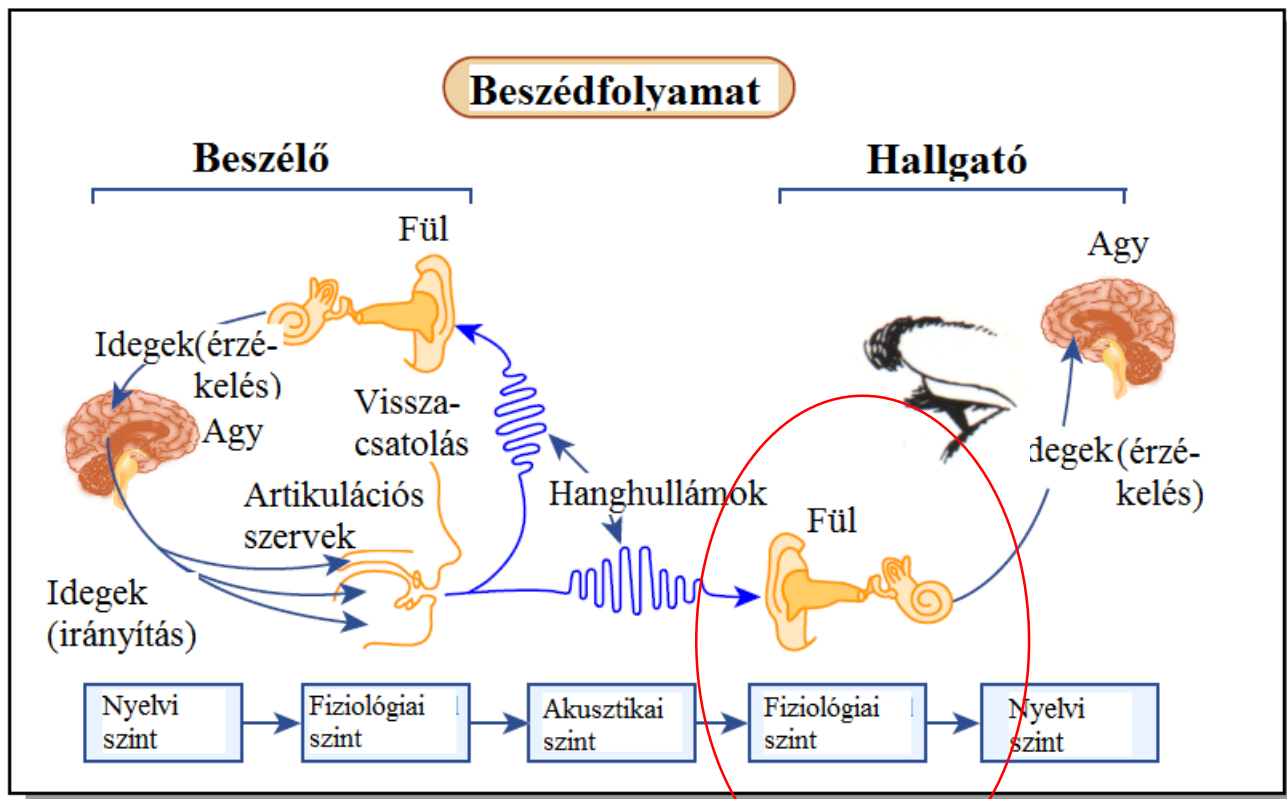


Hallás

# A beszéd folyamat



# A beszédfeldolgozás leegyszerűsített sémája

BESZÉDMEGÉRTÉS

**Nyelvi (szintaktikai, lexikai, pragmatikai) feldolgozás**

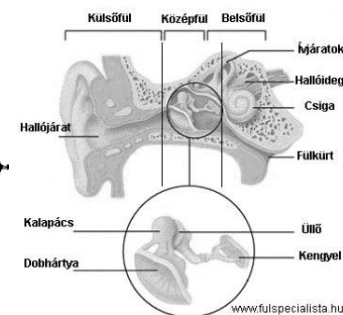


BESZÉDÉSZLELÉS

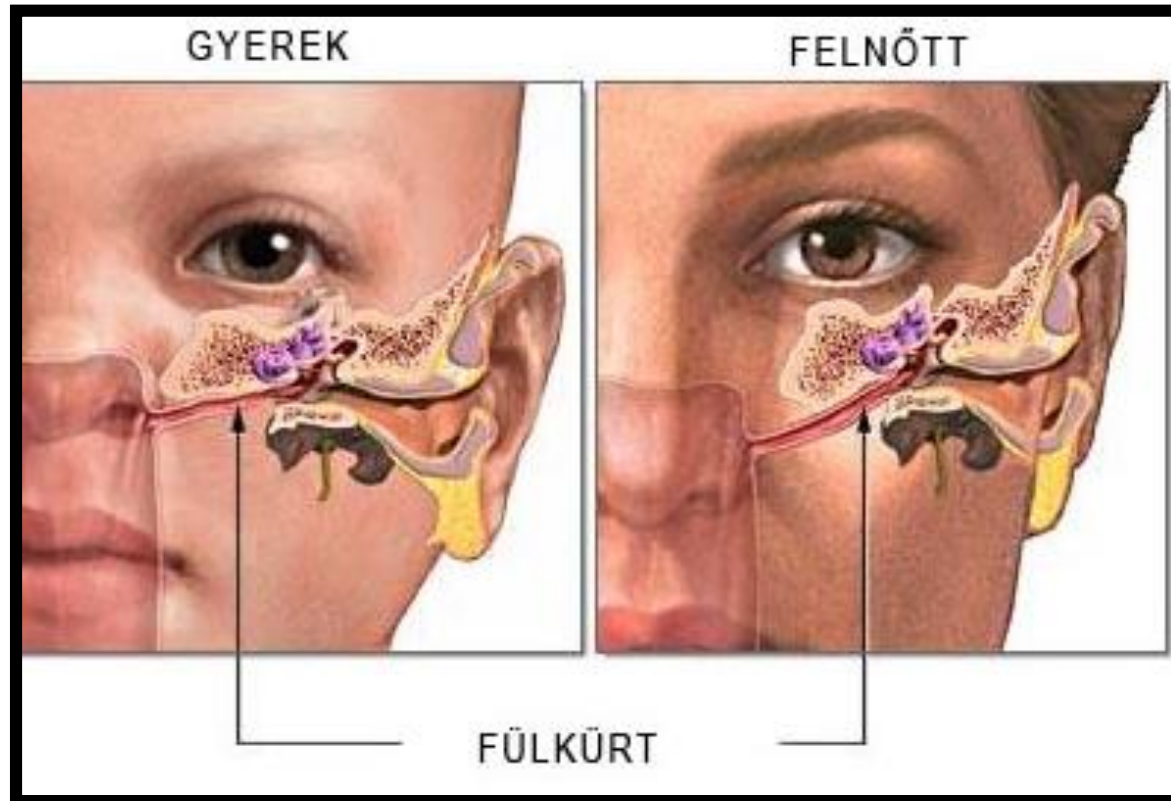
**Nyelvi egységek (fonéma, szótag, szó) elérése**

HALLÁS

**Jelátalakítás**

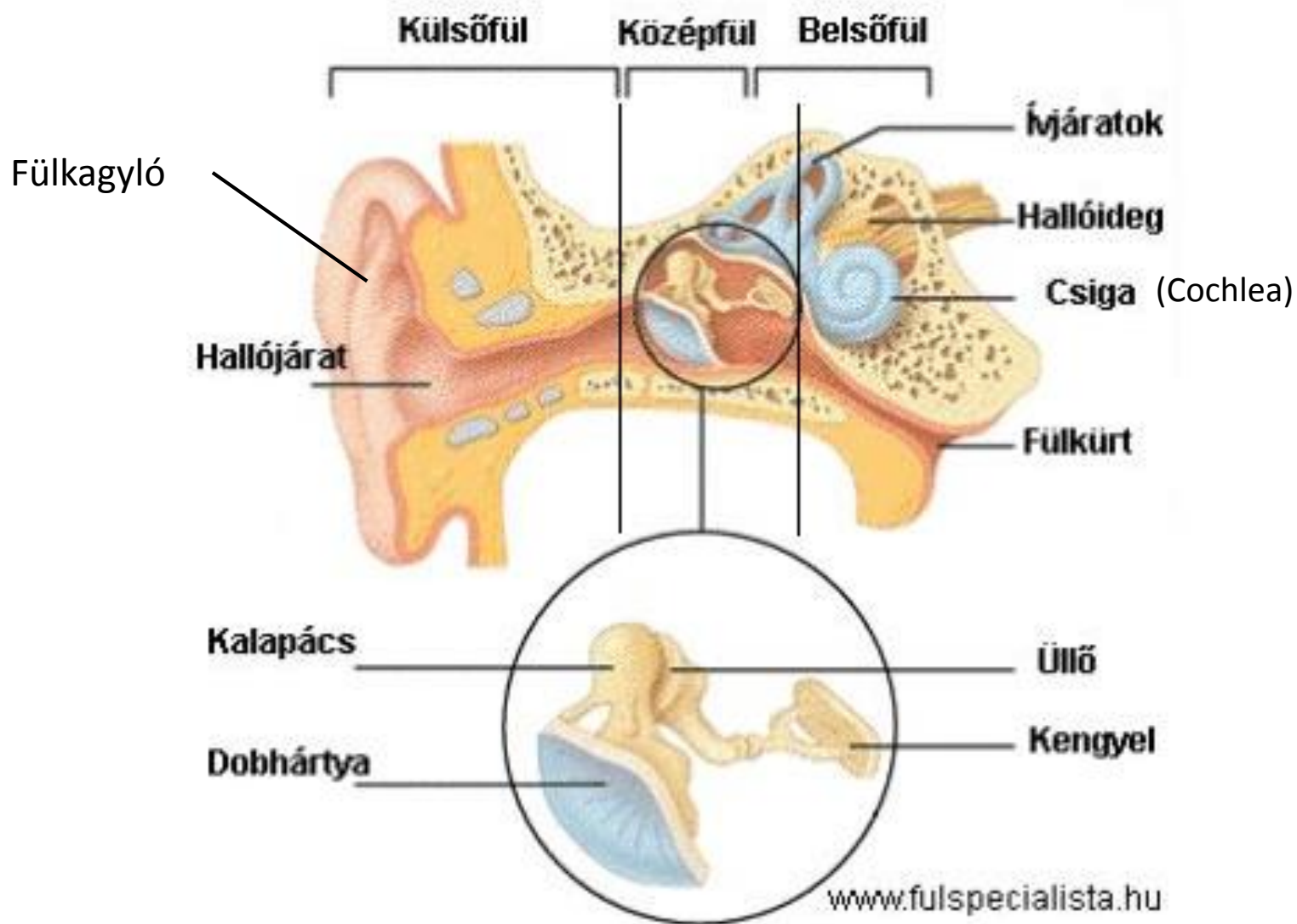


# A fülkürt (Eustach-féle kürt) jelentősége



- Nyomáskiegyenlítődés a **dobhártya két oldalán**

# A fül anatómiája – jelátalakítás

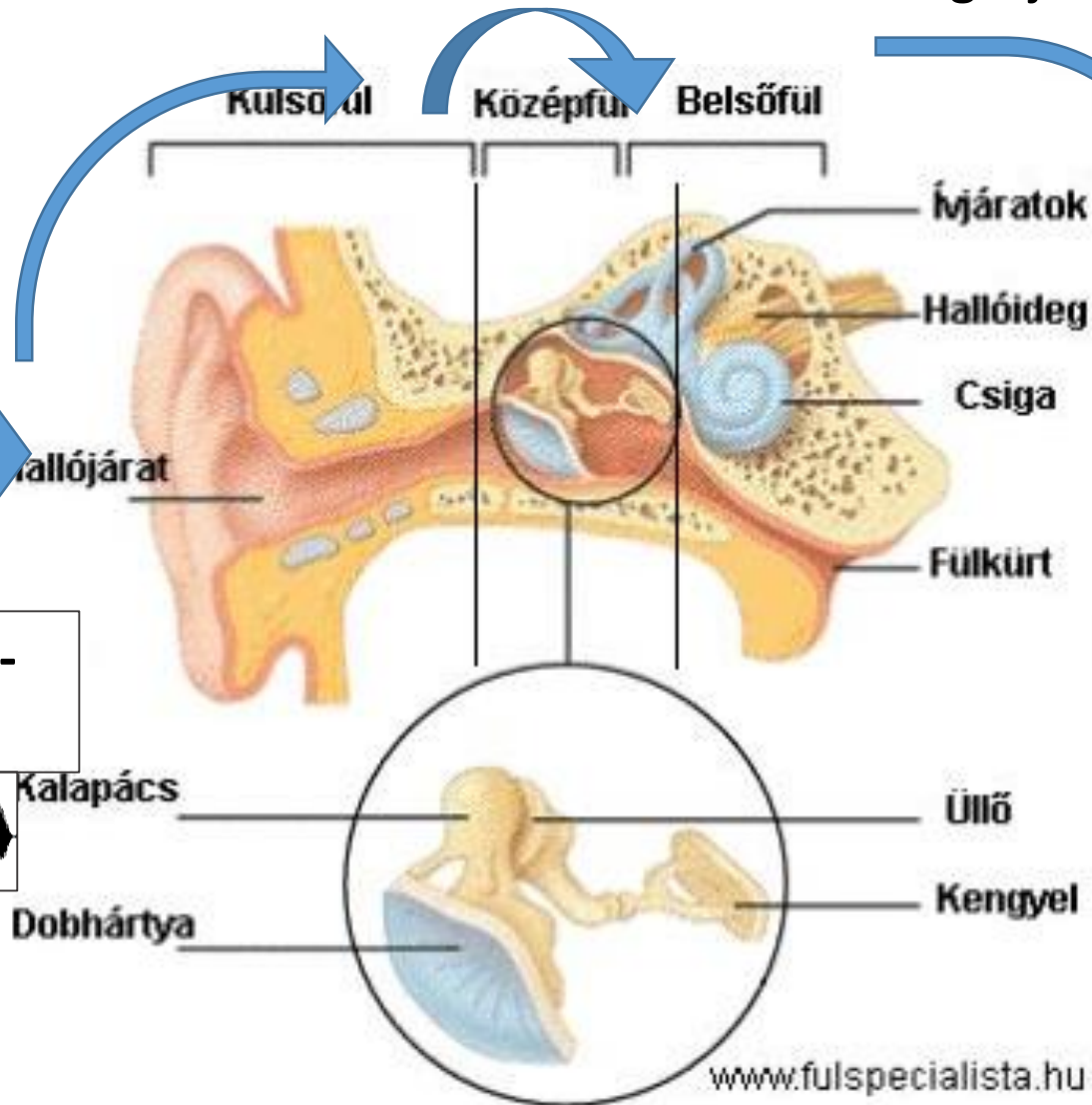


A fül mint  
jelátalakító

Mechanikus  
rezgés

Idegsejtek ingerlése

Idegi  
ingerület



Hangnyomás-  
ingadozás



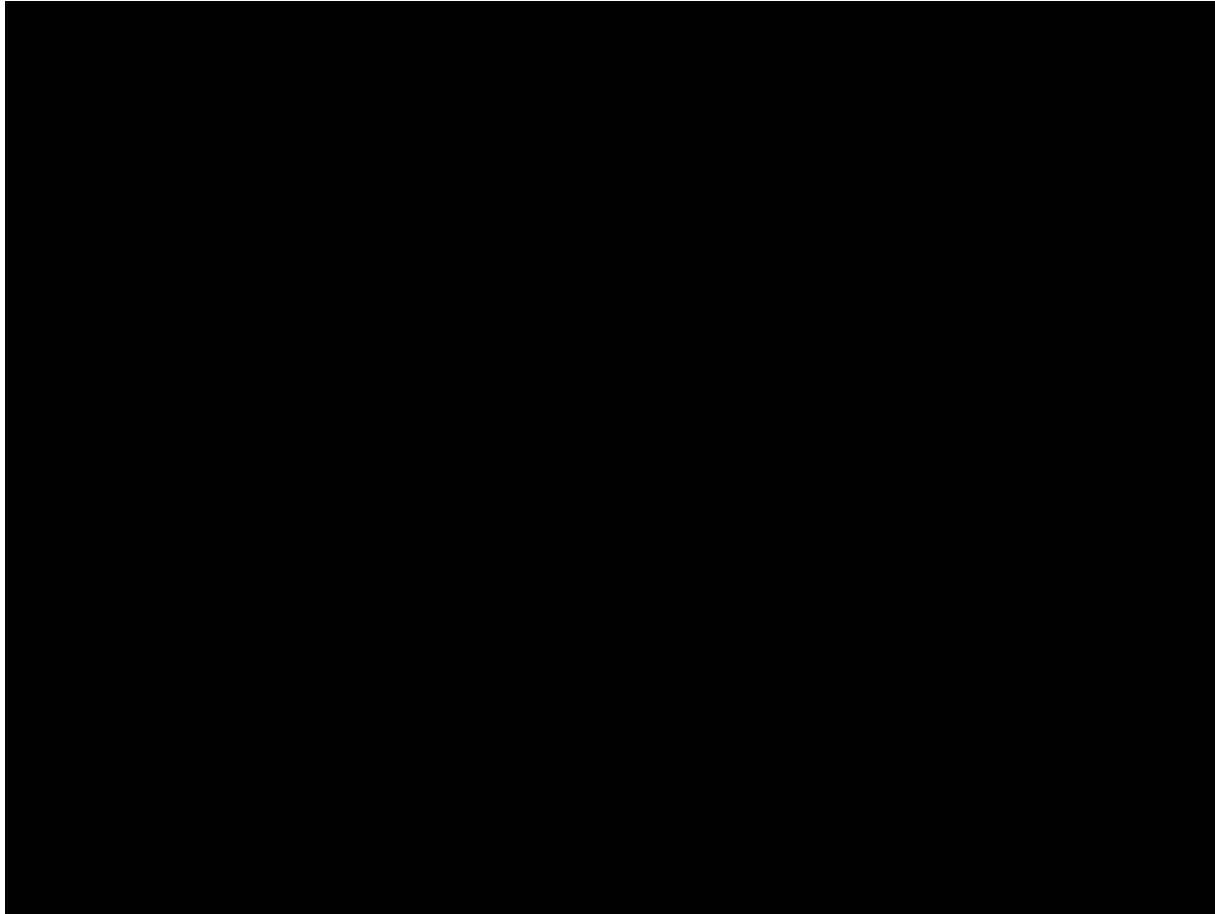
Kalapács

Dobhártya

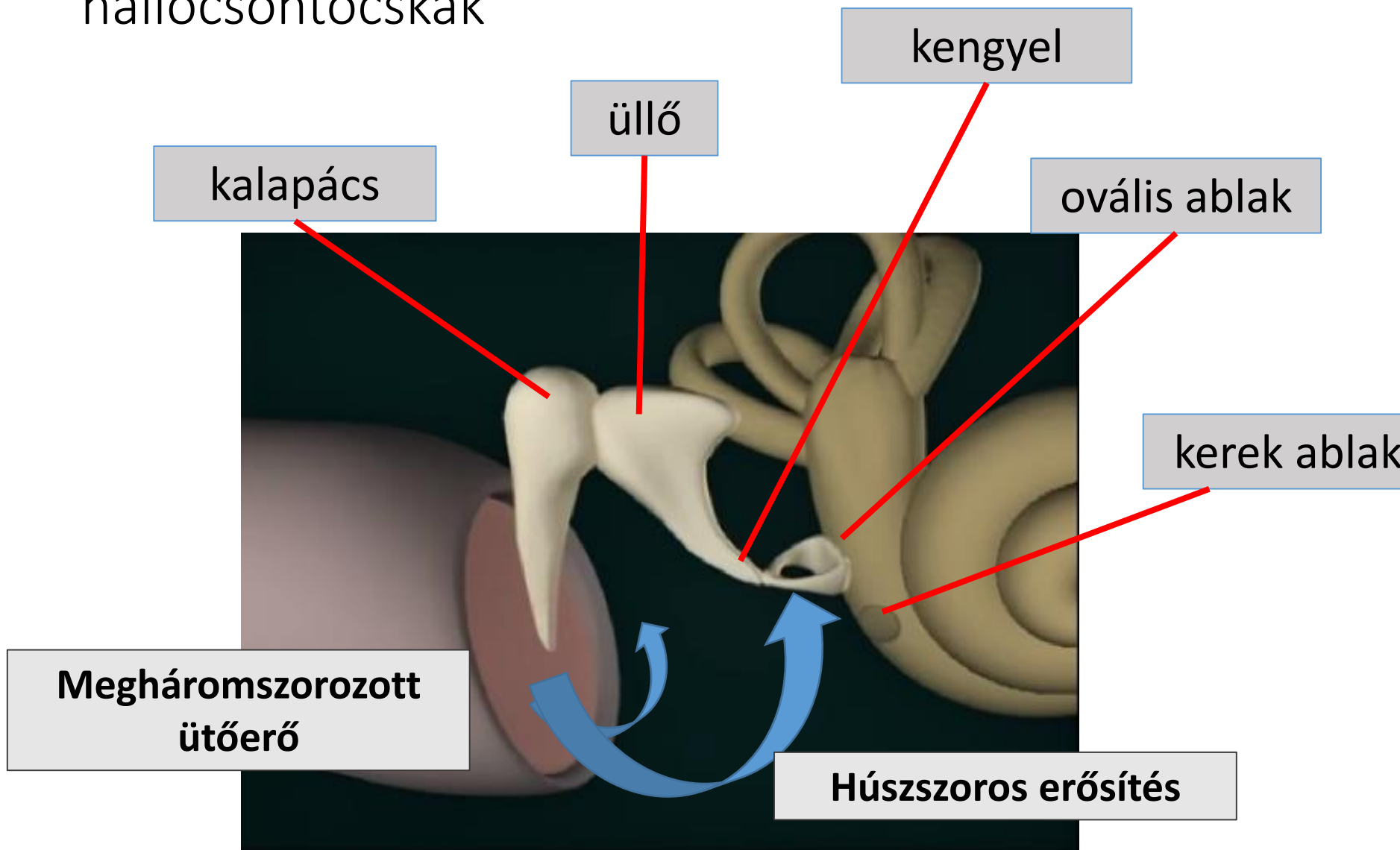
Üllő

Kengyel

Hanghullámok → mechanikus rezgések: a hallócsontocskák



Hanghullámok → mechanikus rezgések: a hallócsontocskák

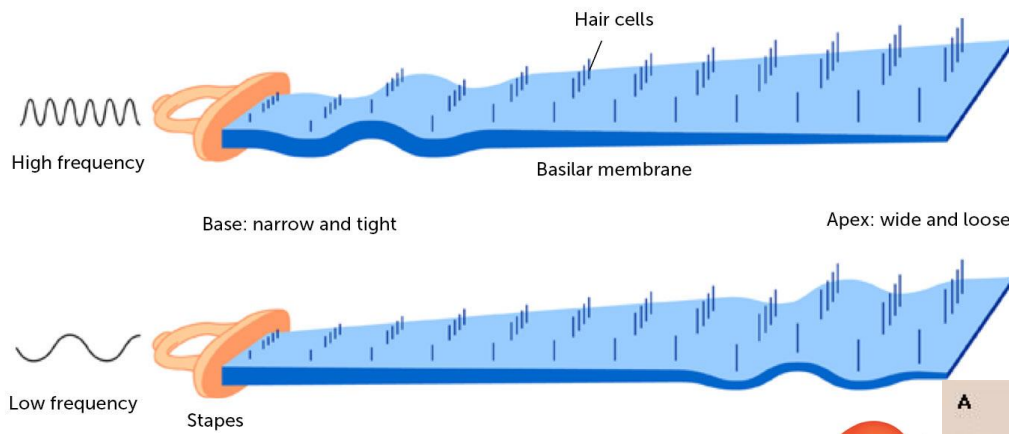




# Az alaphártya frekvenciaérzékenysége

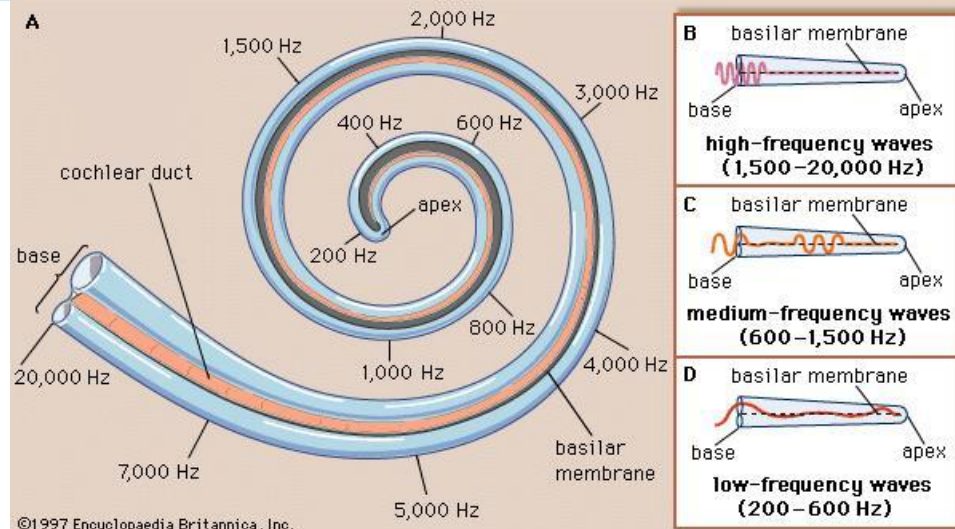
- **Az alaphártya tonotópiás felépítésű:**

a szomszédos területek szomszédos frekvenciasávokra érzékenyek.



- A bázisnál **magasabb** a sajátfrekvenciája.
- A csúcsnál **alacsonyabb** a sajátfrekvenciája.

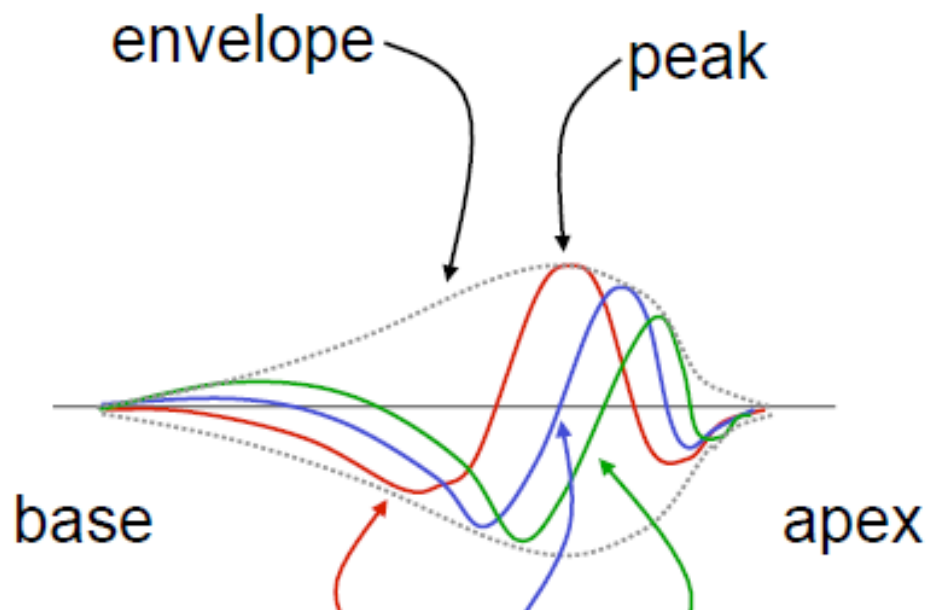
- Különböző frekvenciák: **eltérő méretű területek.**



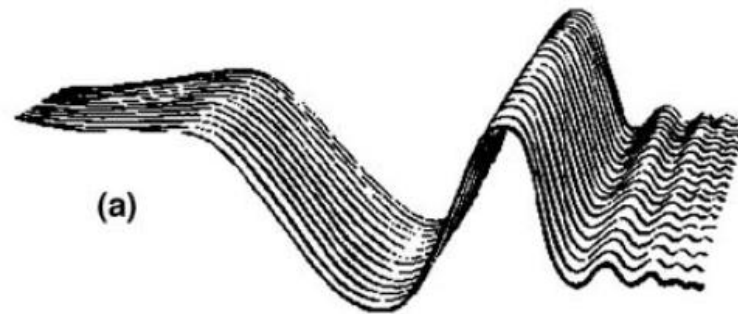
# Utazóhullámok

A hullám a bázistól a csúcsig „utazik”

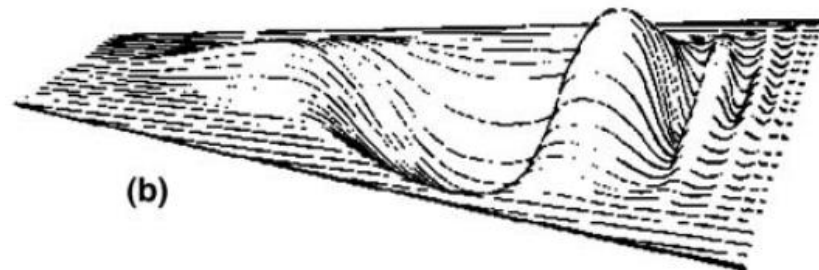
a legnagyobb kitérés helye a hullám burkológörbéjének legmagasabb pontja.



Bekesy 1947

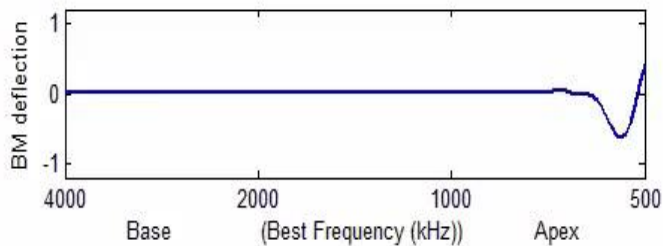
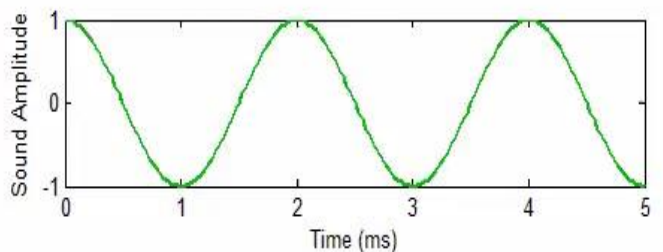


Tonndorf 1960

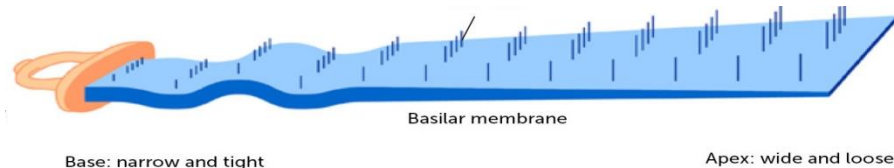
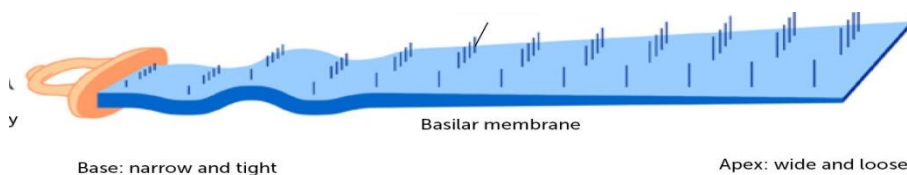
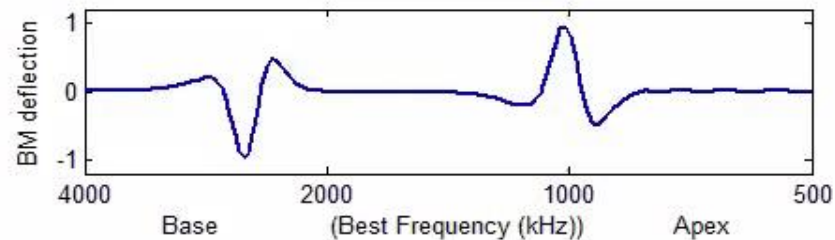
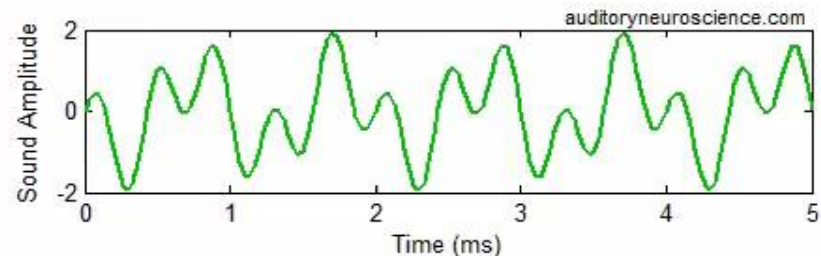


# Utazóhullámok és tonotópiás felépítés jelentősége

Tiszta hang

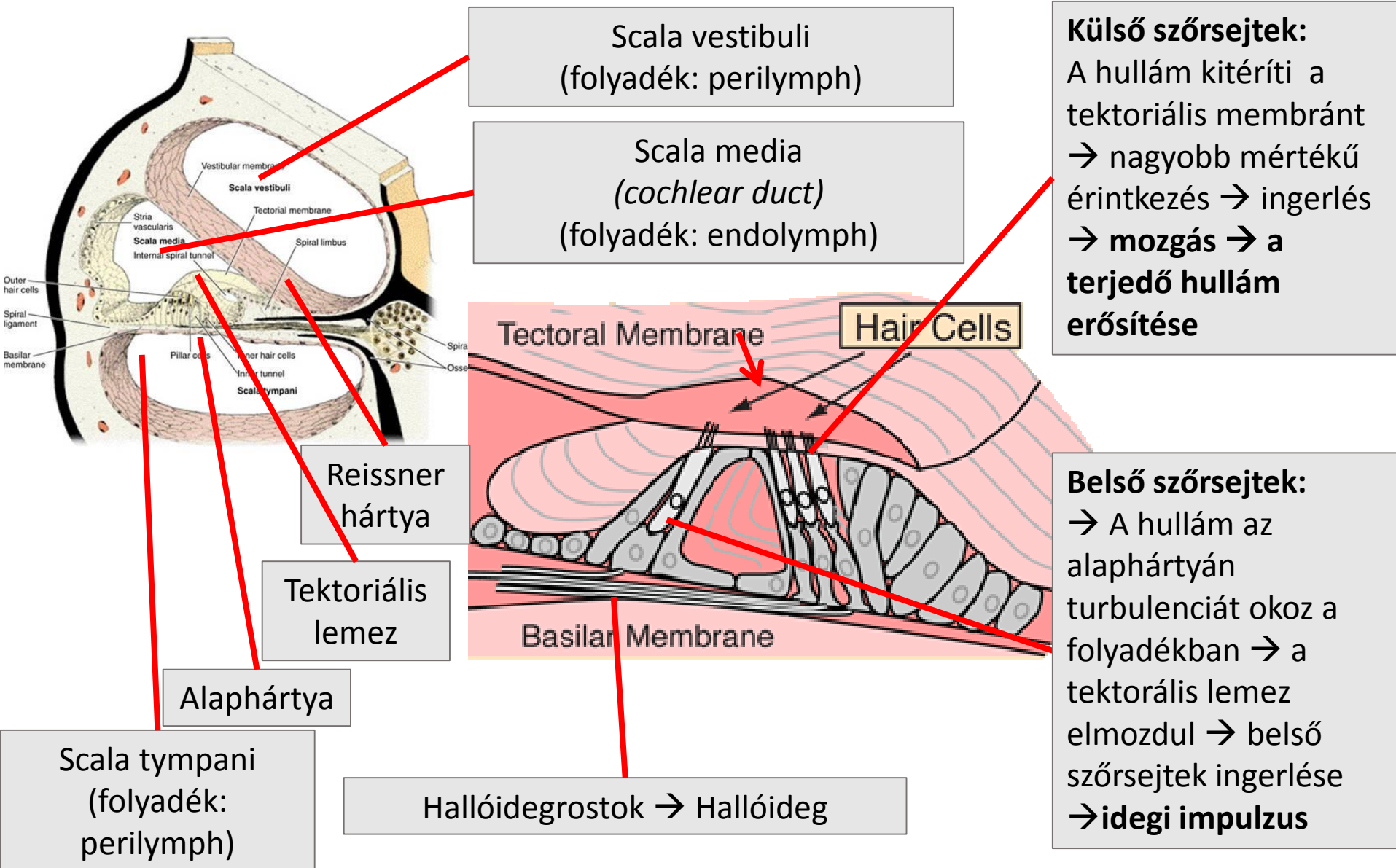


Komplex hang (1000 és 2500 Hz)



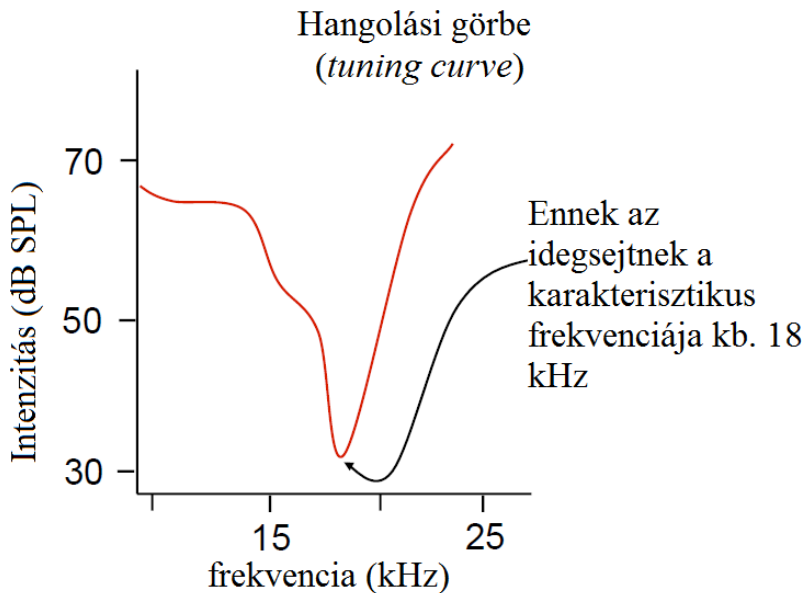
**A periferiális hallórendszer frekvenciafelbontást végez!**  
**→ auditoros „spektrogramok”!**

# A csiga és a Corti szerv anatómiája



# A belső és külső szőrsejtek

## A belső szőrsejtek



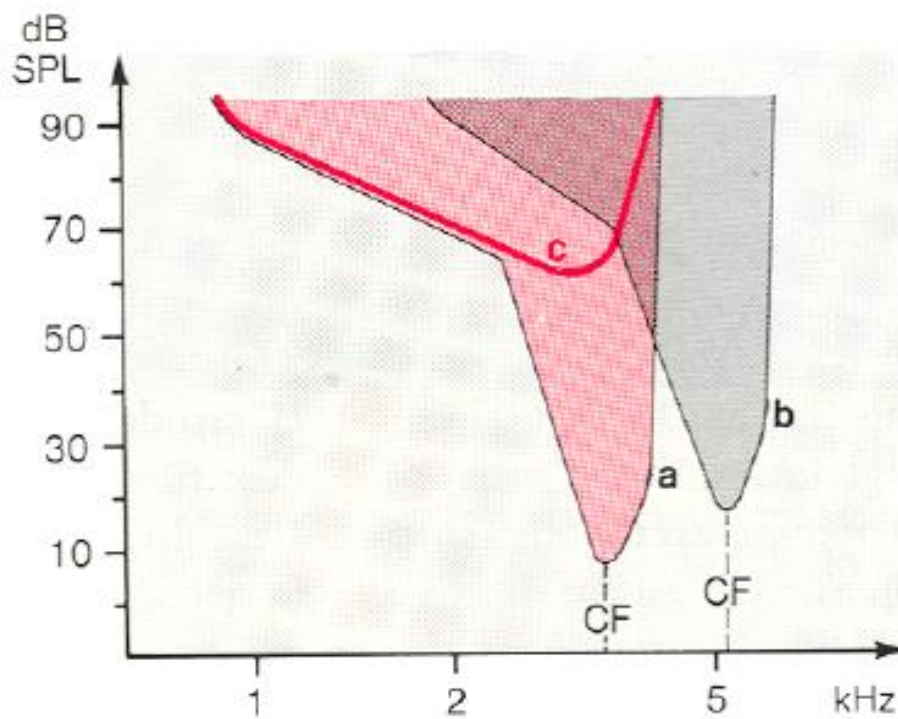
- Frekvenciaérzékenység:  
Jellemző rá az a frekvencia, amelyre reagál (tüzel)
- **A hallás idegsejtjei:**  
Tüzelés → innen továbbítódnak az idegi impulzusok
- Főleg **FELSZÁLLÓ** (afferens) kapcsolatok

## A külső szőrsejtek

- Ingerlésre mozgás → a mozgása frekvenciája egyezik az inger (a hang) frekvenciájával →
- Frekvenciaérzékenység →
- **„Erősítők”**: felerősítik az ingert (tektoriális lemez mozgását a belső szőrsejtek számára), ezzel „hegyesítik” a belső szőrsejtek hangolási görbéit: a belső szőrsejtek kisebb intenzitású hangra is reagálni fognak
- Főleg **LESZÁLLÓ** (efferens) kapcsolatok



# Hangolási görbe két idegsejtre

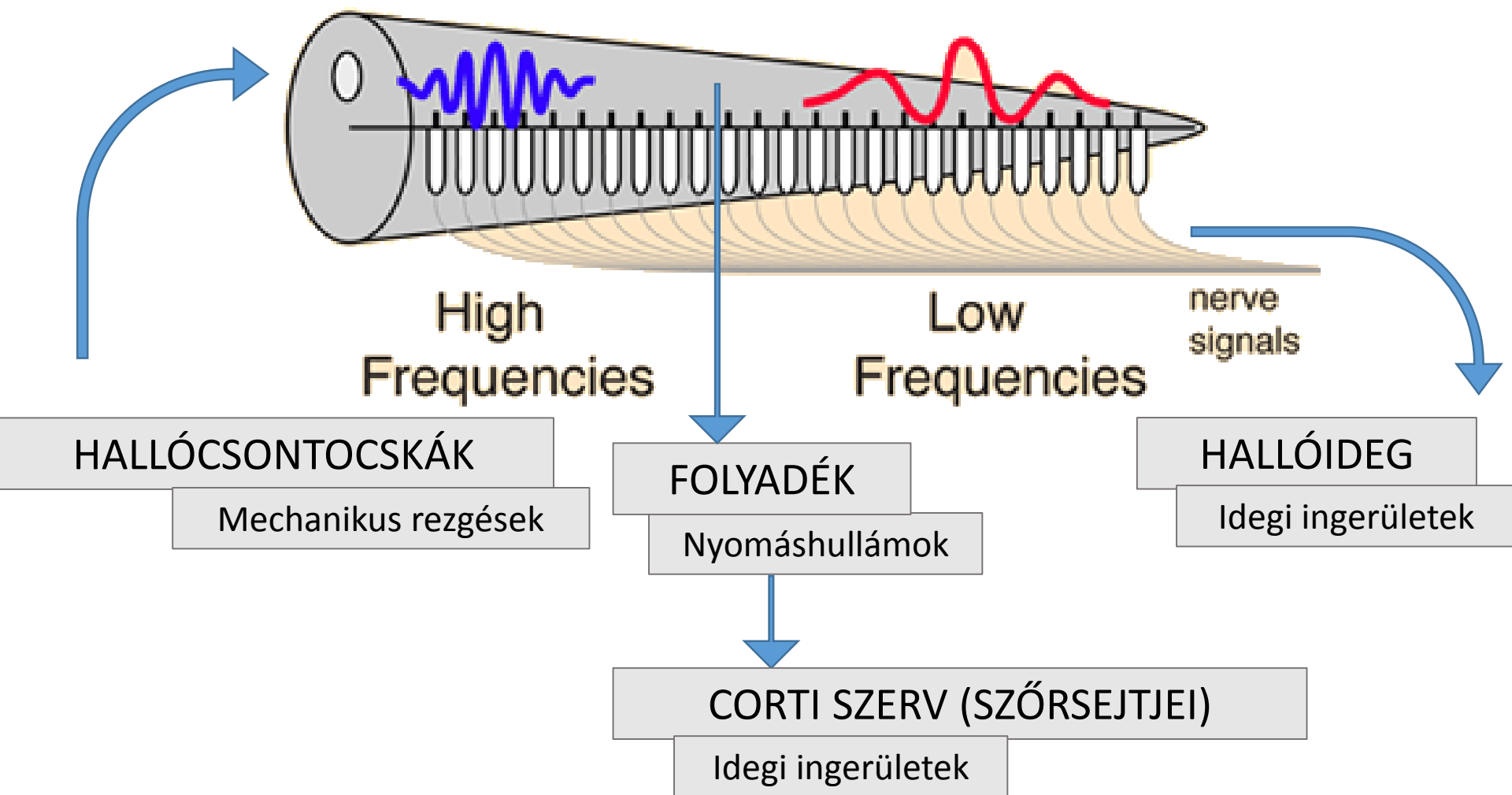


Bierbaumer&Schmidt (1999)

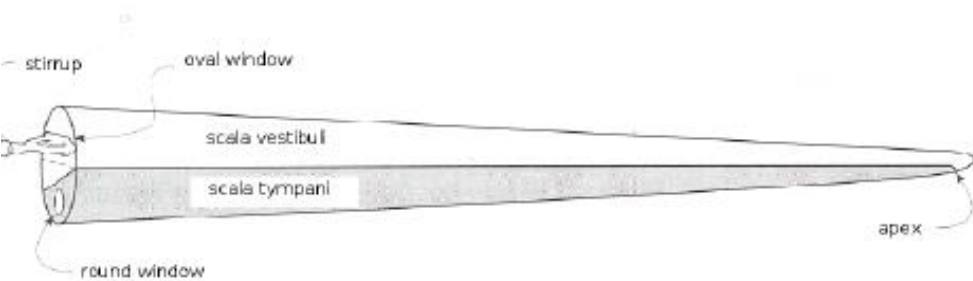
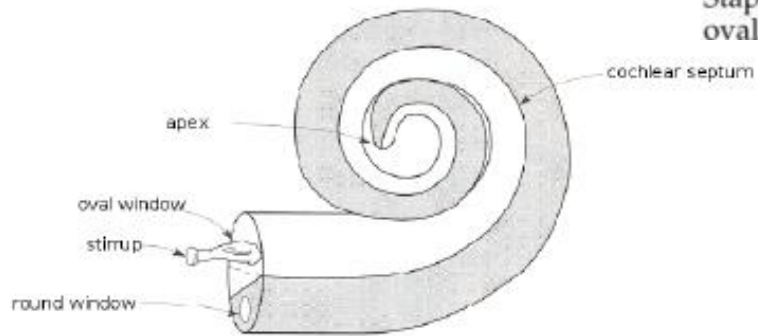
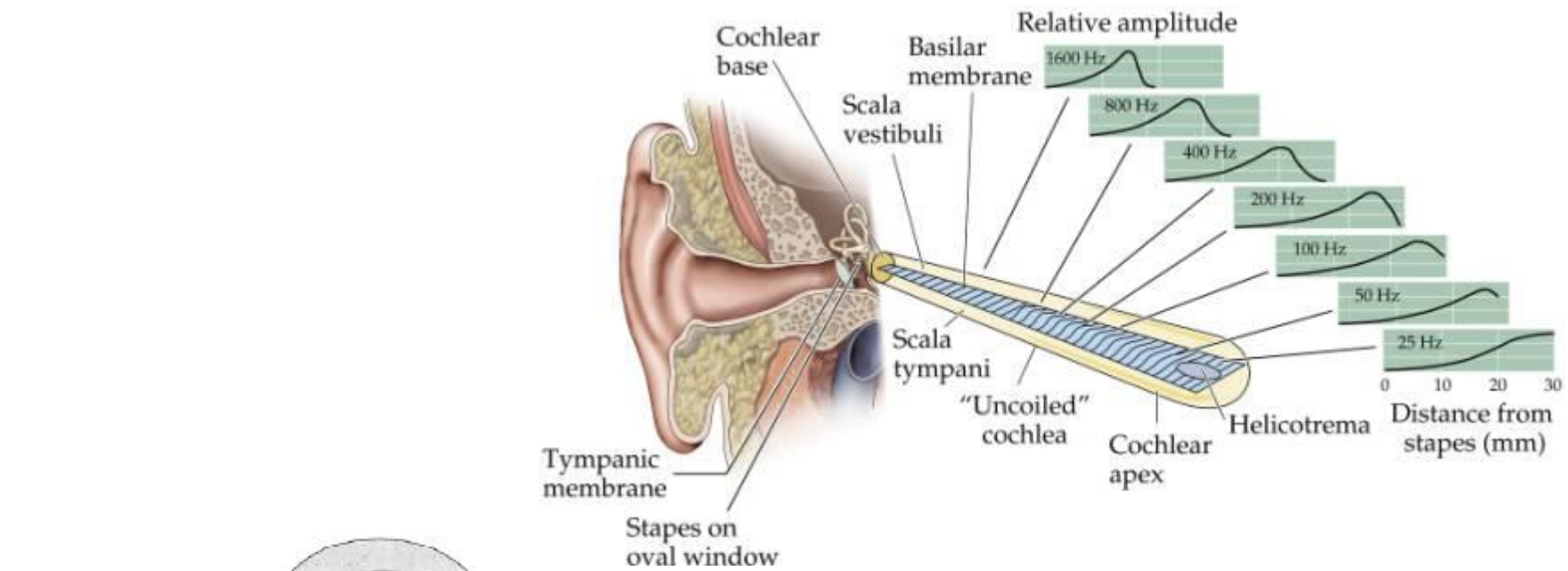
# Intenzitás kódolása

- Más szenzoros modalitásokkal NEM a neuronok tüzelésének gyakorisága kódolja
- A (belső) idegsejtek aktivációs thresholdja különböző
- Minél nagyobb a hanginger, azaz minél nagyobb a hangerő, **annál több idesejt tüzel.**
  
- Milyen következménye van ennek?
- Hogyan változik a hallószerv érzékenysége nagy zajban?

# Mechanikus rezgések → idegi ingerületek



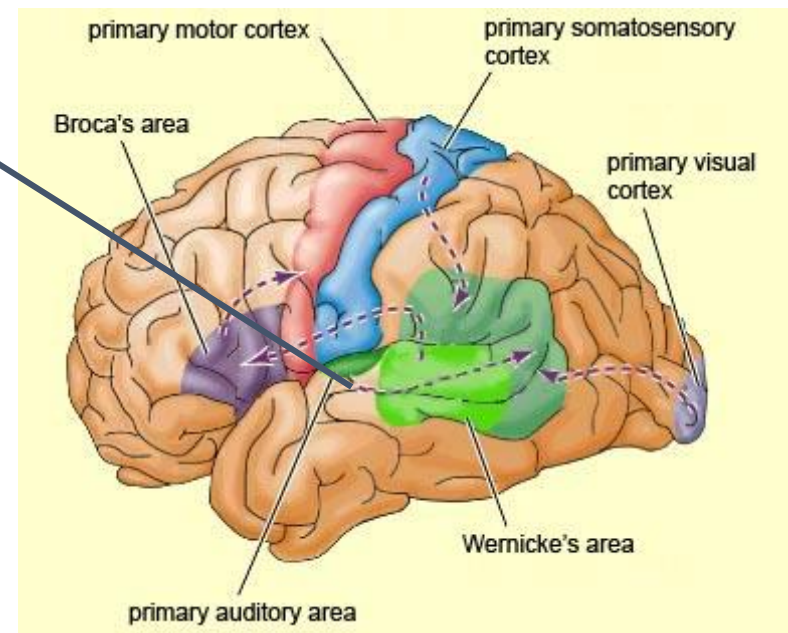
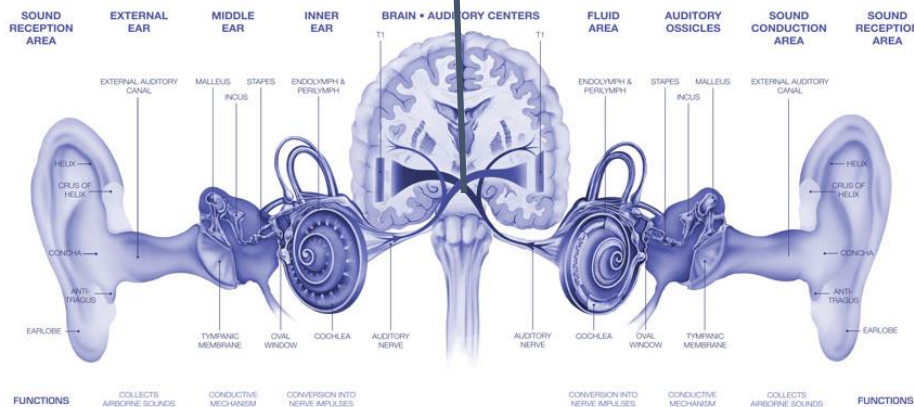




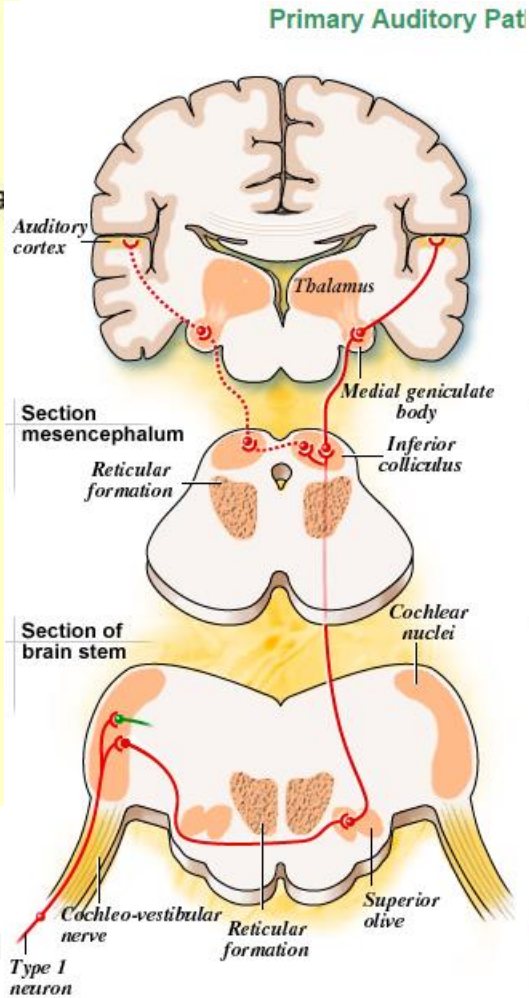
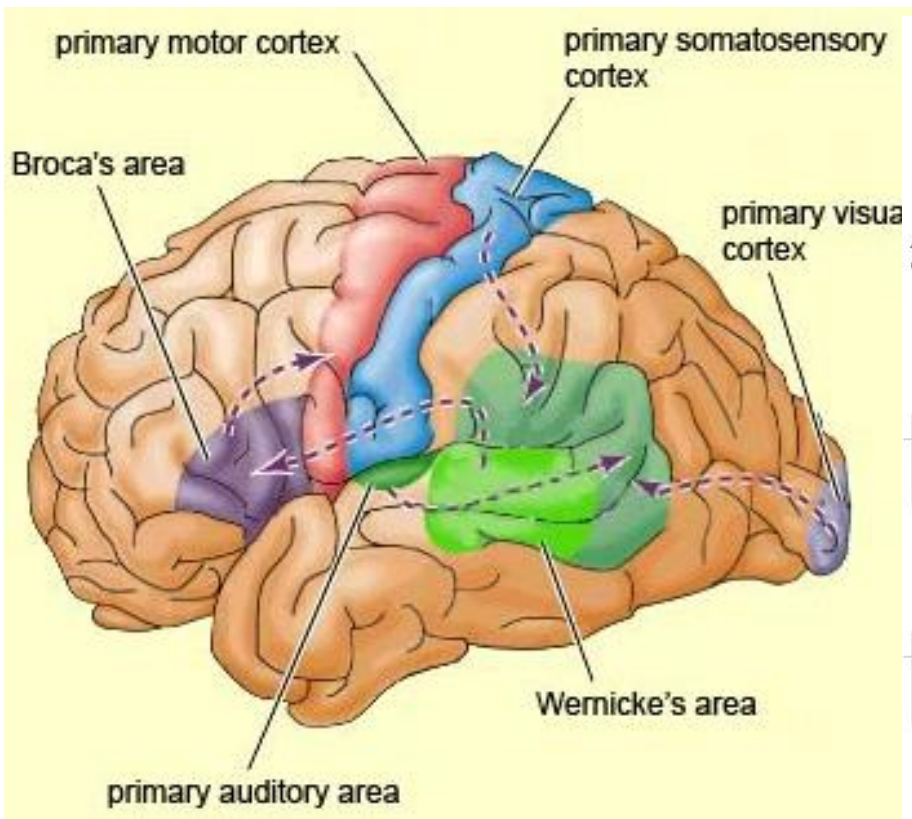
Goldstein (1997)

# A hangerek útja

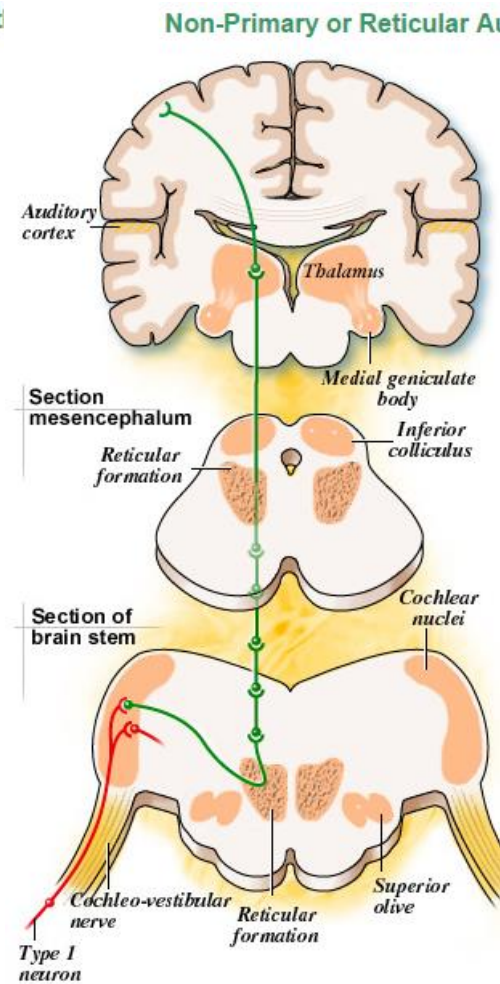
- A szőrsejtekre **receptorok** kapcsolódnak
- A receptorok (neuronok) axonjai „összeállnak” és kilépnek a cochleából: **hallóideg** (a nyolcadik agyideg)
- hallóideg → **agytörzsbe** jut → innen az inger az ellenkező féltekébe → majd **elsődleges és másodlagos auditoros kortexbe**



# A hangterek és az agy



Ipszilaterális útvonal



kontralaterális útvonal

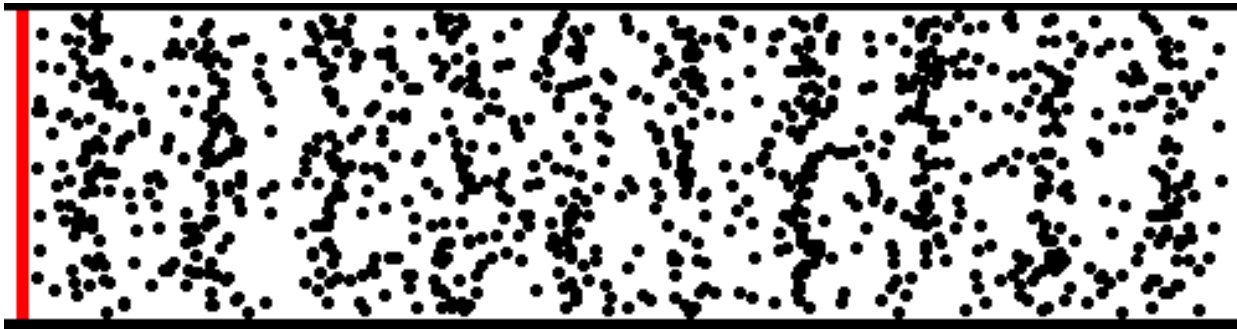
Az ezek közti kapcsolatok, valamint a leszálló (efferens) ág felelősek például azért, hogy a hangforrásokat térben elhelyezzük



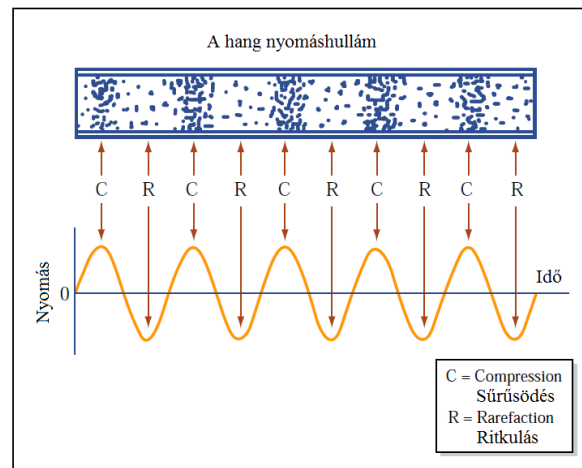
Fizikai jellemzők észlelése

# A hang

- A (lég)nyomás ingadozása az időben.

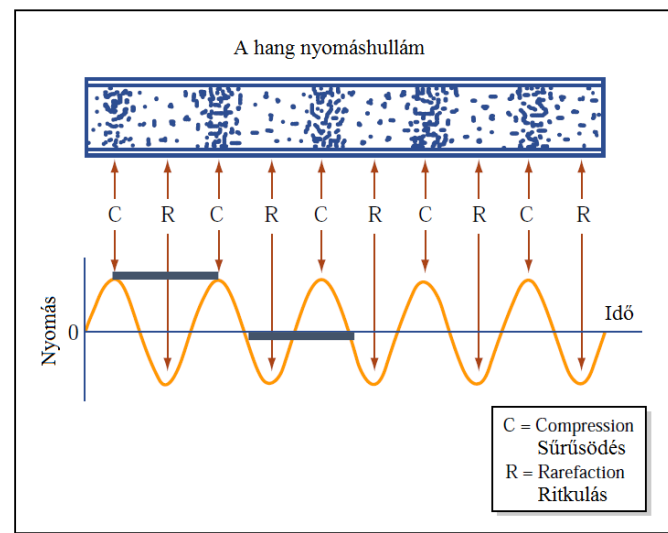


- **Az emberi hallás terjedelme:** ha az ingadozás 20-nál többször, de 20.000-nél kevesebbszer történik meg egy másodperc alatt, halljuk.

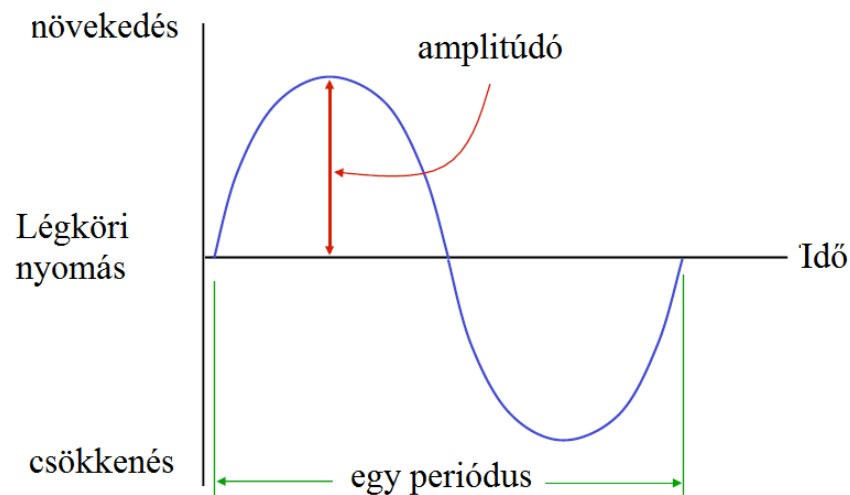


# A hang fizikai tulajdonságai

- **(Alap)frekvencia:**
- a nyomásváltozás gyakorisága, azaz a **periódusok száma** egy időegység alatt [Hz].
- **Amplitúdó:**
- a nyomásváltozás (sűrűsödés és ritkulás) mértéke, illetve a kitérés mértéke.
- **Fázis:**
- a nyomásingadozás kezdőpontja szögben mérve – bárhol lehet a minimum és a maximum között (itt:  $0^\circ$ ).



Szinuszos hang (tisztahang)



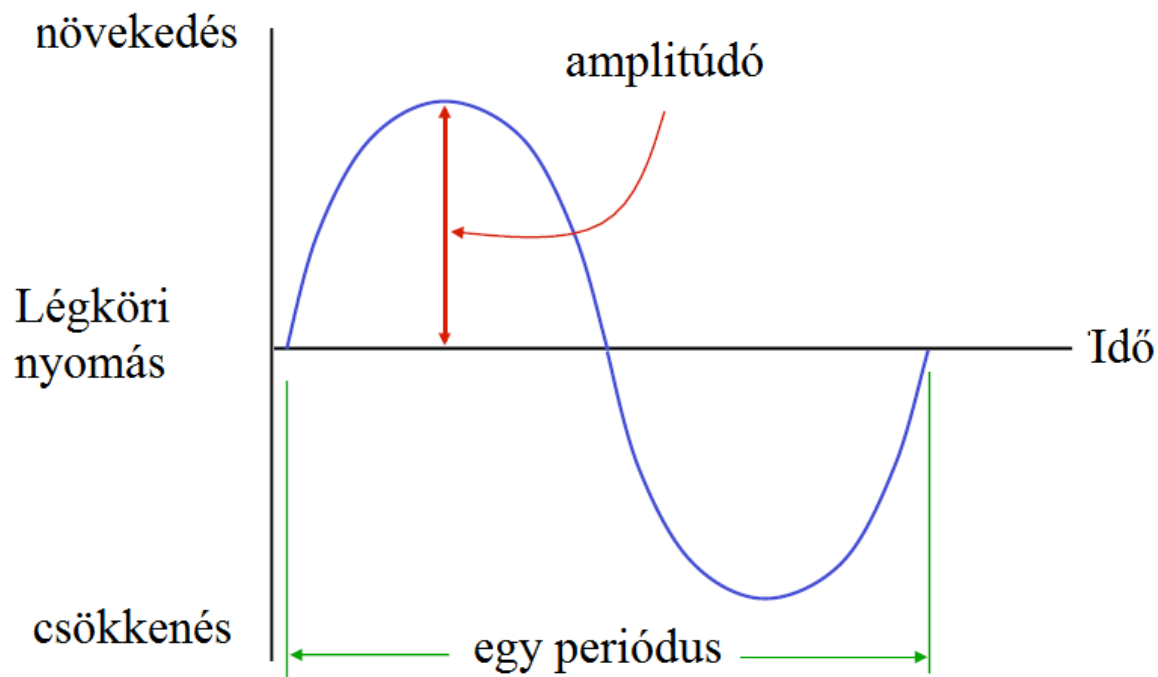
# Fizikai jellemzők és érzeti vetületük

- Hangnyomás vagy hangintenzitás – [Pa] [W/m<sup>2</sup>]
- (Alap)frekvencia - [Hz]
- Spektrum
- Időtartam - [ms]
- **Hangosság** ~ hangnyomásszint [son] [phon] [dB]
- **Hangmagasság** (*pitch*) [Bark] [Mel] [félhang]
- **Hangszín** és hangszínezet
- **Hosszúság** ( $\neq$  nyelvi hosszúság!)

# Amplitúdó

- A légköri nyomáshoz viszonyított nyomásváltozás (azaz a kitérés) nagysága
- Ettől függ a hangosság

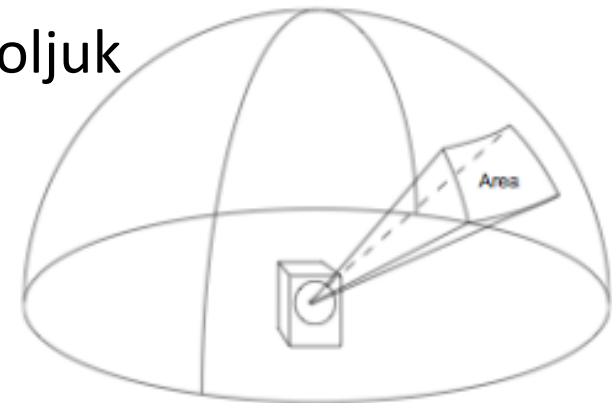
Színuszos hang (tisztahang)





# Hangosságérzet: hangnyomásszint (dB-skála)

- A hangosságérzet valójában közelebbről az **intenzitással függ össze**:
  - **Intenzitás**: objektív; a hangterjedés irányára merőleges egységnyi felületen egységnyi időt alatt átáramlott energia időbeli középértéke, azaz
    - a felületegységen áthaladó **hangteljesítmény ( $W/m^2$ )**.
    - A hangforrás teljesítményét méri.
  - Hallási megfelelő: **hangnyomásszint (sound pressure level: SPL)**
    - A **nyomásból** vagy az **intenzitásból** számoljuk
- Az intenzitás vagy nyomás és a hangosság között **logaritmikus** összefüggés van.



# Hangosságérzet: hangnyomásszint (dB-skála)

Sugárhajtómű  
(140 dB)

- **Hangnyomásszint (SPL)**
- A fül a nyomásra érzékeny
- Jellemzése arányszámmal:

**Nyomásból:**

$$SPL = 20 \log (p'/p_0)$$

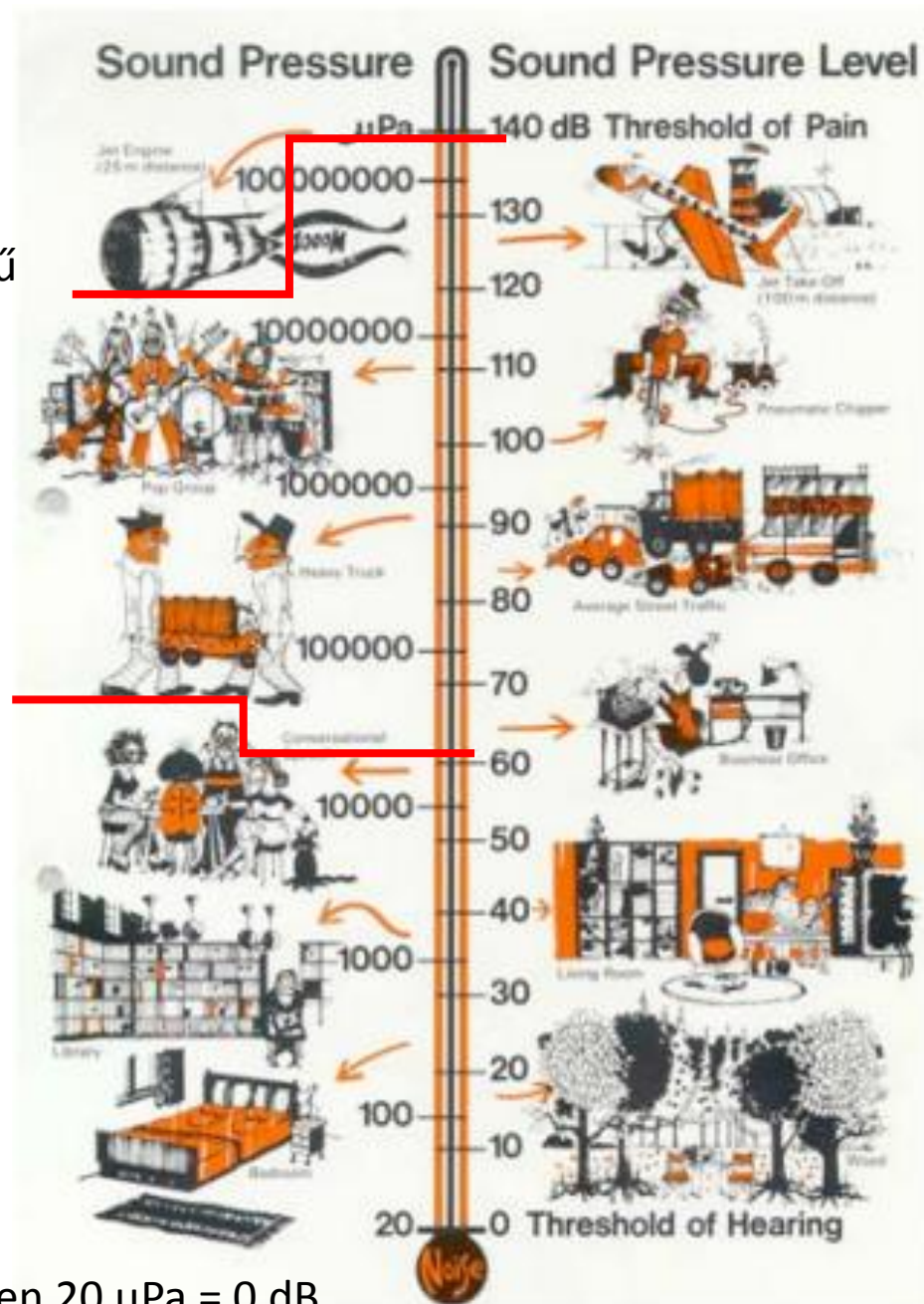
VAGY

**Intenzitásból:**

$$SPL = 10 \log (I'/I_0)$$

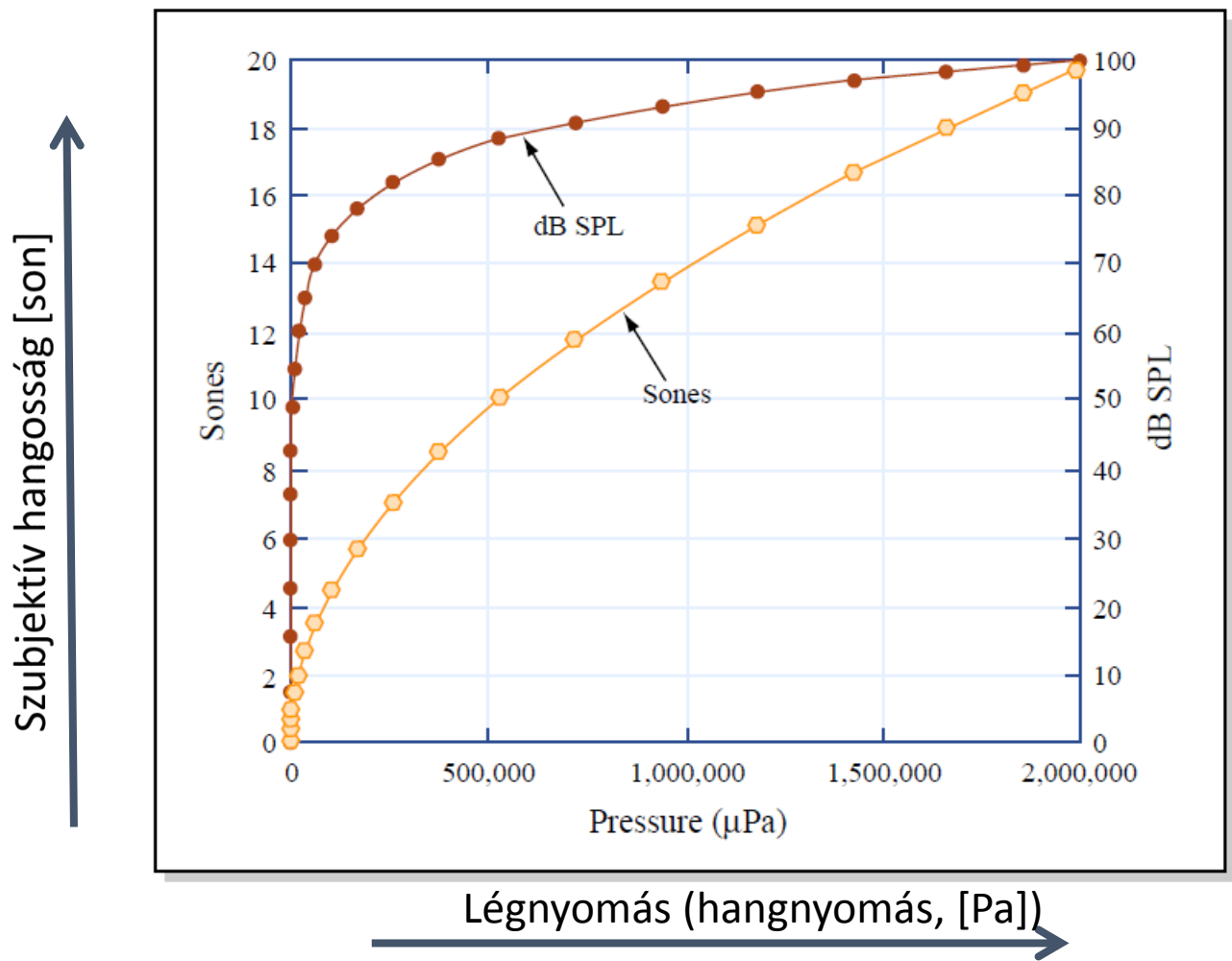
- Mértékegysége: **dB**

Társalgás  
(60 dB)



Threshold: 1000 Hz-en 20 μPa = 0 dB

# A valódi (kísérleti) hangosságérzet, a son és a dB-skála (~log skála) kapcsolata



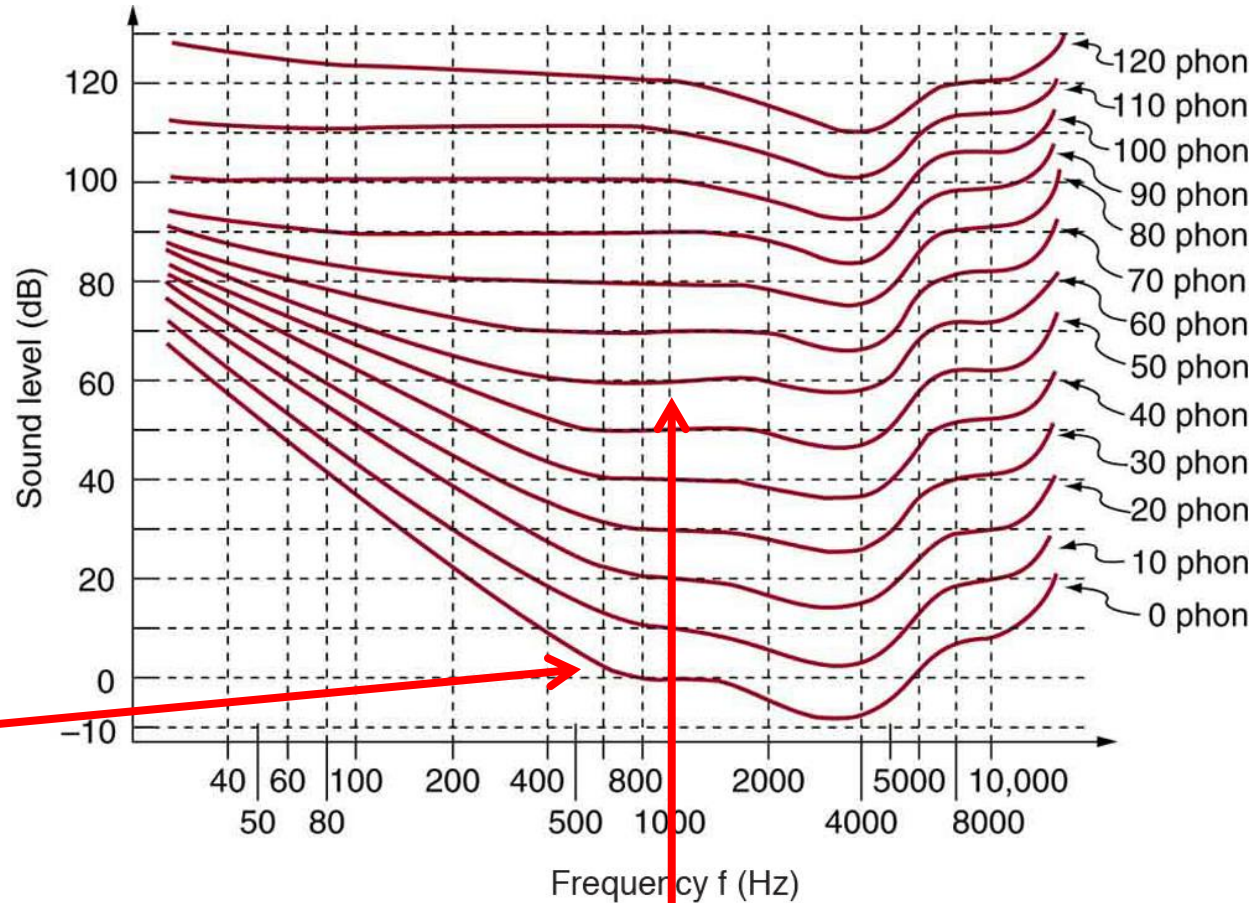
Légnnyomás logaritmus aránya (hangnyomás, [Pa])

## Son:

- S. S. Stevens (1936): 1 sone is equivalent to the loudness of a signal at 40 phons
- (Kvazi) lineáris: kétszer olyan hangosnak érzett: kétszer akkora son érték  $\leftrightarrow$  dB: log
- nem tételez frekvencia-függést!

# A hangosságérzet frekvenciafüggése: phon

## Hangosságérzet és frekvencia



**Hallásküszöb:** egy 1000 Hz frekvenciájú tiszta hang 0 dB-en

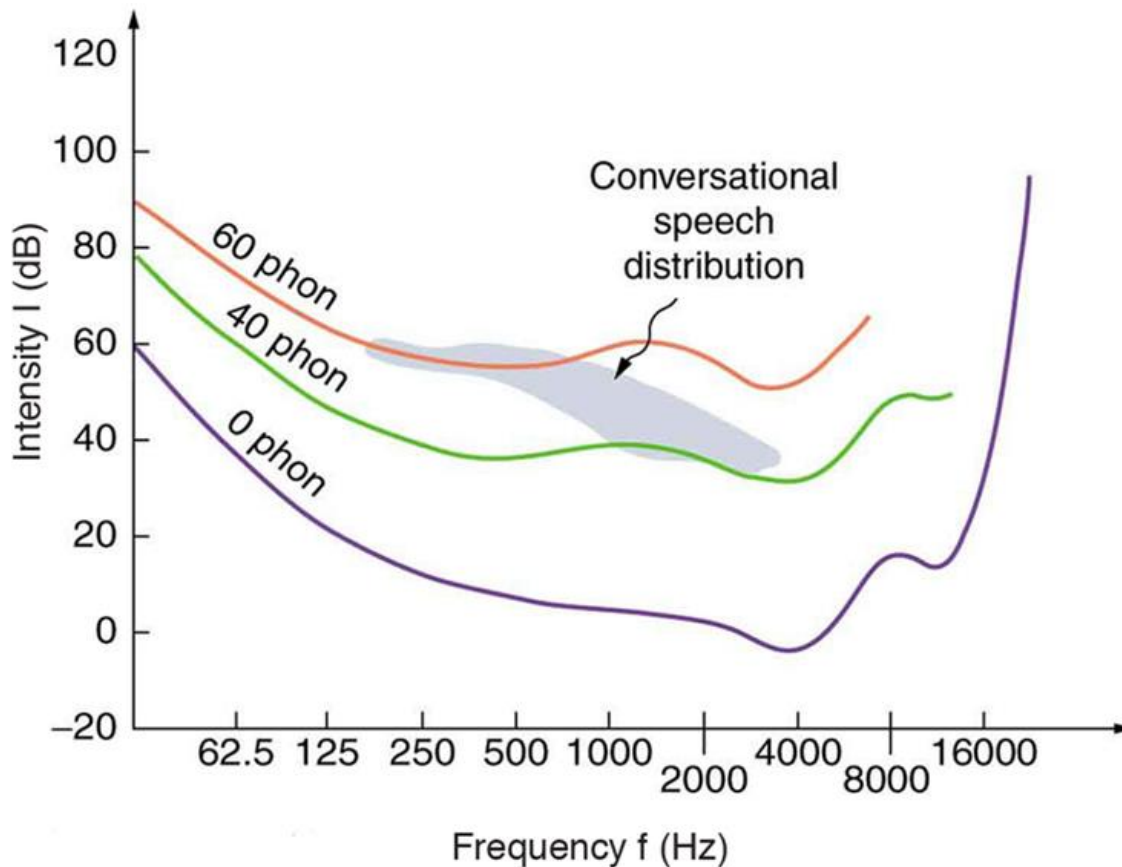
**Phon:** azonos hangosságúnak érzékelt hangok → változó arányok! (pl. a 40 phon nem kétszer olyan hangos mint 20 phon)

*Példa:* 60 phon = „olyan hangos, mint egy 60 dB-es 1000Hz-es szinuszhang”

Teszteljétek a saját hallásgörbéiteket: <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>

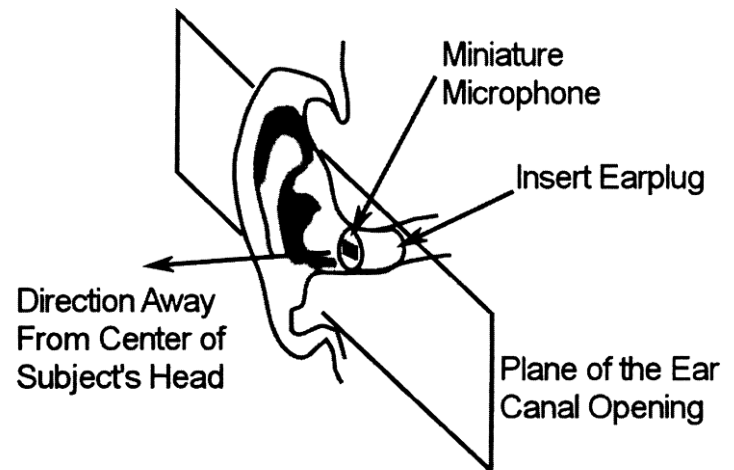
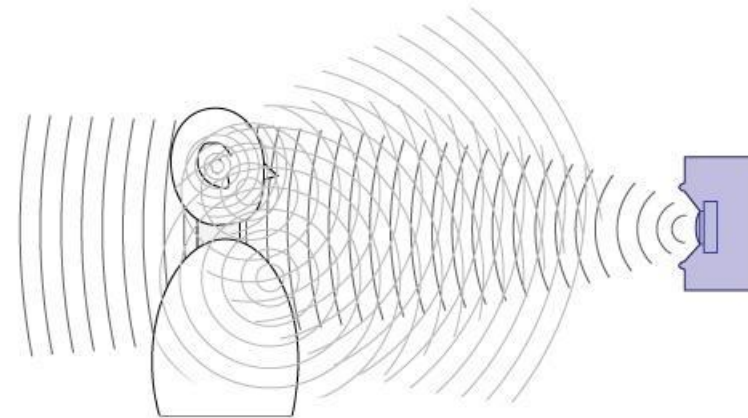
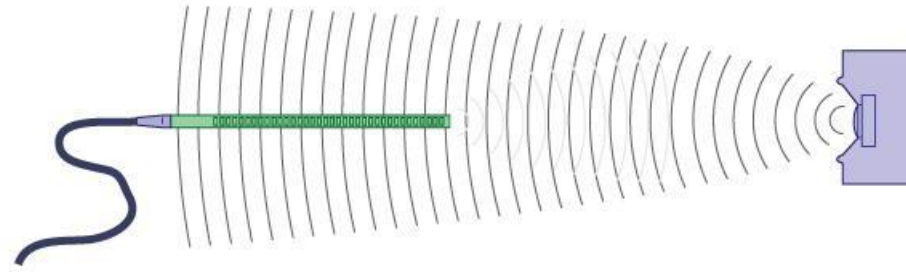
# Frekvenciafüggő hangosságérzet

A hallás nagyjából a beszéd tartományán a legérzékenyebb/legjobb felbontású



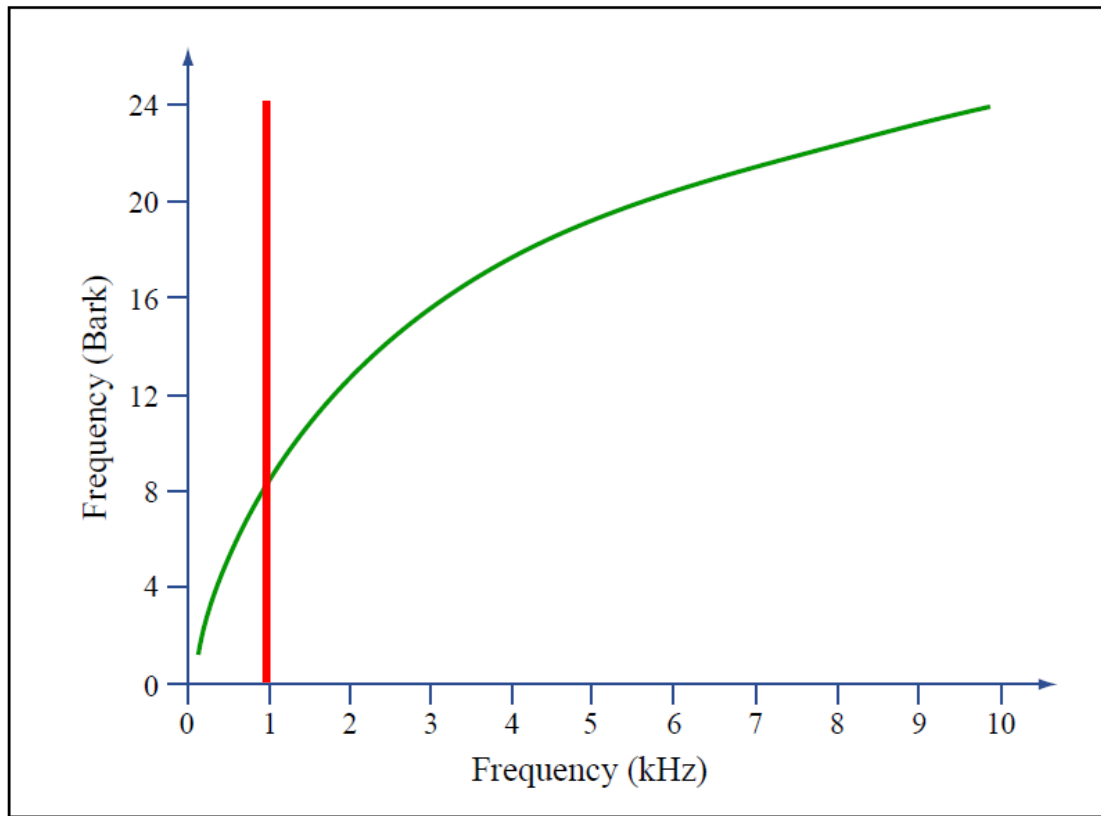
# Hangosság „a fejben”

- Kétféle hangnyomásmérés
  - „freefield” – hangszóróból a szabad térben
  - Hangnyomás mérése a fülben (fülbe rakott mikrofon)
    - ⇒ Különbég 6 dB – a fülnél „halkabb a hang”, mint a szabadban
- Ennek oka: *head related transfer function* (HRTF) – fej, vállak maszkoló hatása
- Plusz: fiziológiás zajok maszkoló hatása



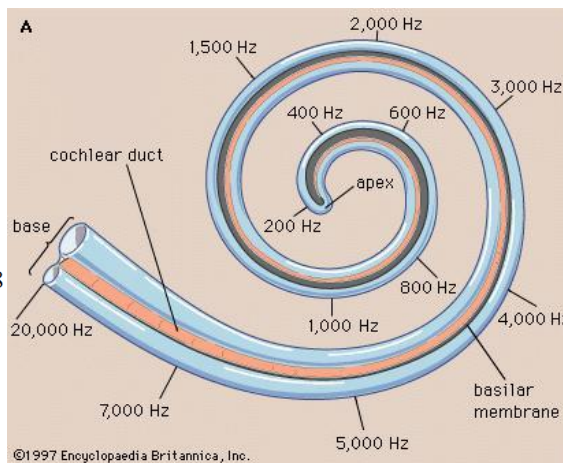
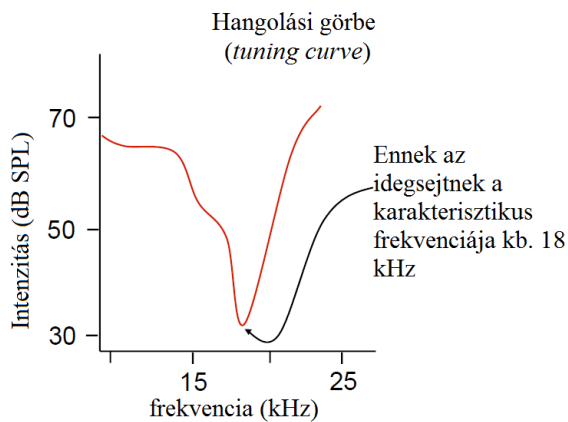
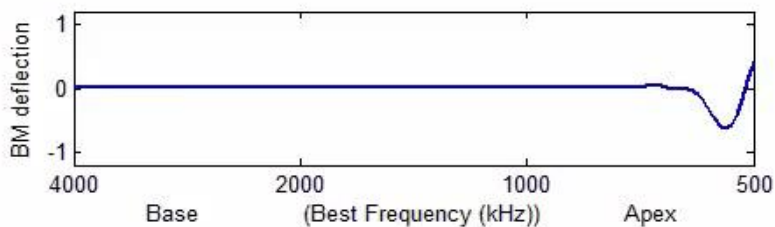
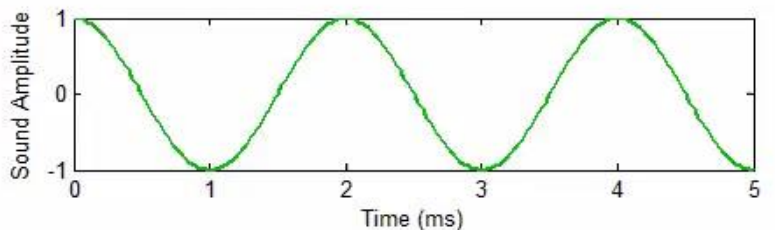
# A hangmagasság-észlelés sem lineáris

## Hangmagasságérzet és frekvencia



- 20–1000 Hz-ig nagyjából lineáris
- Felette nagyjából logaritmikus
- MIÉRT?

# Az alaphártya frekvenciaérzékenysége



- Különböző frekvenciákra különböző helyeken reagál.
- A belső szőrsejtek frekvencia-érzékenyek.
- A különböző frekvenciasávokra különböző méretű részek érzékenyek az alaphártyán → **magasabb frekvenciákon nem olyan jó a felbontás.**



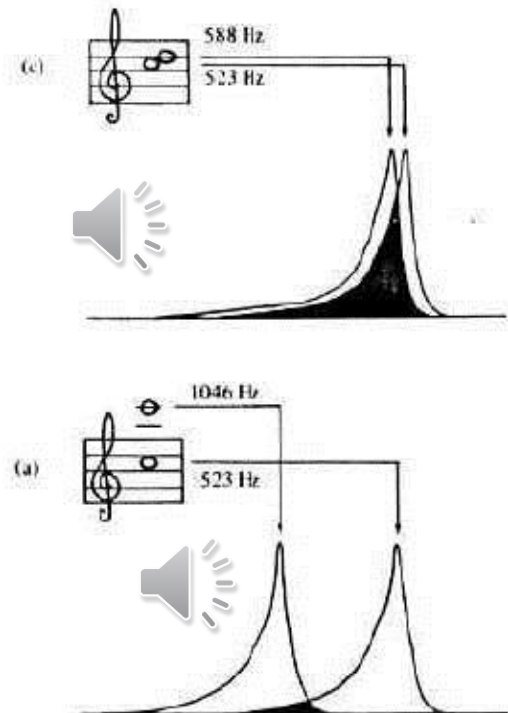
# A frekvencia (fizikai) és a hangmagasság (érzeti) összefüggései 1: **kritikus sávok és Bark skála**

- **Kritikus sáv szélesség:** az alaphártyán: kb 1,3 mm → ami egy adott frekvenciájú szinuszra rezgésbe jön.
- **Kritikus frekvenciasáv:** auditoros sávszűrő → ha két frekvencia közelebb van egymáshoz, mint a kritikus sáv szélessége, nem tudjuk két hangként azonosítani őket
- A hangmagasság fizikai mértékegysége a Hz **lineáris**, míg az érzeti mértékegységek, pl. a Bark **nemlineárisak**.

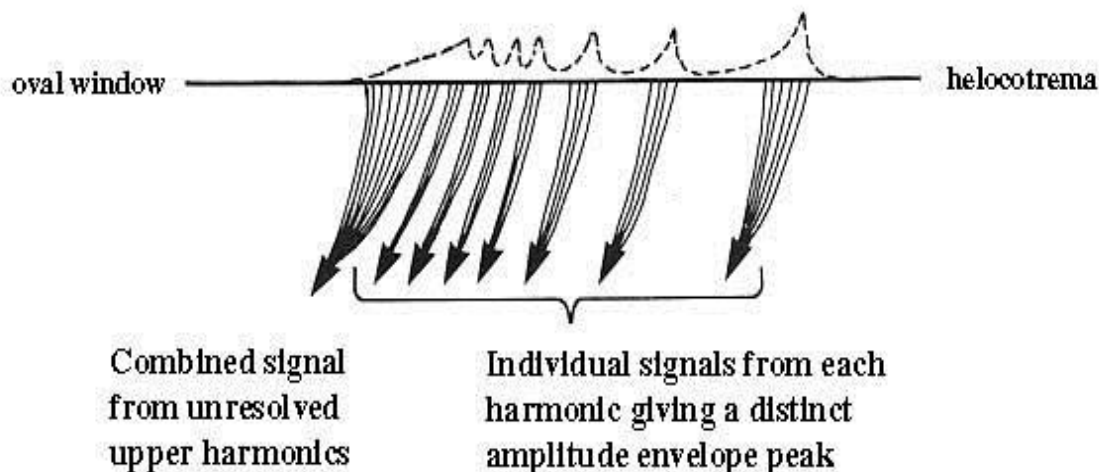
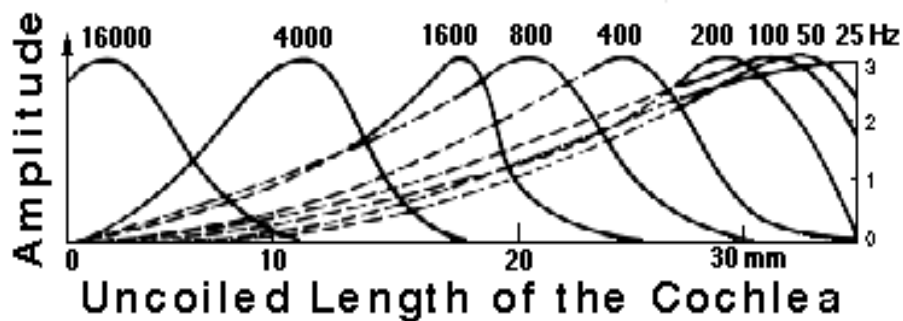
# A frekvencia (fizikai) és a hangmagasság (érzeti) összefüggései 1: kritikus sávok és Bark skála

## Kritikus frekvenciasáv:

- ha két frekvencia közelebb van egymáshoz, mint a kritikus sáv szélessége, nem tudjuk két hangként azonosítani őket → **integráció** → **disszonancia**
  - 10-20 Hz (523 + 533 Hz): *beating*,
  - > 20 Hz, de még a sáv szélességén belül (588 Hz + 523 Hz): *roughness*
- ~: az a frekvenciakülönbség, amire a *beating* és a *roughness* is eltűnik, és a két, egyszerre szóló szinuszhangot két külön hangként (vagy egy sorozatba szerveződve – felharmonikusok!) halljuk → **konzonancia**



# Kritikus sávok



- A sáv szélességek, azaz a szűrők sáv szélességei az alaphártya felbontása miatt változnak
- nagyobb rész érzékeny a mély hangokra, ezért a fülünk a mélyebb frekvenciákon „jobb felbontású”.
- → **Frekvenciafüggő a frekvenciafelbontás érzékenysége.**

# A hallás kritikus sávjait a bark skála rögzíti

**Kritikus sáv:** az a frekvenciakülönbség, amire a *beating* és a *roughness* is eltűnik, és a két, egyszerre szóló szinuszhangot két külön hangként halljuk.

TABLE I.

Number	Center frequencies Hz	Cut-off frequencies Hz	Bandwidth Hz
1	50	20	80
2	150	100	100
3	250	300	100
4	350	400	100
5	450	510	110
6	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22	8500	9500	1800
23	10 500	12 000	2500
24	13 500	15 500	3500

Hz → Bark konverzió (egyik) képlete

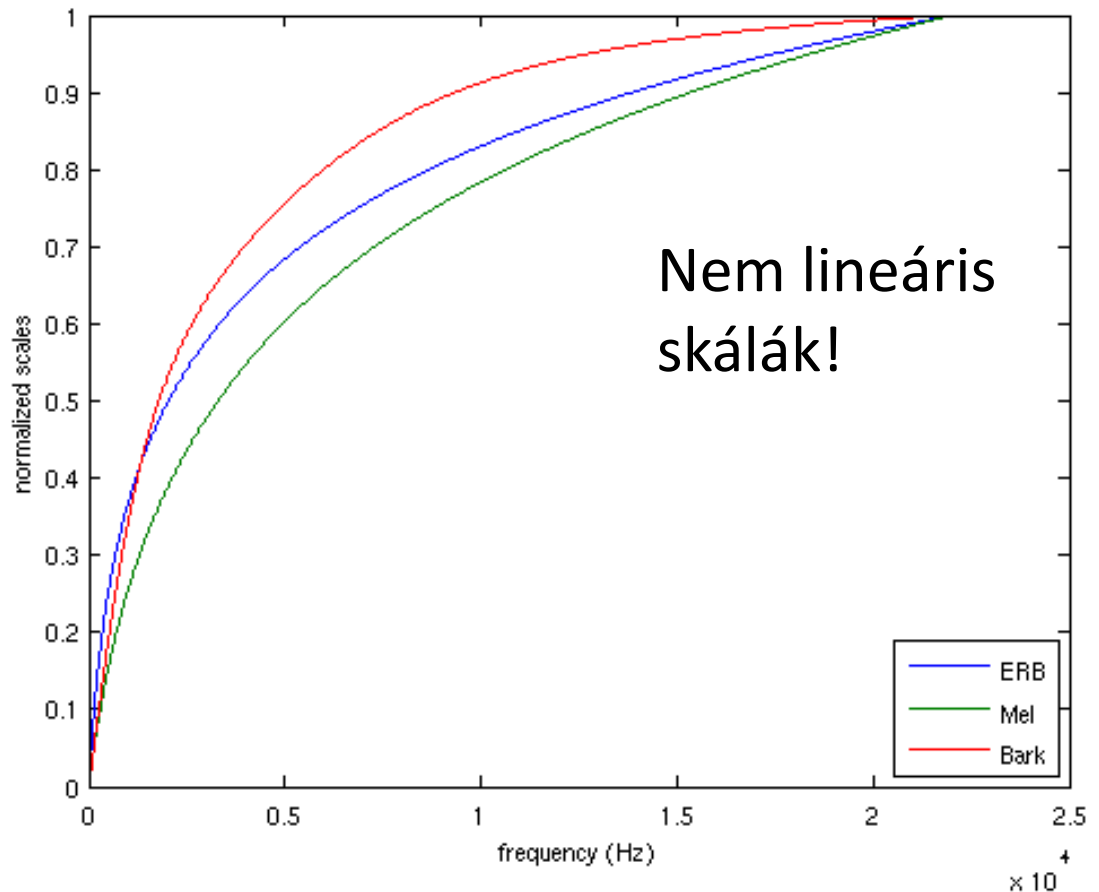
$$\text{Bark} = 13 \arctan(0,00076f) + 3,5 \arctan((f/7500)^2)$$

1 Bark = 1. sáv

# A frekvencia (fizikai) és a hangmagasság (érzeti) összefüggései 2: mel skála

- **Kísérletek (tisztá hangokkal)**

- A teszthang beállítása a referenciához képest fele olyan magasságúra vagy kétszer olyan magasra.
- 500 Hz alatt ~ a Hz skálához hasonló, fölötte inkább logaritmikus a viszony.



Spektrum → hangszín (komplex hangok)

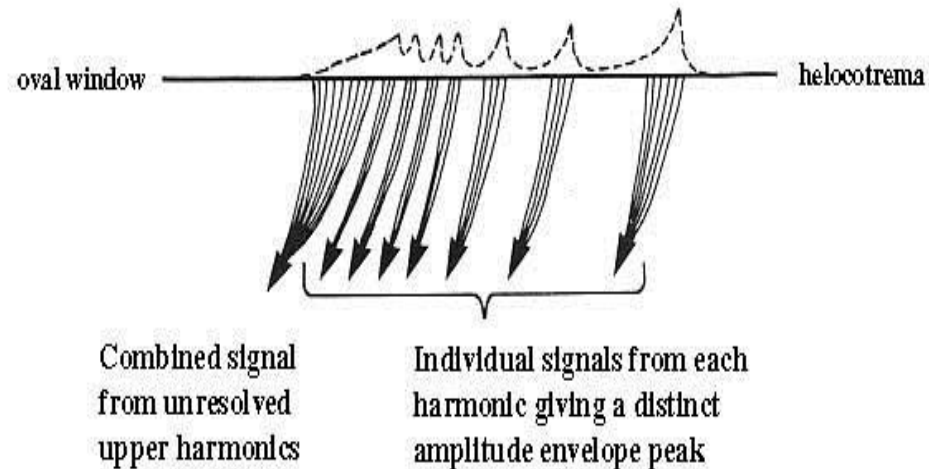
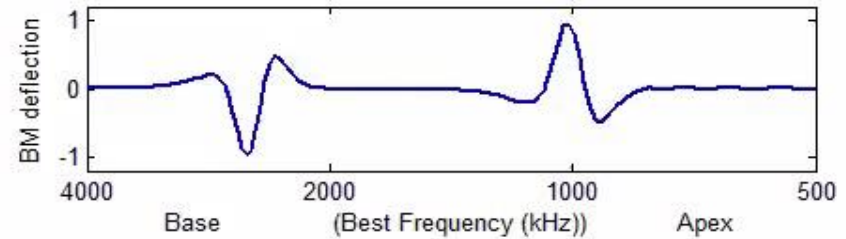
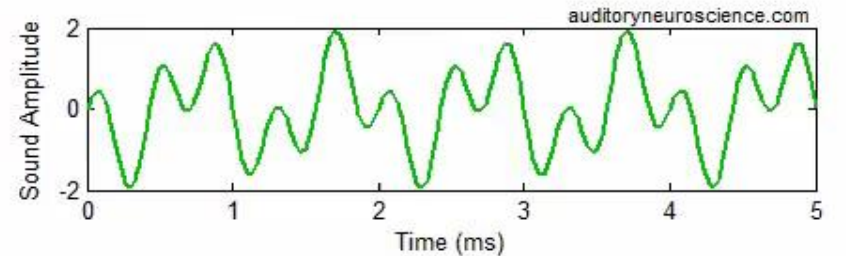
- az egyes hangoknak azon tulajdonsága, mely alapján a hallgató képes két **ugyanolyan hangerejű és ugyanolyan alapfrekvenciájú** hangot **különbözőkként** felismerni (ANSI 1961)
- A magyar terminológiában néha megkülönböztetnek **hangszínt** és **hangszínezetet** – mik ezek?

# Spektrum → hangszín (komplex hangok)

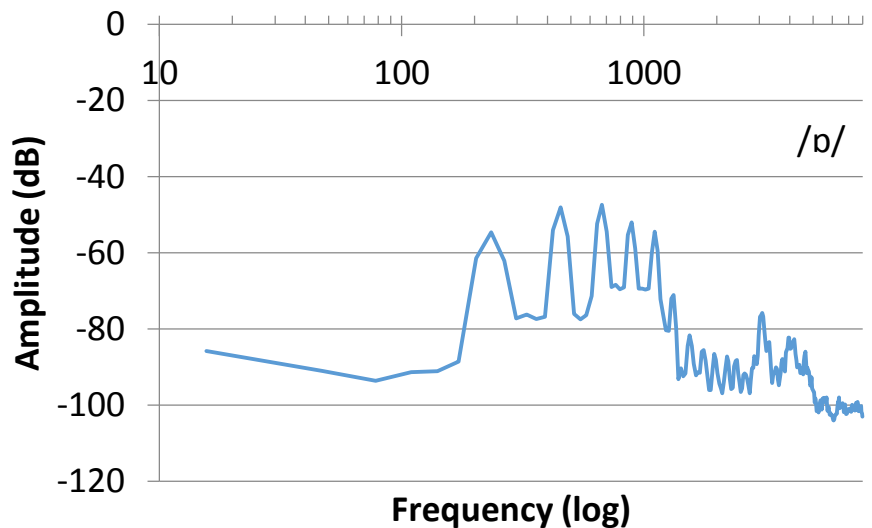
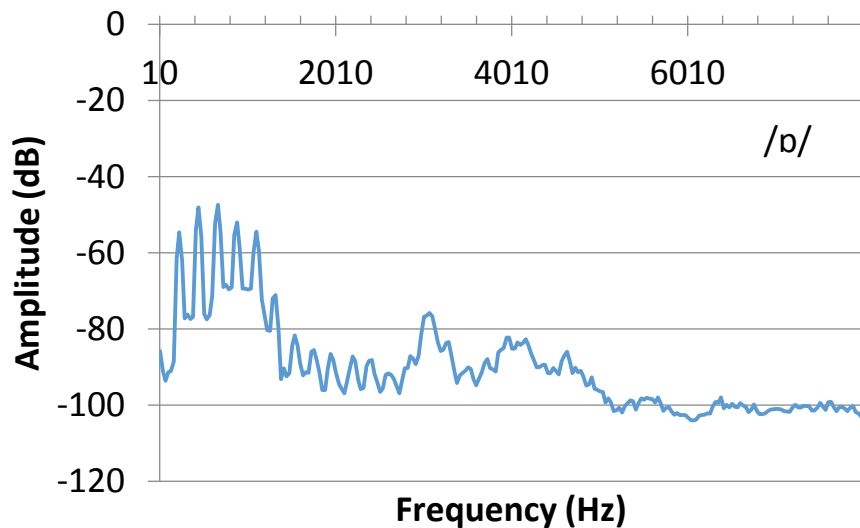
Alaphártya: **kritikus sávok**

Hallás: **kritikus frekvenciasávok (Bark-skála).**

- A fül is **dekomponálja a hangot** mint a Fourier-trafo.
- **Fizikai** spektrum: egyenlő sáv szélességű frekvenciasávok ↔
- **Auditoros** spektrum: a hallás (a fül felépítése miatt) különböző sáv szélességű frekvenciasávok → **cochleogram**



# Az objektív spektrum és az észlelt (a frekvencia mentén logaritmikus) spektrum eltérései



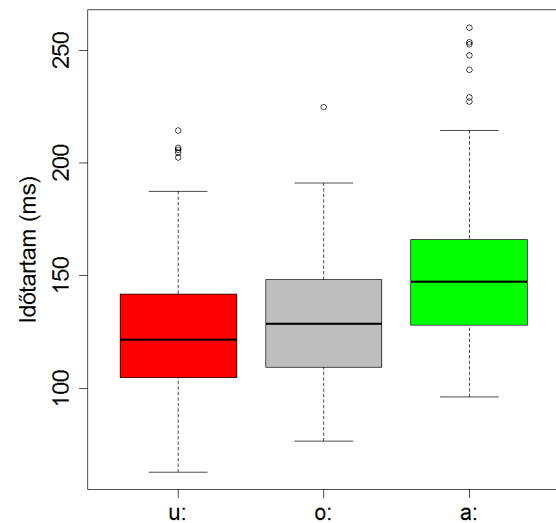
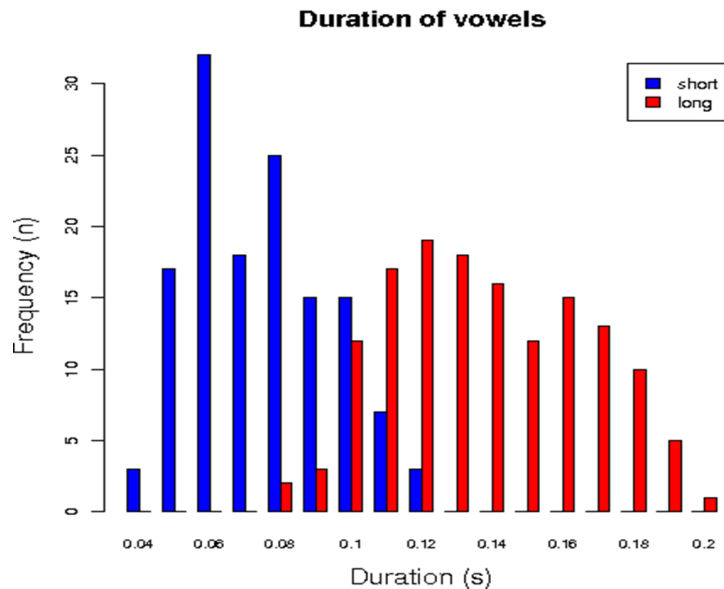
Az /p/ egy megvalósulásának spektruma női beszédben  
lineáris és  
skálák alkalmazásával

nemlineáris





# Időtartam (és nyelvi hosszúság)

- A hangtani irodalomban a mértékegysége többnyire a másodperc (s) vagy annak ezred része, az ezredmásodperc (ms).
- Észlelése szintén frekvenciafüggő: különböző frekvenciákon különböző hosszúságú szünet szükséges ahhoz, hogy észleljük a szünetet (jelkimaradást).

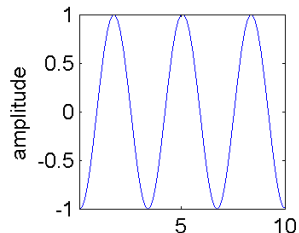
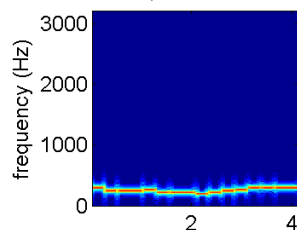


# Komplex hangok alaphangmagassága

- Egy 300, 600, 900 és 1200 Hz-ből álló komplex hangot 300 Hz alapfrekvenciájúnak hallunk. 
- Milyenek hallunk egy 600, 900 és 1200 Hz-ből álló hangot?
  - Szintén 300 Hz alapfrekvenciájúnak- mert az a legnagyobb közös osztó → a **hiányzó alaphang**. 
- Mit hallunk, ha a bal fülbe egy 1600, a jobba egy 1700 Hz frekvenciájú tiszta hangot adunk?
  - 100 Hz alapfrekvenciát → **integráció!**
- **Még akkor is halljuk az alaphangot, ha az valójában nem szólal meg (azaz a frekvenciáján nincs energia a spektrumban) → a „hiányzó alaphang” problémája.**

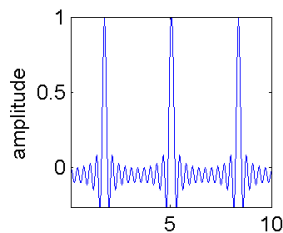
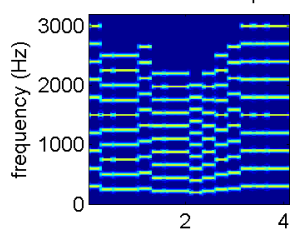
Tiszta hangok:

pure tone



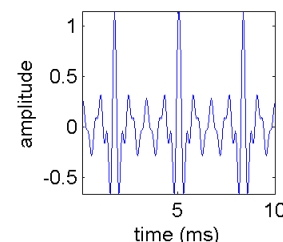
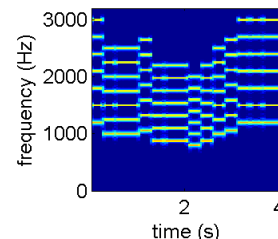
1-10 felharmonikus:

10 harmonic complex



4-10 felharmonikus:

harmonics 4 to 10



# A hiányzó alaphang

Mindennapi kihasználása:

- Telefon (férfi  $f_0$ : 100–160 Hz, női: 160–280 Hz, telefon átvitele: 300–30000 Hz)
- 55 Hz-es orgonasíp nincs, csak egy 110 Hz-es és egy 165 Hz-es



Felmerülő kérdések:

- A hallott  $f_0$  nem stimulálja a fület, mégis halljuk → akkor mégsem a fülben detektáljuk az alaphangot (és a frekvenciaszerkezetet általában)?
- Az integráció mégsem a fülben történik? (bal fülbe + jobb fülbe adott hangok is integrálódnak) → Akkor nem áll meg az elmélet, miszerint az alaphártya dolgozza fel/dekomponálja a hangokat?

# A koktélparti jelenség

- Egy zajos teremben képesek vagyunk kiemelni annak a beszédét, akivel épp társalgunk.
- Miért?
- **Szelektív hallás:** az a perceptuális, auditív folyamat, amely alapján kiválasztjuk, mely ingereket ismerjük fel, és melyeket nem.
- Hogyan működik?
- **Hanglokalizáció: a hangforrás térbeli elhelyezésének képessége.**
  - Mindkét fül kell hozzá → az **irányok feldolgozása** miatt.
  - **Binaurális felfedés:** egy zaj csak akkor nyom el egy hangot, ha ugyanolyan hangforrásúnak azonosítjuk (pl. mindkettő ugyanabba a fülbe érkezik).
  - Miután felismerünk egy hangforrást, képesek vagyunk azt kivonni a zavaró (másik) hangból.
- A hanglokalizációs képesség további felhasználása: **de-reverberáció** – az auditoros rendszer képes figyelmen kívül hagyni a visszaverődő hangokat (←→ mikrofon).
- Miért?
- Mert a visszaverődő hangok **máshonnan jönnek.**



# Hallási illúziók

- Tritone paradox:

Lefelé vagy felfelé lépegetünk? (4 inger)



- Shepard tone illusion:

