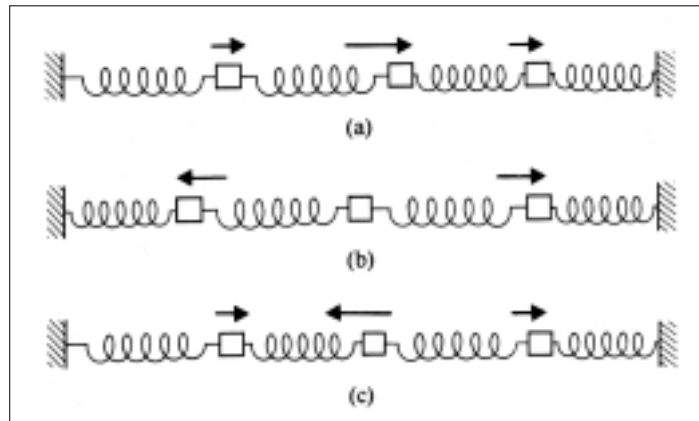
Helmholtz-resonaattorin vaste herätteeseen taajuuden funktiona on kuvassa 5b esitetyn luonteinen. Resonanssitaaajuudella ja sen välittömässä läheisyydessä värähtely vahvistuu muihin taajuuksiin nähden.

1.2.3 Massa-jousi-järjestelmät

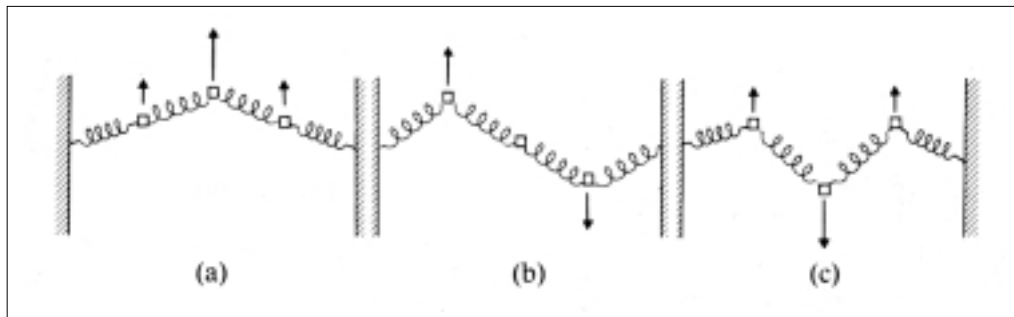
Kun massoja kytketään jousien kautta toisiinsa, saadaan monimutkaisempia värähtelijäjärjestelmiä. Seuraavassa tarkastellaan massa-jousi-järjestelmän monimutkaistamista jakamalla se avaruudellisesti yhä useampiin, jousilla toisiinsa kytkettyihin massoihin.

Kuvassa 6 on esitetty kahden massan järjestelmä, jossa massat pääsevät liikkumaan niitä yhdistävien josten suunnassa eli pitkittäissuunnassa. Kuvassa 7 on vastaava tapaus, missä massat liikkuvat jousiin nähden poikittaissuunnassa. Kun massoja on kolme ja ne

⁴Todellisuudessa jokainen resonaattori on avaruudellisesti jakautunut kolmiulotteisesti, mutta yksinkertaisissa resonaattoreissa tämä jakautuminen on epäolennaista, jolloin ne voidaan kuvata keskitettyinä järjestelminä vailla avaruudellisia ulottuvuuksia. Esimerkiksi kielisoittimen kaikukoppa tai kaiuttimen bassorefleksikotelo toimii alimman resonanssin läheisyydessä Helmholtz-resonaattorin kaltaisesti.



Kuva 8: Pitkittäiset värähtelymoodit kolmen massan järjestelmässä.



Kuva 9: Poikittaiset värähtelymoodit kolmen massan järjestelmässä.

pääsevät liikkumaan pitkittäissuunnassa, saadaan esiin kuvan 8 värähtelymuotoja. Kuva 9 esittää vastaavan tapauksen poikittaisvärähtelyille.

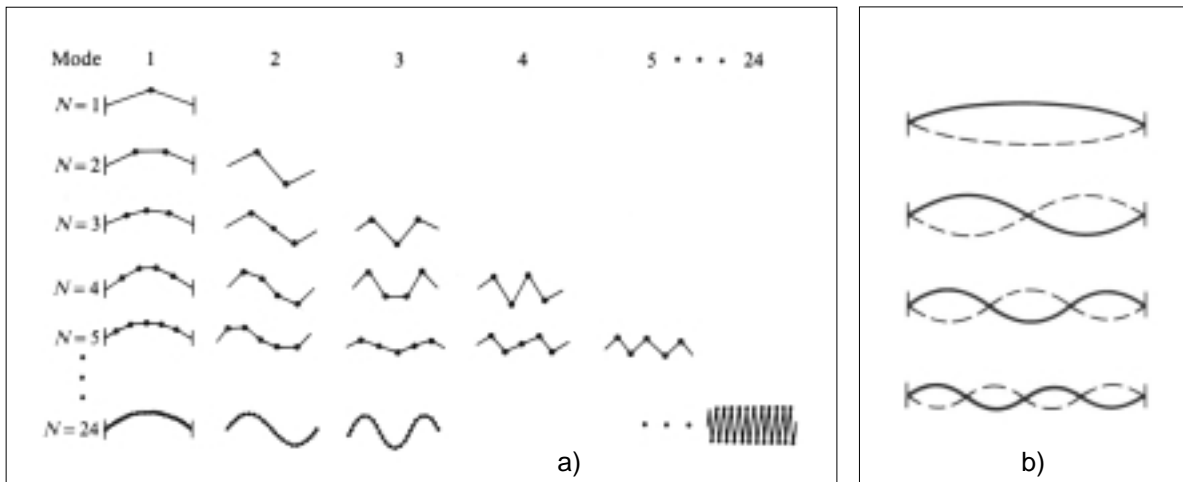
Jokainen massapartikkeli tuo mukanaan liikkeen yhden *vapausasteen* jokaisessa suorakulmaisen koordinaatiston liikesuunnassa, missä se voi liikkua. Jos liike on mahdollista vain yhdessä suunnassa, on järjestelmän vapausasteiden määrä yhtä kuin massapartikkelien määrä. Kolmiulotteisessa liikkeessä vapausasteita on kolme kertaa tämä määrä⁵.

1.2.4 Ominaisvärähtely ja moodi

Jokaisella massa-jousi-järjestelmällä on taajuuksia, joilla se värähtelee erityisen helposti, ts. se resonoi. Jos järjestelmä saatetaan värähtelemään vain yhdellä tällaisella *ominaistaajuudella* kerrallaan, todetaan, että näihin kuhunkin liittyy oma *ominaisvärähtelymuotonsa*. Kuvissa 6, 7, 8 ja 9 on esitetty näiden värähtelijöiden nimenomaisia ominaisvärähtelymuotoja eli *moodeja*, jotka vastaavat järjestelmän resonanssitajuuksia. Kuvien 6 ja 7 tapauksissa moodeja on kaksi: massojen samanvaiheinen ja vastakkaisvaiheinen värähtely. Kolmen massan tapauksessa (kuvat 8 ja 9) moodeja on kolme. Yleisesti ottaen moodeja on yhtä monta kuin järjestelmällä on värähtelyn vapausasteita.

Moodeille on ominaista, että niiden yhdistelminä, eri painokertoimin ja mahdollisesti eri värähtelyvaiheissa summaten voidaan muodostaa mikä tahansa monimutkaisempi

⁵Lisäksi voi tulla kysymykseen kiertoliike yhden, kahden tai kolmen akselin ympäri eli näin monta vapausastetta lisää. Tässä yhteydessä ei tarkastella kiertoliikkeen ilmenemismuotoja.



Kuva 10: Massa-jousi-ketjussa syntyvät moodit massojen määrää kasvatettaessa (a). Päistään kiinnitetyn soittimen kielen neljä alinta moodia (b).

värähtelymuoto⁶.

Kun massa-jousi-järjestelmää tihennetään kuvan 10a mukaan, saadaan yhä moninai-
sempia ominaismuotoja. Raja-arvona voidaan lähestyä tilannetta, missä massa- ja jousi-
ominaisuudet ovat jakautuneet tasaisesti tilaan. Näin päädytään väliaineisiin kuten kaa-
sut, nesteet ja kiinteät aineet, joissa värähtely etenee aaltoliikkeenä. Kuvassa 10b on esi-
tetty päistään kiinnitettyyn lankaan, esimerkiksi soittimen kieleen, syntyvät neljä alinta
moodia. Mooditaajuudet ovat tässä tapauksessa kokonaislukusuhteissa eli $f_n = n \cdot f_1$.

1.2.5 Aaltoliike

Kun massa- ja jousi-ominaisuus jakautuu kuvan 10a mukaan äärimmäisen tiheästi, päädy-
tään väliaineeseen tai rakenteeseen, johon aiheutettu häiriö alkaa edetä aaltoliikkeenä.
Kuvassa 11 on luonnehdittu yksiulotteisen aallon syntyä ja etenemistä köydessä.

Yksiulotteisen aaltoliikkeen yleinen muoto homogeenisessä väliaineessa on

$$y = f_1(ct - x) + f_2(ct + x) \quad (9)$$

missä y on aaltomuuttuja (esim. poikkeama), c on väliaineen ominaisuuksista riippuva aal-
lon etenemisnopeus, t on aika- ja x paikkamuuttuja⁷. Kaavan mukaan mikä tahansa aal-
toliike voidaan tulkita kahden vastakkaisiin suuntiin kulkevan aaltomuodon f_1 (x-akselin
positiiviseen suuntaan) ja f_2 (x-akselin negatiiviseen suuntaan) summana.

Jaksollisella värähtelyllä kahden peräkkäisen jakson samanvaiheisten kohtien (esim.
huippujen) välimatkaa kutsutaan *aallonpituudeksi*. Aallonpituus λ [m] saadaan kaavasta

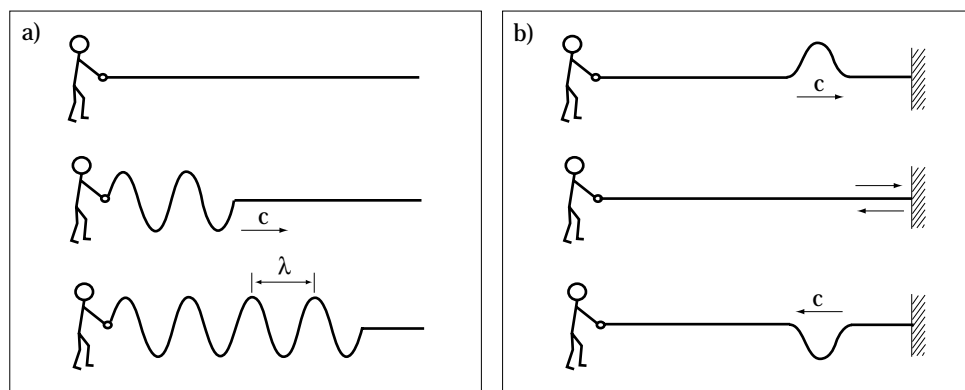
$$\lambda = c/f \quad (10)$$

missä c on aallon etenemisnopeus [m/s] ja f on värähtelyn taajuus [Hz].

Yleisimmässä tapauksessa aaltoliike esiintyy kolmiulotteisessa tilassa. Aaltoliikkeeseen
liittyviä käsitteitä tarkastellaan yksityiskohtaisemmin kohdassa 1.4.

⁶Värähtelyn hajottaminen erillisiksi moodeiksi summausperiaattella edellyttää yleisessä tapauksessa,
että järjestelmä on *lineaarinen*, ts. superpositioperiaate on voimassa, kts. kohta 3.2.1.

⁷Tämä yleinen ratkaisu seuraa osittaisdifferentiaaliyhtälöstä $\ddot{y} = c^2 y''$, missä \ddot{y} on toinen aikaderivaatta
ja y'' toinen paikkaderivaatta.



Kuva 11: Aaltoliike yksiulotteisessa jakautuneessa massa-jousi-järjestelmässä (köysi) (a). Aaltoliikkeen heijastuminen epäjatkuvuuskohdassa (köyden pää kiinnitetty) (b).

1.2.6 Aallon heijastuminen ja seisova aalto

Kun aaltoliike kohtaa väliaineen epäjatkuvuuden, tapahtuu täydellinen tai osittainen heijastuminen. Kuvassa 11b on esitetty aallon heijastuminen köyden kiinteästä päädyistä. Tässä tapauksessa päätepisteessä aallon poikkeama on aina nolla, jonka vuoksi heijastuneen aallon täytyy olla poikkeamasuunnaltaan saapuvaan nähden vastakkainen. Jos köyden pää on jätetty irti, tapahtuu tällöinkin heijastuminen, mutta poikkeamaltaan samansuuntaisena kuin saapuva aalto.

Kuvan 10 värähtelymuodot tiheässä massa-jousijonossa tai jatkuvassa väliaineessa voidaan selittää myös aaltoliikkeen avulla. Voidaan ajatella, että väliaineessa etenee molempiin suuntiin aaltoliikkeet kaavan (9) mukaisesti. Näiden kahden aallon summa vastaa värähtelymuotoa kunakin ajan hetkeneä. Tällöin tulee ajatella, että kumpikin aalto heijastuu päädyistä edellä kuvatun mukaisesti. Heijastuvat aallot jäävät värähtelemään pääty pisteiden välille. Tällaista aaltoa kutsutaan *seisovaksi aalloksi*, koska sen sisältämä energia pysyy paikoillaan. Kuvan 10b mukaisesti kullakin mooditaajuudella värähtelyssä esiintyy kupukohtia, joissa värähtely on maksimaalista, ja nollakohtia, joissa värähtelyä ei tapahdu lainkaan.

1.3 Akustiikassa käytettävät suureet

Akustiikassa käytetään monia suureita, joilla kuvataan aaltoliikkeen tai värähtelyn fysiikaalisia ominaisuuksia ja toisaalta äänen kuulohavaintoon liittyviä ominaisuuksia. Tässä käsitellään fysiikaalisia ja luvussa 2 kuulonmukaisia suureita.

1.3.1 Ääni ja värähtely signaalina

Kun fysiikaalisen suureen arvo tarkasteltavassa avaruuden pisteessä rekisteröidään ajan funktiona, saadaan *signaali*⁸. Tässä yhteydessä on tarpeen määritellä muutama äänisignaaleihin liittyvä käsite:

- *Äänes* on puhdas sinimuotoisesti vaihteleva äänisignaali, kuten kaavan (3) mukainen resonaattorin kosinivärähtely. Siihen sisältyy siis vain yhtä taajuutta. Vaikka

⁸Luvussa 3 käsitellään lähemmin signaalinkäsittelyyn liittyviä käsitteitä ja analyysimenetelmiä.

käytännössä ei ole mahdollista muodostaa puhdasta äänestä, on se käyttökelpoinen abstraktio.

- *Yhdistelmä-ääni* koostuu joukosta eritaajuisia ja -vaiheisia ääneksiä.
- *Jaksollisille äänille* on ominaista, että ne koostuvat *perustaajuisesta* (f_1) ääneksestä ja sen *harmonisista komponenteista* nf_1 . Yleisemmässä tapauksessa osäänekset voivat olla mielivaltaisissa taajuussuhteissa. Mikä tahansa signaalifunktio voidaan valitussa aikavälissä esittää osäänensten summana (Fourier-kehitemä, kts 3).
- *Ei-jaksollisille äänille* on ominaista, että ne ovat kohinanomaisia, toistottomasti muuntuvia signaaleja.

Jaksollisen signaalin voimakkuutta kuvataan usein joko sen *amplitudiarvolla* (suurin poikkeama keskiarvosta) tai *tehollisarvolla*. Tehollisarvo lasketaan samanarvoisen tehon perusteella, esimerkiksi paineelle $p(t)$:

$$p_{eff} = \frac{1}{t_2 - t_1} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt} \quad (11)$$

missä integrointiaikaväli on tarpeeksi pitkä (teoriassa ääretön).

Sinisignaalin (äänekselle) huippuarvo $\hat{p} = \sqrt{2} p_{eff}$.

1.3.2 Äänipaine

Akustiikan tärkein mittasuure on *äänipaine* eli aaltoliikkeen aiheuttama poikkeama väliaineen staattisesta paineesta. Sen mittayksikkö on kuten paineella yleensä Pascal [Pa] eli $[N/m^2]$. Äänestä johtuvat paineen vaihtelut ilamssa ovat yleensä paljon pienempiä kuin staattinen ilmanpaine. Kuultavat äänet vaihtelevat noin alueella $2 \cdot 10^{-5} \dots 50$ Pa.

Äänipaineen tarkka mittaminen on suhteellisen helppoa käyttämällä kondensaattorimikrofoniperiattella toimivia mittamikrofoneja (kohta 1.6.3), jotka muuttavat äänipainevaihtelut jännitesignaaleiksi.

1.3.3 Äänipainetaso

Koska kuultavan äänen äänipaineen mittaluvut vaihtelevat laajalla alueella, on osoittautunut hyvin käyttökelpoiseksi ottaa käyttöön logaritminen mittayksikkö, *desibeli*. Yleisenä käsitteenä desibeli voidaan määritellä värähtelyamplitudien A_2 ja A_1 suhdetta kuvaavana lukuna

$$L = 20 \lg(A_2/A_1) [dB] \quad (12)$$

ja sitä käytetään tässä suuruussuhteita esittävässä tarkoituksessa laajasti sähkö- ja tietoliikennetekniikassa. Helposti muistettavia desibeliarvoja ovat

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

Akustiikassa desibelin käsitteelle on annettu erityinen käyttö, jossa siitä tulee äänen voimakkuutta kuvaava absoluuttinen mittayksikkö. Kun valitaan referenssipainetaso p_o vastaaman paineeltaan likimain heikointa kuultavaa ääntä, $p_o = 20 \mu\text{Pa}$, saadaan *äänipainetaso* eli äänen voimakkuuden logaritminen mitta desibeleinä kaavasta

$$L_p = 20 \lg(p/p_o) \quad (13)$$

Kuulo kykenee käsittelemään äänipainetasoja, jotka ovat välillä noin 0–130 dB. Näin saatavat lukuarvot ovat helpompia käsittää kuin vastaavat äänipainearvot. Äänipainetaso voidaan muuntaa äänipaineeksi käänteisellä kaavalla

$$p = p_o 10^{L_p/20} \quad (14)$$

Erilaisten desibelilukemien merkitystä kuulon kannalta tarkastellaan luvussa 2.

1.3.4 Äänitaso

Koska äänipainetaso ei vastaa ihmisen kuulojärjestelmän kokemaa äänen subjektiivista voimakkuutta tai sen vaikutuksia kuulojärjestelmään, on kehitetty paremmin tätä tarkoitusta vastaavia mittoja. Käytännössä eniten käytetty ja tärkeä suure on *äänitaso*, joka on taajuuspainotettu äänipainetaso. Tätä ja muita kuulonmukaisia mittoja käsitellään luvussa 2.

1.3.5 Hiukkasnopeus

Ääniaaltoihin liittyy painevaihtelun lisäksi väliaineen hiukkasten liike. Paine ja *hiukkasnopeus* muodostavat muuttujaparin, joka kuvaa täydellisesti aaltoliikkeen hetkellisen tilan tarkasteltavassa pisteessä⁹. Nopeus on vektorisuure eli sillä on sekä suuruus että suunta.

1.3.6 Äänilähteen teho ja hyötysuhde

Äänen teho määritellään, kuten teho P [W] yleensä, aikayksikössä tehdyn työn avulla. Akustiikassa tehosta puhuttaessa tarkoitetaan usein äänilähteen tehoa, jonka se säteilee synnyttämässään aaltoliikkeessä ympäristöönsä.

Äänilähteen värähtelytehosta muuntuu yleensä vain pieni osa akustiseksi tehoksi. Säteilijän hyötysuhde η määritellään tehosuhteena

$$\eta = P_a/P_m \quad (15)$$

missä W_a on akustisena säteilyt teho ja P_s säteilijän mekaaninen (tai sähköinen) syöttöteho. Alhaisesta hyötysuhteesta johtuen akustinen teho on tyypillisissä äänilähteissä pieni. Esimerkiksi kotiäänentoistojärjestelmistä ei yleensä saa yli 1 Watin akustista tehoa, koska tyypillisen kaiuttimen hyötysuhde on 1 % luokkaa.

⁹Tasoaallolle ilmassa pätee paineen ja hiukkasnopeuden u suhteelle: $p = \rho c u = Z_c u \approx (413 \text{ Pas/m}) u$, missä ρ on ilman tiheys, c äänen nopeus ja Z_c ilman *karakteristinen impedanssi*.

1.3.7 Tehotaso

Vastaavasti kuin edellä määriteltiin desibeleissä ilmaistava äänipainetaso, on hyödyllistä määritellä *äänitehotaso*. Yleisesti on voimassa tehosuureille P_2 ja P_1 :

$$L = 10 \lg(P_2/P_1) [dB] \quad (16)$$

missä on huomattava kerroin 10 logaritmin edessä, kun taas amplitudisuureille kerroin on 20 kaavassa (12)¹⁰.

Kuten äänipainetasolle, tarvitaan referenssiarvo, jotta äänitehotaso kuvaisi absoluuttista suuretta eikä suhdelukua. Akustiikassa on valittu äänitehotasolle L_W

$$L_W = 10 \lg(P/P_o) \quad (17)$$

missä P on ääniteho ja referenssiksi P_o on valittu 1 pW (pikowatti). Näin esimerkiksi äänilähteen äänitehoa voidaan kuvata tasosuureen avulla desibeleinä.

1.3.8 Äänen intensiteetti

Teho pinta-alayksikköä kohti on intensiteetti I [W/m²]. Tarkemmin ottaen intensiteetti on vektorisuure, eli sillä on suunta ja suuruus. Akustiikassa *äänien intensiteetti* kuvaa äänitehon virtausta. Esimerkiksi pallosäteilijän aiheuttamassa pallosymmetrisessä aallossa teho jakautuu säteen kasvaessa yhä suuremmalle pinnalle, jolloin intensiteetti on kääntäen verrannollinen säteen neliöön. Äänen intensiteetti on käyttökelpoinen suure mm. mittauksissa, joissa halutaan selvittää äänienergian siirtymistä äänikentässä.

1.3.9 Intensiteettitaso

Äänen intensiteettitaso määritellään

$$L_I = 10 \lg(I/I_o) \quad (18)$$

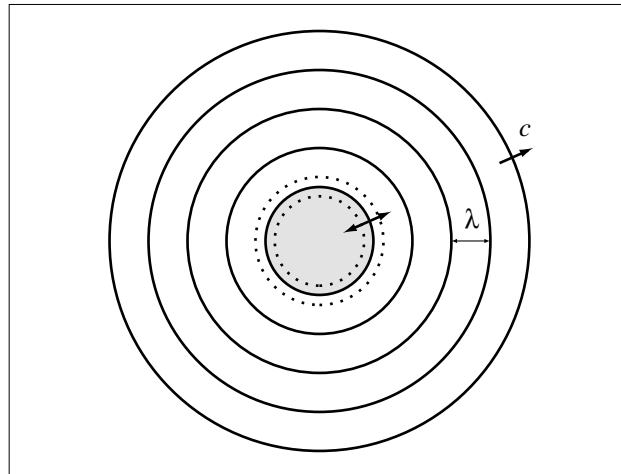
missä I on intensiteetti ja referenssiksi I_o on valittu 1 pW/m².

1.3.10 Tasosuureilla laskeminen

Kun kaksi tai useampia samanaikaisia äänilähteitä synnyttää äänikentän, voi äänen yhteisvaikutus johtaa monenlaisiin kokonaistasoihin. Hetkellisarvojen osalta suureet kuten paine ja hiukkassnopeus summautuvat. Summautuvan äänen amplitudi- tai tehollisarvojen saamiseksi tapaukset voidaan käytännössä jakaa kahteen ryhmään:

1. Äänilähteet ovat *koherentteja*, jos niiden (tai niiden osäänesten) taajuudet ovat samat. Tällöin aallot voivat summautua vaihesuhteista riippuen joko
 - samanvaiheisinä eli ne vahvistavat toisiaan
 - vastakkaisvaiheisinä, jolloin ne kumoavat toisiaan
 - muussa vaiheessa toisiinsa nähden, jolloin lopputulos riippuu niiden amplitudeista ja vaihe-erosta.
2. Äänilähteet ovat *epäkoherentteja*, jolloin niiden tehot summautuvat.

¹⁰Tämä seuraa yksinkertaisesti siitä, että $10 \lg(P_2/P_1) = 10 \lg(A_2^2/A_1^2) = 20 \lg(A_2/A_1)$.



Kuva 12: Pallosäteilijän aiheuttama palloaaltokenttä.

Kun kaksi yhtä voimakasta samanvaiheista signaalia amplitudilla A summautuu, on syntyvän signaalin amplitudi $2A$, jolloin summasignaalin taso on $20 \lg 2$ eli noin 6 dB korkeampi. Jos taas kaksi yhtä voimakasta epäkoherenttia signaalia summautuu, on syntyvän signaalin taso $10 \lg 2$ dB eli noin 3 dB korkeampi. Yleisessä tapauksessa kaksi epäkoherenttia ääntä, tasoilla L_1 ja L_2 , summautuvat tehosuureiden (W) avulla kuten

$$L_{tot} = 10 \lg(W_1 + W_2) = 10 \lg(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) \quad (19)$$

1.4 Ääniaaltoihin liittyviä ilmiöitä

1.4.1 Aaltoliike fluidissa

Ääniaalto käyttäytyy kaasuissa ja nesteissä jokseenkin samalla tavalla. Näiden kaltaista väliainetta, jossa ei esiinny (merkittäviä) leikkausvoimia, kutsutaan *fluidiksi*. Ideaalifluidissa on mahdollista vain pitkittäinen aaltoliike.

Ensisijainen fysikaalinen suure ääniaallon kuvaamiseksi on äänipaine. Heräte eli häiriö tasapainoasemaan nähden väliaineessa, ts. paineen poikkeama staattisesta arvostaan saa aikaan aaltoliikkeen, joka etenee väliaineelle ominaisella nopeudella c , kts. kaava 9. Äänen nopeus ilmassa on huoneenlämmössä noin 340 m/s ja riippuu hieman lämpötilasta seuraavasti

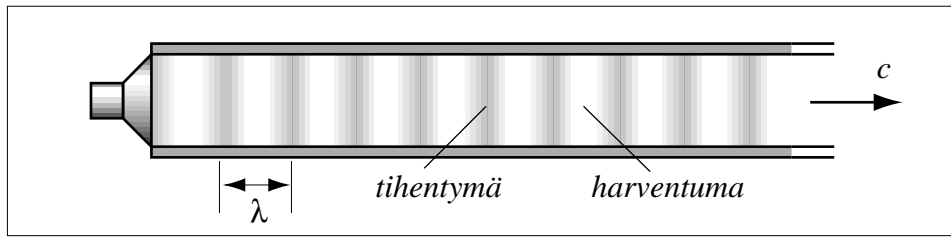
$$c_{ilma}(T) = (331,3 + 0,6 T/^\circ\text{C}) \text{ [m/s]} \quad (20)$$

missä T on lämpötila.

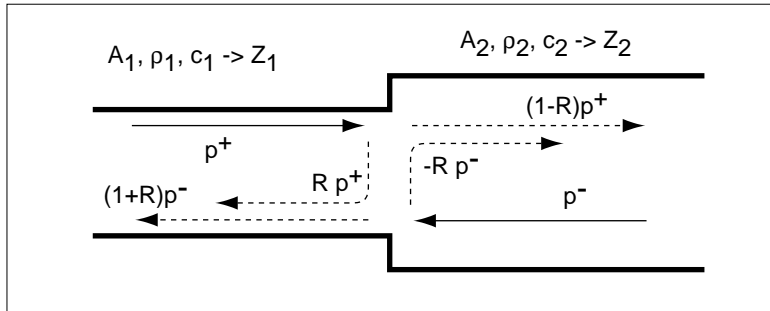
Kun värähtelevä kappale synnyttää aaltoliikkeen fluidiin, riippuu syntyvän kentän muoto äänilähteen muodosta ja sen koosta aallonpituuteen nähden. Käytännön tapauksissa kentän muoto on yleensä monimutkainen ja sen yksityiskohtainen laskenta on vaikeaa. Eräillä likimääräistyksillä voidaan approksimoida syntyvän kentän ominaisuuksia verraten helposti. Näistä tärkeimmät tapaukset ovat palloaalto ja tasoaalto.

1.4.2 Palloaalto

Sykkivä pallo synnyttää ympärilleen *palloaallon*, ts. nopeudella c pallosymmetrisesti etäännyvän aaltorintaman, kuva 12. Palloaallon äänipaine $p(r)$ on kääntäen verrannollinen



Kuva 13: Tasoaalto tasapaksussa putkessa.



Kuva 14: Aallon heijastuminen ja eteneminen putken epäjatkovuuskohtassa.

etäisyyteen r eli

$$p(r) \propto 1/r \quad (21)$$

Mikä tahansa aallonpituuteen nähden pienikokoinen värähtelijä, jonka pinnat värähtelevät samassa vaiheessa, synnyttää likimain palloaallon.

1.4.3 Tasoaalto ja aaltoliike putkessa

Toinen tärkeä aaltoliikkeen erikoistapaus on *tasoaalto*. Laaja, yhtenäisesti värähtelevä tasopinta saa aikaan tasoaallon. Häviöttömässä väliaineessa tasoaallon voimakkuus on etäisyydestä riippumaton. Riittävän kaukana pallosäteilijästä pienellä pinnalla tarkasteltuna myös palloaalto on likimain tasoaalto.

Tasapaksussa putkessa voi edetä vain tasoaalto, mikäli taajuus on niin pieni, että putken poikkimitta on pieni aallonpituuteen verrattuna. Kuvassa 13 on luonnehdittu akustista aaltoliikettä putkessa.

Putkessa etenevälle allolle käytetään aaltosuurena paineen lisäksi *tilavuusnopeutta* q , joka kuvaa väliaineen tilavuusvirtausta [m^3/s] pinnan kautta. Putkelle pätee

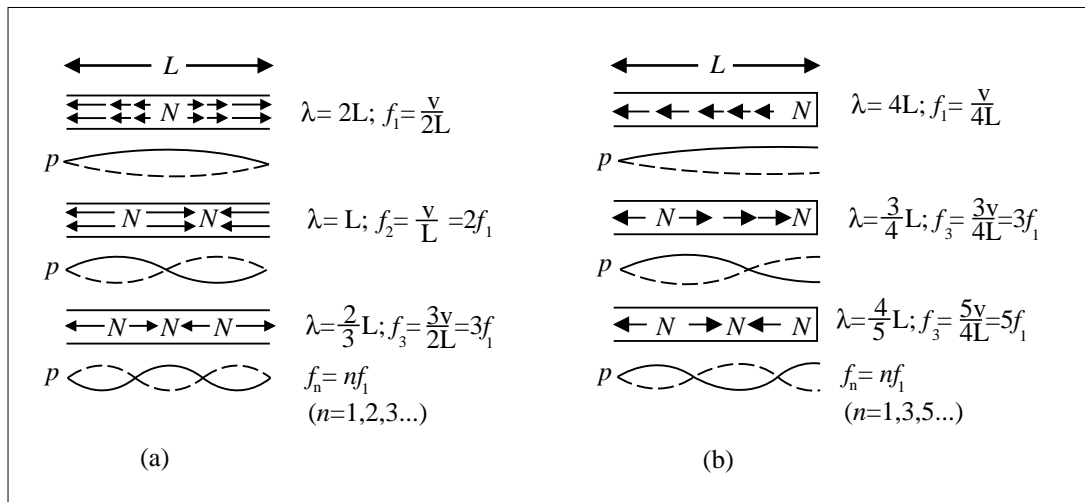
$$p = Z_a q \quad (22)$$

missä p on äänipaine ja Z_a on *akustinen impedanssi*. Sen arvo saadaan kaavasta

$$Z_a = \rho c / A \quad (23)$$

missä ρ on väliaineen tiheys, c äänen nopeus ja A on poikkipinta-ala.

Kun putken pinta-ala tai väliaineen parametrit muuttuvat jossakin kohtaa putkea, tapahtuu saapuvan aallon jakaantuminen heijastuvaan osaan ja eteenpäin jatkavaan osaan. Kuvan 11 tapauksessa kysymyksessä oli täydellinen epäjatkovuus (jäykkä seinä), missä



Kuva 15: Alimmat resonanssimoodit a) avoimelle ja b) toisesta päästä suljetulle putkelle. Tilavuusnopeus (nuolilla) ja paine p putkessa. Pienin värähtelyamplitudi esiintyy solmu- kohdissa ja suurin näiden välillä sijaitsevilla kupukohdissa.

koko signaali heijastui köyden päätteestä. Yleisemmässä tapauksessa (kuva 14) putken epäjatkuvuuskohdassa, missä siirrytään akustisesta impedanssista Z_1 impedanssiin Z_2 , syntyvä takaisin heijastuva äänipaine p_r^+ on

$$p_r^+ = R p^+ \quad (24)$$

ja eteenpäin jatkava osuus p_f^+ on

$$p_f^+ = T p^+ = (1 - R) p^+ \quad (25)$$

missä *heijastuserroin* eli *heijastussuhde* R on

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (26)$$

ja *siirtokerroin* (*siirtosuhde*) eteenpäin jatkavalle aallolle on $T = (1 - R)$. Kuvassa 14 on esitetty myös vastakkaiseen suuntaan etenevän aallon käyttäytyminen. Edellä esitetyistä kaavoista nähdään, että jos $Z_1 = Z_2$, heijastuserroin on nolla ja koko aalto jatkaa kulkuaan. Tätä kutsutaan täydelliseksi impedanssisovitukseksi. Jos taas Z_1 ja Z_2 ovat hyvin erisuuret, tapahtuu voimakas heijastus, eli kysymyksessä on impedanssiepäsovitus.

Jos putki päätetään jäykkään seinään, on sen impedanssi $Z_2 \approx \infty$, jolloin kaavan (26) raja-arvona saadaan $R \rightarrow 1$. Jos taas putki päätetään avoimena, on avoimen pään impedanssi hyvin pieni, jolloin $R \rightarrow -1$.

Kun putki on päätetty päistään joko avoimeksi tai suljetuksi, saadaan mm. kuvan 15 tapaukset ja niihin liittyvät moodit. Putkessa, jonka toinen pää on avoin ja toinen suljettu (likimain esim. klarinetissa), on värähtelyssä mukana perusresonanssin (neljännesaalto-resonanssin) parittomat kerrannaistaajuudet tasavälein. Jos molemmat päät ovat avoimet (kuten huilussa), on värähtelyssä mukana perusresonanssin (puoliaaltoresonanssin) kaikki kerrannaistaajuudet.

1.4.4 Aaltoliike kiinteissä aineissa

Kiinteä aine eroaa fluidista sikäli, että siinä leikkausvoimat ovat mahdollisia. Tästä puolestaan seuraa se, että poikittainen aaltoliike on mahdollinen pitkittäisen aallon lisäksi.

Pitkittäisen aallon nopeus muutamissa väliaineissa on esitetty seuraavassa taulukossa.

Väliaine	Nopeus [m/s]
Ilma (20 °C)	343
Helium	970
Vesi	1410
Teräs	5100
Lasi	12–16000

Poikittainen aaltoliike syntyy esimerkiksi langassa/kielessä (kuva 16) tai palkissa (kuva 17). Taipuisassa langassa, esim. soittimen kielessä, poikittaisaallon nopeus riippuu massatiheydestä μ (= massa pituusyksikköä kohti) ja kiristysvoimasta T

$$c = \sqrt{T/\mu} \quad (27)$$

Kuvassa 16a on esitetty keskeltä näpätyn kielen¹¹ hetkellinen värähtelyjakauma ja sen moodihajoitelma, josta ilmenee, että värähtelyyn sisältyy perustaajuus ja sen parittomat kerrannaistajuudet. Jos näppäyskohta sijaitsee epäsymmetrisesti (kuva 16b), kuvan esimerkissä viidesosa kielen päästä, ovat syntyvät harmoniset painottuneet vastaavasti siten, että joka viides harmoninen puuttuu.

Esimerkki aaltoliikkeestä, joka muistuttaa kielen käyttäytymistä, mutta ei ole enää puhtaasti yksidimensionaalinen tapaus, on värähtelevä tanko tai palkki. Jäykkyydestä johtuen siinä syntyvä aaltoliike on *dispersiivinen* eli eri taajuiset aaltokomponentit etenevät eri nopeuksilla (suuret taajuudet nopeammin kuin pienet taajuudet). Tästä johtuen resonanssitaajuudet eivät ole kokonaislukusuhteissa vaan sijaitsevat kuvan 17 mukaisesti epäharmonisesti.

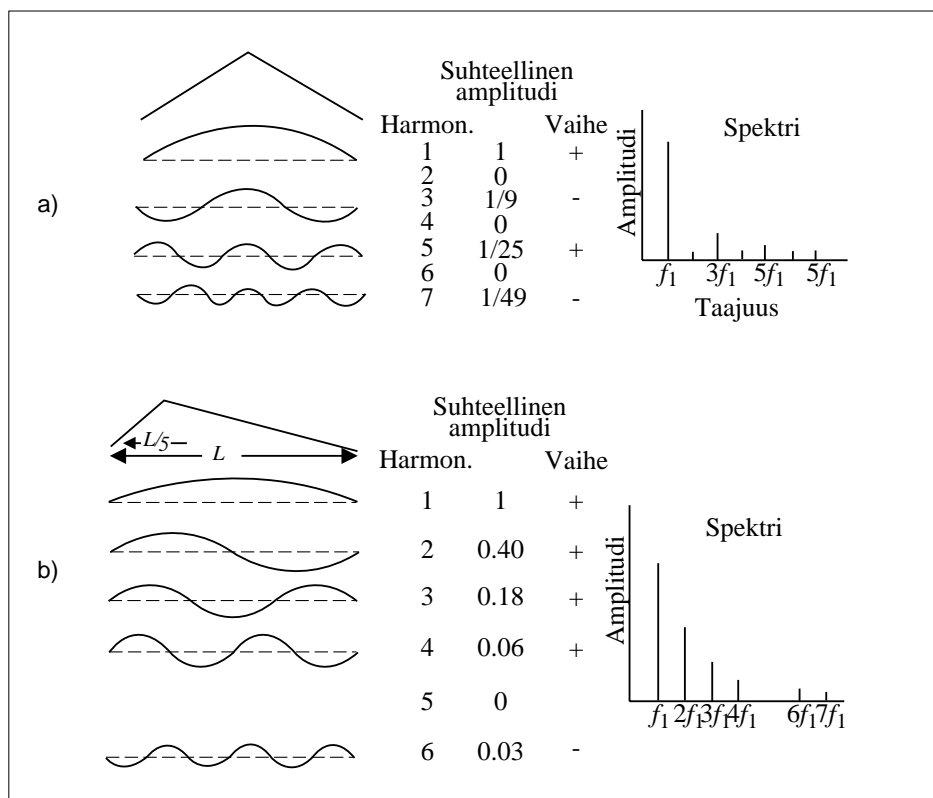
Esimerkkejä kaksiulotteisesta aaltoliikkeestä ovat reunasta kiinnitetty kalvo sekä reunoista vapaasti värähtelevä levy. Kuvassa 18 on havainnollistettu kalvossa syntyviä malleja hetkellisen poikkeamakuvion avulla. Noodiviivat ovat nollakohtia, joissa värähtelyamplitudi on minimaalinen, ja ne voivat olla säteettäisiä suoria tai ympyröitä.

Kuvassa 19 on esitetty ideaalisen kalvon noodikuvioita ja vastaavat suhteellisen resonanssitaajuudet. Yleensä pätee havainto, että kaksi- ja kolmiulotteisilla resonaattoreilla moodit eivät ole harmonisissa taajuussuhteissa ja että resonanssitiheys kasvaa taajuuden kasvaessa (kts myös kohta 1.5.4).

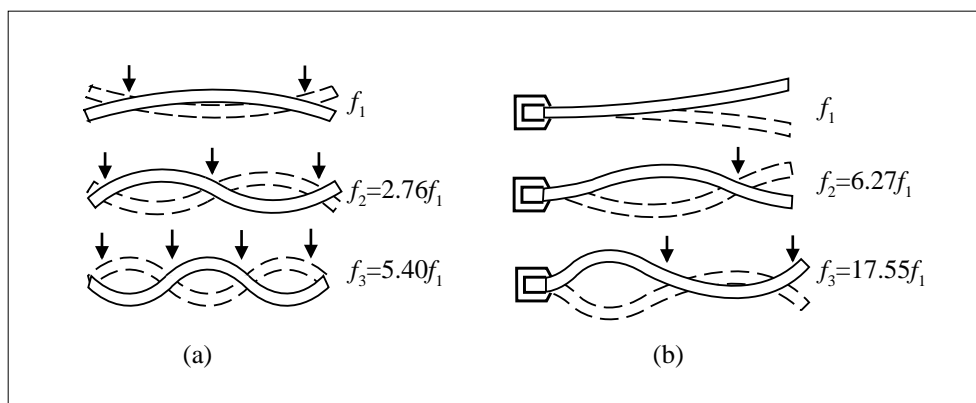
1.4.5 Heijastuminen, absorptio ja läpäisy

Kun aaltoliike kohtaa pinnan kuten seinän, osa aaltoliikkeen energiasta *heijastuu* takaisin ja osa jatkaa toisessa väliaineessa tai muuttuu lämmöksi. Energian poistumista

¹¹Kielisoittimissa primääriresonaattoreina ovat kielet, jotka saatetaan värähtelemään näppäämällä (esim. kitara), lyömällä (piano) tai jousella soittamalla (viulu). Sekundääriresonaattoreina voivat olla kaikukoppa, -levy tai resonanssikielit. Huomaa, että esimerkiksi kitarassa vapaat kielet soivat tallan kautta tapahtuvan kytkennän vuoksi sekundääriresonaattoreina, kun yhtä kieltä näpätään. Tätä kutsutaan *sympateettiseksi värähtelyksi*.



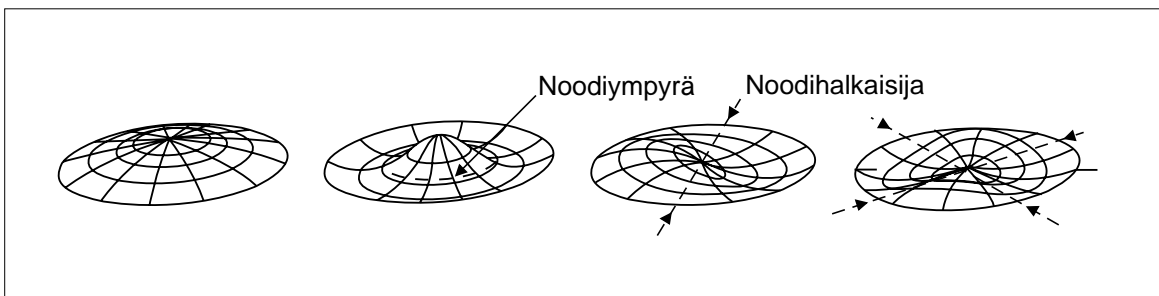
Kuva 16: Näpätyn ideaalisen kielen moodihajoitelma a) keskeltä näpätylle ja b) viidesosan verran päästä näpätylle kielelle sekä vastaavat spektrikuvat.



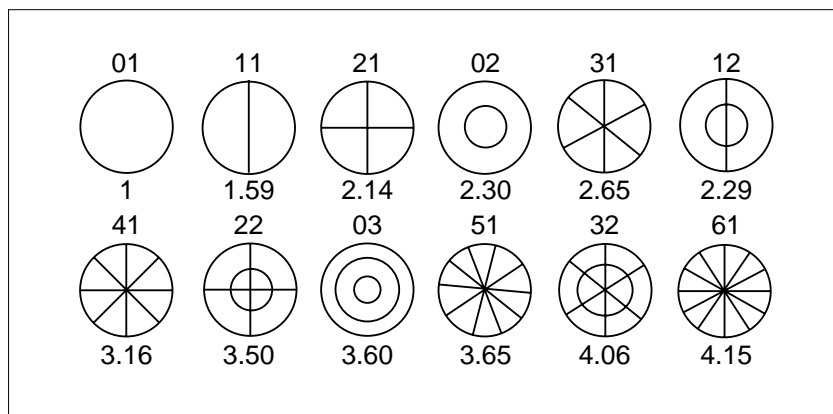
Kuva 17: Palkin alimpia värähtelymoodeja a) vapaasti ripustetulle palkille ja b) toisesta päästä jäykästi kiinnitetylle palkille. Nuolet esittävät solmukohtia, joissa värähtelyamplitudi on minimissä.

väliaineesta 1 eli se, että heijastuminen ei ole täydellinen, kutsutaan *absorptioksi*. Heijastuvan aallon voimakkuutta suhteessa saapuvan aallon voimakkuuteen (amplitudiin) kuvataan *heijastuskertoimella* (R , kts kohta 1.4.3) ja absorboituvaa osuutta aallon energiasta *absorptiokertoimella*. Absorptiokerroin a saadaan kaavasta

$$a = 1 - |R|^2 \quad (28)$$



Kuva 18: Pyöreän ja täysin taipuisan, reunoista kiinnitetyn kalvon värähtelymoodeja hetkellisen poikkeamakovion mukaan havainnollistettuina.



Kuva 19: Ideaalisen, reunoista kiinnitetyn kalvon alimpia noodiviivakuvioita ja vastaavat suhteelliset resonanssitaajuuudet.

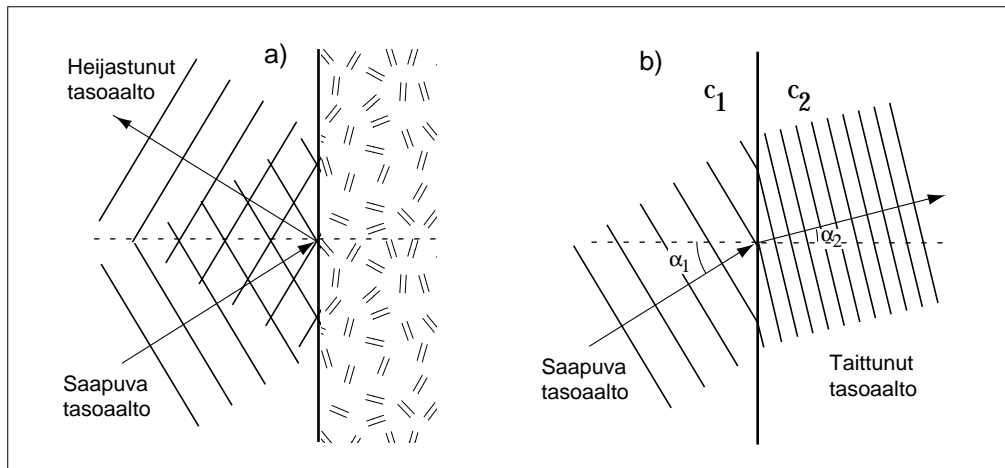
Kuvassa 20a on luonnehdittu tasoallon käyttäytymistä kolmiulotteisessa peiliheijastuksen tapauksessa, jolloin kuvan mukaan määritellyt tulo- ja lähtökulmat ovat yhtä suuret. Absorptiokerroin on funktio tulokulmasta, ja se mitataan joko kohtisuoralle aallolle tai *diffuusille kentälle*, missä ääntä saapuu tasaisesti kaikista tulokulmista.

1.4.6 Tahtuminen ja taipuminen

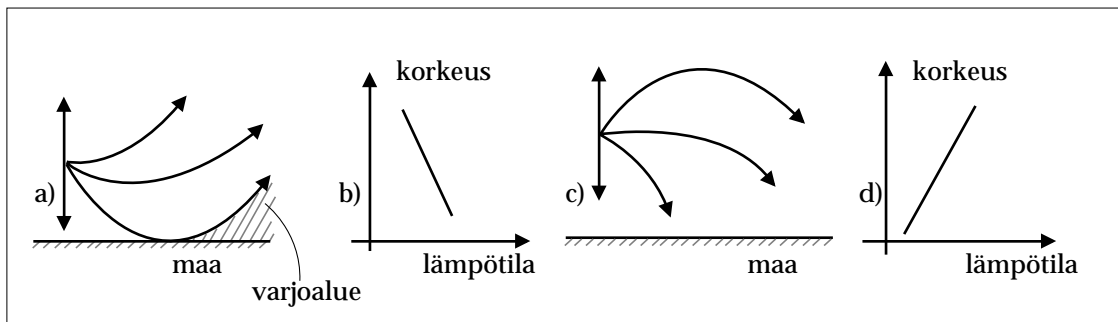
Kuvasta 20b nähdään aallon *tahtuminen*, kun se kohtaa toisen väliaineen rajapinnan. Tulo- ja lähtökulmien (sinien) suhde riippuu äänen nopeuksista ko. väliaineissa (Snellin laki)

$$c_1 \sin \alpha_2 = c_2 \sin \alpha_1 \quad (29)$$

Jos väliaineen ominaisuudet muuttuvat asteettain kuten esimerkiksi ilmakehässä, riippuu ääniaaltojen käyttäytyminen äänennopeuden ja siten lämpötilan profilista kuvan 21 mukaisesti. Aaltorintama taipuu normaalisti ylöspäin, mutta inversiotapauksessa (ts. kun lämpötila kasvaa ylöspäin) aaltorintama kääntyy maanpintaa kohti. Tällä on merkitystä mm. ympäristömelun leviämisen kannalta.



Kuva 20: a) Tasoallon heijastuminen kovasta seinäpinnasta ja b) taittuminen kahden eri väliaineen rajapinnassa.



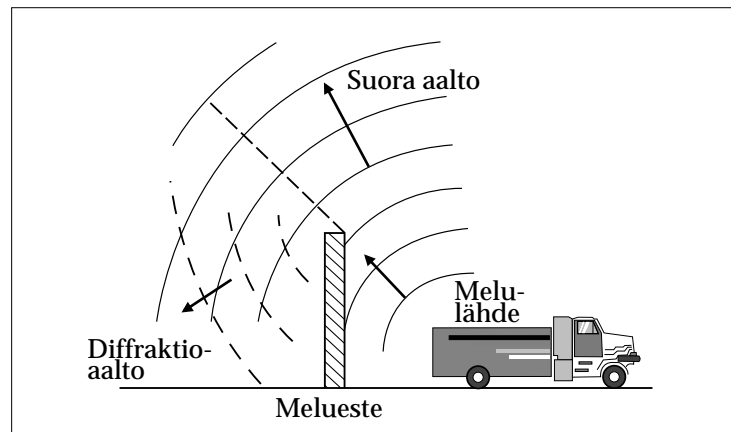
Kuva 21: Äänen taipuminen ilmakehässä eri lämpötilaprofileilla: a & b) normaalitilanne, jolloin lämpötila laskee ylöspäin, c & d) inversiotilanne, jolloin lämpötila nousee ylöspäin ja ääniaallot kaareutuvat alaspäin.

1.4.7 Sironta ja diffraktio

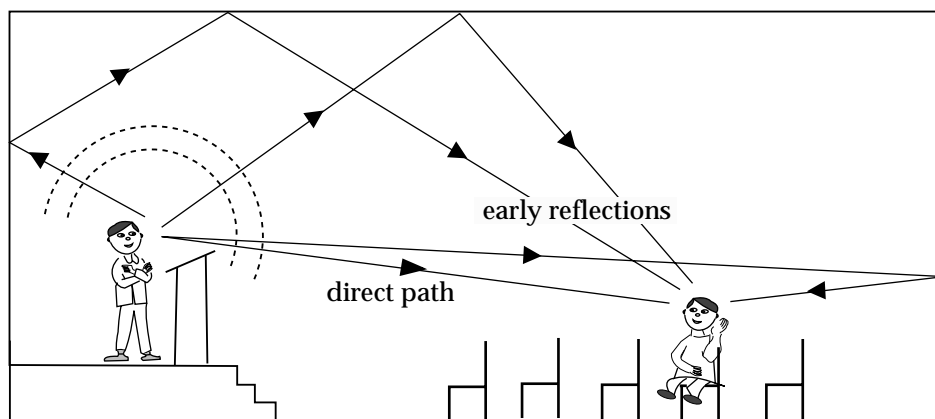
Kun aalto kohtaa väliaineen epäjatkuvuuden, tapahtuu *sirontaa*. Heijastuminen on erikoistapaus sironnasta. Yleisemmässä tapauksessa ilmiötä kutsutaan akustiikassa *diffraktioksi* ja se tapahtuu, kun ääniaalto kohtaa esineen, jonka mitat ovat aallonpituuden suuruusluokkaa. Diffraktio on matemaattisesti hankalasti käsiteltävä ilmiö. Esine tai sen reuna toimii eräänlaisena sekundääri- eli toisioääninähteenä. Tyypillinen esimerkkitapaus on kuvan 22 meluete. Pienillä taajuuksilla (= aallonpituus suuri) seinäke estää vain vähän äänen etenemistä sen taakse. Suurilla taajuuksilla (= aallonpituus pieni) puolestaan syntyy varjoalue (kuten valolla) ja vain pieni osa äänestä diffraktoituu reunan ympäri. Kun este on aallonpituuden kokoluokkaa, osa äänestä pääsee kiertämään esteen taakse.

1.5 Äänen käyttäytyminen suljetussa tilassa

Suuri osa äänikommunikaatiosta tapahtuu sisällä suljetuissa tiloissa kuten tavallisessa olohuoneessa, puheauditoriossa, konserttisalissa, toimistossa, jne. Tilan seinät aiheuttavat *heijastuksia* ja *jälkikaiuntaa*, jotka vahvistavat ja värittävät ääntä, mutta liiallisina



Kuva 22: Äänen diffraktio esteen reunasta.



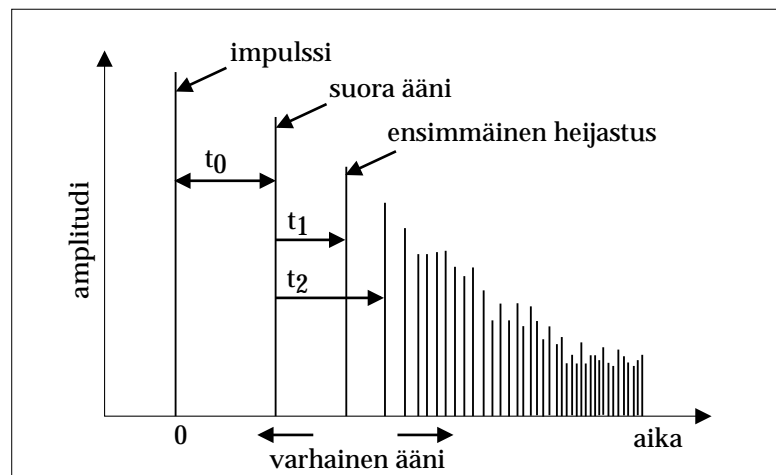
Kuva 23: Äänen kulkureittejä huoneessa äänilähdeestä kuulijalle, kun oletetaan, että äänen etenemistä voidaan kuvata säteenseurantaperiaatteella.

tekevät äänestä epäselvän. Akustinen tila tulee suunnitella siten, että hyötyääni saapuu kuulijalle kyllin voimakkaana ja selkeänä. Toisaalta melu ja haittaäänet vahvistuvat myös, joten esimerkiksi konemelun kannalta ääntä voimistava jälkikaiunta on pyrittävä pitämään kyllin lyhyenä.

1.5.1 Äänikentän syntyminen

Kuvassa 23 on hahmoteltu äänen etenemistä suljetussa tilassa äänilähdeestä kuulijalle. Suoran äänen jälkeen saapuu joukko varhaisia heijastuksia seinien, katon ja lattian kautta, sitten tihenevä määrä moninkertaisia heijastuksia, jotka muodostavat jälkikaiunnan.

Äänen saapumista kuulijalle ajan funktiona voidaan havainnollistaa kuvan 24 periaatekaavion avulla. Ääni saapuu kuulijalle ensimmäiseksi suorana äänenä, sitten ensimmäisen kertaluvun heijastuksina seinistä, katosta ja lattiasta, ja tämän jälkeen yhä useamman heijastuksen läpikäyneenä. Kuvasta nähdään näin syntyvä *reflektogrammi* eli vaste ajan funktiona periaatteellisesti esitettyinä. Varhaiset heijastukset — puheella n. 60 ms saakka ja musiikilla noin 100 ms alusta — parantavat äänen kuuluvuutta, mutta myöhempi osa, *jälkikaiunta*, liian voimakkaana esiintyessään on haitallista.



Kuva 24: Impulssimaisen äänen saapuminen kuulijalle ajan funktiona (= impulssivaste) suljetussa tilassa periaatteellisesti esitettynä.

1.5.2 Jälkikaiunta

Huoneen tai salin tärkein yksittäinen tunnusluku on *jälkikaiunta-aika*, joka ilmoittaa, missä ajassa tilaan tuotetun äänikentän amplitudi vaimenee 60 dB sen jälkeen, kun äänen tuottaminen lakkaa. Tilan jälkikaiunta-aika T_{60} voidaan laskea kaavasta

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{S} \quad (30)$$

missä V on huoneen tilavuus ja S on absorptiopinta-ala eli pintojen absorptiota vastaavan ekvivalenttisen, täydellisesti absorboivan pinnan ala. Se lasketaan kaavasta

$$S = \sum a_i A_i \quad (31)$$

yli huoneen kaikkien pintojen siten, että S_i on pinnan i ala ja a_i on vastaava absorptiokerroin. Absortiokerroimet ilmoitetaan akustisille materiaaleille seuraavan taulukon mukaisessa muodossa

Materiaali	125	250	500	1000	2000	4000
Lasi-ikkuna	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Maalattu betoni	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Puulattia	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07

Jokainen tilassa oleva henkilö edustaa noin 0.5 m^2 absorptioalaa.

Suljetun tilan sopivin jälkikaiunta-aika riippuu tilan käyttötarkoituksesta. Konserttisalin jälkikaiunnan tulisi olla tilan koosta riippuen noin kaksi sekuntia tai vähän alle, kun taas puheauditoriossa koon mukaan suuruusluokkaa $0.5\text{--}1$ sekuntia.

1.5.3 Äänikentän voimakkuus suljetussa tilassa

Suljetussa tilassa syntyvän äänikentän voimakkuus jatkuvalla ääniherätteellä voidaan laskea kaavasta

$$L_p = L_W + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{S} \right) \quad (32)$$

missä L_p on äänipainetaso [Pa], L_W on äänilähteen tehotaso [dB] (kaava 17), Q äänilähteen suuntaavuus, r äänilähteen ja mittauspisteen välimatka [m] sekä S tilan absorptioala [m²] (31). Suuntaavuus Q ympärisäteilevälle (ts. ei-suuntaavalle) lähteelle saa arvon 1 ja muille lähteille se voi saada suunnasta riippuen ykköstä suurempia tai pienempiä arvoja.

Kaavan 32 logaritmilauseke koostuu kahden osatekijän summasta. Ensimmäinen osa kuvaa suoran äänen vaikutuksen ja se on suoraan verrannollinen suuntaavuuteen ja kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Jälkimmäinen termi edustaa jälkikaiuntaa, ja se on kääntäen verrannollinen absorptioalaan¹².

Kun äänilähteen etäisyys mittauspisteestä on pieni, on ensimmäinen termi vallalla ja äänipainetaso laskee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuuessa. Tietyllä etäisyydellä molemmat termit ovat yhtäsuuria, ja tätä etäisyyttä kutsutaan *kaiuntasäteeksi*. Tätä pidemmillä etäisyyksillä äänipaine ei juurikaan alene, koska tilaan likimain tasaisesti jakautuva jälkikaiuntakenttä on dominoiva tekijä.

1.5.4 Suljetun tilan moodit

Suljettua tilaa, esimerkiksi huonetta tai salia, voidaan tarkastella myös resonaattorijärjestelmänä. Tilaan muodostuu ominaisvärähtelyjä eli moodeja, joilla kullakin on tietty taajuus ja paikkajakauma tilassa.

Suorakulmaiselle ja kovaseinäiselle ilmatilalle, esimerkiksi huoneelle (kts kuvat 23 ja 24), pätee mooditaajuuksien kaava

$$f_{ijk} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{a}\right)^2 + \left(\frac{j}{b}\right)^2 + \left(\frac{k}{c}\right)^2} \quad (33)$$

missä v on äänen nopeus, a , b ja c ovat tilan dimensiot kolmessa suunnassa ja kokonaislukumuuttujat i , j ja k voivat saada mitä tahansa arvoyhdistelmiä luvuista 0, 1, 2, jne.

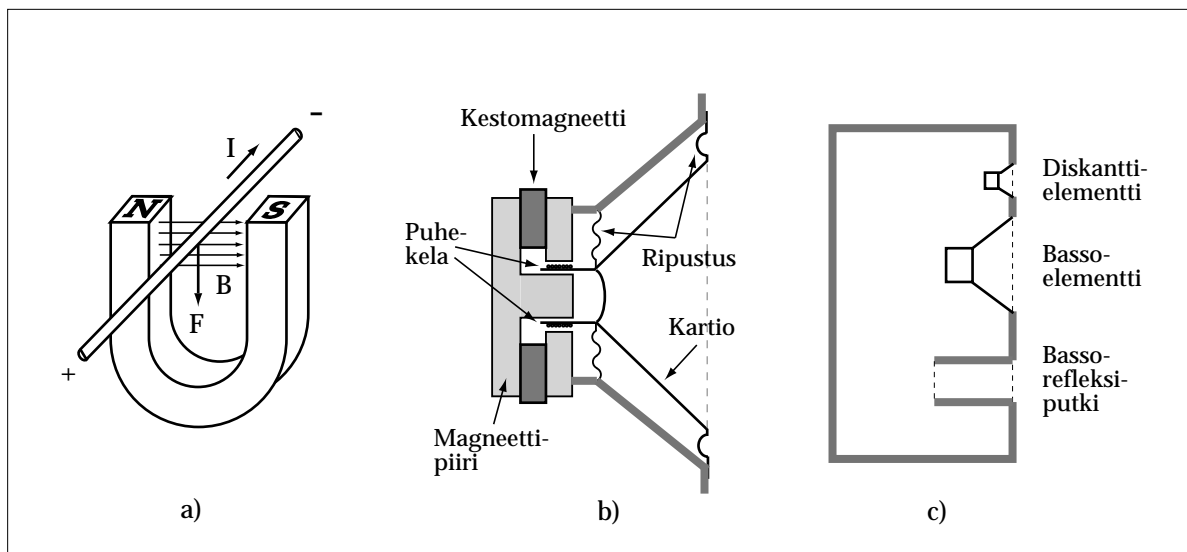
Alimman mooditaajuuden alapuolella väliaine värähtelee likimain samanvaiheisesti (‘paine-kammiona’) koko tilassa. Alin mooditaajuus vastaa tilan pisintä sivua. Tällöin huoneessa syntyvä kenttä vastaa kuvan 15a akustista putkea, paitsi että paine- ja nopeuskenttien muoto on vaihtanut paikkaa (painemaksimit päädyissä). Mooditaajuuksilla, joilla useampi kuin yksi muuttujista i , j ja k on nolasta poikkeava, on syntyvä kentän rakenne monimutkaisempi sisältäen ‘vinottaismoodeja’.

Mooditiheys kolmiulotteisessa tilassa kasvaa nopeasti suuria taajuuksia kohti. Kun mooditiheys on kyllin suuri, voidaan äänen käyttäytymistä tarkastella tilastollisin menetelmin.

1.6 Sähköakustiikka

Sähköakustiikka liittyy ilmiöihin, joiden avulla sähköiset värähtelyt tai signaalit muunnetaan akustisiksi tai päinvastoin. Tämä on tärkeä alue kommunikaatiotekniikan ja äänentoiston kannalta, sillä ääni välitetään, tallennetaan ja käsitellään lähes aina sähköisessä muodossa. Myös mittausten ja tutkimuksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää voida muuntaa akustiset signaalit ja mitattavat suureet sähköiseen muotoon.

¹²Huomaa, että jälkikaiuntakentän voimakkuus ei tämän perusteella riipu tarkastelupisteen sijainnista huoneessa. Kaava on johdettu äänen tilastollisten ominaisuuksien avulla, eikä se ole täysin tarkka varsinkaan monimutkaisen geometrian omaavissa tiloissa.



Kuva 25: Dynaamisen kaiuttimen toimintaperiaate: a) magneettikentässä B olevaan johdtimeen, jonka virta on I ja pituus kentässä on l , vaikuttaa voima $F = BIl$, b) tyypillinen elementin rakenne sekä c) koteloitun kaksitiekaiuttimen (bassorefleksikotelo) rakenne.

1.6.1 Kaiuttimet

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

Lähes kaikki käytännön kaiutinelementit perustuvat kuvan 25a 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 25b mukainen dynaamisen kaiutinelementin perusrakenne. Siinä johdin on kierretty puhekelaksi kestmagneetin ilmapäliin. Jännite puhekelan navoissa saa aikaan virran, joka aiheuttaa puhekelaa poikkeuttavan voiman. Puhekelaa puolestaan liikuttaa kartiota, joka pystyy poikkeuttamaan liikkuessaan riittävästi ilmaa ja saa aikaan ääniaallon. Kartio on ripustettu reunoistaan ja puhekelan läheltä siten, että se pääsee helposti liikkumaan.

Pelkkä kuvan 25b 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. Ensinmainittu on muuten suljettu kotelo paitsi aukko elementin asennusta varten. Kuvassa 25c esitetty tapaus on bassorefleksokotelo, missä on elementtien lisäksi erillinen refleksiaukko tai -putki, jonka ansiosta kotelosta tulee Helmholtz-resonaattori (vrt kuva 5). Sopivasti toistotaajuuksialueen alapäähän viritettynä resonanssi vahvistaa pienten taajuuksien toistoa.

Yksittäisellä kaiutinelementillä on erittäin vaikea saada toistetuksi laadukkaasti koko audiotaaajuusalue. Tämän vuoksi on tavanomaista tehdä laatukaiuttimet kaksi- tai kolmitiekaiuttimina, joissa sähköisellä jakosuotimella eri taajuuksialueet 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. 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 sen 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 kuulokkeilla tehtävät kokeet). Kaiuton huone on tila, missä seinät on päällystetty hyvin ääntä absorboivalla materiaalilla, joka usein on asennettu kiilan muotoisina kappaleina seinille.

1.6.2 Kuulokkeet

Kaiutinten ohella toinen tapa muuntaa sähköinen äänisignaali korvin kuultavaksi on *kuulokkeet*. 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 -tehoinen kaiutin) tai sähköstaattiseen periaatteeseen (käänteisesti kondensaattorimikrofonin toiminnalle, kts. seuraava kohta).

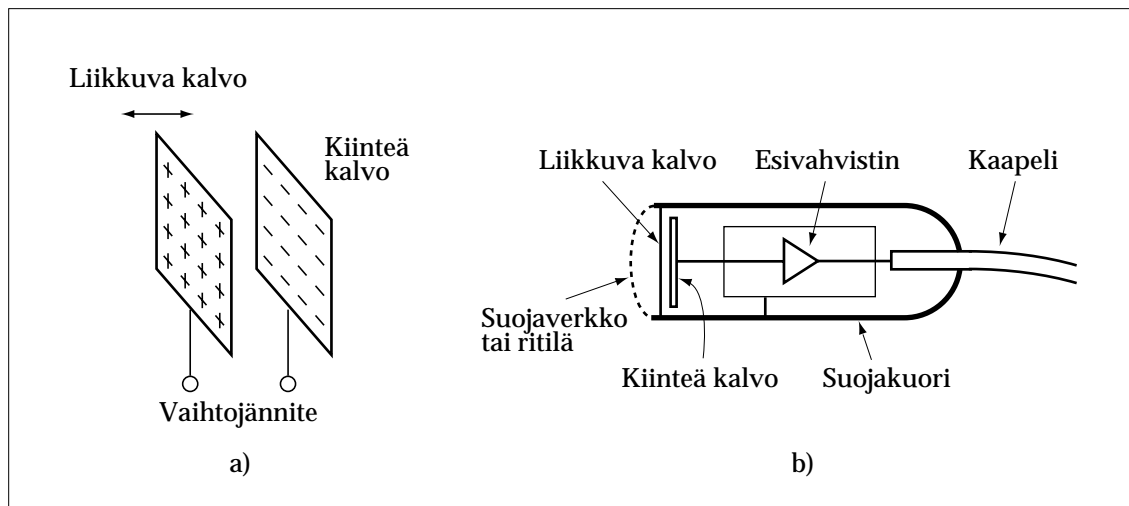
Korvaan kytkeytymisen kannalta kuulokkeita on monenlaisia. Erilaiset nappikuulokkeet ovat pienikokoisia ja kytkeytyvät suoraan korvakäytävään. Korvanpäälliskuulokkeet nojaavat korvalehtiin. Kuppikuulokkeet ulottuvat koko ulkokorvan yli siten, että ne sulkevat sisäänsä korvalehden ja nojaavat päähän korvalehtien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

1.6.3 Mikrofonit

Mikrofonin tehtävänä on muuntaa ilmassa tapahtuvat äänivärähtelyt vastaaviksi sähköisiksi signaaleiksi, yleensä jännitteeksi. Tavoitteena on, että tämä muunnos tapahtuisi ilman vääristymiä halutulla audiotaaajuusalueella, 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 25, mutta käänteisesti käytettynä ja kyllin pienikokoiseksi toteutettuna.

Edellisessä tapauksessa eli *kondensaattorimikrofonissa* ilmanpaineen vaihteluiden seurauksena värähtelevä kalvo, joka on staattisella sähkövarauksella varatun kondensaattorin liikkuvana elektrodina (kuva 26a), aiheuttaa elektrodien välille vaihtelevan jännitteen. Kuvassa 26b on hyvälaatuisen kondensaattorimikrofonin tyypillinen rakenne. Mikrofonikapselille tarvitaan ulkoa tuotu polarisaatiojännite sähköisen varauksen tuottamiseksi. Toinen vaihtoehto on käyttää pysyvän varauksen aikaansaamiseksi eristeenä kalvojen



Kuva 26: Kondensaattorimikrofonin a) toimintaperiaate ja b) tyypillinen rakenne.

välissä elektreettimateriaalia. Näin saatavat *elektreettimikrofonit* ovat nykyisin hyvin laajassa käytössä mm. puhelimissa.

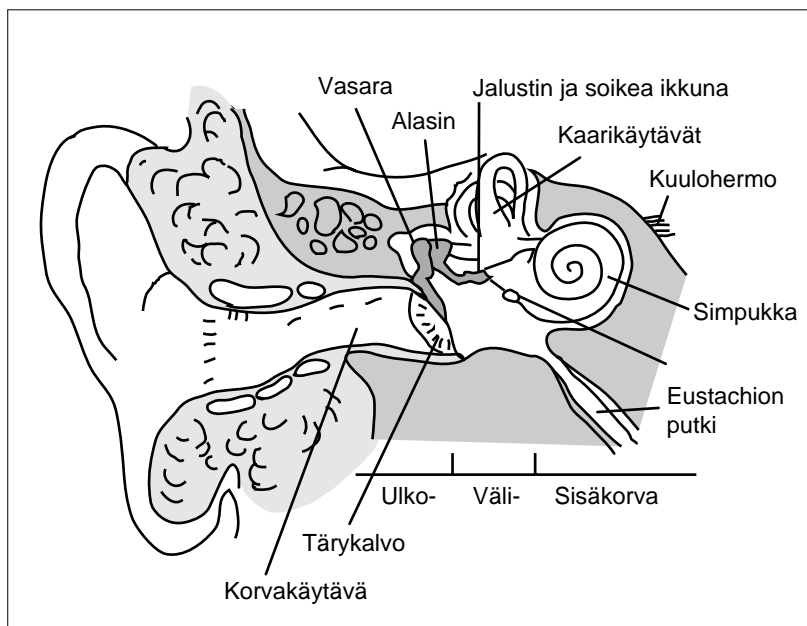
Kondensaattorimikrofonin antama jännite vahvistetaan yleensä mikrofoniakapselin yhteydessä olevalla esivahvistimella, koska signaalin siirtäminen häiriöttömästi ei muuten onnistuisi.

1.7 Fysikaalisen ja teknillisen akustiikan osa-alueita

Fysikaaliseen akustiikkaan sisältyy monia muitakin käsitteitä ja osa-alueita kuin mitä edellä on mainittu. Yleinen *lineaarinen akustiikka* tarkastelee äänikenttiä ja värähtelyitä kaasuihin, nesteisiin ja kiinteisiin aineisiin, näiden muodostaessa erilaisia rakenteita ja geometrioita, edellyttäen että lineaarisuusehto (kts kohta 3.2.1) on voimassa.

Jos järjestelmä käyttäytyy epälineaarisesti, käy sen matemaattinen tarkastelu yleensä paljon hankalammaksi. Epälineaarisen akustiikan osa-alueita ovat suuren painepoikkeaman omaavien aaltojen käyttäytyminen kuten shokkiaallot [6, 4] ja kavitaatio [7].

Muita paljon tutkittuja akustiikan osa-alueita ovat *vedenalainen eli hydroakustiikka* ([8] osa IV), kuuloalueen yläpuolisia taajuuksia (yli 20 kHz) edustavat *ultraäänet* ([8] osa V), ja alapuolisia taajuuksia (alle 20 Hz) koskevat *infraäänet* [9], *meluntorjunta* ([8] osa VIII), *rakennus-, sali- ja huoneakustiikka*, [10] ([8] osa IX), *musiikki- ja soitinakustiikka* [11] ([8] osa XIV) sekä *akustinen mittaustekniikka* [12, 13], ([8] osa XVII).



Kuva 27: Korvan halkileikkaus, josta ilmenevät ulko-, väli- ja sisäkorva.

2 KUULON RAKENNE JA TOIMINTA

Ihmisen kuulojärjestelmä [14, 15, 16, 17] 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.

2.1 Korvan rakenne

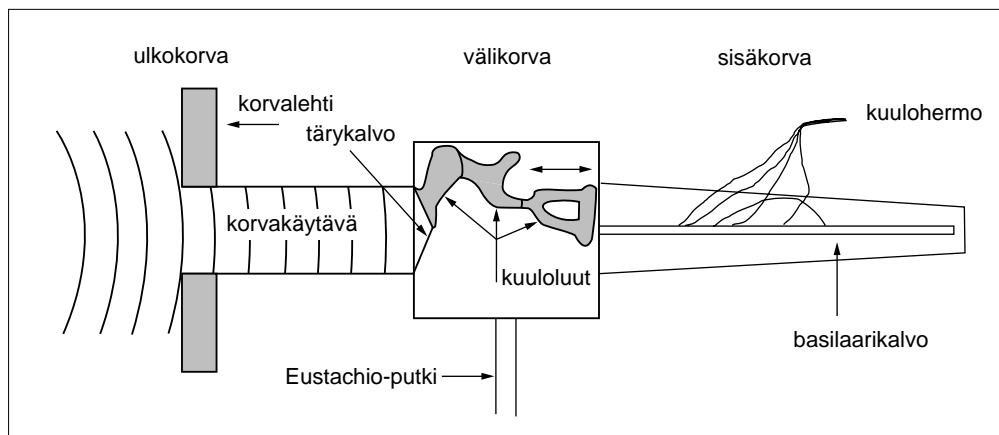
Ihmisellä kuten useimmilla eläimilläkin on kaksi korvaa. Korvan tehtävänä on vastaanottaa ilmassa etenevä ääniaalto ja välittää se eri vaiheiden kautta *kuulohermostoon* analysoitavaksi. Kahden korvan edullisuus yhteen verrattuna perustuu äänen tai äänilähteen suunnan tarkempaan analysoitavuuteen ja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

Kuvassa 27 on esitetty halkileikkaus ihmisen ääreiskuulosta. Korva voidaan jakaa *ulko-*, *väli-* ja *sisäkorvaan*, joilla kullakin on oma tehtävänsä ja erilainen toimintatapansa. Kuvassa 28 on korvan rakenne pelkistetty kaavamaisemmaksi, jotta toiminnallisesti tärkeät kokonaisuudet voitaisiin paremmin havaita.

Ulkokorva

Ulkokorvan osat ovat *korvalehti* ja *korvakäytävä*. Rajapinnan välikorvaan nähden muodostaa *tärykalvo*. Ulkokorva on passiivinen ja lineaarinen 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.

Akustisesti korvan toimintaan vaikuttaa myös pään diffraktio [18]. Kun ääni saapuu tarkasteltavan korvan puolelta, aiheuttaa pää äänipaineen kasvua. Vastakkaiselta puolelta



Kuva 28: Pelkistetty kaavio korvan rakenteesta.

saapuvalla aallolle pää muodostaa varjon, joka vaimentaa korkeita ääniä. Tästä seuraa se, että kuulojärjestelmä saa suurilla taajuuksilla (yli 1.5 kHz) tietoa äänilähteen suunnasta *korvienvälisen tasoeron ILD* (= interaural level difference) perusteella.

Toinen perustekijä, joka välittää kuulolle tietoa äänilähteen suunnasta, on *korvienvälinen aikaero ITD* (= interaural time difference). Se toimii varsinkin pienillä taajuuksilla (alle 1.5 kHz). Aikaero syntyy, koska äänen tullessa esim. etuviistosta sen kulkema matka eri korviin on erilainen, jolloin myös kulkuaikaerot ovat erilaiset.

Äänilähteen suunnan havaitsemiseen vaikuttaa lisäksi mm. pään epäsymmetria, korvalehdet ja hartioiden aiheuttamat heijastukset.

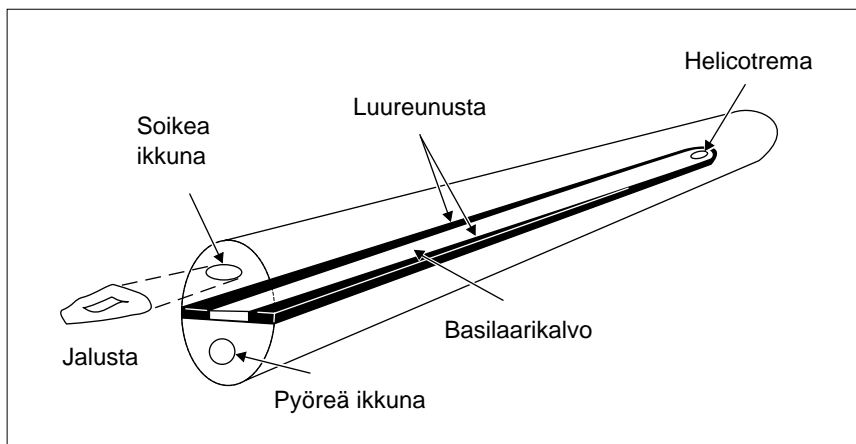
Korvakäytävää voidaan likimäärin pitää kovaseinäisenä akustisena putkena, jonka keskimääräinen pituus on noin 22,5 mm ja halkaisija noin 7,5 mm. Korvakäytävä aiheuttaa resonanssin noin 3–4 kHz taajuusalueella, joka korostuu ja aiheuttaa sen, että kuulo on herkimmillään tällä alueella. Korvakäytävä ja sen jälkeiset kuulon osat eivät enää vaikuta äänen suunnan havaitsemiseen.

Tärykalvo muuntaa korvakäytävän kautta saapuvan, ilmassa etenevän aaltoliikkeen mekaaniseksi värähtelyksi kuuloluuketjuun.

Välikorva

Välikorva ulottuu tärykalvosta sisäkorvan ns. soikeaan ikkunaan ja äänen välittymisen kannalta tärkeimmät osat siinä ovat ns. *kuuloluut: vasara, alasin ja jalustin*, kts. kuvat 27 ja 28. 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 (sisäkorvan nesteessä). Hyvä sovitus on tärkeä kuulon herkkyyden kannalta. 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!

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



Kuva 29: Oikaistuksi kuvitellun simpukan periaatteellinen rakenne.

herkkyys alenee pääasiassa matalilla äänillä:

- 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 impulsimaisilla äänillä refleksi vaikuttaa vasta impulssin edettyä jo sisäkorvaan. Eräillä ihmisillä on kyky vaistonvaraisesti supistaa stapedius-lihasta.

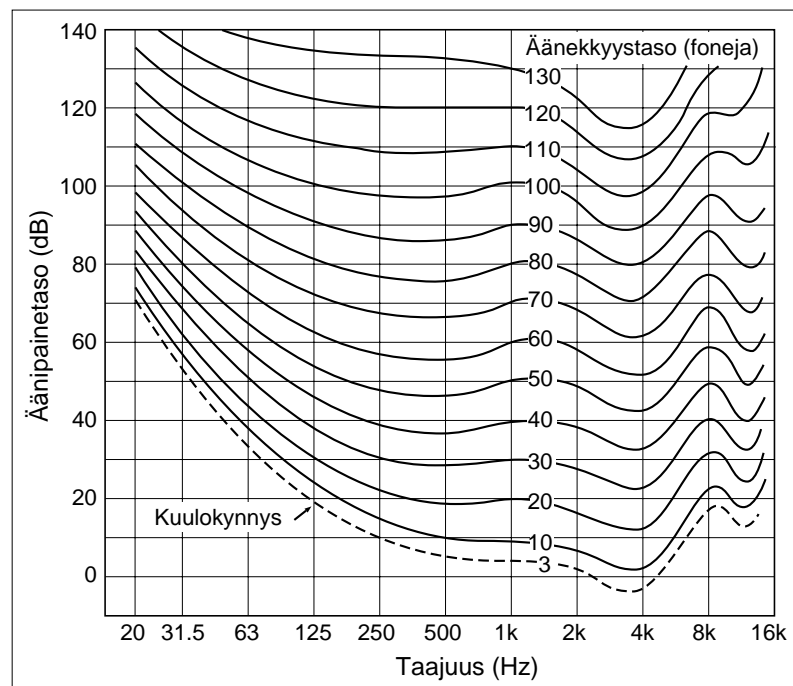
Sisäkorva

Sisäkorvan [14] kuuloa palveleva osa on nesteen täyttämä *simpukka*¹³. 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 29 kaaviomainen esitys.

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

Simpukka on erittäin monimutkainen ja herkkä elin. Kun basilaarikalvo liikkuu simpukkaan saapuneen värähtelyn vaikutuksesta, aiheuttaa se aistinsoluissa aktiviteettia, jonka seurauksena ne lähettävät impulsseja *kuulohermoon* säikeisiin ja näin viestittävät ylemmille tasoille tietoa basilaarikalvon värähtelyn paikasta, tavasta ja amplitudista. Aistinsolujen toiminta ei ole pelkästään reseptoritoimintaa, vaan ne on ymmärrettävä myös efektoreina eli liikkeen säätelijöinä tai synnyttäjinä. Aistinsoluihin saapuu siis myös las-

¹³Sisäkorvassa sijaitsevat myös tasapainoelimet, mutta näillä ei kuulon kannalta ole juurikaan merkitystä.



Kuva 30: Vakioäänepainetasokäyrä, jonka ääriarajat rajoittavat kuuloaluetta. Käyrästä määritetty vapaakenttäolosuhteissa.

keviä hermoratoja, jotka ohjaavat solujen ja basilaarikalvon liikettä.

Basilaarikalvo ja aistinsolut toimivat eräänlaisena spektrianalysointilaitteena. Kalvossa syntyvä aaltoliike resonoi eri taajuuksilla eri kohdissa kalvoa. Suuret taajuudet resonoi- vat heti kalvon alkupäässä, kun taas pienimmät taajuudet etenevät kalvon loppupäähän ja resonoiivat siellä. Kukin aistinsolu reagoi siis voimakkaimmin sen sijainnin mukaisiin taajuuksiin.

2.2 Kuulon perusominaisuudet

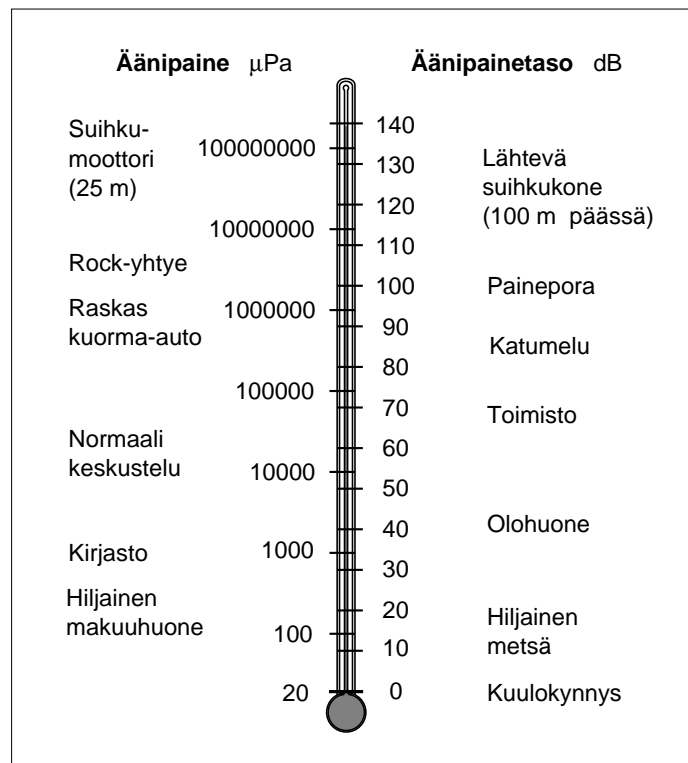
2.2.1 Kuuloalue ja vakioäänepainetasokäyrä

Ihmisen kuulo on kehittynyt vastaanottamaan ilmassa eteneviä ääniaaltoja, jotka taajuutensa ja äänipaineen osalta rajoittuvat kuvan 30 kuuloalueen puitteisiin, ts. niiden voimakkuus äänipaineena rajautuu kuulokynnyksen ja kipurajan välille vertikaalisuunnassa sekä ala- ja ylärajataajuuksien välille horisontaalisuunnassa.

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

$$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0) \quad (34)$$

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.



Kuva 31: ‘Äänenvoimakkuuslämpömittari’ eli tyypillisiä äänipainetasoja desibeliasteikolla.

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 30 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 30 vaaka-akselina on logaritminen taajuusasteikko (taajuuden mittayksikkönä hertsi, Hz). Logaritmisen asteikon käytölle on perusteensa, koska se kuvaa kuulon taajuuserottelukykä paremmin kuin lineaarinen asteikko. Akustisissa mittauksissa noudatetaan usein myös logaritmista asteikkoa. Tällöin pyritään käyttämään määrättyjä taajuuksia ja taajuusalueita taulukon 1 mukaisesti. Suositeltavimmat keskitaajuudet sijaitsevat *oktaavin* (= taajuussuhde 2:1) välein taajuudesta 1 kHz ylös- ja alaspäin. Taulukossa on merkitty myös suositeltavat 1/2-oktaavi- ja 1/3-oktaavikaistojen keskitaajuudet.

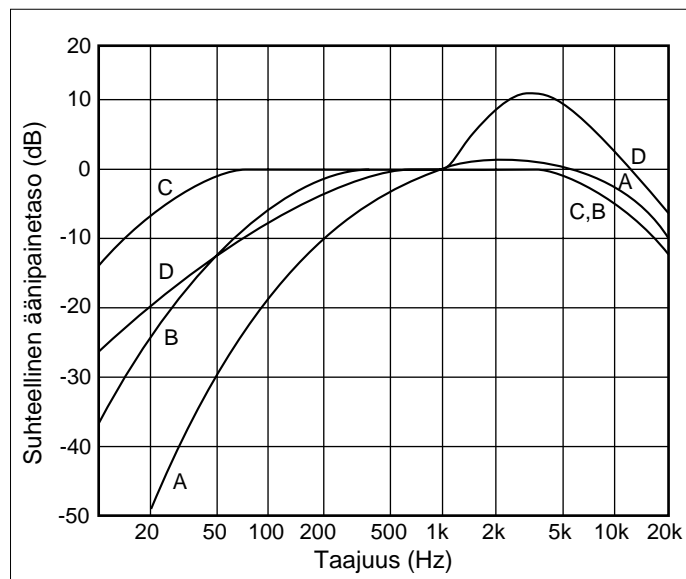
Kuvaa 30 kutsutaan *vakioäänekkyyskäyrästäksi*, koska sen jokainen käyrä ilmaisee kullakin taajuudella sen äänipainetason siniääneksellä, joka aiheuttaa yhtä voimakkaan kuuloaistimuksen kuin vertailuääni taajuudella 1 kHz. Käyrästä määrittee *äänekkyystason* käsitteen. Kullakin käyrällä vallitsee tietty äänekkyystaso. Äänekkyystason yksikkö on *foni*, 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 tyy-

Taulukko 1: Akustisissa mittauksissa suositeltavat keskitaajuudet, oktaavit, puolioktaavit ja terssit.

Keskitaajuus	1/1	1/2	1/3	Keskitaajuus	1/1	1/2	1/3
16	x	x	x	560			
18				630			x
20			x	710		x	
22,4		x		800			x
25			x	900			
28				1000	x	x	x
31,5	x	x	x	1120			
35,5				1250			x
40			x	1400		x	
45		x		1600			x
50			x	1800			
56				2000	x	x	x
63	x	x	x	2240			
71				2500			x
80			x	2800		x	
90		x		3150			x
100			x	3550			
112				4000	x	x	x
125	x	x	x	4500			
140				5000			x
160			x	5600		x	
180		x		6300			x
200			x	7100			
224				8000	x	x	x
250	x	x	x	9000			
280				10000			x
315			x	11200		x	
355		x		12500			x
400			x	14000			
450				16000	x	x	x
500	x	x	x				

pillinen psykoakustinen suure, sillä se kuvaa subjektiivisesti koettavaa aistimuksen voimakkuutta. Äänekkyydelle on olemassa vastaava absoluuttinen suure, jota kutsutaan *äänekkyydeksi*, ja jonka mittayksikkö on *soni*. Yksi soni vastaa 40 fonia ja 10 fonin lisäys kaksinkertaistaa sonimäärän.

Äänipaine on akustisten mittausten fysikaalinen perussuure. Koska kuuloherkkyys taajuuden funktiona ei ole vakio, ei äänipaine kuvasta erityisen hyvin äänen voimakkuutta kuulon kannalta. Esimerkiksi melun voimakkuutta mitattaessa ei äänipaine tai äänipainetaso kerro häiritsevyydestä tai haitallisuudesta luotettavaa arviota, vaan tarvitaan jokin paremmin kuulon toimintaa vastaava mittayksikkö. Kun äänekkyyys tai äänekkyydetaso on perinteisellä mittaustekniikalla ollut liian vaikeasti mitattavissa, on päädytty



Kuva 32: Äänitasomittauksissa käytettävien painotussuotimien A, B, C ja D taajuusvasteet.

kuuloherkkyyssäyrän yksinkertaistuksiin. Valitsemalla sopiva taajuuspainotus voidaan kuvan 30 herkkyyssäyriä approksimoida enemmän tai vähemmän tarkasti. Standardoituista painotussuotimista A, B, C, ja D (kuva 32) kukin jäljittelee likimäärin kuulon herkkyyttä erilaisilla kriteereillä arvioituna.

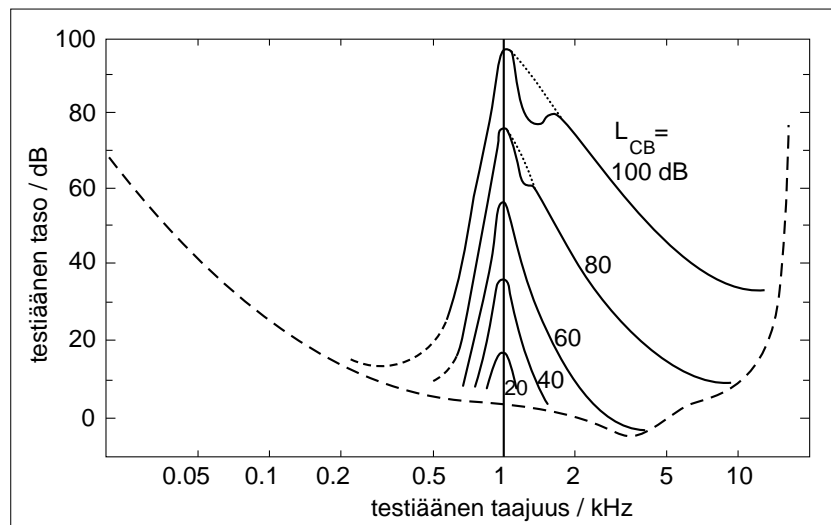
Taajuuspainotettua äänipainetasoa kutsutaan *äänitasoksi* ja sitä mittaavaa laitetta äänitasomittariksi eli kansanomaisesti melumittariksi. Painotussuotimista yleiseen käyttöön on jäänyt lähes yksinomaan A-painotus. A-painotetun äänitason mittayksikkö on myös desibeli, mutta erotukseksi äänipainetasosta sitä merkitään toisinaan lyhenteellä dB(A) tai dBA.

2.3 Psykoakustiikkaa

Kuulojärjestelmän toimintaa koskeva tutkimus voidaan jakaa kahteen päähaaraan: *kuulon fysiologia* ja *psykoakustiikka*. Edellisessä tutkitaan kuulossa tapahtuvia fysiologisia ilmiöitä ja ääniärsykkeiden aiheuttamia vasteita, jotka ovat mitattavissa. Psykoakustikassa [19, 20] tutkitaan välillisesti kuulijan kokemia ääniaistimuksia ja äänen vaikutuksia koehenkilön vastausten tai reaktioiden perusteella. Psykoakustisin kokein voidaan tutkia periaatteessa mitä tahansa kuulon toimintoja, mutta johdonmukaisimpia tuloksia saadaan kokeista, jotka liittyvät kuulon perusominaisuuksiin.

Psykoakustikassa käytetään monia käsitteitä ja mittayksiköitä, jotka suhteuttavat fyysikaalisia suureita subjektiivisesti koettuihin asteikkoihin. Kun tutkitaan äänen fyysikaalista ominaisuutta, esimerkiksi äänipainetasoa suhteessa subjektiivisesti koettuun voimakkuuteen, tässä tapauksessa äänekkyytasoon, kuvataan näiden keskinäisiä riippuvuuksia *psykofyysisten funktioiden* avulla. Ne voidaan estimoida erilaisten kuuntelukokeiden avulla, joissa herätteenä on fyysikaalinen ääni ja vasteena on koehenkilön antamat vastaukset tai tahdonalaiset reaktiot.

Tässä yhteydessä tarkastellaan eräitä psykoakustisia ilmiöitä ja näihin liittyviä suureita ainoastaan käsitelmääritysinä.



Kuva 33: Kapeakaistaisen äänen (1 kHz) aiheuttama peittovaikutus (peittokuulokynnys) äänen tason funktiona.

2.3.1 Peittoilmiö

Voimakas ääni peittää kuulumattomaksi heikomman samantaajuisen ja -aikaisen äänen. Tämä *peittovaikutus* [20] leviää myös läheisille taajuuksille ja ajanhetkille. *Taajuuspeitto* käyttäytyy siten, että erityisesti voimakkailla äänillä peittovaikutus leviää tehokkaammin suurille kuin pienille taajuuksille kuvan 33 mukaan. *Aikapeitto* ilmenee siten, että *jälkipeitto* ulottuu vähittäin vaimentuen noin 200 ms päähän peittävän äänen jälkeen, mutta myös *esipeitto* ulottuu hieman taaksepäin peittävän äänen alkuhetkeen nähden.

2.3.2 Äänenkorkeus

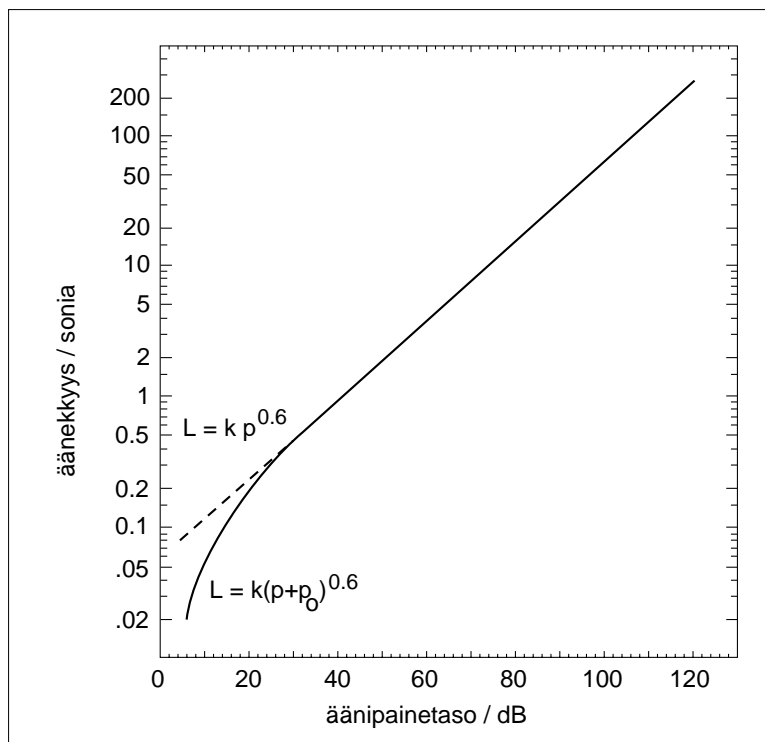
Subjektiiivisesti aistittu äänenkorkeus [20] siniääneksellä tai jaksollisella äänellä kasvaa taajuuden kasvaessa, mutta suhde ei ole lineaarinen. Perinteisin äänenkorkeusasteikko on *meliasteikko*, jonka mukaan pienillä taajuuksilla äänenkorkeus on suoraan verrannollinen ja suurilla taajuuksilla logaritmisesti verrannollinen taajuuteen (Hz-lukemaan) nähden.

Nykyisin teknisissä sovelluksissa käytetään yleisimmin *Bark-asteikkoa*. Bark-asteikko liittyy läheisesti kriittisen kaistan käsitteeseen. Kuulon kyky eritellä äänen taajuuskomponentteja toisistaan on rajallinen. Erityisesti laajakaistaisessa äänessä lähekkäin sijaitsevat osäänet kuulo käsittelee yhtenä kokonaisuutena. Sellaista taajuuskaistaa jonkin keskitaajuuden ympäristössä, jonka kuulo käsittelee tällä tavalla, kutsutaan kriittiseksi kaistaksi. Pienillä taajuuksilla (alle 500 Hz) kriittisen kaistan leveys on noin 100 Hz ja suurilla taajuuksilla (yli 500 Hz) se on verrannollinen keskitaajuuteen siten, että se on hieman 1/3-oktaavia kapeampi¹⁴.

Kun kriittisiä kaistoja asetetaan vieretysten siten, että kuulon koko taajuusalue (20 ... 20000 Hz) katetaan, saadaan 24 kaistaa. Kun tästä muodostetaan äänenkorkeusasteikko merkitsemällä 1 Bark = 1 kriittinen kaista, saadaan Bark-asteikko

$$z/\text{Bark} \approx 13 \arctan(0,76 f/\text{kHz}) + 3,5 \arctan(f/7,5 \text{kHz})^2 \quad (35)$$

¹⁴Oktaavi on taajuussuhde 2 : 1, jolloin 1/3-oktaavi vastaa taajuussuhdetta $\sqrt[3]{2}$.



Kuva 34: Siniäänksen äänekkyyks (soneina) äänekkyytason (foneina) funktiona.

missä z on Bark-lukema ja f on kHz-lukema.

ERB-asteikko (ERB, Equivalent Rectangular Bandwidth) [21] on teoreettisesti oikeaoppisin äänenkorkeuden asteikko ja sen käyttö on yleistymässä. Äänenkorkeuden käsitetään myös usein olevan logaritmisessa suhteessa taajuuteen (esim. musiikissa ja audiotekniikassa).

2.3.3 Äänekkyyks ja äänekkyytaso

Subjektiiivisesti koettua äänenvoimakkuutta kutsutaan *äänekkyydeksi* [20]. Sen mittayksikkö on soni. Yksi soni vastaa 1 kHz siniäänestä äänipainetasolla 40 dB. Jokaista 10 dB lisäystä kohti äänekkyyks soneina kaksinkertaistuu. Äänekkyyks on suhteessa äänipaineeseen p ([Pa], 1 kHz) kaavan

$$N = k \cdot p^{0,6} \quad (36)$$

mukaan, missä N on äänekkyyks [sonia] ja k on verrannollisuusvakio.

Äänekkyyks on keskeinen psykoakustinen käsite, sillä äänekkyyksaistimuksen muodostumista koskeva teoria liittää yhteen ja selittää monia kuulon ilmiöitä. Äänekkyyden laskentaa varten on standardoitu ns. Zwickerin menetelmä (ISO 532B) ja ns. Stevensin menetelmä (ISO 532A). Periaatteena on laskea kullekin kriittiselle kaistalle tuleva osäänekkyyks ja näiden summana saadaan kokonaisuäänekkyyks.

Äänekkyytaso (kts kohta 2.2.1) on äänekkyyden ohella toinen tapa ilmoittaa subjektiivista äänenvoimakkuutta ja se ilmaistaan yksiköllä [foni]. Siniäänksellä taajuudella 1 kHz fonimäärä vastaa suoraan äänipainetasoa desibeleinä. Äänekkyyden N ja

äänekkyystason L_L välinen riippuvuus yli 40 dB tasoilla on

$$N = 2^{(L_L - 40)/10} \quad (37)$$

Tämä on esitetty graafisesti 1 kHz taajuiselle äänekselle kuvassa 34.

2.3.4 Äänenväri

Äänenväri on monimutkainen psykoakustinen käsite. Jatkuvilla laajakaistaisilla äänillä Bark-kaistoittain laskettu (auditorinen) spektri kuvaa parhaiten subjektiivista äänenväriin aistimusta. Katkoäänillä aluke eli se, kuinka ääni alkaa, on tärkeä tekijä äänenväriin kanalta.

2.3.5 Äänen subjektiivinen kesto

Äänen subjektiivinen kesto vastaa varsin hyvin objektiivisesti mitattua kestoa paitsi hyvin lyhyillä äänillä (alle 10 ms).

2.3.6 Terävyys

Ääni kuulostaa sitä terävämmältä, mitä voimakkaammin sen spektri keskittyy korkeille taajuuksille. Äänen (subjektiivisen) *terävyyden* mittayksikkö on [acum]. 1 acum vastaa äänen terävyyttä 1 Barkin levyisellä kohinalla 1 kHz keskitaajuuksella ja äänipainetasolla 60 dB. Terävyys lasketaan Bark-kaistoittaisesta spektristä siten, että se kuvaa spektrin painopistettä (1. momentti) Bark-asteikolla. Suuri äänen terävyys merkitsee yleensä korkeaa häiritsevyysastetta.

2.3.7 Vaihteluvoimakkuus

Kuulo pystyy seuraamaan äänen voimakkuuden suhteellisen hitaita vaihteluita siten, että syntyy *vaihteluvoimakkuuden* aistimus, jonka mittayksikkönä on [vacil]. 1 vacil vastaa vaihteluvoimakkuutta 1 amplitudimoduloidulla 1 kHz 60 dB siniäänöksellä, kun modulaatiotaajuus on 4 Hz ja modulaatioaste 100 %. 4 Hz on modulaatiotaajuus, jolle korva on herkin.

2.3.8 Karheus

Jos äänen voimakkuus yhdellä tai usealla kriittisellä kaistalla vaihtelee nopeasti (n. 15 Hz tai nopeammin), kuulostaa ääni karhealta ja epämiellyttävältä. *Karheuden* mittayksikkö on [asper] ja 1 asper vastaa karheutta amplitudimoduloidulla 1 kHz 60 dB siniäänöksellä, kun modulaatiotaajuus on 70 Hz ja modulaatioaste 100 %.

2.3.9 Tonaalisuus

Tonaalisuus kuvaa sitä, kuinka säännöllisen jaksollinen tai 'soinnillinen' ääni on. Alhainen tonaalisuusaste merkitsee sitä, että äänessä ei kuulu jaksollisia ominaisuuksia. Ääriesimerkkinä on kohina.

2.3.10 Häiritsevyys

Äänen *häiritsevyys* on monimutkainen ääneen liittyvää subjektiivinen tekijä, joka riippuu paitsi äänen lyhyt- ja pitkäaikaisista ominaisuuksista, myös lukuisista muista tekijöistä, henkilön psyykkisestä ja fyysisestä tilasta sekä kokemustaustasta. Mikäli olosuhteet vakioidaan hyvin, voidaan äänen luonteesta riippuen saada enemmän tai vähemmän johdonmukaisia tuloksia kuuntelukokeiden avulla. Tällöin saattaa olla mahdollista muodostaa laskennallinen malli äänen häiritsevyydelle, esim. perustuen psykoakustisiin tunnuslukuihin. Äänekkyyys on usein häiritsevyyden perustekijä varsinkin suurilla voimakkuuksilla. Erityisen häiritsevää voi olla ei-toivottu puheääni, mikäli koehenkilön täytyy suorittaa keskittymistä vaativaa tehtävää.

2.4 Melu

Melu voidaan lyhyesti määritellä ääneksi, joka on häiritsevää tai haitallista. Edellisessä tapauksessa se voi aiheuttaa keskittymiskyvyn puutetta, heräämistä unesta, psyykkisiä häiriöitä tai vaikeuksia, ärtyisyyttä ja kiusaantumista. On huomattava, että jonkun henkilön mielestä ääni on melua, mutta toisen mielestä informatiivista tai viihdyttävää ääntä, tai kääntäen.

Selvemmin objektiivinen vaikutus melulla on silloin, kun se on kuulolle haitallista. Tiettyä rajaa suuremmat jatkuvat tai jopa kertaluontoiset meluannokset voivat vaurioittaa kuuloa. Melun sieto tässä suhteessa on myös varraten yksilökohtaista.

Melun syntyyn ja sen torjuntaan fyysikaalisena ilmiönä perehdytään tämän koneakustiiikan kurssiin muissa osissa. Seuraavassa tarkastellaan melun vaikutusta kuulon toimintaan.

2.4.1 Melun ja äänen vaikutus kuuloon

Melun aiheuttamat fyysiset vaikutukset kuulojärjestelmään voivat olla joko tilapäisiä tai pysyviä. Jo hieman puhetta voimakkaampi ääni (n. 70 dB) voi tunteja jatkuessaan aiheuttaa tilapäistä kuulon alenemaa, ts. kuulon herkkyys laskee joillakin taajuuksilla tai koko taajuusalueella. Voimakas, esim. yli 100 dB ääni aiheuttaa tilapäistä alenemaa jo minuuteissa ja voimakas pamaus saa "korvat lukkoon" joksikin aikaa.

Jos meluannos on ollut kohtuullinen, palautuu kuulon herkkyys tilapäisestä alenemasta. Palautuminen edellyttää usien noin kaksinkertaisen ajan meluallistuksen keston nähden. Niinpä rock-konsertin jälkeen voi vielä seuraavana päivänä kuulo olla alentunut ja mahdollisesti esiintyä korvien soimista. Mikäli palautuminen tapahtuu esim. vuorokaudessa ja meluallistus ei ole usein toistuvaa, ei siitä välttämättä synny nopeasti kuulovaurioita.

Varsinaiset meluperäiset kuulovammat syntyvät usein hitaasti ajan kanssa. Hidas kuulon aleneminen on myöskin vaikea havaita ajoissa. Yleensä tällainen kuulovamma johtuu siitä, että sisäkorvan simpukassa olevat aistinsolut vaurioituvat eräänlaisesta yllärasituksesta. Niissä ilmenee aineenvaihduntahäiriöitä tai niiden yläpinnalla olevat värekarvat vioittuvat. Voimakkaassa melussa aistinsolut joutuvat 'työskentelemään' ylikuormitustilassa, jolloin ne voivat turvota ja jopa 'puhjeta', josta seuraa kuulon alenemaa tain menetystä sillä taajuusalueella, jota vastaavassa kohdassa basilaarikalvo tällöin resonoisi.

Kuulon päivittäinen meluallistuksen sieto pitkäaikaisesti on arvioitu olevan noin 85 dB, 8 tuntia päivässä, A-äänitasona mitattuna. Tällä allistuksella on jo merkittävä todennäköisyys saada puhekommunikaatiota haittaava kuulovamma vuosien kuluessa. Kun

melun (päivittäinen) kesto lyhenee, sallitaan korkeampi äänitaso. On osoittautunut, että melua on syytä mitata päivittäisenä energia-annoksena. Tähän perustuu ns. ekvivalenttitason L_{eq} käyttö

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{\sum t_i 10^{L_i/20}}{8 \text{ h}} \quad (38)$$

missä t_i on kunkin yhtäjaksoisen melujakson kesto, L_i vastaava äänitaso ja nimittäjän 8 h normeerausessa käytettävä vorokautinen referenssikesto.

Kaavasta seuraa mm. se, että meluallistustajan puolittaminen sallii tason kasvattamisen 3 dB verran ja 4,8 minuutin ajan taso voi olla 20 dB korkeampi kuin 8 tunnin taso, ts. 105 dB. Tämä on päivittäin toistuvan melun kuulovammariskiraja — yksittäisiä altistuskertoja kuulo sietää paremmin.

Kun melu nousee noin 120 – 130 dB tasolle, aletaan saavuttaa kipuraja, ts. ääniaistimus muuttuu kipuaistimukseksi ja jo suhteellisen lyhyet kestot voivat vahingoittaa kuuloa pysyvästi. Noin 140 – 150 dB yläpuolella jo hetkellinen impulssiääni voi tuhota korvan mekaniismeja. Näin voimakkailla äänillä voi sisäkorvan simpukan lisäksi vaurio kohdistua myös kuuloluihin tai tärykalvoon.

Kuuloon syntyneet vauriot eivät rajoitu pelkästään kuulon herkkyyden alenemiseen, vaan huomattavaan kuulovammaan liittyy mm. suuntakuulon ja äänten erittelyn heikkeneminen, jolloin meluisassa tai kaiuntaisessa ympäristössä on vaikea saada selvää yhtä aikaa kuuluvista äänistä.

Toinen kuulon toimintaa ja elämisen laatua joskus voimakkaastikin haittaava ilmiö on *tinnitus* eli korvien soiminen. Kuulojärjestelmä tuottaa tällöin ääniaistimuksen, vaikka fyysikaalista ääntä ei saapuisikaan korvaan. Tinnitus saattaa johtua monista syistä, mutta voimakkaat iskuäänet voivat olla meluperäisen tinnituksen aiheuttajia.

2.4.2 Kuulon suojaaminen

Paras keino suojautua kuulovammalta on välttää ylisuuria meluannoksia. Tämä asettaa vaatimuksia sekä työpaikkojen, asutun ympäristön ja vapaa-ajan paikkojen äänisuunnittelulle että yksilön omalle aktiviteetille huolehtia kuulostaan. Paras tulos saavuteaan, jos laitteet ja ympäristöt suunnitellaan alunperin vähämeluisiksi.

Aina ei kuitenkaan voida täyttää näitä vaatimuksia esim. taloudellisista tai muista syistä, jolloin kuuloa tulisi suojata erillisin toimenpitein. *Kuulosuojaimet* ovat välineitä, joilla estetään äänen pääsyä kuulojärjestelmään. Kuulosuojaintyyppejä ovat mm. *tulpat*, jotka työnnetään tukkimaan korvakäytävää sekä *kuppisuojaimet*, jotka sulkevat sisäänsä koko ulkokorvan. Kuppisuojaimilla saavutetaan parempi vaimennus. Näiden yhdistelmä toimii vielä paremmin ja erittäin hyvää vaimennusta tarvittaessa voidaan käyttää myös kypärätyyppisiä vaimentimia. Viime aikoina on ryhdytty valmistamaan myös *aktiivisia kuulosuojaimia*, joissa signaalinkäsittelyn avulla tuotetaan melua vaimentavaa vastaaääntä.

Kuulosuojaimet ovat ainakin jossain määrin hankalia ja muita toimintoja haittaavia, josta syystä niiden käytöstä helposti luovutaan. Edellä esitetyn ekvivalenttitason laskentasaännön mukaan lyhytkin oleskelu voimakkaassa melussa ilman kuulon suojausta aiheuttaa kuulovammariskin kasvua, josta syystä kuulosuojaimia tulisi pitää aina oleskeltaessa voimakkaassa melussa.

2.5 Äänenlaatu

Äänenlaatu on monimuotoinen käsite, jonka tulkinta riippuu hyvin paljon äänen luonteesta ja olosuhteista. Äänenlaadun tekniset kysymykset voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan:

- Melun ja häiritsevän äänen haitallisuuden alentaminen. Kun melun äänitaso on nykyisin monissa tapauksissa saatu kuulovammariskin kannalta kyllin alas (esim. 70–80 dB), on äänen häiritsevyyteen tai kiusallisuuteen liittyvät tekijät alkaneet nousta yhä voimakkaammin esiin.
- Informatiivisen tai esteettisen äänen ominaisuuksien parantaminen. Näihin joudutaan kiinnittämään huomiota esimerkiksi äänentoistossa, konserttisalien ja soitinten rakentamisessa sekä puheensiirtotekniikassa.

Yhteisenä tekijänä edellisille on käsite *tuoteäänienlaatu*, jolla on alettu kuvata minkä tahansa äänellisen tuotteen laatuominaisuuksia. Erityisesti suurelle yleisölle myytävien tuotteiden, kuten autot ja kotitalouskoneet, kohdalla asiakas haluaa yhä enemmän ‘elämisen laatua’ ja mukavuustekijöitä, jolloin ääni on monesti hyvinkin tärkeä tekijä. Esimerkiksi käsitteellä *melun laatu* tarkoitetaan muuten meluna koettavan tuoteäänien kehittämistä siten, että sen negatiiviset vaikutukset minimoituisivat ja positiiviset vahvistuisivat. Positiivisiin kuuluu mm. eräänlainen *ääni-identiteetti*, ts. tuotteen erottuminen ja tunnistuminen positiivisen äänikuvan perusteella. Suuntaus kohti laadukasta tuoteääntä tulee todennäköisesti jatkumaan, mistä syystä mm. koneensuunnittelussa tämä tulisi yhä useammin ottaa yhdeksi laadukkaan ja siten kilpailukykyisen tuotteen tärkeistä suunnittelukriteereistä.

3 ÄÄNI SIGNAALEINA JA SIGNAALINKÄSITTELY

Ääni fysikaalisena ilmiönä on väliaineen värähtelyä tai aaltoliikettä. Kun tarkkailemme ääni-ilmiötä, esimerkiksi äänipaineen vaihtelua jossakin avaruuden pisteessä ajan funktiona, on tämä rekisteröity aikafunktio *äänisignaali*. Jos ääni muunnetaan mikrofonilla sähköiseen muotoon, saamme signaalin, joka on erityisen käyttökelpoinen helpon muokattavuutensa vuoksi (esim. vahvistaminen ja suodatus). Sähköisiä signaaleja voidaan myös analysoida ja syntetisoida (= tuottaa). Ajan suhteen jatkuvina määriteltyjen signaalifunktioiden muokkausta esim. elektronisin piirein kutsutaan *analogiseksi signaalinkäsittelyksi*. Kun aikajatkuva signaali muunnetaan aikadiskreetiksi ottamalla siitä näytteitä ja nämä näytteet muunnetaan edelleen lukujonoksi digitaaliseen muotoon, voidaan siihen soveltaa *digitaalisen signaalinkäsittelyn* (DSP, digital signal processing) tehokkaita ja monipuolisia menetelmiä. Tässä luvussa esitetään katsaus eräisiin äänitaajuisten signaalien käsittelyn eli *äänenkäsittelyn* peruskäsitteisiin.

3.1 Ääni signaalina

Äänisignaali edellä määritellyssä mielessä on ajan funktio, joka voidaan kuvata monella tavalla. Signaali voidaan tarpeen mukaan esittää

1. **Matemaattisena funktiona**, esim. sinimuotoinen äänisignaali eli *äänes*

$$y(t) = A \sin 2\pi ft = A \sin \omega t \quad (39)$$

missä A on amplitudi, f on taajuus, ω kulmataajuus ja t on aika, tai toisena esimerkkinä kohinasignaali

$$n(t) = \text{rand}(t) \quad (40)$$

missä $\text{rand}()$ on satunnaislukuarvoinen funktio.

2. **Aikadiskreetissä numeerisessa muodossa** lukusekvenssinä esim.

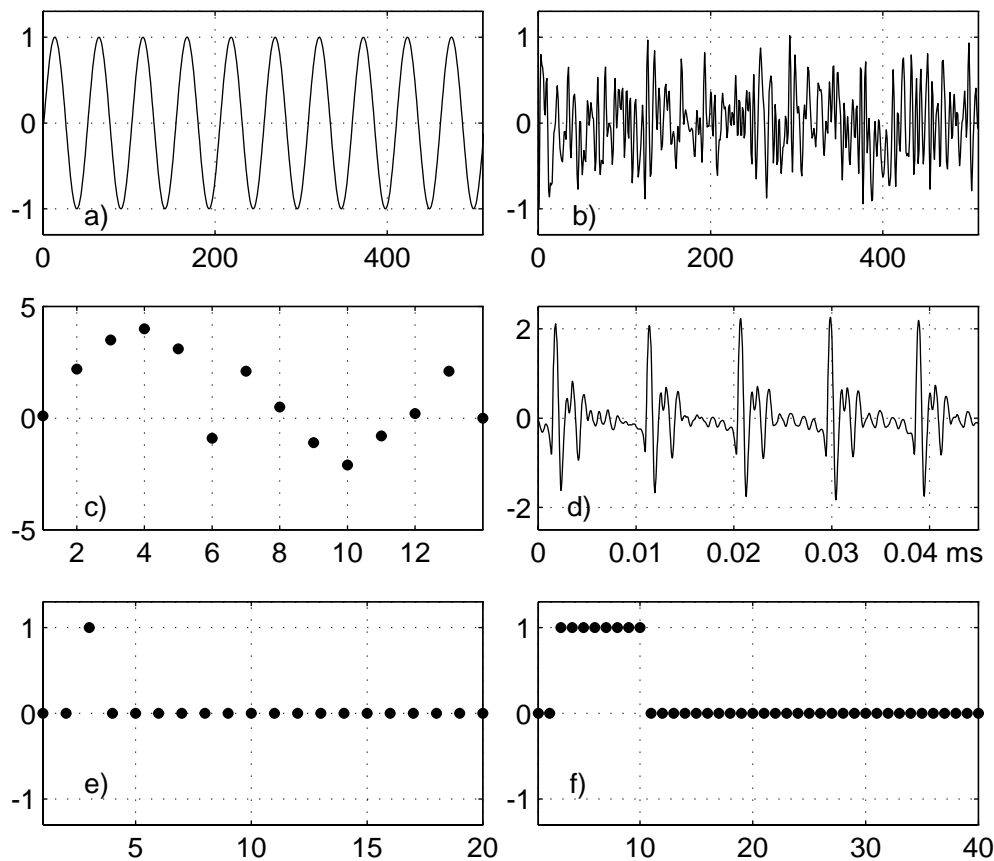
$$x(n) = [0.1 \ 2.2 \ 3.5 \ 4.0 \ 3.1 \ -0.9 \ 2.1 \ 0.5 \ -1.1 \ -2.1 \ -0.8 \ 0.2 \ 2.1 \ 0.0] \quad (41)$$

joka matriisilaskennassa on tapana esittää sarakevektorina.

3. **Graafisena esityksenä**, esim. kuva 35, jossa nähdään käyriä osat matemaattisista signaaleista yhtälöissä 39 ja 40, näytesekvenssistä 41, lyhyt jakso puhesignaalista (vokaali /a/), yksikköimpulssi $\delta(n - n_0)$, $n_0 = 3$, sekä äärellisen kestoisen pulssi.

Kaksi ensinmainittua matemaattista signaalia ovat *aikajatkuvia* ja näytesekvenssi 41 sekä impulssi ja pulssi ovat *aikadiskreettejä*¹⁵.

¹⁵Kaikki kuvan signaalit ovat tosiasiaa olleet aikadiskreettejä näytesekvenssejä tietokoneella, vaikka osa onkin tulostettu jatkuvina käyriä.



Kuva 35: Signaalien graafisia esitysmuotoja: a) sinimuotoinen äänisignaali eli äänes, b) kohinasignaali, c) näytesekvenssi (kaava 41), d) puhesignaalinäyte, e) yksikköimpulssi sekä f) äärellisen mittainen pulssi.

3.2 Signaalinkäsittelyn peruskäsitteitä

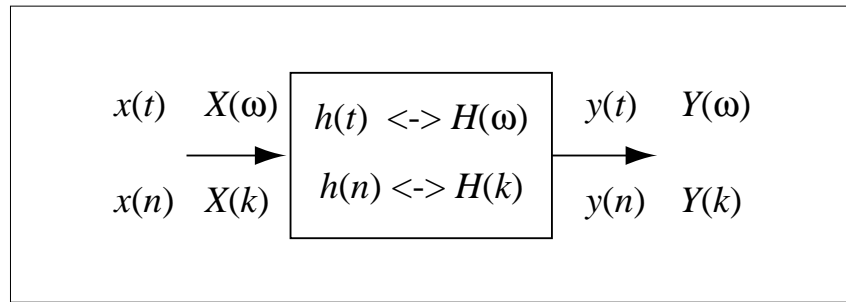
Signaalinkäsittelyssä on joukko käsitteitä ja menetelmiä, joiden tuntemus on tärkeää äänellä tapahtuvan kommunikaation ymmärtämiseksi. Näitä ovat mm. lineaaristen aikainvarianttien järjestelmien ominaisuudet, Fourier-muunnokseen perustuva signaalianalyysi, synteesi ja spektrianalyysi, sekä digitaalinen signaalinkäsittely (DSP), jonka keskeisiä komponentteja ovat digitaalisuotimet. Seuraava yhteenvedo näistä käsitteistä on pinnallinen ja palvelee vain yleiskuvan saamista. Samoin on pyritty pitäytymään mahdollisimman yksinkertaiseen matemaattiseen formulointiin. Yksityiskohtaisempaa tietoa on löydettävissä viitteistä, mm. [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31].

3.2.1 Lineaarisuus ja aikainvarianttisuus

Jos tarkasteltavan systeemin lähtösignaali $y(t)$ ajan funktiona riippuu vain tulosignaalista $x(t)$, voidaan tämä ilmaista yleisessä muodossa $y(t) = h\{x(t)\}$. Järjestelmä on *lineaarinen* ja *aikainvariantti* (LTI, *linear time-invariant*), jos sille pätee

$$h\{Ax_1(t) + Bx_2(t)\} = Ah\{x_1(t)\} + Bh\{x_2(t)\} \quad (42)$$

missä A ja B ovat vakiokertoimia ja $x_1(t)$ ja $x_2(t)$ ovat kaksi tulosignaalia. LTI-systeemin vaste signaalien summalle on siis signaalien vasteiden summa ja signaalit skaalautuvat



Kuva 36: Lineaarinen aikainvariantti järjestelmä ‘mustana laatikkona’ ja siihen liittyvät matemaattiset käsitteet aika-alueen suureina (pienet kirjaimet) ja taajuusalueen suureina (suuret kirjaimet).

amplitudinsa suhteen lineaarisesti (vakio kertomalla). Tällaisen järjestelmän toiminta voidaan kuvata täydellisesti aika-alueessa *impulssivasteen* $h(t)$ tai $h(n)$ ja taajuusalueessa *siirtofunktion* $H(w)$ tai $H(k)$ avulla ja pelkistää ‘mustaksi laatikoksi’¹⁶ kuvan 36 mukaisesti. Tällöin muuttuja t viittaa aikaan jatkuvana muuttujana ja n diskreettiin aikamuuttujaan (indeksiin).

LTI-järjestelmän lähtö- ja tulosignaalien suhde on matemaattisesti esitettävissä konvoluutio-operaattorin $*$ avulla

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (43a)$$

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} x(i) h(n - i) \quad (43b)$$

Edellinen muoto pätee aikajatkuville järjestelmille ja sitä kutsutaan konvoluutiointegraaliksi. Jälkimmäinen muoto on aikadiskreeteille järjestelmille ja sitä kutsutaan konvoluutiosummaksi¹⁷. Jos tulosignaali on impulssi, on lähtösignaali yhtä kuin impulssivaste $h(t)$ tai $h(n)$. Muissa tapauksissa lähtösignaali voidaan ajatella eri ajanhetkinä saapuneiden impulssien vasteiden summana, jota konvoluutiointegraali ja -summa kuvaa.

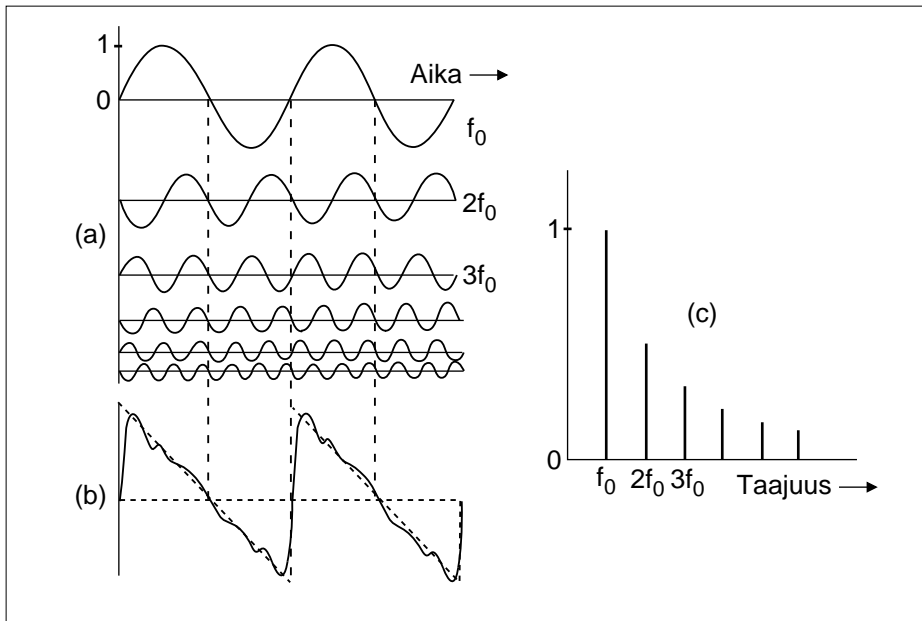
Mikäli järjestelmä ei täytä kriteeriä 42, se voi olla *aikamuuttuva*, ts. sen ominaisuudet muuttuvat ajan funktiona, tai sanan varsinaisessa mielessä *epälineaarinen*, jolloin sen ominaisuudet riippuvat sisääntulosignaalista. Molemmissa tapauksissa järjestelmä voi synnyttää lähtönsä signaalitaajuuksia, joita ei ole sisääntulevassa signaalissa. LTI-järjestelmien matemaattinen analyysi, mallintaminen ja käsittely on huomattavasti helpompaa kuin epälineaaristen ilmiöiden hallinta. Kuulo on hyvä esimerkki järjestelmästä, joka on monessa suhteessa epälineaarinen, jolloin sen matemaattinen mallintaminen on vaikeaa, eikä sille ole olemassa impulssivastetta tai siirtofunktiota em. mielessä.

3.2.2 Fourier-analyysi ja -synteesi

Lineaaristen aikainvarianttien järjestelmien kuvaaminen ja käsittely on usein tehokkaampaa, jos signaalit ja vasteet muunnetaan taajuusalueeseen eli ne esitetään taajuuden funk-

¹⁶Viittaa siihen, että sisäinen rakenne tai tila ei ole tarkkailtavissa.

¹⁷Käytännössä summauksen indeksirajat ovat äärelliset ja reaaliajassa toimiville järjestelmille $h(n)$ on kausaalinen eli $h(n) = 0$ kun $n < 0$.



Kuva 37: Kolmioaallon Fourier-hajoitelma harmonisiin komponentteihinsa.

tiona. Tämä tapahtuu tavallisimmin *Fourier-muunnoksen* avulla:

$$X(\omega) = \mathcal{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (44a)$$

$$X(k) = \mathcal{F}_d\{x(n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jk(2\pi/N)n} \quad (44b)$$

Vielä yleisempi muunnos on Laplace-muunnos, mutta signaalinkäsittelyssä Fourier-muunnos on paljon laajemmin käytetty. Kaava 44a pätee aikajatkuviin tapauksiin ja 44b aikadiskreetteihin. Vastaavat muunnosoperaattorit merkitään tässä $\mathcal{F}\{\cdot\}$ ja $\mathcal{F}_d\{\cdot\}$. Jälkimmäistä kutsutaankin *diskreetiksi Fourier-muunnokseksi*. Se on määritelty äärellisen mittaiselle sekvenssille (N) ja se voidaan laskea erittäin tehokkaasti ns. *nopean Fourier-muunnoksen* (FFT, **f**ast **F**ourier **t**ransform) avulla. Kaavojen 44a ja 44b käänteiset muunnokset ovat

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (45a)$$

$$x(n) = \mathcal{F}_d^{-1}\{X(k)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{jk(2\pi/N)n} \quad (45b)$$

joilla taajuusalue-esitykset muuntuvat takaisin aikasignaaleiksi. Kaavojen 44a ja 44b mukaisia muunnoksia voidaan kutsua *Fourier-analyysiksi* ja kaavojen 45a ja 45b muunnoksia *Fourier-synteesiksi*. Kuvassa 37 on esitetty kolmioaallon syntyminen Fourier-synteesillä harmonisista komponenteistaan (6 harmonista). Tämä signaalipari voidaan toiseen suuntaan tulkita Fourier-analyysinä. Mikä tahansa tietyt jatkuvuusominaisuudet omaava signaali voidaan mielivaltaisella tarkkuudella esittää osakomponenttien summana.

Fourier-muunnoksen tärkeä etu on, että se muuntaa konvoluutio-operaation kertolas-

kuksi:

$$\mathcal{F}\{x(t) * y(t)\} = X(\omega) \cdot Y(\omega) \quad (46a)$$

$$\mathcal{F}_d\{x(n) * y(n)\} = X(k) \cdot Y(k) \quad (46b)$$

Fourier-muunnosta ja sen käänteismuunnosta käyttämällä voidaan konvoluution laskenta suorittaa kertolaskun avulla seuraavasti

$$x(t) * y(t) = \mathcal{F}^{-1}\{X(\omega) \cdot Y(\omega)\} = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{x(t)\} \cdot \mathcal{F}\{y(t)\}\} \quad (47a)$$

$$x(n) * y(n) = \mathcal{F}_d^{-1}\{X(k) \cdot Y(k)\} = \mathcal{F}_d^{-1}\{\mathcal{F}_d\{x(n)\} \cdot \mathcal{F}_d\{y(n)\}\} \quad (47b)$$

3.2.3 Spektrianalyysi

Signaalin esittäminen taajuuskomponenttiensa avulla on tärkeää paitsi yleisen signaalianalyysin kannalta myös siksi, että kuulo suorittaa hieman samantyyppisen analyysin. Äänitajuisia signaaleja tutkitaan usein juuri niiden kuultavien ominaisuuksien selvittämiseksi. Fourier-muunnos tekee tarvittavan analyysin eli hajoitelman taajuuskomponentteihin. Kuulon kannalta tämä on sellaisenaan epätarkoituksenmukainen, koska Fourier-muunnoksen tulos on kompleksinen spektri. Kuulo on jokseenkin epäherkkä vaiheinformaation suhteen, joten tästä syystä ja kuvaamisen helppouden kannalta on parempi käyttää muunnostuloksesta ainoastaan itseisarvo eli magnitudispektri. Lisäksi korva on pikemminkin logaritminen kuin lineaarinen amplitudin suhteen. Kun myös tulosten visualisoinnin kannalta on edullista käyttää logaritmista magnitudiasteikkoa, on päädytty esittämään audiosignaalien *spektrianalyysin* tulokset seuraavasti magnitudispektreinä:

$$|X(\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |X(\omega)| \quad (48a)$$

$$|X(k)|_{dB} = 20 \log_{10} |X(k)| \quad (48b)$$

Vaihefunktio $\varphi(\omega) = \arg\{X(\omega)\}$ tai $\varphi(k) = \arg\{X(k)\}$ voidaan, mikäli halutaan, laskea myös. Tällöin on muistettava, että vaihe on syklinen, joten haluttaessa jatkuva vaihekäyrä se tulee suoristaa. Vaihe jaettuna kulmataajuudella antaa *vaiheviiveen* τ_p ja vaiheen derivaatta taajuuden suhteen antaa *ryhmäviiveen* τ_g (huomaa miinusmerkit):

$$\tau_p(\omega) = -\varphi(\omega)/\omega \quad (49a)$$

$$\tau_g(\omega) = -d\varphi(\omega)/d\omega \quad (49b)$$

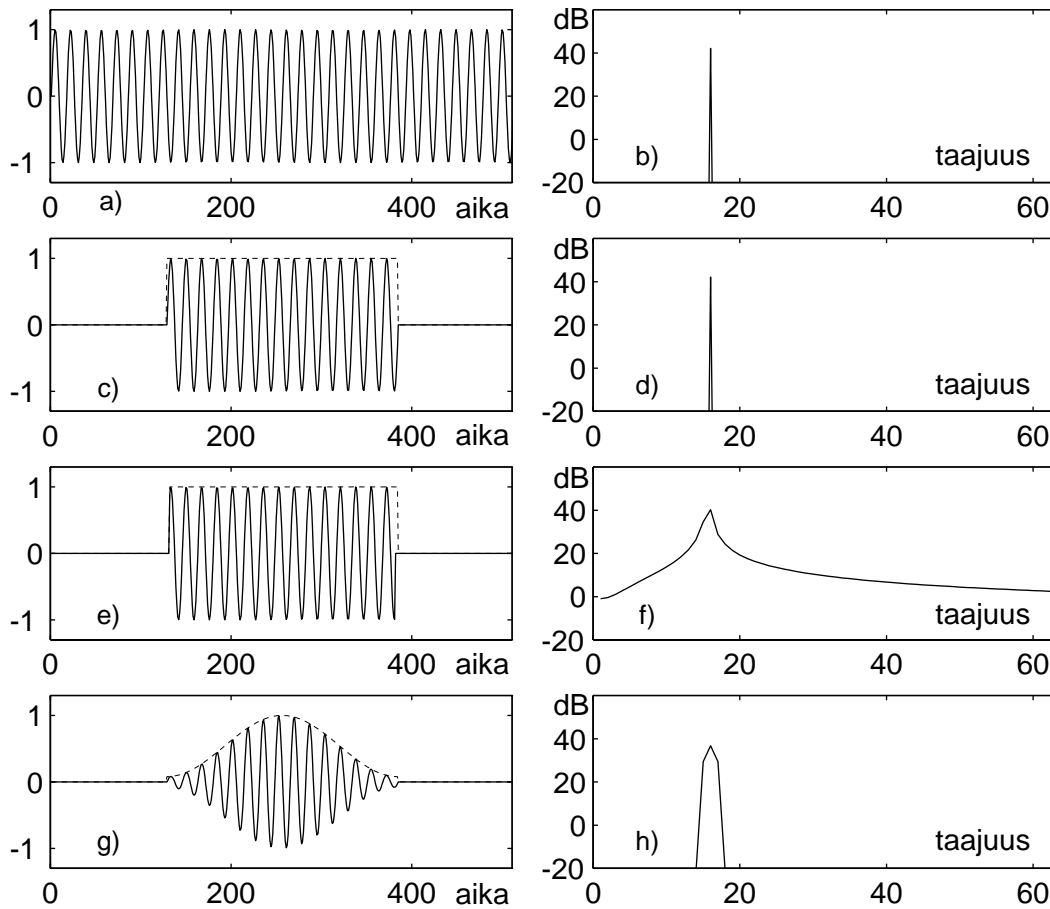
Vaiheviive edustaa itse signaalikomponentin viivettä ja ryhmäviive signaalin modulaation (esim. amplitudiverhokäyrän) viivettä.

Koska tutkittavien signaalien spektriominaisuudet muuttuvat yleensä ajan funktiona, on tarpeen suorittaa spektrianalyysi ajassa lokalisoidusti. Tämän toteuttamiseksi sovelletaan *ikkunointia*, missä signaalifunktio kerrotaan (painotetaan) ikkunafunktiolla $w(t)$ (nollasta poikkeava vain äärellisen ajan) siten, että esimerkiksi Fourier-muunnos lasketaan

$$X(\omega) = \int w(t) x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (50a)$$

$$X(k) = \sum_n w(n) x(n) e^{-jk(2\pi/N)n} \quad (50b)$$

Yleisiä ikkunafunktioita ovat mm. *Hamming*-, *hanning*-, *Blackman* ja *Kaiser*-ikkunat. Huomattakoon, että signaalin poimiminen tietyltä aikaväliltä ja nollaaminen tämän välin



Kuva 38: Signaalianalyysi Fourier-muunnoksen avulla: a) sinisignaali (äänes) aikafunktiona ja b) sen spektri, c) perusjakson kanssa synkroninen suorakaideikkuna ja d) sillä saatu spektri, e) epäsynkroninen suorakaideikkuna ja f) vastaava spektri, sekä g) Hamming-ikkunoitu signaali ja tällä saatu spektri.

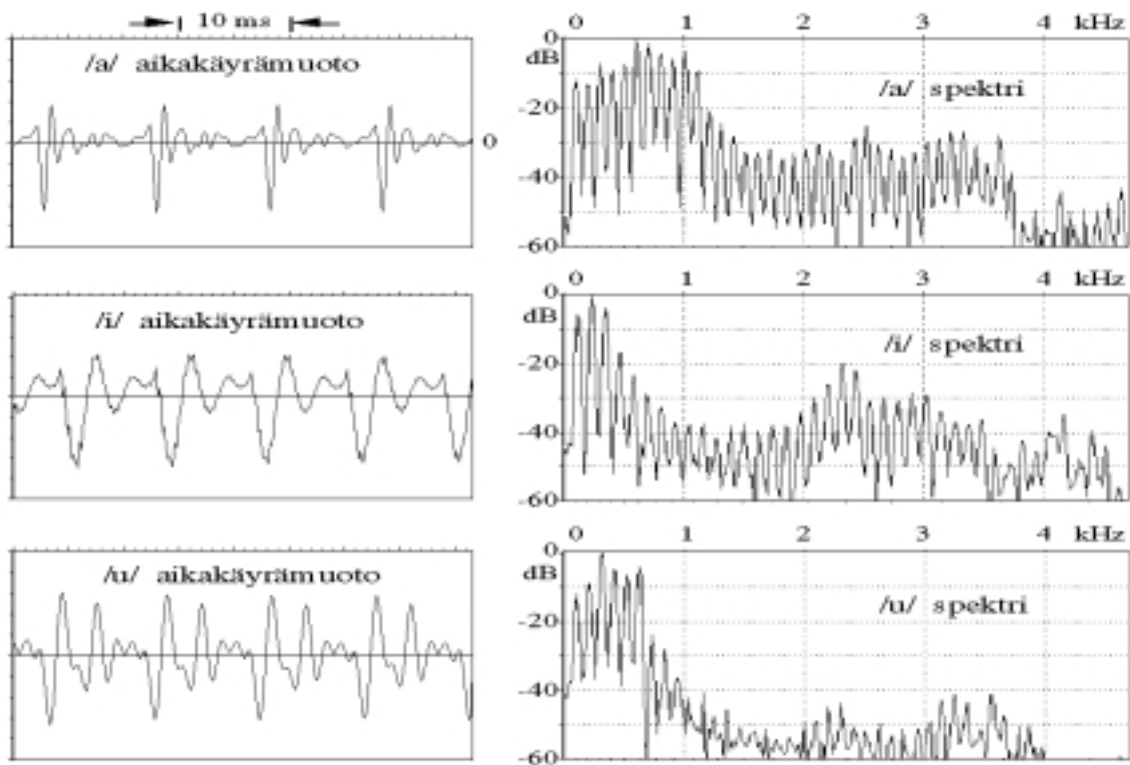
ulkopuolella edustaa *suorakaideikkunaa*. Kuvassa 38 on esitetty sinisignaali, kaksi sen suorakaideikkunoitua versiota, Hamming-ikkunoitu versio, sekä näiden spektrit. Kun suorakaideikkuna osuu sopivasti synkroniin signaalin jakson kanssa (kuva 38c), on se ihanteellinen ikkunamuoto. Kuvassa 38e suorakaideikkuna osuu mahdollisimman huonosti, jolloin spektri leviää pahasti. Hamming-ikkuna (kuva 38g) sensijaan toimii aina verraten hyvin, vaikkakin spektri leviää huipuistaan.

Esimerkkejä todellisista signaaleista ja niistä lasketuista spektreistä nähdään kuvassa 39, joka esittää kolmea vokaaliäännettä /a/, /i/ ja /u/.

3.2.4 Z-muunnos

Digitaalisessa signaalinkäsittelyssä keskeisen tärkeä muunnostyyppi on z-muunnos. Siinä käytettävä perusmuuttuja voidaan tulkita aikadiskreeteissä järjestelmissä esiintyvän *yk-sikköviiveen* eli näytevälin T ilmentymäksi, jolloin sen yhteys Fourier-muunnokseen on

$$z^{-1} = e^{-j\omega T} \quad (51)$$



Kuva 39: Kolmen vokaalin /a/, /i/ ja /u/ aikakäyrämuodot ja spektrit.

Tämän perusteella impulssivasteesta tai näytesekvenssistä $h(n)$ saadaan z-muunnos

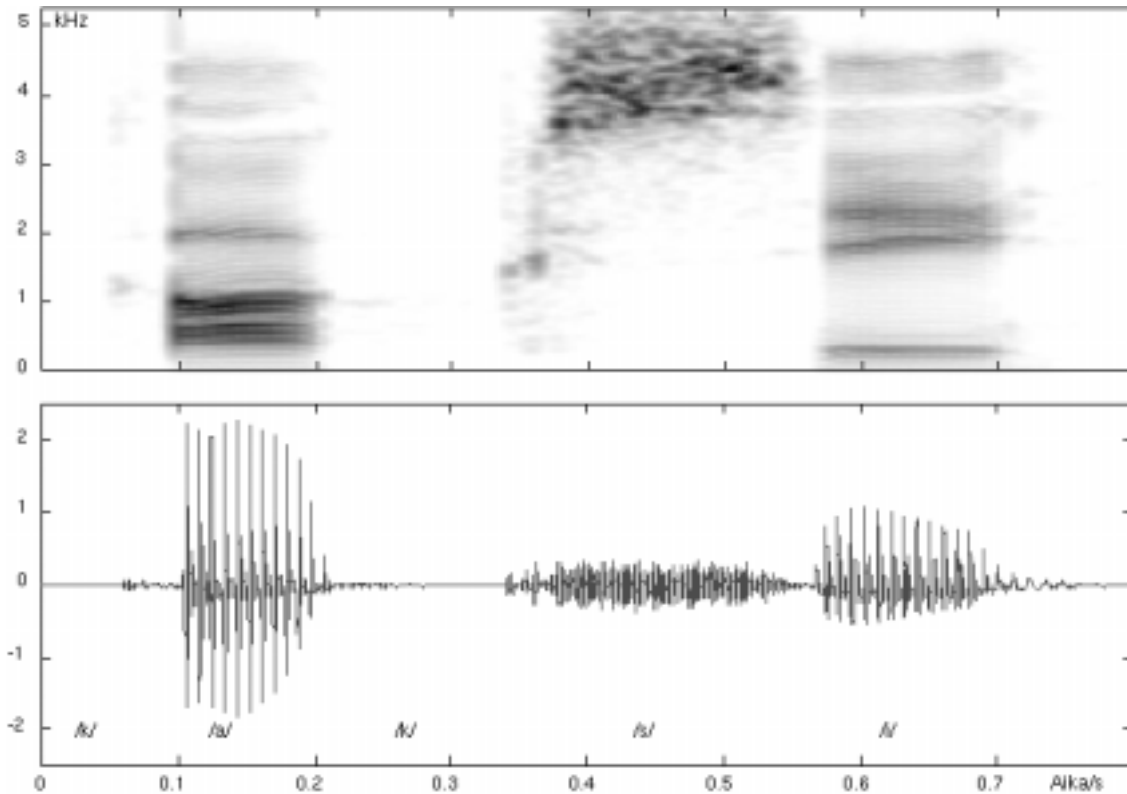
$$H(z) = \mathcal{Z}\{h(n)\} = \sum_n h(n) z^{-n} \quad (52)$$

Z-muunnos on tärkeä mm. digitaalisuodinten suunnittelussa (kts. 3.3.1).

3.2.5 Aika-taajuusesitykset

Koska kaikki todellisuudessa esiintyvät äänet muuttuvat spektriominaisuuksiltaan ajan funktiona, on tarkoituksenmukaista laskea spektrejä sopivan mittaista ja muotoista aikaikkunaa käyttäen. Esimerkiksi puhesignaalin on yleensä syytä käyttää noin 20–25 ms Hamming-ikkunaa, jotta ikkunaan mahtuu vähintään puheen pari perusjaksoa kerrallaan. Lyhyemmällä ikkunalla alkaa signaalin jaksollinen vaihtelu ilmetä peräkkäisten spektrien vaihteluna, kun taas pidempää ikkunaa käytettäessä eivät nopeat muutokset kuvaudu enää analyysituloksessa. Peräkkäiset ikkunat on syytä sijoittaa esim. 10–12 ms välein, jotta ne menevät osittain limittäin. Näin saatua spektrien sekvenssiä, itse asiassa magnitudia ajan ja tajuuden funktiona, kutsutaan *lyhytaikaisspektri-analyysiksi* ja spektrijonon graafista esitystä *spektrogrammiksi*.

Tulos voidaan visualisoida siten, että magnitudi esitetään aika-taajuus-tasossa harmaansävyillä tai värien avulla koodattuna. Yleisin tapa puhesignaaleiden tapauksessa on harmaansävyin esitetty spektrogrammi. Esimerkkinä tästä on kuvassa 40 sanasta ‘kaksi’ laskettu spektrogrammi. Formanttien eli spektrihiippujen sijainti ja liikkuminen ajan funktiona, kuten myös s-äänteen korkeataajuinen kohina näkyvät selvästi.



Kuva 40: Sanasta /kaksi/ laskettu spektrogrammi ja siihen aikatahdistettu aaltomuoto.

Lyhytaikasspektri on erikoistapaus *aika-taajuus-esityksistä*, joista muita esimerkkejä ovat mm. *aalloe-* eli *wavelet-analyysi* [32, 33] ja *Wigner-jakauma* [33]. Kukin näistä jakaa aika-taajuus-tason osiin eri tavoin. Yleisestä epätarkkuusperiaatteesta johtuen aika- ja taajuusresoluutiot ovat kääntäen verrannollisia, ts. aikaresoluution parantaminen esim. aikaikkunaa lyhentämällä heikentää taajuusresoluutiota ja päinvastoin. Wavelet-analyysissä taajuuserottelu (resoluutio) on suoraan verrannollinen analyysikaistan keskitajuuteen. Wigner-jakauma pystyy ylittämään epätarkkuusperiaatteen rajoitukset antamalla samalla kertaa sekä hyvän aika- että taajuuserottelun, mutta hinta tästä on, että saatavassa spektrogrammissa esiintyy ‘virhetermejä’, ts. fyysikaalisesti ei-olemassaolevia komponentteja.

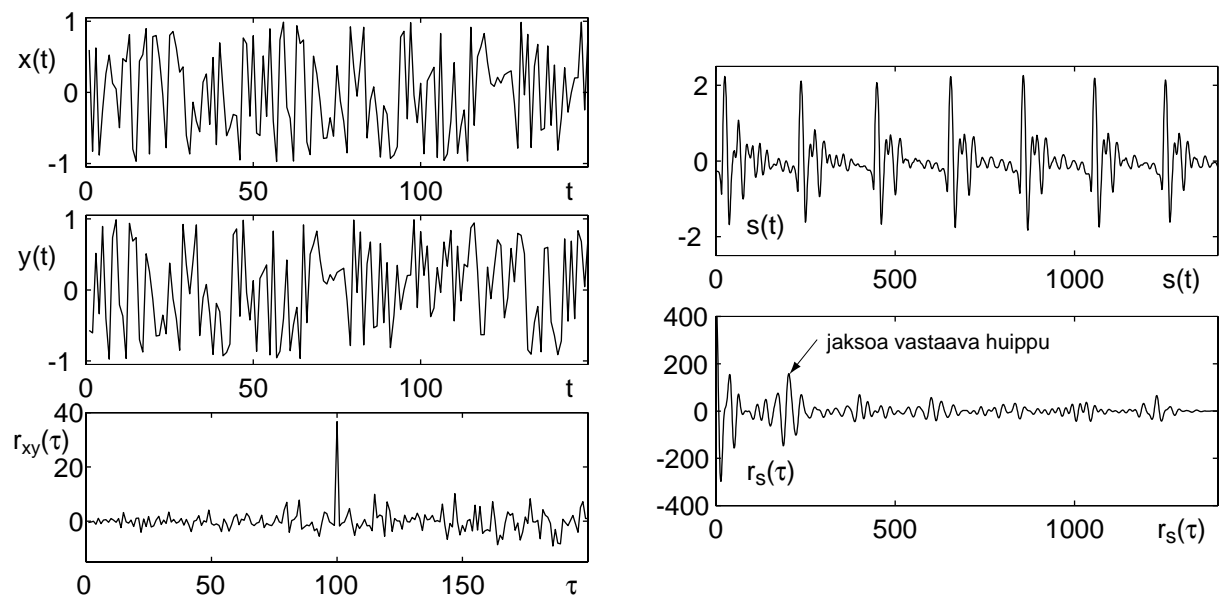
3.2.6 Auto- ja ristikorrelaatio

Kahden signaalin keskinäistä ajallista samankaltaisuutta voidaan analysoida niiden *ristikorrelaation* avulla ja yksittäisen signaalin periodisuuden eli jaksollisuuden ominaisuuksia *autokorrelaation* avulla. Näillä käsitteillä on käyttöä myöhemmin mm. kuulon toiminta-periaatteita selitettäessä.

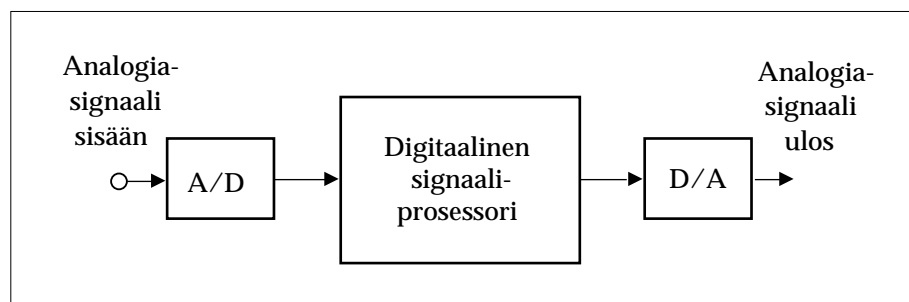
Ristikorrelaatiofunktion laskenta tapahtuu seuraavasti:

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) y(t + \tau) dt \quad (53a)$$

$$r_{xy}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) y(i + k) \quad (53b)$$



Kuva 41: Signaali $x(t)$ ja sen viivästetty versio $x(t - 100)$ sekä näiden ristikorrelaatio $r(\tau)$ vasemmalla; jaksollinen puhesignaali $s(t)$ ja sen autokorrelaatio $r_s(\tau)$ oikealla.



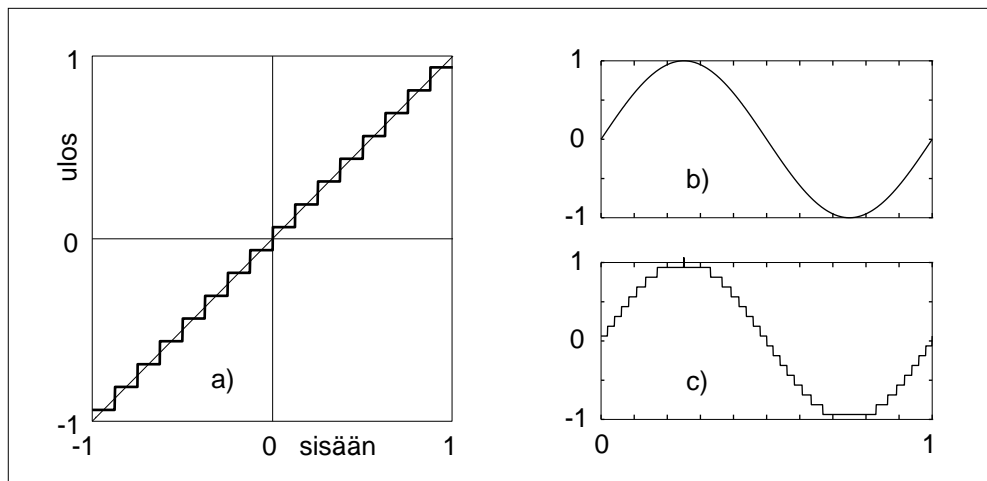
Kuva 42: Digitaalisen signaalinkäsittelyn toteuttaminen analogiasignaaleille: A/D-muunnos, signaaliprosessori, D/A-muunnos.

Autokorrelaation laskenta on muuten sama, mutta $y = x$. Kuvassa 41 on esitelty vasemmalla korrelaatiofunktio (alinna), kun korreloitavina signaaleina on satunnaiskohina ja sen viivästetty versio. Kohinaluonteesta huolimatta korrelaatiofunktioista on selvästi nähtävissä piikki, joka edustaa signaalien keskinäistä aikaviivettä.

Kuvan 41 oikeanpuoleisessa osassa on esitetty jaksollinen puhesignaali (vokaali) ja sen autokorrelaatiofunktio. Autokorrelaatiofunktiossa on maksimit signaalin jaksonpituuden ja sen monikertojen kohdilla.

3.3 Digitaalinen signaalinkäsittely (DSP)

Digitaalinen signaalinkäsittely (digital signal processing, DSP) [22, 25, 26] perustuu diskreettiaikaisuuteen ja numeeriseen laskentaan. Mikäli käsiteltävä signaali on alunperin analoginen (aikajatkua), se tulee muuntaa digitaalseksi *A/D-muunnoksella* (analogia-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 42).



Kuva 43: Analogiasignaalin kvantisointi (PCM-koodaus) neljän bitin tarkkuudella eli kahdeksalla diskreetillä tasolla: a) kvantisoinnin ominaiskäyrä, b) analoginen sinisignaali, c) kvantisoitu sinisignaali.

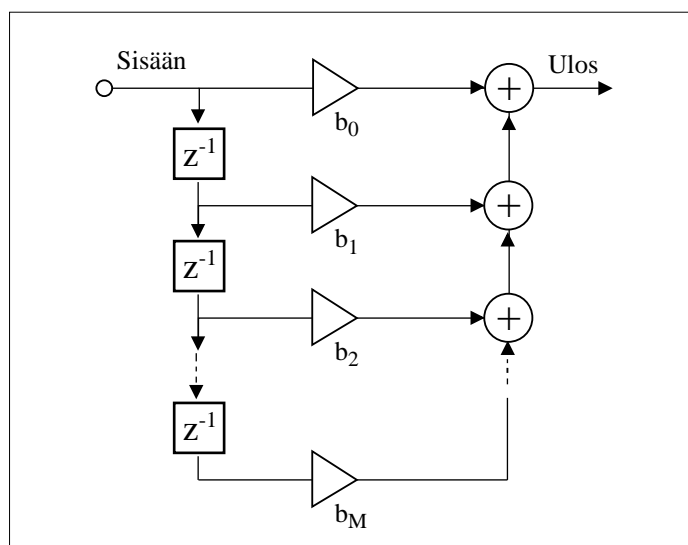
Muunnoksissa täytyy ottaa huomioon Nyquistin näytteenottoteoreema, ts. analoginen signaali kuvautuu diskreetiksi virheettömästi vain jos *näytetaajuus* on vähintään kaksi kertaa suurin signaalissa esiintyvä taaajuus. Tämän rajataajuuden yläpuoliset signaalikomponentit *aliasoituvat* eli peilautuvat *Nyquist-taajuuden* (= puolet näytetaajuudesta) alapuolelle väärinä 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 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 43 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. Koska muunnoksen suorittama *kvantisointi* aiheuttaa kohinanomaista virhettä, voidaan puhua kvantisointikohinasta. *Signaali-kohinasuhde* paranee 6 dB jokaista lisäbittiä kohden, joten usein käytetty 16 bitin muunnostarkkuus antaa maksimissaan 96 dB SN-suhteen. Koska kuulon dynamiikka-alue¹⁸ on noin 130 dB, vaatisi tämä jopa yli 22 bitin tarkkuuden. Puheen PCM-koodaukseen käytetään yleensä 8 bitin muunnosta logaritmisella amplitudisteikolla (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 signaalinkäsittelytoimintoja, kunhan se vain ohjelmoidaan tarkoitukseen sopivasti. Esi-

¹⁸*Dynamiikka* = käyttökelpoinen signaalitason vaihtelualue yliohtautumisen ja taustahäiriöiden asettaman pohjatason välillä.



Kuva 44: FIR-suotimen laskentaperiaate, missä z^{-1} on yksikköviive ja kertoimet b_i ovat impulssivasteen näytteitä vastaavia suodinkertoimia.

merkiksi reaaliaikainen spektrianalyysi voidaan toteuttaa nopean Fourier-muunnoksen eli FFT:n avulla. Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti kahta tärkeää signaalinkäsittelymenetelmien ryhmää, digitaalisuodatusta ja lineaariprediktiota.

3.3.1 Digitaalisuodatus

Digitaalisuotimella [29, 27, 34] voidaan toteuttaa mielivaltainen kaistarajoitettu lineaarisen järjestelmän siirtofunktio (vrt. kuva 36). Digitaalisuotimien päätyypit ovat FIR-suodin, jolla on äärellisen kestoinen impulssivaste, sekä IIR-suodin, jonka impulssivaste on äärettömän pitkä.

FIR-suodin toteutetaan kuvan 44 mukaisella periaatteella. Suodinkertoimien b_n arvoina ovat suoraan impulssivasteen $h(n)$ näytteiden arvot. Siirtofunktio voidaan ilmaista z -muunnosmuodossa

$$H_{FIR}(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i} = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{N-1} z^{-(N-1)} \quad (54)$$

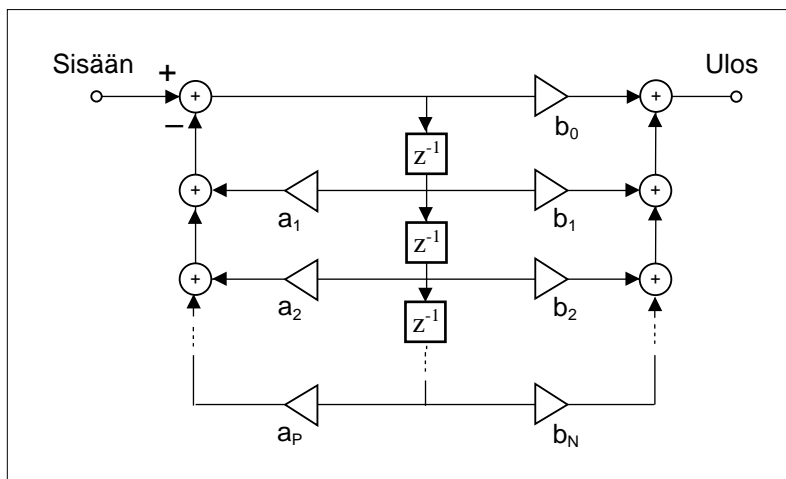
FIR-suotimien suunnittelu ja käsittely on verraten yksinkertaista, mutta ne voivat olla laskennallisesti raskaita, koska usein tarvitaan suhteellisen korkeaa astelukua.

IIR-suotimen z -muunnossiirtofunktio on muotoa

$$H_{IIR}(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{P-1} a_i z^{-i}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{N-1} z^{-(N-1)}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{P-1} z^{-(P-1)}} \quad (55)$$

IIR-suotimen tyypillinen toteutus, ns. suoramuoto-II, on esitetty kuvassa 45. Se eroaa FIR-suotimesta olennaisesti siten, että siinä on takaisinkytkentäreittejä kertoimien a_i kautta. Tästä syystä IIR-suodin voi olla epästabiili eli sen vaste voi amplitudiltaan kasvaa rajatta, ellei suunnittelussa oteta huomioon stabiilisuuskriteerejä¹⁹.

¹⁹Stabiilisuus edellyttää, että siirtofunktion navat eli kaavan 55 nimittäjän nollakohdat ovat kompleksitasossa yksikköympyrän sisällä eli $|z| < 1$. Siirtofunktion nolliille eli osoittajan nollakohdille ei ole asetettu stabiilisuusrajoituksia.



Kuva 45: IIR-suotimen ns. suoramuoto-II:n laskentaperiaate, missä kertoimet b_i ovat FIR-rakennetta vastaavia ja a_i -kertoimet rekursiivisen osan takaisinkytkentäkertoimia.

3.3.2 Signaali-kohinasuhde

Kohinaluonteisten ym. häiriöiden vaikutusta hyötysignaalin kuulemiseen kuvataan *signaali-kohinasuhteella*, joka ilmoitetaan desibeleinä

$$SNR = 10 \log_{10} (P_S/P_N) \quad (56)$$

missä P_S on hyötysignaalin teho ja P_N häiriösignaalin teho. Tapauksesta riippuu, millaisen aikaikkunan tai -kehyksen puitteissa tehot määritellään. Mikäli tehoja laskettaessa ei oteta huomioon hyöty- ja häiriösignaalien spektrien erilaisuutta, voi SNR olla kuulon kannalta pahimmassa tapauksessa varsin hyödytön tai harhaanjohtava mittaluku.

Viitteet

- [1] T. D. Rossing, *The Science of Sound*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1990, second edition.
- [2] P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*. Princeton, New Jersey: McGraw-Hill, 1968.
- [3] J. Toivanen, *Teknillinen akustiikka*. Espoo: Otakustantamo, 1976.
- [4] A. D. Pierce, *Acoustics, An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Woodbury, New York: Acoustical Society of America, 1989.
- [5] L. L. Beranek, *Acoustics*. Cambridge, Massachusetts: Acoustical Society of America, 1986.
- [6] R. Raspet, *Shock Waves, Blast Waves, and Sonic Boom*, pp. 329–340. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [7] W. Lauterborn, *Cavitation*, pp. 263–270. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [8] M. J. Crocker, ed., *Encyclopedia of Acoustics, vol. 1-4*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [9] T. B. Gabrielson, *Infrasound*, pp. 367–372. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [10] A. Halme, *Rakennus- ja huoneakustiikka*. Espoo: Otakustantamo, 1976.
- [11] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [12] T. Lahti, *Akustinen mittaustekniikka*. Espoo, Finland: TKK Akustiikan laboratorio, 1997.
- [13] L. L. Beranek, *Acoustical Measurements*. Cambridge, Massachusetts: Acoustical Society of America, 1988.
- [14] J. O. Pickles, *An Introduction to the Physiology of Hearing*. London: Academic Press, 1982.
- [15] A. N. Popper and R. R. Fay, eds., *The Mammalian Auditory Pathway: Neurophysiology*. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [16] W. L. Gulick, G. A. Gescheider, and R. D. Frisina, eds., *Hearing — Physiological Acoustics, Neural Coding, and Psychoacoustics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- [17] T. Jauhiainen, *Kuulo ja viestintä*. Helsinki: Yliopistopaino, 1995.
- [18] J. Blauert, *Spatial Hearing — Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1996.

-
- [19] B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing*. London: Academic Press, 1982.
- [20] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics — Facts and Models*. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [21] 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.
- [22] A. V. Oppenheim, A. Willsky, and I. Young, *Signals and Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1983.
- [23] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1975.
- [24] L. R. Rabiner and B. Gold, *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1975.
- [25] S. Mitra and J. Kaiser, eds., *Handbook of Digital Signal Processing*. Wiley-Interscience, 1993.
- [26] J. Strawn, ed., *Digital Audio Signal Processing, An Anthology*. William Kaufmann Inc., 1985.
- [27] T. W. Parks and C. S. Burrus, *Digital Filter Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [28] K. Steiglitz, *A Digital Signal Processing Primer*. Menlo Park: Addison-Wesley, 1996.
- [29] L. B. Jackson, *Digital Filters and Signal Processing*. Boston: Kluwer Academic Publ., 1989.
- [30] S. Templaars, *Signal Processing, Speech and Music*. Lisse: Swets & Zeitlinger Publ., 1996.
- [31] C. Roads, S. T. Pope, A. Piccialli, and G. D. Poli, eds., *Signal Processing, Speech and Music*. Lisse: Swets & Zeitlinger Publ., 1996.
- [32] M. Vetterli and J. Kovacevic, *Wavelets and Subband Coding*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [33] L. Cohen, *Time-Frequency Analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [34] S. Haykin, *Modern Filters*. New York: Macmillan Publ. Co., 1989.