



Aalto-universitetet
Högskolan för
elektroteknik

Kommunikatio- akustiikan perusteet

Ville Pulkki

A?

Aalto-universitetet
Högskolan för
elektroteknik

Mitä on akustiikka?

Akustiikka

- 1) ääntä tutkiva tiede ja sen tekniset sovellukset
- 2) suljetun tilan (huoneen) kuuluvuus, kaiuntasuhteet

Ääni

- 1) kuulohavainto korvassa
- 2) värähtely, joka voi aiheuttaa kuulohavainnon
(esim. ilmanpaineen vaihtelu äänitaajuudella,
sähköinen tai digitaalinen signaali)



Aalto-universitetet
Högskolan för
elektroteknik

Akustiikan haaroja

Huoneakustiikka
Ilmakehän akustiikka
Vedenalaisakustiikka
Kvanttiakustiikka
Meluakustiikka
Puheteknologia
Äänentoisto (Audio)
Psykoakustiikka
Ultraääni
...



Aalto-universitetet
Högskolan för
elektroteknik

Miksi sitten akustiikkaa tutkitaan ELECIssä?

**Akustiikka ei ole sidottu tiettyyn tieteenalaan,
akustiikan tutkimus voisi olla kouluissa SCI, ELEC,
ENG, ARTS.**

Monilla tieteenaloilla on omat akustiset ongelmat

- **SCI: äänen käyttäytymisen mallinnus**
- **ELEC: ääni telekommunikaatiossa, äänentoisto,
puhelimet**
- **ENG: koneiden värähtelyt, talojen ääneneristys**
- **ARTS: taide**

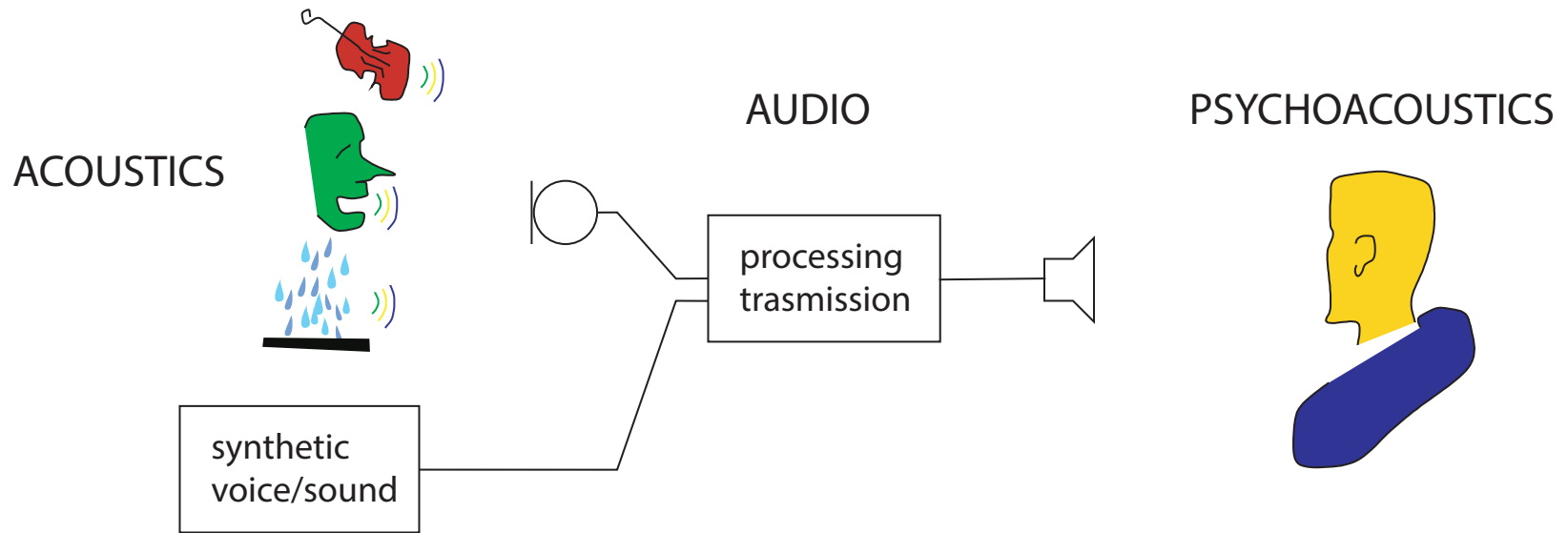


Aalto-universitetet
Högskolan för
elektroteknik

Mitä akustiikkaa lukenut henkilö tekee?

- audio-DSP:n kehitys (nokia, huawei, intel, skype, apple, dolby, philips, yousician)
- audiolaitteet (genelec, savox, goertek, nokia)
- akustiikkakonsultti (akukon, ramboll, helimäki, sito)
- muut (VTT tampere+helsinki, työterveyslaitos, ministeriöt, aalto, koulutus)

Mitkä akustiikan ilmiöt liittyvät informaatioteknologiaan



Esimerkkejä kommunikaatioakustiikkaan liittyvistä teknologioista

Äänen koodaus ja välitys puhekommunikaatiota varten

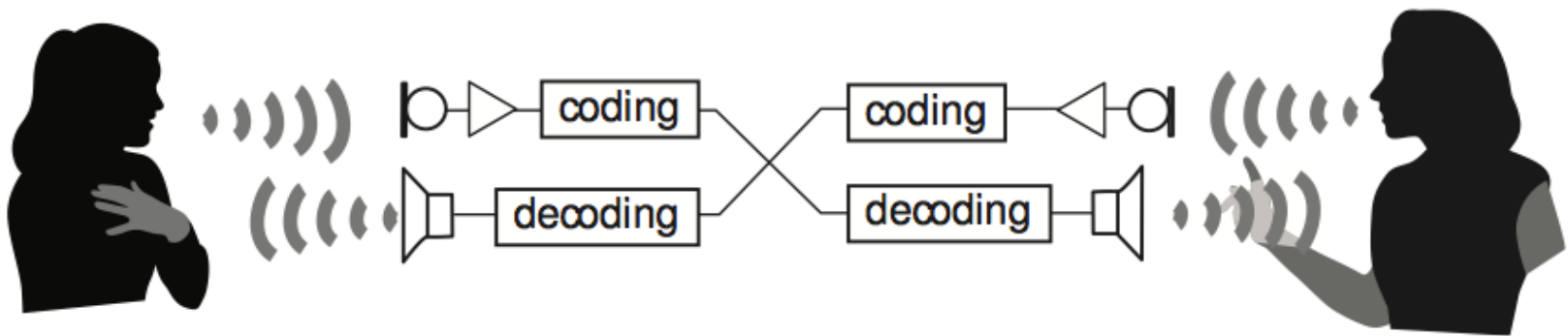
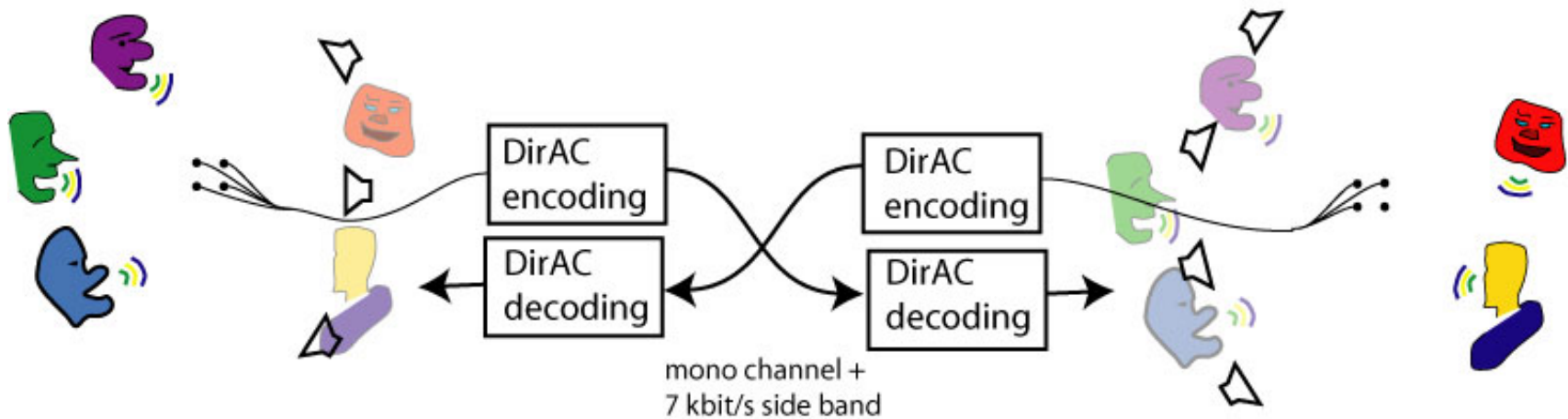


Figure 4 Speech communication through a technical transmission channel.

Telekonferenssit, tilaäänen analyysi ja synteesi



Puheella ohjattava 'älykäs' laite

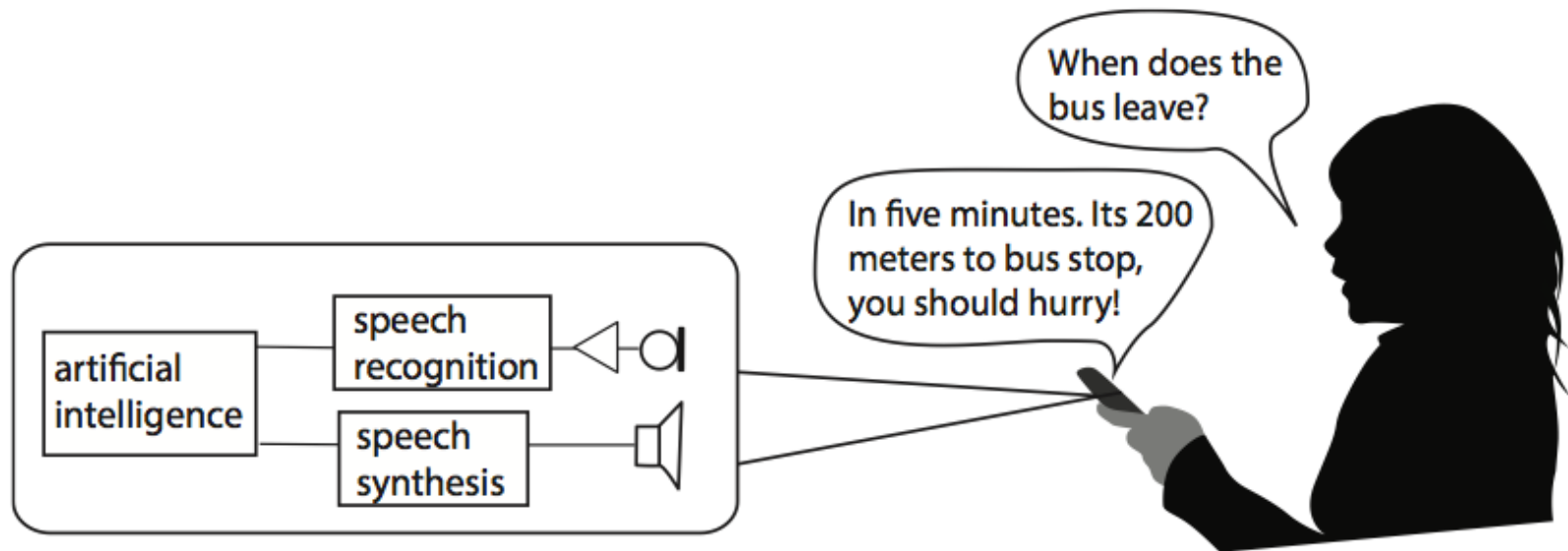
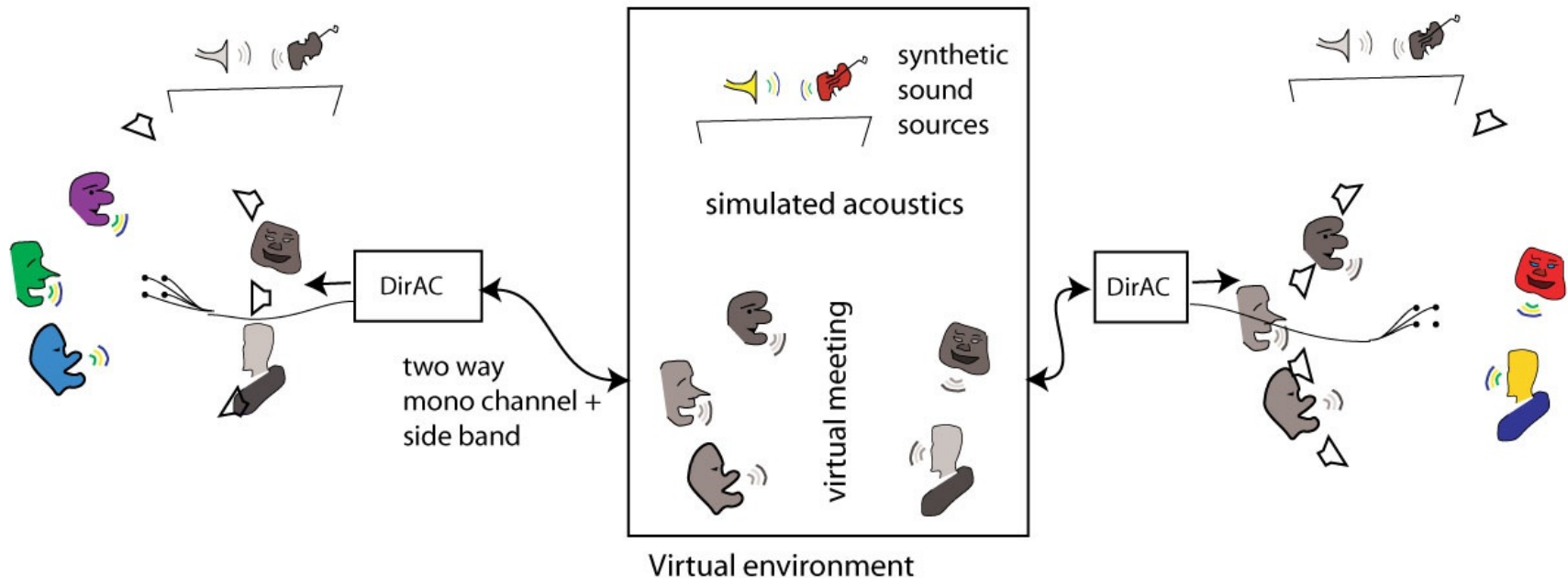


Figure 5 Man-machine communication by voice.

Usean käyttäjän virtuaalimaailmat, tilaäänen synteesi ja toistaminen



Mitkä akustiikan ilmiöt liittyvät informaatioteknologiaan

- **Äänilähteet (puhe, musiikki, luonto)**
- **Synteettiset lähteet (puhesynteesi, musiikki)**
- **Äänen käyttäytyminen huoneissa**
- **Mikrofonit / kaiuttimet**
- **Äänen käsittely ja koodaus**
- **Äänen välitys**
- **Havaitseminen**

Muutamia akustiikan peruskäsitteitä

Aallot

Ääniaallot, valoaallot, veden aallot, sokkiaallot, radioaallot, röntgenaallot, ...

Kaikki viestintä perustuu aaltoihin (kuva ja ääni)

Aalto kuljettaa mukanaan energiaa ja informaatiota

Aallon etenemisnopeus = taajuus $\times$ aallonpituus
$$v = f \lambda$$

Ääniaallot

Ääniaalto = pitkittäinen värähtely kiinteässä aineessa, nesteessä tai kaasussa

Ilmassa (tai muussa kaasussa) ääniaalto ilmenee molekyylien harventumina ja tihentyminä, jotka etenevät

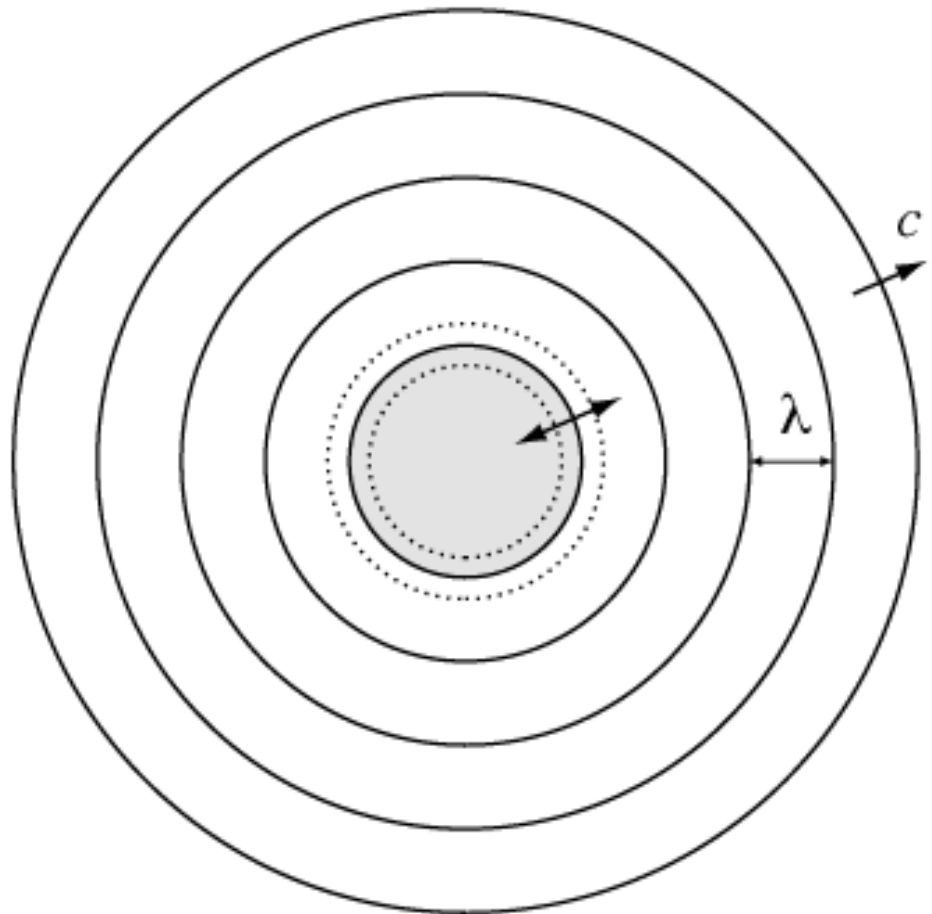
Käytännössä paine-erot ovat hyvin pieniä verrattuna ilmankehän paineeseen

Ääniaallon heijastumista voidaan tarkastella kapeassa putkessa

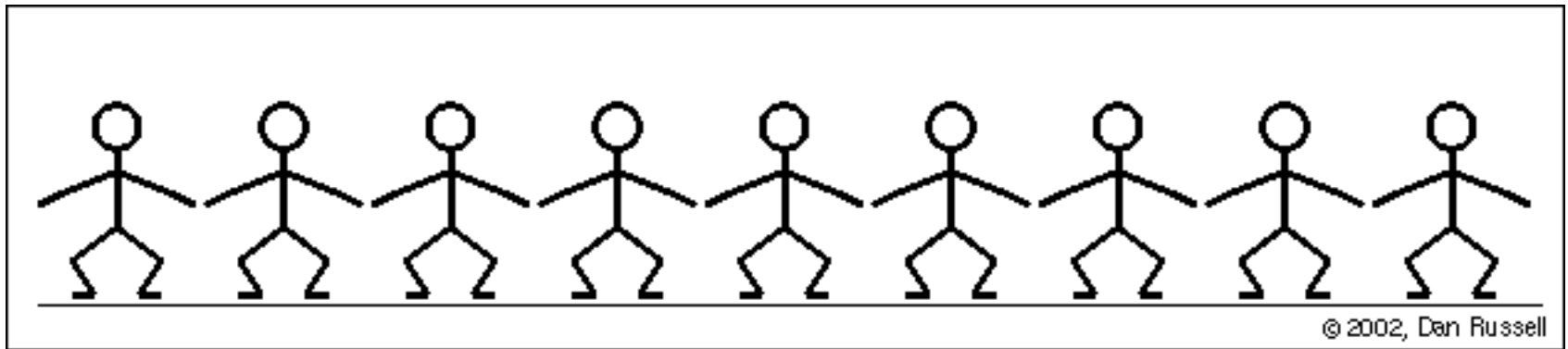
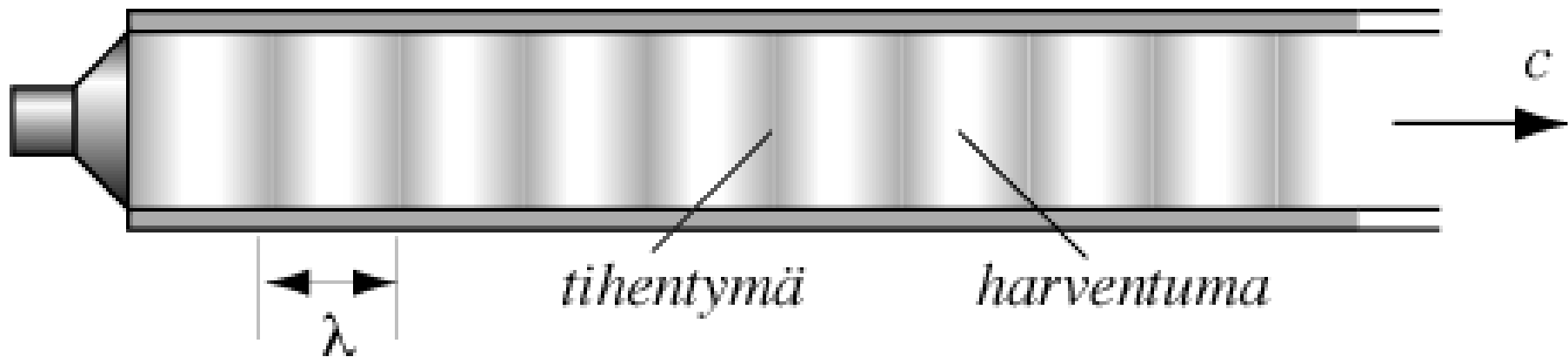
Palloaalto

$$p \sim 1/r$$

Paineaallot etenevät
ilmassa nopeudella
 $c=340 \text{ m/s}$



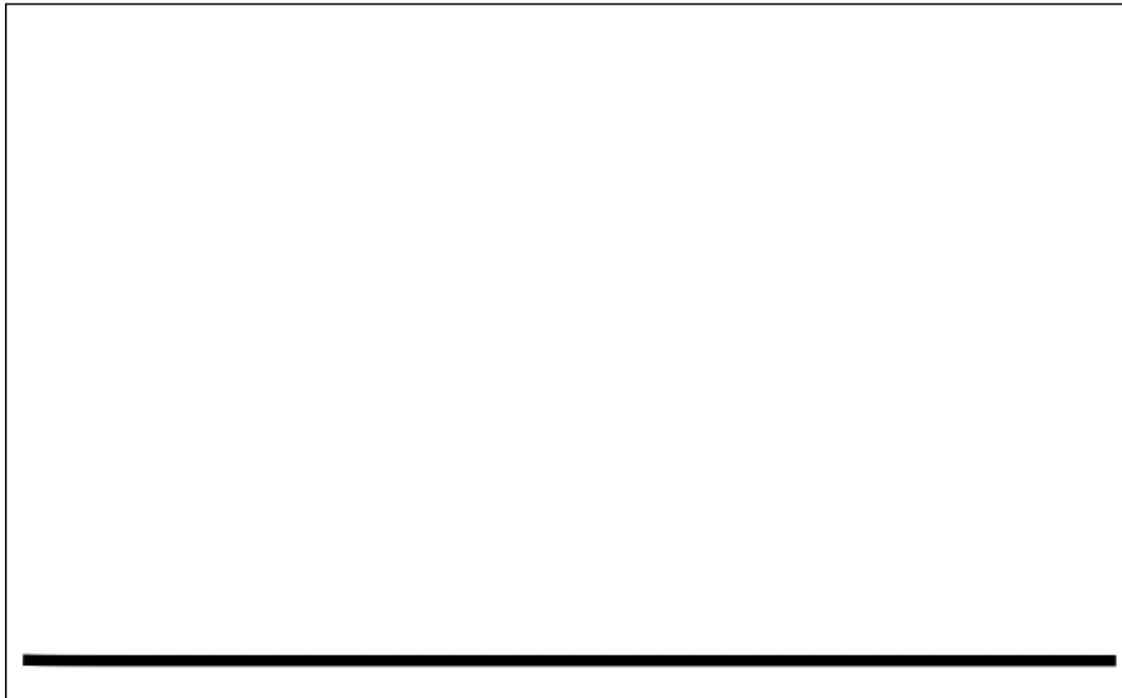
Tasoaalto $p(t)$ putkessa



Aaltojen yhdistyminen

Paineaallot yhdistyvät superpositio-periaatteen mukaisesti.

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t)$$



Äänipainetaso

Kuvaa äänenvoimakkuutta verrattuna referenssiäänipaineeseen $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 20 \mu\text{Pa}$, joka vastaa tasoa 0 dB

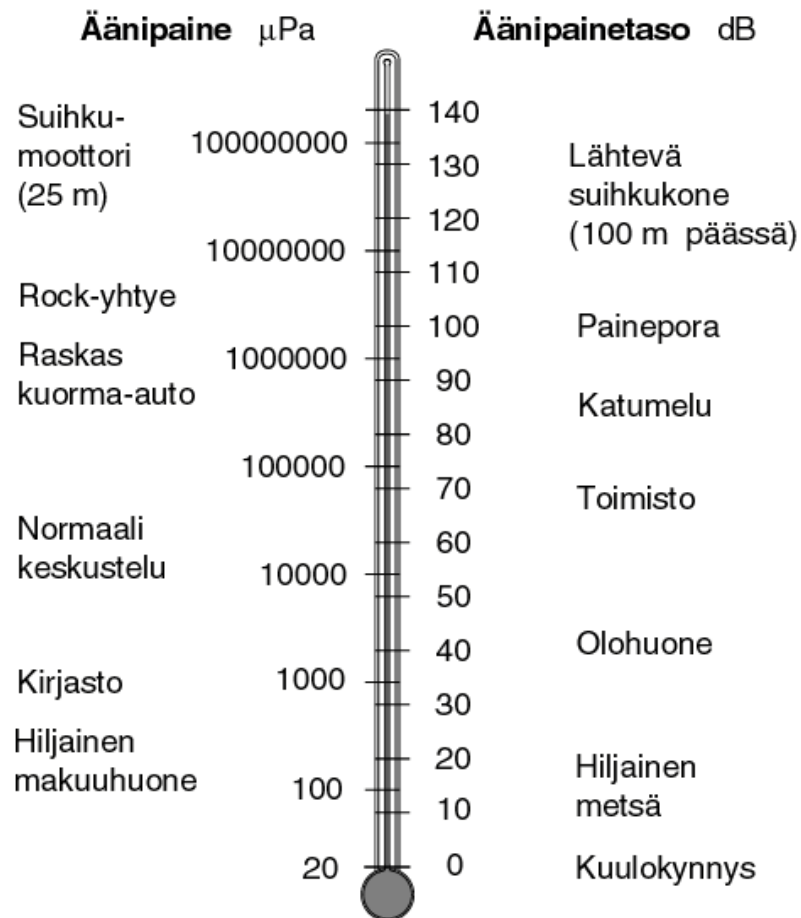
$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

- Yksikkö **desibeli**, dB
- Belin kymmenesosa (vrt. desilitra, desimetri)



Aalto-universitetet
Högskolan för
elektroteknik

Äänten tasoja



Kohina, 6 dB askelin



Kohina, 3 dB askelin



Kohina, 1 dB askelin



Puhe, 25, 50, 100, 200cm

Useita äänilähteitä

- Jos 2 korreloimatonta äänilähdettä aiheuttaa kukin 80 dB äänipainetason, ne aiheuttavat yhdessä 83 dB tason
- Syy: ääniteho kaksinkertaistuu eli äänipainetason nousu on $10 \log(2) = 3,0103 \text{ dB} \approx 3 \text{ dB}$
- Jos 2 äänilähdettä ovat korreloivia (esim. kaksi samaa ääntä) ja samanvaiheisia, niiden yhdistäminen aiheuttaa 6 dB:n nousun äänipainetasossa
- Äänet voivat yhdistyä toisiinsa kumoten tai vahvistaen
- Jos kummankin amplitudi on A, niiden yhdistyessä amplitudi voi olla jotain 0 ja 2A:n välillä taajuus- ja vaihesuhteista riippuen

Jälkikaiunta

Äänilähde jätetään päälle ajaksi T

- Äänitaso kasvaa portaittain
- Äänitaso vaimenee eksponentiaalisesti, kun lähde on sammutettu

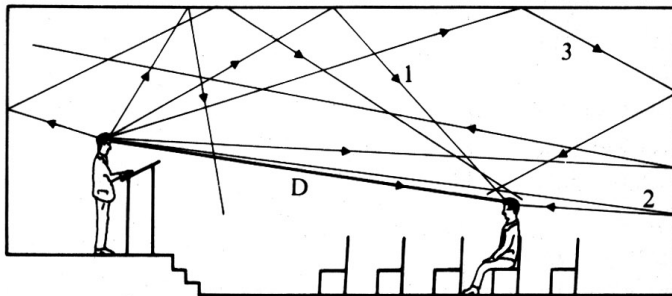
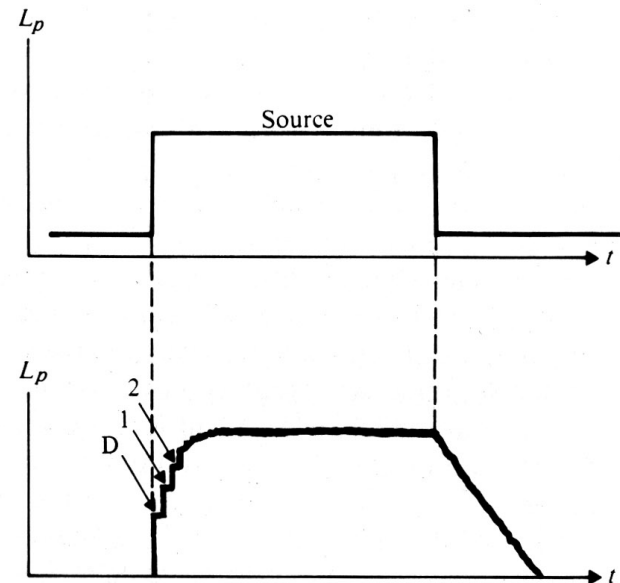
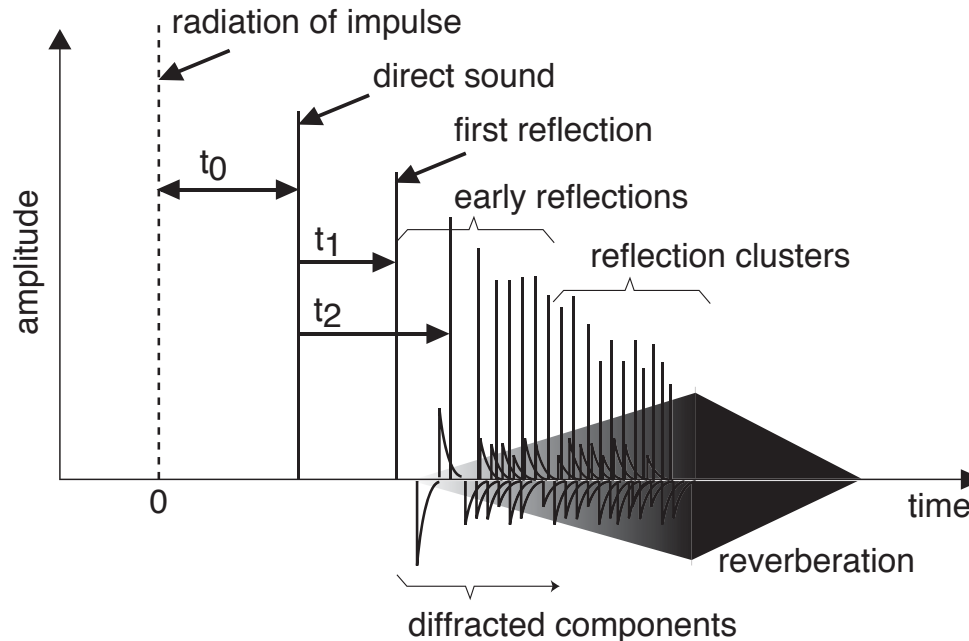


FIG. 23.5



Impulssivaste

Lähde emittoi yhden impulssin. Mitä näkyy vastaanottajalla?



Jälkikaiunta-aika

- Äänen vaimenemisaika huoneessa riippuu huoneen koosta sekä pintojen ja esineiden absorptiosuhteesta
- Sabinen kaava jälkikaiunta-ajalle (W. Sabine, 1922):

$$RT = 0,161 \text{ s/m} \frac{V}{A}$$

– missä V on huoneen tilavuus ja A on absorptioala [sabin, m²]

- Yleensä mitataan **T60** eli aika, jossa ääni vaimenee 60 dB
 - Voidaan mitata 30 dB:n vaimenemisaika ja kertoa kahdella
- Jälkikaiunta-aika voi olla hyvin erilainen eri taajuuksilla
 - Voidaan käyttää keskiarvoa tai taajuuden 500 Hz arvoa

Jälkikaiunta-aika

Esimerkki:

kovaseinäinen huone (tilavuus V), jonka seinässä aukko (ala A)

Ääni pääsee aukosta ulos, joten absorptioala = A

Muiden pintojen absorptioala on Sa

- S on pinta-ala ja a on absorptiosuhde, joka on selvitettävä

Kokonaisabsorptioala: $A = S_1a_1 + S_2a_2 + S_3a_3 + \dots$

Materiaalien absorptiosuhteita on taulukoissa

Myös huonekalut ja ihmiset absorboivat ääntä

- Otettava huomioon T_{60} :n arvioinnissa

Materiaalien absorptiosuhteita

TABLE 23.1 Absorption coefficients for various materials

Material	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Concrete block, unpainted	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Concrete block, painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Glass, window	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Plaster on lath	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03
Plywood paneling	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Drapery, lightweight	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
Drapery, heavyweight	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65
Terrazzo floor	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Wood floor	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Carpet, on concrete	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
Carpet, on pad	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
Acoustical tile, suspended	0.76	0.93	0.83	0.99	0.99	0.94
Acoustical tile, on concrete	0.14	0.20	0.76	0.79	0.58	0.37
Gypsum board, one-half inch	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09

Materiaalien absorptiosuhteita

TABLE 23.2 Sound absorption by people and seats, and air absorption

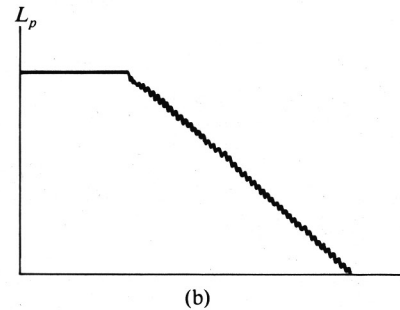
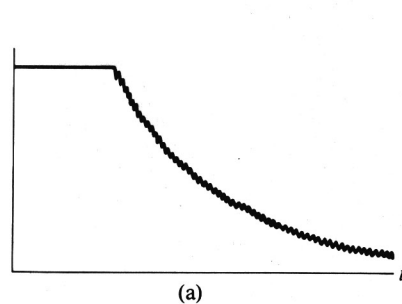
Material	Frequency (Hz)							Unit*
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Wood or metal seats, unoccupied	0.014	0.018	0.020	0.036	0.035	0.028		m ²
Upholstered seats, unoccupied	0.13	0.26	0.39	0.46	0.43	0.41		m ²
Audience in upholstered seats	0.27	0.40	0.56	0.65	0.64	0.56		m ²
Air absorption (per m ³):								
20°C, 30%	—	—	—	—	0.012	0.038	0.136	
20°C, 50%	—	—	—	—	0.010	0.024	0.086	

Note: Values of sound absorption are given in m²; to convert to ft², multiply by 10.8. Values of air absorption are given in m⁻¹; to convert to ft⁻¹, divide by 3.3.

Jälkikaiunta-aika

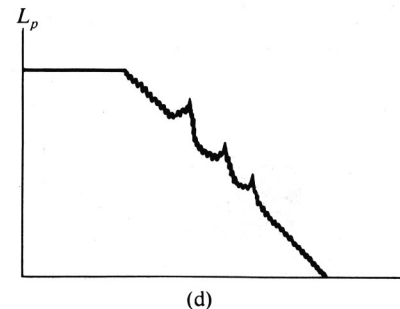
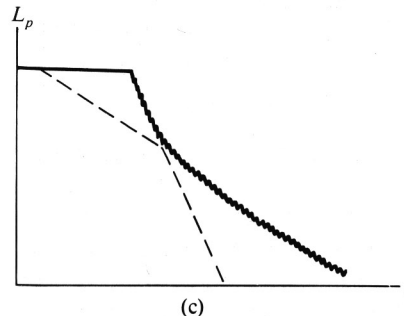
- Eksponentiaalinen vaimeneminen on lineaarista log-asteikolla, kuten dB-asteikolla

Äänipaineen
vaimeneminen



Ääni(paine)tason
vaimeneminen

Kaksivaihe-
vaimeneminen



Erillisenä erottuvia
heijastuksia

Siniääni

Siniääni on yksinkertaisin ääni

$$p(t)=A \sin(f t)$$

A = amplitude

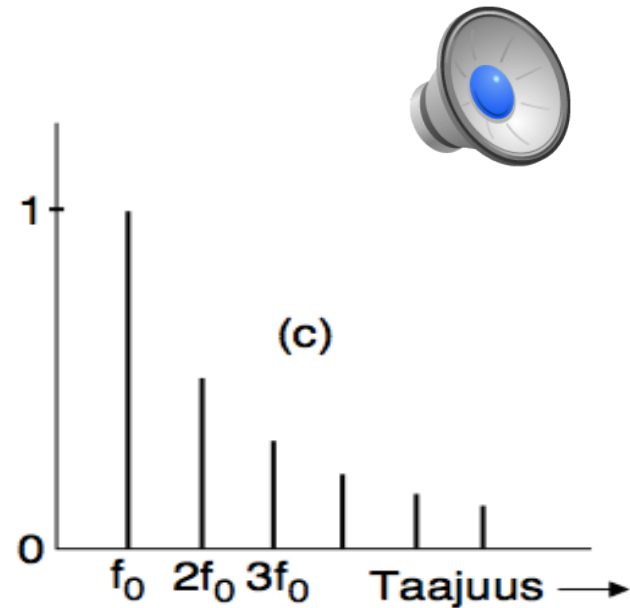
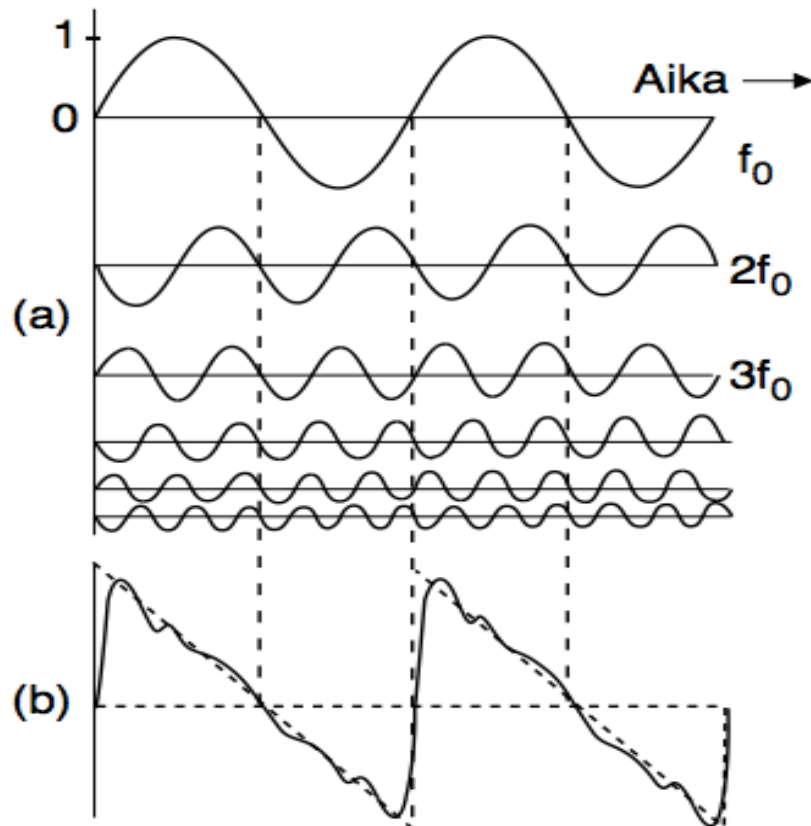
f = taajuus

t = aika

- demo: kuunnellaan sinejä

Siniääni = äänes = äänen harmoninen

Värähtelyn spektrianalyysi



Muutaman signaalin taajuusanalyysi

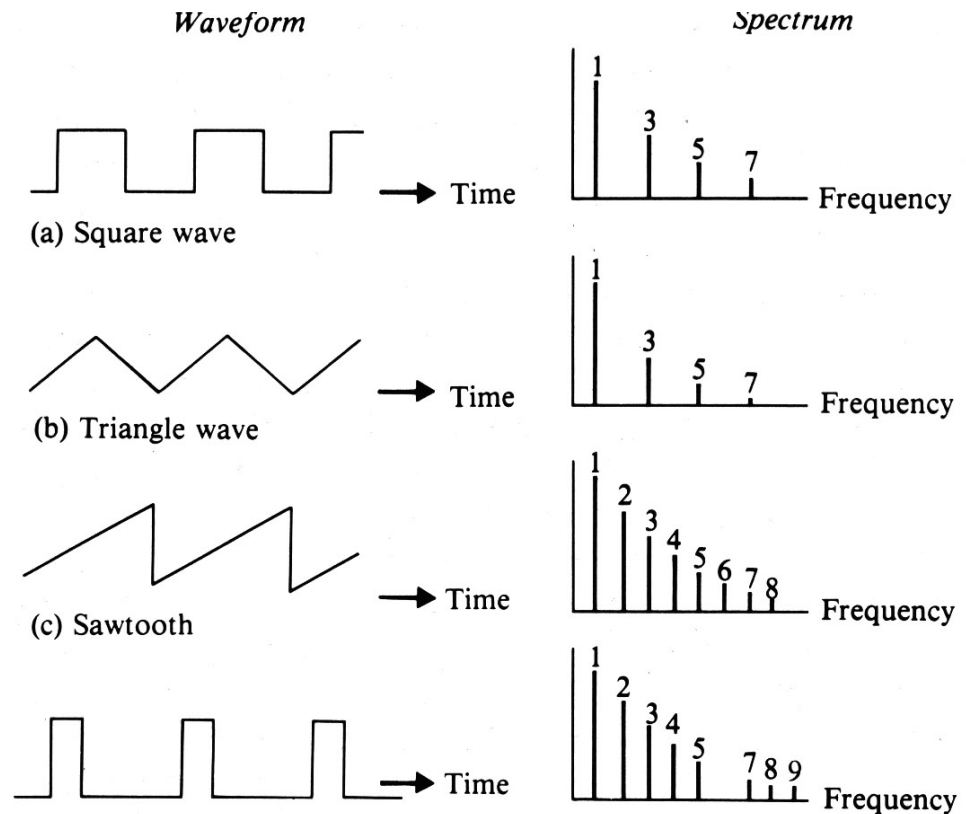


FIG. 7.11

Spectra of complex waveforms. The square wave and triangle wave are missing all the even-numbered

Kuulon rakenne ja toiminta

Kuulo

Kuuloaisti reagoi äänipaineen vaihteluun

Laaja dynamiikka: suurimman ja pienimmän äänipaineen suhde = 1 000 000 : 1 = 10^6 : 1

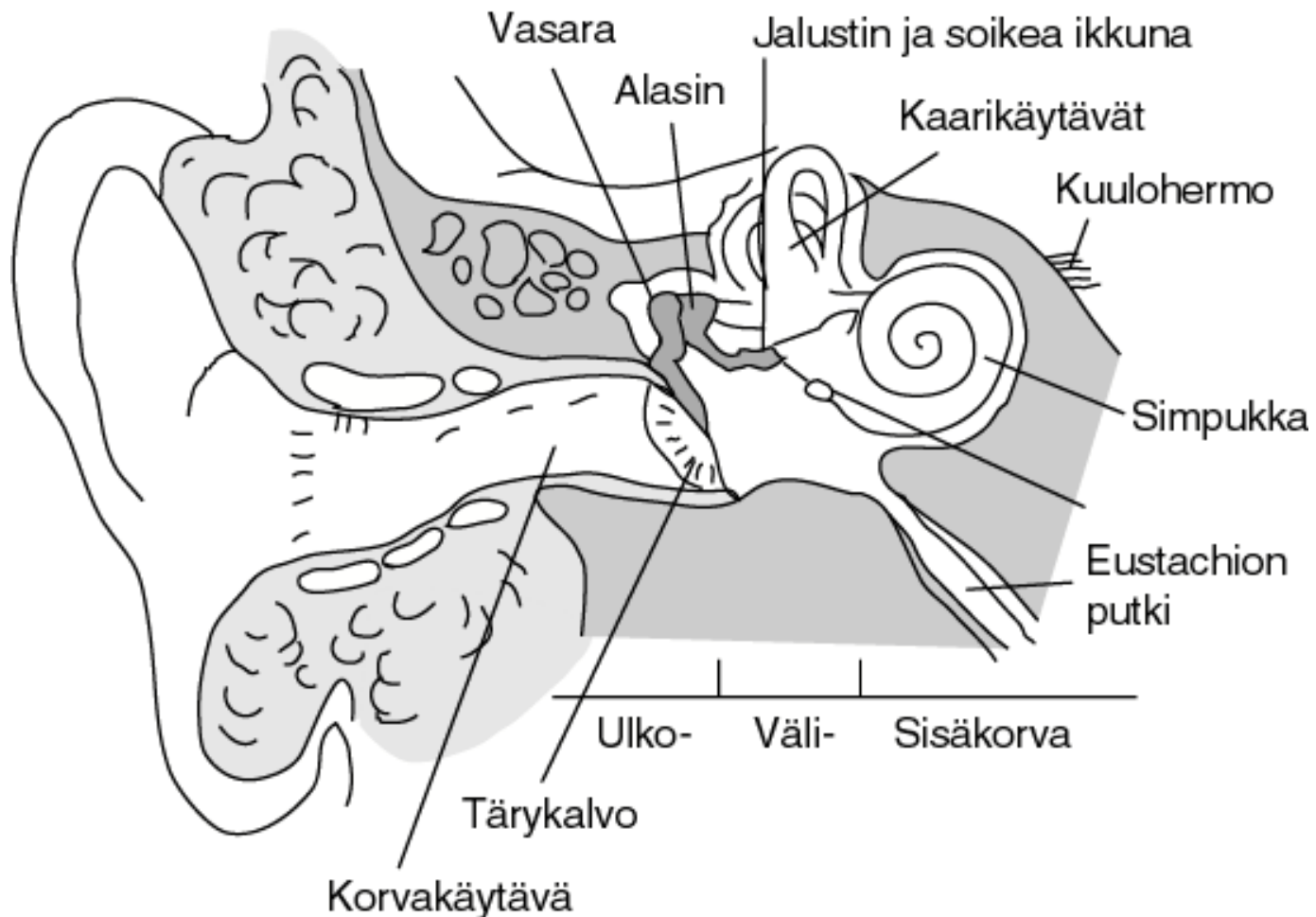
Taajuusalue jopa 20 - 20 000 Hz

Kuulon ominaisuudet muuttuvat iän ja meluallistuksen mukana

Valikoiva aisti

- äänilähteiden erottelu, esim. cocktail-juhlissa
- nukkuminen melussa, herääminen kellon soidessa tai lapsen itkiessä

Korvan rakenne



Korvan toiminta

Äänipaineen vaihtelu aiheuttaa tärykalvon liikkeen

Kuuloluut muuttavat värähtelyn mekaaniseksi ja vahvistavat

Akustinen refleksi (stapediusrefleksi): kuuloluut ja tärykalvo voivat jäykistyä suojellakseen korvaa voimakkailta ääniltä

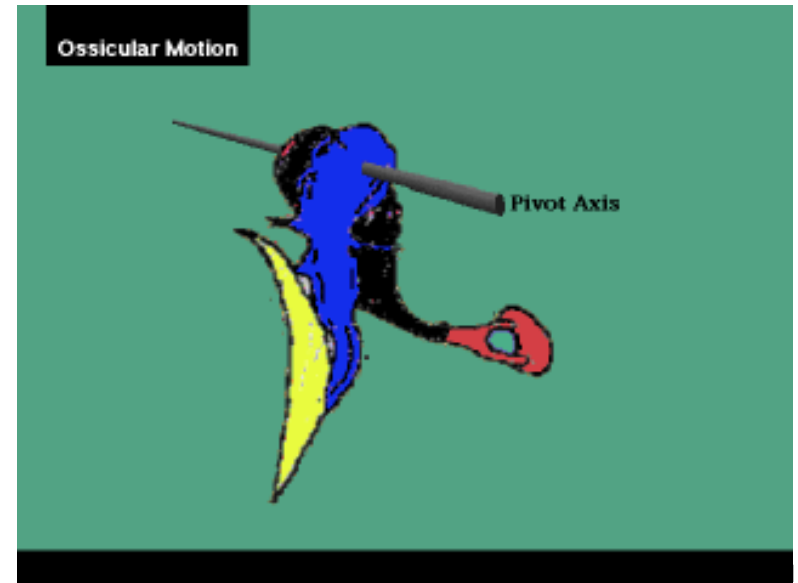
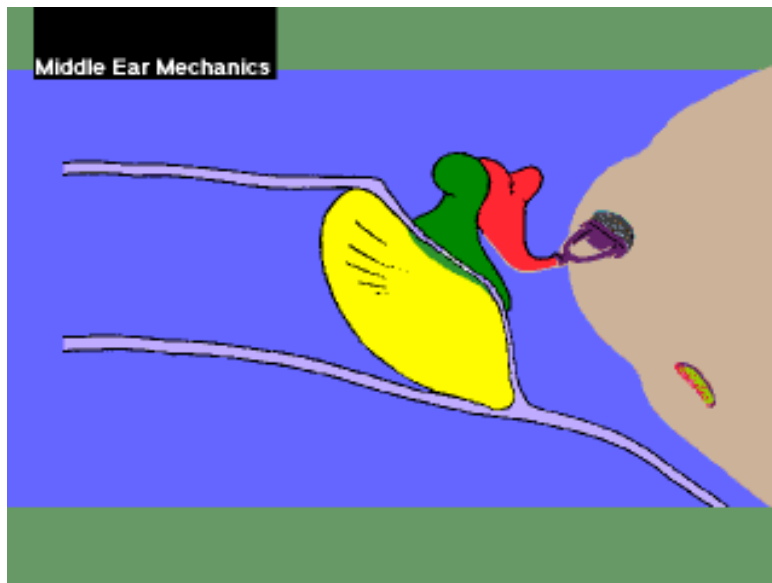
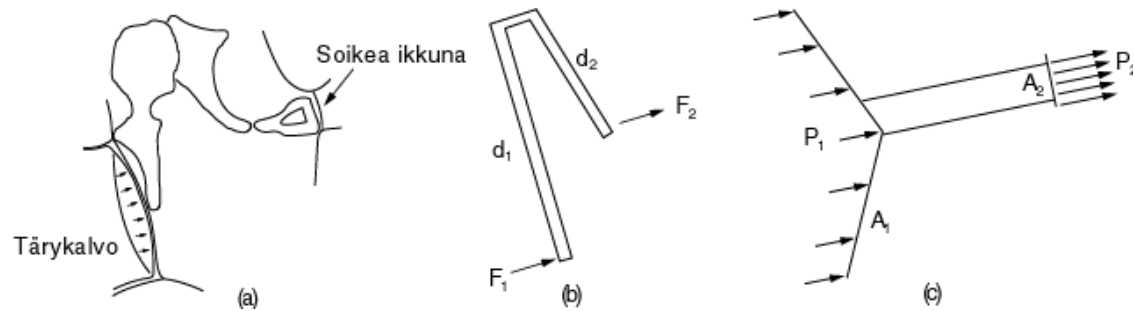
Tärykalvon ja soikean ikkunan kokoero → vahvistuskerroin 20

Simpukassa värähtely etenee nesteessä

Basilaarikalvon mekaaninen värähtely koodautuu sähköimpulsseiksi

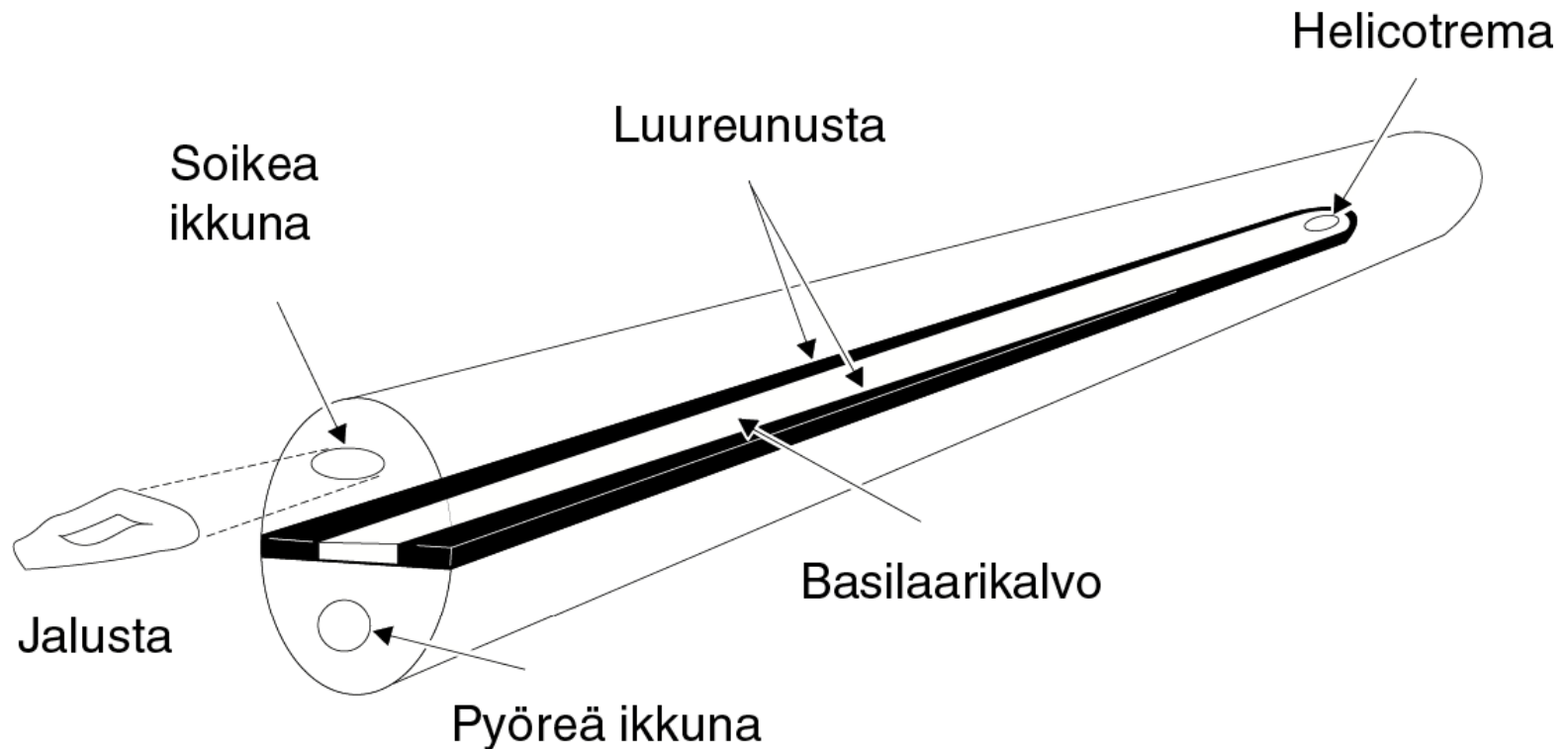
Kuulohermo vie sähköimpulssit aivoihin

Kuuloluut



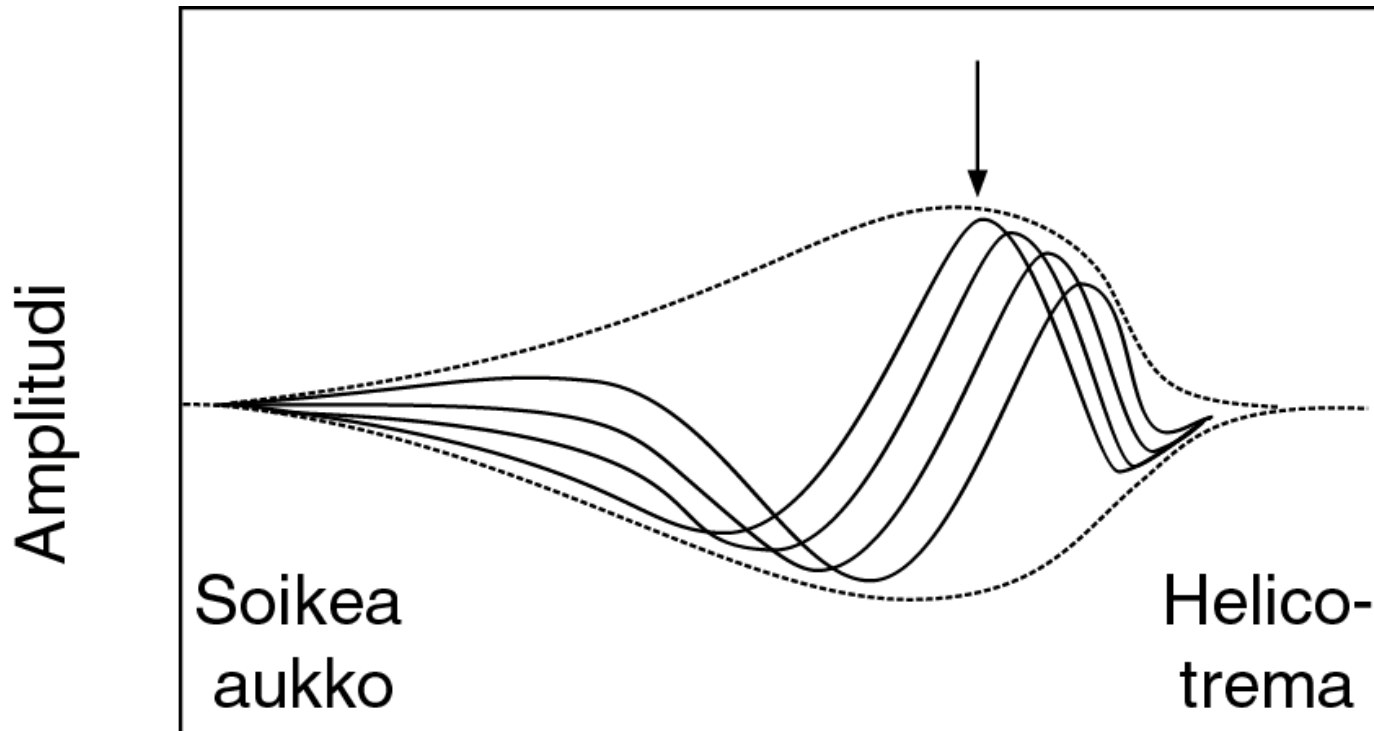
Sisäkorva ja simpukka

Simpukka oikaistuna

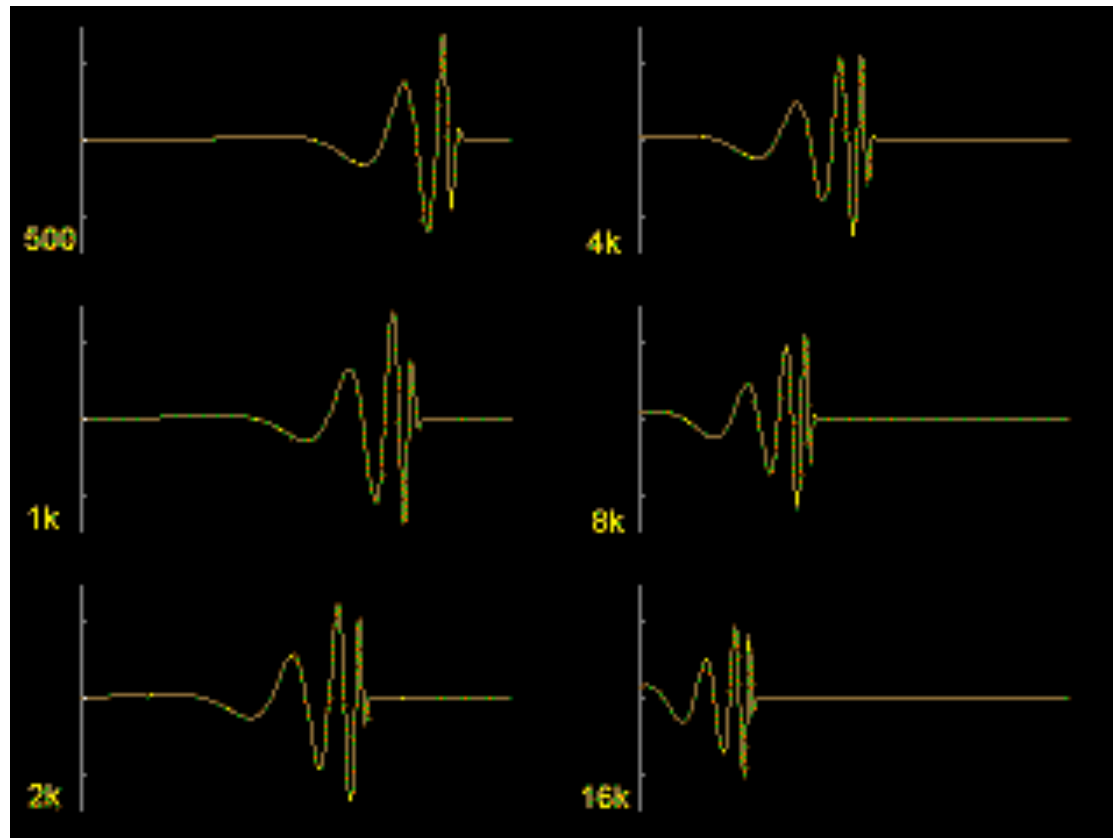


Basilaarikalvon toiminta

Kulkuaalto basilaarikalvolla

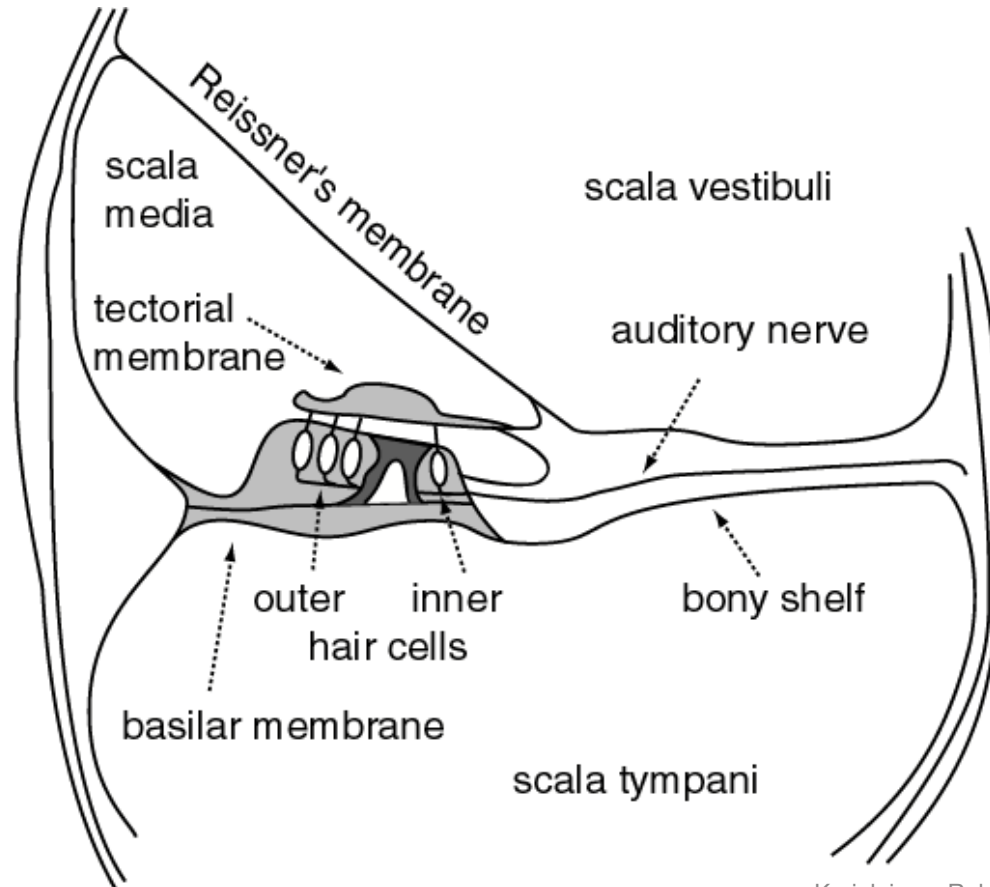


Kulkuaalto basilaarikalvolla



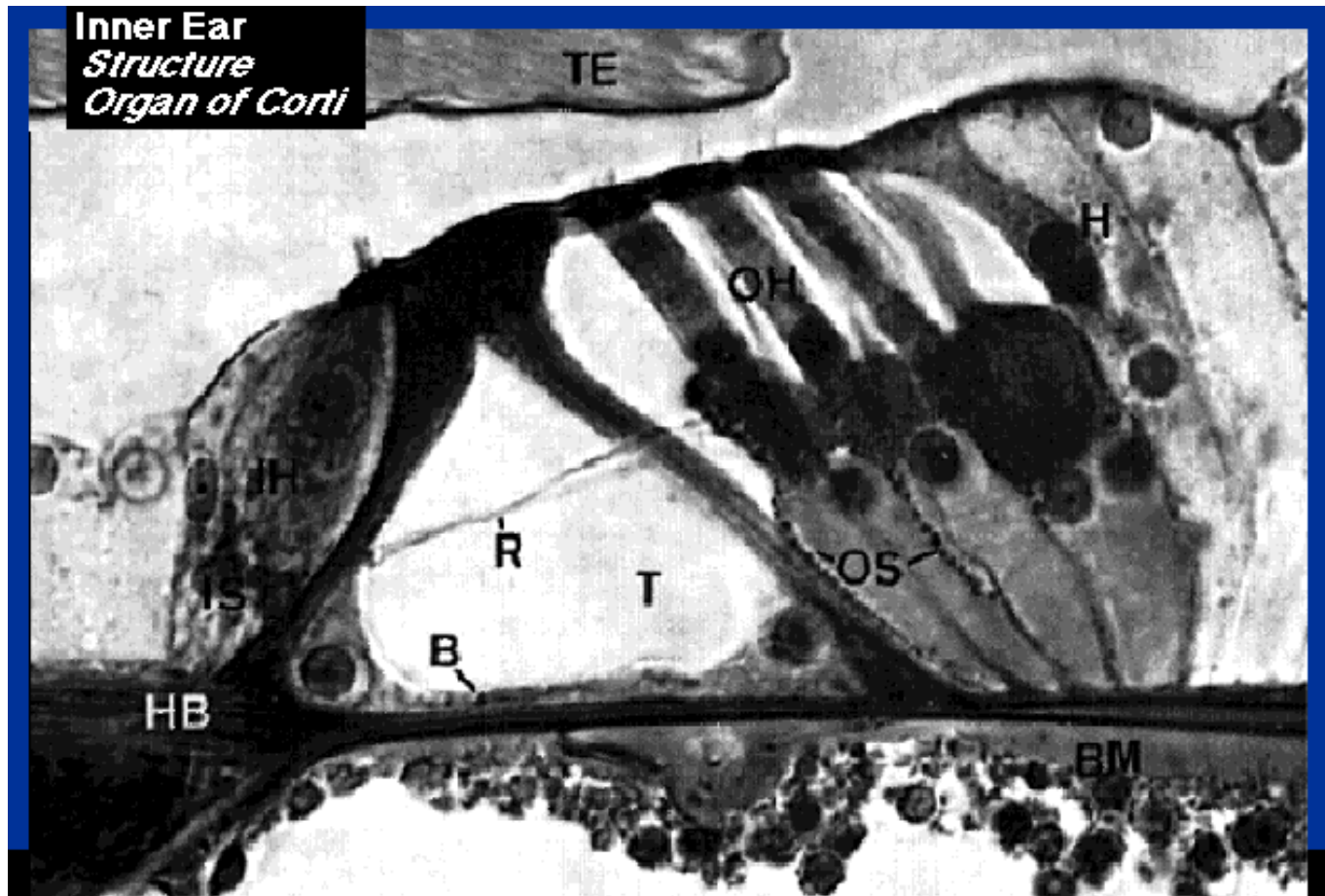
Karjalainen, Rahkila, Välimäki 1999-2001

Simpukan poikkileikkaus



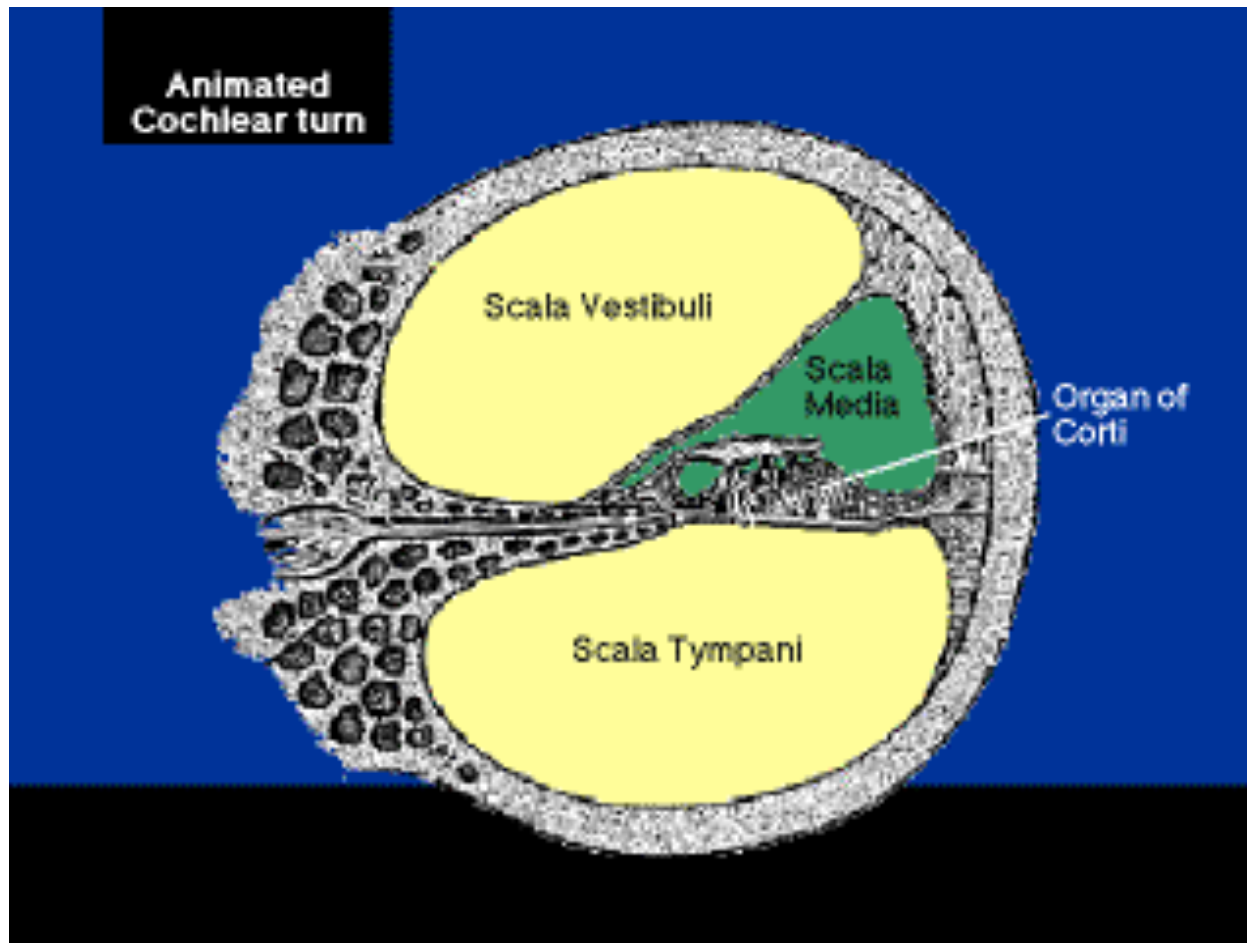
Karjalainen, Rahkila, Välimäki 1999-2001

Aistinsolut Cortin elimessä



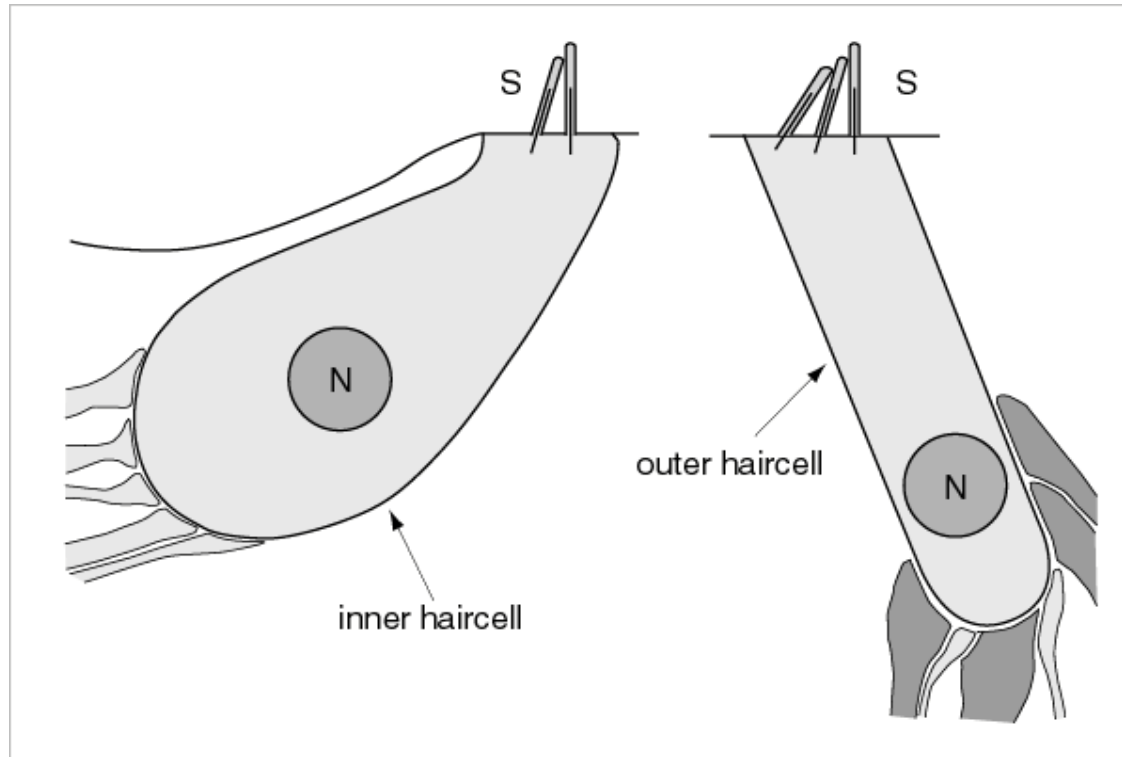
ki 1999-2001

Cortin elimen liike



Välimäki 1999-2001

Aistinsolut



Kuulon toiminta

**Jaetaan korvakäytävän ääni taajuuskaistoihin
Aivoihin etenevä signaali synkronoitunut tärykalvon liikkeen
kanssa**

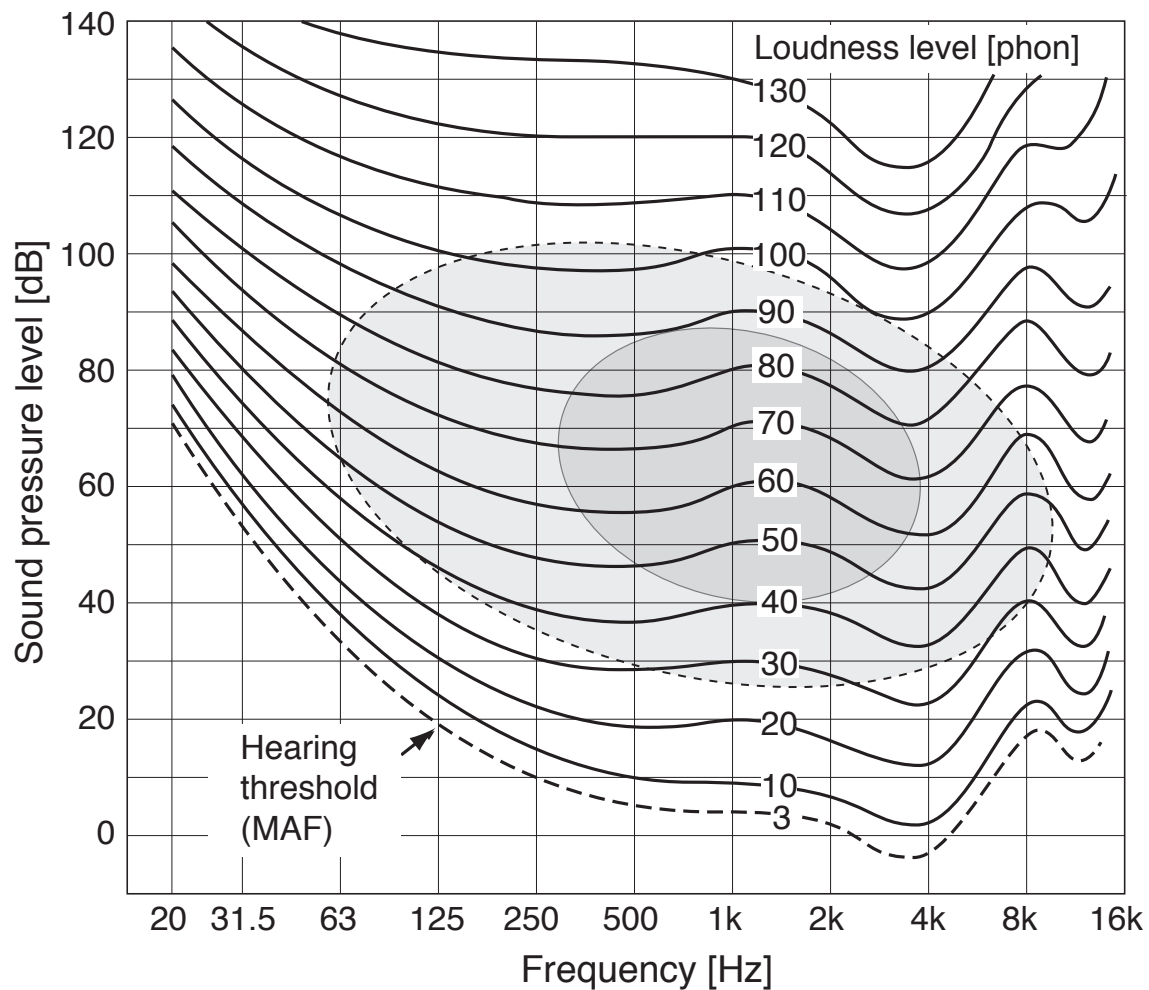
Kuuleeko ihminen kaiken äänen? Ei.

Peittääkö jokin ääni toista kuuluvista? Kyllä

Onko ihmisellä jokin aika-taajuusresoluutio? On

Voiko tätä resoluutiota käyttää äänen koodaamisessa? Jep.

Vakioäänekkyyssäyrät



Kriittiset kaistat

Taajuuskaista, jonka sisällä 2 tai useampi äänes herättää samoja aistinsoluja

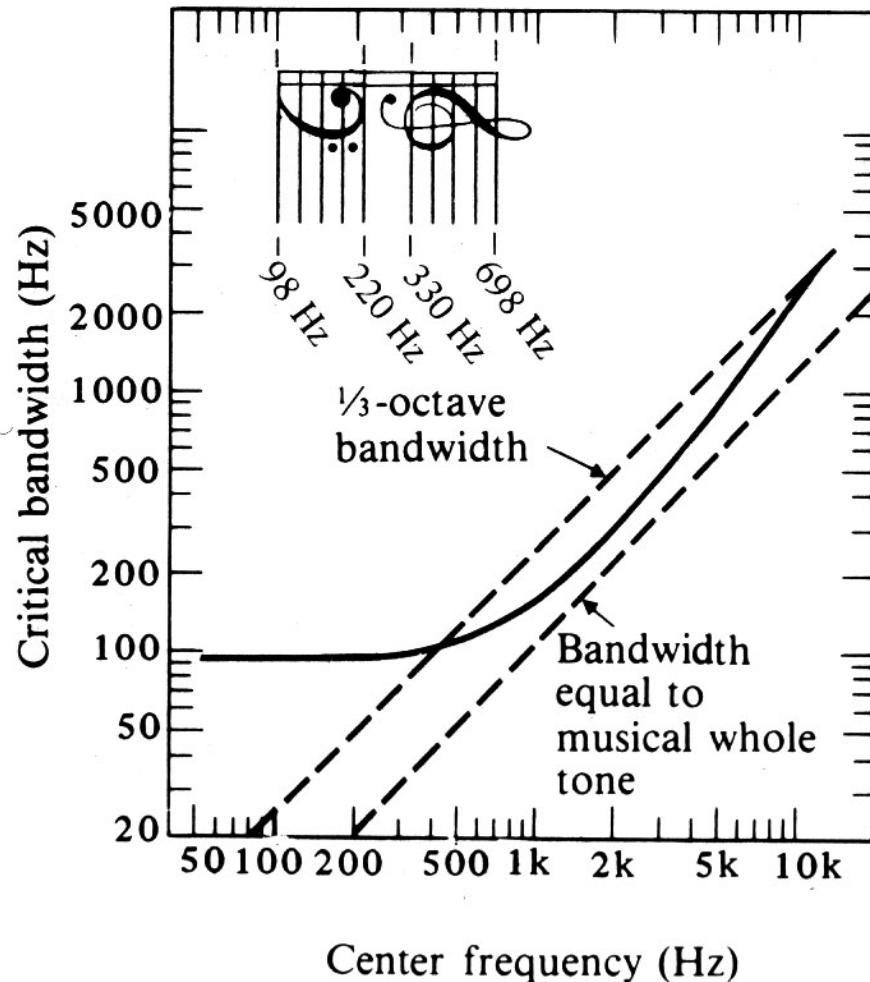
Kriittisen kaistan sisällä kuulolla on vaikeuksia erottaa ääneksiä toisistaan

Vastaa noin 1,3 mm matkaa basilaarikalvolla (n. 1300 aistinsolua)

Kriittisiä kaistoja on kuuloalueella noin 24 kpl

Ei vakiotaajuusrajat, vaan muodostuvat herätteen mukaan

Kriittiset kaistat



Center
frequency (Hz)

100
200
500
1,000
2,000
5,000
10,000

Critical
bandwidth (Hz)

90
90
110
150
280
700
1,200

Peittoilmiö

Kun korvaan kuuluu samanaikaisesti useita ääniä, ne voivat peittää toisensa kuulumattomiin

Peittoilmiön voi yleisesti ymmärtää kuulokynnyksen nousuna voimakkaimman kuuluvan äänen vaikutuksesta

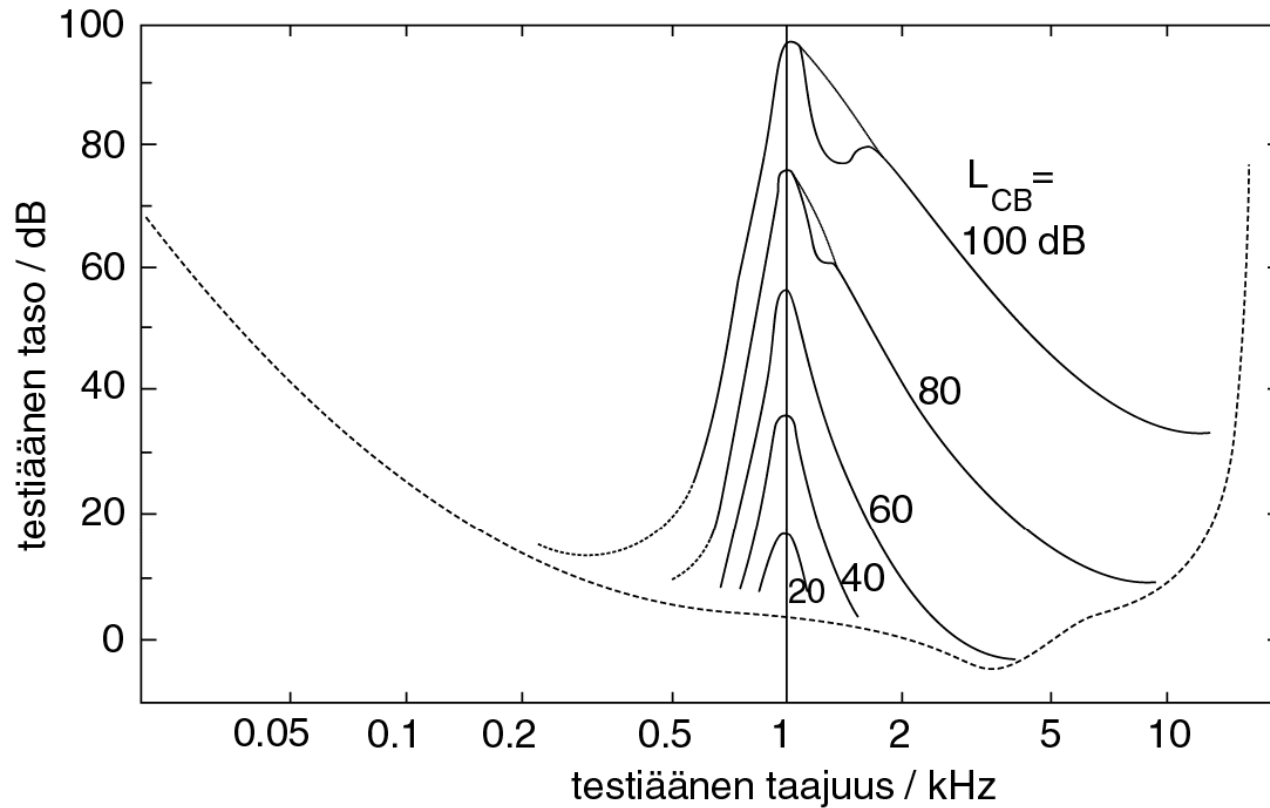
Myös äänet, jotka kuuluvat peräjälkeen, voivat peittää toisiaan (aikapeittoilmiö)

Peittoilmiötä voidaan tutkia siniäänten, kapeakaistaisen kohinan ja valkoisen kohinan avulla

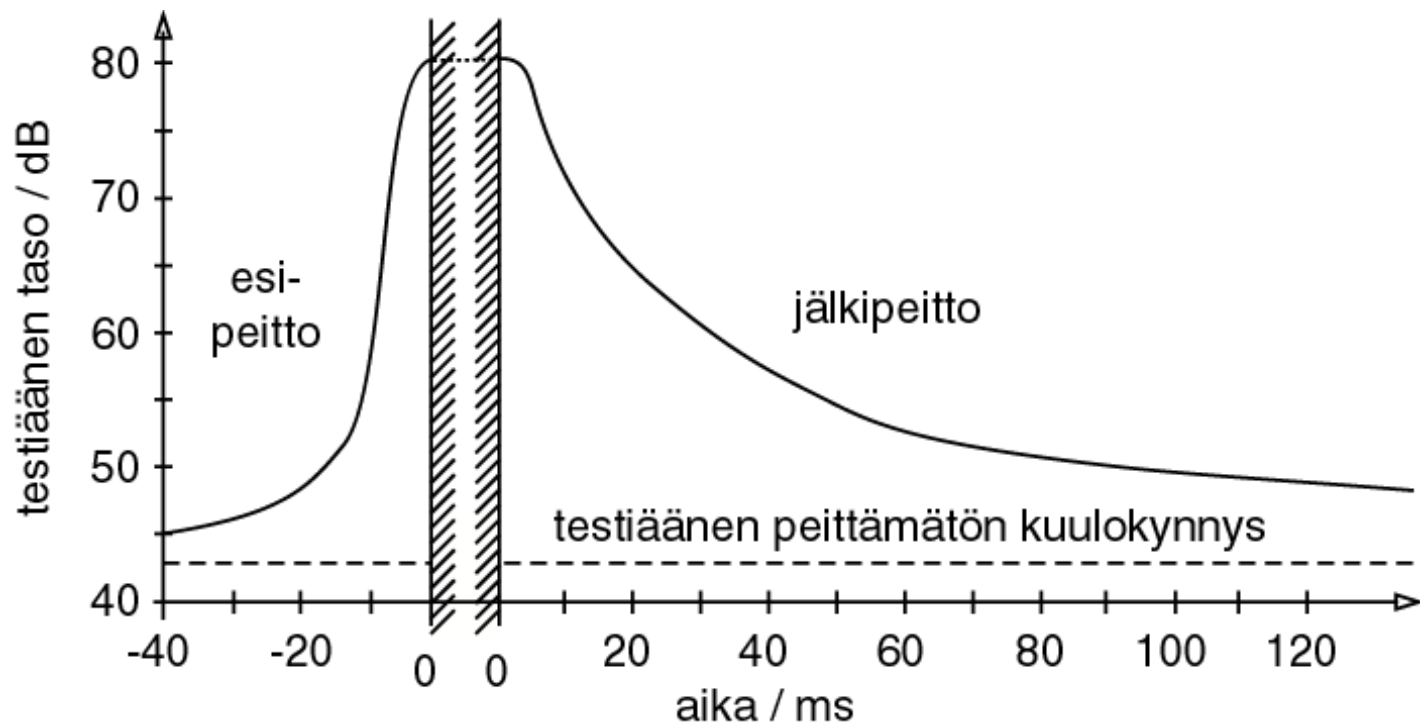
Peittoilmiön ominaisuuksia

- 1. Äänekset, jotka ovat taajuuksiltaan lähellä toisiaan, peittävät toisiaan enemmän kuin laajakaistaiset äänet**
- 2. Ääni peittää enemmän korkeampia ääniä kuin matalampia**
- 3. Mitä voimakkaampi ääni, sitä laajempi taajuuspeitto**
- 4. Jos taajuudet ovat kaukana toisistaan, ei peittoa**
- 5. Kapeakaistainen kohina peittää kuten äänes**
- 6. Laajakaistainen kohina peittää kaikkia taajuuksia (sovellus: ”akustinen parfyymi”)**

Taajuuspeitto

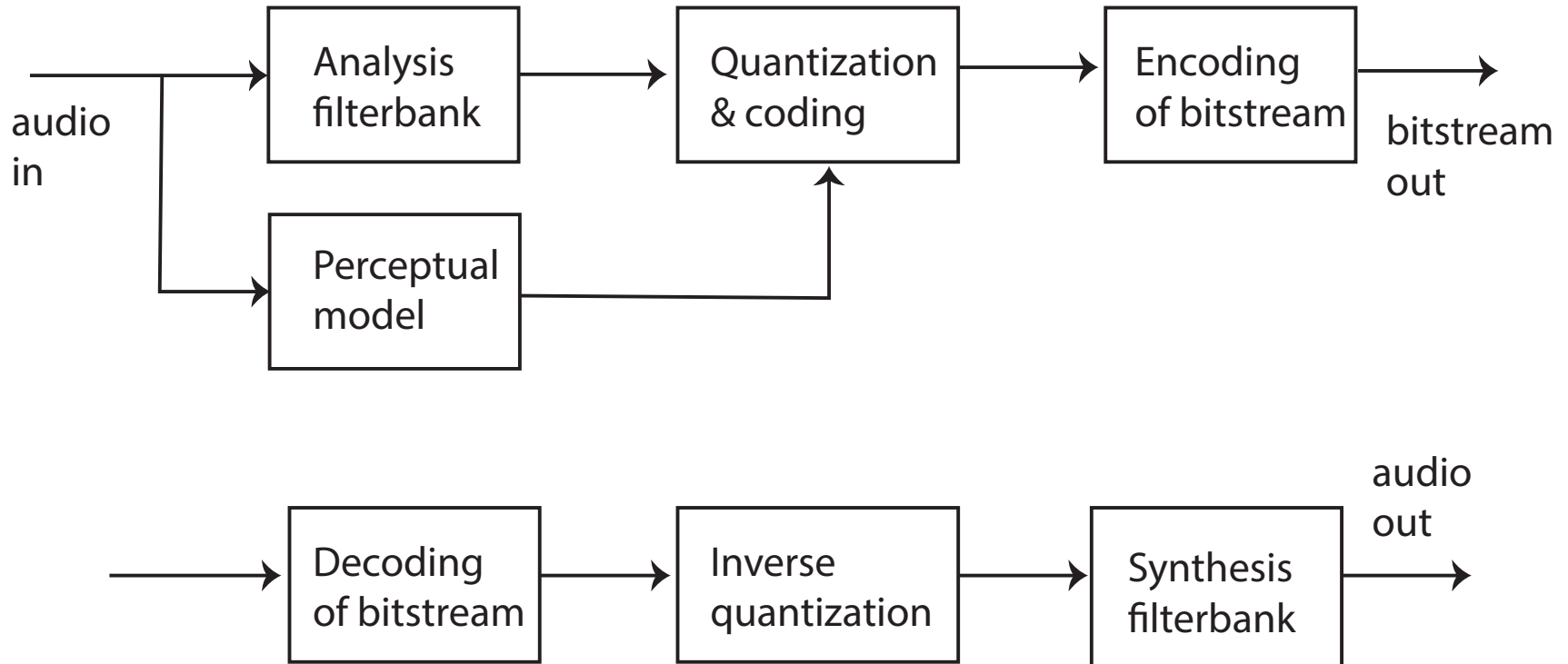


Aikapeitto



Äänen koodaus

Häviölliset koodekit



Häviölliset koodekit

MP3, AAC, puhekoodekit jne

- **Hyödyntävät voimakkaasti peittoilmiötä**
- **Oletetaan signaalista jotain**
- **Puhekoodekit**
- **Musiikkikoodekit**
- **Pienen latenssin koodekit kommunikointia varten**
- **Artefaktit / laatu**
- **Laatu pitää aina mitata psykoakustisesti, ts. käyttämällä koehenkilöitä kuuntelukokeissa.**

Häviöllisten koodekkien vaikutuksia

- Puhekommunikoinnissa GSM jo 1990-luvulla
- 2000-luvulla iTunes syrjäytti CD:n
- 2010-luvulla streaming, spotify, youtube, etc
- Verkon yli voidaan siirtää hyvälaatuista audiota
- + kuuntele mitä tahansa musiikkia milloin tahansa ja missä tahansa

Yhteenvetoa

- **Kommunikaatioakustiikan esittelyä**
- **Muutama perusasia akustiikasta ja signaaleista**
- **Kuulon rakenne ja toimintaperiaate**
- **Häviöllisen äänenkoodauksen periaatteet**

Acoustics and audio technology major

CODE	NAME	CREDITS
ELEC-E5600	Communication Acoustics	5
ELEC-E5610	Acoustics and the Physics of Sound	5
SCI-XXX	Acoustical Measurements	5
ELEC-E5620	Audio Signal Processing	5
SCI-XXX	Room Acoustics	5
ELEC-E5630	Acoustics and Audio Technology Seminar (varying content)	5

AAT Optional courses

CODE	NAME	CREDITS
ELEC-E5650	Electroacoustics	5
ELEC-E5640	Meluntorjunta (Bullerbekämpning, Noise control)	5
ELEC-E5660	Special assignment in Acoustics and Audio Technology	1-10
ELEC-E5410	Signal Processing for Communications	5
ELEC-E5420	Convex Optimization for Engineers	5
ELEC-E5430	High Volume Data Processing	5
ELEC-E5440	Statistical Signal Processing	5
ELEC-E5500	Speech Processing	5
ELEC-E5510	Speech Recognition	5
CSE-C3800	Usability and user interfaces	5
ME-C3100	Computer Graphics	5
ME-E4100	Advanced Computer Graphics	