

# A?

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)

# A?

Aalto-universitetet  
Högskolan för  
elektroteknik

# Akustiikan haaroja

**Huoneakustiikka**

**Ilmakehän akustiikka**

**Vedenalaisakustiikka**

**Kvanttiakustiikka**

**Meluakustiikka**

**Puheteknologia**

**Äänentoisto (Audio)**

**Psykoakustiikka**

...

# A?

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: taidepläjäykset, konserttitalit?**

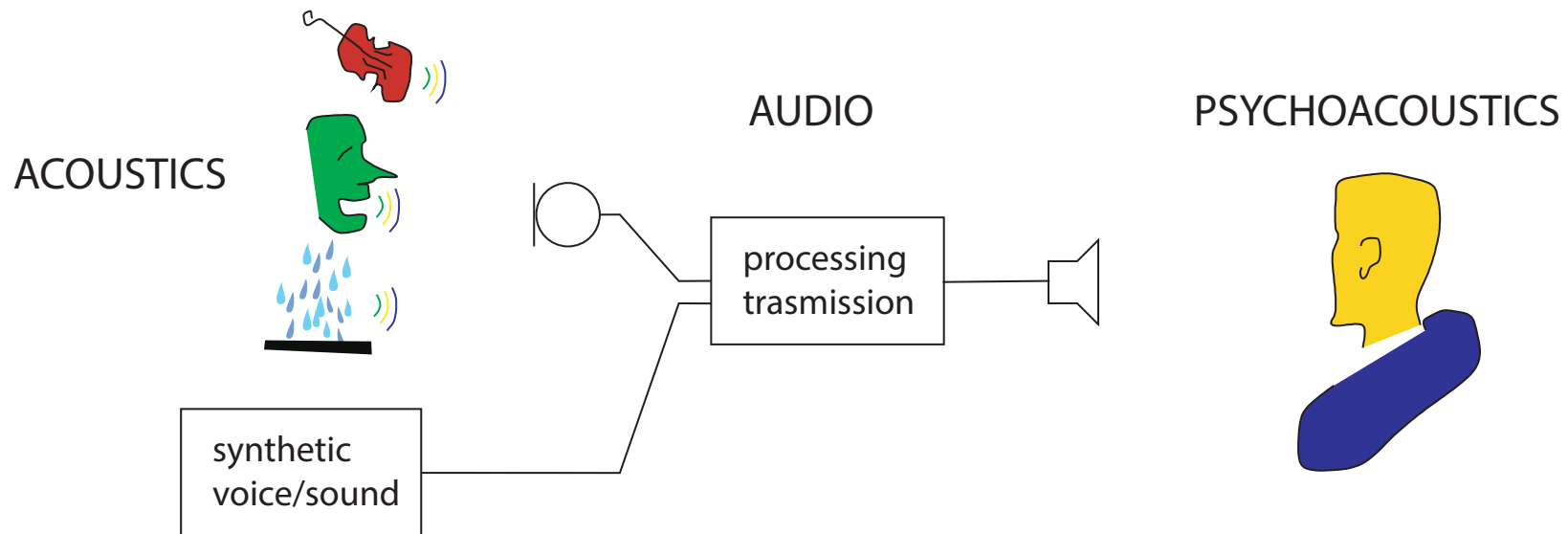
# A?

Aalto-universitetet  
Högskolan för  
elektroteknik

## Mitä akustiikkaa lukenut henkilö tekee?

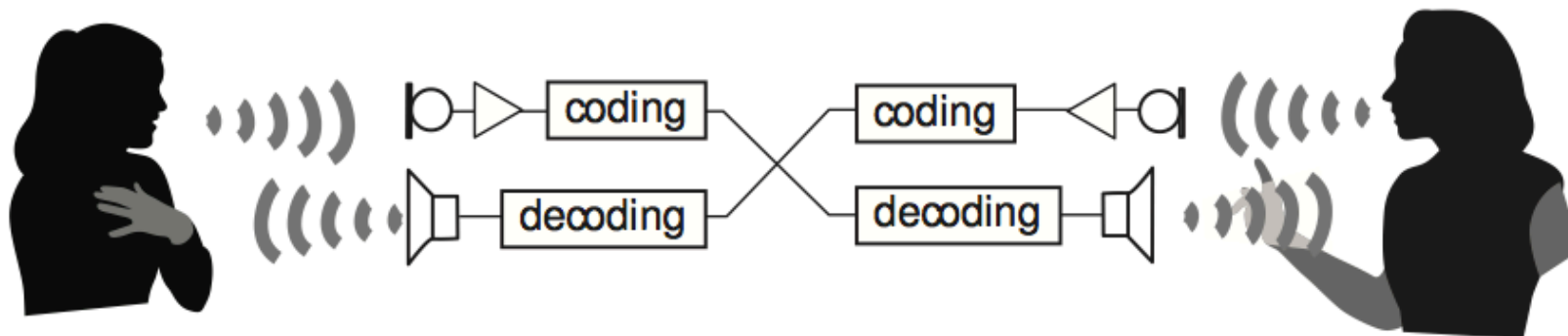
- **audio-DSP:n kehitys ( nokia, huawei, intel, skype, apple, dolby, philips)**
- **audiolaitteet (genelec, savox, goertek, nokia)**
- **akustiikkakonsultti (akukon, ramboll, helimäki, sito)**
- **muut (VTT tampere+helsinki, työterveyslaitos, ministeriöt, aalto, koulutus)**

# Mitkä akustiikan ilmiöt liittyvät informaatioteknologiaan



# Esimerkkejä kommunikaatioakustiikkaan liittyvistä teknologioista

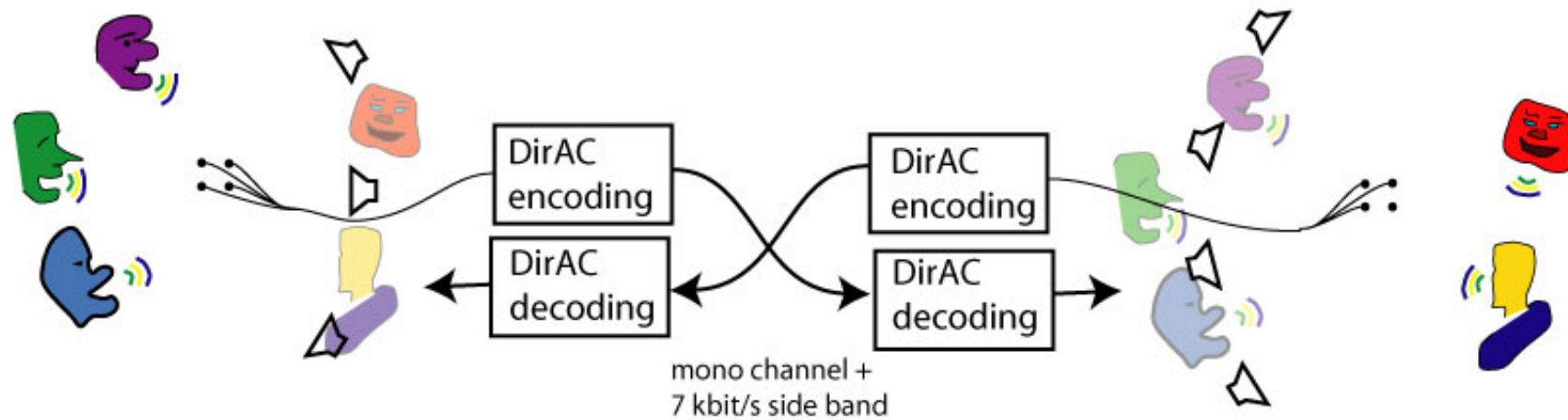
# Äänen koodaus ja välitys puhekommunikaatiota varten



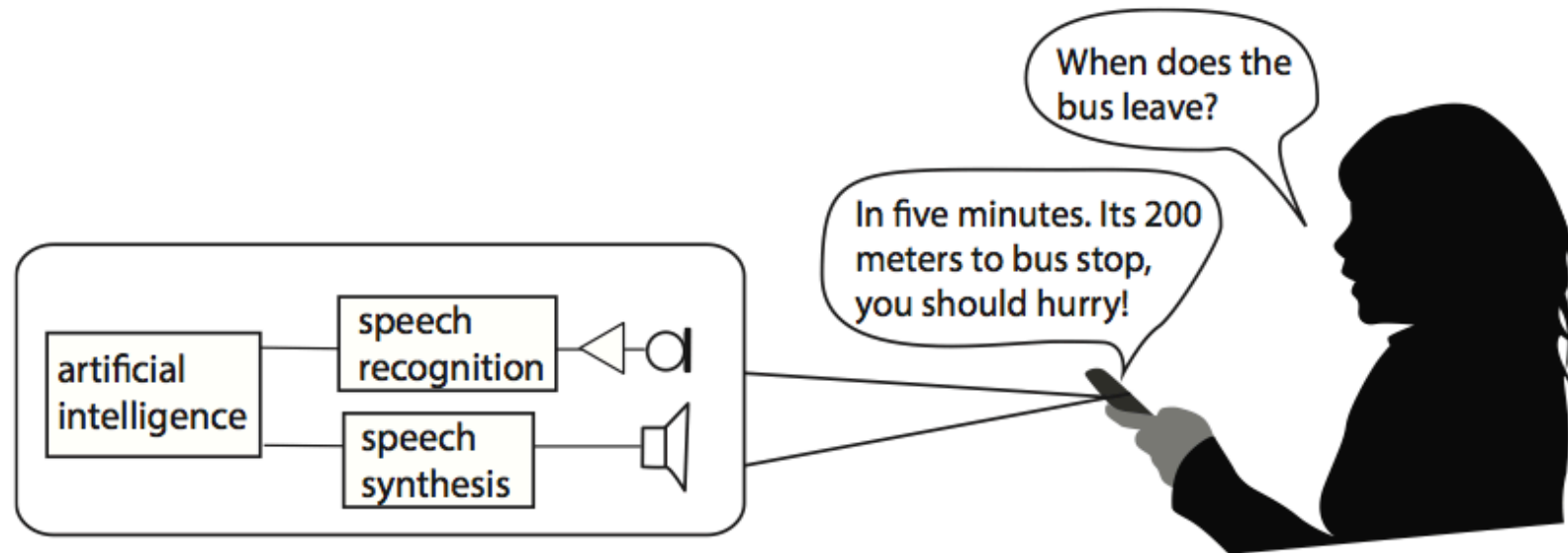
**Figure 4** Speech communication through a technical transmission channel.



# Telekonferenssit, tilaäänien analyysi ja synteysi

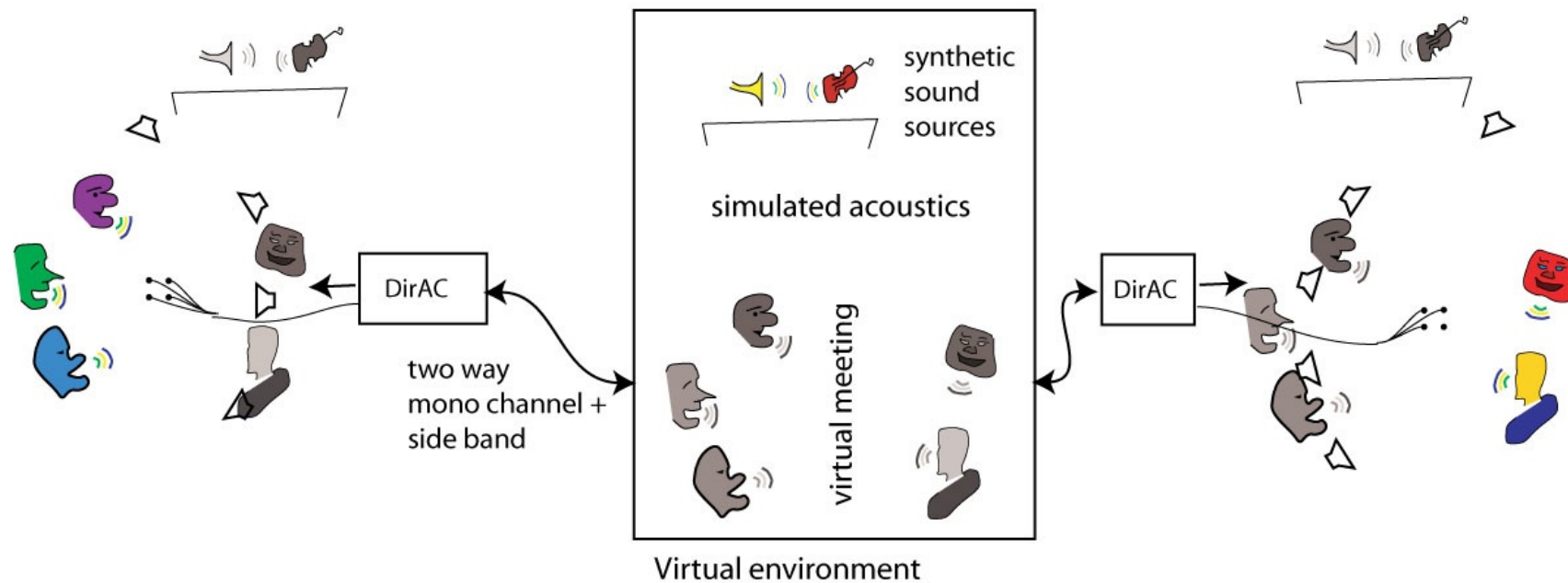


# Puheella ohjattava 'älykäs' laite



**Figure 5** Man-machine communication by voice.

# Usean käyttäjän virtuaalimaailmat, tilaäänien 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*

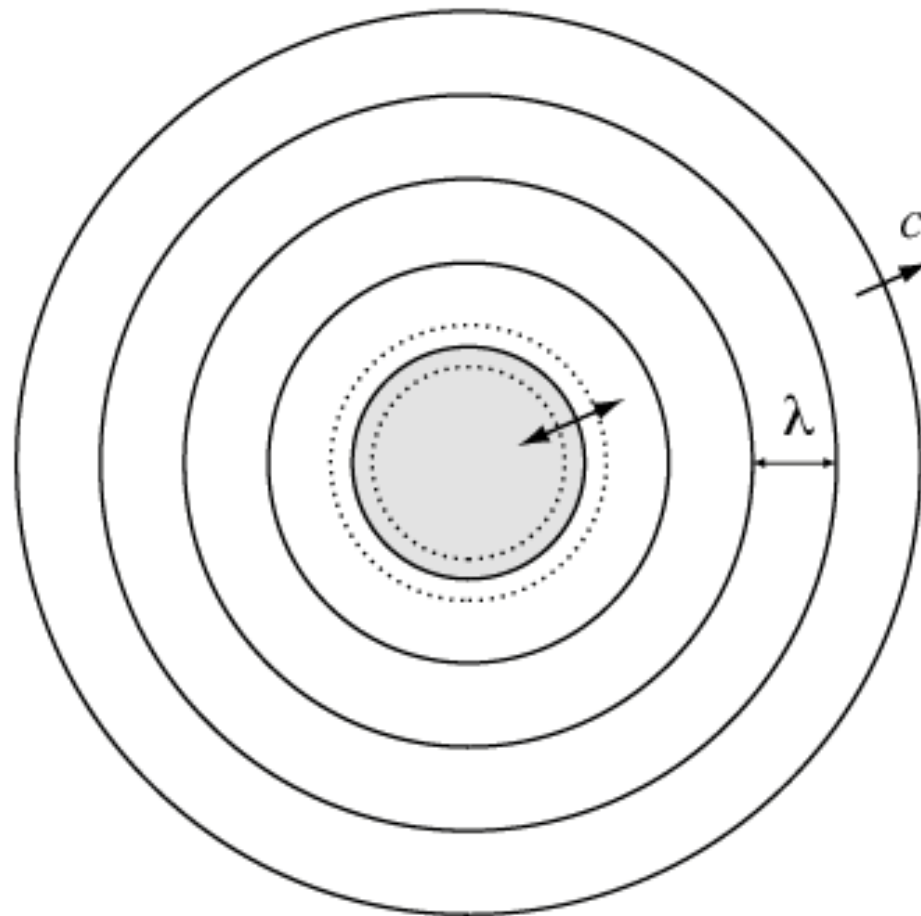
*Käytännössä paine-erot ovat hyvin pieniä verrattuna ilmankehän paineeseen*

*Ääniaallon heijastumista voidaan tarkastella kapeassa putkessa*

# Palloaalto

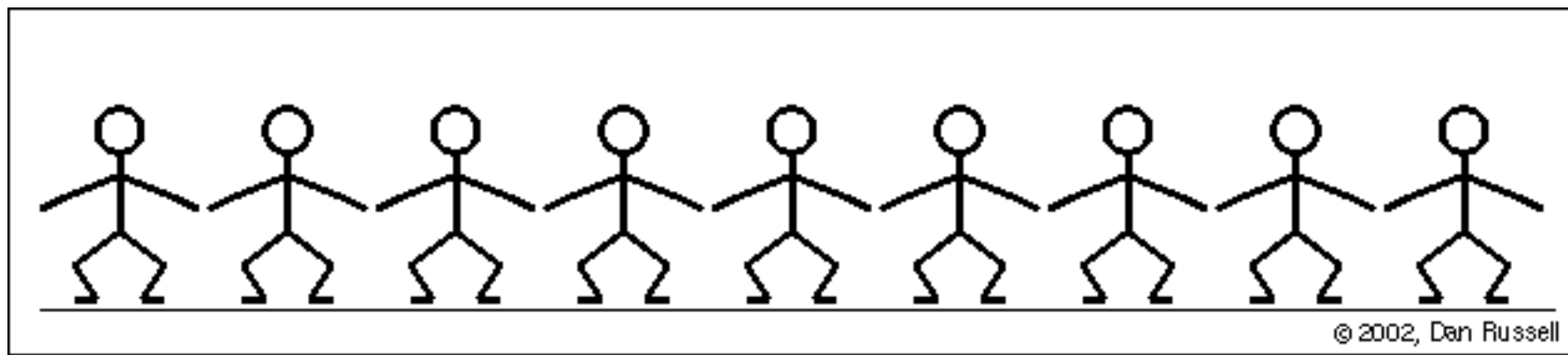
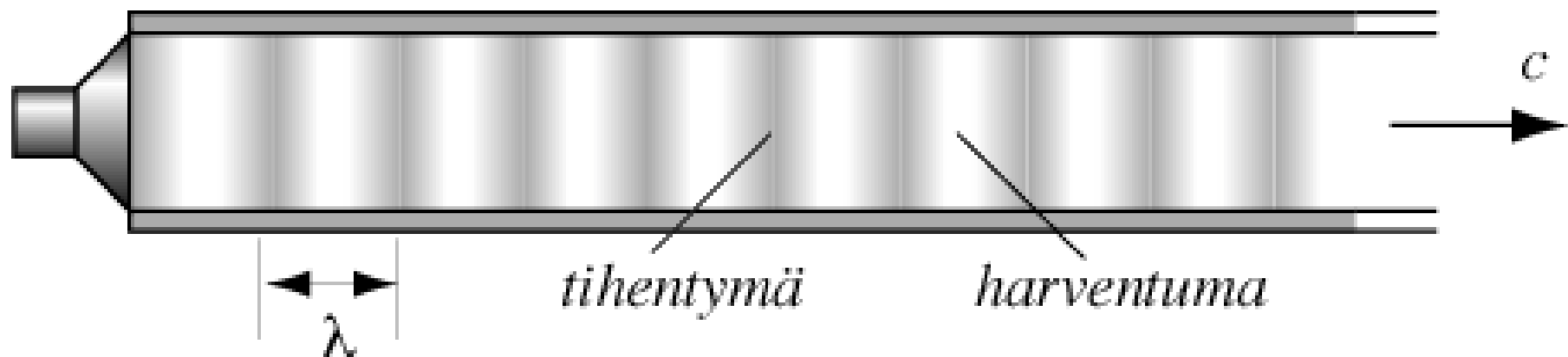
$$p \sim 1/r$$

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

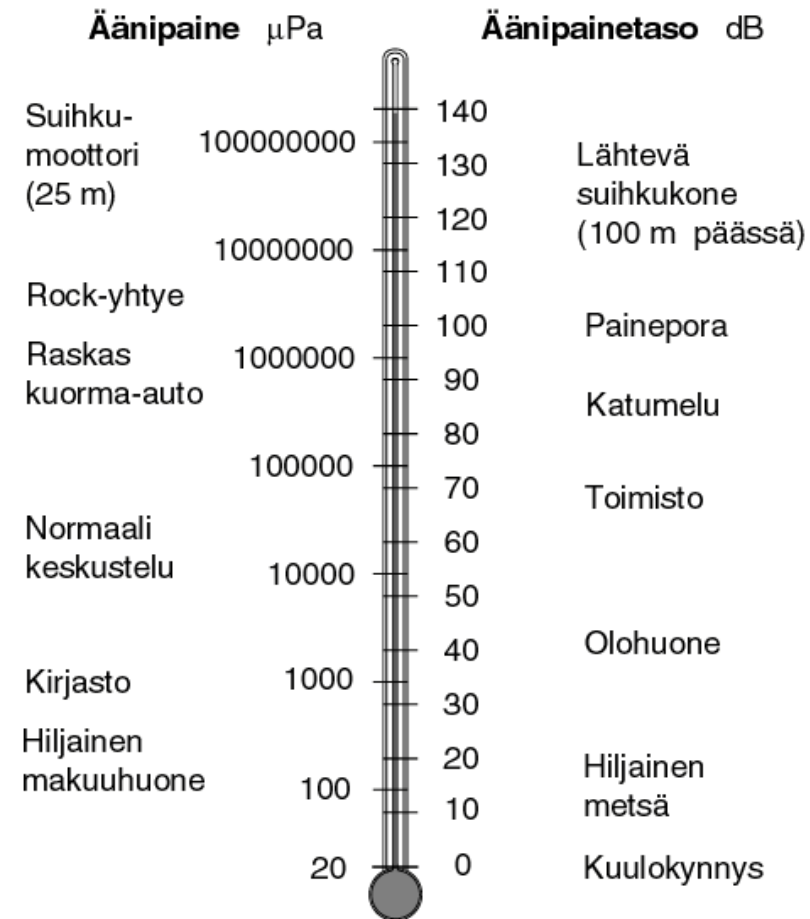
$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

- 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 yhteensä 83 dB:
- 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

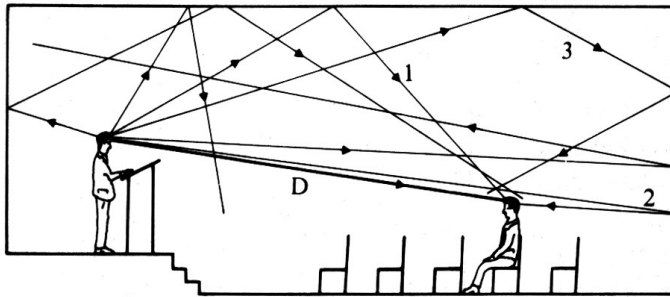
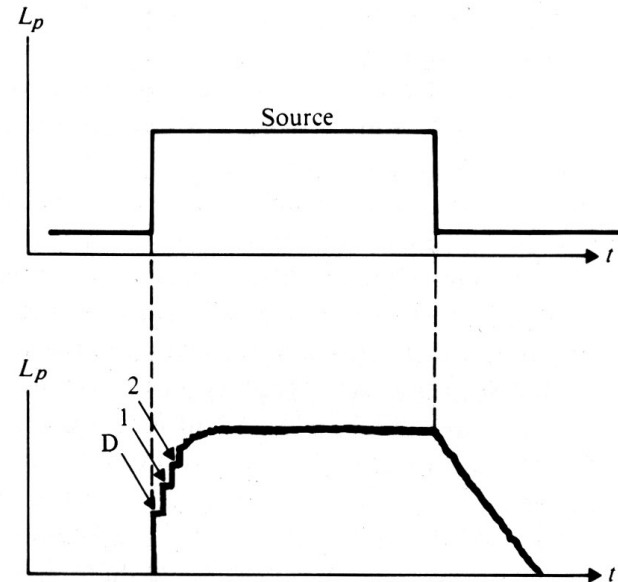
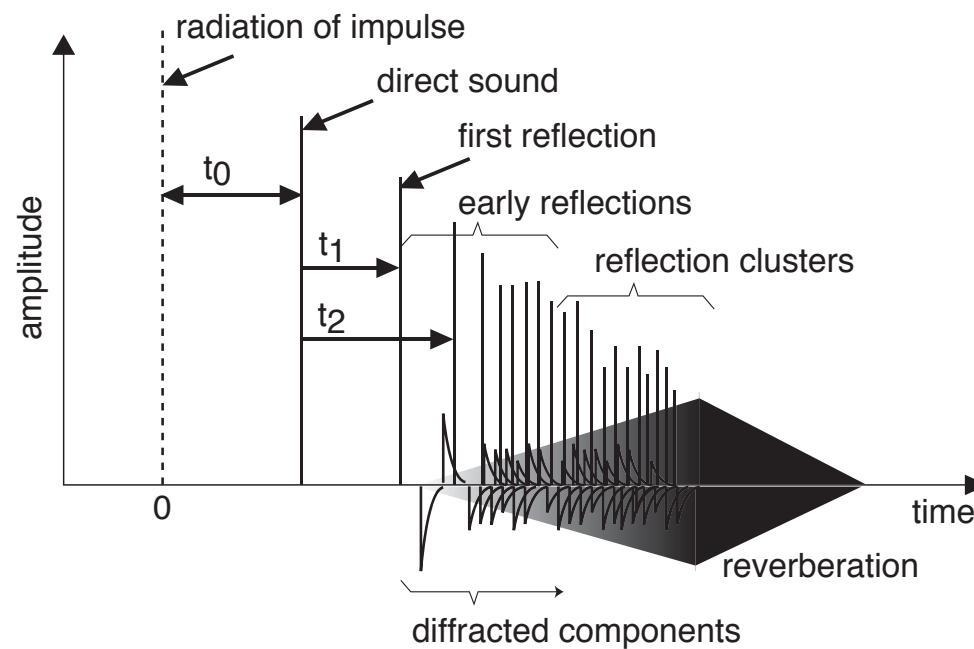


FIG. 23.5



# 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, m<sup>2</sup>]

- **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

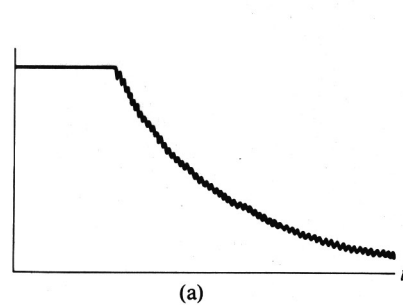
Material	Frequency (Hz)						Unit*
	125	250	500	1000	2000	4000 8000	
Wood or metal seats, unoccupied	0.014	0.018	0.020	0.036	0.035	0.028	m <sup>2</sup>
Upholstered seats, unoccupied	0.13	0.26	0.39	0.46	0.43	0.41	m <sup>2</sup>
Audience in upholstered seats	0.27	0.40	0.56	0.65	0.64	0.56	m <sup>2</sup>
Air absorption (per m <sup>3</sup> ):							
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 m<sup>2</sup>; to convert to ft<sup>2</sup>, multiply by 10.8. Values of air absorption are given in m<sup>-1</sup>; to convert to ft<sup>-1</sup>, divide by 3.3.

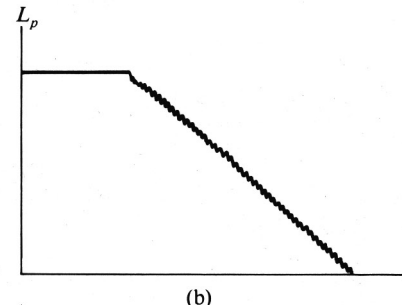
# Jälkikaiunta-aika

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

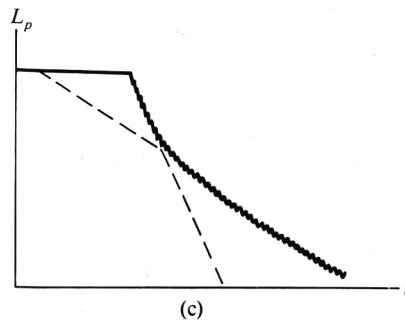
Äänipaineen vaimeneminen



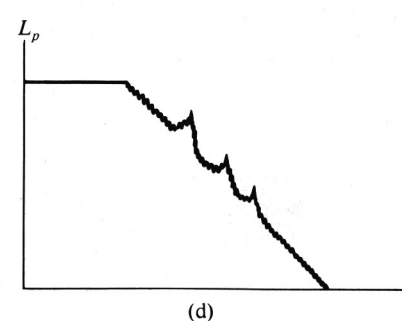
Ääni(paine)tason vaimeneminen



Kaksivaihe- vaimeneminen



Erillisenä erottuvia heijastuksia



# Siniääni

Siniääni on yksinkertaisin ääni

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

**A** = amplitude

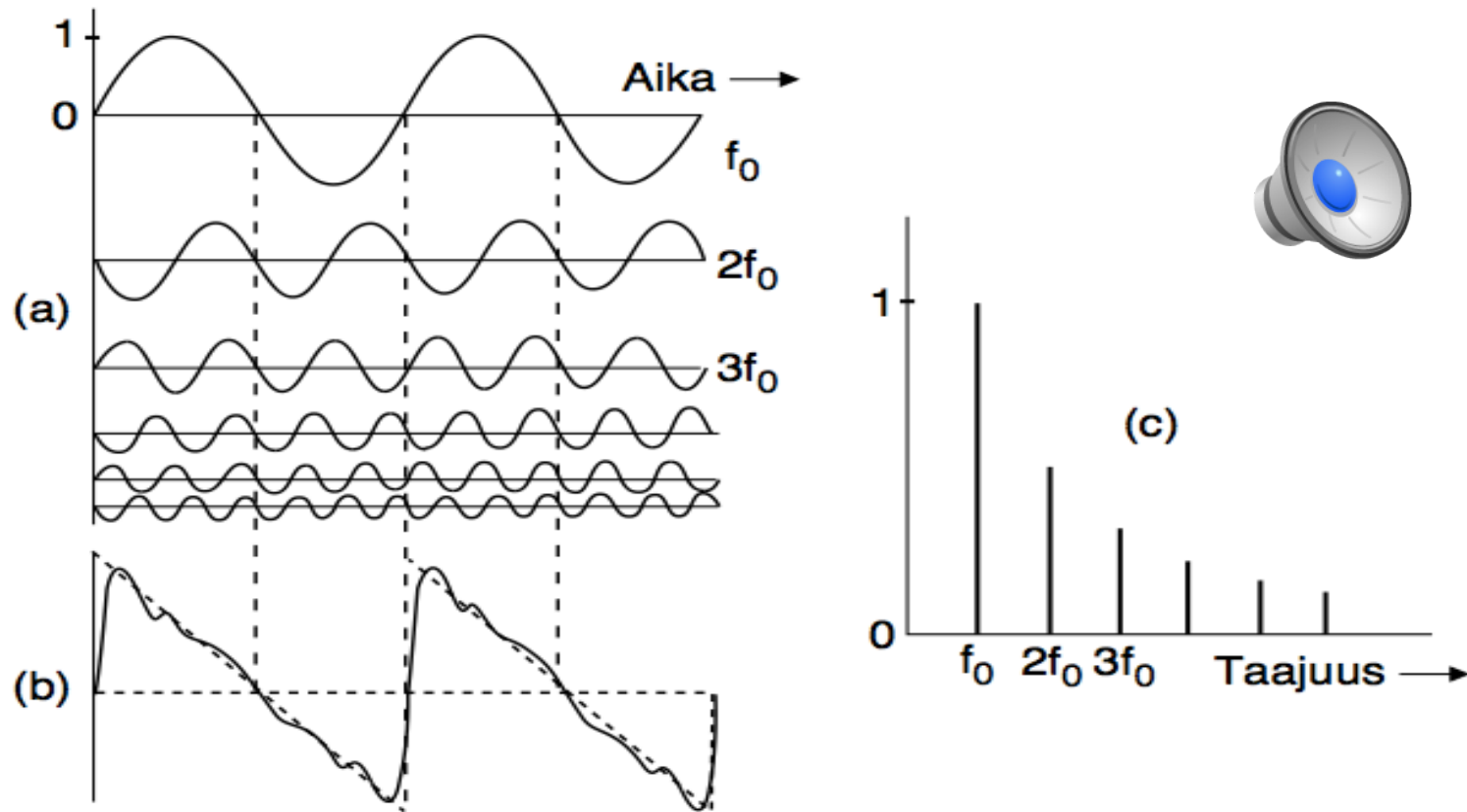
**f** = taajuus

**t** = aika

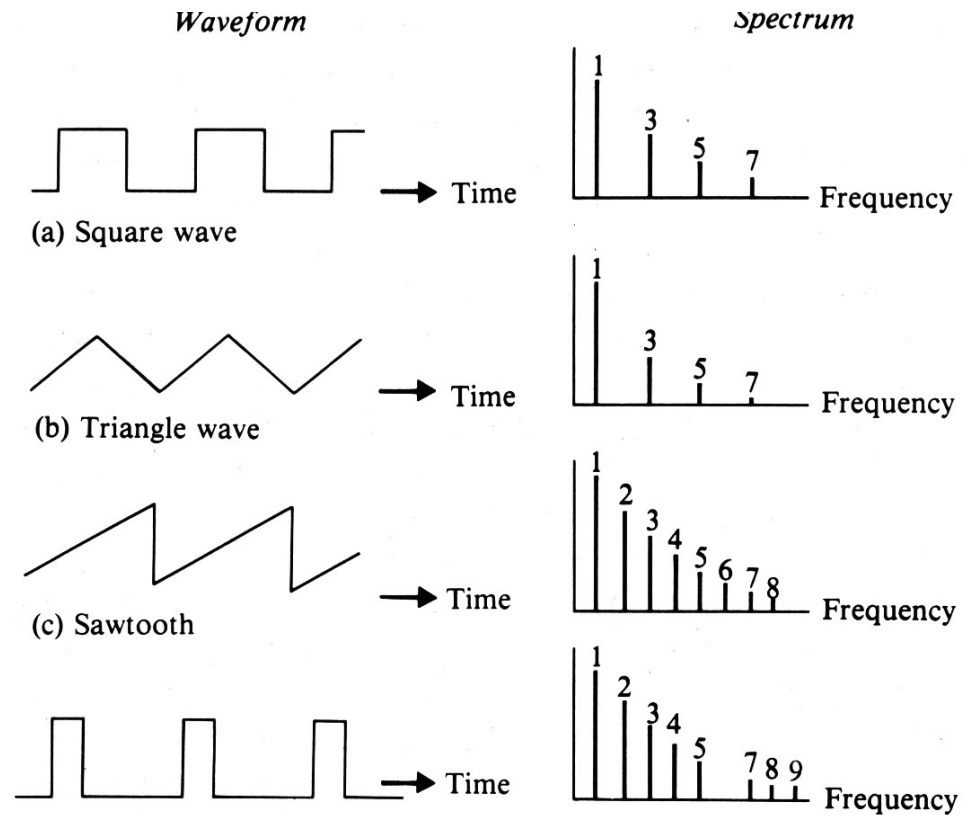
- demo: kuunnellaan sinejä

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**

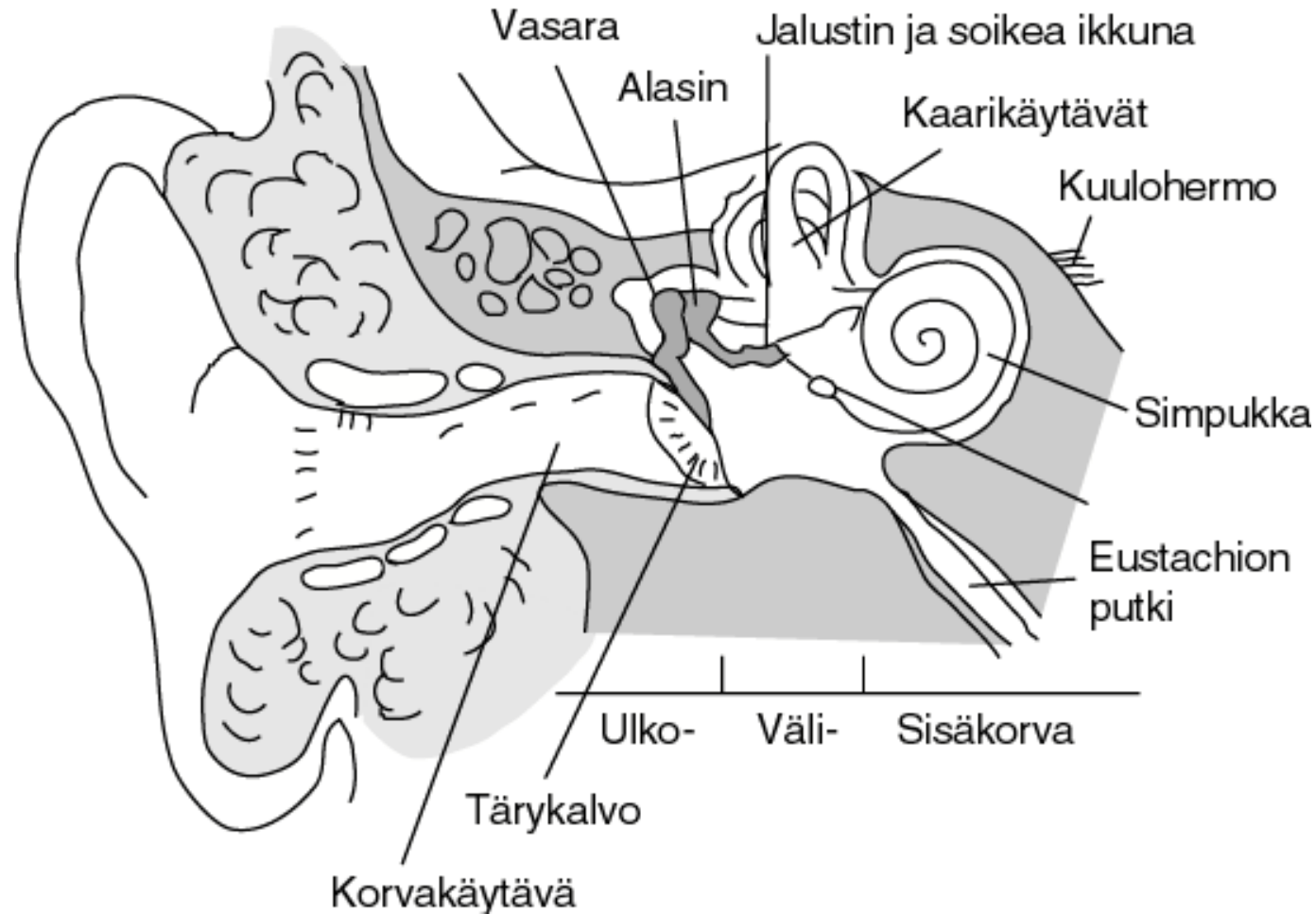
**Taajuusalue jopa 20 - 20 000 Hz**

**Kuulon ominaisuudet muuttuvat iän ja meluallistuksen mukana**

**Valikoiva aisti**

- äänilähteiden erottelu, esim. cocktail-juhlassa
- 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**

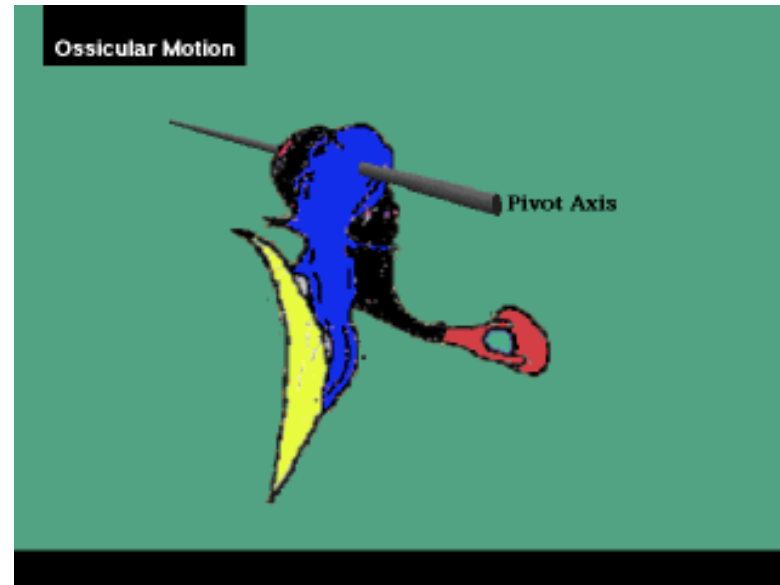
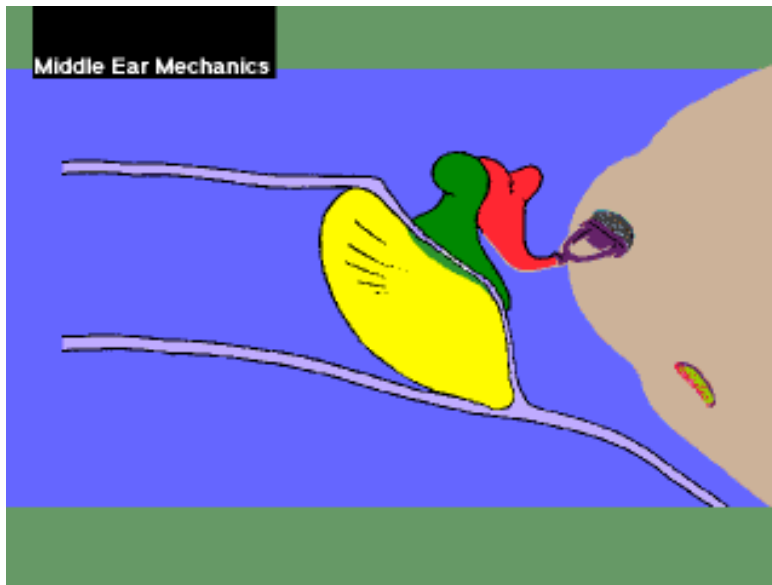
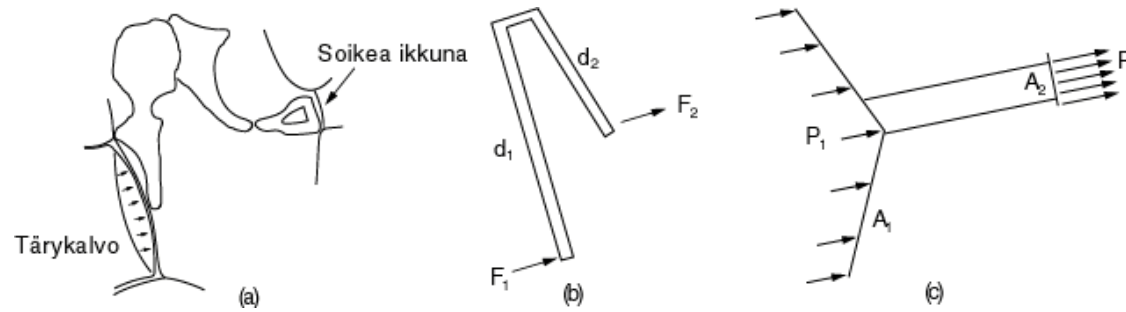
**Simpukassa värähtely etenee nesteessä**

**Basilaarikalvon mekaaninen värähtely koodautuu sähköimpulsseiksi**

**Kuulohermo vie sähköimpulssit aivoihin**

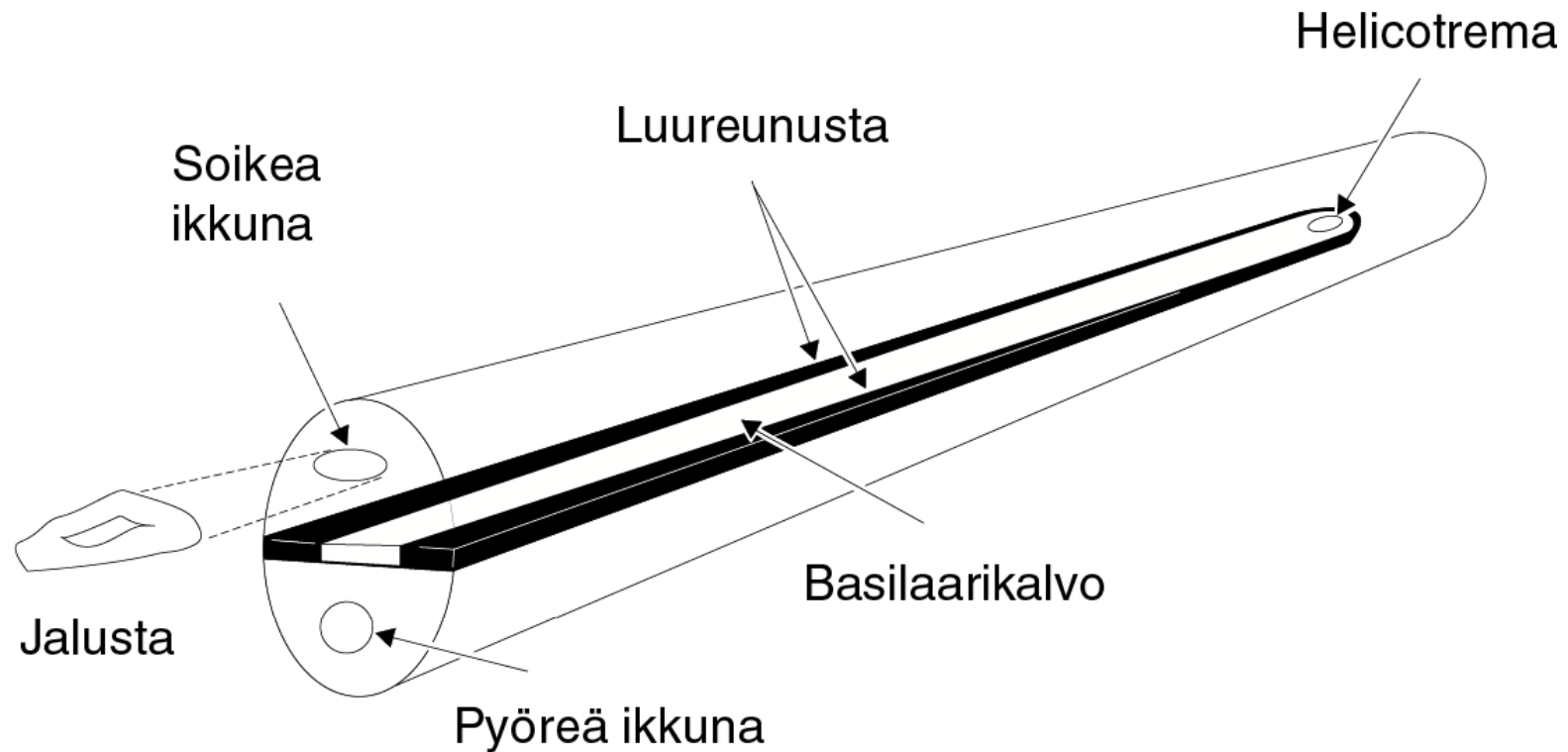
---

# Kuuloluut



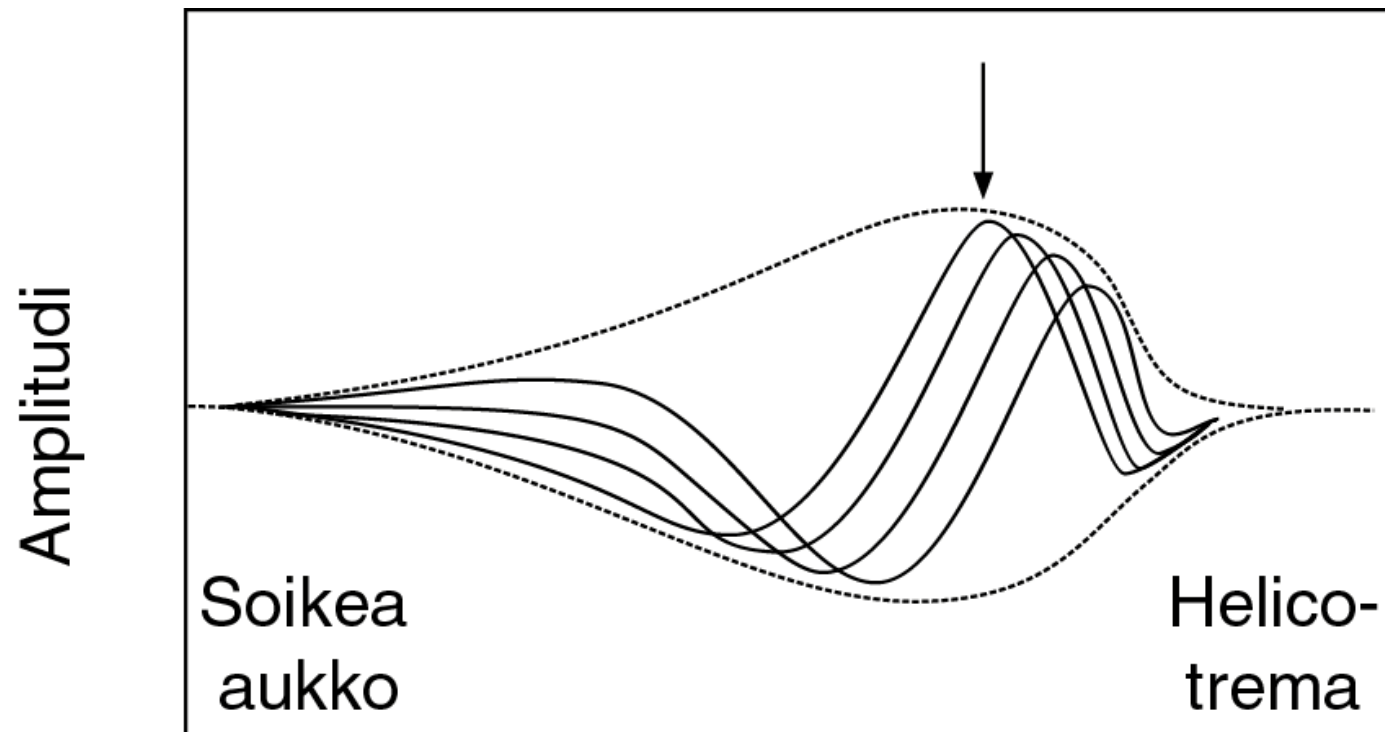
# Sisäkorva ja simpukka

## Simpukka oikaistuna

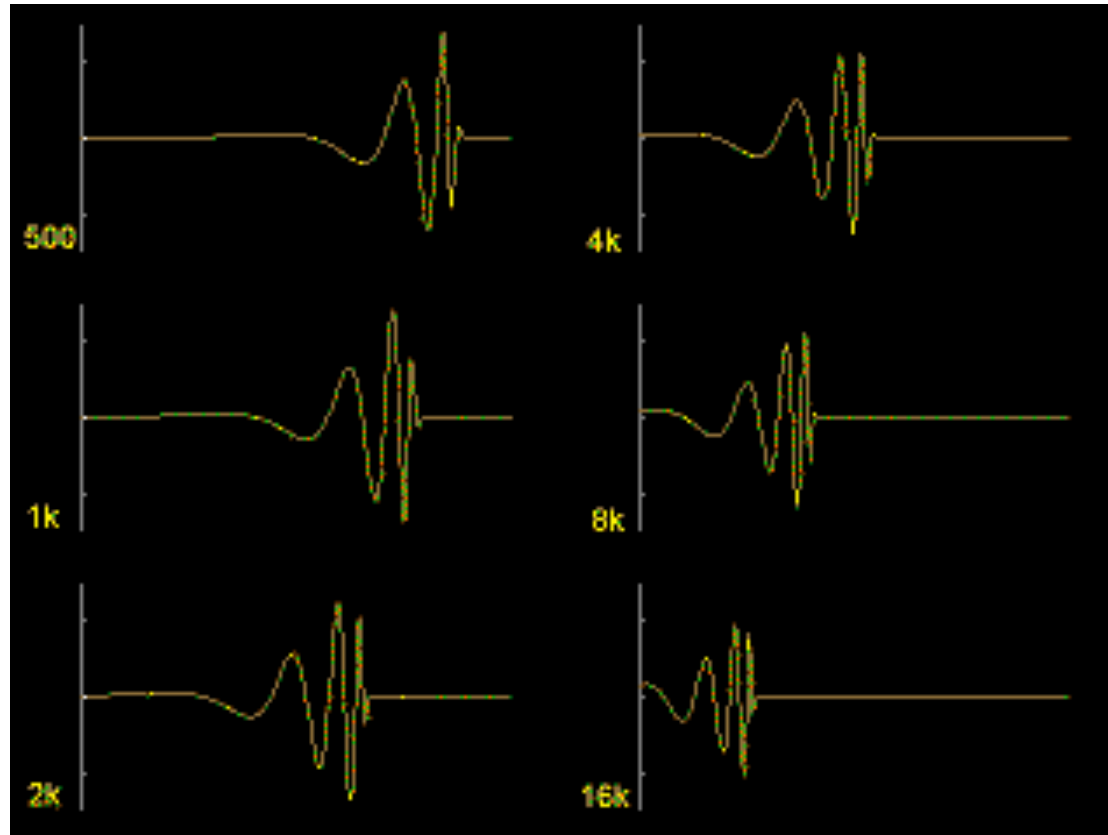


# Basilaarikalvon toiminta

## Kulkuaalto basilaarikalvolla

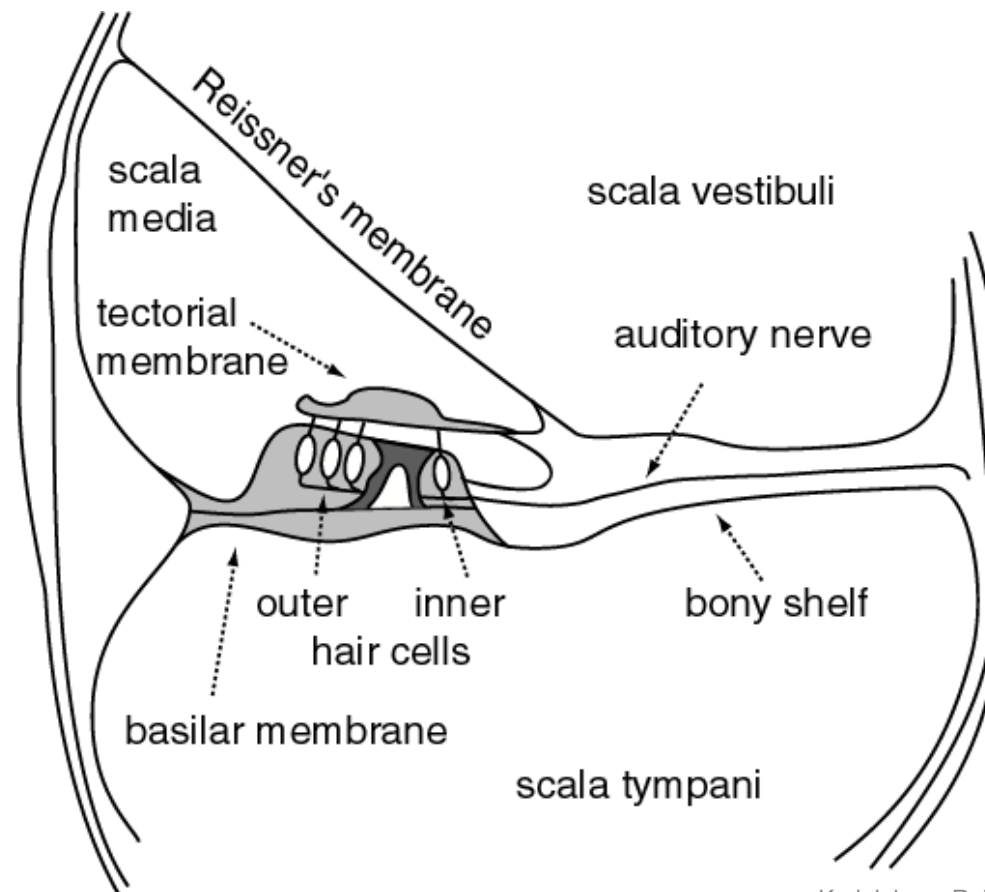


# Kulkuaalto basilaarikalvolla



Karjalainen, Rahkila, Välimäki 1999-2001

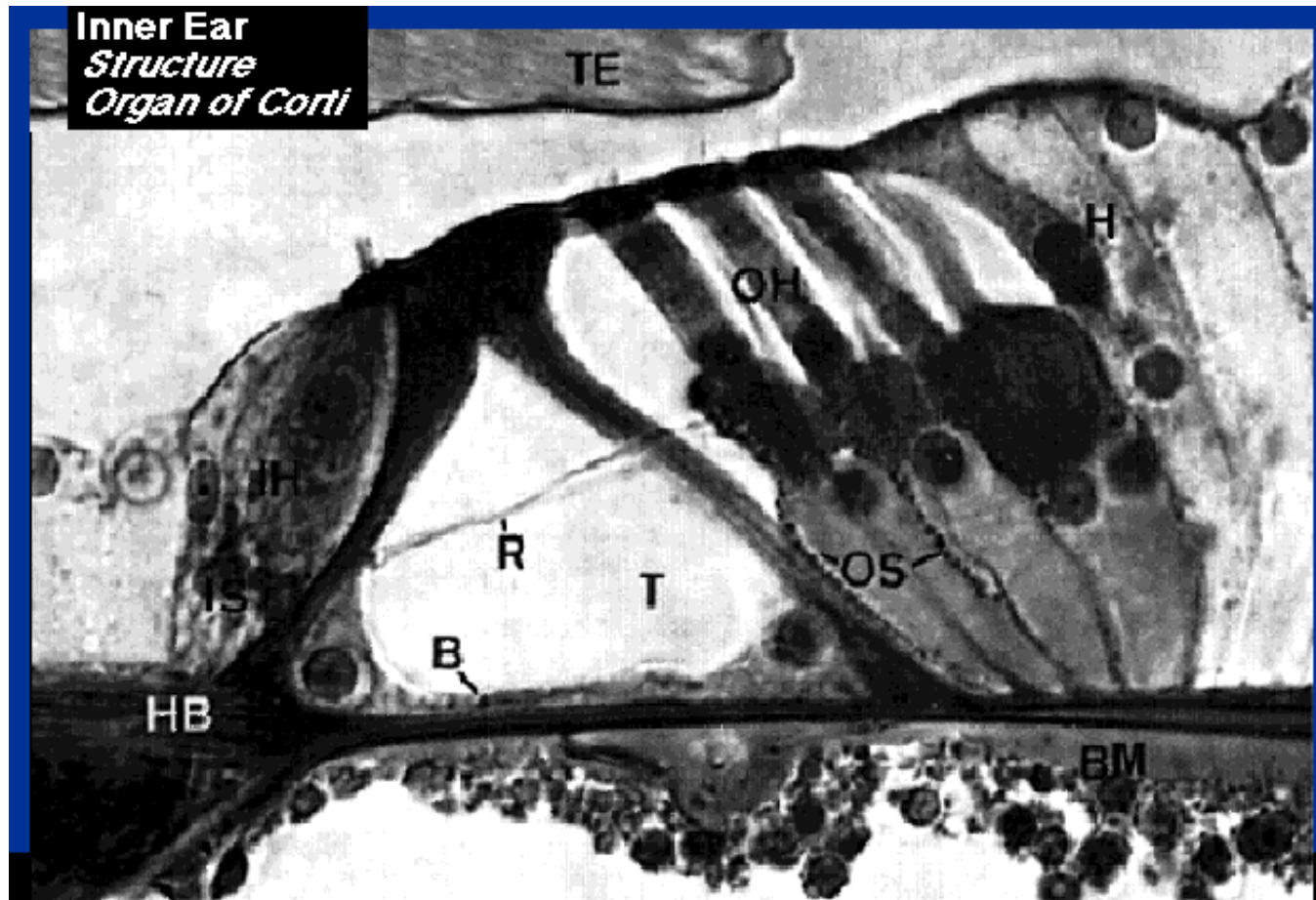
# Simpukan poikkileikkaus



Karjalainen, Rahkila, Välimäki 1999-2001

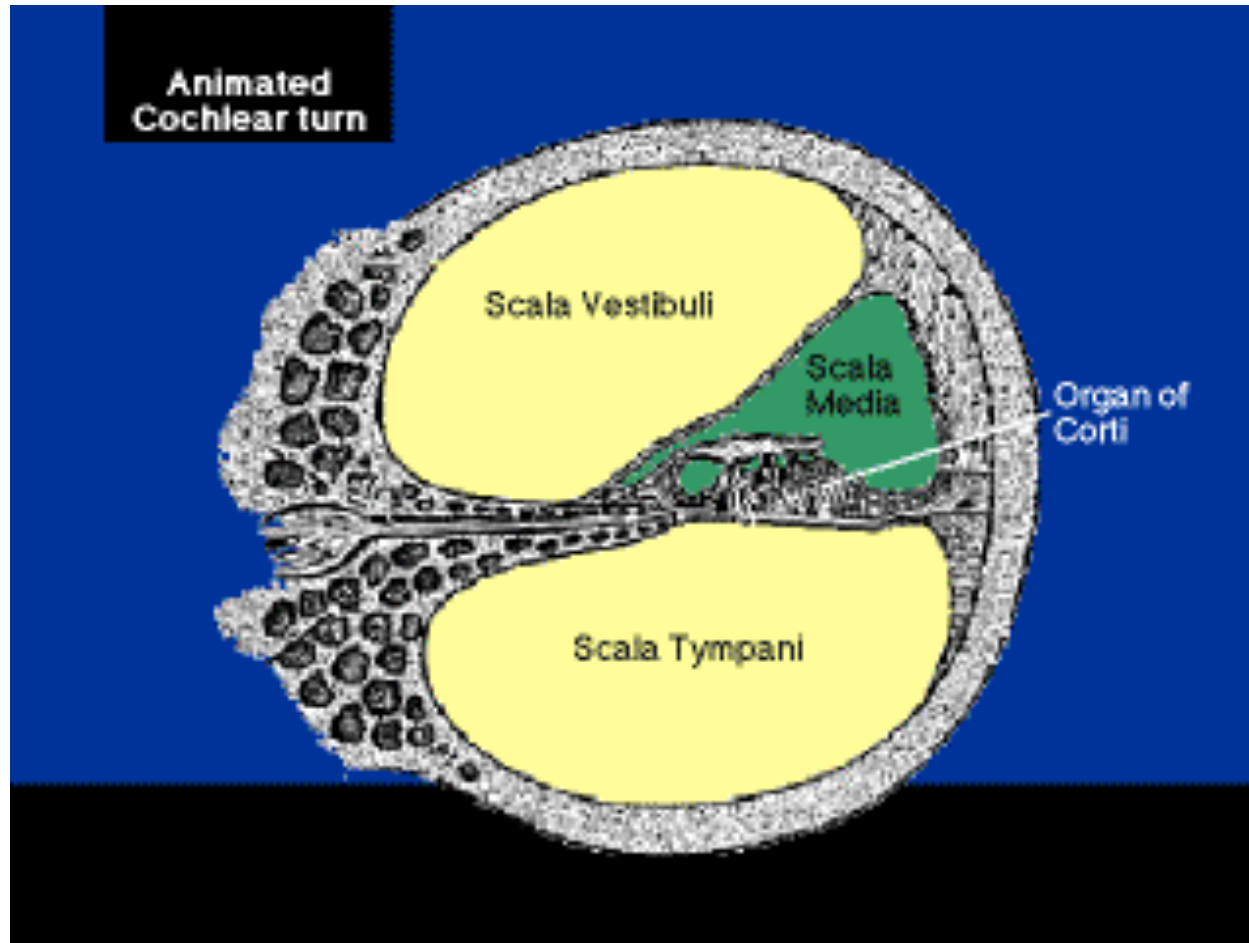


# Aistinsolut Cortin elimessä

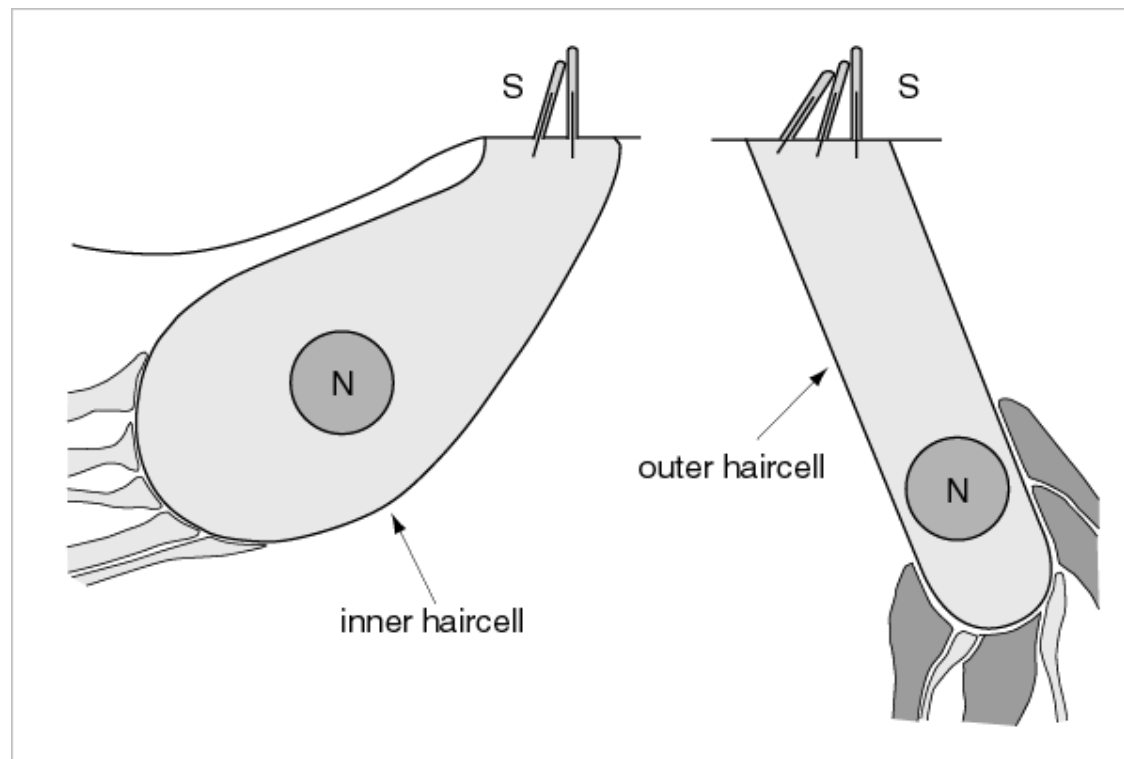


ki 1999-2001

# Cortin elimen liike



# Aistinsolut



# Kuulon toiminta

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

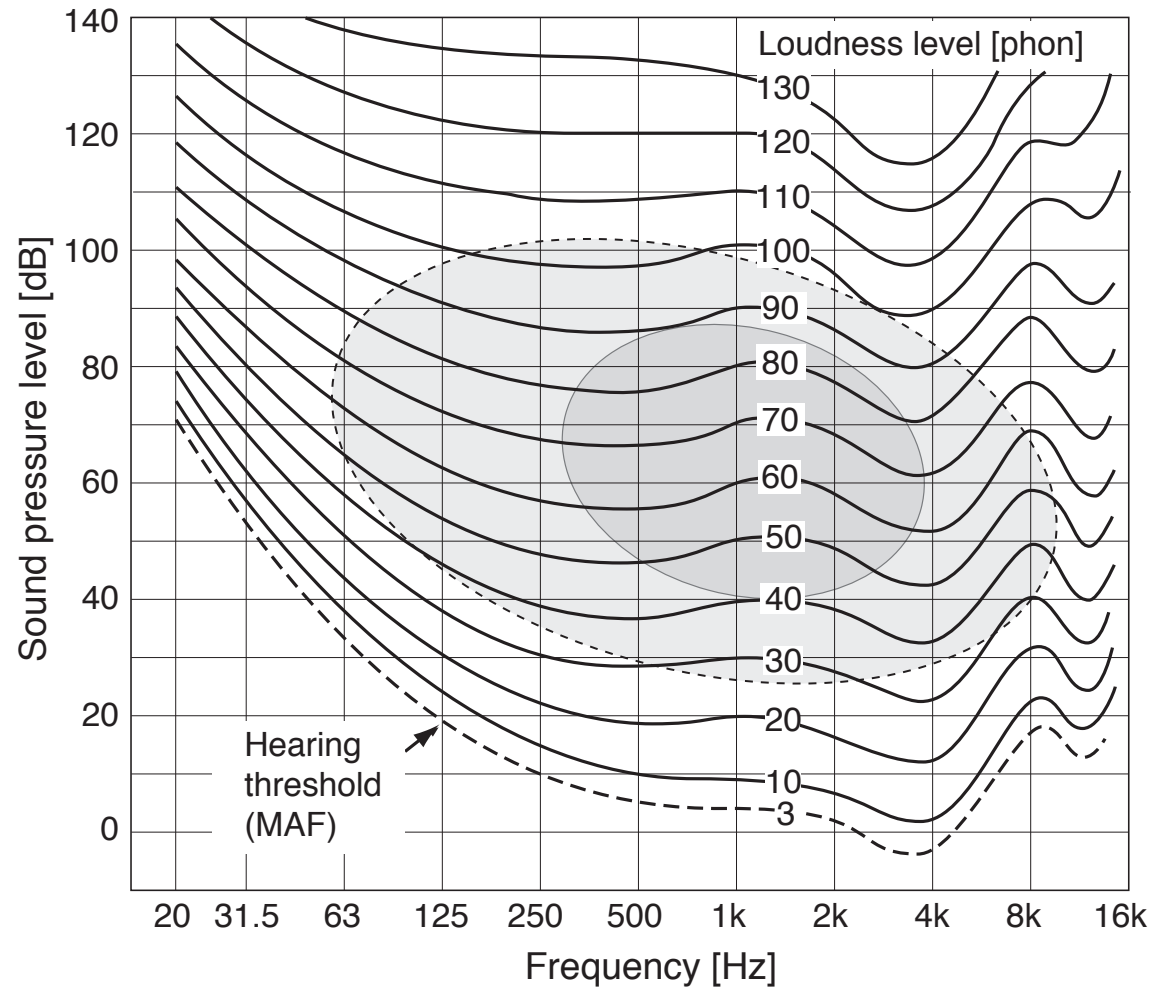
**Kuuleeko ihminen kaiken äänen? Ei.**

**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**

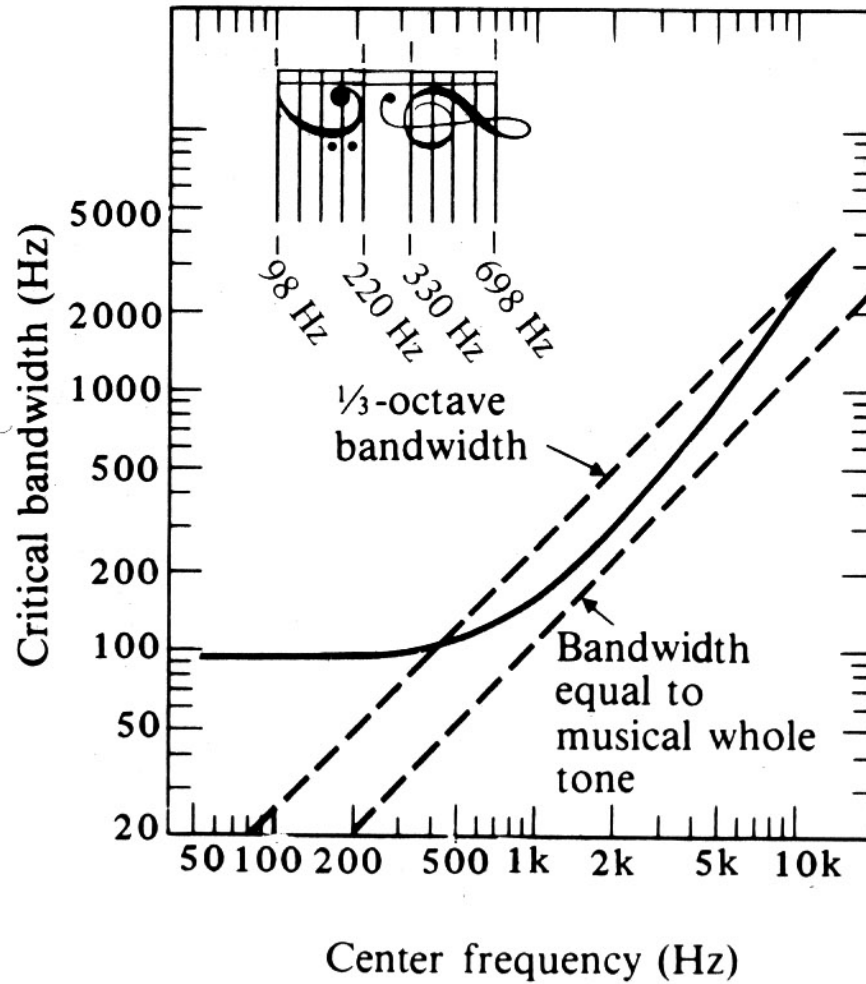
**Kriittisen kaistan sisällä kuulolla on vaikeuksia erottaa ääneksiä toisistaan**

**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)	Critical bandwidth (Hz)
100	90
200	90
500	110
1,000	150
2,000	280
5,000	700
10,000	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)**

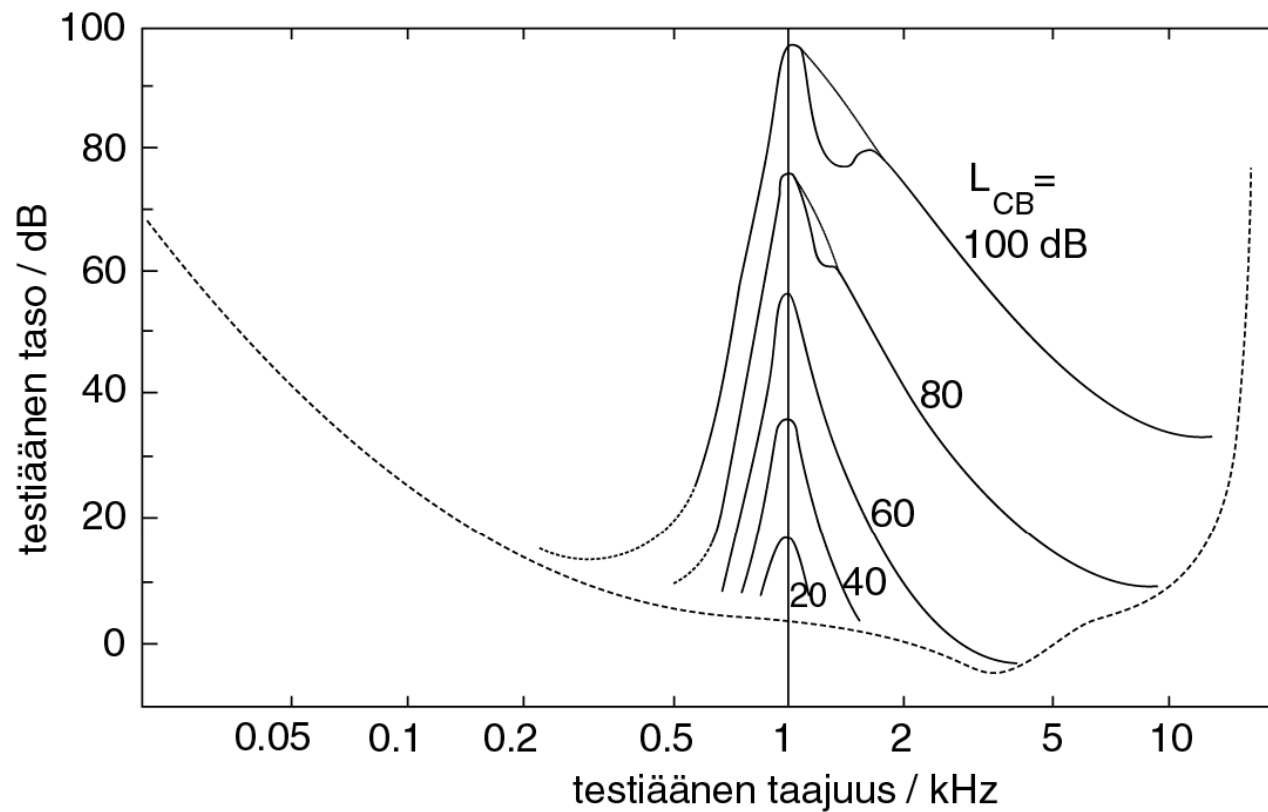
**Peittoilmiötä voidaan tutkia siniäänten, kapeakaistaisen kohinan ja valkoisen kohinan avulla**



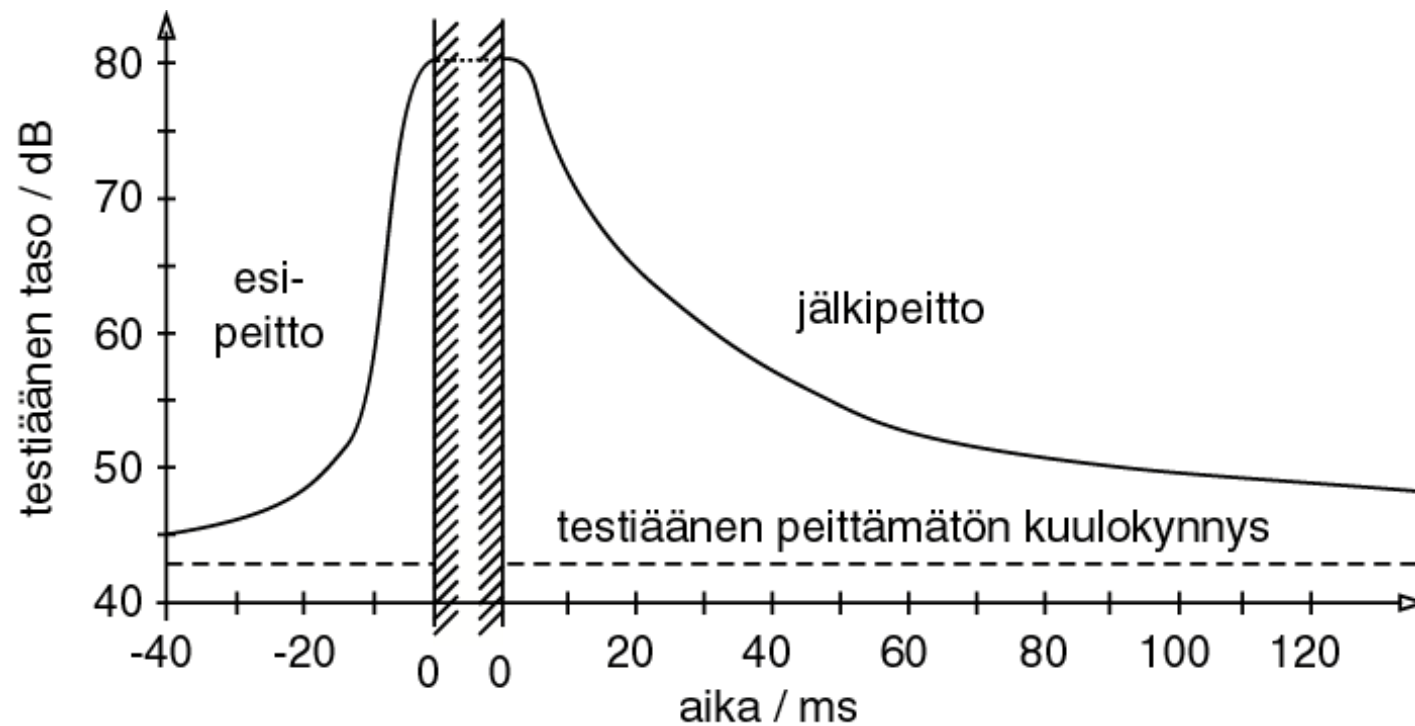
# Peittoilmiön ominaisuuksia

- 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

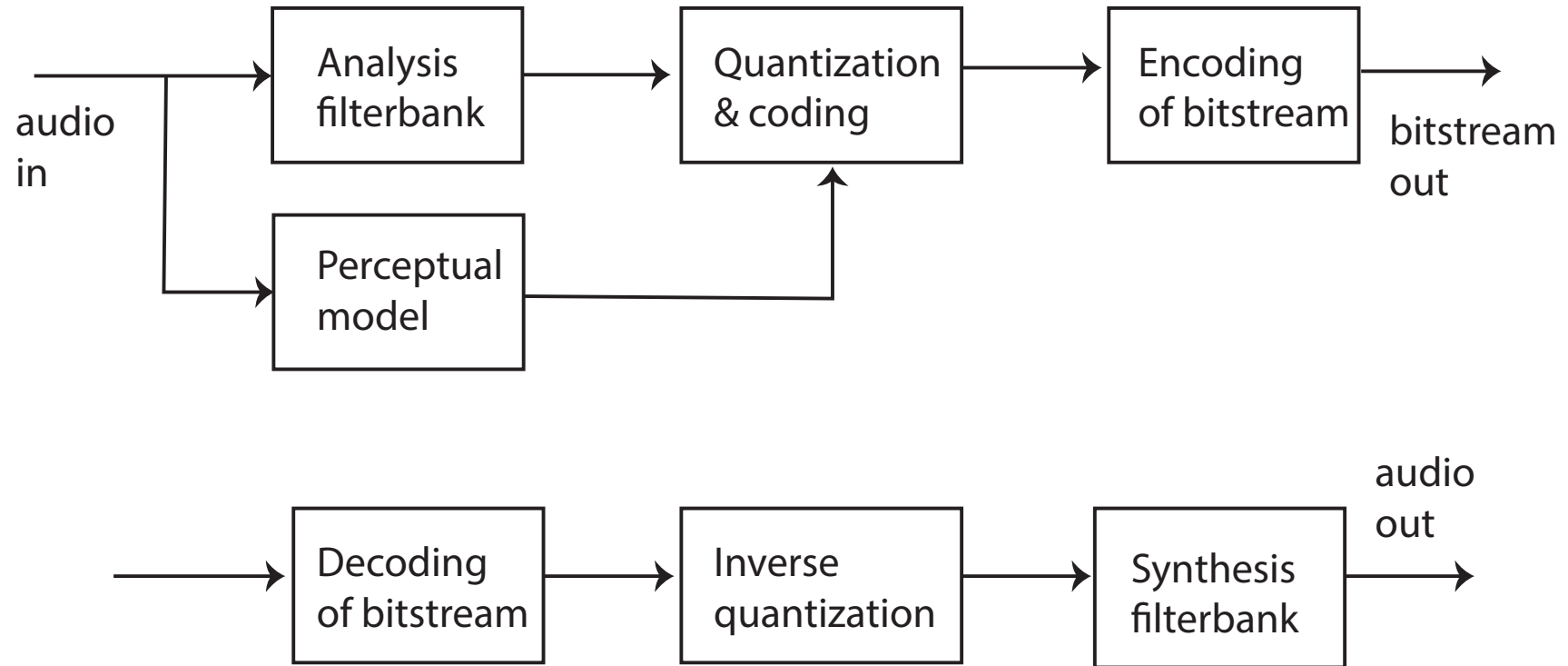


# Aikapeitto



# 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**