

Kuulo

Lähteet: Karjalainen. (1999). ”Kommunikaatioakustiikka”.
Rossing. (1990). ”The science of sound”. Luvut 5–7.
Moore. (1997). ”An introduction to the psychology of hearing”.



Sisältö:

1. Johdanto
2. Korvan rakenne
3. Peittoilmiö
4. Äänekkyys
5. Äänenkorkeus
6. Tila- ja suuntakuulo

1 Johdanto

- Kuulojärjestelmä voidaan ajatella koostuvan kahdesta osasta
 - periferinen kuulojärjestelmä (ulko-, väli- ja sisäkorva)
 - aivot (kuuloaivokuori)
- *Kuulon fysiologia* tutkii edellistä
- *Psykoakustiikka* tutkii kokonaisuistimusta (jälkimmäistä)
- Paljon kuulon toiminnoista tapahtuu jo korvassa, mutta korkeamman tason toiminnoista suurin osa on aivoissa

1.1 Kuulon toiminta

- Kuulon *dynaaminen alue* on laaja
 - hyvin äänekkään äänenpaineen suhde heikoimman kuultavan äänen äänenpaineeseen on $1:10^6$ (→ energiat suhteessa $1:10^{12}$)
 - kuulon dynamiikka toimii suurinpiirten logaritmisesti (dB-asteikko)
- Kuulon *taajuusalue* vaihtelee suuresti yksilöiden välillä
 - vain harvoilla kuulo kattaa koko alueen 20 Hz – 20 kHz
 - herkkyys matalille äänille (< 100 Hz) ei ole kovin hyvä
 - herkkyys korkeille äänille (> 12 kHz) laskee iän myötä
- Kuulon *selektiivisyys*
 - kuulija voi poimia soolosoittimen sinfoniaorkesterin soitosta
 - kuulija voi poimia yksittäisen puhujan äänen ihmisjoukosta
 - taustamelussa voi nukkua, ja silti herätä epätavalliseen ääneen

1.2 Psykofysiikka, psykoakustiikka

- Aistimiseen liittyy informaation prosessointi aivoissa
 - tieto aivojen toiminnasta on rajoittunutta
- Psykofysiikka tutkii suhteita *herätteiden* ja niiden tuottamien *aistimusten* välillä
- Psykoakustiikka tutkii suhteita akustisten herätteiden ja niiden tuottamien kuuloaistimusten välillä
 - pyritään mallintamaan aistimuksen syntymekanismia
 - esim. aistitun äänekkyuden / äänenkorkeuden / äänenväriin ennustettavuus signaalin akustisista ominaisuuksista
- Psykoakustisessa kuuntelukokeessa
 - annetaan koehenkilön kuunnella akustisia herätteitä
 - tehdään kysymyksiä tai pyydetään kuvailemaan koettua aistimusta

1.3 Äänen subjektiiviset attribuutit

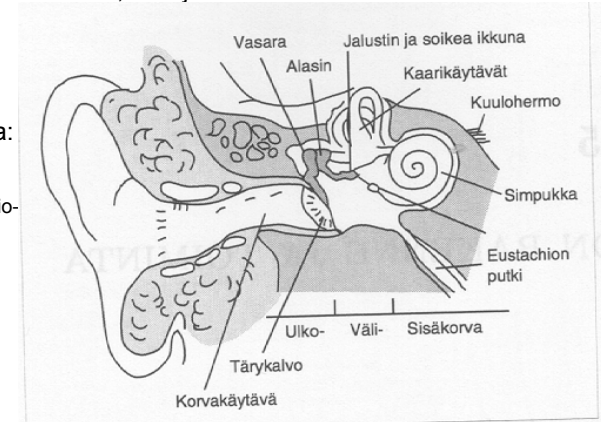
- Ääniä kuvaillaan tyypillisesti neljällä attribuutilla
 - äänekkyyks, äänenkorkeus, äänenväri, ja äänen kesto
- Taulukko: subjektiivisten ominaisuuksien riippuvuus fysikaalisista parametreista
 - ♦♦♦ = vahvasti riippuvainen, ♦♦ = jonkin verran ♦ = heikosti riippuvainen

Subjektiivinen ominaisuus

Fysikaalinen parametri	Subjektiivinen ominaisuus			
	Äänekkyyks	Äänenkorkeus	Äänenväri	Kesto aika
Paine	♦ ♦ ♦	♦	♦	♦
Taajuus	♦	♦ ♦ ♦	♦ ♦	♦
Spektri	♦	♦	♦ ♦ ♦	♦
Kesto	♦	♦	♦	♦ ♦ ♦
Verhokäyrä	♦	♦	♦ ♦	♦

2 Korvan rakenne

- Kuva: korvan fysiologinen rakenne
 - osat ryhmitellään ulko-, väli- ja sisäkorvaan



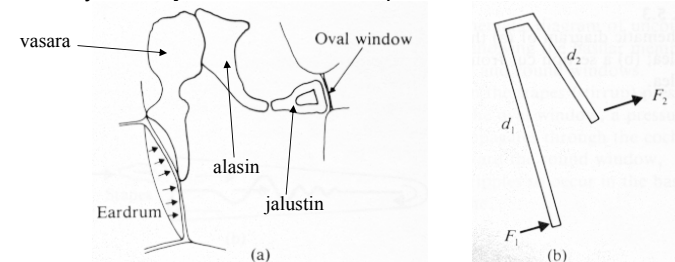
- kuva kirjasta: Karjalainen. (1999). "Kommunikaatioakustiikka," Akustiikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.

2.1 Ulkokorva

- Ulkokorvaan kuuluvat
 - korvalehti
 - korvakäytävä
 - tärykalvo, joka rajaa ulko- ja välikorvan
- Korvalehti kerää ääntä ja auttaa korkeiden äänten tulosuunnan määrittämisessä
 - aiheuttaa erilaisen vasteen edestä / takaa, ja eri tulosuunnista saapuville äänille
- Korvakäytävä
 - voidaan pitää kovaseinäisenä akustisena putkena
 - alin resonanssi 4 kHz paikkeilla → korostuu noin 10 dB verran
- Tärykalvo muuntaa ääniaallot mekaaniseksi värähtelyksi, joka välittyy kuuloluiden myötä sisäkorvaan

2.2 Välikorva

- Ulottuu tärykalvolta sisäkorvan ns. soikeaan ikkunaan
- Kuva: välikorvan tärkeimmät osat ovat kuuloluut
 - *vasara* (lepää tärykalvoa vasten, ks. kuva), *alasin* ja *jalustin*
- Kuuloluut toimivat vipuna, joka vahvistaa tärykalvon värähtelyn 30-kertaisena sisäkorvan *soikeaan ikkunaan*
 - vipumeکانismi vahvistaa 1.5 kertaa
 - tärykalvon ja soikean ikkunan pinta-alaero vahvistaa 20 kertaa



Välikorva

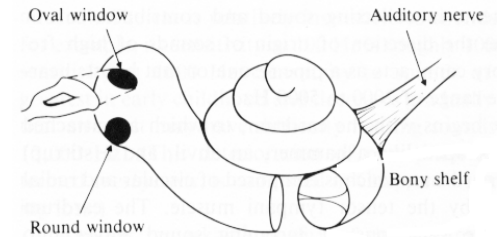
DA / Klapuri & Virtanen

- **Akustinen refleksi** (= stapediusrefleksi)
 - kun äänenpaine ylittää n. 80 dB tason, tietyt lihakset kiristävät tärykalvoa ja stapediuslihas siirtävät jalustimen pois sisäkorvan ikkunalta
 - suojaa sisäkorvaa vaurioilta
- Eustachion putki mahdollistaa paineentasauksen yhdistämällä välikorvan ääniväylään
 - tärykalvo on tiivis
 - välikorvan ja ulkoilman välinen staattinen paine-ero painaa tärykalvoa estäen sen vapaata värähtelyä, jopa aiheuttaen kipua

2.3 Sisäkorva, simpukka

Kuulo 10
DA / Klapuri & Virtanen

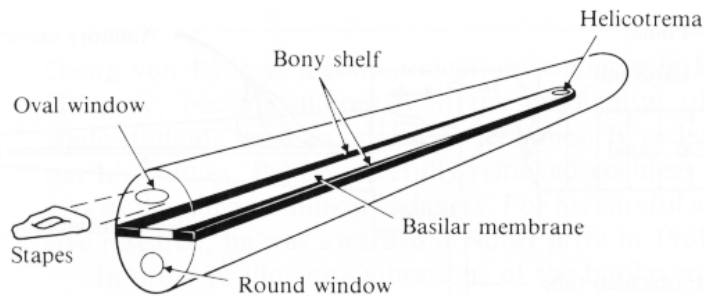
- Sisäkorvassa sijaitsevat simpukka ja kaarikäytävät
 - kaarikäytävät eivät varsinaisesti vaikuta kuuloon, niissä on tasapainoelin
- Kuuloa palveleva osa on nesteen täyttämä **simpukka** (engl. *cochlea*)
 - monimutkainen elin, jossa paineenvaihtelut muuttuvat hermoimpulsseissa
 - simpukan neste jakaa pituussunnassa kahtia **basilaarikalvo**
- Jalustimen liike saa simpukan nesteen värähtelemään, jolloin myös basilaarikalvo alkaa värähdellä
 - basilaarikalvolla on ns. *Cortin elin*, jolla on värähtelylle herkkiä **aistinsoluja**
 - aistinsolut muuttavat liikeinformaation hermoimpulsseiksi kuulohermo



2.4 Basilaarikalvo

Kuulo 11
DA / Klapuri & Virtanen

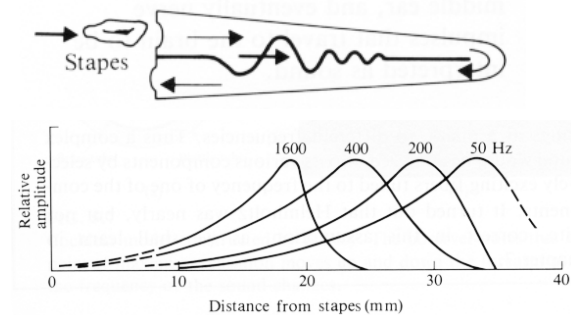
- Kuva: simpukka on kuvattu selkeyden vuoksi oikaistuna
 - simpukan leveämmässä päässä ovat soikea ja pyöreä ikkuna
 - *helicotrema*, simpukan kauimmaisessa päässä oleva pieni aukko, yhdistää basilaarikalvon jakamat nestepuoliskot



Basilaarikalvo

Kuulo 12
DA / Klapuri & Virtanen

- Hydrauliset paineaallot etenevät basilaarikalvolla
 - korkeat äänet tuottavat korkeimman amplitudin lähellä alkupäätä
 - matalat äänet taas tuottavat suurimmat amplitudit loppupäässä
 - alustava **taajuusanalyysi** tapahtuu basilaarikalvolla

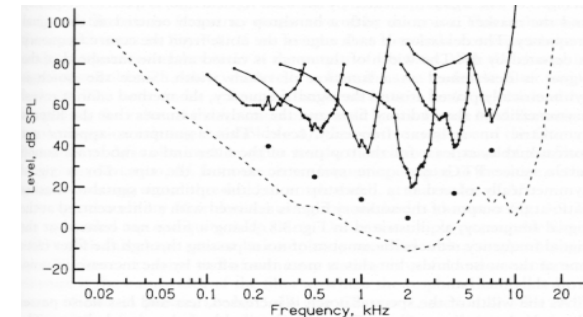


2.5 Aistinsolut

- Aistinsolut (värekarvat, engl. *hair cells*) muuntavat basilaarikalvon liikeinformaation hermoimpulsseiksi aistinsolusta lähtevään kuulohermosäikeeseen.
- **Aistinsolun taipuessa se generoi hermoimpulsseja**
 - impulssitiheys riippuu värähtelyn amplitudista ja taajuudesta
- Kuulohermossa kulkevia sähköimpulsseja voidaan mitata
 - hermoimpulssit korreloivat voimakkaasti basilaarikalvon mekaanisen värähtelyn kanssa aina 4 – 5 kHz asti, tästä ylöspäin aistinsolut eivät oikein ”pysy mukana” -> pulssit eivät generoidu aallonpituuden jaksoissa vaan satunnaisena kohinana

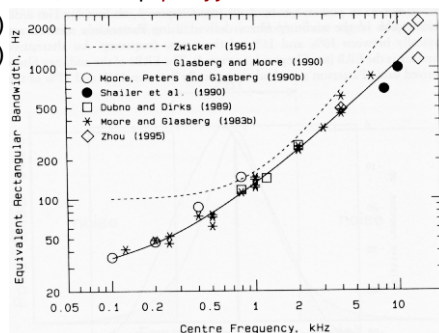
Aistinsolut

- Kuva: kuuden eri aistinsolun ”**virityskäyrät**”
 - aistinsolut ovat kukin virittyneet omille taajuuksilleen, jolla ne antavat vasteen (herkimmin, vaste leviää jonkin verran)
 - eritaajuuksisilla ja voimakkuuksisilla siniäänöksillä on etsitty kynnystaso, jolla kukin aistinsolu alkaa tuottaa hermoimpulsseja



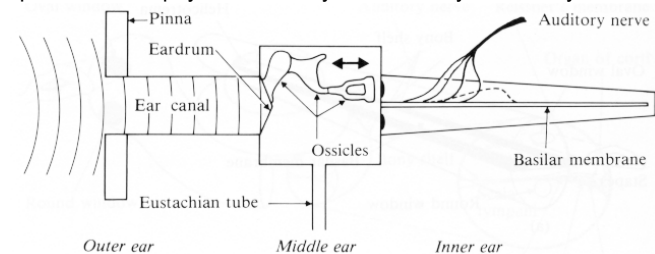
2.6 Kriittiset kaistat

- Kahden siniäänöksen taajuuksien lähestyessä toisiaan
 - niiden resonanssikohdat basilaarikalvolla menevät päällekkäin
 - molemmat osuvat samojen aistinsolujen viritysalueelle
 - Kun äänokset tulevat saman **kriittisen kaistan** sisälle, korvalla on suuria vaikeuksia erottaa molempia ääniä, heikompi **peittyi**
- Noin 26 (Bark-skaala, katkov.) tai 40 (ERB-skaala, ehyt viiva) kriittistä kaistaa kattaa koko kuuloalueen
 - kuva: kriittisen kaistan leveys keskitaajuuden funktiona
 - kaistanleveys on melko vakio matalilla taajuuksilla, ja suhteessa keskitaajuuteen korkeilla taajuuksilla



2.7 Kokonaiskuva, luujohtuminen

- Alla vielä korvan rakenteen yksinkertaistettu kokonaiskuva
- **Luojahtuminen**: värähtelyt välittyvät myös kallon luiden kautta sisäkorvaan, ei pelkästään korvakäytävää pitkin
 - merkitystä puheessa
 - oman puheen kuuleminen äänitettynä kuulostaa epäluonnolliselta, kun normaalia kallon kautta johtuvaa ääntä ei tule
- Kuulon fysiologiaa animoituuna
 - <http://www.neurophys.wisc.edu/~ychen/auditory/fs-auditory.html>



3.1 Peitto taajuustasossa

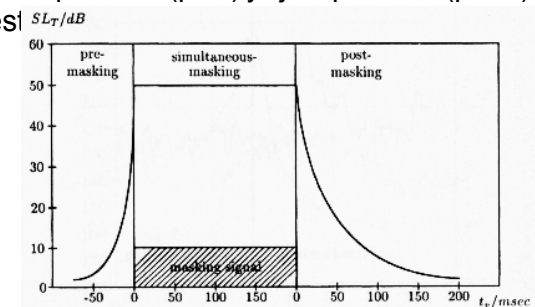
- Malli ihmisen kuulojärjestelmän taajuusanalyysistä
 - taajuustaso voidaan jakaa kriittisiin kaistoihin
 - peittovaikutus on voimakas, mikäli taajuuskomponentit ovat lähempänä kuin kriittisen kaistan etäisyydellä toisistaan
 - Bark asteikko: taajuusasteikko joka saadaan täyttämällä kuuloalue vierekkäisillä kriittisillä kaistoilla, ja numeroimalla ne 1:stä 26:een
- Kapeakaistainen kohinasignaali kykenee peittämään siniääneksen tehokkaammin (pienemmällä äänipainetasolla) kuin siniäänes kohinan
- **Peittokynnys** tarkoittaa peittoäänen aiheuttamaa noussutta kuulokynnystasoa
 - ääniä, joiden taso jää peittokynnyksen alapuolelle ei kuulla
 - peittokynnys hiljaisuudessa = kuulokynnys

3 Peittoilmiö

- Peittoilmiö kuvaa tilannetta jossa hiljaisempi mutta selvästi kuultava signaali muuttuu kuulumattomaksi äänekkäämmän signaalin vaikutuksesta
 - **peittoääni** aiheuttaa peittoilmiön, jolloin
 - **testiääni** häipyy kuulumattomiin
- Peittovaikutus riippuu sekä äänen spektrirakenteesta että äänen vaihtelusta ajan funktiona
- Ilmiöstä käytetään myös sanaa maskaus (engl. *masking*)

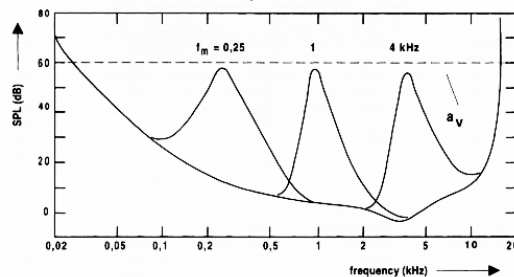
3.2 Peitto aikatasossa

- **Eteenpäin** peitto (= jälkipeitto, post-masking)
 - signaalin peittovaikutus ulottuu ajanhetkiin sen loppumisen *jälkeen*
- **Taaksepäin** peitto (= esipeitto, pre-masking)
 - signaalin peittovaikutus ulottuu ajanhetkiin *ennen* sen alkamista
- Kaaviokuva esipeitosta (pre-) ja jälkipeitosta (post-) kun peitto- ja testi SL_T/dB r98]



Peitto taajuustasossa

- Kuva: peittokynnyksiä [Herre95]
 - peittoääni: kapeakaistaista kohinaa 250 Hz, 1 kHz, 4 kHz
 - leviämiskäyrä: peittovaikutus ulottuu peittoäänen lähiympäristöön
 - leviää enemmän kohti korkeita taajuuksia
- Peiton additiivisuus (kompleksit signaalit)
 - yhteinen peittovaikutus on yleensä *enemmän* kuin osien summa

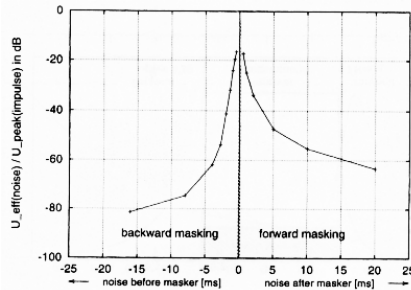


4 Äänipainetaso

- Äänisignaali $s_1(t)$ ajanhetkellä t on hetkellinen paineen poikkeama normaali-ilmanpaineesta
- Äänipainetaso $p_{RMS} = \sqrt{E\{s(t)^2\}}$ on signaalin (lineaarinen) RMS-teho
- Laajan dynaamisen alueen takia **dB-asteikko** on kätevä
 - $p_{dB} = 20 \log_{10}(p_{RMS} / p_0) = L_p$

Peitto aikatasossa

- Kuva: peittovaikutuksen mittaustuloksia [Spille92]
 - **aika peitto ei ulotu kovin kauas**
 - samanaikaisten äänen taajuuspeitto on merkittävämpi ilmiö
 - peittokynnys lähestyy kynnystä hiljaisuudessa, jos aikaero signaalien välillä on enemmän kuin 16 ms, ja jo 2 ms aikaerolla peittokynnys on 25 dB alempana kuin impulssin aikana



4.2 Äänitehotaso vs. äänipainetaso

- Äänipainetason lisäksi on muitakin tasosuureita, joita mitataan dB-asteikolla, joten kannattaa olla tarkkana
- Jos puhutaan vain äänen tasosta, tarkoitetaan käytännössä aina äänipainetasoa L_p
- Äänitehotaso
 - lähteen eri suuntiin säteilemän äänen kokonaisteho
 - äänitehotason ja äänipainetason välinen suhde riippuu useista tekijöistä, kuten lähteen ja tilan geometriasta
 - jos muut asiat pidetään vakiona, niin 10 dB nousu äänitehotasossa nostaa myös äänipainetasoa 10 dB:llä

4.1 Kuulokynnys ja dB-asteikko

- **Kuulokynnys**
 - heikoin kuultava äänipaine 1 kHz taajuudella on 20 μ Pa, mikä on valittu äänipainetason dB-asteikon nollakohdaksi, p_0
 - $L_p = 20 \log_{10}(p/p_0) = 10 \log_{10}(p^2/p_0^2)$

■ Kipuraja

– voimakkain ääni, jota kuulo pystyy mielekkäästi käsittelemään

TABLE 6.1 Typical Sound Levels One Might Encounter.

Jet takeoff (60 m)	120 dB
Construction site	110 dB <i>Intolerable</i>
Shout (1.5 m)	100 dB
Heavy truck (15 m)	90 dB <i>Very noisy</i>
Urban street	80 dB
Automobile interior	70 dB <i>Noisy</i>
Normal conversation (1 m)	60 dB
Office, classroom	50 dB <i>Moderate</i>
Living room	40 dB
Bedroom at night	30 dB <i>Quiet</i>
Broadcast studio	20 dB
Rustling leaves	10 dB <i>Barely audible</i>
	0 dB

4.3 Kahden äänilähteen tuottama äänipainetaso

Kuulo 25
DA / Klapuri & Virtanen

- Kaksi äänilähdettä: $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$
- Summasignaalin RMS-äänipainetaso:

$$p_{RMS} = \sqrt{E\{s(t)^2\}} = \sqrt{E\{s_1(t)^2 + 2s_1(t)s_2(t) + s_2(t)^2\}}$$

- Jos signaalit ovat korreloimattomia, $E\{s_1(t)s_2(t)\} = 0$ ja ylläoleva supistuu muotoon

$$p_{RMS} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$$

- Jos $p_1 = p_2$, summasignaalin äänipainetaso on 3 dB korkeampi kuin p_1 :n taso (miksi?)

4.4 Useita lähteitä

Kuulo 26
DA / Klapuri & Virtanen

- Kaksi 80 dB äänipainetasoa tuottavaa lähdettä rinnakkain
 - lähteiden ääni *ei korreloi*: tuottavat yhdessä 83 dB tason
 - lähteiden ääni *korreloi täysin* (sama ääni): tuottavat 86 dB tason
- Amplitudin kaksinkertaistus nostaa äänipainetasoa 6 dB
 - koska: $L_p = 20 \log_{10}(2 \cdot p/p_0) = 20 \log_{10}(p/p_0) + 6$ [dB]
 - vastaa toisen identtisen lähteen lisäystä ensimmäisen rinnalle
- Mutta: mikäli kahden 80 dB:n ääntä tuottavan lähteen ääniaallot eivät korreloi, yhteinen äänenpaine on 83 dB
 - johtuu siitä, että ääniaallot voivat vaiheesta riippuen joko kumota tai vahvistaa toisiaan (negatiivisessa vaiheessa oleva paineaalto kumoaa positiivista)

5 Äänekkyys

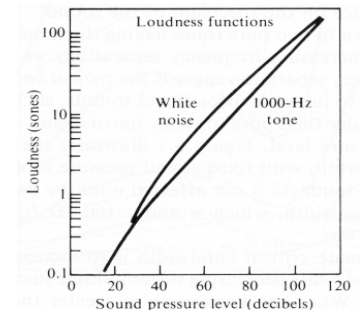
Kuulo 27
DA / Klapuri & Virtanen

- **Äänekkyys** on subjektiivista äänenvoimakkuutta kuvaava suure
 - äänekkyysaistimuksen muodostuminen on suhteellisen monimutkainen, mutta kuitenkin
 - johdonmukaisesti käyttäytyvä ilmiö
 - yksi psykoakustiikan keskeisimmistä osista
- Tarkastellaan äänekkyuden teoriaa alkaen siniääneksistä ja edeten kohti monimutkaisempia ääniä

5.1 Äänekkyuden määrittäminen

Kuulo 28
DA / Klapuri & Virtanen

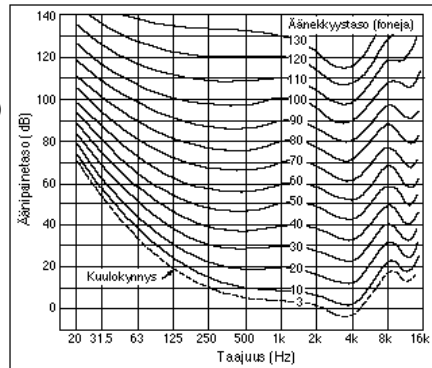
- Äänekkyysasteikon määrittäminen
 - koehenkilölle annetaan tiettyä äänenpainetasoa oleva referenssiääni
 - pyydetään säätämään toinen ääni kaksi kertaa äänekkäämmäksi tai hiljaisemmaksi
- Kuva: Siniääneksen (1 kHz) ja valkoisen kohinan aiheuttama äänekkyys äänipainetason funktiona
 - samalla äänenpaineella laajakaistaisemman äänen äänekkyys on suurempi



5.2 Siniääneksen äänekkyys

- Vakioäänekkyyskäyrän mukaan määritelty **äänekkyystaso** on äänekkyyttä kuvaava tasosuure

- yksikkö *foni*
- taajuudella 1 kHz äänipainetaso (dB) ja äänekkyystaso (foneina) ovat määritelmän mukaan samat

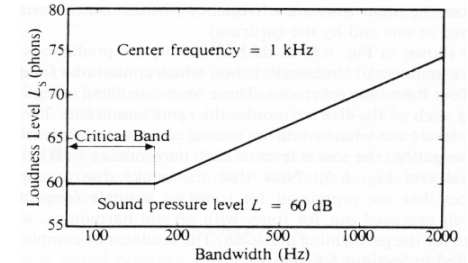


- Kuva: vakioäänekkyyskäyriä [Karjalainen99]

5.3 Laajakaistaisen äänen äänekkyys

- Laajakaistainen ääni koetaan äänekäämpänä kuin saman äänenpaineen omaava kapeakaistainen signaali
 - kuulo analysoi ääntä kriittisen kaistan resoluutiolla
 - kukin kaista antaa oman lisänsä kokonaisäänekkyteen
- Kuva: kapeakaistaisen kohinan äänekkyys kaistanleveyden funktiona

- äänipainetaso pysyy vakiona (60 dB)
- äänekkyys alkaa kasvaa, kun yhden kriittisen kaistan leveys ylitetään

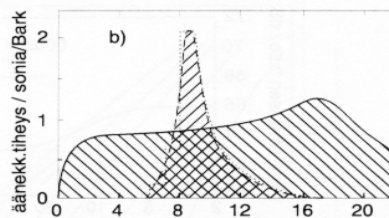


5.4 Kompleksisen äänen äänekkyys

- Kompleksisen äänen äänekkyys lasketaan käyttämällä ns. **äänekkyystiheyttä** apusuurena
 - osäänekkyys kutakin kriittistä kaistaa kohti
 - kokonaisäänekkyys saadaan summaamalla äänekkyystiheysarvo kultakin kriittiseltä kaistalta

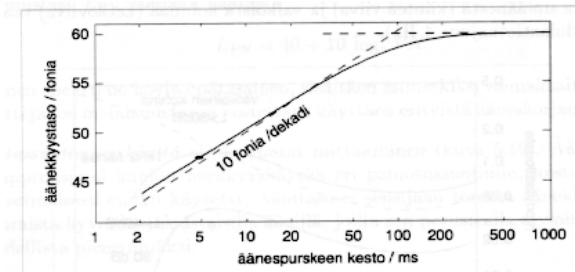
- Äänekkyystiheys on (karkeasti ottaen) ko. kaistalla olevan signaalin tehon logaritmi, jota
 - painotetaan kuulon herkkyyden mukaan (matalat ja korkeat taajuusalueet vaikuttavat vähemmän äänekkyteen)
 - äänekkyystiheyspektriä "levitetään" konvolvoimalla yli taajuusalueen
 - kapeakaistainen signaali leviää läheisille taajuusalueille

- Kuva: siniääneksen ja laajakaistaisen kohinan äänekkyuden integrointi yli kriittisten kaistojen [Karjalainen]



5.5 Äänekkyuden aikakäyttäytyminen

- Edellä puhuttiin jatkuvaluonteisista signaaleista
- Kuva: äänekkyysaistimus ei synny täysimääräisenä hetkessä, vaan vaatii aikaa [Karjalainen99]
 - vastaa likimain äänienergian aikaintegraalia
 - ilmiöstä käytetään nimeä aikaintegrointi (temporal integration)
 - äänekkyys saavuttaa täyden arvonsa noin 200 ms kuluessa

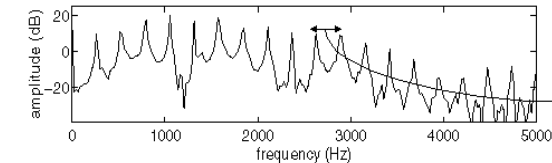


6 Äänenkorkeus

- **Äänenkorkeudella** tarkoitetaan
 - subjektiivisesti koettua äänen ominaisuutta, jonka perusteella ääniaistimukset voidaan järjestää asteikolla matala ... korkea
 - toiminnallinen määritelmä: äänellä on tietty korkeus, jos siniääneksen taajuus voidaan luotettavasti ja toistettavasti säätää samalle korkeudelle ko. äänen kanssa
- **Perustaajuus** vs. äänenkorkeus
 - perustaajuus on fysikaalinen suure
 - äänenkorkeus aistimuksellinen suure
 - molempia mitataan yksikössä Hertsi (Hz)
 - aistittu äänenkorkeus \approx perustaajuus

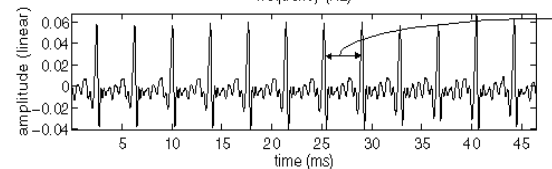
6.1 Harmoninen ääni

- **Siniäänekselle**
 - perustaajuus = sinin taajuus
 - äänenkorkeus \approx sinin taajuus
- **Harmoninen ääni**



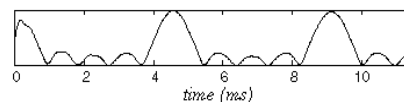
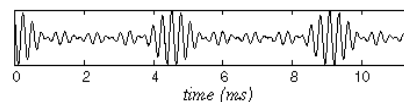
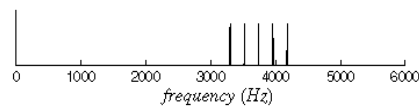
Trumpetin ääni:

- Perustaajuus $F = 262 \text{ Hz}$
- Aallonpituus $1/F = 3.8 \text{ ms}$



6.2 Äänenkorkeusaistimuksen synty

- Äänenkorkeusaistimuksen **syntymekanismia** on yritetty selittää kahdella kilpailevalla teorialla
 - *paikkateoria*: sisäkorvan simpukassa olevan basilaarikalvon eniten reagoiva paikka määrää äänenkorkeuden
 - *ajoitusteoria*: korva suorittaa aika-tason jaksollisuusanalyysiä
- Todellinen mekanismi on näiden yhdistelmä
 - ääni jaetaan taajuuskaistoihin (basilaarikalvo)
 - **kullakin kaistalla analysoidaan amplitudi-verhokäyrän (alin kuva) jaksollisuutta**
 - tulokset kaistoilta yhdistetään



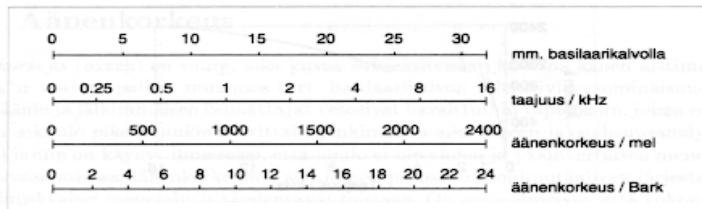
6.3 Äänenkorkeusasteikot

- Subjektiivista äänenkorkeutta kuvaa **Meliasteikko**
 - määrittäminen perustuu suhdevertailuun, kuten äänekkyysasteikkokin
 - valitaan referenssiääni ja pyydetään henkilöä säätämään toisen äänen korkeus puolet korkeammaksi tai matommaksi
 - lopuksi valitaan ankkuripiste, eli referenssitajuus
- Kriittisen kaistan käsite määrittelee myös äänenkorkeusasteikon
 - jos kriittiset kaistat asetetaan peräkkäin taajuusasteikolle, saadaan meliasteikon tapainen käyrä
 - yhtä kriittistä kaistaa vastaa yksi **Bark**
 - 1 Bark = 100 meliä

Äänenkorkeusasteikot

Kuulo 37
DA / Klapuri & Virtanen

- Äänenkorkeusasteikoilla on yhteys sisäkorvan anatomiaan
 - vakion suuruista äänenkorkeuden muutosta vastaa vakion mittainen resonanssikohdan siirtymä basilaarikalvolla
 - uusimman käsityksen mukaan **ERB-asteikko** on lähimpänä tätä suhdetta (1 ERB = 0.9 mm basilaarikalvolla)
 - ERB-asteikolla kuuloalueelle mahtuu 40 kriittistä kaistaa (Bark: 26)
- Kuva: äänenkorkeusasteikkojen suhde taajuuteen ja sisäkorvan ominaisuutta kuvaaviin mittoihin [Karjalainen]



6.4 Äänenkorkeuden amplitudiriippuvuus

Kuulo 38
DA / Klapuri & Virtanen

- Äänenkorkeusaistimus riippuu hieman äänipainetasosta
- Siniäänöksillä
 - pienillä taajuuksilla äänen voimistuminen madaltaa sitä
 - suurilla taajuuksilla äänen voimistuminen korottaa sitä
- Myös harmonisen rakenteen omaavilla äänillä ilmenee **pienää** riippuvuutta voimakkuustasosta

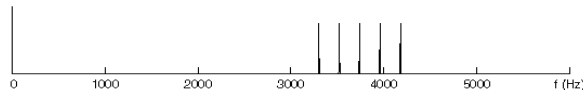
6.5 Absoluuttinen sävelkorva

- Ihmisen kuulo on
 - tarkka vertailtaessa kahden äänen ominaisuuksia keskenään
 - epätarkka tekemään absoluuttisia arvioita
- Absoluuttinen sävelkorva on harvinainen ominaisuus
 - synnynnäinen tai harjoitettu kyky sanoa äänenkorkeus ilman referenssiä

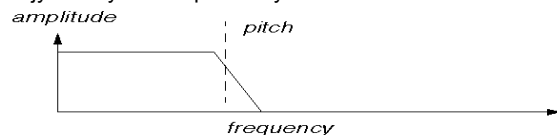
6.6 Ei-harmonisten äänten äänenkorkeus

Kuulo 39
DA / Klapuri & Virtanen

- Kuulo tuntuu yrittävän antaa äänenkorkeuden kaikille mahdollisille äänille (tosin aistimuksen vahvuus vaihtelee)
- Harmoninen ääni ilman perustaajuuskomponenttia



- Selvästi ei-harmoniset äänet: kellot, värähtelevät kalvot, lautaset, ...
- Kohinan aiheuttama äänenkorkeusaistimus
 - kapeakaistainen kohina (suurin piirtein keskitaajuus kuuluu)
 - kohinasignaalia ja sen viivästettyä versiota summataan (viive kuuluu)
 - kuva: jyrkästi yli- tai alipäästetty kohina



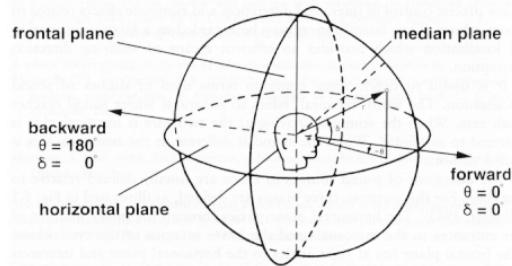
7 Tila- ja suuntakuulo

Kuulo 40
DA / Klapuri & Virtanen

- Tärkeimmät kuuloaistin käyttämät johtolangat äänilähteen avaruudelliseen paikantamiseen ovat
 1. korvien välinen **aikaero** lähteestä tulevalle äänelle
 2. korvien välinen **intensiteettiero**
 3. pään ja korvalehden aiheuttamat tulosuunnasta riippuvat **muutokset äänen spektrissä**→ kutakin näistä käsitellään seuraavassa tarkemmin
- Hyödyllisiä termejä ja käännöksiä
 - yksikorvainen (*monaural*)
 - kaksikorvainen (*binaural*)
 - korvien välinen (*interaural*, *interaural time / intensity difference*)
 - lateralisaatio: äänilähteen paikantaminen horisontaalitasossa

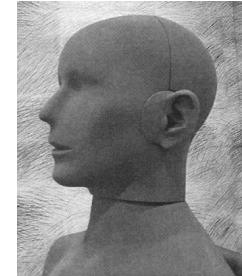
7.1 Yksikorvainen äänilähteen paikantaminen

- Suunnan kuuleminen on jossain määrin mahdollista myös yksikorvaisesti
- Pää ja korvalehti muodostavat *suuntariippuvan suodattimen*
 - korvaan saapuvan äänisignaalin muokkaantumista tulosuunnasta riippuen voidaan kuvata HRTF-vasteilla
 - *HRTF = head-related transfer function*
- HRTF-vasteiden merkitys on ratkaiseva äänilähteen mediaanitason (vertikaalisessa) paikantamisessa



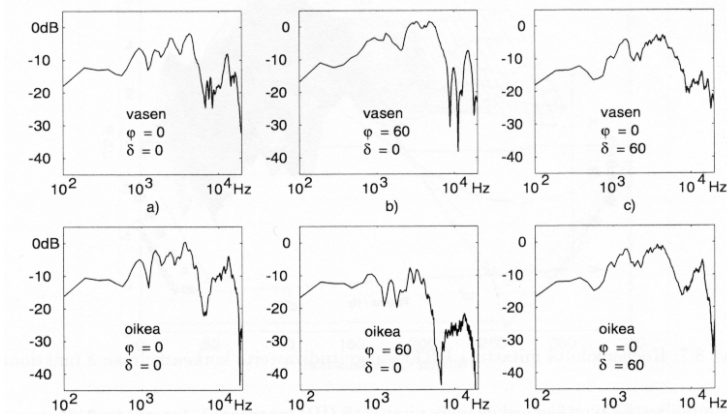
Yksikorvainen äänilähteen paikantaminen

- HRTF-vaste voidaan määrittää mittaamalla
 - lähteen säteilemä ääni
 - korvakäytävän suulle tai tärykalvolle tuleva ääni (korvakäytävän vaste pysyy tulosuunnan suhteen vakiona)
- Käytännössä mittauksessa voidaan käyttää joko
 - vasen kuva: koehenkilön korvakäytävän suulla olevaa mikrofonia, tai
 - oikea kuva: keinopäätä [Karjalainen99]
- Yksilöiden välillä on melko paljon eroja
 - kuulo tottuu omaan kehoon



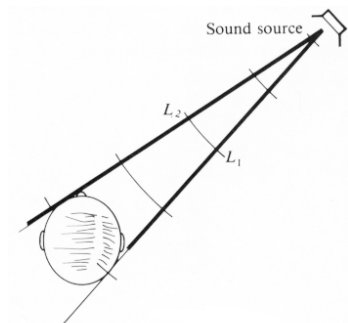
Yksikorvainen äänilähteen paikantaminen

- Koehenkilöiltä mitattuja HRTF-vasteita [Karjalainen99]
 - φ = horisontaalitalon kulma (0: edessä); δ = mediaanitalon kulma



7.2 Siniäänneksen tulosuunnan kuuleminen

- Suuntakuulon kokeileminen siniäänneksillä auttaa ymmärtämään kompleksisten äänien tulosuunnan kuulemistä
- Taajuudeltaan *alle 750 Hz* korkuisten äänien tulosuunnan kuuleminen perustuu pääasiassa korvien väliseen *aikaeroon*
 - aaltojen kulkeman matkan eroa laskiessa äänen diffraktio, taipuminen pään ympäri, pitää huomioida
 - ääni taipuu, koska aallonpituus matalille äänille (< 750 Hz) on pitkä (> 45 cm) verrattuna pään dimensioihin

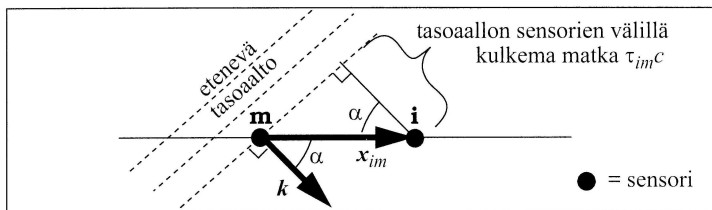


Yhteys aikaeron ja tulosuunnan välillä

- Kahden sensorin (esim. korva tai mikrofoni) välisen aikaeron τ_{im} yhteys kulmaan α äänen etenemisvektorin k ja sensorivektorin x_{im} välillä:

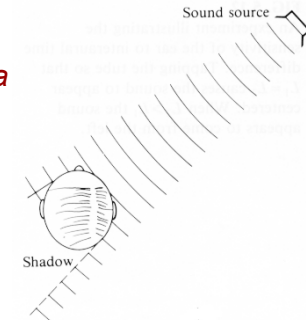
$$\cos(\alpha) = \frac{\tau_{im}c}{\|x_{im}\|} \quad (c \text{ on äänen nopeus})$$

- Äänen oletetaan olevan riittävän kaukana, jotta sen eteneminen voidaan mallintaa tasoaaltona



Siniääneksen tulosuunnan kuuleminen

- Korvien välinen aikaero on käyttökelpoinen vain 750 Hz taajuuksiin asti
 - korkeammille äänille aikaero on monitulkintainen, sillä lyhyitä aaltoja mahtuu useita aikaeron sisään → vaihelukitus ei onnistu
 - pään liikuttaminen (tai lähteen liike) auttaa: onnistuu 1500 Hz:iin
- **Korkeammilla taajuuksilla** (> 750 Hz) kuulo hyödyntää korvien välistä **intensiteettiero**
 - pää aiheuttaa akustisen "varjon" (äänen voimakkuus pään takana on pienempi)
 - toimii erityisesti korkeilla taajuuksilla

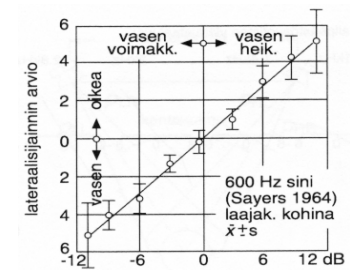
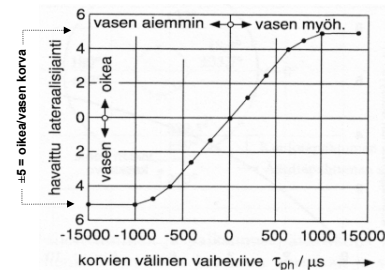


7.3 Kompleksisten äänten tulosuunta

- Kompleksisilla äänillä tarkoitetaan
 - ääniä, jotka sisältävät useita erilaisia taajuuskomponentteja
 - ajallisesti muuttuvia ääniä
- Tulosuunnan kuuleminen on tyypillisesti tulos kaikkien edellä esitettyjen **mekanismien yhteisvaikutuksesta**
 1. korvien välinen aikaero (tärkein)
 2. korvien välinen intensiteettiero
 3. HRTF-vaste
- Transienttimaisen (nopeasti muuttuva) äänen tulosuunta
 - suuntakuulon tarkkuuden kannalta on tärkeää, että ääni sisältää myös alle 1500 Hz taajuuskomponentteja
- Laajakaistainen kohina: suuntakuulo toimii hyvin

7.4 Kuulokekuuntelu ja lateralisaatio

- Kuulokekuuntelussa äänet paikantuvat yleensä **pään sisälle** korvien väliselle akselille
 - ääni ei tunnu tulevan pään ulkopuolelta, koska korvalehtien ja pään aiheuttama diffraktio puuttuu (simuloitu kaiunta ei juuri auta)
 - huolellisesti HRTF-vasteilla käsitellen äänikuva siirtyy päästä ulos
- Kuvat: kuulotapahtuman lateralisointi korvien väliselle akselille (sama ääni; aika- tai voimakkuuseroa voi säätää) [Karjalainen]



7.5 Etäisyyden kuuleminen

- Tutuille äänille etäisyys määritetään *äänekkyuden* perusteella
 - tehokkainta, kun muita ääniä on läsnä kohdeäänien ohella
- Lähteen tai kuuntelijan *liike* antaa paljon lisäinformaatiota
- Kaikuisassa ympäristössä *suoran ja heijastuneen äänen voimakkuuden suhde* antaa tarkkaa tietoa etäisyydestä
- *Korkeiden ja matalien äänten suhde*
 - korkeat äänet vaimentuvat pitkällä kulkutiellä enemmän
- Etäisyyden kuuleminen on tulosuuntaa epätarkempaa
 - mitä enemmän johtolankoja, sitä parempi
 - useiden äänten yhtäaikainen läsnäolo auttaa, äänen tutuus auttaa
 - näköaisti antaa tarvittavaa lisäinformaatiota ympäristöstä