

# Beszédinformációs rendszerek

Alapvető beszédakusztika I.

# Beszédinformációs rendszerek - Alapvető beszédakusztika I.

- Kiss Gábor, Tulics Miklós Gábor, Tündik Máté Ákos
- [kiss.gabor,tulics,tundik}@tmit.bme.hu](mailto:{kiss.gabor,tulics,tundik}@tmit.bme.hu)
- I.B.156, I.B157, I.B.155
- Miért jó ez a gyakorlat?

# Hallás

- Mivel hallunk?
- Az alább felsorolt fogalmak közül melyek játszanak alapvető szerepet a hallás folyamatában?

ovális ablak

kalapács

szőrsejtek

nyereg

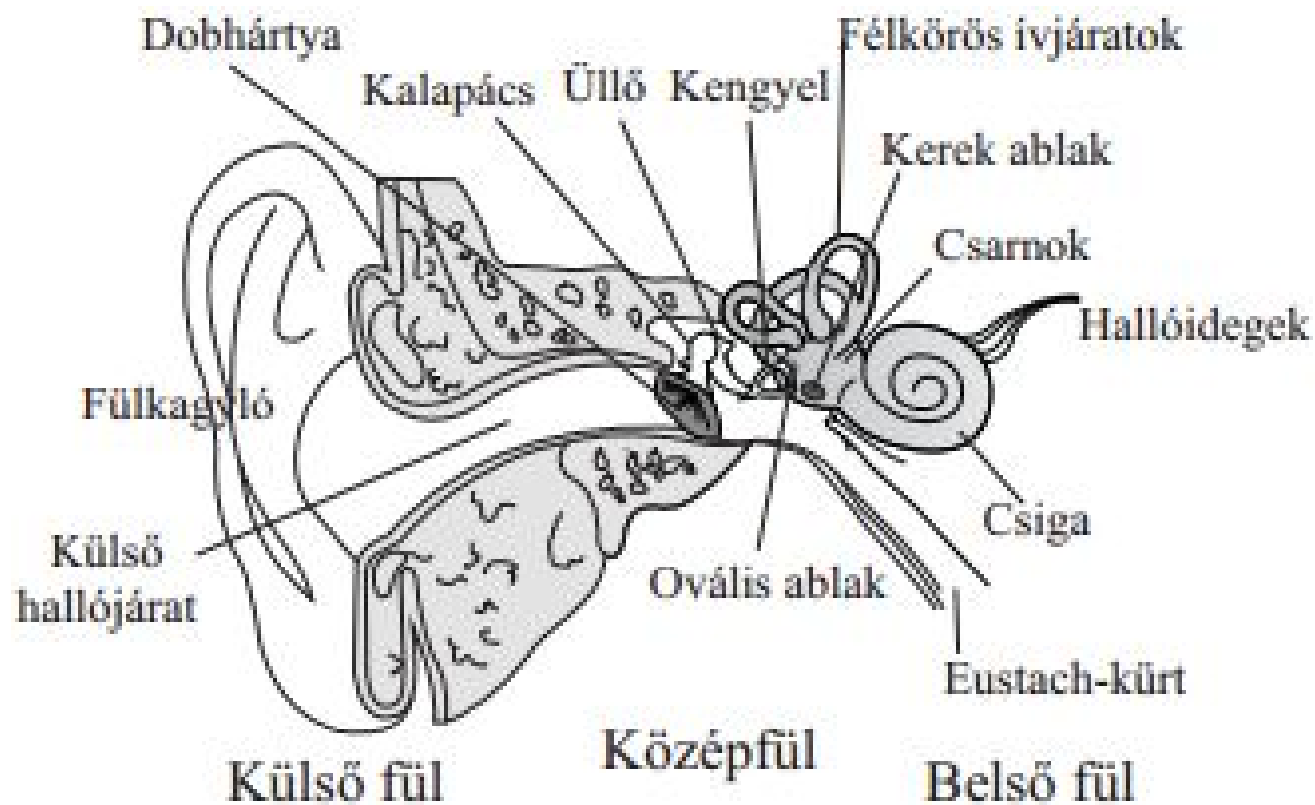
kengyel

patkó

# Hallás

- Mi a vadászkürt, a fagott, a fülkagyló és az Eustach-kürt szerepe a természetes beszédkommunikációban?
- Hogyan járulnak hozzá az előbbi elemek egy zenész és egy bűvár beszédkommunikációjának megmaradásához ill. megromlásához?
- Mi a sarló, kalapács, üllő, sarkantyú és kengyel szerepe a természetes beszédkommunikációban?
- Hogyan járulnak hozzá az előbbi elemek egy kovácsmester beszédkommunikációjának megmaradásához ill. megromlásához?

# Hallás



# Hallás

- A fül szerkezetével tisztában kell lenni a tárgy elsajátításához. Ez például „A Magyar Beszéd” 28-31 oldalakon nagyon szépen le van írva.
- Már csak az egész zsenialitása miatt érdemes tisztában lenni vele.
- Illetve a fül sérülékeny műszer, óvjuk, ne tegyük ki felesleges károsodásnak.
  - [ovdafuled.hu](http://ovdafuled.hu)
- Mit hallunk? Mekkora tartományban?

# decibel skála

- Mi az hogy decibel skála? Vajon miért használjuk?
- „A **decibel (dB)** két mennyiség arányának logaritmikus mértéke, amit széles körben használnak az akusztika, a fizika és az elektronika területén.”
- „A decibel mértékegysége és dimenziója egy ( [1] ), hasonlóan a százalékhoz.”
- „Alkalmazásának több előnye van: szélsőségesen nagy és kicsi értékek összehasonlítását teszi lehetővé, egyszerű összeadásra és kivonásra egyszerűsíti le az arányokkal való műveleteket, valamint a decibel logaritmikus skálája megfelel az emberi halló- és látószerv működésének.”
- (akusztikai decibel)
  - $I[\text{dB}] = 10 * \lg\left(\frac{I}{I_0}\right), I_0 = 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2}\right]$  vagy
  - $L[\text{dB}] = 20 * \lg\left(\frac{p}{p_0}\right), P_0 = 2*10^{-5} \left[\frac{N}{m^2}\right] = [\text{Pa}]$
- Alap az 1 Bel

# Logaritmus, mint függvény

- Értelmezési tartomány: pozitív számok  
Értékkészlete: valós számok
- (Az alap az pozitív 1-től különböző szám lehet)
- $\log_a xy = \log_a x + \log_a y$
- $\log_a x^k = k * \log_a x$
- $\lg(x) = \log_{10} x$
- Hányszor nagyobb a  $\lg(10000000000)$  a  $\lg(10)$ -nél?



# Hang intenzitás és amplitúdó dB-be számítása

- Egy hangszóróból 60 dB intenzitású hang szól. Megkettőzzük a hangforrást. Hány dB lesz a két hangforrás együttes intenzitása?
- Megoldás:
  - Intenzitás (10),  $60\text{dB} = 10 * \lg(y)\text{dB} \Rightarrow y = 10^6$
  - $x = 10 * \lg(2 * 10^6) = 10 * (\lg(2) + \lg(10^6)) \Rightarrow \text{kb } 63 \text{ dB}$
- Egy beszédhullám amplitúdóját 2x-es szorzóval duplájára növeljük. Ez dB-ben mennyi növekedést jelent?
- Megoldás:
  - Hangnyomás-amplitúdó (20)  $\Rightarrow x = 20 * \lg(2 * y) \Rightarrow 20 * \lg(2)$  plusz az eredeti, ami kb. 6 dB növekedés

# Hang intenzitás és amplitúdó dB-be számítása

- Adja meg a megfelelő mértékegységben annak a 80 Hz-es szinuszos hangnak a hangnyomásszintjét akusztikai dB-ben, amelynek effektív hangnyomása  $0.02 \text{ N/m}^2$ !
- Megoldás:
  - $\text{N/m}^2$  az ua. mint Pa, hangnyomás-amplitúdó vagyis ( $20 \cdot \lg \dots$ )
  - $x \text{ dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$ ,  $p = 0.02 \text{ N/m}^2 \Rightarrow p = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$   $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
  - $60 \text{ dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-5}}\right)$

# Hang intenzitás és amplitúdó dB-be számítása

- „A Magyar Beszéd” 40-44 oldalakon nagyon szépen le van írva, a hang fizikai alapjai és a hang intenzitás számítása dB skálában.
- Egy mérnöknek értenie kell a dB skálához, elektronikában is fontos szerepe van.

# Pszichofizikai tényezők

- Melyik szinuszjelnek a legnagyobb az intenzitása?

1kHz / 50 dB

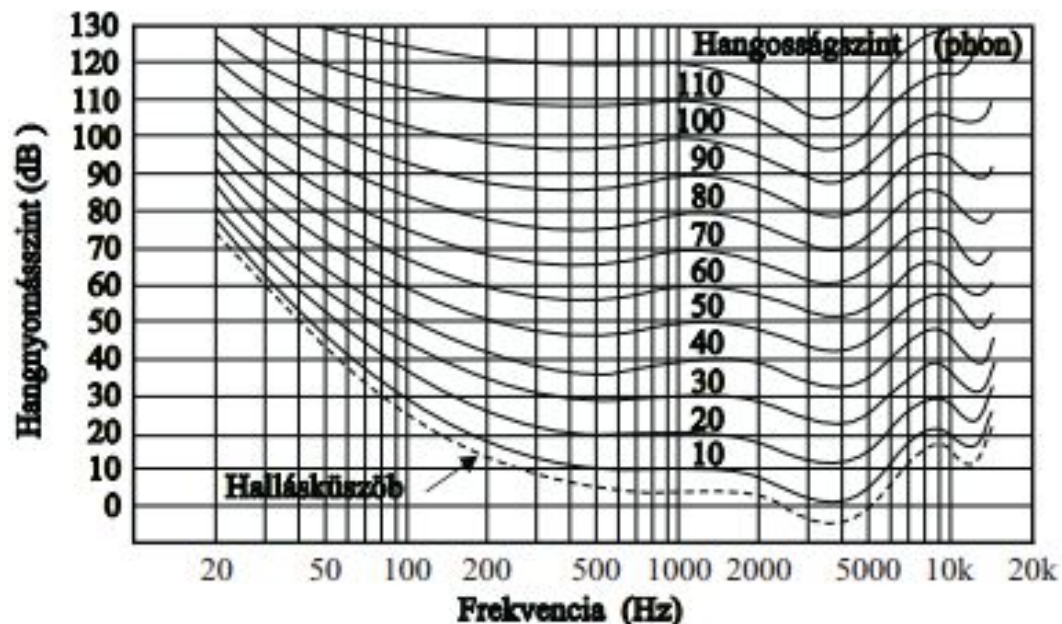
25Hz / 49phon

22kHz / 50 dB

2kHz / 51phon

500Hz / 10dB

5kHz / 50 phon



- Phon görbe, az egyenlő hangosság érzetű görbe eltérő frekvenciájú szinuszos hangok esetén; x phon olyan hangos az átlagos embernek, mint x dB 1 kHz-en.
- Megoldás:
  - Intenzitást kérdezik, vagyis a dB számít. Mindent át kell váltani dB-be.
  - Vagyis 50 dB = 50 dB > 10 dB; 2 kHz 51 phon = kb. 50 dB; 5 kHz 50 phon = kb. 44 dB
  - 25 Hz 49 phon az kb. 90 dB!!!
  - Melyik kelti a legnagyobb hangosság érzetet?

# Pszichofizikai tényezők

**120 dB-s hangnyomásszintet mértünk. Mi lehetett a hangforrás?**

- Benzinmotoros fűnyíró \{1,5 m-ról\}
- Sugárhajtású repülő hajtóműve \{25 m-ról\}
- Suttogó beszéd \{1 m-ról\}
- Normál beszéd \{1 m-ról\}
- Kiabálás \{15 m-ról\}
- Sírás \{1 m-ról\}

**10 dB-s hangnyomásszintet mértünk. Mi lehetett a hangforrás?**

- Benzines fűnyíró \{1,5 m-ról\}
- Mobiltelefon csörgés \{2 m-ról\}
- Sírás \{1 m-ról\}
- Normál beszéd \{1 m-ról\}
- Kiabálás \{5 m-ról\}
- Stúdió zöreje \{2 m-ról\}

# Pszichofizikai tényezők

W/m <sup>2</sup>		dB
10 <sup>-12</sup>	<b>hallásküszöb</b>	0
10 <sup>-11</sup>	halk neszek, levélzörgés	10
10 <sup>-10</sup>	óraketyegés (közvetlen közelről)	20
10 <sup>-9</sup>	csöndes kert, suttogás	30
10 <sup>-8</sup>	halk beszéd 1 m-ről	40
10 <sup>-7</sup>	csöndes iroda	50
10 <sup>-6</sup>	átlagos beszéd 1 m-ről	60
10 <sup>-5</sup>	városi forgalom zaja	70
10 <sup>-4</sup>	kiabálás 1 m-ről	80
10 <sup>-3</sup>	fúrógép 1,5 m-ről	90
10 <sup>-2</sup>	nagyzenekari forte	100
10 <sup>-1</sup>	kierősített rockegyüttes	110
1	légkalapács 1 m-ről, fájdalomküszöb	120
10	sugarhajtású repülő 40 m-ről	130
100	rakétahajtómű közelről	140

# Pszichofizikai tényezők

- „A Magyar Beszéd” 56-66 oldalakon nagyon szépen le vannak írva a hallás pszichofizikai tényezőinek alapjai.
- Nagyon érdekes téma.
- Fontosak ezek a tényezők, például az mp3 kódolás erősen épít rá.

# Összetettebb feladatok

- Egyszerre szól egyenként 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 és 5000 Hz alapfrekvenciájú és 60dB intenzitású hang. Mekkora az ezen komponensekből álló komplex hangnak az össz-intenzitású szintje?
- Megoldás:
  - 1 hangszórónak az intenzitás szintje 60 dB
  - 10 hangszórónak NEM  $10 \cdot 60$  dB!!! (120 dB a fájdalomküszöb)
  - 10-szeres szorzó az a logaritmus szabályai miatt kiemelhető összegként, illetve intenzitásról van szó, tehát
  - Össz-intenzitású szint =  $60 \text{ dB} + 10 \cdot \lg(10) \text{ dB} = 70 \text{ dB}$



# Összetettebb feladatok

- Hogyan definiáljuk a hallásküszöböt az akusztikai dB és a phon fogalmának felhasználásával? Mennyi az emberi hallás, az emberi beszéd és a komplex zöngés beszédhang jellemző frekvenciatartománya?
- Megoldás:
  - Hallás küszöb az 0 dB 1 kHz-en (átlagos hallású ember esetén) => 0 phon görbe felel meg neki
  - Emberi hallás 20Hz-20kHz
  - Emberi beszéd 60Hz-10kHz (8kHz)
  - Zöngés hang 60Hz-4kHz

# Kiegészítő feladat

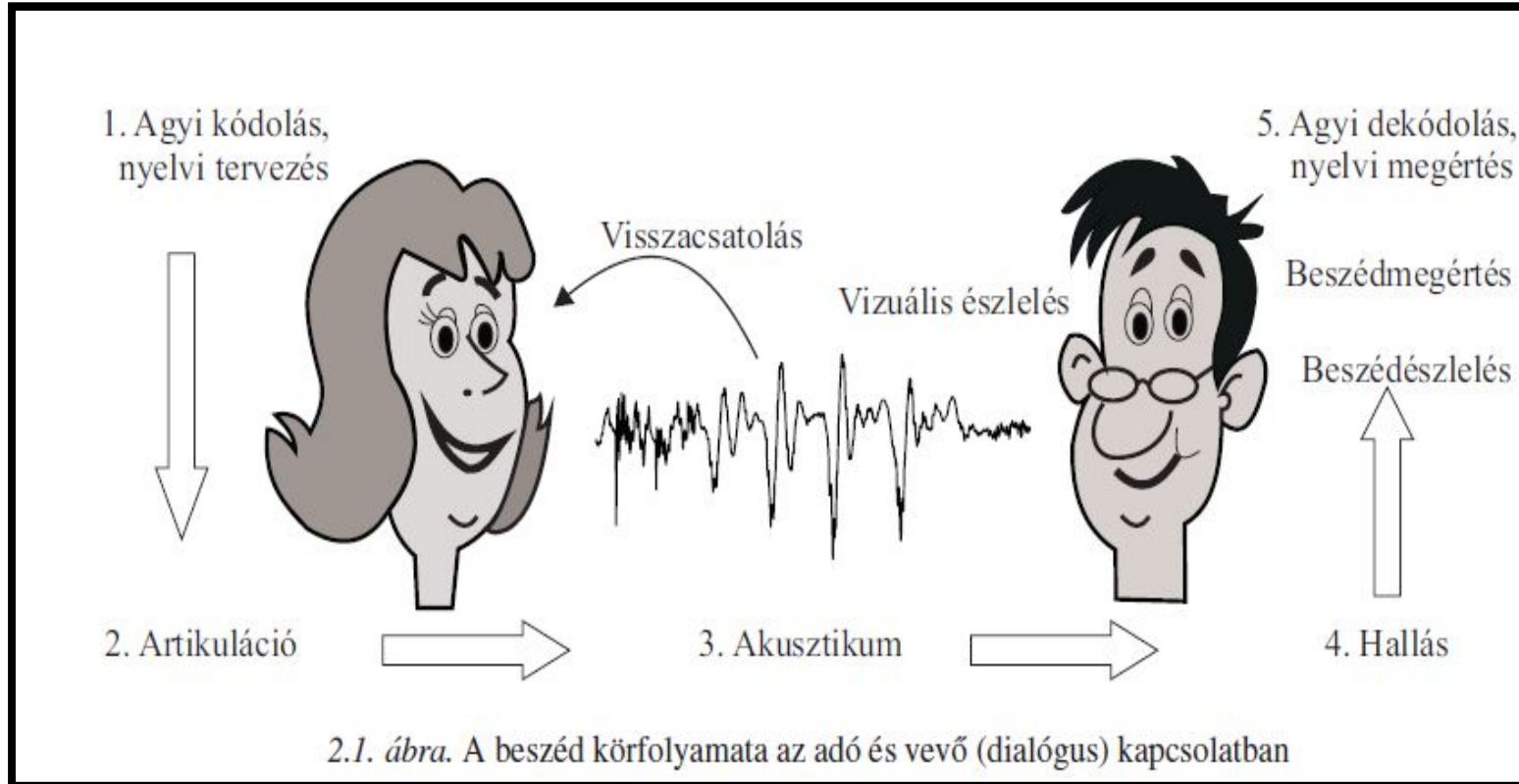
- Adott egy 1000 Hz-es szinusz hang, aminek a hangnyomásszintje akusztikai dB-ben 80 dB. Hányszorosára kell változtatni az amplitúdót, ha azt szeretnénk, hogy a hangnyomásszintje akusztikai dB-ben 56 dB legyen, miközben a frekvenciáját 500 Hz-re módosítjuk?
- Megoldás:
  - Frekvencia nem számít
  - 24 dB csökkenést akarunk elérni, vagyis az amplitúdót csökkenteni kell.
  - $24 \text{ dB} = 20 \cdot \lg(x) \Rightarrow x \text{ kb. } 16$ , vagyis körülbelül 16-odára kell csökkenteni az amplitúdót.

# Függelék

Felhasznált irodalom:

- Németh Géza, Olaszy Gábor: A magyar beszéd
- Vicsi Klára: A beszéd akusztikai-fonetikai leírása
- Vicsi Klára: Beszéd- és hallásdiagnosztikai előadás (2016/2017 ősz)

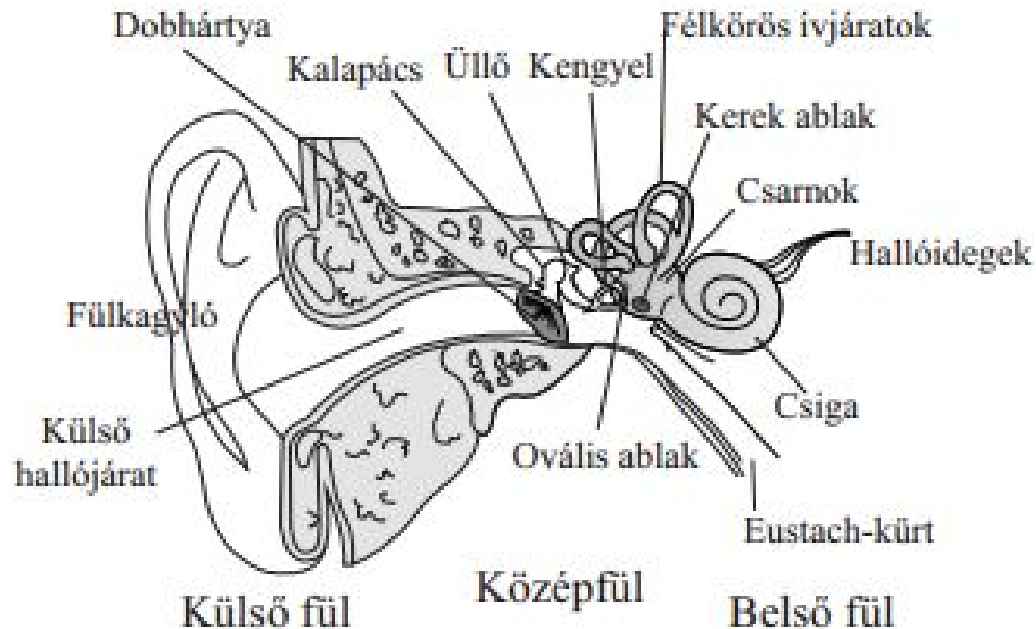
# A beszédkommunikáció körfolyamata 1.



## A beszédkommunikáció körfolyamata 2.

- A beszélő agyában megszülető nyelvi formába öntött üzenet a beszédprodukciónál során a levegő közvetítésével továbbítódik a hallgató füléig
- Itt az üzenet beszédérzékelési és feldolgozási folyamat során a hallgató agyában újraformálódik
  - embertől emberig a kommunikációban a közvetítő közeg a levegő, amelyben a nyelvi üzenet a hanghullámok formájában továbbítódik
  - Ezekhez a hanghullámokhoz adódik a környezetben keletkező zaj, ezeket a hanghullámokat torzítják el a falakról visszaverődő hullámok, például egy erősen visszhangos teremben
  - A pszicho-akusztika a beszédpercepció fonetika és a pszicholingvisztika vizsgálja, hogy mi a kapcsolat a produkcióval létrejött beszédhanghullámok akusztikai tulajdonságai és a hallgatóban keletkező beszédérzet és megértés között
  - A teljes kommunikációs folyamat megismeréséhez a beszédprodukciónál létrehozott beszéd fizikai tulajdonságaival, vagyis a beszéd akusztikai leírásával, is meg kell ismerkednünk

# A fül szerkezete



## A külső fül

- A fülkagylóból és a hallójáratból áll, amelyet a dobhártya zár le.
- A fülkagyló segít a hangok összegyűjtésében, és hozzájárul azon képességünkhöz, hogy meghatározzuk a hangforrások irányát.
- A külső hallójárat rezonátorcsőként működik, növeli a hallás érzékenységét a 2000–5000 Hz-es tartományban.

## A középfül

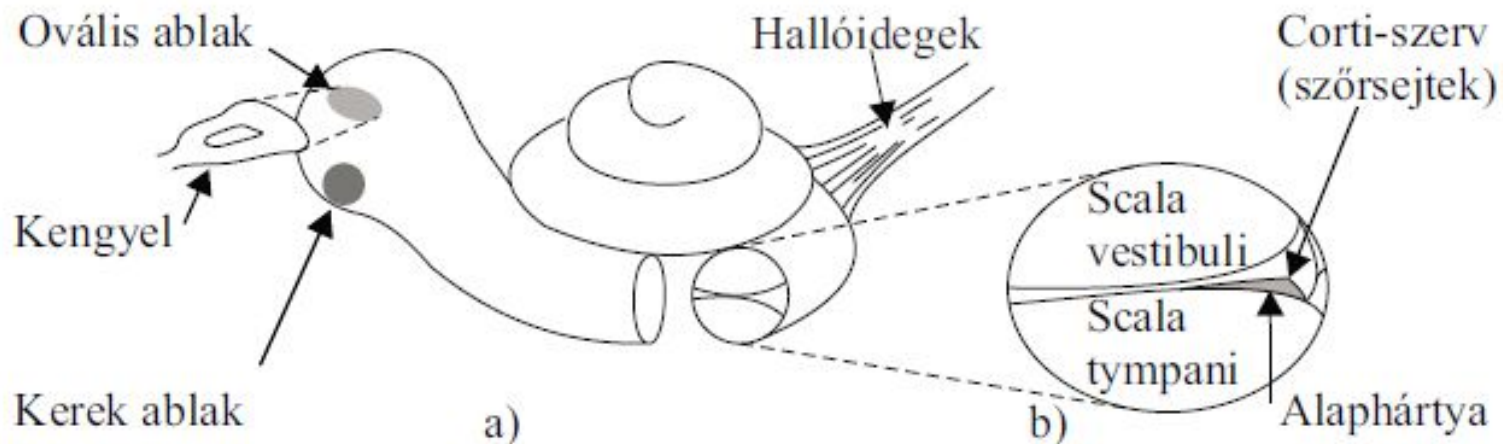
- A dobhártyából és a hallócsontokból (kalapács, üllő és kengyel) áll.
  - A dobhártyát, amely kör alakú, és sugárirányú rostokból épül fel, megfeszítve tartják a feszítőizmok. A dobhártya a bejövő hanghullámok hatására elmozdul a nyomásingadozás függvényében.
  - Ezt a mozgást a hallócsontocskák továbbítják a belső fülbe, a hártyszerű ovális ablakon keresztül.
  - A dobhártya szintjén megjelenő nyomásváltozás felerősödve érkezik az ovális ablakhoz.
  - Egyrészt a hallócsontocskák emelőrendszerként működnek, mintegy 1,5-szörös erőmegsokszorozást hoznak létre + mintegy húszszoros nyomásnövekedést okoz a dobhártya és az ovális ablak területe közötti különbség (kisebb felületre ugyanannyi erő jut, nagyobb nyomást eredményezve).
  - A csontocskák másik funkciója, hogy védjék a belső fület a nagyon erős hangoktól és a hirtelen nyomásváltozástól (robbanás, üstdob). A nagy erejű hang kétféle izomzatot aktivizál: az egyik a dobhártyát szűkíti, a másik a belső fülben elhúzza a kengyelt az ovális ablaktól → akusztikus reflex
  - Minthogy a dobhártya légmentesen lezárja a külső- és a középfül közötti részt a külvilágtól, szükség van némi nyomáskiegyenlítés biztosítására, hiszen a dobhártya csak akkor tud rendeltetésszerűen működni, ha a külső és belső fülben a nyomás ugyanakkora. A külső légnyomás megváltozásakor (például gyors magasságváltozás esetén csökken a légnyomás) a középfül nyomásviszonyait ehhez kell igazítani.
- ← Ez az Eustach-kürtön keresztül történik, amely összeköti a középfület a garatüreggel.



## Belső fül 1.

- Félkörös járatokból és a csigából áll.
- A félkörös járatok nagyon kevésbé, vagy egyáltalán nem működnek közre a hallásban, a test vízszintes-függőleges detektorai, amelyekre az egyensúlyozáskor van szükség.
- A hang feldolgozásában a csigának van fontos szerepe, itt a mechanikus rezgések megfelelően kódolt idegi impulzusokká alakulnak át.
- A csiga kiterített hossza 3–4 cm. A csiga jelbemenete az ovális ablak hártyája.
- A kengyel erre a hártyára adja át a rezgéseket. A csiga folyadékkal van tele.
- Az ovális ablak hártyájának rezgései továbbterjednek a folyadékban.
- Mivel a folyadékok összenyomhatatlanok, gondoskodni kell arról, hogy a nyomáshullám terjedhessen a csigában.
- Erre szolgál a kerek ablak rugalmas hártyája.
- Amikor az ovális ablak hártyája befelé mozdul el, a kerek ablaké kifelé.

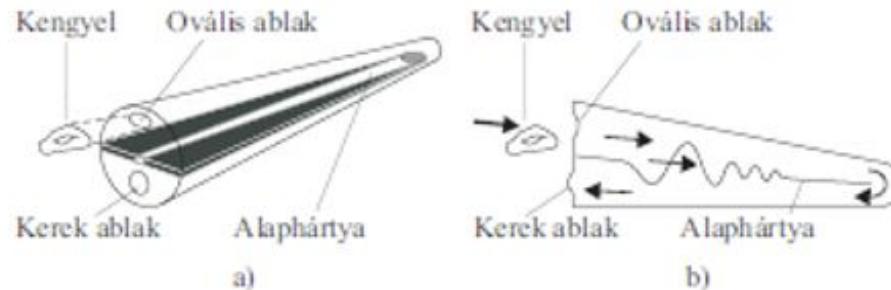
## Belső fül 2.



3.7. ábra. A csiga és a csigából kivágott rész sematikus diagramja

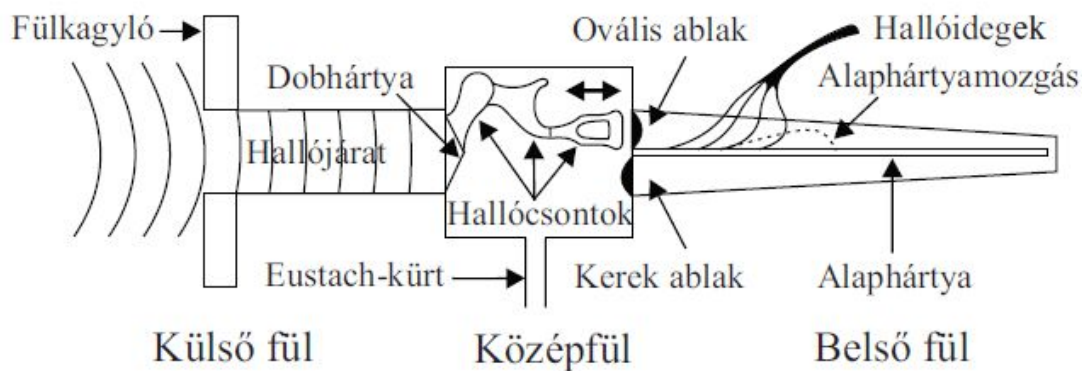
- Az alaphártya a csigát két részre osztja; a scala vestibuli és a scala tympani járatokra (3.7. ábra).
- Az alaphártya teljes hosszában nyugszik a finom és komplex Corti-szerv. Ez a „hallás székhelye”, amely több sor apró szőrsejtből áll.

## Belső fül 3.



- Hogyan rezeg az alaphártya? → a csiga kiterített és egyszerűsített változata a fenti ábrán.
- A csiga itt egy kúposan elvékonyodó hengerként jelenik meg, amelyet két részre oszt az alaphártya.
- A henger vastagabb végénél van az ovális és kerek ablak, amelyeket az alaphártya térben elválaszt. A csiga keskeny végén található egy lyuk, ami összeköti a felső és alsó üreget, és szabad áramlást biztosít a folyadéknak a kerek ablak felé.
- Amikor a kengyel az ovális ablak felé mozdul el, hidraulikus nyomáshullámok kerülnek továbbításra a scala vestibuli kamrában, hullámokat indukálva az alaphártyában.
- A magas frekvenciájú hangok az alaphártya legnagyobb amplitúdójú kimozdulását az ovális ablak közelében okozzák, ahol az alaphártya a legkeskenyebb.
- Az alacsony frekvenciák a legnagyobb amplitúdójú hullámokat az alaphártya másik végénél hozzák létre, ott ahol az alaphártya széles és laza.
- Így jön létre a kezdeti, még nem nagy felbontású frekvenciaanalízis a csigában.
- Amikor az alaphártya kimozdul, a Corti-szerv szőrsejtjeinek szőrscillói a hullámzás hatására elhajolnak, ezáltal idegi impulzusokat hoznak létre, amelyek az idegpályákon az agyvelőbe továbbítódnak.
- A keletkező impulzusok sűrűsége főleg az intenzitástól függ, de kevésbé annak frekvenciájától is.

A teljes hallási mechanizmus sematikus felépítését a 3.10. ábra illusztrálja.



3.10. ábra. A fül sematikus reprezentációja, amely a teljes hallási mechanizmust illusztrálja. A külső fülből érkező hanghullámok mechanikus rezgéseket okoznak a középfülben, és végül idegi impulzusokká alakulva továbbítódnak az agyba

A belső fül három lényeges működési tulajdonsága:

a) a frekvencia az alaphártyán helyfüggvénné vált

b) mechanikai energia elektroenergiát szabadít fel

d) az idegek már nem az eredeti jelnek megfelelő (analóg) formát viszik át, hanem periodikusan egymást követő rövid kisüléseket indítanak el és vezetnek föl az agyba

### Impulzusszerű kisülések un. AKCIÓS POTENCIÁL:

Intenzitás, impulzussorozatok sűrűségébe megy át. Impulzussűrűség egy ideghártyán ~ 800 Hz, nyugalmi helyzetben 1-100 Hz kb.

Hangjel időkésése a dobhártyától az agykéregig 3-5 ms.

Egy impulzusszerű kisülés: 1 ms időtartamú, néhány  $\mu\text{V}$  nagyságú (a csigából kilépve egy belső szőrsejtéből 20 idegszál indul el)

### Fölmenő idegszálak:

95% a belső szőrsejtekből indul, 5% külső szőrsejtekből gyűjti az információt

10 külső szőrsejtet fog össze egy idegszál

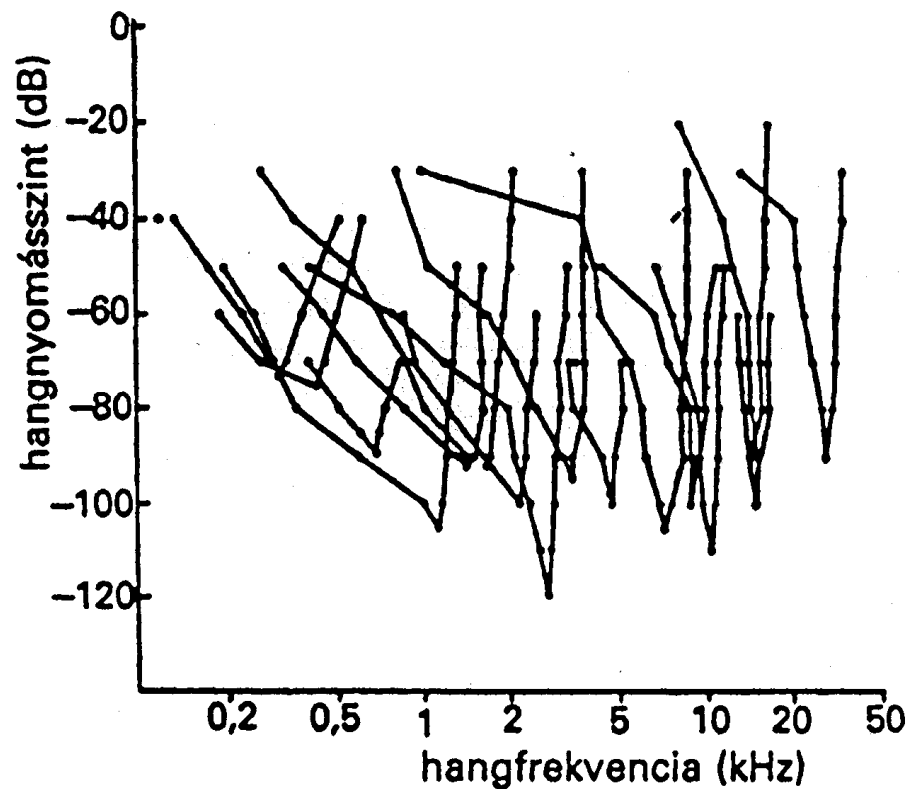
Leszálló rendszer: szabályzó utasításokat közöl az érzékelő szőrsejtnek oldalirányú gátlás alakul ki

# A hallórendszer

- Az emberi hallórendszer komplex akusztikai, mechanikai, hidrodinamikai elektromos jelátalakító, idegvezetési és agyi szerkezet.
- Nemcsak számos ingerre reagál, hanem a beszédhangot és az alaphangot (hangmagasságot, hangfekvést), sőt, a hangforrás irányát is precízen beazonosítja.
- A jelfeldolgozás a hallórendszerben két részre osztható: az egyik egység a periférikus hallórendszer (maga a fül), ahol a levegőben és a csontokban terjedő mechanikai rezgések elektromos impulzusokká alakulnak át, a másik a hallási idegrendszer az agyban.
- A hallási funkciók nagy részét a fül végzi el, ám a legutóbbi kutatások kihangsúlyozták, mennyire függ a hallás attól az adatfeldolgozástól is, amely a központi idegrendszerben történik.

Békésy halott állatokon  
kísérletezett

Dallos élő cochleában  
végezte  
méréseit.



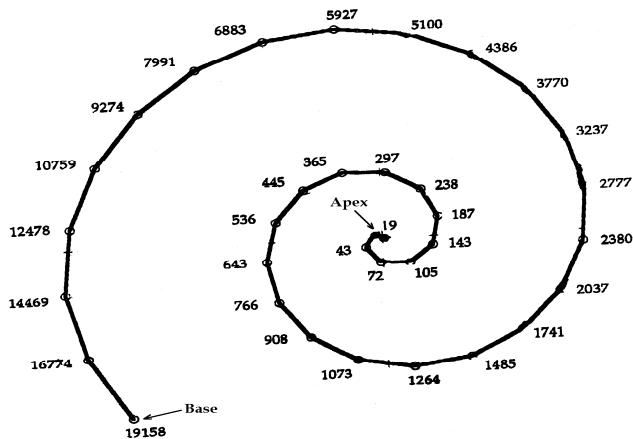
*Fölmenő idegrostokban mért  
hangolási görbék, amelyek  
éles frekvenciaszelektivitást  
mutattak.*

Baziláris membrán kitérése is jóval élesebb, mint Békésy feltételezte.

Az aktív energiaigényes vibrációerősítő tevékenység hangjelenséggel jár  
– hallócsontokon keresztül kisugárzódik – otoakusztikus emisszió.

# 1. Periférikus hallórendszer

A fül mint hallószerv akusztikus hangnyomásjelet dolgoz fel, először mechanikus rezgésmintázattá alakítva azt az alaphártyán,



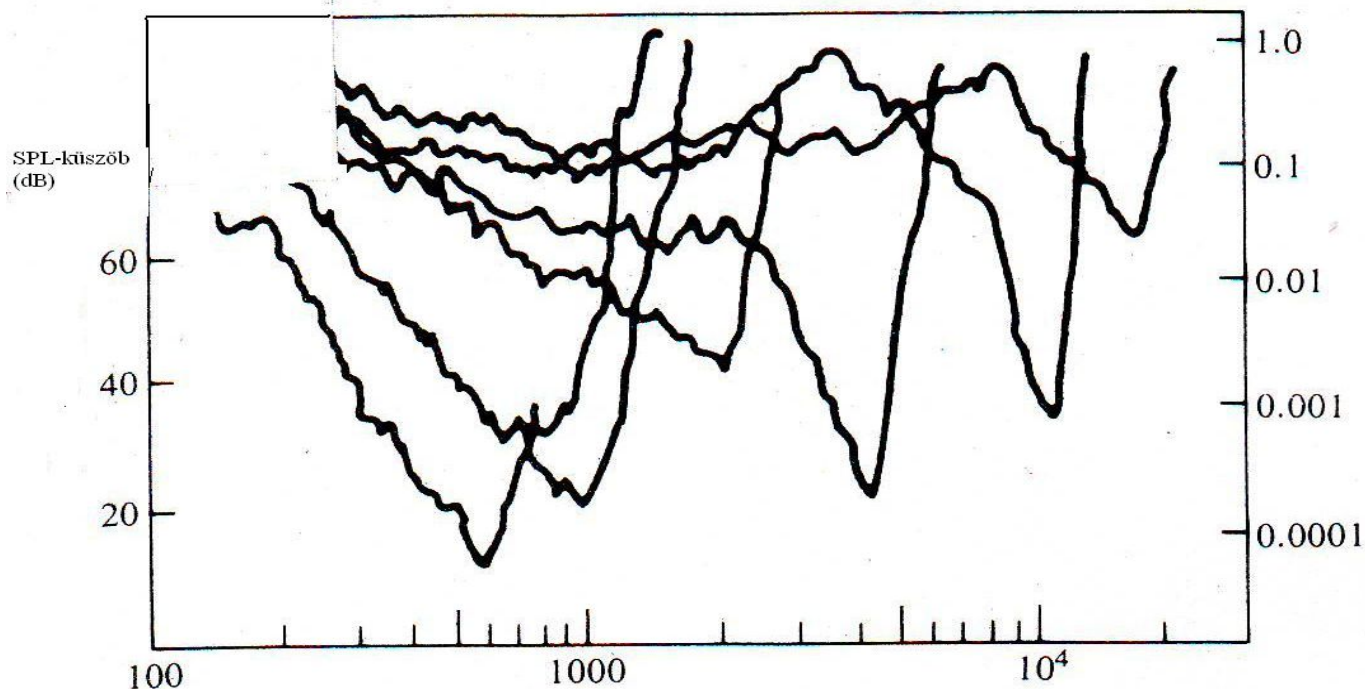
*Maximális amplitúdó helyek a csiga alaphártyája mentén az ábrán feltüntetett frekvenciaértékekkel gerjesztve Hz-ben*

azután pedig ezt a mintát, ami a szőrsejtekben keletkező impulzussorozatot reprezentál, amelyet a hallóidegek továbbítanak az agy felé.

Minden hallóidegszál egy bizonyos hangnyomás és frekvencia tartományon belül reagál.



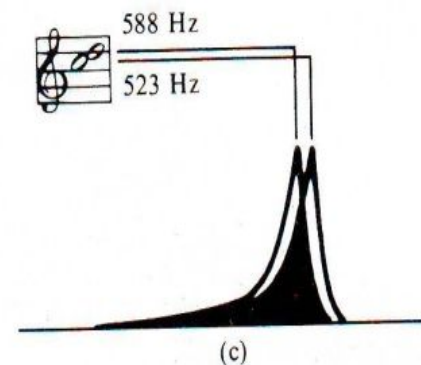
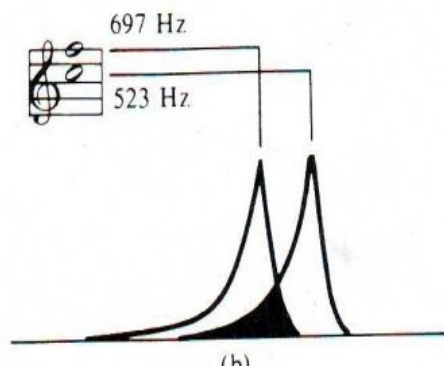
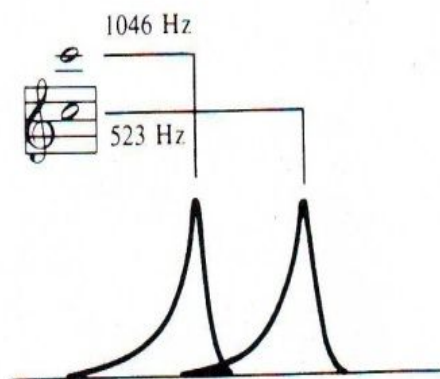
## Egy szinuszos gerjesztő hang esetében:



*Hat különböző idegszál hangolási görbéi egy macska hallószervében szemléltetik a reakcióküszöbökét, egy 90dB-es 500 Hz –es szinuszos hang gerjesztés esetén a frekvencia függvényében (Kiang és Moxon nyomán, 1974).*

Az idegi hangolási görbék élesednek, ahogy az idegpályákon az agy felé tartunk.

## Egyidőben több szinuszos gerjesztő hang esetén:



*Frekvencia válasz görbék tiszta szinuszos hangpárokhoz.*

Amint a köztük lévő intervallum csökken, reakciógörbéik növekvő átfedést mutatnak.

# Kritikus sávok

Hallásmodell

Kritikus sáv szélesség alapján:

$$\Delta f_{\text{crit}} = 25 + 75[1 + 1,4 f_0^2]^{0,49}$$

$f_0$  = szűrő középfrekvencia,  $\Delta f_{\text{crit}}$  = sáv szélesség

$$z = 13 \cdot \arctan(0,76 f) + 3,5 \arctan(f / 7,5)^2$$

$z$  hangmagasság [Bark] átviteli függvény:

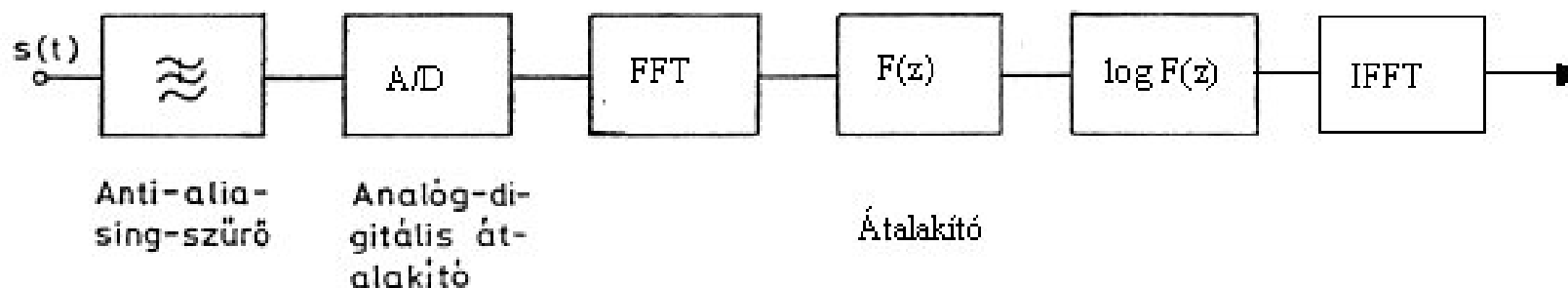
$$10 \lg L(x) = 15,8 + 7,5(x + 0,5) - 17,5(1 + (x/0,5)^2)^{1/2},$$

$z = 0$ -nál  $L(x)$  maximális

Mel hangmagasság skála alapján:

$$z = 2595 \log\left(1 + \frac{f}{700}\right) \text{ [Mel]}$$

Mel-Frekvencia Cepstral Coefficiens (MFCCs)



## Kritikus sávok

- A kritikus sávok megfeleltethetőek a csiga frekvenciafelbontó képességének, ha ugyanis fülünket egyszerre több hang éri, és ezek egy kritikus sávon belül vannak, akkor intenzitásuk összegződik, de nem észleljük őket különálló hangként.
- Minden egyes kritikus sáv adatgyűjtési egységnek számít az alaphártyán.
- Kb. 24 kritikus sáv íveli át a hallási frekvenciatartományt, és ezzel az alaphártya régióit.
- Egy kritikus sáv 1,3 mm-es hosszúságú, és kb. 1300 neuront tartalmaz
- (Scharf, 1970).

A szűrő sorszáma	Középfrekvencia	Alsó vágási frekvencia	Felső vágási frekvencia	Sávszélesség
Bark	Hz	Hz	Hz	Hz
1	150	100	200	100
2	250	200	300	100
3	350	300	400	100
4	450	400	510	110
5	570	510	630	120
6	700	630	770	140
7	840	770	920	150
8	1000	920	1080	160
9	1170	1080	1270	190
10	1370	1270	1480	210
11	1600	1480	1720	240
12	1850	1720	2000	280
13	2150	2000	2320	320
14	2500	2320	2700	380
15	2900	2700	3150	450
16	3400	3150	3700	550
17	4000	3700	4400	700
18	4800	4400	5300	900
19	5800	5300	6400	1100
20	7000	6400	7700	1300

**A hallási  
(kritikus)  
sávszélességű  
szűrősor adatai**

[Zwicker, 1982.]

A kritikus sávarány szoros kapcsolatban van a hangmagasság érzetoldali skálájával, a melodikus hangmagasság (mel) skálával.

A kritikus sávarányú skála esetén az emberi hallást 24 bark fedi le, így 1 bark a kritikus sáv szélességen 100 mel.

## *Hallóidegek agyba vezetése*

- Mind a föl (afferens), mind a leszálló (efferens) ágak keresztezik egymást. A bal fülben beadott jel 80-85% a jobb oldali agyfélteke homloklebenyébe fut és viszont.
- A két homloklebény nem szimmetrikus: bal féltekén időbeli megfejtés, beszéd-feldolgozás történik, jobb félteke a térbeli információ, színeképi megfejtés helye (zene).

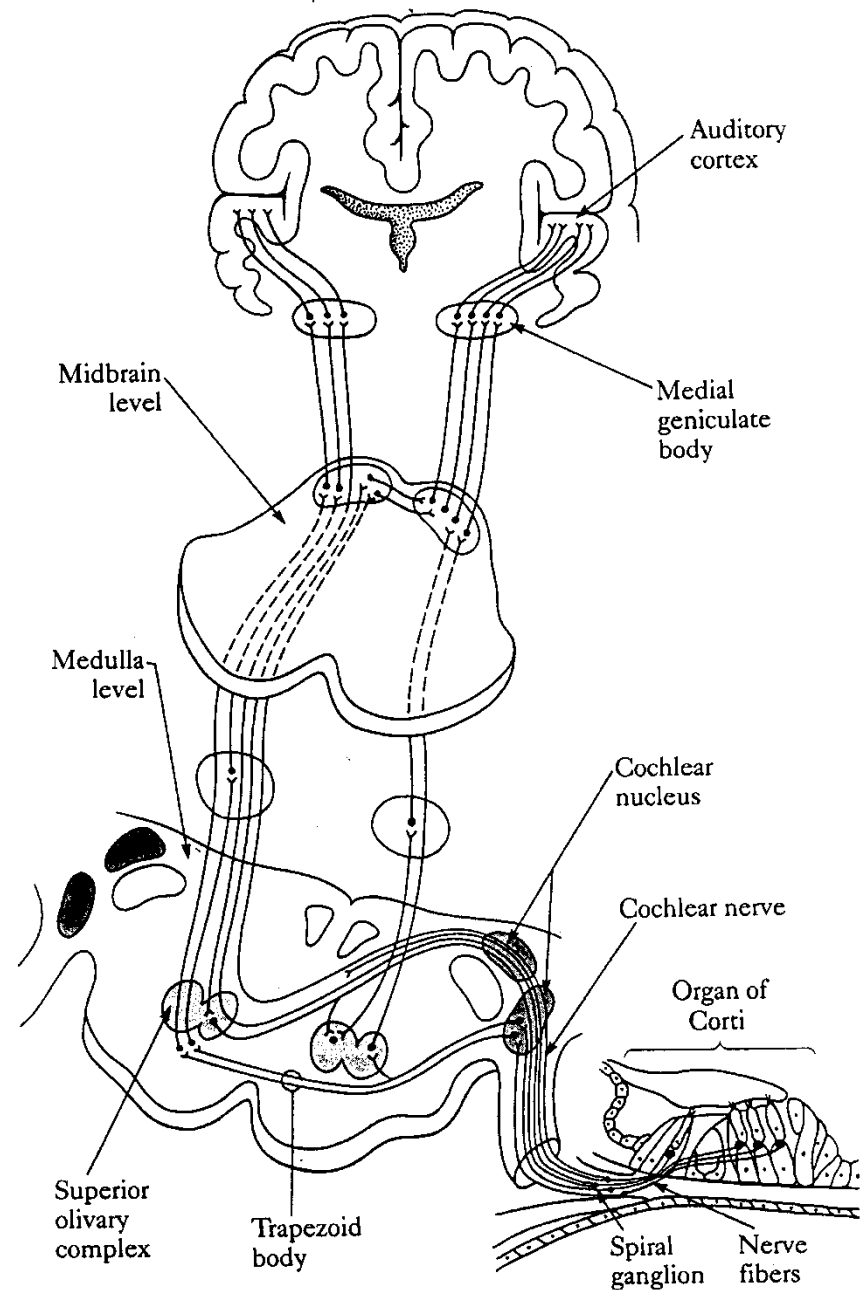


Diagram of the auditory pathways linking the ear with the brain.

## 2. A hallási idegrendszer

A hallóideg :kb. 30 000 afferens és efferens idegszálból áll, amelyeknek kb. 6%-a efferens, azaz a központi idegrendszerből a perifériás idegrendszerbe továbbít információt.

Afferens sejtek: receptorsejtekként működnek.

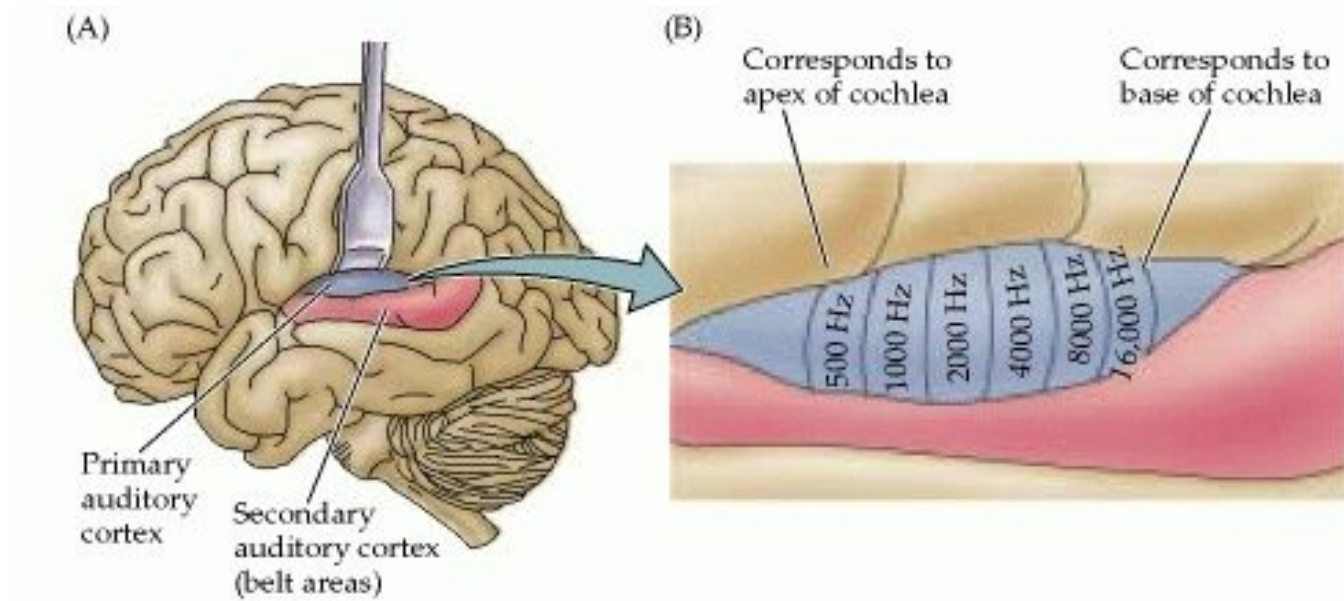
Efferens sejtek:

- által kiváltott izomösszehúzódás aktívan befolyásolja az alaphártya viselkedését, például növelni tudja az alaphártya egyes frekvenciákra való fogékonyságát.
- bizonyos irányból érkező hangokra fokozottan tudunk koncentrálni (szelektív térbeli hallás, koktélparti effektus).



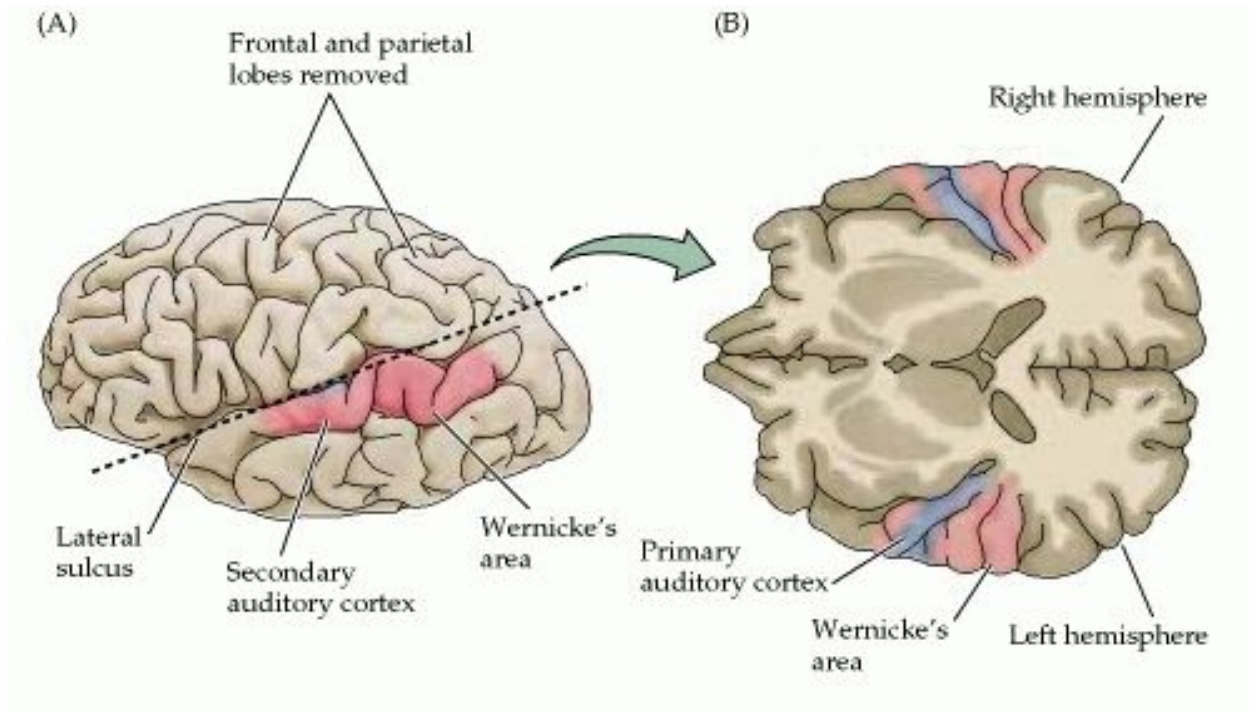
A hallókéreg 3 elkülönült részre van felosztva:

**Az elsődleges hallókéreg A1:** tonotopikai szerveződésű, tehát bizonyos idegcsoportok más-más frekvenciára érzékenyek. Azt tartják, hogy az agynak ez a része az ahol az alulfrekvencia és a hangosság meghatározása történik.



*Az agykéreg baloldali nézete. Kék elsődleges hallókéreg A1*

A másodlagos hallókéreg A2 a dallam és a ritmus feldolgozásáért felelős, valamint a beszédben a beszédhangok feldolgozásáért. Wernicke-terület.



A harmadlagos hallókéreg A3 a teljes zenei összbenyomásért felelős.

## **Hang terjedése a levegőben**

### **Hangok fizikai leírása - Hangtani alapfogalmak**

#### **1. Rezgés**

- Azokat a fizikai folyamatokat nevezzük rezgéseknek, amelyek meghatározott időközönként újra meg újra ugyanazt az állapotot érik el, vagy ugyanazon állapoton haladnak át.
- Ez az oszcillálás lehet periodikus vagy rendezetlen, véletlenszerű.

#### **2. Hang**

- Rezgő test által a levegőben történő sűrűsödéseknek és ritkulásoknak hatására a környező levegőben folytonos nyomásingadozások alakulnak ki, amelyek a levegő molekuláinak a segítségével, a molekulák egymás közötti rezgési energiájuk átadásával, hanghullámok formájában a levegőben tovább terjednek és a dobhártyát rezgésbe hozzák.

## HANGFORRÁS:

- korlátozott kiterjedésű rezgő tömeg
- **korlátozott geometria** → meghatározza a hangforrás hangmagasságát
- hangforrások → állandó nyomásingadozást biztosítanak
- Hangforrás átadja a rezgést az azt közvetítő közegnek: a részecskék kényszerrezgést végeznek

## HANGHULLÁM: Mechanikai hullám

- Energiaterjedés, ahol a közeg közvetít, de önmaga haladó mozgást nem végez
- A hangforrás rezgéseinek mechanikai hullám formájában történő tovaterjedése a közeg részecskéinek rezgésállapotának továbbításával

légnemű testekben

→ csak longitudinális

szilárd testekben

→ főleg transzverzális

## HANGTÉR

- Vívó közeg, amely valamilyen mechanikai rezgés hatását közvetíti.
- légnemű, cseppfolyós, szilárd

Levegőben terjedő hanghullámok jellemzői:

- 0 C°, 1 atm (100 000 Pa) nyomáson  $c = 331,5\text{m/s}$  a hang sebessége
- A visszaverődés és az elhajlás  $\rightarrow$  általános, mint minden hullámformánál

jellemző paraméterek:  $\Delta s$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta p$

**Hangnyomás:**  $1\text{Pa} = 1\text{ N/m}^2 = 0,10\text{ cm vízoszlop}$

*Hangnyomás* ( $p_{hang}(t)$ ): A hang terjedésekor a részecskék sűrűsödése és ritkulása egy adott pontban  $p_{hang}(t)$  nyomásváltozást eredményez. Ez a nyomásingadozás igen kicsi és a légköri (sztatikus) nyomás értékére szuperponálódik. A nyomás időbeli változása tehát

De a négyzetes középértékkel számolunk, mert a fül ezt érzékeli (effektív hangnyomás):

$$p_{légköri} + p_{hang}(t)$$

$$p_{eff} = \sqrt{p^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt} \quad [\text{N/m}^2]$$

## Nyomásértékek:

sztatikus nyomás → 1 atm ~ 100 000 Pa

beszéd nyomásingadozás → 0,01-0,1 Pa

Hallásküszöb → 0,000020 Pa

fájdalomküszöb → 20 Pa

A hangtér legfontosabb térmennyisége:  $p$  nyomás és  $v$  részecskesebesség

Karakterisztikus impedancia → akusztikai hullámellenállás:

Komplex mennyiség

- valós része az akusztikai keménység:  $z_0 = \rho \cdot c$  , amely közegben a hang terjed
- közeg sűrűsége:  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],

$$z = \frac{p}{v}$$

**Hangenergia (E)** → hangrezgések mechanikai energiája

egy adott térrészre igaz

$$E_{\text{össz}} - E_{\text{nyug}} = E_{\text{hang}}$$

[Ws/m<sup>3</sup>],

**hangteljesítménye (P):** *A hangforrás elsődleges adata*

a hangforrás körüli képzett gömbfelületen időegység alatt átáramlott összes energiamennyiség [Watt].

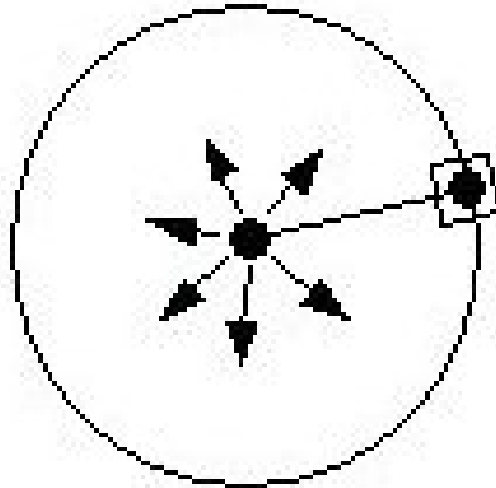
$$P = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \cdot S$$

ahol S a felület [m<sup>2</sup>].

A hangteljesítmény „mennyiségi”, tehát összegező adat: az elemi értéknek, a felületegységre eső teljesítménynek, vagyis az intenzitásnak a sugárzó körüli teljes gömbfelületen vett integrálja.

hangenergia továbbítása → hangsugárzás

hangintenzitás (I): egységnyi felületen merőlegesen időegység alatt átáramlott energia [W/m<sup>2</sup>]



$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c}$$

$\rho \cdot c$  = akusztikai keménység,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>].  $c$  [m/s] (hangsebesség)



## Szintérték – dB fogalma

hallásküszöb hangintenzitás-értéke  $I_0 = 10^{-12} \text{ W} / \text{m}^2$  (még éppen hallható)

egy nagyteljesítményű repülőgép zaja 10 m távolságban  
kb.  $I = 1 \text{ W} / \text{m}^2$ ,

vagyis a repülőgép zajának a hangintenzitása az éppen meghallható hang intenzitásának 1 000 000 000 000 szorosa.

deciBel[dB]: 
$$X_{dB} = 10 \log \frac{X}{X_0} = 10 \log X - 10 \log X_0$$

Az akusztikában és vele kapcsolódó tudományágakban, mint a fonetika, pszicholingvisztika, digitális beszédfeldolgozás stb. a hangintenzitás és a hangnyomás kezelésére dB szintértéket használunk, és a viszonyítási alap a hallásküszöb-intenzitás ill. hangnyomás értéke.

A hangintenzitás a hangnyomás négyzetével arányos. Szintben kifejezve:

$$L_{db} = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \cdot 2 \cdot \lg \frac{p}{p_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

A hangnyomás szintértéke:

$$L_{dB} = 20 \lg \frac{p}{p_0} = 20 \lg p - 20 \lg p_0 \quad [\text{dB}],$$

ahol a viszonyítási alap a hallásküszöb hangnyomásértéke, vagyis 20uPa.

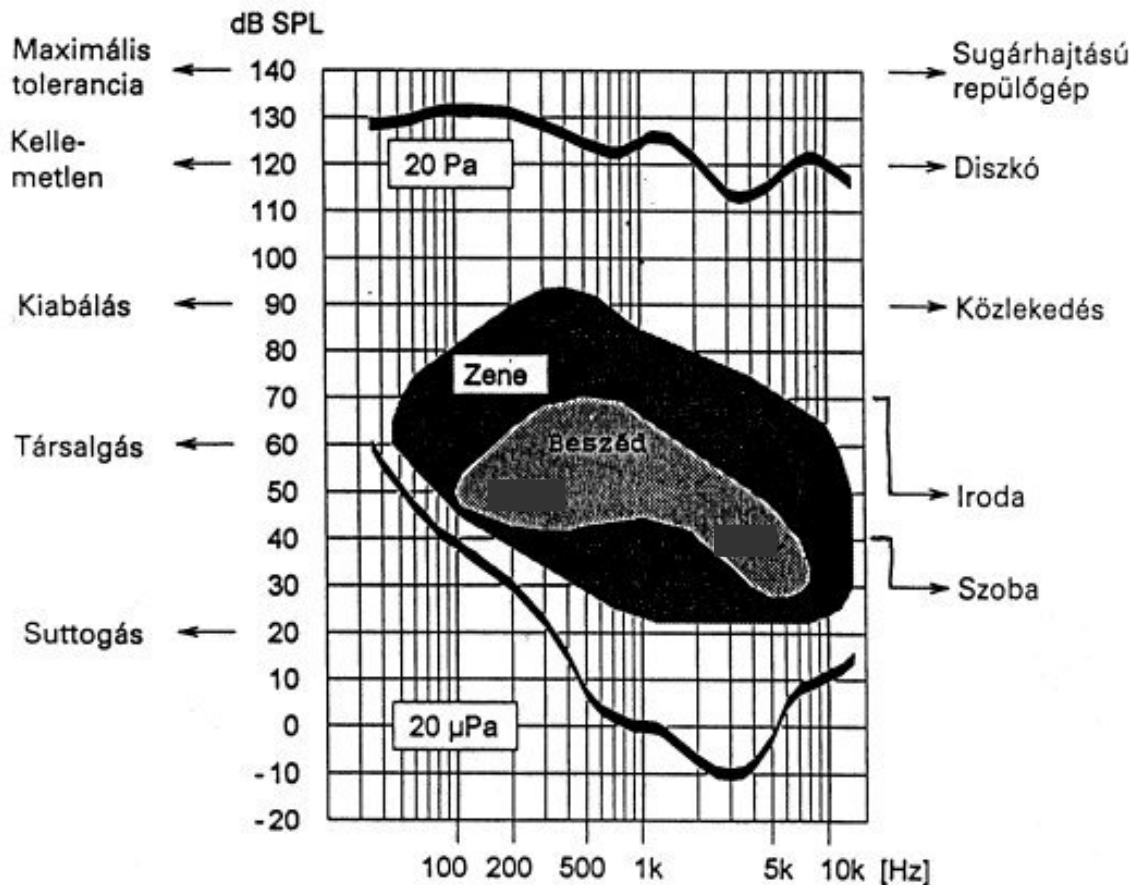
Ha tehát hangnyomás arányokkal számolunk dB-ben, akkor a hangnyomáсарányok logaritmusának húszszorosát kell vennünk

Így akár hangnyomás, akár intenzitásszint értékekkel számolhatunk, a szintértékek nagysága egyenlő.

A nemzetközi standard szerint a nulla dB mint referencia szint SI egységben a következő:

$P_0 = 0,00002 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$  hangnyomás, azaz  $20 \mu\text{Pa}$

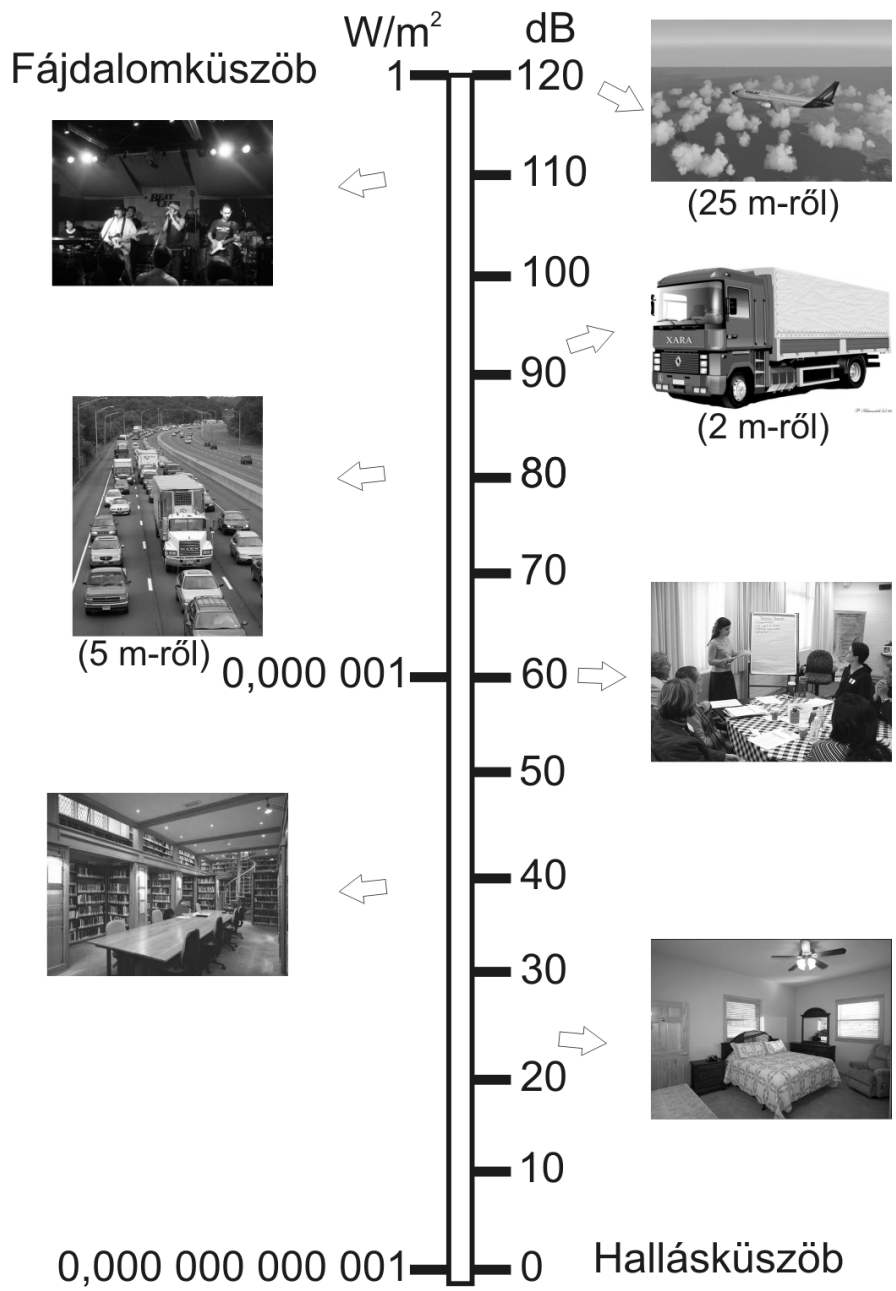
$I_0 = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$  mint intenzitás.



*Az emberi fül érzékenysége. Az alsó határ vonal a hallásküszöböt, a felső határ vonal a kellemetlenségi küszöböt mutatja a különböző frekvenciákon (Pitel, 1996)*

# Hangintenzitás

# Hangintenzitásszint



## Szubjektív akusztika

- A hangélmény kialakulásával, leírásával foglalkozik
- A beszédhang fizikai jelenség, számunkra csak a fülünkön keresztül válik valósággá.
- Hogy valójában milyen lesz a hang, amit meghallunk függ:
  1. fizikai valóságtól
  2. hallás tulajdonságaitól, képességeitől

# HANGÉLMÉNY KIALAKULÁSA

A fül nemlineáris átviteli rendszer.

**fizikai  
(mérhető)  
paraméterek:**

Intenzitás

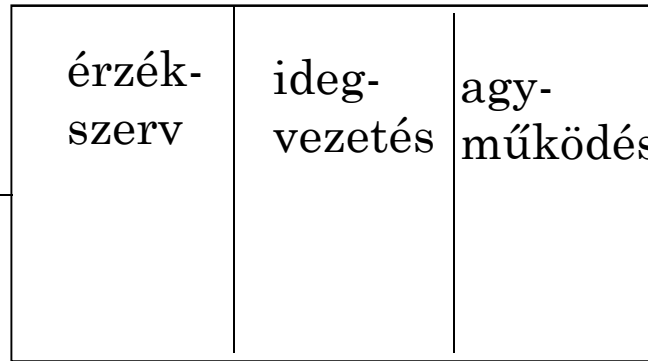
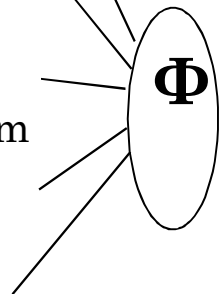
Frekvencia

Színkép

Időtartam

Irány

stb.



**Hangérzet  
paraméterei:**

Hangosság

Hangmagasság

Hangszínezet

érezkelt időtartam

érezkelt irány,

stb.



$$\Psi(\psi) = O\Phi(\varphi_1\varphi_2\cdots\varphi_n)$$

$O$  = műveleti szabály

A hangérzet minőségének a fizikai paramétereiktől való függősége + = gyengén függő ++ = mérsékelten függő, +++ = erősen függő.

Fizikai paraméter	Szubjektív minőség			
	Hangosság	Alaphang	Hangszín	Tartósság
Intenzitás	+++	+	+	+
Frekvencia	+	+++	++	+
Színkép	+	+	+++	+
Időtartam	+	+	+	+++

# Hangosságérzet

## Hangosságérzékelés

- Egy hang bizonyos fizikai hangnyomásszintje bizonyos hangosságérzetet vált ki.
- A kérdés az, hogy milyen összefüggés van az inger és az érzet között tisztahangok, illetve összetett hangok esetében?
- Amikor a hangok nagyobb hangintenzitás- vagy hangnyomásszinttel közvetítődnek a fülbe, általában a hangerősség növekedésének érzetét váltják ki, hangosabban szólnak, ez azonban nem minden esetben van így.
- Ez azt jelenti, hogy a fizikai paraméterek keresztbe is hatnak egymásra a biológiai feldolgozás során.



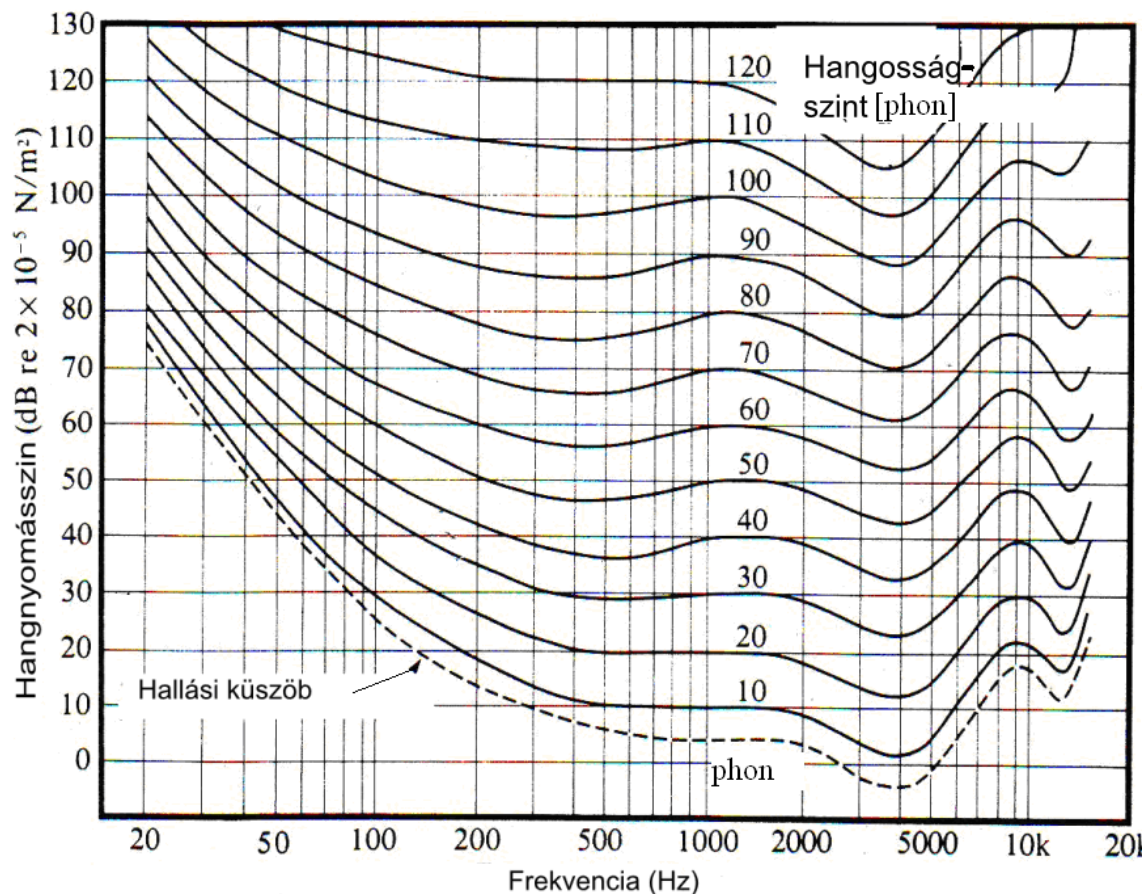
# Összehasonlító hangosság

- Külön egymásután megszólaltatott hangok közötti hangosságviszonyt fejezi ki.
- Hangintenzitás és a hangosság szint érzet kapcsolatát az egyenlő hangosság szint gorbék adják meg, amelyek frekvenciafüggők.

## Egyenlő hangosságú görbék [phon]

Színuszos hangokra v. keskenysávú zörejekre

Kérdés: mekkora fizikai intenzitásszintűre kell beállítani a vizsgált hangot, hogy egyforma hangosságúnak érezzük, az 1000 Hz frekvenciájú X dB intenzitásszintű hanggal



VONATKOZTATÁSI  
értékek:  
1000 Hz-en X dB=X  
phon

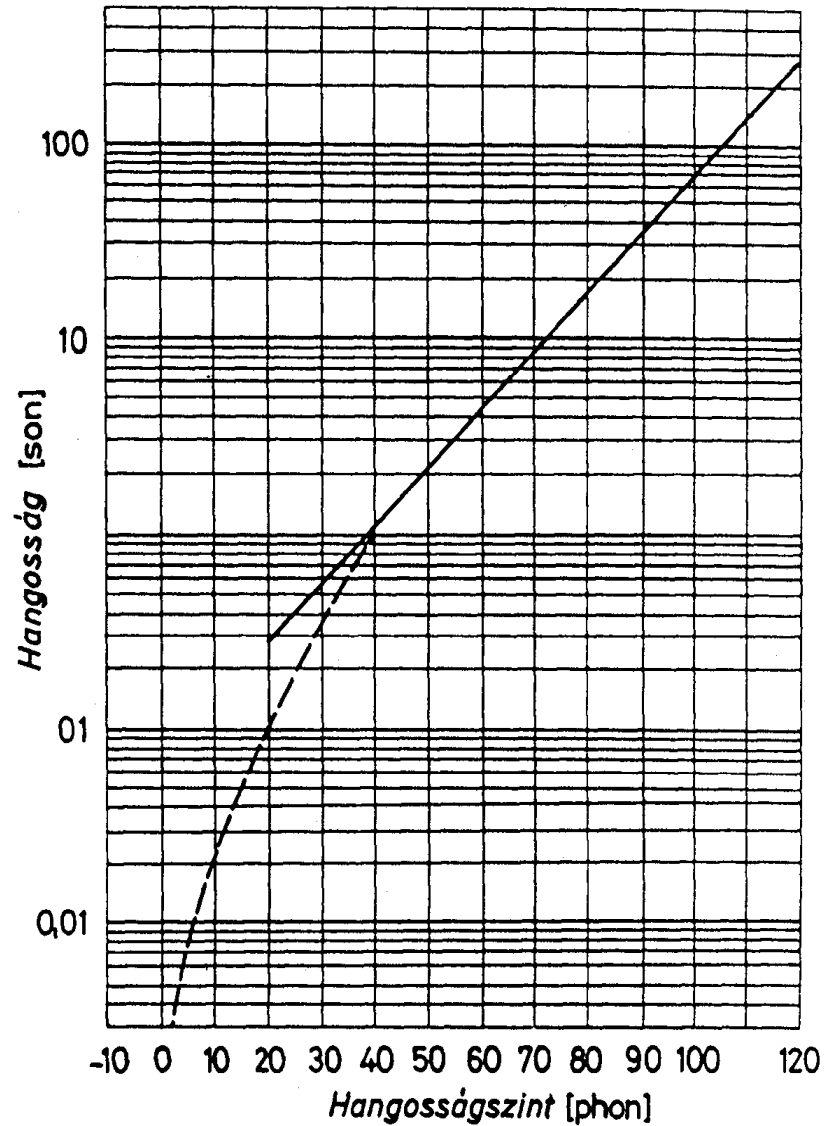
Egyéb frekvenciákon  
a fizikai  
és a szubjektív skála  
különböző

szabad hangtérben mérve, ahol a hangforrás a hallgatóval szemben volt elhelyezve.

A hangosság (son) és hangosság-  
szint (phon) összefüggése (nemzet-  
közi szabvány).

$$S = 2^{(P-40)/10}$$

$$P = 40 + \frac{100}{3} \lg S$$



**Relatív hangosságérzet [son]**

## Összetett hangok esetén:

### Fletcher kísérlet

Együtt szól 10 db 60 dB-es szinuszos hang, melynek együttes intenzitás szintje 70 dB összesen.

10 db	500 Hz	1000 Hz	1500 Hz ...	5000 Hz	szinuszos hangok
	60 dB	60 dB	60 dB	60 dB	hang

egyformán hangos 1 db 90 dB intenzitásszintű 1000 Hz-es szinuszos hanggal

## Összeg hangosság

Egyszerre megszólaltatott hangok hangossága.

Kritikus sávok összefoglaló képessége és az elfedés nagymértékben befolyásolja az érzetet. A jelenség igen összetett.

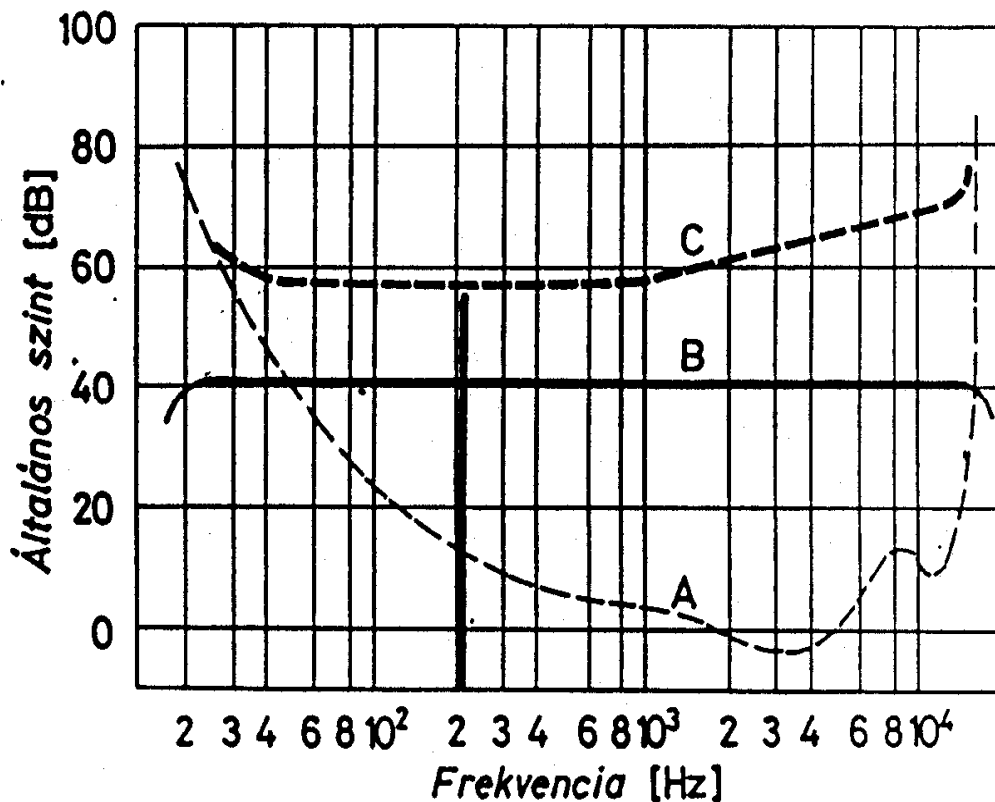
- a “son” összegzés érvényes ha elég távoli frekvencián szólnak a részhangok.
- ha az összetevők intenzitása nagyon különbözik – elfedés
- elfedés hangosságfüggő – erősebb hangoknál nagyobb mértékű

# Elfedési jelenségek

# **Azonos idejű elfedés: frekvenciában**

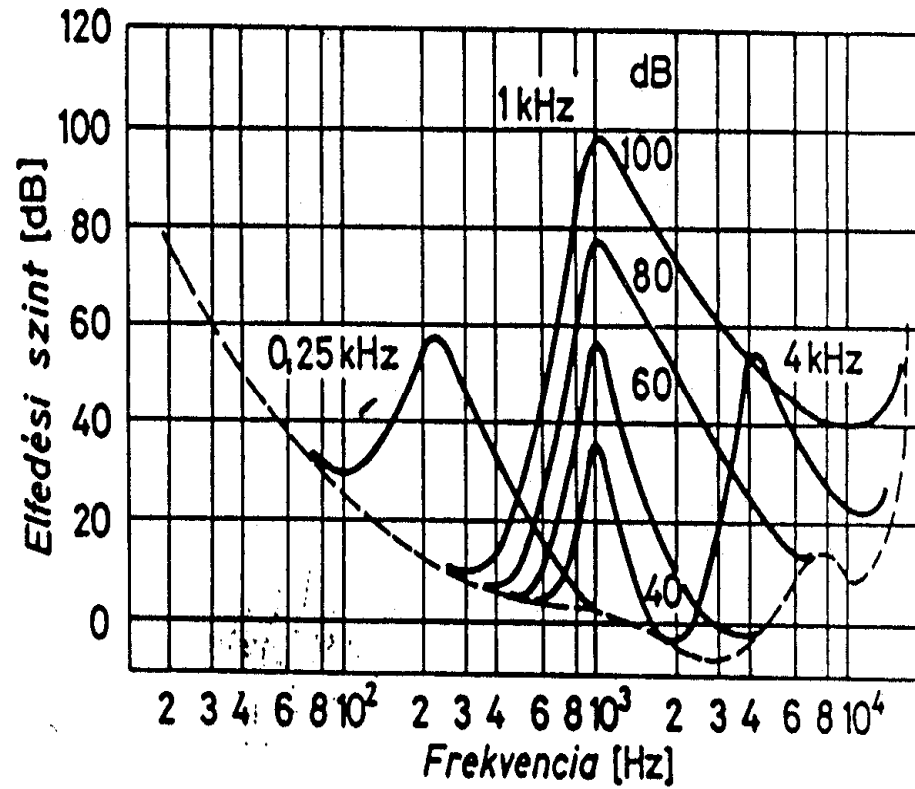
**Két, vagy több hang egyszerre szól**

Magyarázó grafikon az elfedéshez. A frekvencia függvényében három görbe látható. A: a hallásküszöb görbéje, szabványos körülmények között, szinuszos hangokra. B: a „fehér zaj”-nak nevezett sustorgó zörej fizikai színkép vonal szintje (1 Hz sávszélességre vonatkoztatott intenzitásszintje), C: a B hang elfedési színképe, azaz a B hang által módosított hallásküszöb görbe szinuszos hangokra. Egy ilyen szinuszos hang helyét (200 Hz frekvencián) és éppen meghallható intenzitását (57 dB) az ábrába szintén bejelöltük.



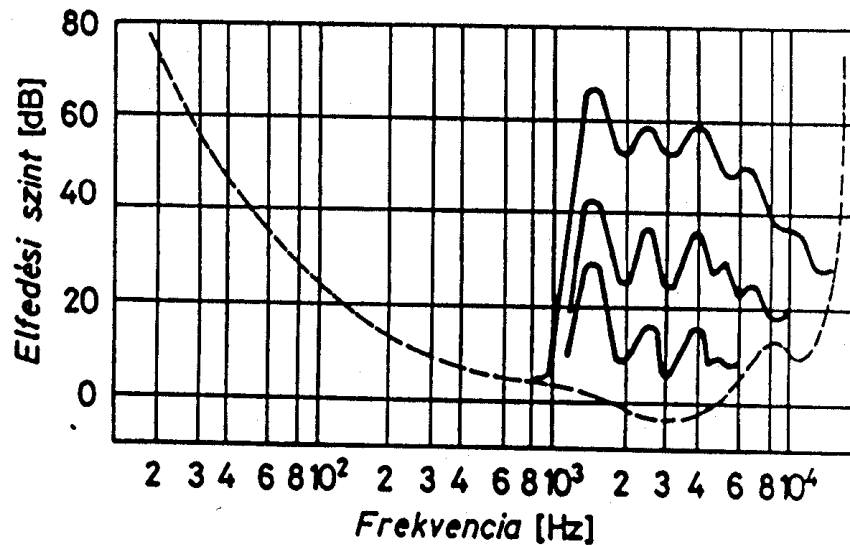
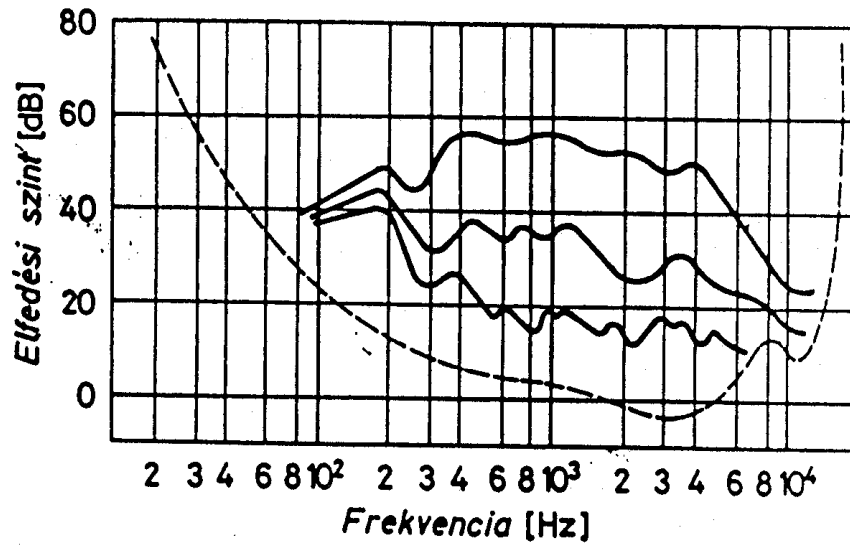


Keskenysávú zörejek elfedő hatása. Az ábrán 250 Hz, 1 kHz és 4 kHz frekvenciájú, kritikus sáv szélességű zörejek hallásküszöböt módosító hatása látható. A járulékos hallásküszöböket 1000 Hz-nél különböző intenzitású elfedő hangok eredményeként is bemutatjuk. Két fontos leolvasható adat: (1) az elfedés a magas hangok felé erősebb, és (2) az aszimmetria az elfedő zörejhang intenzitásával növekszik (E. Zwicker alapján).



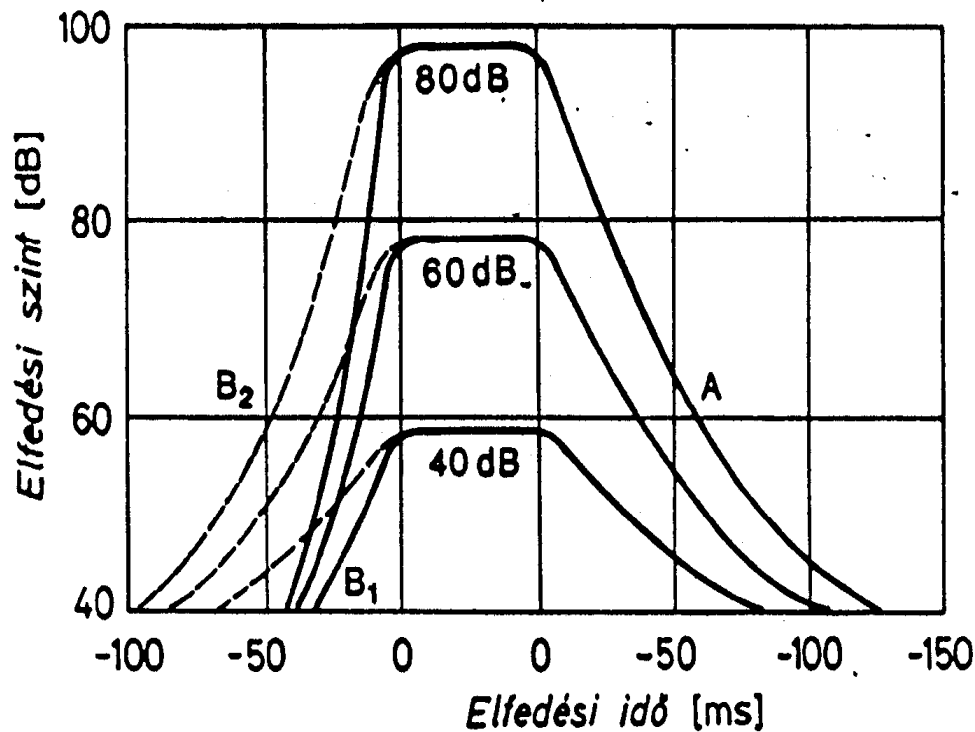
80. ábra

Hegedűhangok elfedési szinképe:  
*a)*  $g$  (196 Hz) és *b)*  $f_3$  (1397 Hz) ki-  
 tartott hang, 40, 60 és 80 dB szin-  
 ten, az ábráknak megfelelő szinkép  
 szerint emeli meg a hallásküszöböt,  
 azaz annyira fedi el az egyidejűleg  
 megszólaló egyéb hangokat. (E.  
 Zwicker ábrája).



# Időbeli elfedés

Egymás után megszólaló hangok egymásra hatása



Az elfedés időbeli alakulása 40, 60 és 80 dB intenzitású fehér zaj terhelésekor. Jobbra (A-görbék), az elfedő hang elhangzása után tapasztalható utó-elfedő hatás olvasható le. Balra (B<sub>1</sub>-görbék) a különböző fülű és (B<sub>2</sub>-görbék) az azonos fülű elő-elfedés folyamata tanulmányozható. Ez esetben egy később megjelenő elfedő hang hat egy már korábban elhangzott gyöngébb hangra.