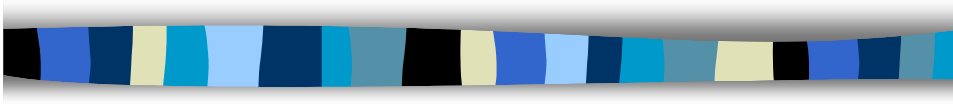


Kuulo

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 kokonaisuaimusta (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

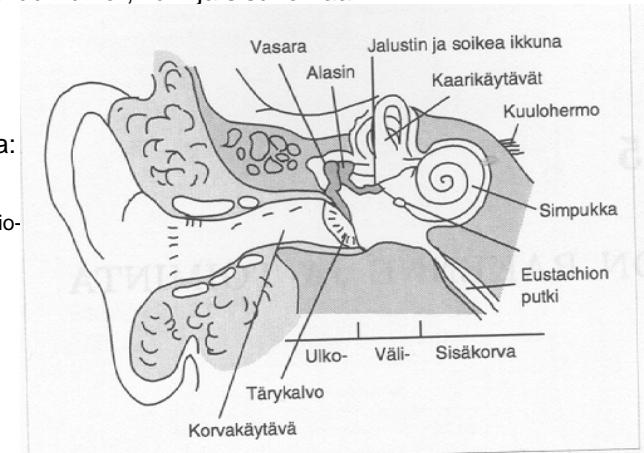
- Ääniä kuvaillaan tyypillisesti neljällä attribuutilla
 - äänekkyyys, äänenkorkeus, äänenväri, ja äänen kesto
- Taulukko: subjektiivisten ominaisuuksien riippuvuus fysikaalisista parametreista
 - ♦♦♦ = vahvasti riippuvainen, ♦♦ = jonkin verran ♦ = heikosti riippuvainen

Subjektiivinen ominaisuus

Fysikaalinen parametri	Äänekkyyys	Äänenkorkeus	Äänenväri	Kesto-aika
Paine	♦♦♦	♦	♦	♦
Taajuus	♦	♦♦♦	♦♦	♦
Spektri	♦	♦	♦♦♦	♦
Kesto	♦	♦	♦	♦♦♦
Verhokäyrä	♦	♦	♦♦	♦

2 Korvan rakenne

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



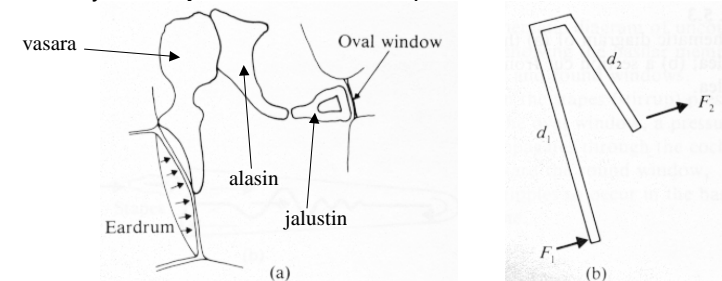
- kuva kirjasta: Karjalainen. (1999). "Kommunikaatioakustiikka," Akustiikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.

2.1 Ulkokorva

- Ulkokorvaan kuuluvat
 - korvalehti
 - korvakäytävä
 - tärykalvo, joka rajaa ulko- ja välikorvan
- Korvalehti kerää ääntä ja auttaa korkeiden äänen 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*
 - vipumekanismi vahvistaa 1.5 kertaa
 - tärykalvon ja soikean ikkunan pinta-alaero vahvistaa 20 kertaa



Välikorva

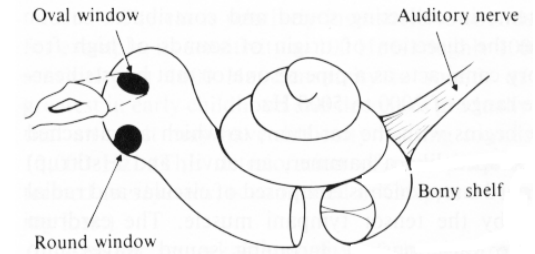
Kuulo 9
DA / Klapuri

- **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

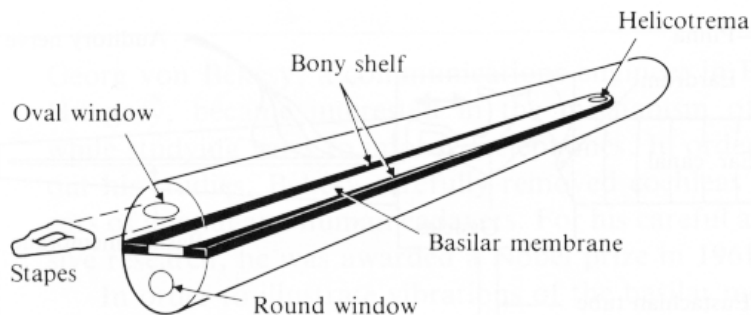
- Sisäkorvassa sijaitsevat simpukka ja kaarikäytävät
 - kaarikäytävät eivät varsinaisesti vaikuta kuuloon, niissä on tasapainoelin
- Kuuloa palveleva osa on nesteellä täytetty **simpukka** (engl. *cochlea*)
 - monimutkainen elin, jossa paineenvaihtelut muuttuvat hermoimpulsseiksi
 - simpukan nesteen jakaa pituussuunnassa 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 kuulohermoon



2.4 Basilaarikalvo

Kuulo 11
DA / Klapuri

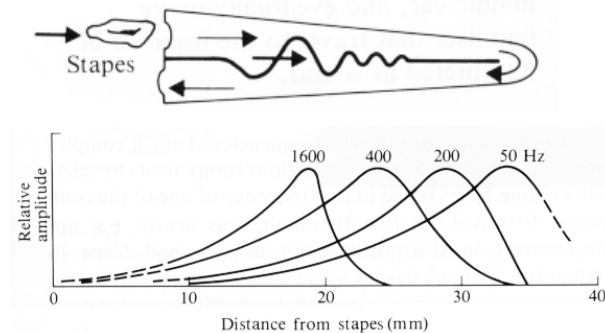
- Kuva: simpukka on kuvattu selkeyden vuoksi oikaistuna
 - simpukan leveämmässä päässä ovat soikea ja pyöreä ikkuna
 - *helicotrema*, simpukan kauimmaisessa päässä oleva pieni aukko, yhdistää basilaarikalvon jakamat nestepuoliskot



Basilaarikalvo

Kuulo 12
DA / Klapuri

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

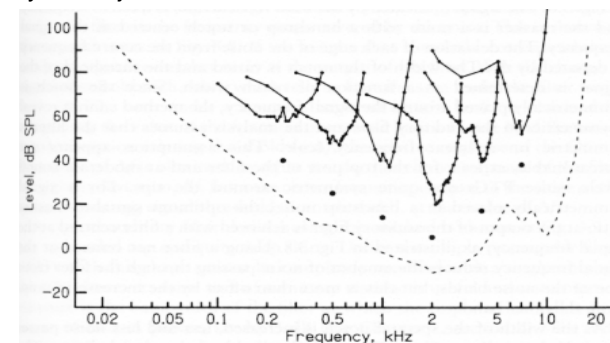


2.5 Aistinsolut

- 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"

Aistinsolut

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

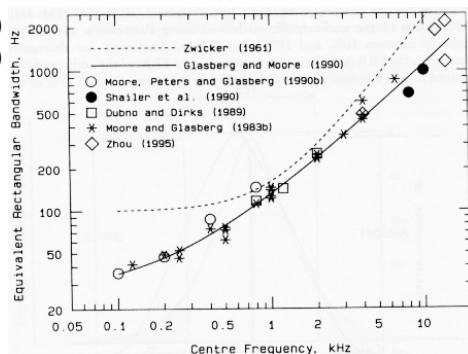


2.6 Kriittiset kaistat

- Kahden siniääneksen taajuuksien lähestyessä toisiaan
 - niiden resonanssikohdat basilaarikalvolla menevät päällekkäin
 - molemmat osuvat samojen aistinsolujen viritysalueelle
 → Kun äänekset tulevat saman *kriittisen kaistan* sisälle, korvalla on suuria vaikeuksia erottaa molempia ääniä, heikompi *peitty*

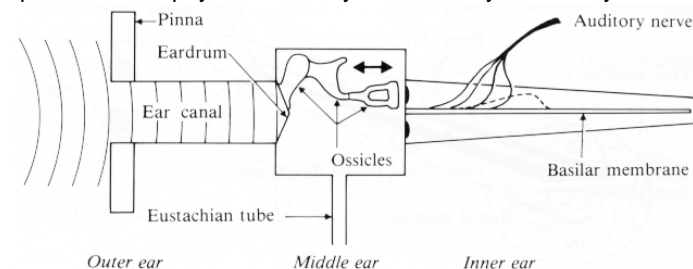
- Noin 26 (Bark-skaala, katkov.) tai 40 (ERB-skaala, ehyt viiva) kriittistä kaistaa kattaa koko kuuloalueen

- 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
- *Luujohtuminen*: värähtelyt välittyvät myös kallon luiden kautta sisäkorvaan, ei pelkästään korvakäytävää pitkin
 - merkitystä puhuessa
 - oman puheen kuuleminen äänitettynä kuulostaa epäluonnolliselta, kun normaalia kallon kautta johtuvaa ääntä ei tule
- Kuulon fysiologiaa animoituna
 - <http://www.neurophys.wisc.edu/~ychen/auditory/fs-auditory.html>



3 Peittoilmiö

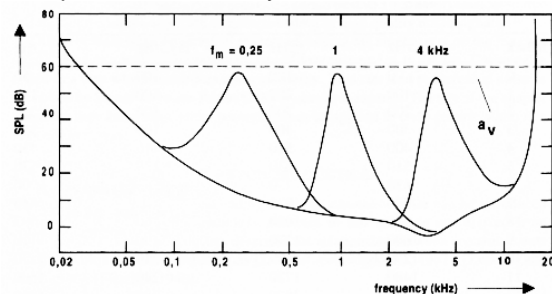
- Peittoilmiö kuvaa tilannetta jossa hiljaisempi mutta selvästi kuultava signaali muuttuu kuulumattomaksi äänekkäämmän signaalin vaikutuksesta
 - *peittoääni* aiheuttaa peittoilmiön, jolloin
 - *testiääni* häipyä kuulumattomiin
- Peittovaikutus riippuu sekä äänien spektrirakenteesta että äänien vaihtelusta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

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 kuulokynnystä
 - ääniä, joiden taso jää peittokynnyksen alapuolelle ei kuulla
 - peittokynnys hiljaisuudessa = kuulokynnys

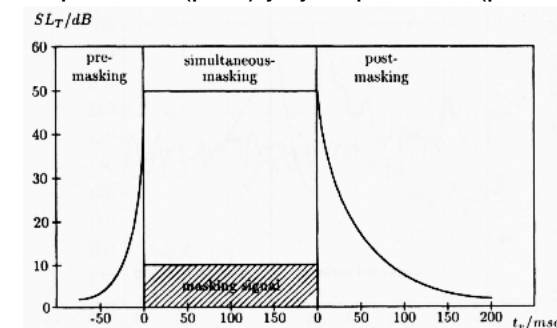
Peitto taajuustasossa

- 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

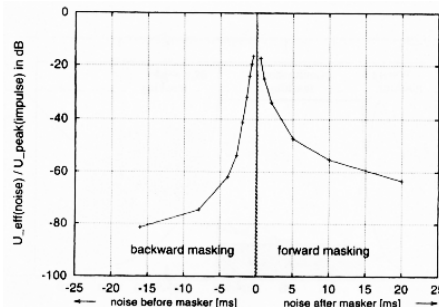


3.2 Peitto aikatasossa

- *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-) [Sporer98]



- Kuva: peittovaikutuksen mittaustuloksia [Spille92]
 - *aikapeitto ei ulotu kovin kauas*
 - samanaikaisten äänten 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 Äänipainetaso

- *Kuulokynnys*
 - heikoin kuultava äänipaine 1 kHz taajuudella on 20 mPa, mikä on valittu äänipainetaso 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
- Laajan dynaamisen alueen takia *dB-asteikko* on kätevä
 - $10 \log_{10}(\text{tehoja})$

TABLE 6.1 Typical Sound Levels One Might Encounter.

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

4.2 Äänitehotaso vs. äänipainetaso

- Äänipainetaso 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 äänipainetaso 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
- (Äänen intensiteettitaso
 - mittaa energian virtausta pinta-alan läpi
 - vapaasti etenevälle aallolle intensiteettitaso \approx äänipainetaso
 - äänipainetasoon vaikuttavat monesta eri suunnasta tulevat äänet)

4.3 Useita lähteitä

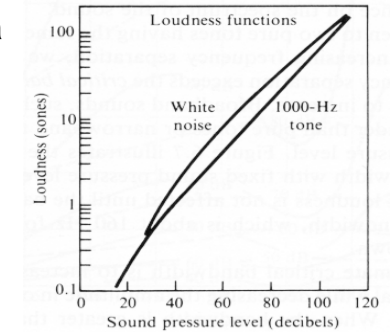
- Kaksi 80 dB äänipainetasoa tuottavaa lähdettä rinnakkain
 - lähteiden ääni *ei korreloi*: tuottavat yhdessä 83 dB tason
 - lähteiden ääni *korreloi täysin* (sama ääni): tuottavat 86 dB tason
- Amplitudin kaksinkertaistus nostaa äänipainetasoa 6 dB
 - koska: $L_p = 20 \log_{10}(2 \cdot p/p_0) = 20 \log_{10}(p/p_0) + 6$ [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

- **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

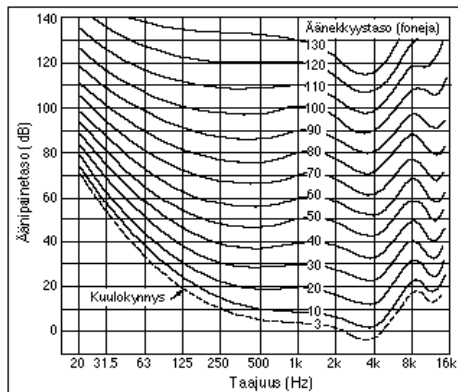
5.1 Äänekkyuden määrittäminen

- 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



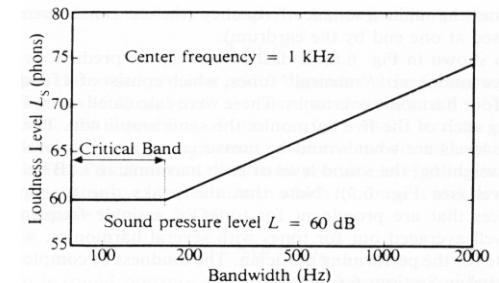
5.2 Siniääneksen äänekkyys

- 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]



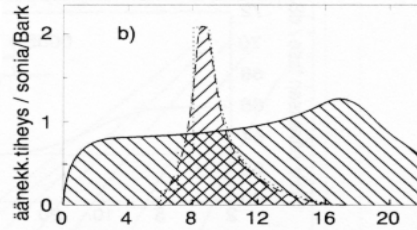
5.3 Laajakaistaisen äänen äänekkyys

- Laajakaistainen ääni koetaan äänekkäämpänä kuin saman äänenpaineen omaava kapeakaistainen signaali
 - kuulo analysoi ääntä kriittisen kaistan resoluutiolla
 - kukin kaista antaa oman lisänsä kokonaisäänekkyYTEEN
- Kuva: kapeakaistaisen kohinan äänekkyys kaistanleveyden funktiona
 - äänipainetaso pysyy vakiona (60 dB)
 - äänekkyys alkaa kasvaa, kun yhden kriittisen kaistan leveys ylitetään



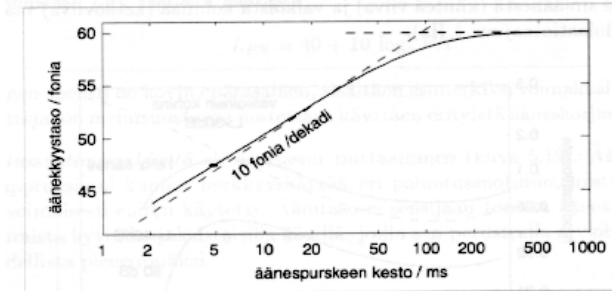
5.4 Kompleksisen äänen äänekkyys

- Kompleksisen äänen äänekkyys lasketaan käyttämällä ns. **äänekkyyksiheyttä** apusuurena
 - osäänekkyyys kutakin kriittistä kaistaa kohti
 - kokonaisyänekkyyys saadaan summaamalla äänekkyyksiheysarvo kultakin kriittiseltä kaistalta
- Äänekkyyksiheys on (karkeasti ottaen) ko. kaistalla olevan signaalin tehon logaritmi, jota
 - painotetaan kuulon herkkyyden mukaan (matalat ja korkeat taajuualueet vaikuttavat vähemmän äänekkyteen)
 - äänekkyyksiheyspektriä "levitetään" konvolvoimalla yli taajuualueen
 - kapeakaistainen signaali leviää läheisille taajuualueille
- Kuva: siniääneksen ja laajakaistaisen kohinan äänekkyden integrointi yli kriittisten kaistojen [Karjalainen]



5.5 Äänekkyden 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

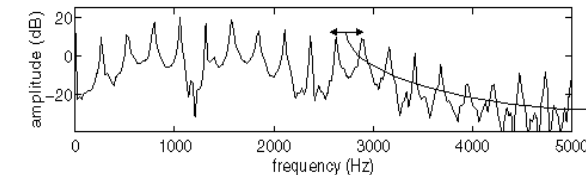


6 Äänenkorkeus

- **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

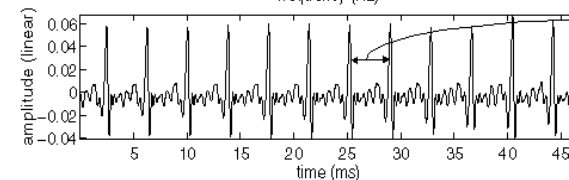
6.1 Harmoninen ääni

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



Trumpetin ääni:

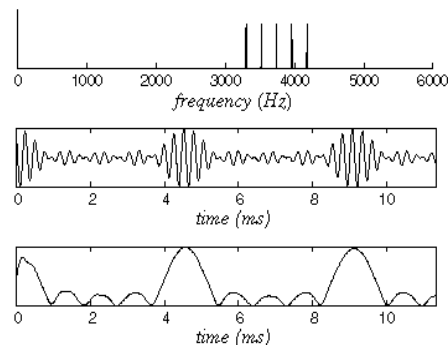
• Perustaajuus
 $F = 262 \text{ Hz}$



• 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

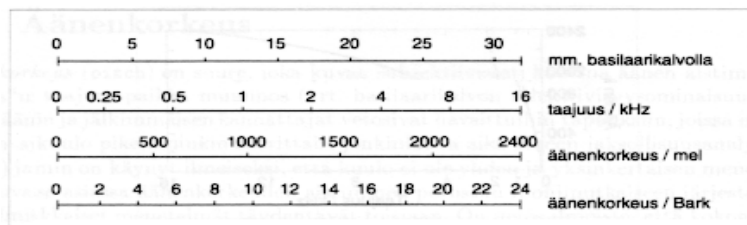


6.3 Äänenkorkeusasteikot

- Subjektiiivista äänenkorkeutta kuvaa *Meliasteikko*
 - määrittäminen perustuu suhdevertailuun, kuten äänekkyysasteikkokin
 - valitaan referenssiäni ja pyydetään henkilöä säätämään toisen äänen korkeus puolet korkeammaksi tai matemmaksi
 - 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

- 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

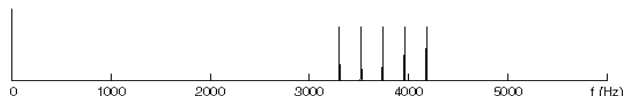
- Äänenkorkeusaistimus riippuu hieman äänipainetasosta
- Siniääneksillä
 - pienillä taajuuksilla äänen voimistuminen madaltaa sitä
 - suurilla taajuuksilla äänen voimistuminen korottaa sitä
- Myös harmonisen rakenteen omaavilla äänillä ilmenee *pienää* riippuvuutta voimakkuustasosta

6.5 Absoluuttinen sävelkorva

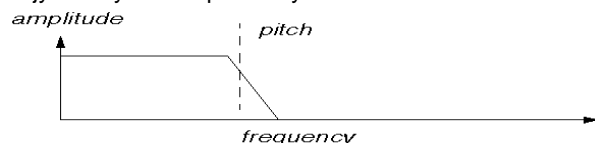
- Ihmisen kuulo on
 - tarkka vertailtaessa kahden äänen ominaisuuksia keskenään
 - epätarkka tekemään absoluuttisia arvioita
- Absoluuttinen sävelkorva on harvinainen ominaisuus
 - synnynnäinen *tai* harjoitettu kyky sanoa äänenkorkeus ilman referenssiä

6.6 Ei-harmonisten äänten äänenkorkeus

- Kuulo 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



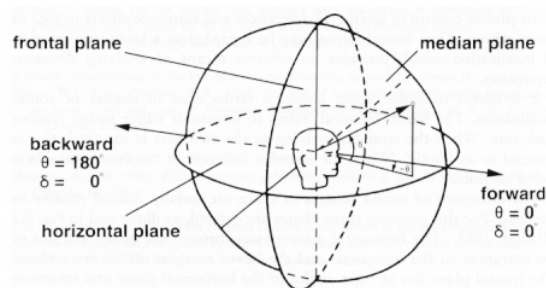
7 Tila- ja suuntakuulo

- 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

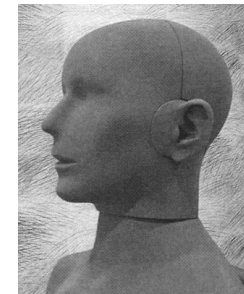
- Suunnan kuuleminen on jossain määrin mahdollista myös yksikorvaisesti
- Pää ja korvalehti muodostavat *suuntariippuvan suodattimen*
 - korvaan saapuvan äänisignaalin muokkaantumista tulosuunnasta riippuen voidaan kuvata HRTF-vasteilla
 - *HRTF = head-related transfer function*

- HRTF-vasteiden merkitys on ratkaiseva äänilähteen mediaanitason (vertikaalisessa) paikantamisessa



Yksikorvainen äänilähteen paikantaminen

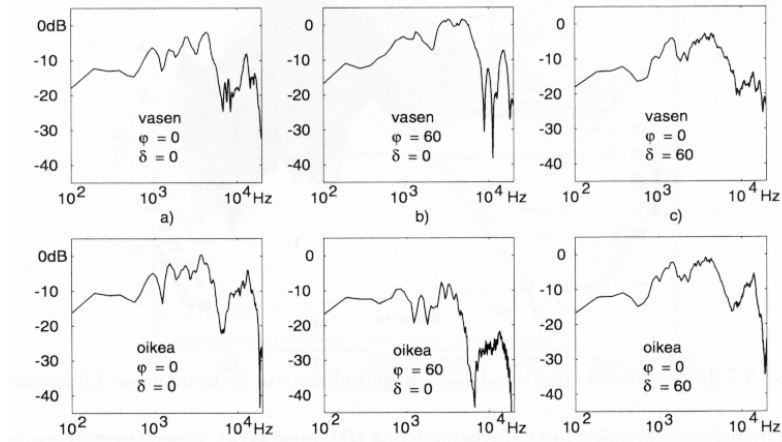
- HRTF-vaste voidaan määrittää mittaamalla
 - lähteen säteilemä ääni
 - korvakäytävän suulle tai tärykalvolle tuleva ääni (korvakäytävän vaste pysyy tulosuunnan suhteen vakiona)
- Käytännössä mittauksessa voidaan käyttää joko
 - vasen kuva: koehenkilön korvakäytävän suulla olevaa mikrofonia, tai
 - oikea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



Yksikorvainen äänilähteen paikantaminen

Kuulo 41
DA / Klapuri

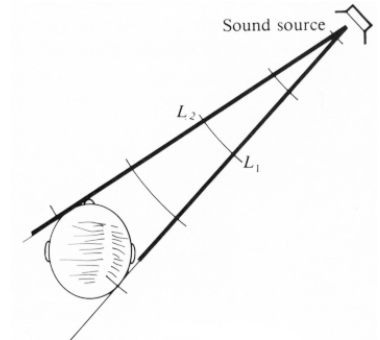
- Koehenkilöiltä mitattuja HRTF-vasteita [Karjalainen99]
 - φ = horisontaalitason kulma (0: edessä); δ = mediaanitason kulma



7.2 Siniääneksen tulosuunnan kuuleminen

Kuulo 42
DA / Klapuri

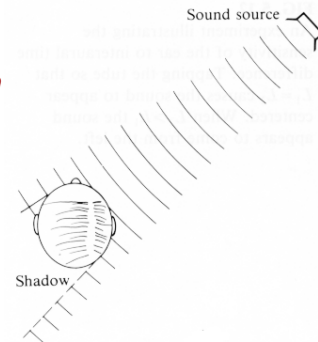
- Suuntakuulon kokeileminen siniääneksillä auttaa ymmärtämään kompleksisten äänten tulosuunnan kuulemistä
- Taajuudeltaan *alle 750 Hz* korkuisten äänesten tulosuunnan kuuleminen perustuu pääasiassa korvien väliseen *aikaeroon*
 - aaltojen kulkeman matkan eroa laskiessa äänen diffraktio, taipuminen pään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



Siniääneksen tulosuunnan kuuleminen

Kuulo 43
DA / Klapuri

- 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 kHz:iin
- *Korkeammilla taajuuksilla* (> 750 Hz) kuulo hyödyntää korvien välistä *intensiteettieroa*
 - pää aiheuttaa akustisen "varjon" (äänen voimakkuus pään takana on pienempi)
 - toimii erityisesti korkeilla taajuuksilla



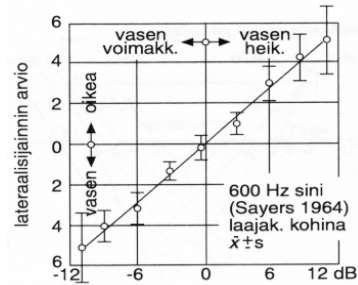
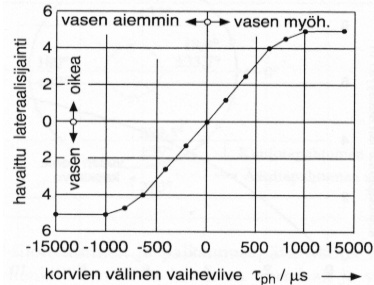
7.3 Kompleksisten äänten tulosuunta

Kuulo 44
DA / Klapuri

- 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 **äänekkyden** 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