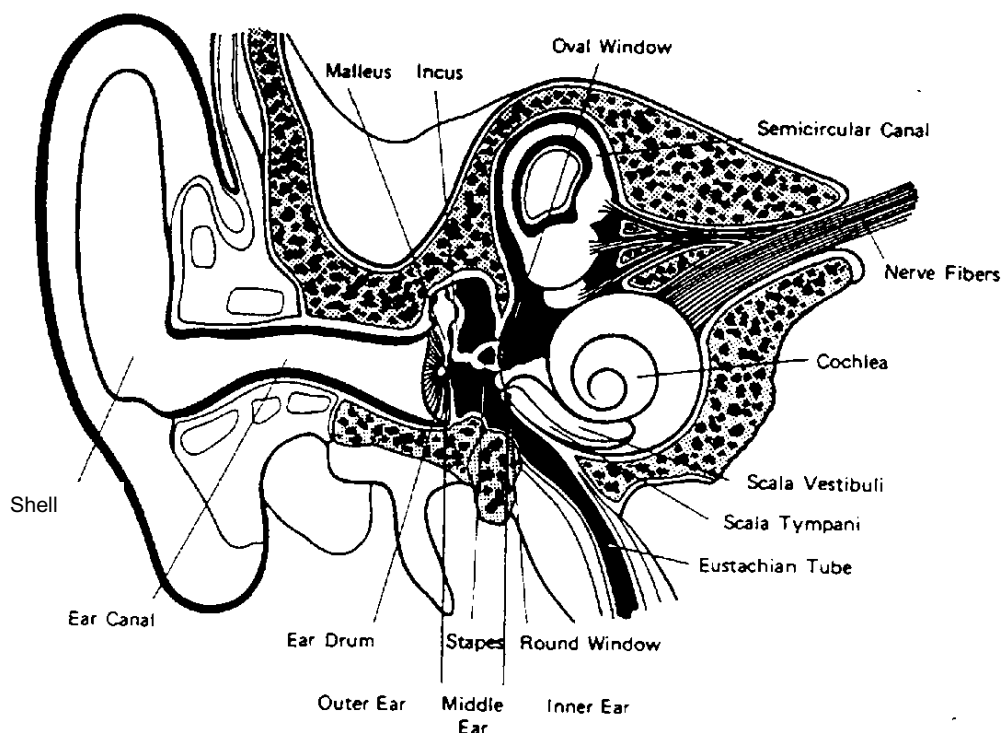


1. HALLÁSTULAJDONSÁGOK

1. Az emberi fül szerkezete és a hallás folyamata

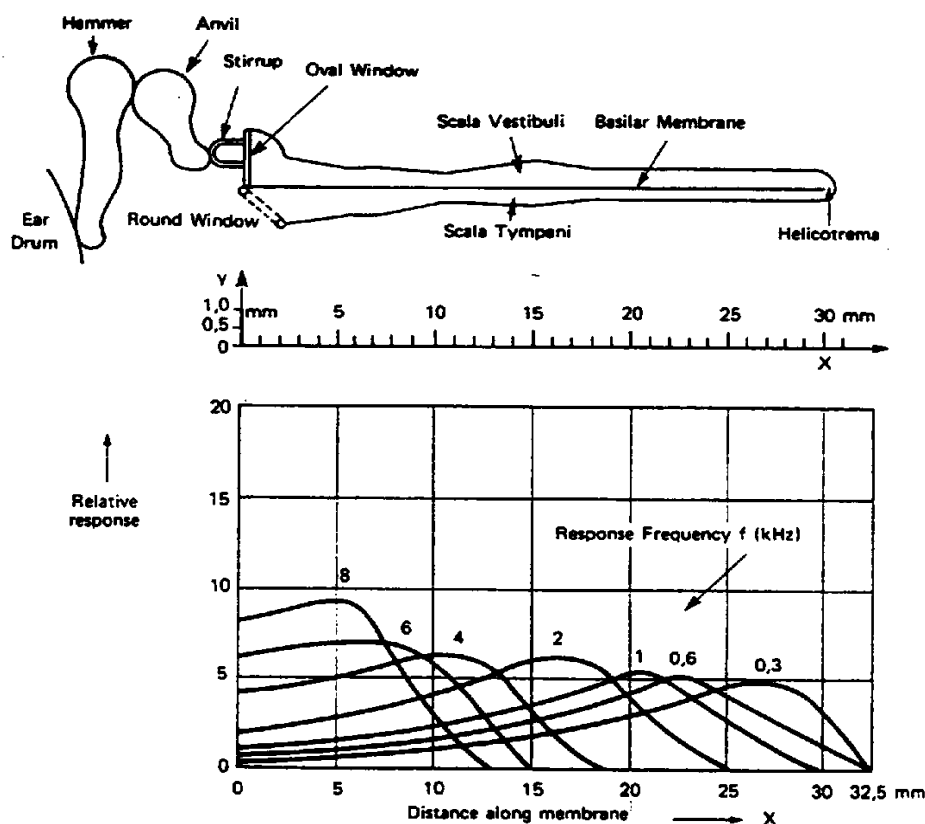


1. ábra. A fül metszete. A külső-, közép- és belső fül.

Az 1. ábrán látható a fül metszeti rajza és a külső (Outer Ear), középső (Middle Ear) és belső fülre (Inner Ear) való tagozódása. A külső fül a *fülkagylót* (Shell) és a *hallójáratot* (Ear Canal) tartalmazza. A hallójárat lényegében egy 2.5 cm hosszú és 0.4 cm² keresztmetszetű cső. A szintén levegővel töltött 1.5-2 cm³ középfül, másnéven *dobüreg* kapcsolja össze a *dobhártyát* (Ear Drum) a belső füllel. A mechanikai összeköttetés a dobhártya és az *ovális ablak* (Oval Window) között a *hallócsontok* (*kalapács-malleus, üllő-incus és kengyel-stapes*) segítségével valósul meg. A csontocskák igen kicsinyek, 3-5 mm-es méretűek. A középfül a 36 mm hosszú *Eustach-kürttel* (Eustachian Tube) a garathoz kapcsolódik, amelyen keresztül nyeléskor az esetleges légnyomásbeli különbség ki tud egyenlítődni. Ez viszonylag gyors légnyomás változáskor (pl. repülésnél felszállás illetve leszállás közben) jelentkezik. A belső fül szerve a folyadékkal töltött, kb. 2.5 fordulatszámú *csiga* (Cochlea), amelyet az *alaphártya* (Basilar Membran) két részre oszt. A folyadék összetétele a tengervízhez hasonlatos. (A csiga kiterített szerkezete a 2. ábrán látható. Keresztmetszete a csiga elején 4 mm², ami a végén 1 mm²-re csökken. Az alaphártya kiterített hossza kb. 35 mm, keresztirányú rostjai 0.04 mm hosszúságról 0.5 mm-re növekednek a csiga végére, vastagsága századmilliméteres) Az agy felé futó *hallóidegrost* végződése, a *szőrsejtek* az alaphártyával érintkeznek. Az agyban végződő kb. 4000 idegszál a 15- 20 ezer szőrsejtet négyes-ötös csoportokba fogja össze. A szőrsejtek igen kicsinyek, átmérőjük kb. 10 µm, magasságuk 60-80 µm.

A fentiek ismeretében a hallás folyamata az alábbiakban írható le. A tetszőleges irányból beérkező hanghullám eléri a fülkagylót. A hangforrás irányától függően a fej árnyékoló hatása jobban vagy kevésbé módosítja a beérkező hanghullámot. A fülkagyló iránykarakterisztikája is szerepet játszik elsősorban a többkiloherzes tartományokban. Továbbiakban a módosult hanghullámok a hallójáraton keresztül eljutnak a dobhártyához. A dobhártya akusztikai ellenállása közel van a levegőéhez, 800 Hz-en pedig megegyezik

vele, ezért a hangenergia jó hatásfokkal tud rezgéssé átalakulni. A dobhártya külső felületére ható megváltozott levegőnyomás és a középfül változatlan légnyomása közötti különbség hozza mozgásba a dobhártyát. A dobhártyával lezárt hallójárat egy 3kHz körüli rezonáns sípot alkot. Emiatt, valamint a fülkagyló irányító hatása miatt a hallás érzékenysége az 1 és 10 kHz közötti tartományban a legnagyobb.



2. ábra. A kiterített csiga és az alaphártyán kialakuló rezgésmaximumok a frekvencia függvényében.

A dobhártya rezgése a kalapács, üllő és kengyel közvetítésével (2:1-es mechanikai áttétel) az ovális ablakra jut. A dobhártya felülete 55 mm^2 , az ovális ablakon a kengyeltalp kb. 3.3 mm^2 s így a felületek aránya 15:1. A két arány együttesen 30:1 áttételt eredményez, ami csaknem tökéletes impedancia illesztést valósít meg a külső levegő és a belső fül folyadéka között. A középfülnek ezenkívül még van egy fontos szerepe, nevezetesen ha, a fület hirtelen nagy hangnyomás éri, akkor egyes izmok jobban megfeszítik a dobhártyát és elhúzzák a kengyel talpát az ovális ablaktól. Ezáltal a belső fül roncsolódása elkerülhető, mivel a nagy amplitudójú rezgések nem jutnak az ovális ablakra. Természetesen a hosszabb ideig igen zajos környezetben dolgozókat a fül ezen tulajdonsága sem menti meg a végleges halláskárosodástól.

Az ovális ablak rezgése folyadékhullámokat gerjeszt, amelyek a csigamenet felső csatornáján végighaladnak, majd itt a csigalyukon keresztül az alaphártya alatti részen elindulnak vissza a csiga kezdete felé, ahol a *kerek ablaknak* ütköznek. A haladó és reflektált folyadékhullámok hatására az alaphártya is rezgésbe jön. A hártyán kialakuló jellegzetes hullámalakokat a Nobel-díjas magyar tudós Békésy György tanulmányozta és mérte meg. A rezgésmaximumok helyzete frekvencia függő (2. ábra). A csiga végénél a legkisebb frekvenciájú, még hallható rezgések maximuma jelenik meg, a frekvencia növelésével ez a maximumhely fokozatosan a csiga kezdete felé helyeződik át. Az alaphártya kitérése a legerősebb (120 dB) hallható hangok esetén kb $1 \mu\text{m}$. Ebből

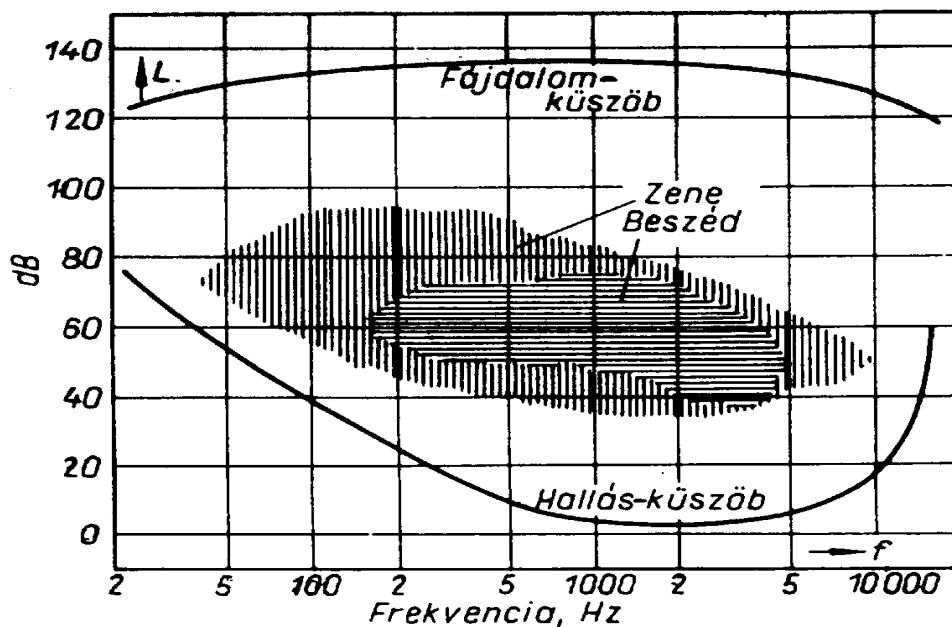
kiszámítható, hogy a leghalkabb (0 dB) hangoknál 10^{-12} m, ami századrésze a 10^{-10} m-es hidrogénatom átmérőjének. A rezgésalakok segítségével jól magyarázható az a tény, hogy egy kisfrekvenciás zavaró jel gyakorlatilag az egész hallható tartományban megnehezíti a hangok felismerését. Ugyanakkor a magashangok a mélyhangok felismerését csak kismértékben akadályozzák.

Az alaphártya a rezgések amplitúdójával arányosan ingerli a sejtvégződéseket. A csiga tehát transzverzális szűrőként működve, a beérkező hullámok frekvenciájának megfelelően más és más idegvégződéseket fog stimulálni. A gerjesztett hallóidegek impulzusokat továbbítanak az agyba, ahol igen összetett kiértékelési folyamat eredményeképpen megszületik a hangérzet. A hangok intenzitásnövekedése elsősorban az idegimpulzusok sűrűségét növeli, másrészt több idegpályán indulnak impulzusok. Az impulzusok időtartama mintegy 1 msec, nagysága pedig 1-10 mV közé esik, terjedési sebessége pedig 3 cm/sec. A dobhártyához érkező hangjel időközése az agykéreg 5 msec is lehet. Erősebb és magasabb hangoknál az időközés rövidebb.

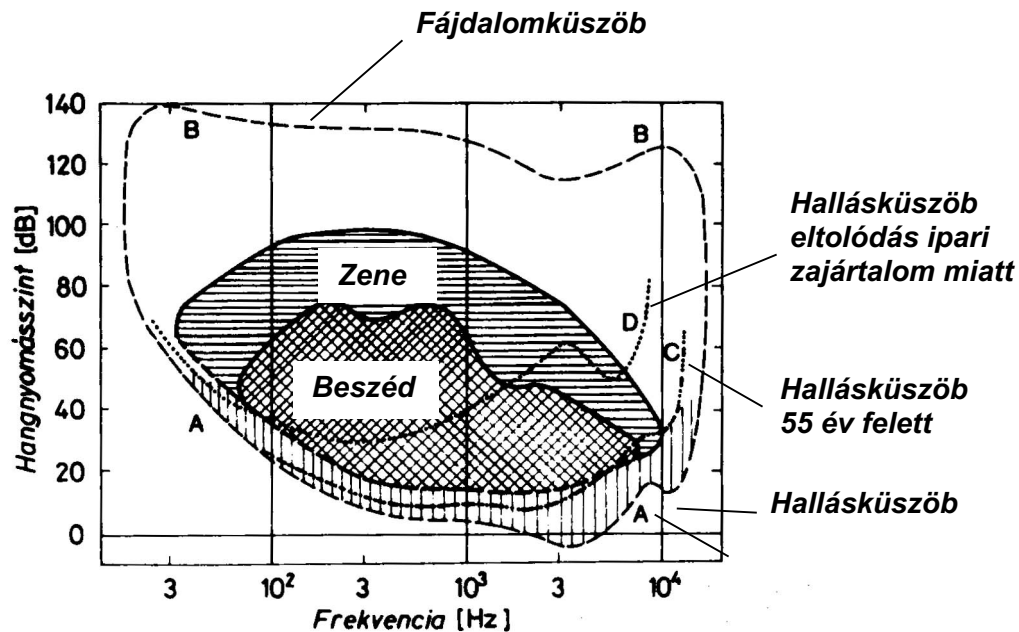
A hallás, mint minden érzékelési folyamat röviden tehát a következő: a beérkező hangnyomás azaz az *inger* idegimpulzusok formájában *ingerületet* kelt, ami az agyba jutva a kiértékelő folyamat eredményeképpen *érezte* válik.

2. Hallásterület

A hallás mind frekvenciában, mind pedig intenzitásban (nyomásban) korlátozott (lásd 3.a. ábra). A legalacsonyabb, még hallható intenzitásérték 1 kHz-en kerekén 1 pW/m^2 , ami a megállapodás szerinti referencia szint, azaz 0 dB. (Ekkora intenzitásnak megfelelő hangnyomásérték, azaz a hangnyomás referencia $20 \mu\text{Pa}$) A különféle frekvenciákon még éppen hallható intenzitásértékek alkotják a *hallásküszöböt*. A felső korlát az elviselhetetlen intenzitású pontok alkotta *fájdalom-küszöb*. A fájdalomküszöb átlagos értéke 130 dB. Frekvenciatartományban a hallható hangok 20 Hz és 20 kHz között helyezkednek el. Ezen korlátok között elhelyezkedő tartományt nevezzük *hallásterületnek*.



3.a. ábra. A hallásterület



3.b ábra Hallásterület és a hallásküszöb változásai

Ezen belül viszonylag kis területet foglal el a beszéd és sokkal nagyobb a zene tartománya. Meg kell jegyezni, hogy a mai diszkózene tartományának felső határa igen gyakran a fájdalomküszöb határáig terjed. Az ilyen szintű, huzamosabb idejű zenehallgatás komoly halláskárosodást okozhat.

A 3.b. ábrán egy pontosabb képet látunk a teljes hallásterületről és a beszéd (keresztbe vonalkázott), valamint a zene (vízszintes vonalkázott) tartományáról. Ez utóbbi természetesen a beszédet is magában foglalja. Az ábráról az is leolvasható, hogy idősebb korban a normális hallásküszöb (A görbe) a magasfrekvenciás tartományokban 10-20 dB-val is megemelkedik (C görbe). Ennél is súlyosabb lehet a hallásvesztés, ha valaki hosszú ideig zajos munkahelyen dolgozik (D görbe). A zene alatti függőleges vonalkázású terület a kis alapzajú hangversenyterem járulékos hallásküszöb növekedést jelöli.

A hangokat frekvenciatartományuk alapján három részre szoktuk osztani:

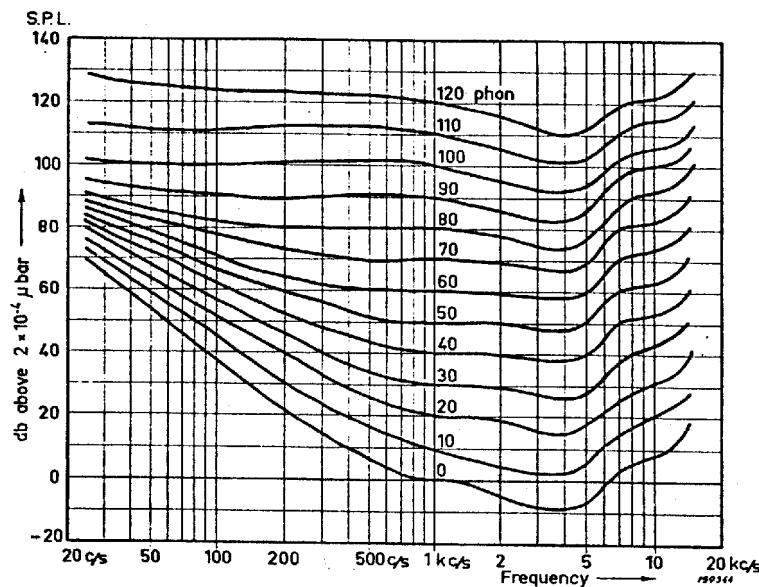
- *infrahang* 20 Hz alatt
- *hallható hang* 20 Hz - 20 kHz
- *ultrahang* 20 kHz felett

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy fülünk egy igen különleges, érzékeny eszköz. Frekvenciatartományban 3 dekád átfogására képes, az intenzitástartományban pedig kerekén 120 dB, ami 10^{12} -es arány. Érdekes még megjegyezni, hogy a még éppen hallható hangintenzitás esetén a levegő részecskéinek kitérése 10^{-11} méter, ami kb. tizede a hidrogénatom átmérőjének. A nagy intenzitásbeli átfogás csak nemlineáris működéssel képzelhető el. Ez úgy valósul meg, hogy nagyszintű jeleknél a hallócsontok izmai elmozdulásának következtében a mechanikai áttétel megváltozik, s ezáltal csökken az ovális ablak sérülésének veszélye.

3. Hangosság

Tapasztalati tény, hogy egészen eltérő jellegű hangok (pl. különböző hangszerek hangjai) esetén is képesek vagyunk eldönteni, hogy melyik a hangosabb, vagy mikor azonos a hangosságérzet. Mérési célokra *Barkhausen* 1926-ban az 1000 Hz-es szinuszhang hangosság-, illetve az azonos számértékű hangnyomásszintjét javasolta. Eszerint egy hang *hangosságát* *phonban* annyi, mint annak az 1000 Hz-es hangnak a hangnyomásszintje

dB-ben, amely a vizsgált hanggal egyenlő hangosnak tűnik. A hallható tartománybeli szinuszhangokra elvégzett kísérletek átlageredményét a *Fletcher-Munson* görbesereg tartalmazza. A 4. ábrából leolvasható, hogy a fül érzékenysége frekvenciafüggő.



4. ábra. Azonos hangosságú görbék Fletcher-Munson szerint

Legnagyobb eltérések a 0 phon feliratú görbén, azaz a hallásküszöb-görbén találhatók. Példaképpen 60 Hz-en 50 dB hangnyomásszintű hang az, ami még éppen meghallható, azaz a hangnyomásbeli különbség 50 dB. A 40 phonos görbéről leolvassa azt kapjuk, hogy ugyancsak 60 Hz-en 70 dB-es hangnyomásszint produkál az 1 kHz 40 dB mérőhanggal azonos hangosságérzetet. Itt a differencia már csak 30 dB. Ez megegyezik azzal az egyszerű hétköznapi tapasztalattal, miszerint ha zenehallgatáskor leszabályozzuk a hangerőt, akkor “eltűnnek” a mély hangok. Tehát a görbesereg a magasabb szinteken mintegy kisimul, a fül érzékenysége kis és nagyfrekvencián javul, a fájdalomküszöb pedig már majdnem mindenütt azonosan 130 dB.

Az ábrából tehát bármely frekvenciájú és hangosságú szinuszhang hangosságát leolvasható phonban. Meg kell jegyeznünk, hogy a fenti görbesereget más jellegű hangokra (pl. keskenysávú zaj) is meghatározhatjuk.

A hangnyomás és az intenzitás fizikai mértékegységei a Pa és a W/m². A gyakorlatban ezeket ritkán használjuk, helyettük a hangnyomásszint ill. az intenzitásszint szerepel, melyeket a következő képletek alapján számíthatjuk:

$$L_I^{\text{dB}} = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) \qquad L_p^{\text{dB}} = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

Mindkét eredményt dB-ben kapjuk. (Az I_0 és p_0 a már említett intenzitás és nyomás referencia értékeket jelenti.) A hangnyomás ill. intenzitásszintnek megfelelő L_N hangosság szint phon-ban a Fletcher-görbéből olvasható le, vagy a Barkhausen definíció szerint elvégzett összehasonlító mérésekből állapítható meg.

Néhány közismert hangforrás hangosságát az 1. Táblázat szerinti:

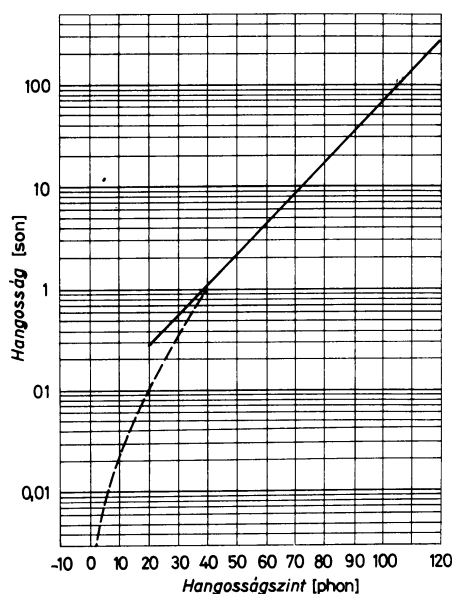
Phon	Természetes zajok	Technikai zajok	Zenei hangerő
140	Villámcsapás (10 m)	Robbanási hang	
130	Tengeri vihar, orkán	Sugárhajtású repülő (10 m)	
120		Légcsavaros repülő (10 m)	
110	Nagy vízesés (pl. Niagara)	Kovácsműhely	
100		Légsűrítő zaja	fff
90	Szélzúgás	Motorkerékpár	ff
80	Lelkes tapsolás	Autóforgalom (10 m)	f
70	Hangos beszéd	Utcai forgalom	mf
60	Átlagos beszéd	Porszívó (3 m)	p
50	Csendes beszéd	Villanyborotva	pp
40	Vízcsobogás	Papírszakítás	ppp
30	Suttogás	Hangversenytermi alapzaj	
20	Szellő	Karóra ketyegés (1m)	
10	Csendes táj	Süket szoba	
0	Testzörejek (véráram)	alapzaja	

1. Táblázat. Szokásos zajszintek

4. Hangosság

A phon bevezetésével egy olyan eszközhöz jutottunk, amivel megállapítható, hogy egy hang hangosság szintje mekkora, ugyanakkor azt nem tudjuk, hogy az egyik hang hányszor hangosabb mint a másik. Ennek érdekében vezették be a *son*-t, amelynek egysége, az *1 son*, ami a *40 phon* hangosság szintű hang hangossága. Megállapították, hogy *10 phon* hangosság szint növekedés a hangosság érzet kétszerezésének felel meg. (Kísérletileg a kétszerezést két azonos hangosságú hangforrás egyidejű bekapcsolásával valósíthatjuk meg, vagy az egy ill. kétfülű hallás közötti különbség felhasználásával.) Az átszámítási képlet a hangosság szint és a hangosság között:

$$N = 2^{\frac{L_N - 40}{10}}$$



5. ábra

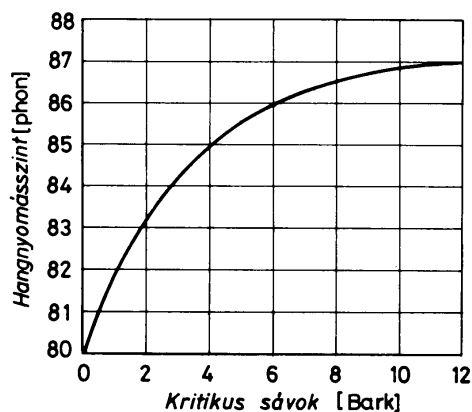
Son-phon kapcsolat. 40 phon feletti tartományban matematikailag leírható (folytonos vonal), alatta pedig a szaggatott vonal adja meg a kapcsolatot

A kapott eredmény az *N* hangosság *son*-ban. Alacsonyabb szinteken az összefüggés pontatlan eredményt ad, ezért 40 *phon* alatti értékek átszámításához *nomogramot*, illetve

son-phon diagramot (5. ábra) célszerű használni. A son bevezetése azért is hasznos, mert segítségével több hangforrás eredő hangossága *közelítőleg* egyszerű összegzéssel megállapítható.

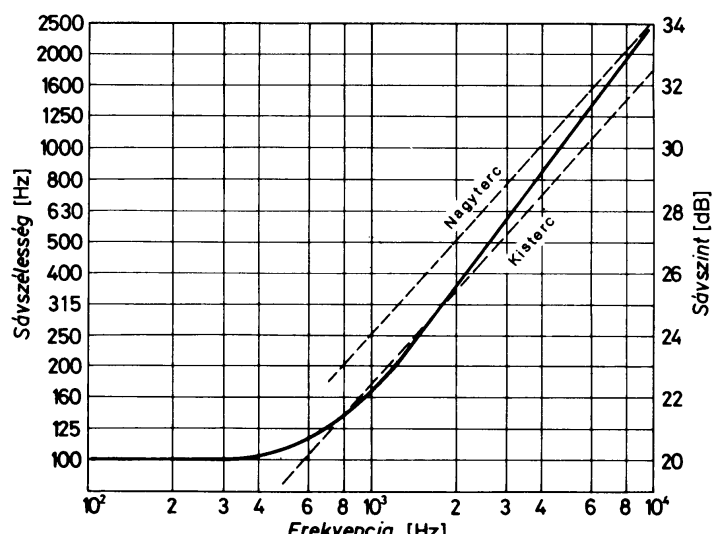
5. Kritikus sáv

Tapasztalatok szerint két közeli frekvenciájú hangforrás eredő hangérzete fizikai összegzéssel határozható meg (pl. azonos szintű hangforrások eredője 3dB-val lesz magasabb), nagyobb frekvenciakülönbségek esetén az eredő hangosságérzet nagyobb lesz, mint amit az intenzitásösszeg eredményezne. Azt a frekvenciakülönbséget, amelyen belül érvényes az energiaösszegzés nevezzük *kritikus sávnak*. (Kritikus sávon kívüli azonos szintű hangforrások eredője egészen 10 phonig emelkedhet.) Példaképpen nézzük meg, hogy két 77 phon-os hangforrás eredő hangosság-szintje hogyan változik, ha növeljük a közöttük lévő frekvenciakülönbséget (6. ábra). Kritikus sávon belül (0 Bark) az eredő 3 phon-nal növekszik, így lesz 80 phon. Az emelkedés eleinte gyors, majd lelassul, s végül eléri a 87 phon eredőt, azaz a 10 phon növekedést.



6. ábra
Két 77 phon-os hangforrás eredő hangosság-szintje a frekvenciatávolság függvényében

A kritikus sáv nagysága a sávközépi frekvenciától függően változik. Kisfrekvenciákon, azaz 1000 Hz alatt közel állandó értékű (100 Hz), míg 1000 Hz felett a harmadoktáv-sávokhoz hasonlóan alakul (lásd 7. ábra).



7. ábra
A kritikus sáv szélesség változása a sávközépi frekvencia függvényében

A szabványosított kritikus sávok lefedik a hallható hangok tartományát. A sávok alulról sorszámozottak, nevük Barkhausen érdemeit elismerve *Bark*.

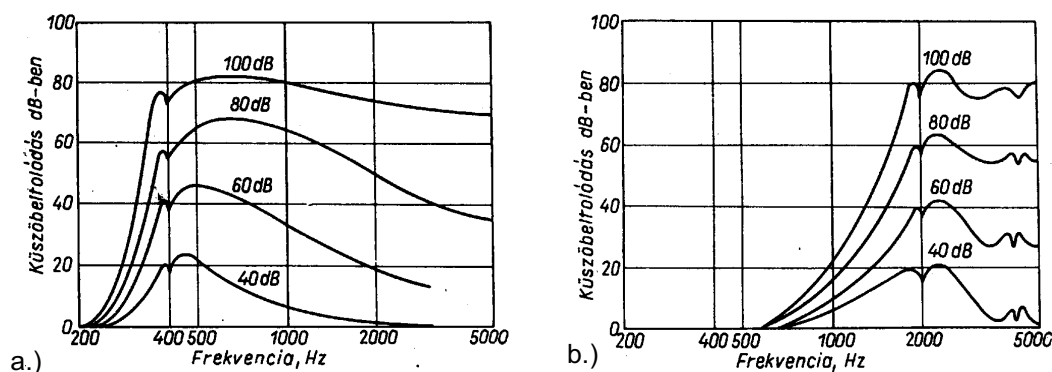
Sávszám [Bark]	Középfrekvencia [Hz]	Alsó-felső határ [Hz]	Sávszélesség [Hz]
1	50	20-100	80
2	150	100-200	100
3	250	200-300	100
4	350	300-400	100
5	450	400-510	110
6	570	510-630	120
7	700	630-770	140
8	840	770-920	150
9	1000	920-1080	160
10	1170	1080-1270	190
11	1370	1270-1480	210
12	1600	1480-1720	240
13	1850	1720-2000	280
14	2150	2000-2320	320
15	2500	2320-2700	380
16	2900	2700-3150	450
17	3400	3150-3700	550
18	4000	3700-4400	700
19	4800	4400-5300	900
20	5800	5300-6400	1100
21	7000	6400-7700	1300
22	8500	7700-9500	1800
23	10500	9500-12000	2500
24	13500	12000-15500	3500

2. Táblázat A hallás kritikus sávjainak elhelyezkedése

Természetesen, ha két hang külön Barkban helyezkedik el attól még lehetnek közeliak. Például a 900 és 1000 Hz-es hangok. Igaz hogy az egyik a 8. a másik pedig a 9.-ben található, viszont frekvencia különbségük csak 100 Hz, ami nem haladja meg ennek a tartománynak a kritikus sávszélességét, a 150-160 Hz-et. Vagyis a kritikus sávok rendszere az aktuális hangoknak megfelelően elszúsztható.

6. Hangelfedés

Egy hangforrás hangjának hallgatását, felismerését egy másik hangforrás kisebb vagy nagyobb mértékben zavarhatja esetleg meg is gátolhatja. *Hangelfedés* akkor következik be, ha a kívánt hangforrás hangját nem vagyunk képesek felismerni. Szokás ezt úgy is magyarázni, hogy a zavaró hangforrás megemeli a hallásküszöböt. A következő példákban a vizsgálandó hang mindig szinuszos lesz, a zavaró pedig lehet ugyancsak szinuszos, valamint keskeny és szélessávú zaj. A hallásküszöb megemelkedését 400 és 2000 Hz-es, 40, 60, 80 és 100 dB-es szintű szinuszhangokra láthatjuk az alábbi ábrákon.



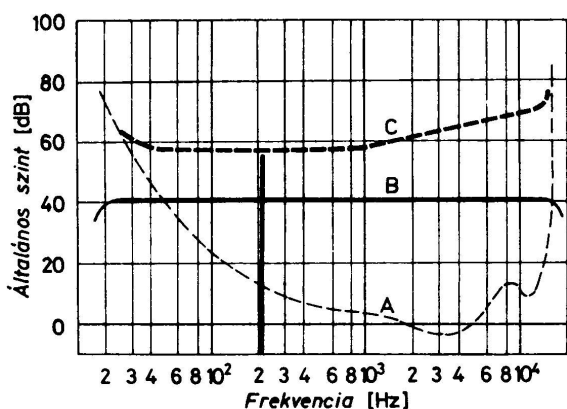
8. ábra

a.) 400 Hz-es hang elfedő hatása b.) 2000 Hz-es hang elfedő hatása

Mindkét ábrán közös az, hogy a magasabb szintű hangok nagyobb területet takarnak, mint az alacsonyabb szintűek. Feltűnő viszont, hogy a kisfrekvenciás zavaró hang csaknem a teljes sávot lefedi a 400 Hz feletti tartományban, ugyanakkor a 4000 Hz-es jel ennél lényegesen kisebb tartományt takar. Ennek az az oka, hogy a hangelfedés aszimmetrikus, azaz a zavaró jel frekvenciája alatti tartományban alig van elfedő hatás. Ha a vizsgálandó jel és a zavaró jel frekvenciája nagyon közeli, akkor fellép a lebegés, amit a görbe behorpadása jelez.

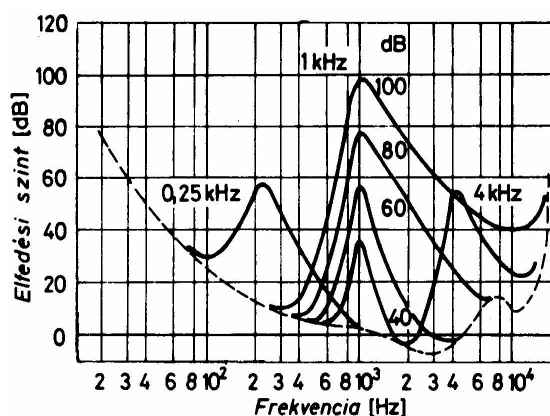
Szélessávú zavaró jelnél (8.c ábra B jelű görbe 40 dB/Hz intenzitásinté). nem jelentkezik a lebegés és az egész tartományban megemelkedik a hallásküszöb (8.c ábra C jelű görbe). Érdeemes megfigyelni, hogy 1000 Hz alatt a hallásküszöb állandó, a zajsűrűség spektrum felett kb 18 dB-rel magasabb. Ugyanakkor 1000 Hz felett emelkedő értéket mutat.

A 8.d ábrán kritikus sáv szélességű zajok hatását látjuk. A zajok sávközépi frekvenciái 0,25, 1 és 4 kHz, sáv szélességei pedig rendre 100, 160 és 700 Hz. A 250 Hz és 4 kHz-s zajsávok csak 60 dB-es szinten szerepelnek. A hallásküszöb emelkedése minden esetben aszimmetrikus, vagyis sávközép feletti elfedés erősebb mint az alatti. Az elfedés, azaz a hallásküszöb megemelkedés aszimmetriája a zavaró hang intenzitásának növelésével (lásd az 1 kHz-es 40, 60, 80 és 100 dB-vel paraméterezett hallásküszöbök) növekszik.



8.c ábra

A szélessávú fehérzaj (B görbe) az A jelű hallásküszöböt C jelű görbévé emeli.



8.d ábra

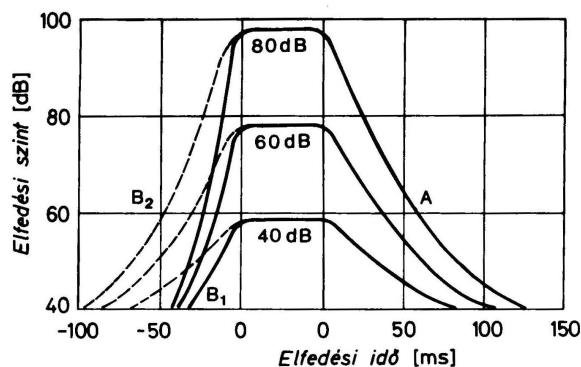
Kritikus sáv szélességű 0,25, 1 és 4 kHz-es zajok hangelfedő hatása..

Megállapíthatjuk, hogy a zajsávok kb a saját intenzitásukkal azonos szinuszelet és annak környékét képesek elfedni, ugyanakkor a szinuszos zavaró hangok hangelfedése csekély, hiszen a saját szintjüknel több mint 20 dB-rel alacsonyabb küszöbeltolódást hoznak létre.

A fentiekből következik, hogy a nagyzenekarokban a vonósok közül a nagybőgőkből kell a legkevesebb, míg az első hegedűkből a legtöbb. Vegyeskórusban is jóval kevesebb basszus kell mint szoprán. Ugyanebből következik az is, hogy a rögzített zenedarabokat az eredeti felvételi szinten kell meghallgatni, mert így megmarad a magas és mély hangok aránya. Az erősítés növelésekor megnövekszik a mélyhangok elfedő hatása.

Ide kívánczik az is, hogy az eredetinél alacsonyabb szintű lehallgatáskor, a Fletcher-Munson görbének megfelelően, a magasak és a mélyek is „eltűnnek”. Az utóbbiak erősebb mértékben. Ezt hivatott korrigálni az ún. fiziológiai hangerőszabályozó.

Az egyidejűleg megszólaló hangok elfedő hatása mellett létezik még az időbeli utó- ill. elő-elfedés. Az *utó-elfedés*, vagyis a zavaró hang megszűnése utáni folyamatosan csökkenő hangelfedés aránylag egyszerűen magyarázható. A csiga gerjesztett részei a hanghatás megszűnése után is még egy ideig csökkenő mértékben ugyan de rezgésben maradnak. A hangelfedés megszűnése átlagosan 100 msec. A 9. ábrán a 40, 60 és 80 dB/Hz intenzitássűrűségű szélessávú zajok utóelfedését (A lecsengő görbék) láthatjuk.



9. ábra. Szélessávú fehérzajok (40, 60 és 80 dB/Hz intenzitássűrűséggel) utó- és elő-elfedése

Az *elő-elfedés* első hallásra lehetetlennek tűnő hatás, ugyanis a más előzőleg megszólaltatott hangot egy későbbi zavaró fogja leárnyékolni. Az idegimpulzusok eltérő haladási sebessége a jelenség magyarázatának. A nagyobb intenzitású hang impulzusai gyorsabban haladnak és ily módon utolérhetik a korábbi idegimpulzusokat. Ez a jelenség tehát már nem a csigában, hanem részben az idegpályákon, részben az agyban következik be. Az ábra B görbeserege adja meg az elő-elfedés időbeli lefolyását. (Ezek közül B₂ az azonos fülű, míg B₁ görbék a különbözőfülű elfedésre vonatkoznak. A zavarójel természetesen most is a 40, 60 és 80 dB/Hz intenzitássűrűségű fehérzaj.)

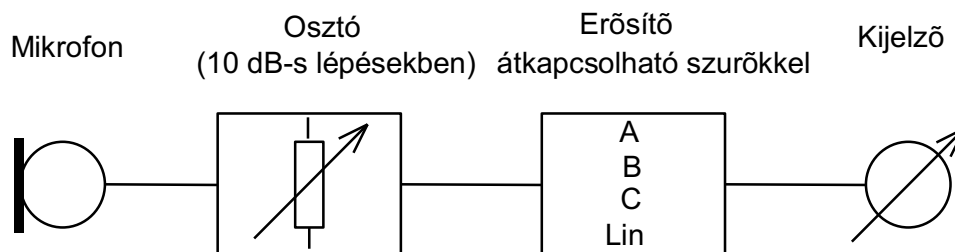
7. Eredő hangosság

A gyakorlati életben a hang és zajforrások csaknem mindig összetett hangjeleket állítanak elő. Ezek hangossága a Fletcher-Munson görbék alapján nem állapítható meg. Elméletileg használható a definíció szerinti összehasonlító mérés, de ez a gyakorlatban kivitelezhetetlen. (Gondoljunk pl. egy zajos nagyüzemre, vagy közlekedési zajra. Ilyen esetekben a zajforrás ki-be kapcsolása és az 1000 Hz-es referenciával történő összehasonlítása megoldhatatlan feladat.) Az alábbiakban ismertetünk néhány megoldást:

a.) Phonmérő

A feladat közelítő megoldása lehetséges egy olyan mérőműszer használatával, amelyik a jel különböző frekvenciájú komponenseit a Fletcher-Munson görbék alapján súlyozza, összegezi és az eredményt dB-ben kijelzi. A műszer használata gyors, egyszerű és könnyen reprodukálható. A három, különböző karakterisztikájú (A, B és C) szűrő a kis, közepes és

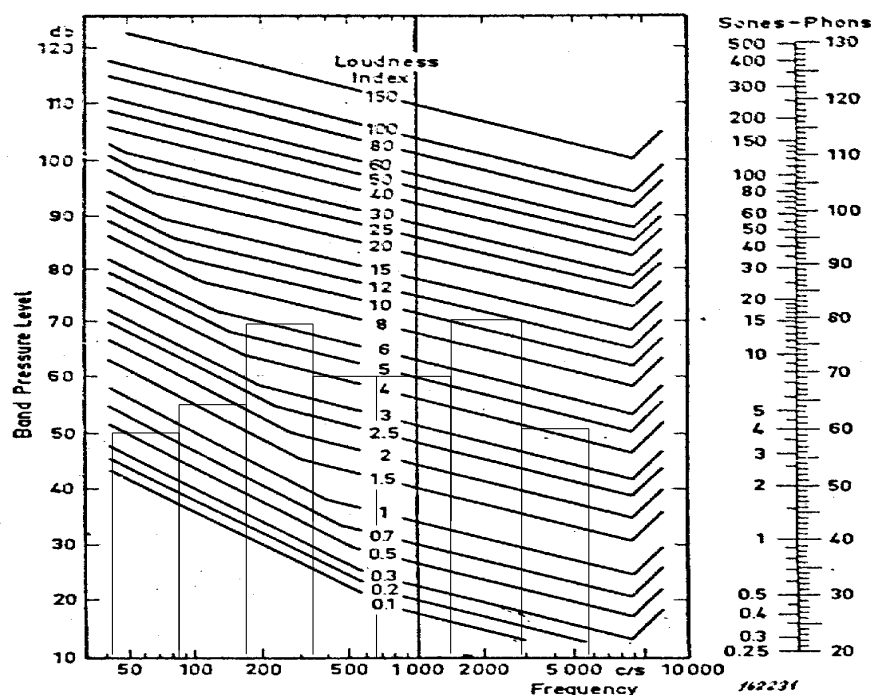
nagyszintű jelek kiértékeléséhez szükséges, ezenkívül lehetőség van az egyenes karakterisztika beállítására is. A gyakorlatban szinte mindig az A súlyozógörbét használjuk. A mutatott érték természetesen nem azonos az igazi *phon* értékkel, hanem attól a mérendő hang jellegétől kisebb vagy nagyobb mértékben eltér. (Pontos eredményt csak egy szinuszhang mérésekor kaphatunk.) Az egyértelműség kedvéért a mért adatokat dB(A), dB(C) stb. kell megadni.



10. ábra Phonmérő felépítése

b.) Stevens módszer

A módszer az oktáv vagy tercsávokban mért hangnyomásszint értékekből számítja ki az eredő hangosságot. Az egyes sávokban mért dB értékeket a sávközépi frekvencia értékénél kell a Stevens-diagramba (11. ábra) berajzolni, és a hozzátartozó S_i értékeket *sonban*



11. ábra Stevens-diagram az eredő hangosság számításához.

(A bejelölt oktávsvávi hangnyomásszintek a következők: 63 Hz - 50 dB, 125 Hz - 55 dB, 250 Hz - 70 dB, 500 Hz - 60 dB, 1000 Hz - 60 dB, 2000 Hz - 70 dB, 4000 Hz - 50 dB. Az oktávsváv közepén leolvasható hangosságértékek rendre: 0.6, 1.7, 6, 4, 5, 11 és 4 son.)

leolvasni. A Stevens-diagram a keskenysávú zajjal mért hangosságszint törtvonalas közelítésű görbéit tartalmazza. Lényeges különbség az, hogy a görbék nem *phon*, hanem *son* értékekkel vannak paraméterezve. A leolvasott értékek maximumát N_m -el jelölve, az eredő hangosságot a következő képlettel kapjuk:

$$N = N_m + K \left[\left(\sum_i N_i \right) - N_m \right]$$

ahol a K súlyozófaktor értéke 0.3 oktávcsávokra és 0.15 tercsávokra. Ily módon a kritikus csávokon belüli energia szerinti összegzés már a kiinduláskor (a mérésakor) teljesül, az elfedés hatását pedig a maximális érték kiemelésével és a maradékösszeg súlyozásával veszi figyelembe.

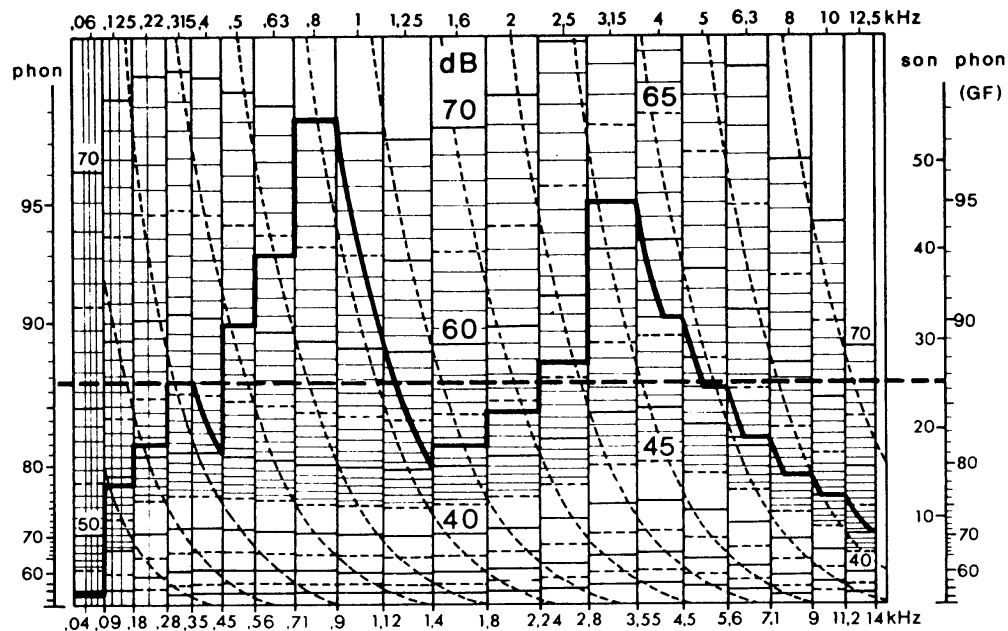
A zajméréseknél használatos szabványos oktáv- és tercsávok a következők:

Oktávcsávok			Tercsávok		
Sávközép	Átfogás	Sávszélesség	Sávközép	Átfogás	Sávszélesség
			20	18-22,5	4,5
			25	22,5-28	5,5
31,5	22,5-45	22,5	31,5	28-35,5	7,5
			40	35,5-45	9,5
			50	45-56	11
63	45-90	45	63	56-71	15
			80	71-90	19
			100	90-112	22
125	90-180	90	125	112-140	28
			160	140-180	40
			200	180-225	45
250	180-355	175	250	225-280	55
			315	280-355	75
			400	355-450	95
500	355-710	355	500	450-560	110
			630	560-710	150
			800	710-900	190
1000	710-1400	690	1000	900-1120	220
			1250	1120-1400	280
			1600	1400-1800	400
2000	1400-2800	1400	2000	1800-2250	450
			2500	2250-2800	550
			3150	2800-3550	750
4000	2800-5600	2800	4000	3550-4500	950
			5000	4500-5600	1100
			6300	5600-7100	1500
8000	5600-11200	5600	8000	7100-9000	1900
			10000	9000-11200	2200
			12500	11200-14000	2800
16000	11200-22500	11300	16000	14000-18000	4000

3. Táblázat. Szabványos oktáv- és tercsávok

c.) Zwicker-módszer

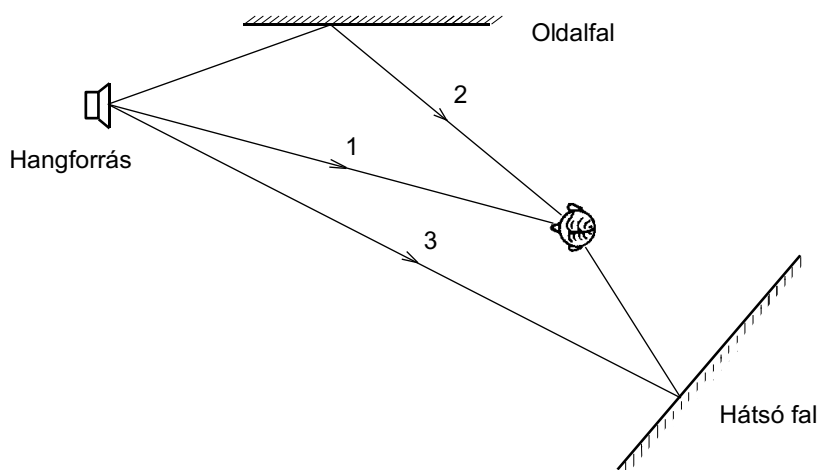
A legbonyolultabb, viszont a legpontosabb eredményt szolgáltató módszer. Csak tercsávos mérési eredmények alapján használható, és speciálisan kidolgozott kiértékelő lapokat kell használnunk (12. ábra). A tercsávok dB-ben mért adatait kell berajzolni úgy,



12. ábra A Zwicker-féle hangösszeállítás kiértékelő lapja.

hogy az esetleges hangelfedésnél a ferde szaggatott görbét, illetve azzal párhuzamosat kell berajzolnunk. (Minden egyes tercsáv saját dB skálázású, mivel a közös függőleges beosztás phonban ill. sonban adott.) Az így kapott terület átlagmagassága (az ábrán a szaggatott vastag vízszintes vonal) adja az eredő hangosságot sonban vagy phonban.

8. Haas-hatás

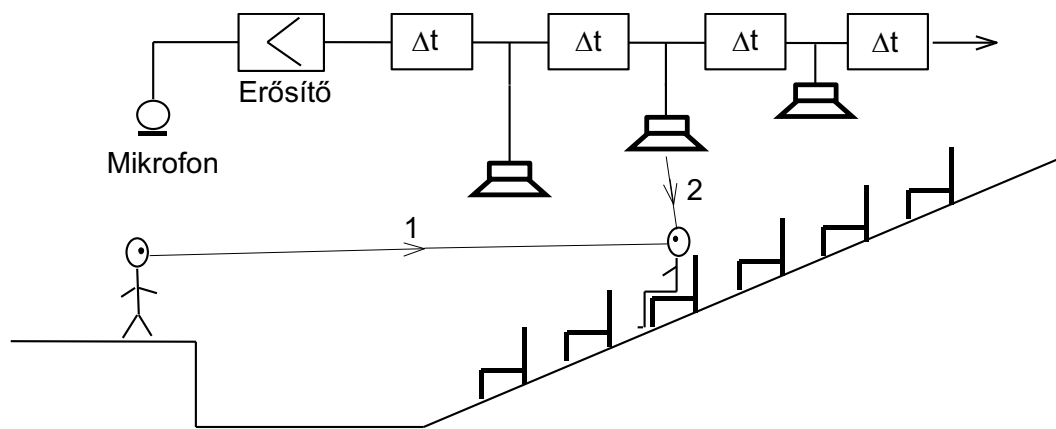


13. ábra Többutas hangterjedés (1. közvetlen hang, 2. oldal- 3. hátsó reflexió)

Ha egy hangforrásból több úton érkeznek hanghullámok a megfigyelőhöz, akkor az először beérkező hanghullám alapján azonosítjuk a hangforrás *irányát* és a hang *minőségét*, feltéve, hogy a közvetlen hang (1) és a reflektált hangok (2,3) között az időkülönbség kisebb, mint 30 msec és a szintkülönbség sem nagyobb, mint 6-8 dB (lásd 13. ábra). Végeredményben hangosabban (ugyanakkor irányhelyesen) halljuk a hangforrást, mint szabadterben, reflexiók nélkül. Ezt a jelenséget már régóta használjuk a

hangellátás passzív javítására. (Ha az időkülönbség meghaladja az 50 msec-et, akkor *visszhangot* hallunk.)

A hangforrásból a kedvezőtlen irányban haladó hullámokat különféle terelő felületekkel (proscénium, mennyezet stb.) a nézők felé irányítjuk. Újabb formája a jelenség hasznosításának a szabadtéri hangosítás (14. ábra).



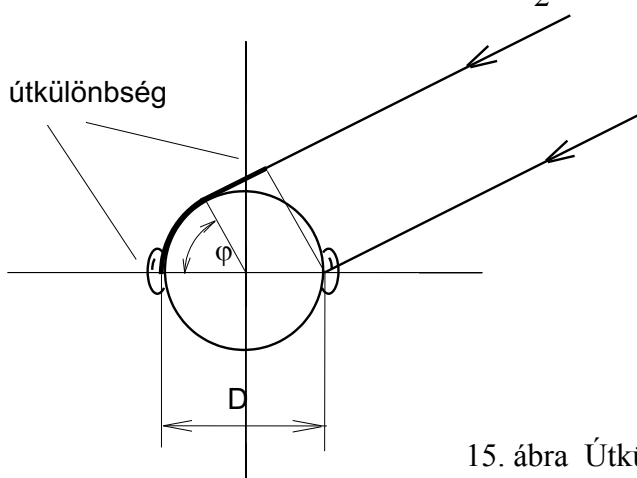
14. ábra Szabadtéri hangosítás

Az ábrán látható, hogy a néző hangellátása a színpadról közvetlen (1) hang és a mikrofon által felvett, erősített és hangszóróval lesugárzott hang (2) összegének formájában valósul meg. Miután a (2) útvonal lényegesen rövidebb, mint az (1)-es, ezért az erősített jel útjába késleltetéseket kell beépíteni. A hátrafele növekvő késleltetés célja az, hogy a közvetlen hang előbb érkezzon a nézőhöz, mint az erősített.

9. Irányhallás és a koktélparti effektus

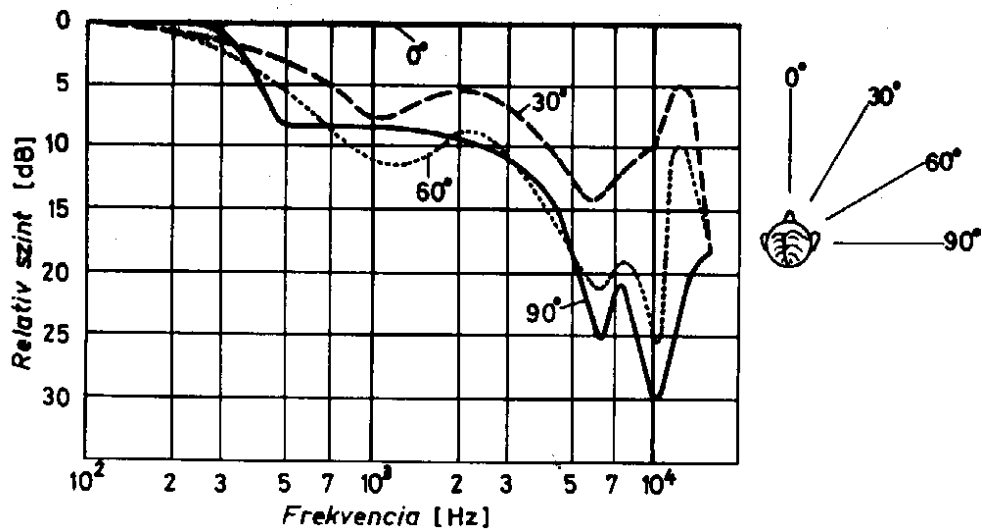
A hangforrás felől beérkező hanghullámok irányát azért tudjuk jól megállapítani, mivel azok a két fülünkben eltérő hangnyomásértékek jelennek meg. Az így fellépő különbséget feldolgozva állapítjuk meg a hangforrás irányát. Az *időkülönbséget* a d útkülönbség alapján számíthatjuk. Az útkülönbség (vastag vonal)

$$d = \frac{D}{2}(\sin \varphi + \varphi)$$



15. ábra Útkülönbség ferdeirányú beesésnél

függ a fej átmérőjétől (D) és a beesés szögétől (φ). Legnagyobb különbséget (kb. 1 msec) oldalirányú, azaz 90°-os beesésnél kapjuk. A fejátmérő kb. 30 cm. Szemből érkező $\varphi=0$ hanghullámok esetében az út-, ill. időkülönbség természetesen nulla.



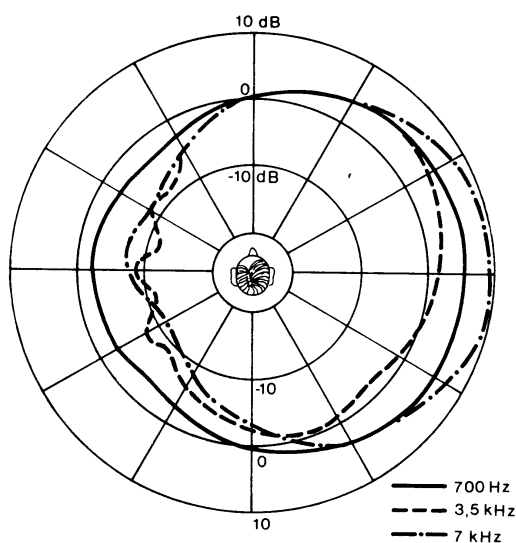
16. ábra. Szintkülönbség különféle beesési szögeknél

A fej árnyékoló hatása miatt, különösen nagyfrekvencián, elég nagy *szintkülönbségek* alakulhatnak ki ferdeirányú hangforrások esetében. Oldalirányú, azaz 90°-os beesésnél a *szintkülönbség* (16. ábra) elérheti a 30 dB-t is. Kisfrekvencián, ahol a hullámhossz jóval nagyobb a fejátmérőnél, a szintkülönbség minimális.

A fül iránykarakterisztikája alapján (17. ábra) látható, hogy 700 Hz felett egyfülű irányhallás is létezik

Ezekből az adatokból az derül ki, hogy kisfrekvencián (800 Hz alatt) a fáziskülönbség, míg nagyfrekvencián (1 KHz felett) az intenzitáskülönbség alapján állapítja meg fülünk a hangforrás irányát. Mindez mozdulatlan fejre érvényes. Amennyiben fejünket mozgatjuk, akkor önkéntelenül is a hangforrás irányába fordulunk, miáltal az iránymeghatározás pontosabbá válik

Az irányérzékelés pontossága az előlről érkező és 500-1000 Hz közötti hangokra a legpontosabb, kb 1°-3°.

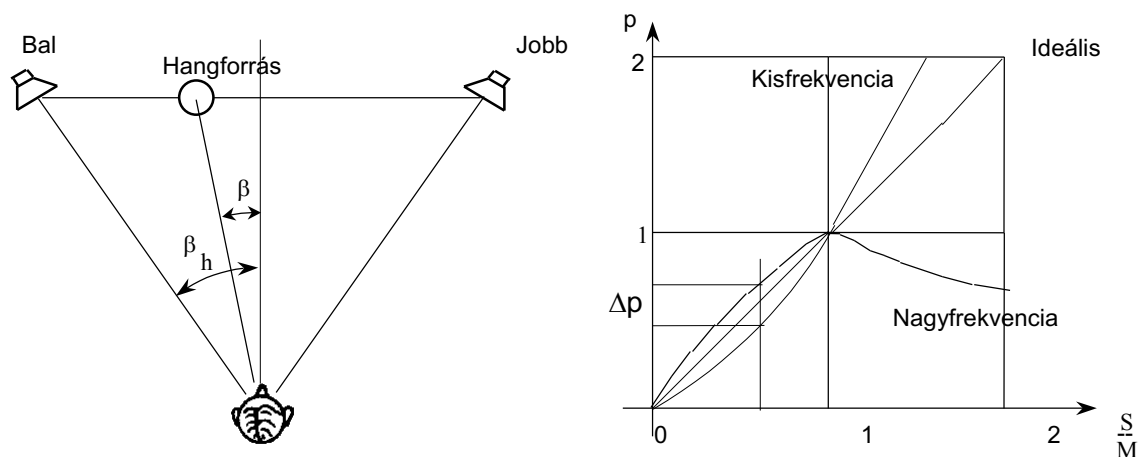


17. ábra A jobb fül irányérzékenysége

Az irányhallás egy különleges változata a *koktélparti effektus*, ami az egyidejűleg sok hangforrás közül történő kiválasztás képességét jelenti. Tipikus eset, hogy az ilyen

rendezvényeken sok ember összegyűlik, és kisebb nagyobb csoportokban kötetlen beszélgetésbe kezdenek, s közben esznek, isznak. Egyidejűleg tehát sokan beszélnek, mégis képesek vagyunk ilyen zajos környezetben is egy általunk kiválasztott személy mondanivalójára figyelni. Természetesen ez elég nagy idegi megterhelést jelent.

A *sztereo irányhallás* azt jelenti, hogy két hangszóróból érkező hanghullámokkal képesek vagyunk tetszőleges irányú virtuális hangforrást előállítani. A 18. ábra bal oldalán látjuk a mérési elrendezést. A kísérleti személy a hangforrás helyét nem látja, s a bal és jobb oldali hangszórók jeleinek arányát tudja állítani. A jelarányt addig kell állítania, míg megítélése szerint a felváltva megszólaló valódi hangforrás és a virtuális hangforrás egybeesnek.



18. ábra. Sztereo irányhallás vizsgálata

Vezessük be az alábbi jelöléseket a jelek arányára és a két hangszóró közötti pozícióra:

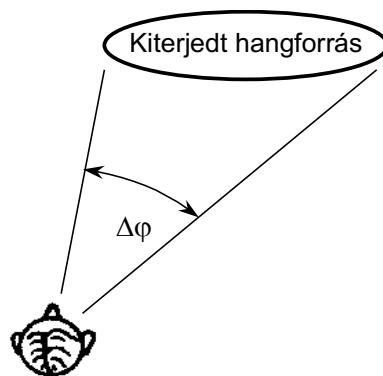
$$S = B - J \qquad M = B + J \qquad p = \frac{\sin \beta}{\sin \beta_h}$$

Az ábra jobboldalán a mérési eredményeket látjuk. Ezek szerint a középső irány ($S/M=0$ és $p=0$) kis és nagyfrekvencián egyaránt jól beállítható, és ugyancsak jól lokalizálható a szélsőhely $S/M=1$ és $p=1$). Kisfrekvenciákon (pont-vonal) lehetséges a hangszórókon kívüli virtuális hangforrás leképzése, ugyanakkor nagyfrekvenciákon (folytonos vonal) erre nincs lehetőség. A Δp egy szélesspektrumú hangforrás lokalizációbeli eltérését adja, vagyis a hangforrás a hangképben bizonytalanul jelenik meg.

10. Hangforrás mérete és távolsága

A hangforrás *méretére* elsősorban az jellemző, hogy mekkora szögtartományban ($\Delta\varphi$) érkeznek a hangok a hangforrásból

Hangforrás *távolságának* meghatározása eléggé pontatlan. Régebbi hangemlékek felidézésével csak becsülni szoktuk, például a hangosság vagy a megváltozott hangspektrum alapján, ugyanis a magasfrekvenciás összetevők jobban csillapodnak a távolság növekedésével, mint a mélyek.



19. ábra. Hangforrás kiterjedése

Irodalom:

Valkó Iván Péter: Az elektroakusztika alapjai
Akadémiai Kiadó, Budapest 1963.

Dr. Halm Tibor: Hallástan (Physiologiai Acustica)
Medicina Könyvkiadó, Budapest 1963.

Tarnóczy Tamás: Zenei akusztika
Zeneműkiadó, Budapest 1982

Tarnóczy Tamás: Teremakusztika I.
Akadémiai Kiadó, Budapest 1986.

Lamoth Emil: Elektro-akusztika
Műszaki Könyvkiadó, Budapest

Szentmártony Tibor: Zajtalanítás
Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1963

F. Takács: Localization Of Stereo Sound Using Two Loudspeakers
Periodica Politechnica, Electrical Engineering-Electrotechnic
Vol. 12. No. 3. Budapest 1968.

