

# **Pap János**

## **A ZENEI AKUSZTIKA ALAPJAI**

### **(egyetemi jegyzet)**

**Liszt Ferenc Zeneművészeti és Zenetudományi Egyetem**  
**Budapest,**  
**2013**

## **1. A zenei akusztika tárgya, a hang fogalma**

A hangok világa csodálatos, magával ragadó, önmagában és az emberi kultúrához kapcsoltnak is. A beszéd és a zene az ember legnagyobb teljesítményei közé tartozik. Talán elsőre úgy tűnik, felesleges ezt a szép világot a tudomány eszközeivel elemeire bontani és feltárni belső összefüggéseit, tulajdonságait. Mégis rá kell szánunk magunkat. Azzal a szándékkal kell közelítenünk a tudáshoz, ahogyan hangszereinkhez: olthatatlan kíváncsisággal és szeretettel. A tudás teljesebbé tesz, a tudás „megszépít”, a tudás, ha kellően mély, bölcsességet ad. Az igazság megismerésének háromféle útja van: a vallásé, a művészeté és a tudományé. Ez utóbbi az, ami megtanulható.

\*

A hangtan, avagy akusztika, a hangjelenségekkel foglalkozik, ide értve az autók zaját, a repülőszárnyak rezgését, a delfinek hangképzését, a fül működését, az ultrahangok terjedését, a hangszerek megszólalását, a falak hangátvezetését és így tovább... Az akusztikán belül a zenei akusztika a zenéhez kapcsolódó akusztikai jelenségeket tárgyalja és kutatja, a megszólalástól a hangterjedésen, halláson át a hangrögzítésig. Van tehát benne valami a hallástanból, a fizikai akusztikából, a teremakusztikából, a pszichoakusztikából és az elektroakusztikából. Ez utóbbival a stúdiótechnikai külön kurzusok miatt most nem foglalkozunk.

*A fizika tudománya szerint a hangok kis amplitúdójú mechanikai rezgések; a fiziológia tudománya olyan érzeteknek minősíti a hangokat, amit a levegőbeli nyomásingadozás a hallószervünkben kelt. Hétköznapi értelemben a hangok tehát velünk, emberekkel kapcsolatosak. Ezt jelzi a kicsi amplitúdó, ill. a hangérzet kritériuma.*

Fontos, hogy *a rezgés forrását rugalmas közeg vegye körül, ami a rezgést közvetíti.* Ezért lehet a legjobb hangszigetelő a vákuum. Nem szükséges, hogy maga a forrás minden esetben mechanikai jellegű legyen (gondoljunk csak a villám keltette dörgésre, műszálas pulóverünk szikráinak pattogó hangjára). Ellenben a hang létrejöttéhez az adott fizikai hatásnak a rugalmas közeget rezgésbe kell tudni hoznia, mely a hangot a fülünkhöz vezeti el.

Noha világunkban az elsődleges rezgés közvetítő matéria a levegő, következetesen a rugalmas közeg megnevezést használjuk, utalván arra, hogy folyadékokban és szilárd anyagokban is terjedhet a hang.

Amikor hangot elemzünk, amikor egy hangszer milyenségére vagyunk kíváncsiak, ügyelnünk kell arra, hogy az eseményeket mindig teljességükben szemléljük. Bármit kihagyva az akusztikai láncból, tudásunk hiányos lesz.

A hangokhoz tartozó *akusztikai lánc*:

*hangforrás - hangtér (rugalmas közeg) – hallgató.*

Csak az emberi füllel nem hallható infra- és ultrahangok ismerete óta terjed ki a hang fogalma az emberi érzékelésen túli világra is.

*Infrahangok a 16-20 Hz alatti hangok, ultrahangok a 16-20 kHz feletti hangok.*

A hang tulajdonságai szerint makro- és mikrojellemzőkkel írható le. Makrojellemzői a *hangmagasság, a hangerő, a hangszín és az idő*. Hangforrások esetében ide sorolandó még a forrás keltette *hangtér* is, ami szintén önálló entitás.

Mikrojellemzők a *hangmagasság, hangszín és hangerő időbeli változásai és a tranziens (nagyon rövid időtartamú átmeneti) jelenségek*.

A hangok alaptípusai az egyetlen, szabályos rezgést tartalmazó *szinusz-* vagy *tiszta-hang*, a szabályos rezgések hallástartományon belüli véges sokaságát tartalmazó *zenei hang*, és a végtelen sok szabálytalan rezgést tartalmazó *zaj* (részletesebb leírásukat lásd a 3.1 fejezetben).

A hangok és általában minden rezgés természetes körülmények között lecsillapodnak. A csillapítás mértékét a hangforrás belső és külső energiaveszteségei határozzák meg. Jellemzésére a csillapítási állandót (jelölése  $\alpha$  vagy  $\delta$ ), ill. ennek reciprokával kifejezett csillapítási együtthatót - lecsengési időt- (jelölése  $\tau$ ) használjuk. A csillapítási együttható azt az időtartamot jelzi, ami alatt a rezgés amplitúdója  $1/e$ -ed ( $e = 2.718\dots$ ) vagy  $1/1000$ -ed részére csökken.

A fütty csak addig szól, amíg fújjuk a levegőt, csillapítási állandója tehát nagy. Hasonló érvényes az emberi beszédre is. Micsoda káoszt, hangzavart okozna, ha szavaink nem halnának el a levegőben, és elhangzásuk után minden egyes hangot hosszú percekig hallanánk!

A rezgő fémhúrok, fémlemezek hangszerként alkalmazva általában túl sokáig szólnak. Gondoskodni kell hangjaik mesterséges tompításáról. A hangszeres tompító mechanizmusok kitalálása zenekultúránk fejlődésére mindenkor forradalmian hatott.

## 1.1 A rezonancia

A fokozott csillapítás megléte egyes rezgő rendszereket arra ítélt, hogy csupán rövid, nyikkanó, csattanó hangokat hoznak létre. Ha az elvesztett energiát pótoljuk, azaz a csillapodó rendszert állandó rezgésre kényszerítjük, mégpedig saját mozgásának ritmusában, akkor különlegesen stabil fizikai rendszert kapunk, ami emberi léptékkal mérve kiváló információ hordozó lesz, mert hosszabb időn keresztül képes a hangok jellemzőit megőrizni. Az emberi memória szükségleteit tehát a *rezonancia* jelensége (a gerjesztett és a gerjesztő rendszer frekvencia azonossága) maximálisan kielégíti, mert erős, stabil jelek létrejöttét teszi lehetővé. A rezonancia nem sérti meg az energia megmaradás törvényét: a rendszer gyűjti, tárolja és nem nyeri az energiát. A nagyfokú rezgési amplitúdó növekedést lehetővé tevő kicsi csillapítású rendszerek éppen a tárolás meghosszabbodott folyamata miatt rezegnek be lassabban és érik el később stabil állapotukat. A szakzsargon ezt úgy fogalmazza meg: a jó rezonátorok „lusták”. Rezonátor lehet vékony falemez, valamiféle légüreg, egy cső légoszlopa, bármi, ami

könnyen rezgésbe hozható. (Nem véletlen tehát, hogy egy jóllakott elefánt rossz rezonátor.)

A rezonancia során a rendszer általában több energiát vesz fel, mint amennyit lead. Ennek köszönhetően a rezgési amplitúdó megnő. Akár rezonancia katasztrófa, az amplitúdó hihetetlen mértékű megnövekedése is bekövetkezhet. Egy öreg pesti villamos, ha már meglazultak a rögzítései, zörög, kattog, rázkódásával az utasok talpát csiklandozza; az összetákolt fahíd a menetelő katonák alatt leszakad. Hogy a rezonancia katasztrófa nem következik be minden esetben, az annak is köszönhető, hogy a rezgő rendszerek csillapítása az amplitúdó növelésével megnő. Egy jól megépített rendszernél tehát a csillapítás növekedésével egyre több befektetett energia használdik el. A felesleg felemésztyődik, a rendszer stabil rezgőmozgást végez. Bárki könnyedén kontrollálhatja ezt a szabályozási folyamatot, amikor énekel.

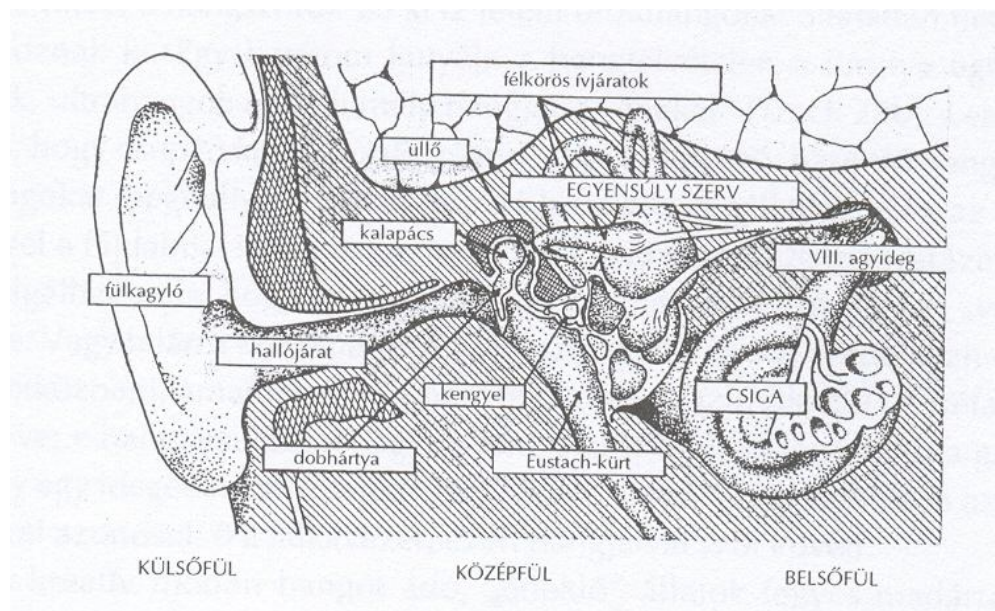
\*

A tanulást talán meglepő módon az akusztikai lánc végállomásával fogjuk folytatni, a hallással. Részben mert minden dolgok mértéke az ember, másrészt pedig, mert hallásélménye és erről véleménye minden zenésznek van, míg a hangok fizikai leírása, elemzése, a lehető legtávolabb áll gondolkodásának módjától.

## 2. AZ EMBERI HALLÓSZERV ÉS A HALLÁS MECHANIZMUSA

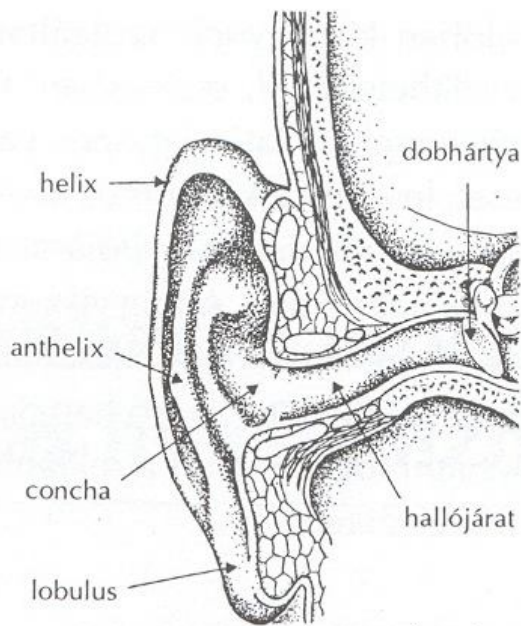
### 2.1 A fül szerkezete és működése

A fül (lásd 1. ábra) legfőbb funkciója a hangforrástól hozzánk érkező hangok kódolása, ill. begyűjtése, felerősítése és irányuk meghatározása. Érzékenységét tekintve atomfizikai műszer, ami önmagában, érzékszervi hasznosságától



1. ábra A fül sematikus szerkezete

eltekintve is maga a csoda. Felépítése összetett. Elhelyezkedésük szerint elnevezett, jól elkülöníthető részekből áll: külső-, közép- és belsőfölből.



**2.ábra A külsőfül**

### 2.1.1 A külsőfül

Ha a fülre gondolunk, először a fülkagyló jut az eszünkbe, hiszen ez látható szabad szemmel. Az ember fülkagylója (valamint az emberszabású majmoké) jócskán eltér a többi emlős fülétől, amelyek kúpos formájúak és izmokkal mozgathatók. Fülkagylónk bőrrel fedett, rugalmas porcból álló szerv, izmai elcsökevényesedtek. Ha tehát valakinek mégis mozog a füle (ami azért mégiscsak komoly tudomány), akkor valószínűleg a fejbőrét ráncolja. A külsőfület a fülkagyló és a hallójárat alkotja. A középfültől a dobhártya választja el (lásd 2.ábra).

Ha megvizsgáljuk, hogy a fülkagyló jellegzetes méreteinek (hosszúság, szélesség, stb.) arányszámait közül melyik emelkedik ki az embernél a többi emlőssével összehasonlítva, azt találjuk, hogy a *concha* (görögül: kagyló), a hallójárat melletti bemélyedés (2.ábra).

Egyébként a legkisebb fülmérete a busman nőknek van, a legnagyobb pedig a patagónoknak. Idős korban a fül tovább nő, az orrhoz hasonlóan. A fülforma tipikus, a családtagokra jellemző, tehát örökölhető, ezért az igazságügyi orvostanban bizonyító erejű. Hogy megnyugtassuk mindazokat, akik őseiktől szép, elálló füleket kaptak, közölnünk kell, hogy az elálló fülforma dominánsan öröklődik a fejhez simulóhoz képest, mivel hangok utáni térbeli tájékozódásnál előnyt jelent.

A csecsemő füle általában ellapított és csak kétéves kora után formálódik ki végleges alakja.

A hallójárat hossza 2.2-2.3 cm. Megfigyelték, hogy a fül dugó hangcsillapító hatása lecsökken, ha csak a hallójárat külső részét zárja le, ahol a bőr alatti rész inkább porcos, mint csontos.

A *concha* és a hallójárat mérete azért különösen fontos, mert a rezonanciafrekvenciáikkal egyező hangok kiemelődnek.

Különleges, de nem ritka eset, ha a fülkagyló visszakanyarodó pereme, a *helix* és a mellette lévő hosszanti kiemelkedés, az *anthelix* egybenő, aminek következtében a *concha* deformálódik. E speciális fülforma a szakirodalomban külön nevet kapott: *Wolfgang Amadeus Mozart* nyomán *Mozart-fülnek* nevezik, aki apai ágról öröklötten ilyen sajátos formájú bal füllel rendelkezett.

A fülcimpa viszonylag érzéketlen, zsírral töltött, nem véletlen tehát, hogy a fülbevalót általában itt hordják.

Meg kell jegyezzük, hogy az akupunktúrán belül a fülakupunktúra önálló tudománynak számít, mivel a fülkagylón a teljes emberi test reprezentációs pontjai megtalálhatók. A szem, a látás nevezetes pontja éppen a fülcimpára esik. Az akupresszúra hívei szerint rendszeres dörzsölgetésével javulhat a látásunk (?!).

De mi fülkagylónk, hallójáratunk hallástani funkciója?

Valójában a külsőfül nem vizsgálható önmagában, hiszen ott a fejünk is; összetett antennarendszert alkotnak. A külsőfül elsőrendű feladata, hogy a sérülékeny, érzékeny belső részekhez elvezesse a hangot. Ez egyben védőszerep is. A hallójárat szőröcskéi pl. apróbb rovarok ellen védik a fület.

A külsőfül feladata az is, hogy a hangokat felerősítse. Azonban hangszínszűrő tulajdonságával szintén számolnunk kell. Különösen a magas hangok tartományában jelentős a hatása. Elegendő csak a kezünket a fülünk mögé vagy elé tenni, és máris halljuk a változást. Közelítsünk a fülükhöz egy poharat nyílásával felfelé. A környezet hangjaiból a pohár ürege a külső fülhöz hasonlóan a csak rá jellemző sajáthangokat fogja kiemelni, azaz módosítja a beérkező hangok hangszínét (kagylóeffektus). Ha rászorítjuk a fülünkre a poharat, akkor pedig saját fülünk (testünk) hangjait halljuk felerősítve.

A külsőfül a vízszintes síkból érkező hangok közül, beesési szögtől függetlenül különösen a 2.6 kHz körülieket emeli ki, ami megegyezik egy átlagos fülmodell első rezonancia-frekvenciájával. Az ennél magasabb hangokra kb. 5 kHz-ig a concha üregének rezonanciája révén erősítést tapasztalunk. A 10 kHz körüli nagyfokú dinamikaesés, rossz hangenergia-átvitel szintén a conchában létrejövő, de fázisellentétes, azaz rezgés kioltó visszaverődésekből alakul ki.

A külsőfülnek talán legfontosabb szerepe az irányhallásnál van. A hátulról jövő hangok a fülkagyló árnyékoló hatása miatt halkabbá és tompábbakká válnak. Külföldi kutatók Tarnóczy Tamás ötlete nyomán elvégeztek egy kísérletet, aminek eredményeként (műfüleket kicsi csövekre erősítve, ellentétes oldalakon, hátrafelé fordítva) az elől-hátul érzet felcserélődött.

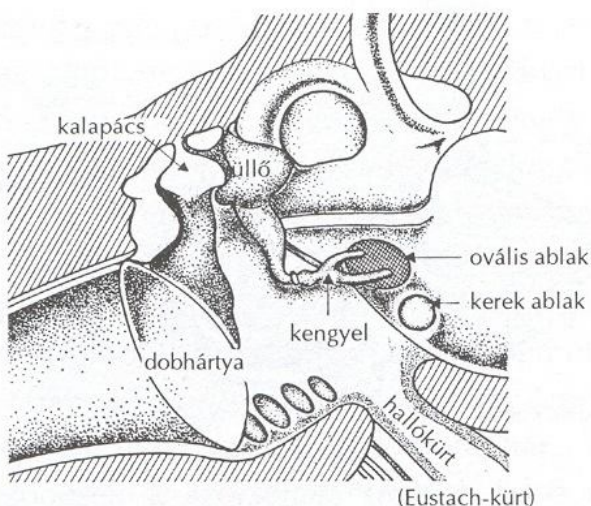
A felülről és alulról érkező hangokat már nehezebben tudjuk azonosítani, mivel frekvenciafüggő, hogy a hangforrás helyét hová képzeljük.

Az oldalirányú hallásnál nagy előny, hogy két fülünk van. A hangforráshoz közelebbi fül, különösen 3 kHz felett, erősebb hangot hall a fej árnyékoló hatása miatt. Mélyebb frekvenciájú hangoknál pedig nagy segítség, hogy a két fülbe időeltéréssel érkeznek be a hangok; a hangforrással azonos oldaliba kb. 0.5 ms-al korábban. Ha tehát csak egy fülünk lenne, mindenképpen a hangok irányába kellene tudnunk fordítani, és valószínűleg a fejtetőnkön helyezkedne el, ami a szemüveggyártástól a kalapgyártásig számos egyéb problémát is felvetne.

### **2.1.2 A középfül**

A középfül a dobüregben elhelyezkedő, jellegzetes formájú hallócsontokból (kalapács – üllő - kengyel) és a hozzájuk tapadó izmocskákból (lásd 3.ábra), valamint a garatot a dobüreggel összekötő fülkürtből (*Eustach-kürt*) áll. Ahogy már említettük, a külsőfültől a dobhártya választja el.





### 3.ábra A középfül

kisgyerekkori betegség, a középfülgyulladás gyógyítási módja gyakorta okozott halláskárosodást. Ugyanis csak a dobhártya átszúrásával lehetett a gyulladás során keletkező váladékot eltávolítani. Az egy-kétszeri felszúrás még nem veszélyes a hallásra, de a többszöri beavatkozás már rontja a hallás élességét.

A dobhártyához a kalapács középen, belülről illeszkedik, és annak rezgéseit továbbítja a fül belseje felé.

A dobhártya a levegőrezgést membránrezgéssé alakítja át. Ha ez nem történne meg, azaz a levegő hanghullámai a belsőfül folyadéktömlőit közvetlenül hoznák rezgésbe. Emiatt a hangenergiának csupán 0.1-1 százaléka jutna be a fülbe a levegő és a folyadék mechanikai ellenállásainak (impedanciáinak) jelentős eltérése miatt. A dobhártya tehát rezgésátalakító szerepet tölt be, és ezt a feladatát bizonyos határok között kiválóan látja el, mert impedanciája alig tér el a levegőétől. De csak mély frekvenciákon vezeti jól a hangot, magas frekvenciákon ez a képessége fokozatosan elromlik. Sajátrezgésének legelső módusa 1400 Hz körüli.

Mivel a dobhártya feladata rezgésközvetítés és nem rezgéskeltés, az ember számára nem előnyös, ha a membrán sajátrezgéseit a hangjelekhez hozzáadja. Magasabb hangokon, ahol már a dobhártya viselkedése zavaró, a rezgésközvetítést fokozatosan a koponyacsont veszi át. Tehát a dobhártya csak mély frekvenciákon vezeti jól a hangot, ezért 1400-1500 Hz alatt légvezetéses hallásról; 3000 Hz felett már a koponyacsontnak köszönhető csontvezetéses hallásról; 1500 Hz és 3000 Hz között pedig a kettő kombinációjáról beszélünk.

A fülkürt normális körülmények között zárva van. Ha változik a külső légnyomás (pl. hegyvidéken való utazáskor vagy repülés közben a fül „pattogása”, „bedugulása” jelzi), nyeléssel, ásítással nyitjuk meg. Ilyenkor a dobhártya belső oldalán lévő légnyomást tesszük egyenlővé a külső légnyomással. Robbanáskor, hirtelen hangerő növekedéskor célszerű tehát „elcsodálkozni” és kitátani a szánkat, hogy a dobhártyánk be ne szakadjon.

A dobhártyára illeszkedő kalapács mozgása a membrán rezgését követi. A kalapács, az üllő és a kengyel rezgési amplitúdót növelő emelőrendszer, és tovább javítja a rezgésátvitelt a belsőfül folyadéktömlőihez. A kengyel (lásd 3.ábra) a csigával érintkezik. Talpa parányi, összesen kb. 0.012 cm<sup>2</sup>. A dobhártya felülete és a

A dobhártya valójában rugalmatlan, pókhálószerűen rostos, szürkés színű, gyöngyház fényű, rezgés-követő membrán. Nem egyenletesen feszes, megközelítőleg kör alakú, a hangszóró tölcseréhez hasonlóan ívelt felületű. Területe  $\approx 1 \text{ cm}^2$ , aminek aktív része kb. 0.4-0.5 cm<sup>2</sup>. A gyulladás-gátló gyógyszerek alkalmazása előtt egy csecsemő-

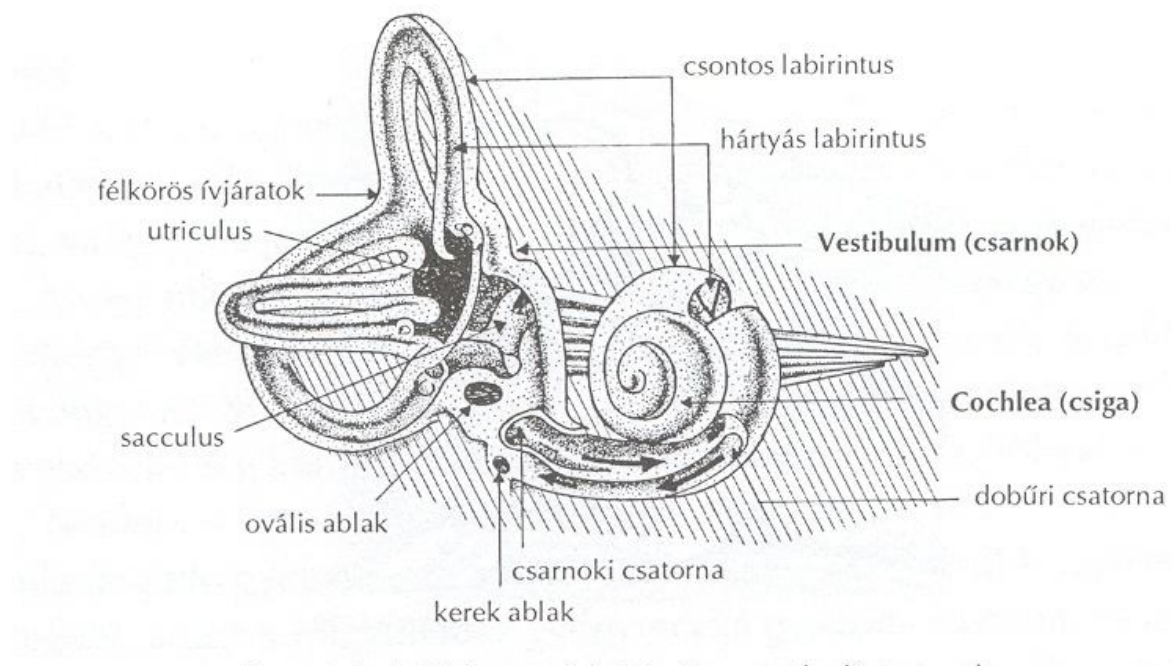
kengyeltalp területe közötti arányok, valamint a hallócsontok emelő tulajdonságai jelentős nyomásnövekedést, erősítést okoznak. A középfülben tehát megnövelt amplitúdójú szilárdtest mozgássá változik a membránrezgés.

A hallócsontokhoz tapadó izmok a középfülizom-reflex révén rövid, váratlan és nagy hangerejű hang esetében a kengyelt visszarántják a belsőfülről, illetve a dobhártya feszességét változtatják meg. Így a belsőfül finom érzékelő sejtjei kevésbé sérülnek, mert elromlik az energiaátvitel. Szerepük van a fej mozgásokkor vagy hirtelen megütésekör is. De nem csak védenek ezek az izmok, hanem a hallócsont-rendszer „merevségét” szabályozva módosítani tudják a hangenergia továbbítását kb. 1-2 kHz-es magasságig.

### 2.1.3 A belsőfül

Az atomi szintű mozgásokkal jellemezhető belsőfül mélyen, a halántékcsonthoz sziklacsonti része mögött, a labirintusban van elrejtve (lásd 4.ábra). A természet (teremtés) erői jól munkálkodtak, mert ennél tökéletesebben aligha lehetne a külső hatásoktól, rezgésektől ezeket a különleges érzékelőket megvédeni. Gondoljuk csak

4.ábra A belsőfül



meg: a hidrogénatom átmérőjénél kisebb kimozdulások is hangingereket kelthetnek benne.

Egyszerre két, mozgásérzékelő feladatot ellátó rendszer is található itt: az egyensúlyozó szerv és a hallószerv.

Az ősből *vestibuláris rendszer* az egyensúlyozó szervünk. Nevét a 4. ábrán látható borsónyi méretű tömlőféléről kapta (*vestibulum* – tornác, előcsarnok). A vestibulumból kiágazó három, egymásra merőleges irányban elhelyezkedő félkörívben történik a fej térbeli helyzetének érzékelése, ill. a benne elhelyezkedő *utrículusban* (jelentése: tömlő) a szőrsejtek a fej egyenes vonalú gyorsulását jelzik. Az utrículusból egyébként a félkörös ívjáratok hártvástömlős részei nyílnak.

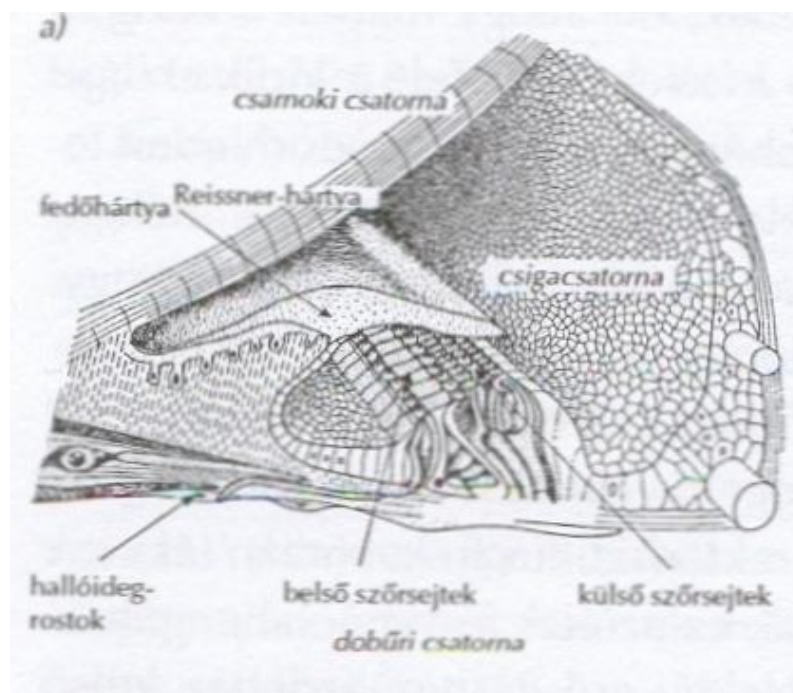
Megjegyzendő, hogy az embernél, ahogy a magasabb rendű állatoknál is, az izmok és a látószerv már eleve jelzik a mozgást az agynak, így bizonyos fokig az agy kompenzálni tudja az egyensúlyozó szerv működési zavarait.

A hallástani szempontból alapvető belfülű szerv, a törzsejlődés szerint fiatalabb *cochlea* avagy *csiga* a levegőben terjedő kisamplitúdójú szilárdtest rezgésre átalakított hanghullámokat, azaz a levegő rezgőmozgását érzékeli, tehát ismételt mozgásról informálja az agyat.

Az embrióban azonos folyadékok töltik ki az egyensúlyozáshoz és a halláshoz tartozó csontos, illetve hártyás részeket. A belfül két fő része tehát szövettanilag hasonló, és egy formai egységet képez, ami azt is eredményezi, hogy korai magzati szinten a magzati izomtónusért felelős vestibularis (szokásos írásmódja még: vesztibuláris) rendszer és a magzati auditív érzékelés összhangban funkcionál. A két rendszer a fejlődés további fázisaiban azonban működésében egymástól függetlenné válik.

A csiga felépítése a 4. ábrán látható. Kívül a csontos labirintus található, amelyet úgy kell elképzelni, mint egy visszahajtott, csigavonalban feltekert hígabb agyfolyadékkal, *perilymphával* töltött csontosfalú tömlőt. Bemeneti része a csarnoki csatorna (*scala vestibuli*) az ovális ablaknál rátapadó kengyellel, kimeneti része a dobúri csatorna (*scala tympani*), amit a hártyás kerek ablak zár le. E furcsa tömlőn belül található egy mindkét végén zárt, vékonyfalú cső, a hártyás labirintus az érzékelő sejtekkel. Szokásos elnevezése még: közép- vagy csigacsatorna (*scala media* avagy *ductus cochlearis*), amit egy még sűrűbb agyfolyadék, az *endolympha* tölt ki. A kétféle folyadék kb. 150 mV-os potenciálkülönbsége a hallástani jelfeldolgozás energiaszükségleteit biztosítja.

Az 5. ábrán látjuk a csiga belfő, harántmetszeti szerkezetét. A középcsatornát felülől a *Reissner-membrán* határolja, alulról pedig az alaphártya (*membrana basilaris*). Az



alaphártya merevsége helyfüggő, fokozatosan csökken a csúcs felé haladva. Formája a kengyelnél keskeny és vastag, a csigacsúcsban széles és vékony. Az eltérő rugalmassági tulajdonságokból arra következtethetünk, amit Békésy be is bizonyított, hogy az alaphártya egyes részei „hangoltak”. Az alaphártya valódi hosszúsága a felnőtt emberben 2.5-3 cm.

Az alaphártyán található szerv (felfedezője, *Alphonso Corti* nyomán, a *Corti-szerv*) a tulajdonképpeni hangérzékelőnk.

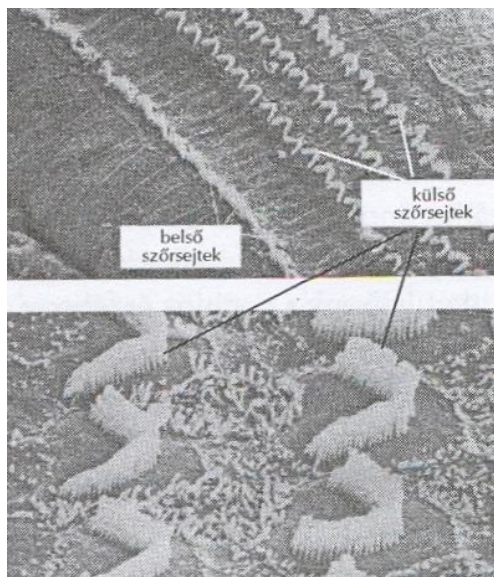
**5.ábra** A csigacsatorna keresztmetszeti képe



Az alaphártyából kiemelkedő receptorokat, érzékelő idegvégződéseket szőrsejteknek nevezzük. A szőrsejteknek és a felettük lévő fedőhártyának (*membrana tectoria*) fontos szerepe van a hallás mechanizmusában. Ez a hártya ugyanis a hanghullámok lökéseire a szőrsejtek érzékelő végződéseivel érintkezik, és ennek hatására jön létre a hanghullámok idegimpulzusokba történő kódolása.

Az endolymphyatér alsó határa valójában nem az alaphártya, hanem a szőrsejtek felső része (a felső felszínük kivételével), illetve a többi határoló sejtfelszín. Azaz a szőrsejtek alsó része a Na-ionokban gazdag perilymphában „ázik”, míg a felső rész a  $K^+$ -ban bővelkedő endolymphában, mivel az endolymphához hasonló tulajdonságú folyadékokban az idegrostok működésképtelenek. Az elektromos impulzusokat elvezető idegrostok a szőrsejtek alsó részéhez kapcsolódnak.

A szőrsejtek két különböző fajtáját különböztetjük meg (lásd 6. ábra): a bemenetnél négy, és a csigacsúcsi részen három sorban lévő külső szőrsejteket, amelyek V-alakú elrendezésben helyezkednek el, illetve az egy sorban álló belső szőrsejteket. A külső szőrsejtek száma kb. 22000, a belsőké megközelítőleg 3000. (Megjegyzendő, hogy az egyes források eltérő módon adják meg az értékeket, különösen a külső szőrsejtek száma bizonytalan: 12 000 és 22 000 közötti.)



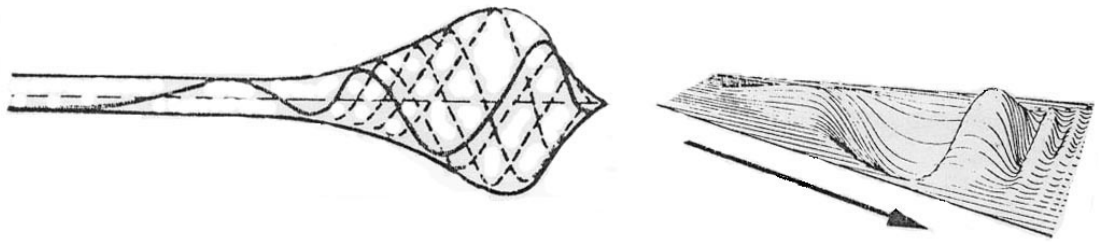
**6.ábra Szőrsejttípusok**

A szőrsejtek felső részén érzékelő csillószőröcskéket, *stereociliumokat* találunk, szőrsejtenként kb. 100-at. Ezek elhajlása (áttételes módon) elektromos kisülést okoz.

#### **2.1.4 Haladó hullámú helyelmélet**

Hogy az alaphártyán milyen alakú hullámok alakulnak ki, megváltoztatják-e a levegőbeli hanghullámok alakját, a tudósokat már régóta foglalkoztató kérdések. Kutatási eredményeik alapján sokat megérthetünk abból, hogy a fül hogyan alakítja át a hangforrások hangját, hogyan lesz egy fizikai jelenségből, egy objektív módon jellemezhető hangból szubjektív érzet. *Hermann von Helmholtz* a 19.század második felében úgy gondolta, hogy az alaphártyán állóhullámok jönnek létre, és minden egyes frekvenciához tartozik

egy hely, egy amplitúdó maximum (*Helmholtz*, 1877). Teóriája az *állóhullámú helyelmélet* elnevezést kapta. Az alaphártya hely szerinti hangoltsága tény, hiszen a szőrsejtek adott területen történő kiirtásával mindig a megfelelő magasságú hangok érzékelése romlik. *Helmholtz*nak az állóhullám mozgásra vonatkozó feltevése azonban helytelennek bizonyult. A probléma egyik megoldásának magyar vonatkozásaira joggal lehetünk büszkék, hiszen 1961-ben *Békésy György* hallástani munkásságáért, a helyelmélet egy lehetséges korrekciójáért kapott Nobel-díjat. Vizsgálatai szerint, amikor is élettelen belső füleken áramoltatott át folyadékot, a keltett alaphártya kimozdulásokból arra a következtetésre jutott, hogy állóhullámok helyett haladóhullámok alakulnak ki az alaphártyán (7.ábra).

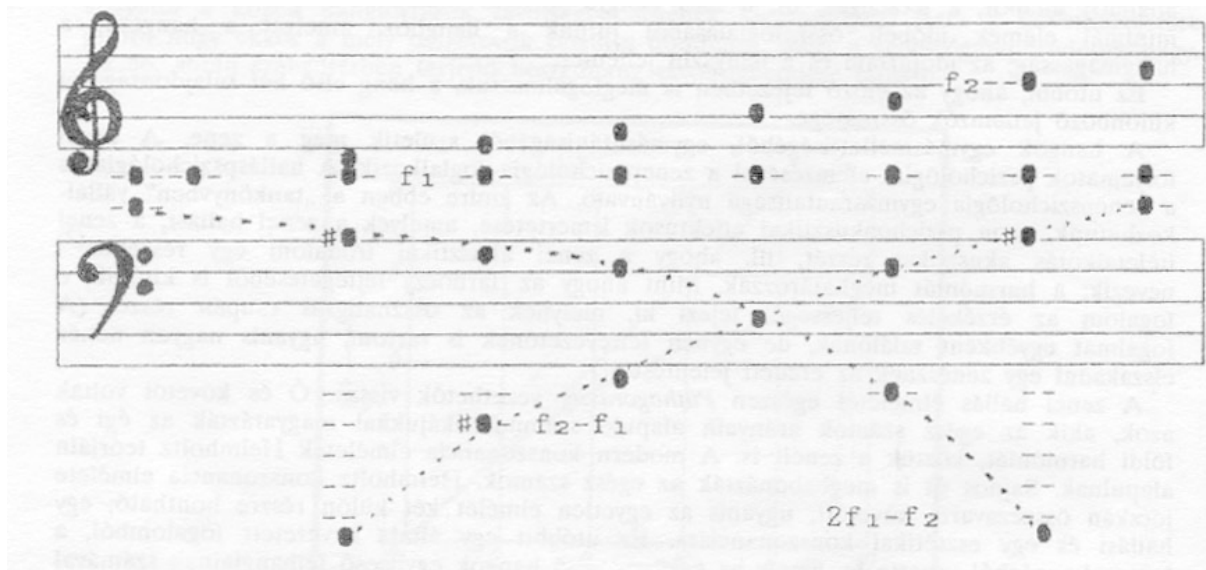


**7.ábra Az alaphártya kimozdulása (Békésy-modell)**

Ezért nevezzük elméletét *haladóhullámú helyelméletnek*. Az alaphártya anatómiai vizsgálatai, ahogy már említettük, a hely szerinti hangoltságra vonatkozó feltételezést igazolták. Békésy mérései alapján világossá vált, hogy az alaphártyán a hang terjedési sebessége a távolság függvényében változik, a bemeneti résznél gyors, a csigacsúcs közelében lelassul, azaz a hullámhossz lerövidül. A frekvenciától függetlenül, a bemeneti résznél egyformák a hullámformák, de ahogy magasodik a hang, a hullámmaximumok helye egyre inkább a kengyel felé tolódik el (lásd 7.ábra). Ez a frekvenciatérkép az alaphártya sajátossága, és minden hely a rá jellemző *karakterisztikus frekvencián* rezeg legjobban. Békésy elmélete szerint az alaphártya hangoltsága túlságosan durva, és csak az agyi gátló parancsok révén javul majd a frekvenciaélesség.

Az élő cochlea viselkedéséről Békésy halála után, az utóbbi 35 évből származó mérésekből kiderült, hogy az érzékeny a hangerő változásaira, és alacsony dinamikákon egy-egy helyhez tartozó karakterisztikus frekvencián (és csak ott) megnő a rendszer átviteli hatékonysága. Az alaphártyának ez az éles frekvencia hangoltsága csak az élő szervezet sajátja. A szelektív erősítéshez azonban külső energia kell, mivel a csillapodó haladó hullám energiát igényel.

A fül általában akkor módosítja a hangjeleket, ha nem a megszokott érzékelési tartományból származnak. Ha pl. ha túlságosan hangosak, akkor az alaphártya rezgésének nemlinearitása egy szinusz hang esetében szubjektív felhangokat hoz létre. Szintén alaphártyai torzítási effektus a *különbségi (vagy kombinációs) hangok* létrejötte is.



**8.ábra Különbségi vagy kombinációs hangok**

Ezt is bárki megtapasztalhatja, ha pl. ketten két különböző magasságú ( $f_1$  és  $f_2$  frekvenciájú) hangos hangot füttyölnek, a két hang alaphangjának kombinációival jellemzett rezgések ( $f_2 - f_1$ , ill.  $2f_1 - f_2$ , ahol feltettük, hogy  $f_2 > f_1$  és  $2f_1 > f_2$ ) mély zúgásként hallhatók lesznek a két füttyhang mellett (lásd 8.ábra).

## 2.2 A hallás idegi mechanizmusa

A fül leírásából már kiderült, hogy mechanikai tulajdonságai meghatározzák a hallott hangok akusztikai paramétereit. Legalább ilyen fontosak a hallószervhez tartozó érzéksejtek és az idegi szerkezet (hallóideg, agyi szerveződések) jelfelvevő, jelátalakító, jeltároló tulajdonságai is.

A részben már bemutatott szőrsejtekről az elmúlt évtizedek mérés technikai fejlődésének köszönhetően kiderült, hogy a passzívnek vélt végkészülékek sajátos rezgési tulajdonságokkal rendelkeznek, az idegi szabályozás révén pedig különleges jelszűrő rendszert alkotnak.

### 2.2.1 A szőrsejtek finomhangolása

Az utóbbi évtizedek halláseméletének egyik fontos felismerése *H.Spoendlin* nevéhez fűződik, aki felfedezte, hogy a külső és a belső szőrsejtek beidegzése eltérő (Spoendlin, 1974). A belső szőrsejtekből indul ki az agy felé ingerületet vivő (afferens) idegrostok kb. 95 százaléka. Ezek a rostok viszik az átkódolt hangjeleket az agyba. *Myelinhüvellyel*, zsírszerű, biológiai szigetelőanyaggal védettek. Egyetlen belső szőrsejt 20, elágazás nélküli idegrostot lát el információval. A külső szőrsejtekhez tartozó rostok már elágazók: a kengyelhez közel egy rostot 10 szőrsejt lát el, a csúcsonál pedig kb. 50.

Az agyból is érkeznek információk vissza a szőrsejtekhez. Az őket szállító rostokat az ingerre adott agyi választ közvetítő (efferens) idegrostoknak nevezzük. Itt is különbségeket tapasztalunk a szőrsejtek között, mivel a külső és a belső szőrsejtekhez tartozó efferens rostok az agy eltérő területeiről erednek, és elsősorban a külső

szőrsejtekhez kapcsolódnak. Az afferens és efferens rostokra a hallópálya elemzésekor még visszatérünk.

Kiderült, hogy számos, a külső szőrsejteket érő manipuláció, megváltoztatja a belső szőrsejtek hangokra történő ráfelelési (rezonanciás) tulajdonságait. Mindez azt jelzi, hogy a külső szőrsejtek az alaphártyára kifejtett hatásukon keresztül képesek befolyásolni a belső szőrsejtek viselkedését. A *motilitás* jelenségét *W.E.Brownell* munkatársaival 1985-ben fedezte fel. Megállapították, hogy a külső szőrsejtek elektromos ingerlés hatására a hosszúságukat módosítani tudják. Ennek következtében energiát csatolnak vissza az alaphártya-fedőhártya rendszerbe, ami csökkentheti az alaphártyán haladó hullám csillapodását, azaz erősítheti a hangjelet.

Egy svéd kutatócsoport (Khanna, 1989) azt is felfedezte, hogy a tengeri malacok külső szőrsejtjei kisüléseinek a száma nem csak a rájuk jellemző ún. karakterisztikus frekvenciájú hangokra nő meg hirtelen, hanem azok harmonikus felhangjaira is. Ezek közül főként az első és második felhang energiája jelentős. Ami meglepő, hogy ez idáig úgy gondoltuk, egyetlen szőrsejt csak egyetlen karakterisztikus frekvenciával rendelkezik. Néhány tudós úgy véli, ebben a tényben leledzik harmóniaérzetünk kulcsa.

Összefoglalva tehát azt mondhatjuk, hogy a külső szőrsejtek felelősek az embernél (és általában a hozzánk hasonló hallószervvel rendelkező élőlényeknél) a frekvencia szelektivitás fokozásáért, a cochlea különlegesen éles hangoltságáért, azaz egyfajta második szűrőrendszert képviselő „finomhangolók”. Minderre legfőbb bizonyíték, hogyha a külső szőrsejtek elpusztulnak, a karakterisztikus frekvenciákon tapasztalt fokozott érzékenység megszűnik. A fül tehát nem egy passzív rezgésközvetítő, hanem az efferens kapcsolódások révén aktív módon hallunk. Az ember azt képes hallani, amit megtanul hallani

### 2.2.2 A hallópálya

Mielőtt belefognánk az idegimpulzusokká kódolt hangjelek agyi feldolgozásának elemzésébe, fontosnak tartom, hogy a mindenkori jobb tájékozódás érdekében, a teljesség igényének mellőzésével a központi idegrendszer anatómiai szerkezetét is áttekintsük:

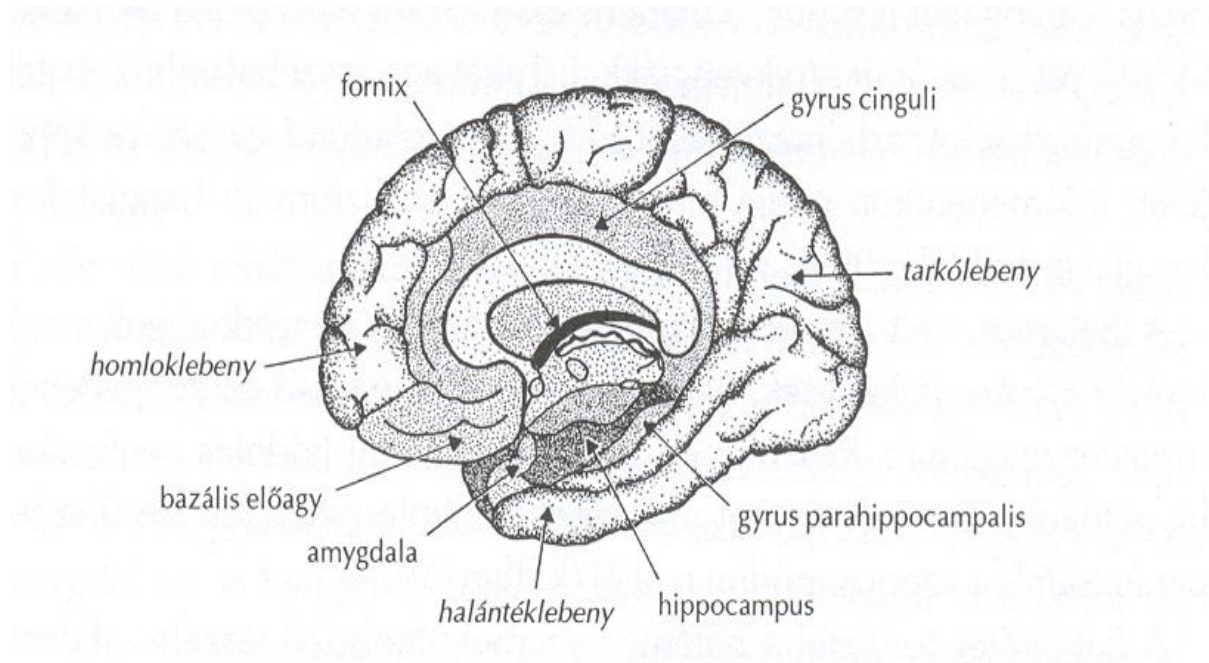
a gerincvelő meghosszabbítása az agy irányába a nyúltvelő vagy nyúltagy, amely a híddal és a középaggyal együtt az ontogenezis során korábban kialakult agytörzset alkotja. Az agytörzs és a nagyagy között fekszik a hallás szempontjából fontos köztiagy (benne a *thalamus*-szal és *hipothalamus*-szal). A tarkórészen helyezkedik el az ösztönös mozgásokért felelős kisagy. A két agyféltekéből álló nagyagyat egy vastag idegköteg, a *corpus callosum*, a *kérges test* köti össze. A nagyagyat átlagosan 3 mm-es mélységben beborító szürkés színű (szürkeállomány), barázdált agykéreg (*cortex*) a jelfeldolgozás célállomása. A kéreg alatti magszerű, szürkeállományhoz tartozó, de nem réteges sejtcsoportosulásokat *subcorticalis* területek-nek nevezzük.

Az evolúció szerinti legkorábbi agykérgi területek a *limbikus kéreghez*, a később kialakult részek *agykéreghez (cortex-hez)* tartoznak. Az agykéreg sejtjei alap-ján hat, a nagyagy felszínével párhuzamos rétegre osztható fel.

Mivel a zene, mely kulcs az emberhez, elsősorban az érzelmeinkre hat, fontos az érzelmek központi idegrendszeri irányításáért-kiváltásáért felelős agyi struktúra, a limbikus rendszer szerkezetének rövid bemutatása is. Összetevői: *gyrus cinguli* (a



corpus callosumot előlről és felülről körülvevő agytekervény), a *hippocampus* (emlékezetminták átalakításánál van szerepe), az *amygdala* (alarmközpont) és a bazális előagy (lásd 9.ábra). A limbikus kérgi rész ehhez az ontogenezis alacsonyabb fokán kifejlődött limbikus rendszerhez kapcsolódik.



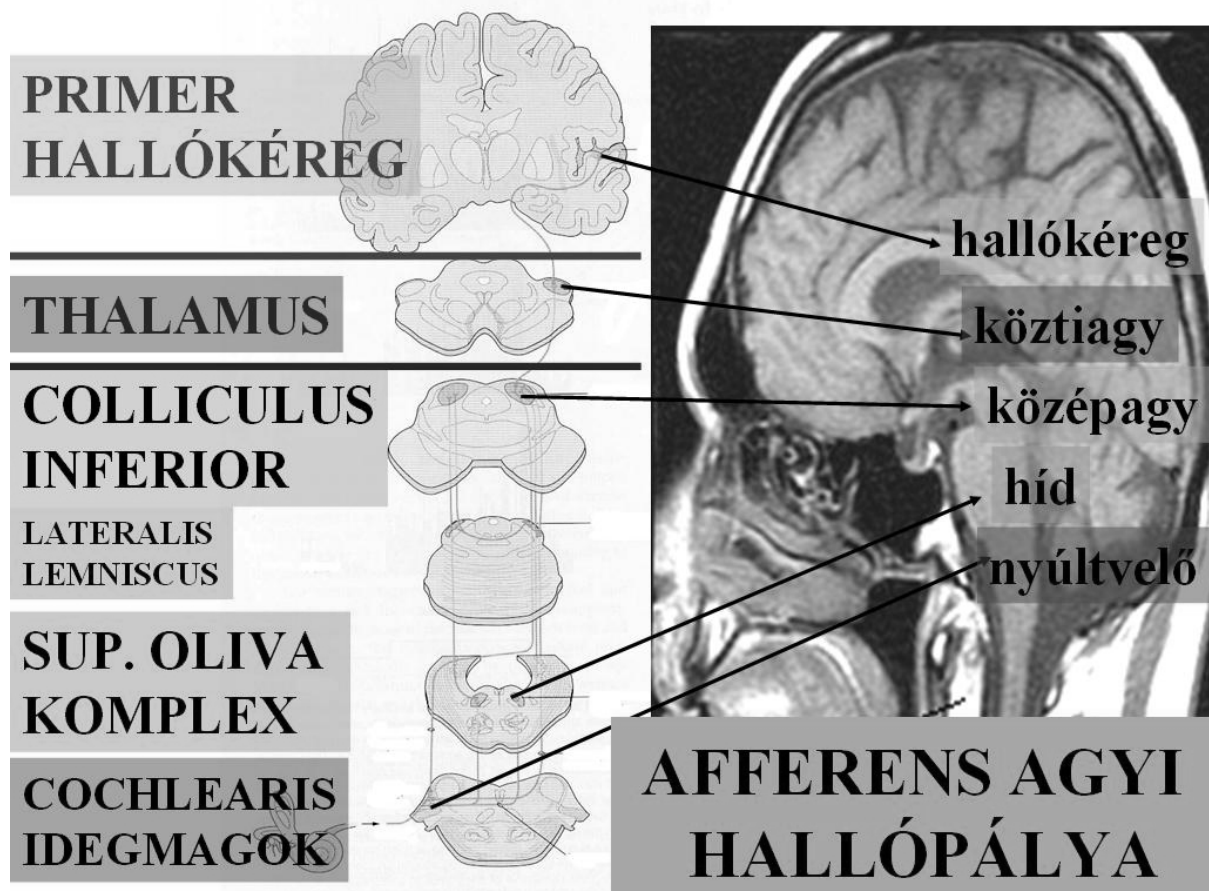
**9.ábra A limbikus rendszer**

A fenti anatómiai kiegészítéshez azt a megjegyzést fűzném, hogy napjainkban a genetika mellett éppen az agykutatás a legaktívabban fejlődő tudományos terület, amelynek eredményei az önmagunkról alkotott vélekedést folyamatosan alakítják. A korábbi, az agyi mechanizmusokról alkotott sematizáló elképzeléseink napról napra módosulnak, tökéletesednek. Az egyik legfontosabb eredmény pl. az agyféltekéi aszimmetriák (az agyféltekék feladat szerinti kizárólagos dichotómiája), valamint a korábban feltárt, a sejttípusok szerint kitüntetett agyi területek munkamegosztásban betöltött szerepének felülvizsgálata. Az új eredmények hatására sokan elvetik az agyban lévő mikroagyak elméletét, azaz, hogy agyunkban lennének olyan központok, amelyek az agyat magát irányítanák. Szimpatikus az az elmélet (Damasio), ami az agyat rendszerek szuperrendszerének nevezi, ahol folyamatok párhuzamosan folynak, de az egész egyetlen egységet képez.

Most, hogy az agy felépítését vázlatosan áttekintettük, térjünk rá a hangok központi idegrendszeri feldolgozásának elemzésére.

A jelsorozatokká kódolt hangjelek útja a központi hallópályán, amíg a ganglion spirale-ből hallókéregig jutnak, meglehetősen bonyolult. Többszöri ellenoldali átkapcsolás történik, a jelek gyakorta felerősödnek, átkódolódnak. A tonotopikusság, azaz a frekvenciahangoltság, ill. a fázis-szinkronizáció a hallópálya két legfontosabb tulajdonsága. Tehát az egyes pályaelemeknél a frekvenciahangolt átkapcsoló neuronok helyzete megőrződik.

A rendszer egy másik alapvető képessége, hogy a kétoldali centrumok közötti átkapcsolások segítségével (lásd a 10. ábrát) a hangforrások térbeli helyét a jelek közötti



**10.ábra** Az afferens hallópálya

időbeli eltolódás és dinamikai különbségek alapján (ahogy a külsőfülnél már elemeztük) meghatározhatjuk. Egyedfejlődésünk során, a korai szakaszban, amikor a hangokkal történő szimbólumképzésre még képtelenek voltunk, a hangok alapján történő tájékozódás képessége volt a hallási percepció leghasznosabb tulajdonsága. Ezért történik a „primitív” tájékozódás, ahogy a későbbiekben rá fogunk mutatni, a hallópálya kérgi szintjénél sokkal alacsonyabb szinten.

A központi hallópálya is két, jeltovábbítási irány szerint elkülönülő részre bontható: afferensre és efferensre. A két rendszer szerkezete, átkapcsolási helyei a 9. ábrán láthatók. A hallópálya fő állomásai: (1) a nyúltvelői cochlearis sejtmagok (nucleus cochlearis); (2) a trapéztest (corpus trapezoidum) és a felső oliva (oliva superior); (3) a lemniscus lateralis magjai; (4) a középagy hallórésze (colliculus inferior); (5) az auditív thalamus a köztiagyban (főként a thalamus hátsó páros kis kiemelkedése (corpus geniculatum mediale); (6) a hallókéreg (gyrus temporalis superior, fissura Sylvii).

A hallópálya felvázolásakor itt csak az elsődleges rendszert írtuk le, mert a hallókéregből további, a kéreg asszociációs központjaival létrejövő kapcsolódások jellemzik a hangok agyi feldolgozását.

Nem mentségképpen, de meg kell jegyezzük, hogy a hallópálya összetettsége messze meghaladja lehetőségeinket, ellenben éppen ez a szinte áttekinthetetlen komplexitás kényszerít arra bennünket, hogy a leegyszerűsítések nyilvánvaló hibái ellenére rendszerbe foglaljuk a hallás központi idegrendszeri folyamatát és szerkezetét.

Az állomások, gyakorta nem csupán átkapcsolási elemek, hanem erősítők, átkódolók és rendszerezők.

Az afferens rendszer ugyan elsősorban hierarchikus, de számos párhuzamos csatorna is jellemzi, amelyek egymástól függetlenül működnek és meghatározott akusztikai paraméterek jelfeldolgozását végzik. A legfontosabb ilyen csatornákat feltüntettük.

Meglepő tapasztalat, hogy a környezetről már alacsonyabb szinten is, a colliculus inferiorban kialakul a hangtérkép.

A magzati tapasztalatok komplexitásának, a zene és a tánc gyökereinek bizonyítékaul szolgálhat, hogy ugyanitt a külső magban (external nucleus) egyszerre taktilis és hangingerekre aktivizálódó neuronokat találni. Sőt a colliculus inferiorban és a köztiagyban lévő thalamusban már a beszédjelek feldolgozása is megkezdődik. Ez alatt az alacsonyabb szintű jelfeldolgozás alatt elsősorban a jelentés nélkül hangzsfelismerést értjük.

Úgy tűnik, hogy a colliculus kapcsolata a limbikus rendszerrel (a thalamuson keresztül) független a kérgi szinttől, a kérgi feldolgozástól. Ez a törzsfejlődésileg alacsonyabb szint akkor is működik, ha az agykéreg még nem fejlődött teljesen ki.

A kifejlett agynál is közvetlen út vezet a limbikus rendszerhez tartozó amygdalához, amely a szervezet vészhelyzet reakcióinak beindítója, elsőrendű érzelmi központ (LeDoux, 1992).

Az amygdala részt vesz mind a kellemes, mind a félelemmel kapcsolatos érzelmi válaszainkban, és befolyásolja a tudatos (a gyrus cinguli elülső része és a szemüreg közeli, ún. orbitofrontális kéreg bekapcsolása révén) és az autonóm érzelmeket (Iverse et al. 2000).

(A hangok hatására kialakuló vagy felidézett érzelmekre a további fejezetekben még többször vissza fogunk térni.)

### **2.2.3 Az efferens pálya**

A hallópálya általában kétirányú, ezért leszálló folyamatok is jellemzik, ami lehetővé teszi, hogy egy alsóbb szintű neuron működésének szabályozását visszacsatolás révén a célállomás neuronja, ahová az alsó neuron jeleket küld, végezze el. Ez az önszabályozás védi a rendszert és növeli a hatékonyságát, mert megadja azt a plaszticitást, ami a bonyolult jelek precíz feldolgozásához szükséges.

Az efferens pályák közül egyesek a középfül izmainak reflexszerű szabályozását végzik, amely a túlzott hangnyomás növekedés káros hatásától óvja a fület. A dobhártya feszítőizmát a ceruzavastag V. agyideg (az arc általános érzőidege) irányítja. A kengyel izmának kontrakcióját a VII. agyideg, az arcideg (mimikai ideg) végzi. Arcidegbénuláskor ezen izmocska passzivitása miatt egyes hangokra kellemetlenül reagálhatunk (Szentágothai, 1977).

### **2.2.4 A thalamus és a hallókéreg hallásbeli feladatai**

Mivel a thalamus és a hallókéreg a két legfontosabb hallópályai központ, szerepükről részletesebben kell szólnunk.

A thalamus a központi idegrendszer reléállomása. Ide érkeznek be a különböző érzékszervekből az információk (kivéve pl. a szaglást), és a nagyagy (agykéreg) felé továbbítódnak. Mivel ennek közvetlen közelében (ill. benne) található a spontán aktív órajeladó sejtek is, itt történik ezeknek az információknak a szinkronizációja, az alatta lévő hipotalamusban pedig az alvás és az ébrenlét szabályozása. [Mérésekkel megállapították, hogy macskák thalamusában az órajeladó sejtek mindegyike a hangjeltől függetlenül egy meghatározott frekvencián hoz létre kisülési mintázatot. Az a frekvenciatartomány, amit összességükben átfognak, meghaladja az egy oktávot. *Keidel* „ősi” harmóniaérzetünkre vonatkozó hipotézise, ami szintén macskákon végzett kísérletekre támaszkodik, azon alapszik, hogy a köztiagy magasságában az idegsejtekben hallásunk teljes hangmagasság tartománya „leosztódik” (alacsonyabb frekvenciájúra állítódik), és mivel az egyes „hangolt” sejteknél a mért kisülési aktivitás hisztogramja harmonikus felhangokat is mutat, a thalamusban ezek a harmonikusok hasonlítódnak az órajel-frekvenciákkal össze. Tehát az „összehasonlító” sejtek a hanginformációt tartalmazó sejtől és az órajeladótól egyszerre kapnak jelet, és a kimenetükön megjelennek a transzformált hangjelek felhangjai is.]

Ahogy már említettük, a thalamus mediális részében egyes neuronsejtek beszédhangok megkülönböztetésére is képesek, azaz különböző zöngékre és zöngétlenekre másként reagálnak. Ez a jelentéskéret nélküli kódolás magyarázza részben, ha pl. a kutyánk azonosan hangzó, de különböző jelentésű szóbeli parancsainkra azonos módon reagál.

A hallókéreg területei a halántéklebeny különböző részein találhatók. Megkülönböztetünk primer (elsődleges) hallókérget (*Heschl*-féle haránttekervény), amelytől elkülönül egy kisebb közvetlenül előtte (anterior) és mögötte (posterior) lévő terület, ill. a posterior rész alatti, ventralis terület. Mind a négy terület tonotopikus, azaz hangolt, ellenben a thalamus különböző részeivel vannak összeköttetésben, ami a funkcióik eltérését jelzi.

E négy tonotop területtel érintkezik e helyfüggő hangoltságot csak részben mutató másodlagos hallókéreg. A másodlagos hallókéreg információkat kap a primer hallókérgetől és más agykérgi területektől, de jeleket kaphat a limbikus rendszerből is. A másodlagos hallókéreg magasabb rendű agyi folyamatok helye. Itt történnek pl. a kogníció, ill. az érzelmi reakciók szabályozásának auditív vonatkozású agyi eseményei, a komplex hangminták feldolgozása. Nevezetes kérgi terület a beszédközpontul szolgáló *temporális* (halántéki) agykérgi *Wernicke*-folt.

Ahogy láttuk tehát, hanginformációk a hallópálya alacsonyabb szintjéről a thalamusból és pl. egy extra pályán az amygdalából érkeznek a hallókéregbe. Az egyes kérgi területek kétirányú kapcsolatban állnak egymással, és más érzékszervi funkcióhoz (pl. látás) tartozó kérgi részekről is kaphatnak idegimpulzusokat. Tapasztalható, hogy a hallókéreg idegi szervezettsége jelen körülmények között áttekinthetetlen.

Ahogy már korábban megemlítettük, a hallókérgi asszociációs területről (szekunder zóna) az amygdala is jeleket kaphat. Ezáltal a hanginformáció az érzelmi reakciók - viselkedési, autonóm és endokrin - vezérlő rendszereit is befolyásolhatja.

A hallópálya rendszere élő, folytonosan alakul, a beépült információk átalakíthatják az újak befogadásának, feldolgozásának módját. Például bebizonyosodott, hogy a cochlea sérülésekor a hallókéregben neuronok újraszerveződése tapasztalható. Ezért és számos más okból is (pl. biokémiai folyamatok az agyban), tudásunk mai szintjén kivitelezhetetlennek tűnik a teljes hallási folyamat számítógépes modellezése.



### 3. A HANGOK OBJEKTÍV ÉS SZUBJEKTÍV JELLEMZŐI

A pszichoakusztikai tudás hiánya tévedések, felesleges viták forrása lehet az együtt muzsikáló emberek között. Különösen a hangmagasság megítélésében nem számíthatunk biztonságos megegyezésre, de műszereink objektivitására sem támaszkodhatunk teljes biztonsággal. (Objektivitás alatt az ismert természettörvényeknek megfelelő, reprodukálható, lehető legkevésbé szubjektív tudományos elemzést értem.) Azonban még erre a nem tökéletes objektivitásra is szükségünk van, legfőképpen azért, hogy valamiféle mértéket szabjunk szubjektivitásunknak. Ha tudjuk, miért és mennyiben térünk el zenésztársunk hangítéleteitől, már lehetőség van a megértésre.

Mielőtt belefognánk a hang objektív és szubjektív paramétereinek elemzésébe, néhány posztulátumot tennék. Első posztulátumunk: *Mindenki azt hall, amit hall.*

Ez a megállapításunk, noha látszólag mulatságos, nagyon fontos, mert a tévedés lehetőségét fejezi ki. De éppen a tévedések okára vonatkozó vizsgálódások által mélyülnek hallástani ismereteink. Tanulással ugyan az érzékelés-észlelés pontosítható, finomítható, mint ahogy a neurológiai kutatások is azt jelzik, hogy a hallási folyamatoknál zenetanulás hatására megnő az aktivizált agyi területek mérete. De az valóban csak társadalmi megállapodás kérdése lehet, hogy egy adott kultúrában a „jól hallani” kifejezés mit jelent.

Második posztulátumunk: *A szubjektív hang paramétereit kölcsönhatásban vannak egymással.*

Hétköznapi tapasztalataink szerint is a hang egységes egész, amit éppen hangzás szavunk fejez ki tökéletesen. Hiszen ahogy már az első fejezetben részletesen kifejtettük, a hang rezgés, ami rugalmas közegben hullámformában terjed tova. Az egyik objektív paraméter változása magával vonhatja egy más jellegű szubjektív paraméter megváltozását, pl. ha a hangerő nő, akkor megváltozik a fülben az alaphártya hullámalakja, több szörsejt „verbuválódik”, és módosulhat a hangszín és a hangmagasság érzete is, stb. .

A legfontosabb objektív hangi makroparaméterek:

a hangmagasság, a hangnyomás, a hangszín, az idő és a hang térbelisége. Már az objektív jellemzők is számos kérdést felvetnek:

a hangmagasság csak a tiszta és a szabályos szerkezetű zenei hangnál azonos az alapperiódushoz tartozó periódusidő reciprokával; a hangszínnak nincs egysége, azaz dimenzió nélküli, ami megnehezíti a kategorizálást.

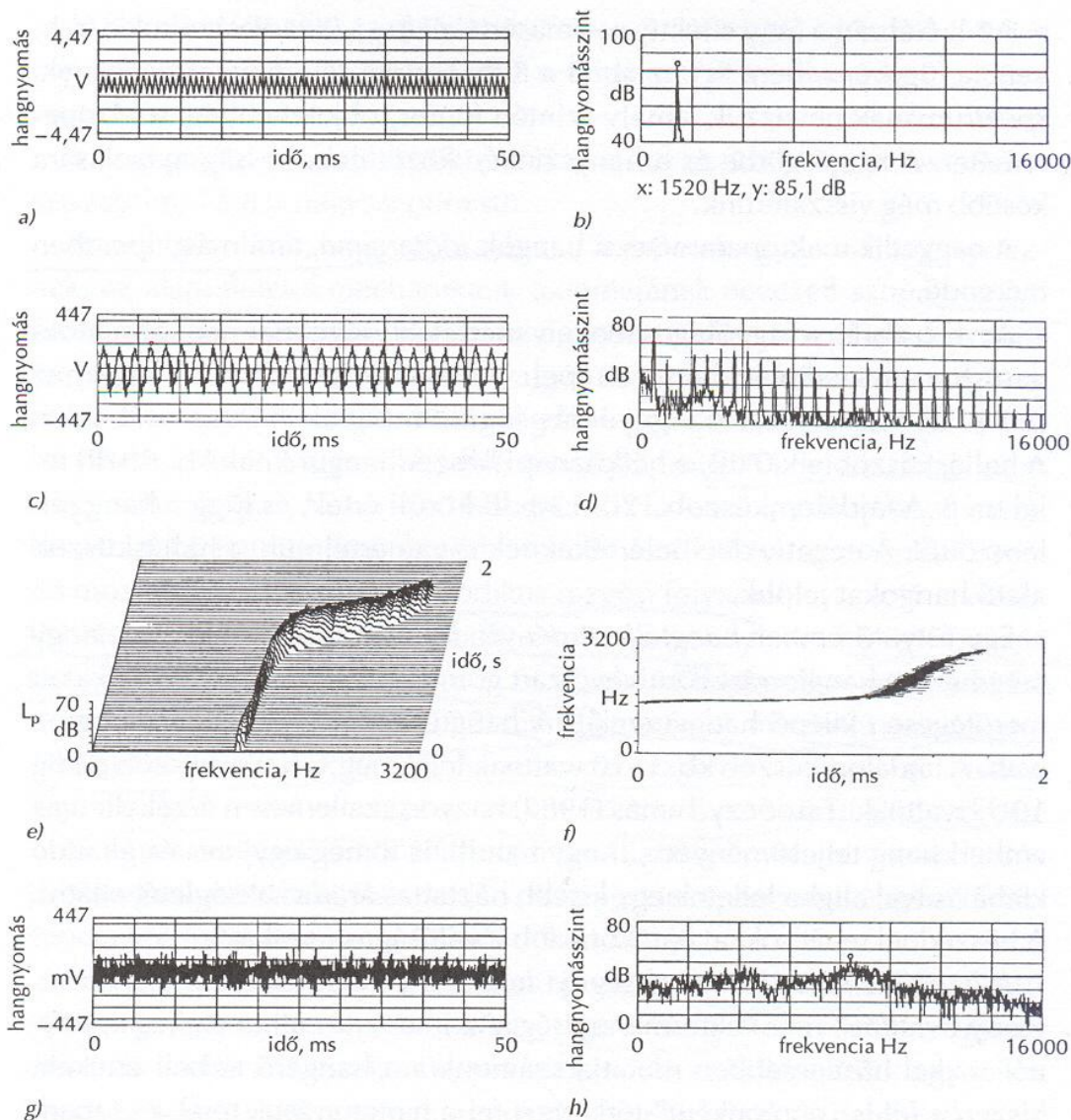
A négy paraméternek megfeleltetett szubjektív változók mérése lehetetlen, csupán az emberi ítéletekre hagyatkozhatunk, a verbalizációra, ami megnehezíti a kultúrától független elemzést.

A zenei hierarchia szerint a legfontosabb hangparaméter a hangmagasság és az idő, és a legelhanyagolhatóbb a térbeliség.

## 3.1 A hangmagasság

### 3.1.1 A frekvencia és a periódusidő

Ha megnézzük az emberi füttty szerkezetét, látható, hogy egészen egyedülálló. Szabályos formájú, csupán egyetlen rezgésszám jellemzi. Ez a rezgésforma a *harmonikus rezgés* (lásd 11. ábra méréseit).



**11.ábra Különböző hangtípusok (a-b) a tisztahang rezgégörbéje és spektruma, (c-d) egy szájharmonikán játszott zenei hang rezgégörbéje és spektruma, (e-f) egy változó hangmagasságú füttyült hang spektrogramja, (g-h) egy sziszegett hang – zaj – rezgégörbéje és spektruma**

Harmonikus rezgés a tömegpont azon mozgása, amelyet a kitéréssel arányos, de ellentétes irányú erő hoz létre. Ennek a rezgésnek hangji megfelelője a már említett szinuszos vagy tisztahang, ami nevét rezgéstani formájáról (lásd 11.a ábra), ill. felhangmentességéről kapta. A tisztahangot tökéletes formában csupán mesterségesen, a veszteségek pótlásával lehet létrehozni.

Az 11.a-b ábrán egy füttyhang kétféle megjelenítése látható. Az 11.a ábrán a levegő nyomásának ingadozását mértük az idő függvényében. A neve *rezgésgörbe*. A görbe nagyfokú időbeli szabályosságot, periodicitást mutat, amit külön adattal jellemzünk, az egy teljes rezgéshez szükséges időtartammal, a *periódusidővel* ( $T$ ). Ennek reciproka, a *hangmagasságot* kifejező *rezgésszám* avagy *frekvencia* ( $f$ ), az egységnyi idő alatt (1 másodperc) mért rezgések száma. Fizikai mértékegysége a *hertz* ( $\text{Hz}$ ), *Heinrich Hertz*, az elektromágneses hullámok múlt században élt és fiatalon elhunyt kutatója emlékére. Esetünkben tehát a füttyült hang magassága  $\approx 1684.4 \text{ Hz}$  (gisz<sup>3</sup>-nál kicsit magasabb hang), periódusideje  $0.59375 \text{ ms}$ . Ezt ábrázoltuk a 11.b spektrumábrán.

Egyébként az emberi hallás frekvenciatartományának közelítő határértékei  $16 \text{ Hz}$ , ill.  $20000 \text{ Hz}$ .

A zenei hang már szabályos felhangokkal rendelkezhet, melyek az alaphang egészszámú többszörösei. A zajban végtelen sok rezgést találni, ezért mind a rezgésgörbéje, mind a spektruma szabálytalan.

A hangmagasságok viszonyát a hozzájuk rendelt frekvenciaértékek arányával fejezzük ki. Hogy miért éppen ezek az értékek alakultak ki, annak részben fizikai, részben hallástani oka van.

A nevezetes arányok és a megfelelő hangközök:

$2:1 = \text{oktáv}$ ,  $3:2 = \text{tisza kvint}$ ,  $4:3 = \text{tisza kvart}$ ,  $5:4 = \text{nagyterc}$ ,  $6:5 = \text{kisterc}$ ,  $9:8 = \text{nagy egészhang}$ ,  $10:9 = \text{kis egészhang}$ ,  $16:15 = \text{nagy félhang}$ ,  $25:24 = \text{kis félhang}$ .

Fontosak még:

$8:5 = \text{kisszext}$ ,  $5:3 = \text{nagyszext}$ ,  $9:5 = \text{kisszeptim}$ ,  $15:8 = \text{nagyszeptim}$  stb. .

Az oktávot technikai okokból 1200 centre osztották fel.  $1 \text{ cent} = \sqrt[1200]{2}$ . Így az egyenletes lebegésre hangolt skálán egy félhangra 100 cent jut. Itt a felosztás logaritmikus, ami azt jelenti, hogy a szomszédos hangoknál a frekvenciaarány az állandó és nem a frekvenciatávolság. Számszerűsítve: az arányszám  $\sqrt[12]{2} = 1,059\dots$

Hangközök arányszámainál az alkalmazott művelet az osztás és a szorzás. Azaz egy tisztakvint és egy –kvart összege, ami egy oktáv,  $3/2 + 4/3$  helyett  $3/2 \cdot 4/3 = 2$ .

Így 12-szer összesorozva  $\sqrt[12]{2}$  –öt önmagával, 2-t kapunk. Ami nem csoda, hiszen éppen az oktávhangra léptünk.

### 3.1.2 A szubjektív hangmagasság függése a frekvenciától

Az *American Standards Association* szerint: a hangmagasság a hallási jelenség olyan attribútuma, amellyel a hangokat egy zenei skálához rendelhetjük. Ez a megfeleltetés azt jelenti, hogy a rezgésszámhoz kapcsolódó érzethez egy hangnevet kapcsolunk, és tulajdonképpen minden hanghoz más nevet.

A bevezetésben már utaltunk rá, hogy a hangmagasság pontos észlelése a nyugati zenében a legalapvetőbb követelmény. De hamarosan be kell látnunk mindannyiunknak, hogy ez a pontosság, és így az abszolút hallás is csupán illúzió.

A tiszta hang fizikai értelemben meghatározott rezgésszámmal rendelkezik. De csak bizonyos esetekben lehet a hangmagasságot ehhez hozzárendelni, mert hallásunk korlátos tulajdonságai következtében a fül másképpen dolgozza fel a magasabb hangokat, mint a mélyeket. A szőrsejtek távolsága is befolyásolja az érzékelést. Ezért csupán az 1-2 kHz alatti szinusz hangoknál feleltethető meg nagyobb pontossággal. A kutatók mérései szerint csak 5 kHz alatt jó a hangmagasság megnevezési

képességünk, abszolút hallásúak is  $c_5$  felett már nehezen azonosítanak be hangokat. Nem véletlen, hogy beszédünk érdemi része is 5 kHz alatti.

A hallott hangokhoz hozzárendelt skálát *mel-skálának* nevezzük. Kb. 1000 Hz-ig megközelítőleg lineáris a mel- és a Hz-skála közötti függvénykapcsolat.

Egyik fontos hallástani jellemzőnk, amit meg is mérhetünk, a *hangmagasság különbségi küszöbünk* (az angol terminológiából származó rövidítéssel: JND- *Just Noticable Difference*). Ez azt jelzi, hogy egy adott rezgésszámú tiszta hangnál mekkora rezgésszám változásokat veszünk még észre. A JND-énk a hallásélességünket jellemzi, és bizonyos mértékben független attól, hogy muzikálisak vagyunk-e vagy sem. Megfigyelték, hogy magasabb frekvenciákon romlik a megkülönböztetési képességünk: 500 Hz-nél kb. 1 Hz-et, 1000 Hz-nél 2 Hz-et, 2000 Hz-nél 3 Hz-et, de 8000 Hz-nél 600 Hz-et is tévedhetünk (Wier et al, 1977).

### 3.1.3 A szubjektív hangmagasság is a dinamika

Ha nő a hangok dinamikája, javul a küszöbérték (valószínűleg az ingerületvezetés tökéletesedése miatt). Ellenben tudni való, hogy ha tiszta hangok abszolút magasságát kívánjuk megnevezni, és közben változik a dinamika, akkor megint csődöt mond a tudományunk. Az órai halláskísérlet szerint is, ha a hangerő nőtt, akkor a hangmagasság-érzet megváltozhatott. Általános megfigyelés, hogy 2 kHz ( $\approx c_4$ ) felett mélyül a tisztahang, ellenben 4 kHz ( $\approx c_5$ ) felett már magasodik. Az 1-2 kHz-es tartományban a változás nem számottevő. Zenei hangokra a hangmagasság dinamikafüggése nagyon kicsi.

Minek köszönhető ez a tendenciózus frekvenciafüggés?

Ahogy az előző fejezetben részletesen kifejtettük, az élettani és neurológiai megfigyelések szerint hallási mechanizmusunk erős frekvenciafüggést mutat. Mély hangoknál az időbeli mintázatok kódolódnak, de fontos a szőrsejtek helye is, hiszen magas hangoknál a szőrsejtek helye számít csupán.

### 3.1.4 A szubjektív hangmagasság és az időtartam

Eddig nem beszéltünk arról, mi történik, ha a szinusz hangjaink rövidek vagy hosszúak, változik-e ezzel a magasságuk. Egy nagyon rövid, néhány milliszekundum hosszúságú hangot a fül csupán kattánásnak hall. Azonban, hogy valódi hangélménnyé váljon, amelyet akár vissza is énekelhetünk, már 10-15 ms hosszúságú jel is elegendő, legalábbis professzionális zenészeknél ezt mértük. A magasabb hangokat mindig rövidebb idő alatt tudjuk meghatározni, mint a mélyeket, mert náluk rövidebb idő alatt is megfelelő számú rezgésperiódus alakul ki, és mivel 3-5 kHz alatt az idegkiszülés sorozatok közötti időintervallumokból megfelelő számú létrejött, az agy képes már a kiértékelésre. Természetesen itt egyetlen hang felismeréséről van szó és nem ilyen rövid hangok egymásutánjának elemző hallásáról. A zenében és a beszédben ez gyors magasságfelismerő képességünk használhatatlan, hiszen fellép az időbeli elfedés jelensége, ami összemosza a hangokat.

A fülhöz mint rendszerhez hozzárendelhető egy *időállandó*, ami a külső hatásokra történő ráfelelés időtartamát, azaz a rendszer berezgését jelzi. Ennek becsült értéke mély hangokra lassabb (50 ms), magasakra rövidebb (20 ms). Mindez ellentmondani látszik annak a tapasztalatunknak, hogy ennél kevesebb idő is elegendő egy-egy hang paraméter kiértékeléséhez. Ellenben az is tapasztalat, hogyha a hangot (esetleg hangok



sorozatát) az összes tulajdonságával együtt, pontosabban akarjuk megnevezni, akkor már hosszabb (100-200 ms) jelmintákra van szükségünk.

### **3.1.5 A szubjektív hangmagasság és a hangszerkezet (virtuális alaphang)**

A hangmagasság meghatározása tovább bonyolódik, ha pl. a jelhang zajban szólal meg. Az órai kísérlet során is nagyon sokféle ítélet született, milyen is a hallott hangmagasság zajban.

Mély zaj hatására a jelhang eltolódik felfelé, mintegy „kibújik” az elfedő zaj alól. Az alaphártyai mozgás változásából ugyanis az olvasható ki, hogy nem csupán egyetlen szörsejt jön egy adott hangnál rezgésbe, hanem több, csak a legnagyobb számú kisülést a megfelelő, karakterisztikus frekvenciával rendelkező szörsejt produkálja. Ha zajjal a szörsejtek szabályos viselkedését lehetetlenné tesszük, akkor mindig a maradék, a zavartalan információ válik felhasználhatóvá. (Meg kell azonban jegyezzem, voltak, akiknél a mély zaj hatására mélyült a hangmagasság érzete. Az ő hallásuk valószínűleg nem analízáló, hanem szintetizáló típusú. Az ő fülüket „elhúzza” a mély zaj. Akiknél nem változott a magasság, azoknak kiváló az izolációs képességük, ill. erős a jelkonstanciájuk, mert agyi efferens, gátló hatás révén külön tudták választani a jelet a zavaró zajtól.

A jelenség gyakorlati következménye, pl., hogy egy hangszer behangolásakor a legideálisabb helyzet, ha az a koncertkörülmények akusztikai háttérében történik. Felvéve tehát a közönségzajt, és azt a hangoláskor visszasugározva, a hallási tapasztalatokhoz jobban igazodhatunk. A hangmagasság-eltolódás effektusa arra is figyelmeztet, hogy sohasem lehet egy együttzenélő csoport tökéletes unisonóban.

A hangszerek hangja már átvezet bennünket egy másik hangtípushoz, a zenei hangok birodalmába. Bizonyára meglepi önöket az a gondolat, hogy a zene, amit hallgatnak a képzeletük szüleménye, azaz virtuális. Természetesen nem minden esetben. Előfordulhat, hogy a fizikai valóság és a szubjektív tapasztalat megegyezik, pontosabban megközelíti egymást. Különleges hangszerkezetű hangszereknél azonban valami egészen sajátos történik, munkába lép az agy, és úgy dolgozza fel a kódolt jeleket, ahogy azt valamikor, valahonnan megtanulta. Azért reménytelen a helyzetünk, ha vissza akarjuk keresni neurológiai, élettani szinten, hogy milyen megfeleltetési szabályoknak engedelmeskedik egy hanghoz rendelt hangmagasság. Ha tehát hangjaink társadalmi kontextusait (nyelv, zene, egyéb kultúrafüggő akusztikai környezet) elhanyagoljuk, nem tudunk jó válaszokat adni egy zenei skálarendszer mibenlétéről. Pontosabban a megfeleltetés még létrejöhet, csak nem fogjuk érteni, hogy noha fizikai értelemben ez és ez történt, miért hallottunk mi mégis így és így.

A harangok hangja is olykor furcsán viselkedik. Ott van benne a megütés pillanatában hallott mélyebb rezgés, de mégsem ez az alaphangja, nem ezt énekeljük vissza hallott hangmagasságként. A hozzárendelt hangmagasságot valójában az elménk hozza létre, azaz képzeljük. Ezért nevezték el *virtuális alaphangnak*, *reziduum hangnak*.

Általában az emberi hangra az a jellemző, hogy szabályos felhangszerkezetű.. Az ilyen struktúrájú hangoknál a hozzárendelt hangmagasság a legmélyebb rezgés (alaphang) frekvenciájával egyenlő (*spektrális alaphang*). De ha pl. kivennénk a hangból ezt az alaphangot, meg az első felhangot, majd a másodikat is, és így tovább, a szubjektív hangmagasság nem változna, csupán a hangszín élesedne fokozatosan. Az agyunk tehát behelyettesítette a hiányzó rezgéseket, mert a már kódolt, memóriában

őrzött hangi mintákban az alaphang jelen van. Ráadásul a hangok periódusideje nem változik. Ezért annyira fontos a magzati (születés előtti) és a születés utáni folytonos hallási tapasztalat a hangok megítélésénél. (Bár az adott problémára az is válasz lehet, hogy nem változott a hang periódusideje hiába vettük ki az alsó rezgéseket a hangból, márpedig 3000 Hz alatt a fül ez alapján kódolja a hangmagasságot.)

[Az előző fejezetben sokat foglalkoztunk a hangmagasság érzékelésének, észlelésének elméleteivel. A komplex hangokra vonatkozó jelenleg legtöbbet nyújtó elmélet, a *spektrotemporális elmélet* az alsó részhangok alaphártyamozgás-szörsejtrezgés szerinti spektrális kikeresését tekinti mérvadónak, és a felső részhangokhoz tartozó hullámmozgás ismétlődési periódusaiból, a kisülési mintázatok időfüggéséből (ami alatt szintén alaphártyai indítatású folyamatot kell érteni) ún. temporális elemzést véli e kikeresés neurális szintű folytatásának. A mesterségesen létrehozott hangok szerkezetére vonatkozóan mindezt előírásnak is tekinthetjük ahhoz, hogy értelmes hangmagassággal rendelkező hangokat kreáljunk. Ha egy hanghoz nem köthető stabil hangmagasság, még mindig lehetőség van ennek az instabil állapotnak a megtanulására, ahogy azt a távol-keleti zenekultúrákban tapasztalni.

Moore (1997) kétségbe vonja a dichotikus virtuális hangmagassági vizsgálatok eredményeit, azzal, hogy a hangmagassági ítéletek túlságosan bizonytalanok voltak. (A dichotikus kísérlet lényege, hogy pl. az egyik fülbe 300 Hz-et, a másikba 400 Hz-et bocsátanak, és a hallgató 100 Hz-es hangot vél hallani.) A dichotikusság a magasabb szintű agyi folyamatok legfőbb bizonyítéka. Moore tehát feltételezi, hogy hangmagasság hallásunk alapvetően az alaphártyán és a hallóidegben dől el. Azonban a mentális folyamatok (pl. az új hangmintáknak a tárolt mintákkal az asszociációs kéregben történő összehasonlítása) bizonyosan részét képezik a hangmagasság elemzési folyamatnak, mert a tanulás egyértelműen javítja a hangmagasság megnevezési képességünket.]

Az abszolút hallás kevés embernek sajátja. A zeneszerető ember általában szenved ettől a képességétől, mert az előadók közül is nagyon kevesen pontosak (a pontosságot itt abban az értelemben használjuk, hogy a többség hangmagasság ítéletével leginkább korreláló hangmagasságot tekintjük elfogadhatónak).

Neurológusok azt találták, hogy az abszolút hallás tanulás eredménye, mert a baloldali frontális kéreg hátoldali része mutatott aktivitást, ami köztudottan a kondicionált, asszociatív tanulásban vesz részt. De más baloldali kéregrészt is aktivitást jelez abszolút hallásúaknál, a planum temporale felülete vagyis a superior temporale Heschl-gyűrű mögötti területe, amit korábbi, más módszerrel végzett mérések is megerősítettek.

Sokáig kérdés volt, vajon az egyes részhangok fázisa, egymáshoz viszonyított időbeli tulajdonságai hatással vannak-e a hangok magasságára. Kimutatták, hogy a sok részhangot tartalmazó hangoknál nincs reális szerepe a fázisnak. Azonban kevés komponens esetében bizonytalanabbá, pontatlanabbá válhat a hangmagasság megítélése a fáziseltéréseknek köszönhetően, ami különösen halláskárosodotknál rontja a zenehallgatást.

Keveset szóltunk eddig a zajról, mivel meghatározott magasság a végtelen számú rezgés miatt nem rendelhető hozzá.

Keskenysávú zajokra leginkább a hangfekvés és nem a konkrét magasság érzete a jellemző. Hangkísérleteinkben mi is gyakran használjuk őket. Példának leginkább a fogorvosi fűrő hangját lehetne említeni, de valószínűsíthető, hogy még a legtapasztaltabb muzikusok figyelmét is folytonosan elvonják a fogorvosok furcsa mozgólatai.

## 3.2 A hangerő és hangosság

### 3.2.1 Az objektív értékek: hangnyomás és hangnyomásszint (a dB fogalma)

Az 11.a ábra függőleges tengelye valójában a *nyomásamplitúdót* ( $p$ ) jelzi, ami *pascalban* ( $Pa=N/m^2$ ) mérendő. A levegőben tovaterjedő rezgésállapot ugyanis nem más, mint a levegő nyomásának periodikus megváltozása. Mivel a füttyöt mikrofonnal vettük fel, és a mikrofon a nyomásingadozást feszültségingadozássá alakítja át, ezért a pascal értékek helyett a mikrofon feszültségének volt (V) értékeivel jelöltük a rezgés amplitúdóját. A hangnyomás amplitúdója (ill. ennek négyzete) egy másik alapvető hangi makroparamétert jellemez, a *hangerőt*, amit szokás még a hang dinamikájának is nevezni.

A pascal parányi nyomásértéket kifejező mértékegység. Egy elvékonyított tízdekás bocicsoki az  $1\text{ m}^2$  felületű asztalra „ráterülve” hoz létre 1 pascalnyi nyomást.

Megközelítőleg  $10^5\text{ Pa}$  a normál légnyomás a levegőben, úgyhogy az emberi hallás fájdalomküszöbe ( $1\text{--}10\text{ Pa}$ ) alatti hangok nyomásingadozási értékei, ha pl. az ujjbegyünkkel a jegyzet lapjaira kifejtett nyomáshoz viszonyítjuk, szinte jelentéktelenek.

Az 11.b ábrán a fütty nyomásmaximumát ábrázoltuk a frekvencia függvényében. Ezt az ábrát a fütty Fourier-féle *hangszínképének*, *spektrumának* nevezzük, ami szintén fontos, objektív hangi makroparaméter. A rezgésgörbe és a hangszínkép közötti azonosság igazolására később még visszatérünk.

Az 11.b ábrán a függőleges tengely mértékegysége már nem pascalokban, hanem decibelekből kifejezett. Mindez bővebb magyarázatot kíván:

mivel az éppen meghallható hangok hangnyomása parányi,  $2\cdot 10^{-5}\text{ Pa}$  ( $20\text{ }\mu\text{Pa}$ ) körüli érték, a fájdalmat okozó hangok pedig  $1\text{--}10\text{ Pa}$  feletti, a kutatók bevezettek egy praktikus, de a gyakorlati életben számszerűen nehezebben kezelhető mértékegységet, a *decibelt* (dB). Ennek segítségével ez a túl terjedelmes nyomás skála 0 és  $120\text{--}130$  közötti számértékekre zsugorítható össze. Az eljárás nem meglepő, hiszen alapvető mértékegységeinket mindig úgy választjuk meg, hogy a fizikai világ emberi léptékű legyen. A hallásküszöb ( $20\text{ }\mu\text{Pa}$   $1000\text{ Hz}$ -en) tehát 0 dB-nek, a fájdalomküszöb ( $1\text{--}10\text{ Pa}$ )  $120\text{--}130\text{ dB}$ -nek felel meg. Csupán azért nehéz a decibellekkel fejben számolni, mert logaritmikus és nem lineáris mértékegységek. Ezért mondhatunk olyan látszólagos komolytalanságokat, hogy:  $0\text{ dB} + 0\text{ dB} \approx 6\text{ dB}$ , a hangnyomásra vonatkoztatva, és 3 dB-t hangintenzitás esetében.

A pascalok decibelekre váltásának lényege, hogy minden hangnyomás értéket ( $p$ ) a hallásküszöbön mérthez ( $p_0$ ) viszonyítunk, a kapott arány tízes alapú logaritmusát képezzük, majd az eredményt megszorozzuk 20-szal:  $x\text{ dB} = 20\cdot \lg(p/p_0)$ . A negatív decibel értékeknek is van értelme, azt jelzik, hogy a hang az emberi hallásküszöb alá került.

Ha decibelben határozzuk meg valaminek a hangnyomását, akkor hangnyomás helyett, a hallásküszöbhez történt viszonyításra utalva *hangnyomásszintet* kell mondanunk.

### 3.2.2 Hangteljesítmény és hangintenzitás

Egy hangszer *hangteljesítményét* ( $P$ ) úgy határozzuk meg, hogy a hangszer megszólaltatásakor megmérjük a hangforrást körülvevő képzeletbeli zárt gömbfelületen egységnyi idő alatt merőlegesen kilépő hangenergiát. A hangteljesítmény mértékegysége a watt. A fájdalomküszöb, amikor a hangok már elviselhetetlenül hangosak, kb. 1-10 wattnak felel meg., a hallásküszöb ( $P_0$ ) =  $10^{-12}$  wattnak.

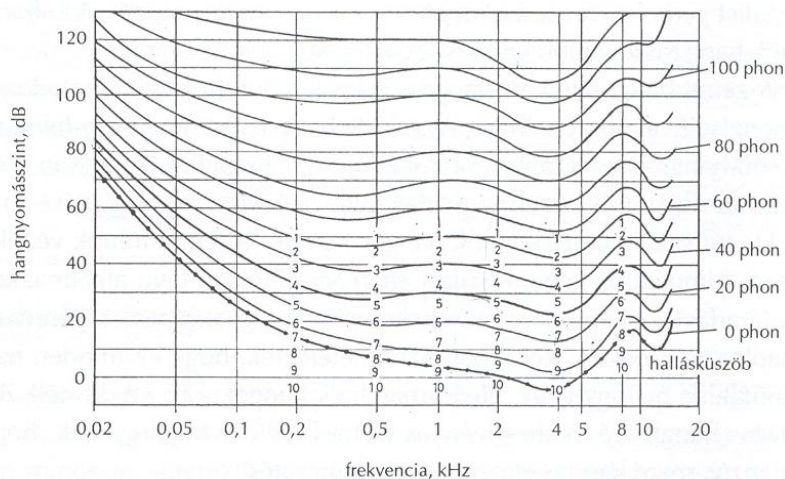
A *hangintenzitás* ( $I$ ) az egységnyi felületre vonatkoztatott hangteljesítmény ( $\text{watt/m}^2$ ) már vektormennyiség. Az intenzitás a hangteljesítménynél sokkal hűségesebben mutatja számunkra a hangerő térbeli értékeit, hiszen a fül is a szabadban „pontonként” térképezi fel a hangforrások terét és nem globálisan értékeli ki. Zárt térben is ugyanezt teszi, de már csak a terem átviteli tulajdonságainak függvényében képes a hangforrásról ítéletet alkotni.

A hangintenzitás és a hangteljesítmény értéke a hangnyomás négyzetével arányos. Ezért a dB-ekben megadott szintértékek mind a három fizikai jellemzőre azonosak, csak hangteljesítmény- és hangintenzitás szintnél a forrásduplázási szabály mindig 3 és nem 6 dB –es növekedést jelent, ill.:  $10 \cdot \lg(P/P_0) = x \text{ dB}$ ;  $10 \cdot \lg(I/I_0) = x \text{ dB}$

### 3.2.3 A szubjektív hangosság: phon-skála és son-hangosság

A hangossági ítélet pszichoakusztikai oka kevésbé követhetetlen, mint a hangmagasságé. Ez összefügg részben azzal is, hogy az akusztikai, objektív oldal az elmondottak szerint egyértelmű: a nagyobb hangerő nagyobb hangnyomás-ingadozást jelez.

Ha visszaemlékeznek a hallási mechanizmusról elmondottakra, a külsőfül rezonanciái miatt a magasabb frekvenciatartományra a fülünk érzékenyebb. Ahogy a frekvenciafüggést kifejező phon-skálákról is látható, a kulcsfontosságú frekvenciatartomány 2-4 kHz közé esik. A legelső, szaggatott görbe a hallásküszöb görbéje. (A küszöb szó azt jelzi, hogy halljuk is a hangot meg nem is.)



12.ábra A phon-skála

A phon-skála hangjait úgy határoztuk meg, hogy 1000 Hz-en 10 dB-t 10 phonnal, 20 dB-t 20 phonnal jelöltük stb. , majd az 1000 Hz –es hang minden egyes phon értékéhez más hangmagasságokon megkerestük azt a hangnyomásszintet, amikor a kiválasztott hang azonosan hangos lett az 1000 Hz-es hanggal. A talált dB értéket a



frekvencia függvényében ábrázoltuk. Az ábra egyetlen vonala mentén a hangok tehát azonosan hangosak.

A tiszta hangok hangosságai összehasonlítása egyszerű volt. De hogyan értelmezzük azt a jelenséget, amikor két ember azonos dB értéken, azonos magasságon énekel, mégis az egyikük hangja lényegesen hangosabbnak tűnik. Lenyomott gégefővel könnyedén létrehozható ez a hangosság növelő, sajátos hangképzés, amellyel a magasabb részhangok meghatározott tartománya kiemelhető. A decibelértékben nincs lényeges változás, azonban a fülünk ezekre a felhangokra érzékenyebb, azaz a hangot hangosabbnak halljuk. Általános zenei jellemző, hogy a felhangdúsabb hang mindig lényegesen hangosabb. Ez utóbbira a kritikus sávoknál elmondottak adnak választ: a különböző kritikus sávokba eső, távoli szőrsejteket gerjesztő rezgések megnövelik a hangosság érzetét. A felhangdúsabb hang mindig több kritikus sávot fog át, ezért lesz hangos. Minden eszközünk megvan tehát arra, hogy ha a szükség úgy kívánja, „leénekeljük” a riválisokat.

A zenei hangok valódi hangosságára tehát nem használhatjuk sem a phon, sem a dB fogalmát, ezért külön nevet, a *son-hangosságot* vezették be erre a fogalomra. A son-hangosság legfontosabb tulajdonsága, hogy lineáris: 1 son+1 son = 2 son. Egy másik hasznos megfeleltetés: 40 phon = 1 son.

Ha túl sokáig tartózkodunk hangos környezetben, a fülünk védekezni fog. Kimutatták, hogy a hallás adaptációja (hosszú távú alkalmazkodása, „kifáradása”) néhány perc után bekövetkezik, és így a hangosságérzet automatikusan csökken. Korábban azt feltételezték, hogy ez minden hangra fennáll, de ma úgy vélik, elsősorban halk hangokra (< 30 dB-nél), ill. magas hangfrequenciesűekre érvényes. Megfigyelték, hogy az intenzív, rövid hang is halláskimerülést okozhat.

Ha repetál, lüktet egy hang (pl. dobütések hangja), akkor sokkal hangosabb lesz, mintha a dobos csak egyet ütne, és az kitartana egész este. A magyarázat szintén az adaptációban keresendő.

A hangosság megkülönböztetési képességünk is korlátos, 0.5 dB és 2 dB között változik, a hangnyomásszint függvényében. Minél hangosabb egy hang, annál jobban halljuk, mennyire hangos. (Természetesen ez a szabály ágyúlövészerű hangosságokra és 6 kHz felett nem érvényes.)

A hangosság érzet neurológiai magyarázatai nem egyértelműek. Nincs egzakt megfeleltetés az idegi kisülések száma (ami egy adott idegrostnál nő, ha a hangnyomás nő) és a hangosságérzet között. A fő gondot az okozza, hogy a hangnyomás növekedésével az alaphártya kitérése is nő, az aktív szőrsejtekhez újak társulnak.

A választ a bonyolultságra az adja, hogy különböző spontán aktivitású idegrostok vezetnek el a halk és a hangos hangokat (lásd előző fejezet). Lehetővé téve így, hogy a fül érzékelni tudja a  $10^{-12}$  wattos és 1-10 wattos hangteljesítményű hangokat is. Ennek kifejeződése, hogy hallási képességeink megváltoznak 30-40 dB (phon) körül.

Az előző fejezetben már megállapítottuk a fül mechanizmusaival kapcsolatosan, hogy a hangos hangok alaphártyái torzítási effektusokat hoznak létre, amelyek felfelé (*szubjektív felhang*) és lefelé (*kombinációs vagy különbségi hang*) is kiegészíthetik a hallott hangok tartományát. Fontos megjegyezni, hogy csak az első ( $f_2-f_1$ ) és az ún. köbös ( $2f_1-f_2$ ) különbségi hangokat halljuk meg, ezeket is gyengén. A hangos szinuszos hangok leglényegesebb sajátossága, hogy sohasem halljuk szinuszosnak őket.

A hangosabb hang általános tulajdonsága, hogy mindig felhangdúsabb, ugyanis a fizikai rendszerek a kitérés növekedésével egyre inkább nemlineárisan viselkednek, ami a rezgésforma torzulásához vezet. És egyszerűen utána lehet gondolni, hogy egy szabálytalanabb rezgés mindig csak lényegesen több szabályos rezgésből tehető össze. (A jelenség hasonló ahhoz, amikor egy kocka után egy elefántot is téglákból akarunk kirakni. Egyre több és egyre kisebb téglákra lesz szükségünk.)

### 3.3 A hangszín

#### 3.3.1 A hangok hangszínképe: spektrum és spektrogram

Ha pl. egy szájharmonikát fújunk, a rezgésgörbe formája bonyolódni fog (11.c ábra). Az  $f_1$  hang hangszínképében az egyetlen vonalat szabályos rendben elhelyezkedő vonalak sokasága egészíti ki (lásd 11.d ábra). Ezt a hangot már *zenei hang*nak nevezzük. A tiszta hanghoz képest a zenei hang felhangokat, magasabb rezgésszámú rezgéseket is tartalmaz. (Szokásos elnevezés még: 1.részhang = alaphang, 2.részhang = 1.felhang, stb. .) A részhangok frekvenciaaránya ideális esetben: 1:2:3:4:5:6:7:8:9:10... . A részhangok által meghatározott hangközöket, amelyeket frekvenciáik arányával fejezünk ki, a görög zenekultúra kitüntetétté tette, noha nem ismerték a hangok pontos szerkezetét.

Ahogy már korábban említettük, a zaj végtelen sok szabálytalan rezgésből áll (lásd 11.g-h ábra). A valóságban szinte alig találni hangforrást, amelyet valamilyen zajféleség ne jellemezzene. Az első szintetizátorok megjelenésekor éppen a zajok hiánya rontotta el a klasszikus hangszerhang-imitációk illúzióját.

A zajok különféle típusúak: a *fehér zaj* minden lehetséges rezgést tartalmaz, hasonlóan a fehér fényhez, amelyben az összes látható fényhullám benne van. A *rózsaszín zajban* túlsúlyban vannak a mély frekvenciájú összetevők -mivel a vörös szín felel meg a legkisebb frekvenciájú látható fénynek.

De mi történik, ha pl. fehér zajt, mondjuk egy adás nélküli televízió sercegését hallgatjuk, és közben befogjuk a fülünket? A hallójáratba helyezett ujj lecsillapítja, megszüri a magas hangokat, azaz *magasvágó szűrőként* viselkedik. (A fül természetes magasvágó szűrő hatása 16-20 kHz feletti hangokra érvényes. Az emberi fül egyébként a nagyon mély hangok átvitelét is elrontja, és 16 Hz alatt *mélyvágó szűrőként* funkcionál.) Ha a zaj felülről és alulról is szűrt, akkor *sávzajról* beszélünk.

Annak igazolásához, hogy az adott hanghoz tartozó spektrumok és rezgésgörbék ugyanazokat a hangokat fejezik ki, az alapötletet a *superpozíció elve* szolgáltatja. Ezen elv szerint az egyetlen tömegpontra ható, egymástól független erők összeadhatók, azaz az általuk létrehozott mozgások eredője az egyedi mozgásokból megszerkeszthető. Ha tehát egyetlen rezgő hangforrásra több harmonikus rezgést eredményező erő hat egyszerre, az eredő mozgás egy bonyolult, periodikus rezgési folyamat lesz, hasonló formájú, mint ami az 11.c ábrán látható. Fordítsuk meg a gondolatot: ha egy mozgás periodikus, meghatározhatók-e az őt létrehozó harmonikus rezgések? Erre a választ *Joseph Fourier (1822)* tétele mondja ki, miszerint *minden periodikus folyamat előállítható harmonikus rezgések összegéből, ahol az egyes rezgések frekvenciája az alapperiódus egészszámú többszöröse.*

Az egyes rezgések kezdőállapota (fázisállandója), valamint amplitúdója is megadható az elmélet alapján. A hangszínképben részrezgések frekvencia szerint ábrázolt

amplitúdó értékeit látjuk. A hangszínek energiamaximum-helyeit nevezzük *formánsoknak*. Ezek kiemelkedések, „dombok” a spektrumban.

A hagyományos Fourier-féle analízis eredményeként a hangot alkotó részhangok „vonalszerkezete” tehát maga a hang. Adós marad azonban ez az ábrázolás a fázissal, az egyes rezgések kezdőállapotával, ugyanis a hangokat alkotó részrezgések nem egyszerre indulnak és halnak el. Ezért valójában ez az ábrázolási mód ebben a formában csak stabil, időben változatlan szerkezetű hangok elemzésére alkalmas. Márpedig a természetben éppen a változás a legalapvetőbb.

A zaj általában nem periodikus, így nem lehetséges egyszerű, egészszám frekvenciaarányú tiszta hangok összegére bontani. Az elemző programok a korábbi összegzést végtelenül finom felosztással (integrálással) helyettesítik, kváziperiodusokkal dolgoznak, hogy az 11.h ábra ún. *folytonos spektrumát* megkapjuk. Mindezekre az eljárásokra nem áll módunkban részletesen kitérni, összefoglaló nevük *Fourier-transzformáció*.

Ha glisszandósan füttyölünk, az 11.e ábra hangjához hasonló hangot kapunk. Egy ilyen füttyentésnek a *gördülő spektruma*, ahol is a számítógép meghatározott időtartamú digitalizált mintákat vesz a hangból (a rezgésgörbéből) és ezen hangminták Fourier-elemzését végzi el. A gördülő spektrum nemzetközi szakirodalomban elterjedt neve *spektrogram*. Ennek formai változata a beszédhang kutatásban sok-sok évvel ezelőtt alkalmazott *szonogram*, ahol a dinamikai értékeket az ábra színeivel, esetünkben színárnyalatainak sötétítésével jelezzük (lásd 11.f ábra).

(A szonogramot mérő Sona-Graph-rendszerű hangelemzés a keresőhang elvén nyugodott: a mérendő hanghoz változó frekvenciájú tiszta hangot kevertek hozzá, és az eredeti hang módosulását mérték.)

Napjainkban a spektrogramok (idő-hangmagasság-hangerő) ábrázolások fejezik ki legvalóságosabban a zenei, akusztikai tartalmat, a hang szerkezetét. Azonban korábbi elégedetlenségünkre csupán enyhítő gyógyírt kaptunk, mert a Fourier-elemzés a hangok rövid idejű hangmagasság-változásának elemzésére nem alkalmas, mivel pontatlanul méri a hangmagasságot. A hangmagasság csak akkor pontos, ha a mintavételezés időtartama kellően hosszú.

### **3.3.2 A mikroszerkezet vizsgálatának módszerei**

A számítógép elterjedésével, a hangjel digitalizálásával, megfelelő algoritmusok alkalmazásával a Fourier-analízis rendkívül leegyszerűsödött; szinte bármelyik személyi számítógép alkalmas lett hangelemzésre. A számítási műveletek redukálásával lényegesen meggyorsult a spektrum meghatározása. A napjainkban legkorszerűbb Fourier-féle analízis neve *FFT (Fast Fourier Transformation)*. Az ábráinkon is a hangjelek FFT-it láthatjuk.

Egy időben állandó hangnál a megismert makrojellemzők: a hangmagasság (rezgésszám), a hangerő (hangintenzitás), a hangszín (spektrum) és az időtartam a hangokat már kielégítően jellemzik. Azonban az első három paraméter időbeli változása alapján más hangnak vélhetjük őket. A változásokat ezért mikrotulajdonságként minősítjük, és a hangok szerkezetének vizsgálatakor külön elemezzük.

A hangok mikroszerkezetéhez soroljuk a makromennyiségek időbeli változását (pl. vibrato, tremolo), az időleges, átmeneti jelenségeket (tranziensek), pl. egy rövid idejű

nemharmonikus felhang megjelenését, rövid zajelemet stb. . Különösen fontos a hangok felismerése szempontjából a berezgés és lecsengés folyamata. A berezgés ismerete nélkül nem mindig határozható meg pontosan, hogy milyen hangszerhangot is hallunk. Hasonló eredményhez vezethet a lecsengés radikális megváltoztatása is.

A szubjektív megítélésnél a hang indítása a döntő, ama bizonyos „első benyomás”, mivel a rákövetkező hang hatását az első elfedheti. Ezért a berezgési folyamat tranzienseinek elemzése napjaink legakutabb problémájává vált. Különösen az impulzusos gerjesztésű, folytonosan lecsengő karakterű hangszerek hangjának analízise kíván aprólékos munkát.

Gondjaink enyhítője, hogy az emberi érzékelés „nagyvonalú”. Ezért azt kell csupán tudnunk, mi az a szerkezeti változás, aminek eredményét még meghalljuk. Az időbeli felbontás finomságának elegendő tehát ehhez a mértékhez igazodnia. Ha ennél is jóval mélyebbre kívánunk hatolni, mérési lehetőségeinket a *határozatlansági reláció*, a természet megismerésének határait kijelölő kvantumfizikai alaptörvény fogja korlátozni, miszerint bizonyos fizikai mennyiségek nem mérhetők egyszerre pontosan; esetünkben az idő és a hangmagasság (ill. az elemi részek világában a hely és az impulzus). Muszáj tehát valami teljesen más elven nyugvó mérési eljárással próbálkoznunk, hogy ezt a csapdát elkerüljük. A hangelemzési módszerek új típusát egy nagyon egyszerű, hétköznapi jelenséggel világíthatjuk meg; a *koktélparti effektussal*.

Társaságban beszélgetve, akusztikailag szinte megmagyarázhatatlan, hogyan értjük meg egymást, hogyan vagyunk képesek beszélgetőtársunk hangját a környezetében lévő gyakran hangosabb mondatfoszlányai, hangjai közül kiemelni és értelmezni. Ha a fülünk Fourier-elemzést végezne csupán, akkor mindez nem valósulhatna meg. Ha kellő ismeretünk van a hasznos és a zavaró jelekről, ha tudjuk, mit akarunk hallani, ha beszélgetőtársunk hangját (és a környezetét is) megtanultuk, akkor képesek leszünk őt „kihallani”. Partnerünk hangjának megtanulása akusztikai paramétereinek nem tudatosuló ismeretét jelenti, azaz bizonyos mintafüggvények kialakítását és tárolását. Nem csinálunk azután egyebet, mint a hangzó, keletkező új „függvényeket” ezekkel a mintákkal hasonlítjuk össze. Az összehasonlítás két szinten történik: a hasznos, ill. a zavaró jeleket mérjük össze a mintáinkkal. Az előbbi eljárás neve *autokorreláció*, az utóbbié *keresztkorreláció*.

Minél jobban eltér valaki vagy valami hangja a környezetétől, korrelációs elemzése annál egyszerűbb.

Valószínű, hogy az ember számára ez az agyi feldolgozás energiaigényes és nagy koncentrációt kíván. Főként idegen nyelvű környezetben fárasztó a koktélparti-szerű beszélgetés (és csak bizonyos mennyiségű koktél elfogyasztásával vagyunk képesek visszanyerni az erőnket és az önbizalmunkat!).

A fenti korrelációs elvek matematikai módszerei kidolgozottak, és az akusztikai jelek, a hangok elemzésébe átültethetők.

Az autokorrelációs elemzésnél a hasznos jel rezgésgörbáját különböző periódusokkal toljuk el, és azt vizsgáljuk, hogy az eredeti jel az eltolt görbesereg elemei közül melyikre hasonlít legjobban. (Hasonló eljárás, mint amikor valaki az általa elmondottak szerint készült fantomképek alapján ismeri fel a rablót.)

Mivel a zavaró jelekkel a hasznos jel korrelációja minimális, önmagával pedig maximális, az autokorrelációs függvény kiemelkedik a keresztkorrelációk közül, és „eltúlzó”, de nyomon követhető formái alapján leírhatóvá válik maga a hasznos jel.

### 3.3.3 A hangszín szubjektív vizsgálata

A felhangdússág szót már sokszor használtuk. Valószínűleg mindannyian egy élesebb, világosabb hangot képzelnek el ilyenkor. A hangokat elsősorban minőségi jellemzőjük, a hangszínük alapján jellemezzük; gondoljunk csak barátaink, rokonaink, ill. egyes hangszerek hangjára. A hangszínt a hangokat alkotó rezgések összessége, pontosabban az egyes rezgések időbeli amplitúdó- és frekvenciaváltozása, vagy leegyszerűsítve a problémát, egyes frekvenciatartományok energiatartalmának időbeli változása határozza meg. (Az angol nyelv az észlelt hangszínt külön szót használ: *timbre*.)

A központi idegrendszerben már agytörzsi szinten találni hangszín-projekciót. A mérések szerint a hang változásait nehezebben követjük, ha szeparálható részhangokból áll. A hangszínnél egyfajta holisztikus elv érvényesül, a részletek elemzése helyett az agy a komplex szerkezetről egy viszonylag egyszerű ítéletet alkot, ahol a részek összege nem azonos az egészszel.

Fizikai értelemben egy hangot alkotó rezgések összességét műszerekkel megmérni ma már viszonylag könnyű. (A gyorsan változó hangok akusztikai analízisének hiányosságairól az első fejezetben külön szoltunk.) Ennél sokkal nehezebb a hangszín mint érzet és észlelet tudományos elemzése, az objektív rezgéshalmaz és a minőségítélet közötti megfeleltetés. Még ennél is nagyobb gondunk azonban, hogy a hangszín nem skálázható, és nem csak érzeti-észleleti oldalról, hanem fizikai oldalról sem. A hangosság és a hangmagasság mindkettőnél egydimenziós paraméternek tekinthető. Bár ez sem teljesen egyértelmű, pl. a hangmagasságot mint zenei jellemzőt sok szakember legalább két dimenzióval jelöli: *Helligkeit (pitch)* – magasság; és *Tonigkeit (chroma)* – minőség. (A chroma zenei megfelelője az oktávpárhuzam.)

Mivel a hangszín egyértelműen minőséget jelöl, ezért csak többdimenziós skálarendszerben tudjuk elhelyezni. Már *Karl Stumpf* 1890-ben 20 szemantikai párba rendezte a verbális hangszínjellemzőket, pl. sötét-világos, éles-tompa stb. Ezt a módszert követte a hetvenes években *von Bismarck*, aki 30 párt talált, és faktoranalízissel határozta meg, melyek azok a centrális tulajdonságok (uralkodó komponensek), amelyek köré rendezhető 35, időben állandó spektrumburkolójú hangmintáról alkotott verbális ítélet. Ezzel az eljárással lényeges információvesztések nélkül a dimenziók számát sikerült lecsökkentenie. A szubjektív hangszínmérika kialakítása tehát a pszichológiai statisztika matematikai alapú kiértékelési módszerével bizonyos határok között megvalósítható.

A kapott két központi hangszínjellemző az *élesség* és a *kompaktság* (hogy az utóbbit jobban megértsük; ellentéte a *szétesettség*). Az élesség egyértelműen monoton frekvenciafüggést mutat, de a dinamikával is nő. Elsődlegesen a hangosságot meghatározó frekvenciatartományhoz köthető. A kompaktság alapján tiszta különbség tehető a zaj és a zenei hangok között. Viszonylag gyengébb kategóriának bizonyult *teltség* és a *színesség*. A teltség hiányánál, az *ürességnél* (pl. a nazalitás érzésével is párhuzamba szokták állítani) a páratlan számú részhangok erősek. Ilyenek pl. a



barokk furulya, a klarinét és a pánsíp mély hangjai. Bár a nazalitás leginkább az 1200-1800 Hz-es tartomány kiemeléséhez köthető (pontosabban a többi csökkenéséhez). Egyszerű hangoknál pl. a magasság a minőségghordozó: a mély hang tompa, a magas hang éles.

Az *érdesség* gyakorta jellemzője az emberi hangnak. Ahogy a név is mutatja, egyfajta kellemetlenség-érzet. A felhangok közelségéből, gyors (10-35 Hz-es) ingadozásából adódóan a jólhangzást lerontja.

A leggyakoribb eset azonban, és valószínűleg megerősítenek ebben a vélekedésemben, ha saját tapasztalataikra gondolnak, hogy egy ismeretlen hang hangszínét valami ismert hangszínhez hasonlítjuk, ami már magasabb rendű mintafelismerést tükröz. Ezért *von Bismarck* (1972) meghatározta azokat a pszichológiai szinteket, amelyekhez a hangszínjellemzők hozzárendelhetők:

1. túlnyomórészt velünk született, ill. a fejlődés folyamán megtanult leképezési tulajdonságokra visszavezetett attribútumok, mint *élesség, kompaktság, teltség, színesség, ingadozáserősség, érdesség* és *volumen*;
2. tanult leképezési tulajdonságokra visszavezetett attribútumok, mint pl. a hangok osztályozása: *vokális hasonlóság, artikulációs módokra vonatkozó hasonlóság, hangszertípussal történő azonosítás, hasonlóság megállapítása*;
3. tanult kategóriákon belüli alkategóriák attribútumai: *pl. fonémák nyelvdialektusok szerint, hangszerek minőségi jellemzői*;
4. limbikus rendszer közreműködésével kialakuló attribútumok: *jólhangzás, örömteliség, kellemesség*;
5. az előző szintekre ráépülő összetettebb kognitív tartalmat kifejező attribútumok: *tisztaság, bonyolultság, hasonlóság*.

A hangszínérzékelés lényegében az első szinthez tartozik, míg a többi magasabb rendű észlelési kategóriát fejez ki.

Ha az időbeli változásokat is figyelembe vesszük, a végtelenség érzése keríthet hatalmába bennünket, ugyanis változhat a hangok fázisa, az egyes részhangok, zajtartalom frekvenciája, amplitúdója, amely változás áttekinthetetlen módon is megtörténhet. A szintetizátor döbrentette rá tulajdonképpen az embert, hogy még a valós világ végtelenje is tovább tágítható. Ezért bizonyult a hangszínek tudományos vizsgálatánál a leghatékonyabb eszköznek az analízis-szintézis gyakorlata. Az elemzett hangok újraserkesztésével (reszintézisével) a változás és a stabilitás kritériumai tárhatók fel, a hangszín invariancia magja (mi pl. a vonós hangszerek hangjának lényege). És ezáltal a computerzene a hangszínt mint elsődleges paramétert kezdte el használni, öntudatlan módon segítve a művészetformáló tudományt. Arról azonban, hogy mi a szubjektív hangszínelmény konkrét neurális háttere, a fizikai jelből milyen transzformációkkal lesz észlelet, hogyan torzul ez a jel, nagyon keveset tudunk. Amit szubkortikális (thalamus) feldolgozási szintről mondtunk, a jelentés nélküli hangszínérzékelés lehetőségéről, továbbra is érvényes. A jelentéssel bíró hangok hangszínét komplex módon tárolhatja el az agy. Hajlok arra a feltételezésre, hogy az életünk során hallott legfontosabb hangok az agykéregben a hallással kapcsolatos részeken „hangtérképet” határozhatnak meg. A beszéd fonémáinak pl. különböző helyek feleltethetők meg a hallókéregben.

### 3.4 Az akusztikai időérzékelés

Az időt másodpercekben mérjük. Fizikai jele:  $t$ . Mértékegysége:  $s$ .

Einstein relativitás elméletében bebizonyította, hogy az idő nem abszolút fizikai paraméter. Az emberi idő már tökéletesen szubjektív.

Az akusztikai jellegű időérzékelés neurológiai hátterét legalaposabban *E. Pöppel* elemezte. Hierarchikus modelljének öt fokozata a pillanat és a valódi időtartam közötti sávot fogja át. Pöppel *egyidejűségnek* nevezi, ha két hang keletkezése között legfeljebb 2-5 ms van. Ha az időkülönbség ennél nagyobb, a tökéletes egyidejűség elromlik (*elrontott egyidejűség*). Az *egymásutániség* érzete kb. 30-50 ms-nál alakul ki. (A Haas-effektus határa is 20 ms, ill. az időbeli elfedési effektusoknak is hasonlóak a határértékei.) Ekkortól kezdenek el függetlenedni egymástól a hangok. A magyarázatot központi idegrendszerünk működésében kell keresni. Ugyanis a hang neurális kisüléseket okoz, és egy újabb hangot csak akkor érzékelünk különválónak, ha a neuronok relaxációs idejénél hosszabb idő múlva ingerlik a fület.

A negyedik fokozat a *jelenidő*, a „*Präsenszeit*”, kb. 3 s-os időtartammal. Ha a hangok ennél nagyobb időkülönbséggel szólalnak meg, elvész az összetartozás érzete.

Az ötödik időfokozatba, amit Pöppel „*tartamnak*” nevezett, már ilyen hangok tartoznak. Nem véletlen tehát, hogy az emberre oly jellemző Békésy-féle *prezencia-idő*, amit Tarnóczy is idéz, kb. 1.2-1.3 s időközt jelöl. A prezencia-időt úgy határozhatjuk meg, hogy a jelöltet megkérjük, ne túl gyorsan és ne túl lassan egy percen keresztül halkan kopogjon az asztalon, és kiszámoljuk a két kopogás közötti átlagos időkülönbséget. Az órai mérések szerint a diákok prezencia-ideje, noha azonos zenekultúrában élnek és alkotnak, 0.5 s és 2 s között változott, a Békésy-féle értékhez hasonló átlaggal. E két szélsőérték legfontosabb következménye, hogy nagyon is szükség van a karmesterekre, hogy a különböző idő-karakterű zenészek sajátidőit egyetlen zenei történetbe egyesítsék. A 0.5 s-ot, azaz 120-as tempót produkáló hallgatók türelmetlen embereknek mondták magukat. A prezencia-időt egyébként befolyásolja az időjárás, a napszak. Említésre méltó tapasztalat még, hogy a magyar diákok ideje a japán, koreai hallgatókénál gyorsabban telik. Az életkortól való függést ugyan nem elemeztük, de a kényelmes tempó lassúbbodása korrelál az életkorral.

A jó időérzék, vagy mondhatnánk úgy is, a ritmusérzék nem csupán a zenében hasznos. Pl. a labdajátékok, az atlétika dobó- és ugrószámai, a torna stb. is megkövetelik a sportolóktól a mozgások tökéletes idő- és térbeli koordinációját. De említhettünk volna bizonyos munkafolyamatokat, vagy a vadászatot is. Ez az egyik általános emberi képesség, amire a zenetanulásnak kimutathatóan jó hatása van.

Befejezésül egyetlen tanács még: nem könnyű egy olyan emberrel sétálni egy egész életen át, akinek a prezencia-ideje lényegesen eltér a miénktől. Tessék előbb leülni, becsukott szemmel kopogni, nem túl gyorsan, nem túl lassan ... , és csak azután házasodni.

### 3.5 A térbeli hallás

Ahogy az előző fejezetben már részletesen kifejtettük, hangok utáni térbeli tájékozódásunkhoz nem feltétlenül szükséges a szimbólumokban való gondolkodás szintje, már agytörzsi-köziagyi szinten megtörténik az információk hangforrás irányát meghatározó alapfokú feldolgozása, ami elegendő néhány motorikus (reflexszerű)

reakció elvégzéséhez, pl. visszalépünk a járdára egy kereszteződésben egy felénk közeledő motor hangjára.

A két fül megléte, a fej árnyékoló hatása, a fülkagyló előre irányítottága és formája, a test fönt-lent aszimmetriája, a hangok irányába fordulásunk mind azt szolgálják, hogy a hangforrások helyét pontosan meghatározhassuk.

Számos állat füle mozgatható, míg az emberi külsőfül izmai elcsökevényesedtek. Ez is azt mutatja, hogy történetünk során valamikor csökkent a hangok szerinti tájékozódás fontossága, valószínűleg akkor, amikor a két lábon járással a látás megerősödött, ill., hogy a hangforrások kiértékelésében, azonosításában az agykérgünk egyre több feladatot vállalt át.

A nem látó embereknél azonban a hangok tájékozódásban betöltött kiemelt szerepe továbbra is megmaradt. A velük folytatott beszélgetésekből az derült ki, hogy egyik legbiztosabb támaszuk közlekedéskor a környezeti hangok, vagy éppen saját lépteik, botjuk hangjának tárgyáról, épületekről való visszaverődéseinek megváltozása. Kifinomult hallásukkal meg tudják becsülni az aktív és passzív hangforrások távolságát, helyét. Bár megjegyezték, ároknál, lépcsőnél azért biztosabb segítség a bot. A hallás mechanizmusával foglalkozó fejezetben számos térérzékelő tulajdonságunk már szóba került. Például magas hangokon (3kHz felett) a fej árnyékoló hatása miatt a két fülbe érkező hangok dinamikai különbsége alapján tudjuk meghatározni, hogy a hang balról vagy jobbról érkezett-e; 3 kHz alatt pedig elsősorban a két hang közötti időkülönbség segít bennünket. A két fülbe érkező hangok akár 0.01 ms időkülönbségét is képes kiértékelni az agy. Legélesebb az irányhallásunk (1°-os pontosságú) a vízszintes síkban beérkező 500 Hz és 1000 Hz közötti hangokra.

Az előlről és hátulról, vízszintes síkban érkező hangok a fülkagyló árnyékoló hatása miatt térnek el egymástól, vagyis a hátulról érkező hang tompább lesz.

Nagy a pontatlanság a felettünk elöl és hátul megszólaló hangok helyének meghatározásánál is. Itt az eltérő hangmagasság és hangszín más és más irányt jelez. Az irányok megadása tehát részben tanulás eredménye. A magas hangok, azaz a 4-5 kHz feletti tartománya a fő információhordozó. Ha pl. a fülkagylónk gödreit gyurmával kitömnénk (a hallójárat szabadon hagyása mellett), romlana az irányérzékelésünk a függőleges szimmetriasíkban. A tanulás mellett szerepe van tehát a fülkagyló formájának is, amit modellvizsgálatok is megerősítettek. Kimutatták, hogy egyes fülformákkal függőleges síkban pontosabban határozhatók meg az irányok.

E pontosságot lényegesen megnöveli, ha látjuk is a hangforrást, ill. ha mozgathatjuk a fejünket. Ez utóbbinál a hangerő és a hangszín változásából következtetjük ki a hangforrás helyét.

Nem látók esetenként úgy érzik, a felülről jövő hangok a koponyatetőjüket hozzák rezgésbe, míg az alulról érkezők a tarkójuknál „szólalnak meg”.

A hangforrások távolságának becslése szintén a hangszín alapján történik és tanulás eredménye: kb. 10 méteres távolságtól kezdődően, egyre messzebről hallva a hangot, a hangszín a levegő frekvenciafüggő csillapító hatása következtében egyre tompább lesz. Azonban itt is elsődleges a tárolt hangminta, a tapasztalat, mert pl. a távoli suttoást mindig közelebbinek érezzük, hiszen az ember csak a másikhöz közel állva sutto.

Érdekes megfigyelés, hogyha azonos helyről szólal meg egy magas és egy mély hang, és csukott szemmel hallgatjuk őket, a mélyet közelebbinek véljük. Ennek az a

magyarázata, hogy a mély hangok sebességének amplitúdója, ami alapján a fül a dinamikai értékekre következtet, közeltérben nagyobb.

Próbálják meg egyszer, unaloműző játékként egy gyengébb színházi előadásnál a szereplők „kiterjedését” a hangjuk alapján meghatározni. Mivel a mély hangok kevésbé irányítottak, gömbfelület mentén terjednek, és az oldalfalakról visszaverődven, virtuálisan megnövelik a kiterjedést. A magas hangok irányítottabbak. Elmondhatjuk tehát, hogy a magas hang „soványít”!

A mély hangok a terem méretét is illuzórikusan megnövelik, mert lecsengésük tovább tart. A tág fekvésű akkordok pedig szintén növelik a becsült méreteket. A térillúziót a hangok a fül azon tulajdonságai alapján keltik, hogy a termék akusztikáját (a teremérzetet) a falakról eltérő jellemzőkkel visszaverődő hangok határozzák meg. Mivel a fül az oldalirányokból beérkező hangokra jóval érzékenyebb (6-8 dB-es a kiemelés), a teremérzet akkor tökéletes, ha a két fülbe oldalról is érkeznek hangok, és minimális, 10-80 ms-os időkülönbség van közöttük. Nem véletlen tehát, hogy a világ legjobb akusztikájú koncerttermei egyszerű téglatest formájúak.

Ennek az időkülönbségnek a méréséből határozták meg a *kétfülű együttfutási fok* elnevezésű teremparamétert. Térérzékelésünk azon tulajdonságai alapján vezették be ezt a fogalmat is, hogy minél nagyobb (egy korlát alatt) a két fülbe érkező hangok közötti időkülönbség, annál „teremszerűbb” a terem. A legújabb felfogás szerint ez a paraméter a termék akusztikai minőségének szubjektív ítéletével leginkább korreláló objektív módon mérhető adat.

Terembeli hallási tapasztalataink az időbeliség kiemelt szerepét jelzik. Mindenki tudja, hogy érzékszerveink működésénél az első hatás a legfontosabb, mert a közvetlenül utána jövőket elfedheti. Hallásnál ezt nevezzük az *első hullámhomlok törvényének*; az első hangjel az utána következő jelet akkor fedi el biztosan, az első hangot akkor halljuk ezáltal hangosabbnak, ha az egészen rövid időintervallumon (kb. 20 ms) belül követi. Ha tehát egy teremben a fülbe érkező közvetlen hang és a falakról visszaverődő első közvetett hangok közötti időkülönbség nagy, a hangot szétesőnek ítéljük, a termet túlságosan tágasnak. Mivel a hangok felfutási szakasza sokkal fontosabbnak tűnik a lecsengési szakasznál, a kétfülű együttfutási fokot is az első 80-110 ms-ra vonatkoztatják.

Egyébként, ha a visszavert hang legalább 0.1 s késéssel jut a fülünkhöz, és ráadásul nagy energiájú visszaverődésről van szó, már a megszólalóhoz képest különállónak érzékeljük. Ilyenkor a sokunk által megtapasztalt *echóról*, visszhangról beszélünk. Hogy létrejöjjön, a terem egyik méretének legalább 17 méteresnek kell lennie.

Mindebből arra következtethetünk, hogy a térbeli hallás tulajdonságainak tudása a termék akusztikai jellemzőinek megtervezésekor alapvető fontosságú, de hasonlóan hangsúlyos kutatási területté vált a fejhallgatós zenehallgatásnál is.

Számos sztereo hangfelvételen, pl. térimitációkat tapasztalhatunk, ill. mozgásimitációkat, amikor a két fülbe nem egyszerre és különböző dinamikával érkező hangok azt az érzetet keltik, hogy a hangforrás „átgyalogolt” egyik fülünkből a másikba.

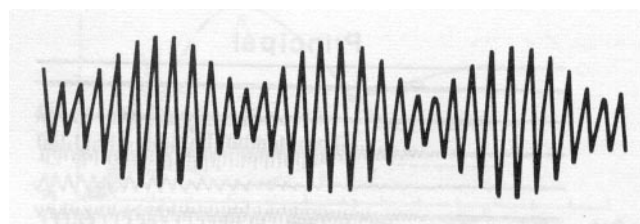
Fejhallgatós zenehallgatáskor már valószínűleg önök is átélték, hogy a zenekar nem elől, hanem belül, a tarkójukban szólal meg. A jelenség, a hangforrások fejben történő lokalizációja, akkor következik be, ha a felvételen a bal- és jobboldali jelek fázisviszonyai kaotikusan összekeverednek.

Ahogy már korábban elemeztük: az oldalirányokat a két fülbe érkező hangok időbeli és dinamikai különbsége; a távolságot, az elől-hátul-fent-lent irányt a hangszín és a hangerő változásai alapján ítéljük meg. A fülünket helyettesítendő, a vizsgálatokhoz hozzárendelhető egy meghatározott transzformációs függvény szerint működő szűrő. Ha a hangfelvételnél figyelembe vesszük ezt a szűrőhatást (pl. mesterséges fej füleibe helyezett mikrofonokat használunk), a hangok térbelisége tökéletes lesz. Ilyenkor a fül hallójáratába helyezett hangszórós fejhallgatón való visszahallgatás a legideálisabb térélményt nyújtja, de ekkor sem halljuk „előlről” megszólalni a hangforrásokat.

Elég gyakori eset, hogy két fülkagylónk nem egyforma (magzati pozíció miatt a méhben, genetikai örökség, csecsemőkorunkban feküdtük el stb.). Bármennyire is furcsának tűnik, ez valamennyire javíthat a térérzékelésünkön. Ugyanis baglyoknál felfedezték, hogy a rendkívül érzékeny, hangok szerinti térbeli tájékozódó képességüket aszimmetrikusan, különböző magasságokban elhelyezkedő fülüknek köszönhetik.

### 3.6 Általános hallásjelenségek: ingadozási jelenségek, az elfedés és a kritikus sávok

Az egyik legismertebb hangingadozási jelenség a *lebegés*. Ez fizikai történés, a levegőben jön létre olyan hangok között, amelyek frekvenciakülönbsége kicsi. A szakirodalomban általában 16 Hz-t neveznek meg, ami alatt még érzékelhető a dinamikalüktetés, de a zenei tapasztalat inkább 8 Hz alatti. A lebegés az eltérő



13.ábra A lebegés rezgésgörbéje

rezgésszámok miatt periodikus erősítés és kioltás. Különösen a zongora unisono húrjainál tapasztalható az eltérő alaphangok között. De létrejöhet a felhangok között is. Az egyenletes lebegésre hangolásnál a kvintpár

hangjainak felhangjai között alakul ki, és a hangoló tudatosan, ezt figyelve

hangolja be a megfelelő szabályok szerint a kvintet. A másodfajú lebegésnek az a lényege, hogy elhangolt kvintek és oktávok (tisztahangokról beszélünk) között jön létre egy agyi folyamat, melynél az agy észleli a periódusidők módosulását és így az eltérést, a zavaró disszonanciát. Létezik dichotikus lebegés is, amikor az egyik fülbe pl. 100 Hz-es, a másikba 105 Hz-es hangot sugároznak, és az agyban kialakul egy 5 Hz-es lebegés, ami generálhatja az 5 Hz-es agyi thétahullámokat.

A dinamika lüktető változását tremolónak nevezzük. Egymás után gyorsan indított azonos hangokkal hozzuk létre. Sokáig azonban a zenei gyakorlatban a tremolo kifejezést a vibratóra használták, a hangmagasság ingadoztatására. A *vibrato* frekvenciaingadozás, mely együtt jár dinamika- és hangszínlüktetéssel is.

A vibratót a szélességével és a gyakoriságával jellemezzük. A túl széles vibrato, ahol a hangmagasság-változás eléri a kissekondot, kellemetlen lehet, különösen más hangszerekkel való együttjátéknál. Az ideális a maximálisan  $\pm$ negyedhangos ingadozás. A vibrato gyakorisága az egy másodperc alatt bekövetkező változások számát jelöli. Hz-ekben fejezzük ki. Ideálisnak tekinthető az 5-7 Hz-es vibrato. Ennél

alacsonyabb értéknél már a két hang különváltan hallható (az időérzékelés szabályai miatt), nagyobb gyakoriságnál pedig a fül nem tudja követni a változást.

A hangok azon tulajdonsága, pl., hogy két hang közül melyik szólal meg előbb, melyik később, melyik hangosabb, melyik mélyebb, egy fontos pszichoakusztikai effektust, az *elfedést* hozhatja létre. Ennek egyik legkomikusabb esete a szülőfalumban történt meg, ahol is *B. Gazsi bácsi* erős, mély hangján rendszeresen túlénekelte a halknak nem mondható, de beszélgetésre még alkalmas kocsmazajt, és ezért, esténként, még a nagy téli hidegekben is, kitették egy székre, a kocsmá bejárata mellé, énekeljen inkább az egész falunak.

Egy erős, mély hangnak sok felhangja van, és ha ezek egy másik, magasabb hang felhangjaival egybeesnek vagy közel kerülnek hozzájuk, elfedik őket (*basszuselfedés*). Ezért van a szimfonikus zenekarokban olyan kevés basszushangszer. Mindebben nincs semmi különös. A meglepő az, hogy erős, mély füttyhang (szinuszhang) is elfedheti a gyenge magasat, de ez fordítva, az erős magassal és gyenge mélyel nem történhet meg. A magyarázat élettani: az alaphártya kimozdulása a magas hangok irányába hosszán elnyúló, a mélyek felé meredeken eső. Tehát a magas hanghoz tartozó kimozdulás, ha kicsi, bele fog simulni az erős mély által okozott, a magas érzékelő rész felé hosszán kiterjedő hullámba. A kitérés aszimmetriája miatt nem következik be a jelenség fordított dinamikai viszonyoknál.

A fülünk sajátosan védekezik az elfedés ellen: pl. evés közben a rágásnak is különösen mély a hangja (feltéve, hogy csukva szánk és nem csámcsogunk?!). Dugják csak be az ujjukkal a két fülüket, és kicsit koccantsák össze a fogaikat. Hangos, mélyfrekvenciás dobbanásokat fognak hallani. Hogy ne fedje el ez a hang a külvilág hangjait (amelyekre evolúciós örökségként mindig figyelünk), a középfül egyik védőizma visszahúzza a kalapácsot a dobhártyáról, lerontván így a mély hangok átvitelét.

Most tapsoljanak egyet, jó erőset. Kérjenek meg valakit, hogy különösen gyorsan, rögtön az önök tapsa után, szintén tapsoljon egy halkabban. Észre fogják venni, hogy ha a két taps közötti idő minimális, a halk taps beleolvad a hangosba. A jelenség neve *előreható elfedés*. Csökken az elfedő hatás, ha az elfedő hang és az őt követő jel közötti időkülönbség nő. És ha eléri a 0.2 s-ot, elenyészővé válik. Főként zenei példák hozhatók, amikor a lecsengő zenekari fortissimókból új témát indít a szerző. De pl. ezért is lehet a zongorán, cimbalmón szép legatókkal játszani. Az ok élettani: a belsőfül még nem nyerte vissza egyensúlyi állapotát.

A fordítottja, a *visszaható elfedés*, amikor az elfedő hang a jelet követi. Ekkor az erősebb inger gyorsabban terjed a hallópályán, innen az elfedő hatása. Az a vélemény azonban, hogy csak keveseknél következik be ez az effektus.

Speciális elfedés fajtának számít a *dichotikus elfedés*. Általában csak fejhallgatós zenehallgatásnál van jelentősége, ill. a jelátviteli technikában alkalmazzák energia kímélő jelerősítésre. Azon a megfigyelésen alapszik, hogyha a két fülbe más (elsősorban fázisfordított, azaz fél periódusidővel eltolt) jeleket, elfedő hangokat adnak, a fentebb említett normális, hagyományos elfedéshez képest mindig javul a jelhallásunk. Tarnóczy Tamás is említ egy erre vonatkozó kísérletet: „Érdemes-e befogni a másik fülünket, amikor telefonon beszélünk?”. Hogy meggyőződjene az önök is, valóban érdemes-e, kapcsolják be a rádiót, állítsák valami „sistergő” hangú hullámhosszra. Vegyék fel a telefont, szorítsák az egyik fülükhöz, dugják be a másik fülüket az ujjukkal, nyissák ki. Észrevehető, hogy a rádió hangja nem zavar, nem



igazán elfedő hatású, mert a két fülbe különböző zajok jutnak be. Lényegesen halkabbá válna a telefonjel, ha a rádió hangja mind a két fülben hallható lenne.

Az elfedési jelenségek egyik élettani oka, hogy a közeli (bizonyos esetekben a távoliak is) szőrsejtek befolyásolhatják egymás viselkedését, ill. magasabb szinten, a hallópályán valósulhat meg a két fül kódolt információinak kölcsönhatása.

A közeli szőrsejtek egymásra hatása egy sajátos hallástani tulajdonságunkat határozza meg, aminek következménye pl. zenénknél, különösen a harmóniaviszonyoknál perdöntő.

Bizonyosan önök is megfigyelték, hogy két hang esetében konszonancia (jólhangzás) érzetünk függ a két hang távolságától, és egy adott határ alatt disszonanciába vált át. De a két hang hangossága is megváltozhat, ha csökken a frekvenciatávolságuk.

Énekeljenek vagy füttyüljenek ketten azonos hangmagasságon. Most az egyikük folyamatosan, lassan növelje hangjának magasságát. Megfigyelhetik, hogy amikor kellemessé kezdett válni a két hang érzete, a hangok hangossága is megnőtt. Így bármelyik hangról kiindulva akár felfelé, akár lefelé meghatározható egy-egy hangsávresz, amely az adott hanghoz tartozó *kritikus sávot* jelöli ki. Bármely kezdőhanghoz megadható így egy sávrendszer, ami összesen 24-25 kritikus sávra osztja fel a teljes hallástartományt, amelyek távolsága az alaphártyán kb. 1 mm.

Azt tapasztalták, hogy 400 Hz ( $g_1$ ) felett a sávszélesség kisterc és nagyterc közötti. (Hogy a kisterc-nagyterc fogalom a laikusok számára is érthető legyen, egy apró szolmizációs gyakorlatot kell csupán elvégezni. Skálázzanak felfelé: *dó-re-mi-fá-szó-lá-ti-dó*'. Itt a *dó-mi* hangköz egy nagytercet jelöl, a *mi-szó* pedig kistercet.)

## 4. HANGTERJEDÉS; A HANGHULLÁMOK TULAJDONSÁGAI

### 4.1 A hanghullám fogalma, típusai

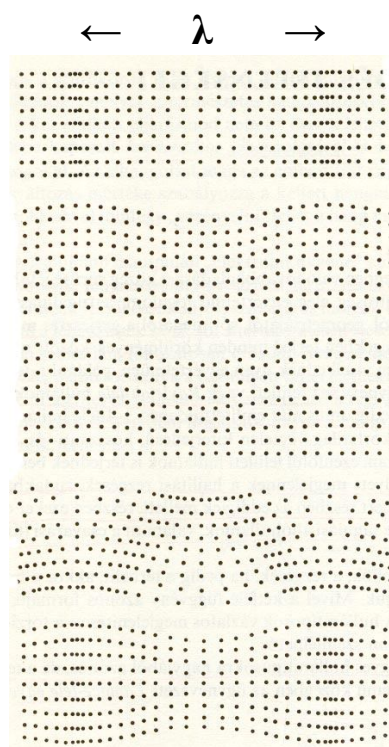
A rezgő rendszer energiát tárol. Ez az energia annál nagyobb, minél nagyobb a rezgési amplitúdó és a frekvencia. A rezgő hangforrás, mivel mozgó részecskéi kölcsönhatásban vannak a környezetükkel, az energiáját átadja a rugalmas közegnek. Ha pl. ujjunkkal rákoppintunk a sima vízfelületre, egyensúlyi állapotából kitérítjük. A rezgőmozgás éppen attól jön létre, hogy a víz igyekszik eredeti állapotába visszakerülni, de mindig túllendül azon. Mivel a vízmolekulák között elektromos összetartó erő hat, a megütött felületről a mozgás tovaterjed. A jelenséget a bajor sörfesztiválok az asztalok körül összekapaszkodva helyükről fel-leugráló, nótázó sörfogyasztók „csatolt” mozgása szemlélteti legjobban. A csatolt rezgés tehát az alapja a hullámmozgás létrejöttének. A rugalmas közegben terjedő hangrezgések neve *hanghullám*, amelyre jellemző fizikai mennyiség a *hullámhossz* ( $\lambda$ ), ami két azonos állapotú hullámbeli pont közötti legrövidebb távolságot jelenti, ill. a *terjedési sebesség* ( $c$ ). Ilyenkor nem az anyag terjed tova, hanem az anyag által hordozott mozgási állapot és az energia. Számunkra elsősorban a levegőbeli terjedés fontos, de hangforrásokat elemezve hasznos információ a különböző fafajtákban, fémekben történő hangterjedés sebessége is. Kényes kísérlet, de talán kivitelezhető, ha elég lassú a vonat; a sínre helyezett füllel sokkal előbb meghallani a közeledő vonat hangját, mint a levegőben.

A levegőben a hang 20 C°-on  $\approx 344$  m/s –os sebességgel terjed, 0 C°-on 331,5 m/s. A hangsebesség tehát függ a hőmérséklettől, azaz első közelítésben a kelvin fokokban mért hőmérséklet négyzetgyökével arányos. A jelenségnek a hangszerek hőmérsékletváltozásra történő elhangolódásánál van szerepe.

A levegőben terjedő hang egyre nagyobb gömbfelületen oszlik el, ezért nyomásamplitúdója a távolság négyzetével fordítottan arányos (a gömbfelszín ( $S$ ) ugyanis  $= 4\pi r^2$ ), ami távolságduplázásnál 6 dB-es hangnyomásszint csökkenést jelent. Ez az összefüggés szabályozza a mesterséges erősítés nélküli szabadtéri színházak méretét, pl. sohasem találkozni 80 méternél nagyobb mélységű ókori görög színházzal.

A hullámok felosztása az őket létrehozó erő iránya és a terjedés irányának viszonya szerint is lehetséges (14.ábra). Levegőben, folyadékban a hang gyakorlatilag longitudinális formában terjed, ahol a terjedés és a gerjesztés iránya megegyezik. Éppen ezért ez a leggyorsabb az összes hullámfajta közül. Hangszereknél nagyon fontos a transzverzális hullám, amikor a hang a rezgésbehozás irányára merőlegesen terjed, éppen abba az irányba, amelyikben a hangszer „hosszú”. A torziós vagy csavarási hullám már ritkábban fordul elő, de szilárd anyagú hangforrások megszólaltatásakor, ha csekély amplitúdóval is, de mindig jelen van. Felületi hullámot úgy lehet előidézni, ha nagyot toppantunk a padlón. Az energia a padló felszínén fut tova, anélkül, hogy mélyebben behatolna az aljzatba. Felületi hullámok formájában terjednek a földrengés hullámok. A csavarási hullámok a vont húrnál fontosak.

A terjedési sebesség, a hullámhossz és a frekvencia kapcsolata:  $c = \lambda \cdot f$



#### 14.ábra Hullámtípusok

(fölről lefelé: longitudinális  
transzverzális, felületi, hajlítási,  
tágulási hullám-Tarnóczy nyomán)

Számos gyakorlati problémára választ kapunk ennek az összefüggésnek az ismeretében. Ha a sebesség állandó, a mélyebb hangok hullámhossza megnő. Ha tehát a hangforrás nagy kiterjedésű, mély a hangja is. Ezért cincog a hegedű és brummog a bőgő. Természetesen a hangmagasság szempontjából az anyagi minőség, vagy lemezek esetében a falvastagság is fontos (ugyanis ott meglepő módon a vastagabb a magasabb hangú), de ha csak két dimenzióban gondolkodunk, vagy a falvastagságok és a többi paraméter rögzítettek, valóban a forrás geometriai méretei a döntőek.

Ha mozog a hangforrás vagy hallgatója, megváltozik a hang magassága. A jelenség neve: Doppler-effektus. Ennek lényege, hogy a mozgó hang hullámhossza közeledéskor folyamatosan lerövidül, távolodáskor meghosszabbodik, mivel a frekvencia és a hullámhossz szorzata állandó, a frekvencia is változni fog, fordított irányban. A közeledő forrás hangja magasodik, a távolodó mélyülni fog.

Különböző anyagokban más és más sebességgel terjednek a hangok. Amikor a hang egy új közegen halad át, a terjedési sebesség megváltozása függvényében nem a hangmagasság, hanem a hullámhossz fog módosulni. Ezért követhető nyomon minden minőségében a hangoskodó szomszédok magánélete, amikor a falakon „átszökik” a hangjuk (eltekintve a falak rezonanciáinak dinamika- és hangszínmódosító hatásától és az elnyeléstől).

### 4.2 Diszperzió és hangelnyelés

*Arisztotelész* egykoron azt állította, hogy a magas hangok gyorsabban terjednek, mint a mélyek. Szilárd közegben, ill. folyadékban valóban függ a hang terjedési sebessége a hullámhossztól, és a mélyebb hang kissé lemarad a magasabbhoz képest. Egy zenei hang esetében pedig a felhangok rohannak előre, aminek következtében a hullámfront kiszélesedik. A jelenség neve *diszperzió*, és nem minden esetben káros a hangszerek világában, pl. a zongora a diszperziónak is köszönheti sajátos hangszínét.

*Arisztotelész* megállapításával a gondunk csupán annyi, hogy ő ezt levegőbeli terjedésre gondolta. A cáfolatra, a filozófus nagy tekintélye miatt 2000 évig várni kellett. Mentségünkre legyen mondva, a mélyebb hangú hangforrás hangja lassabb bérézése miatt a vele egyszerre felhangzó magasabb hangúhoz képest később éri el a maximális hangteljesítményét, azaz látszólag valóban lemarad.

A hangok amplitúdói a terjedés során nem csupán a hullámfelület megnövekedése, hanem a közegbeli elnyelés miatt is csökkennek. Az *elnyelési együttható* ( $\alpha$ ) azt fejezi ki, hogy 1 km megtételekor a hang hangnyomásszintje hány decibellel csökken. Az elnyelési együtthatót elsősorban a közeg anyagi tulajdonságai határozzák meg. Emellett a hangelnyelés függ a hangmagasságtól is: levegőben 2000 Hz felett a frekvencia négyzetével arányos; 1000 Hz alatt csak egyszerű egyenes arányosság érvényes. Emiatt hallható nagy távolságból egy rock zenekarból csupán a basszusgitár és a lábdob.

Az utóbbi összefüggés teljesül a szilárd anyagokra is, de már a teljes hangtartományban.

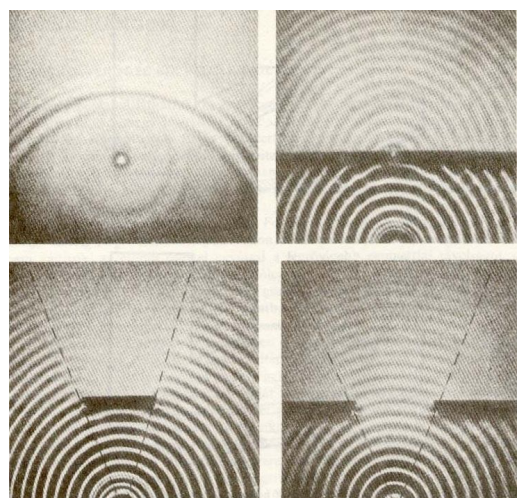
Egyébként a hangelnyelésnek azt a típusát, amikor egy adott felületre érkező hanghullám energiát veszít, *felületi elnyelésnek* nevezzük. A felületek elnyelési tulajdonságait az *elnyelési tényezővel* jellemzik, hogy a felület (szobafal, padló, függöny stb.) a rá érkező energiának hányadrészét nyelte el. Ez az elnyelés típus is frekvenciafüggő; a magas hangok elnyelése intenzívebb.

Meglepő tény, de a közönség sok esetben károsan hathat a zenei, prózai előadásokra. Ugyanis a „közönségfelület”, a Nobel-díjas *Békésy György* megfigyelései szerint, a 400 Hz és 6400 Hz közötti tartományban csökkenti, „elszívja” a felette 1.5 m-nél alacsonyabban terjedő hangok energiáját. Különösen a 800-1600 Hz –es tartomány kritikus. A probléma megoldására az akusztikusok (nem minden ironia nélkül!) a közönség „teraszos művelését” javasolják.

### 4.3 A hangenergia térbeli eloszlása

Az ötödik hangi makroparaméter, amelyet a szakirodalom nem minden esetben vesz a hangok alaptulajdonságai közé, hanem jobbra külön, a hangsugárzásnál tárgyalja; a *hangforrások tere*, amit úgyis nevezhetünk, hogy a *hangenergia térbeli eloszlása*. Nagyon fontos akusztikai jellemző, hiszen a hangszerek vizsgálatánál, a hangfelvételek készítésénél, a zenekar ültetésénél ismeretének hiánya hibák forrása lehet.

Egy kiterjedt hangforrás, pl. fúvószenekar hangjainak terjedési formáját meglehetősen nehéz egzakt módon leírni. Valahogy úgy kell a jelenséget elképzelni, csupán három dimenzióban, mint amikor a vízbe kavicsokat dobálunk. Egyetlen kavics körhullámokat kelt a vízben. Egyetlen tuba nagy hullámhosszú mély hangjai



gömbhullám formájában terjednek a levegőben, ugyanis ha a hangforrás mérete elhanyagolható a hullámhosszhoz képest, a terjedési forma mindig gömbszerű (gömbfelület mentén azonosak a nyomásamplitúdók).

A vízre szórt kavicsok körhullámai lerontják-erősítik egymást, azaz interferálnak egymással. Bonyolult hullámmintázat alakul ki a vízben- fúvósok esetében, a levegőben.

Míg a mély hangok gömbszerűek, a magasabb hangok, ill. magas felhangok mindig a rezgő felületre merőlegesen terjednek, esetünkben egy tuba tengelyének irányában.

15.ábra Körhullámok elhajlása résen, akadályon

Egyáltalán nem felesleges kérdés, hogyan terjed a hang benn, a hangszercsőben. Erre jó, leegyszerűsítő közelítés a síkhullám forma, amelynél egy sík felületén azonosak a nyomásértékek. Ezt valahogy úgy kell elképzelni, mintha egy sűrűző rezes hangszerébe a poháralátétet beleesett volna, és a hangszer tengelyére merőleges állásban csúszik kifelé.

A hanghullámok hullámtere tehát úgy alakul ki, hogy a kiinduló hullámok egy bonyolult interferenciás teret képeznek, amelynek minden egyes pontja felfogható elemi hullámforrásként. Ezért különböznek annyira egymástól a termék akusztikai tulajdonságai, mert a visszaverődések különbözősége miatt ez a mintázat minden teremnél más és más.

A hullámok a hullámtérbe helyezett kis méretű réseken, a nagy akadályok szélein elhajlanak, a nagy síma felületekről visszaverődnek, az ívelt domború felületeken szóródnak, a homorú felületek összegyűjtik őket, sőt, ha más akusztikai keménységű (ez végtelen térre a sűrűség és a hang terjedési sebességének szorzata:  $\rho \cdot c$ ) közeghez érnek, a terjedési irányuk még meg is törhet.

Az elhajlás jelenségének az a következménye, hogy ott is hallhatunk hangokat, pl. egy nyitott ajtó takarásában, ahonnan az ajtón belüli hangforrást nem is látjuk.

#### **4.4 Állóhullámok**

Amikor a hullám visszaverődik, és ez a visszaverődés nem csak merev felületekről történhet, hanem pl. a harsona tölcésérvégénél lévő levegőről is, azaz szabad végről is, a kiinduló és a visszavert hullámok sokasága állóhullámokat hoz létre. Az állóhullámok kialakulásához, tehát a stabil zenei és beszédszerű hangokhoz, korlátozott méretű hangforrások szükségesek; véges hosszúságú szaxofon, húr, hangszalag stb. Az akusztikusok a végességet éppen a már említett harsonatölcésér miatt, nem csupán a geometriai méretekkel jellemzik, hanem azt mondják, hogy a hang onnan fog visszaverődni, ahol a közeg akusztikai tulajdonságai, pl. az akusztikai keménysége megváltozik. Ezért tudunk nem csak mi kimenni a nyitott ajtón, hanem a hangjaink is. Ha nagyon kicsi az ajtó, akkor a nagyon mély hangok energiájának egy része visszaverődhet a nyílásról, annak ellenére, hogy mi átjutottunk rajta.

A haladó- és az állóhullámok közötti különbséget a locsolócsövön elindított huppli és egy hosszabb csőszakasz két végének megfogásakor annak oldalirányú kitérésére létrejövő mozgás különbözősége szemlélteti legjobban.

A hangforráson kialakuló állóhullámok hanginformációk tárolására különösen alkalmasak, mert időben viszonylag változatlan hangparamétereket hoznak létre. Ahogy azt már a rezonancia esetében is hangsúlyoztuk, erre az emberi jelfelfogó és –feldolgozó rendszernek, az emberi agynak van szüksége. Nem véletlen tehát, hogy az állóhullám létrejötté rendszerré szervezhető hanginformációk kialakulásának egyik (de nem kizárólagos) feltétele.

## 4.5 Hanggátlás és hangszigetelés

Ha a hanghullámok egy adott felülethez érnek, részben behatolnak a felületbe, részben visszaverődnek. Amennyiben levegőből szilárd közegbe, pl. falba lép be a hullám és mesterségesen, pl. a falra erősített keményebb anyagokkal igyekszünk a belépő energia mennyiségét csökkenteni, *hanggátlásról* beszélünk. Ha a szilárd anyagba bejutott energiát akarjuk csillapítani, akkor *hangszigetelésről*. (A köznapiban beszélünk a „hangszigetelés” szó a használatos jelenségre.)

Korábban már említettük, hogy a legjobb energia elnyelő a vákuum. A hétköznapi gyakorlatban különleges ritkított nemesgázokat használnak az ablaküvegeknél hő és hangszigetelésre. Általában a két tulajdonság együtt változik, de nem minden jó hőszigetelő egyben jó hangszigetelő is. Különösen érvényes ez a hungarocellre, ami mély frekvenciákon nem igazán hatékonyan nyeli el a hangokat.

Ma már kiváló hanggátló és –szigetelő anyagokat találni a kereskedelemben, a megfelelő rögzítő eszközökkel együtt. Minden zenész életében eljön az a pillanat, amikor munkája, gyakorlása során találkozni fog a jelenséggel, sőt még pereskedésre is sor kerülhet a szomszédal, ha hangszere túl hangos, zavarja a szomszédokat, vagy éppen a szomszéd a lakatosműhelyével őt.

A minőségi hangszigetelést meg kell tervezni, mivel a hangelnyelés frekvenciafüggő. A mély hangok okozzák a legtöbb problémát. Különösen a zongora, nagybőgő hangjainál tapasztalni káros következményeket. A hangszerek támasztó lábain a födémbe zavaró energiák jutnak át, és terjedhetnek az épületben tova. Az épületrészek között gyakran a vasbeton acélhuzalai, vagy régebbi épületeknél a fém váz vezeti át a hangokat. Egyes tantermek vagy a Zeneakadémia Kis- és Nagyterme között pl. ez is okozhat áthallást.

A hangok elnyeletése nem minden esetben megoldás. Az a jó, ha az energia a hangszerben vagy az adott térben marad és cseng le. A teljesen süket terem zenei célokra nem alkalmas – elveszi a muzsikás önbizalmát. Ami energia bejutott a határoló felületekbe, azt el kell nyeletni, de törekedni kell arra, hogy az energia egy része a hangtérben maradjon.

Kiváló hangszigetelő hatású a réteges falszerkezet. A hangok terjedésénél fontos reciprocitási törvény miatt a hangok útja megfordítható. (Ha a hang A-ból B-be eljutott, akkor B-ből is eljuthat A-ba.) A rétegekben ide-oda verődő hangenergia lecsillapodhat. Legyen egy felület elnyelési foka 1 % egy adott frekvencián. Ha tehát két betonfal között légrés található, akkor a falba bejutó 1 %-nyi energiának (ha minimális energia nyelődik el terjedés közben) az 1 %-a fog a résbe bekerülni, és tovább haladni. A következő falnál, ha tulajdonságai változatlanok, megismétlődik az energiaredukció. És így tovább, minden légrésnél.

Látható tehát, hogy egy szendvicsszerű falszerkezet sokkal több energiát tud elnyelni, mint egy ugyanolyan vastag, hagyományos betonfal.

Míg a magas hangok gátlásával nincs különösebb gond, a mély hangok elnyeletése már nem ennyire egyszerű. Speciális megoldások szükségesek: rejtett feszített membránok vagy éppen nagyon vastag falak. A mai vasbeton lakótelepek megoldhatatlannak tűnő hangszigetelési problémát jelentenek.



## 5. A TERMEK AKUSZTIKAI ALAPTULAJDONSÁGAI

Meglehetősen sok paraméterrel jellemezhető egy terem. Léteznek műszerekkel kontrollálható objektívnak tekinthető paraméterek (a feltételes mód használata azért jogos, mert egyes paraméterek meghatározásának módjai eltérhetnek egymástól), ill. a szubjektív paraméterek. Ahogy minden érzékelt dolognál, az ember saját tapasztalata a perdöntő, mert hiába állítja a tervező, hogy a terem zengő, mert a mérések ezt mutatják, ha a közönség nem ezt hallja. A mai számítógépe modellezés, a mérési technikák finomodása révén a két paraméterrendszer egyre közelebb kerül egymáshoz. Ebben a technikai apparátus javulásán túl az is közrejátszik, hogy egyre többet tudunk a teremben ülő ember térbeli hallásáról. Mi most azokat a jellemzőket vesszük sorra, amelyeket maga a muzsikás is kontrollálhat, ill. ha lehetősége van rá, módosíthat, vagy az előadás helyének megváltoztatásával, átültetésekkel vagy a terem átalakításával, bútorozással, falburkolással, különleges esetben a falak eltolásával, rezonátortermek megnyitásával.

### 5.1 Teremrezonancia

Gyakorló zenész számára a legtöbb kellemetlenséget okozó teremtulajdonságok egyike. A terem ugyanis az előadás része, a hangszer „kiterjesztése”. A terem falai a hanghullámokat visszaverik és így állóhullámok alakulhatnak ki benne. Ha a játszott, énekelt hang megegyezik egy-egy állóhullám frekvenciájával, akkor a terem bebűg, berezonál, a hang hallhatóan felerősödik, környezetéből kiemelkedik. Különösen mély frekvenciákon zavaró, mert ott az állóhullám-módusok frekvenciátávolsága félhangnál nagyobb, tehát lesz olyan hang, ami hangosabb lesz és a közvetlenül mellette lévők halkak. Ahogy nő a frekvencia, egyre sűrűbben követik egymást az állóhullámok. Téglatest formájú termekre egyszerűen meghatározhatók ezek a frekvenciák:

$$f_{\text{terem}} = c/2 \cdot \sqrt{((n_a/a)^2 + (n_b/b)^2 + (n_d/d)^2)}$$

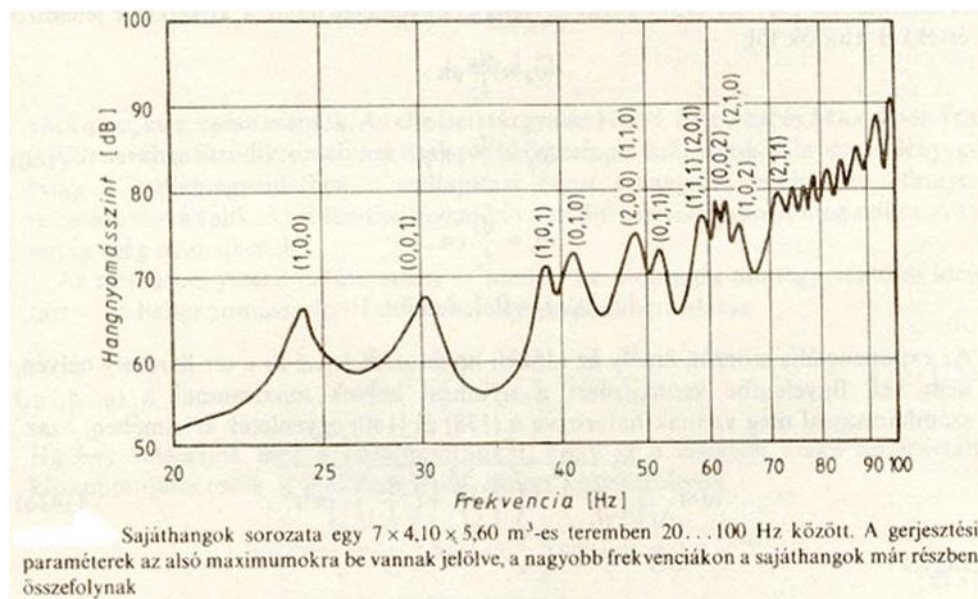
, ahol  $n_a, n_b, n_d = 0, 1, 2, \dots$ ,  $a, b, d$  a terem méterben megadott méretei,  $c$  a hang terjedési sebessége.

Ebből kiszámolható, hogy egy adott méretű terem milyen hangszerekhez megfelelő. Azonban ez a számolás meglehetősen hosszadalmas. Egyszerűbb a Schröder-képlet alkalmazása, ha ismerjük a terem átlagos  $T_u$  utózengési idejét. (A fogalmat lásd a ... oldalon.)

E nagyon hasznos képlet megadja egy ismert  $V$  térfogatú téglatest terem azon frekvencia-határértékét, amely felett már minden játszott hangra erősít a terem.

$$f_{\text{sch}} = 2000 \sqrt{(T_u/V)}$$

(az utózengési idő definícióját lásd alább).



**16.ábra Teremrezonanciák eloszlása egy adott méretű teremben (Tarnóczy nyomán)**

Egyes operaszínpadokon, koncerttermekben bizonyos hangok, hangnemek könnyebben szólalnak meg, mint mások. Ezeket nevezték el jó zengésük miatt szimpatikus hangoknak, ill. szimpatikus hangnemeknek. Elképzelhető, hogy bizonyos, a terem szerkezetéből, páholyok méretéből fakadó teremrezonanciák segíthették megerősödésüket. De elképzelhető olyan magyarázat is, ami a hangterjedés tulajdonságaival kapcsolatos –az énekesre adott hangzónál több energia verődhetett vissza, amiből úgy érezte, könnyebben énekel.

## 5.2 Termek utózungése

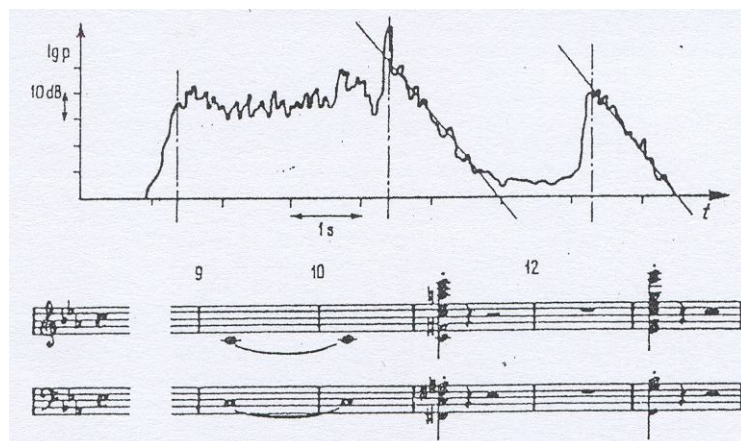
Amikor belépünk egy nagyobb terembe, ha üres feltétlenül hangoskodni fogunk. Kíváncsiságunk arra irányul, hogyan zeng a terem, mennyi ideig halljuk a hangunkat azután, hogy befejeztük a kiabálást. Szabadtérben a hang csak addig szól, ameddig a hangkeltés maga, de termekben a falakról visszaverődve meghosszabbodik a hangok élettartama. Ez az utánzengés vagy **utózungés** az ami a termeket sajáthangjaik mellett akusztikailag legközvetlenebbül jellemzi. Az **utózungési idő** ( $T_u$ ) az az időtartam, amely alatt a hangforrás hangnyomásszintje a teremben 60 dB-lel lecsökken a hangkeltés befejezése után. Az utózungési idő objektíve mérhető teremadat. Szubjektív módon mindig úgy érezzük, hogy a hangosabb hang tovább cseng le. Ennek az a magyarázata, hogy a magasabb dinamikai szintről induló hang a terem zajszintjét később éri el, mint az alacsonyabbról induló.

Az utózungési idő kifejezhető a terem térfogatával, határoló felületek elnyelési tulajdonságaival:

$$T = \frac{0.16 V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\text{átlag}})}$$

,itt  $V$  a terem térfogata ( $\text{m}^3$ ),  $S$  a terem összfelülete ( $\text{m}^2$ ),  $\alpha_{\text{átlag}}$  az átlagos elnyelési fok.

Ez utóbbit úgy határozzák meg, hogy minden egyes felülettípus területét megszorozzák a rá jellemző elnyelési fokkal. Ezeket az értékeket az összes felületfajtaára összeadják, majd a kapott számot elosztják  $S$ -el.  $\ln$  a logaritmus naturalis - e-alapú logaritmus.



**17.ábra A jelszint változása a teremben**

A képlet kifejezi azokat a hétköznapi tapasztalatokat, hogy a térfogat növelésével nő a hangok lecsengésének ideje a teremben; a felület növelésével azonos térfogatnál csökken; minél nagyobbak az elnyelési fokok, annál rövidebb lesz  $T_u$ . Az utózengési idő frekvenciafüggő, ez a hangelnyelés frekvenciafüggésével van kapcsolatban, azaz a magasabb hangok utózengési ideje rövidebb. Így a közönségnek is hatása van az utózengésre.

A 17. ábrán látható *K.Jordan* és *E.Meyer* klasszikusnak számító mérése 1935-ből, a *Coriolanus*-nyitány 9-13. üteme és a hozzá tartozó hangnyomásszint diagram.

Ideális utózengési időket egy teremre nagyon nehéz megadni. A beszéd mindig rövidebb utózengést kíván, mint a zene; a kamarazene, mint a kórusmuzsika; a barokk zene, mint a romantikus. Minden esetben az jelenti a problémát, hogy egyazon teremben próbálnak meg műfajtól függetlenül mindent előadni (lásd Kongresszusi Központ).

Korábban nagyon száraz zengésű opera termeket építettek. Ma már tendencia itt is a nagyobb utózengés elérése. Különösen hangfelvételek készítésekor van erre mesterségesen lehetőség, ahol az éneket a felvételi technika javulásával érthetővé lehet tenni. Az operai előadásoknál a díszletekkel manipulálható az utózengési idő. Koncerttermeknél is hasonló érhető el a teremben lévő felületek megváltoztatásával, járulékos termek kinyitásával, a hangvetőkkel (lásd Művészetek Palotája). Ma amikor a hangfelvételek javarészt a hangstúdiókban készülnek, szinte tetszőleges mesterséges utózengési idő állítható be a digitális készülékekkel, akár a frekvencia függvényében is. A probléma csak az, hogy ez mindig utólag történik, és nem a játék folyamán, ugyanis a zenészeket körülvevő hangtér tulajdonságai erősen meghatározzák a játék karakterét, énekeseknél még a hangképzés módját is. Lehetetlen pl. egy gyors művet hosszú utózengésű teremben előadni.

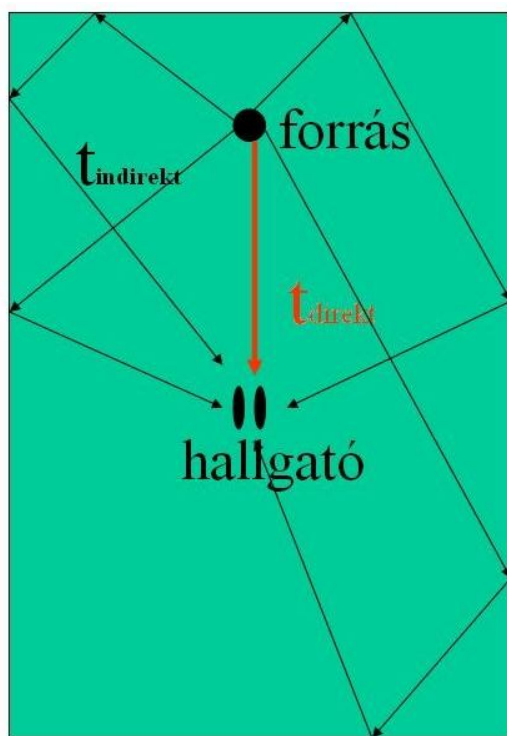
A mesterséges utózengetésre ma már nem csak hangfelvételekkel, hanem lejátszáskor is lehetőség van. Különösen a japán hangmérnökök kedvelik ezeket a megoldásokat. Az ilyenféle zenei "legójáték" szerencsére még nem rontotta el a fülünket.

A mély hangok utózengési ideje jóval hosszabb, mint a magasaké a hangelnyelés frekvenciafüggése miatt. Hogy ez a *basszuskiemelés* milyen mértékű legyen egy adott teremben, függ a tervező akusztikus ízlésétől. Ha túlságosan nagy, a

mély hangok elnyomhatják a magasakat.

### 5.3 Időkésés retesz

Bár az utózengési idő a legkönnyebben meghatározható teremadat, mégis nem az egyetlen, és még talán a legfontosabbnak sem nevezhetjük, mivel megfelelő utózengési idejű termet is ítélték már rossznak. A termekben tehát nem csupán a keltett hangok lecsengése fontos, hanem a hangok megszólalása is, az első hullámfront viselkedése.



Észleléstudományból ismert a jelenség, hogy az agy nem képes az egymást túl gyorsan követő jeleket értékeik szerint feldolgozni. Kell egy minimális időkülönbség, hogy az idegpályákon külön jelként fussanak és feldolgozódjanak. Ez a termeknél az alábbi jelenséget hozhatja létre: ha a hangforrásból a hallgatóhoz érkező első hullámfront (a direkthang), valamint egy utána következő első indirekt, valahonnan odaverődő, ugyanabból a hangforrásból származó hullámfront közötti időkésés a 20 ms-ot meghaladja, akkor e hangok a fül számára egyre inkább megkülönböztethetővé válnak, és az eredeti hang elvesztheti folytonosságát. Ha tehát az indirekt hangok elég gyorsan követik a direkt hangot és egymást, a legelső információt jegyezzük meg, mert annak hatása elfedi a később érkezőket, hiszen erősebb jel.

18.á Az időkésés retesz fogalmához

Teremben történő zenehallgatáskor, a terem kiképzésének függvényében tehát a hallgató széteső, ill. folytonos hangokat hallhat. A fent említett időkésést meghatározó teremakusztikai fogalom az *időkésés retesz*. Ha ennek értéke  $< 20$  ms, akkor a hangzás tömör, ha  $> 30-50$  ms, a hang szétesővé válhat. Az időkésés retesz tehát objektíve meghatározható teremakusztikai jellemző, sokan (Beranek nyomán) az egyik legfontosabb teremjellemzőnek tartják.

Hasonlóan mérhető a hasznos jel és egy bizonyos hangintenzitás feletti zavaró jel viszonya; a *visszhangfok*. Ezt úgy határozzuk meg, hogy az első 33 ms alatt a teremben mért ún. hasznos hang energiáját elosztjuk az ezután beérkező, az utózengési görbe fölötti részeknek megfelelő, ún. zavaró hang energiájával.

A laikusok gyakran keverik össze a visszhang és az utózengés fogalmát. A visszhangnál, amit a fenti visszhangfok is jellemez, a megszólaló hangot egy koncentrált, nagyobb energiájú visszavert „hangnyaláb” követi, olyan időkéséssel, hogy a két jel jól megkülönböztethető még egymástól. Noha az utózengést szintén visszavert hangok okozzák. De itt a fülbe egy-egy parányi időintervallumon belül minimális energiakülönbséggel érkeznek be a visszavert hangok. A hang terembeli lecsengése folyamatos lesz.

A nagyobb méretű termekben fellépő zavaró visszhangokat a terem hátfalának diffúz kiképzésével szüntethetjük meg (lásd Erkel Színház).

#### 5.4 Diffuzitás, hangtisztaság

Lényeges tulajdonsága a teremnek, hogy benne a hangenergia hogyan oszlik el. Ennek jellemzésére használjuk a *diffuzitás* fogalmát. A diffuzitás mindig fokozható a határoló felületek szóróhatásának növelésével. Tökéletes diffuzitású, egyenletes energiaeloszlású terem nincs, ugyanis a felületek hangelnyelése hangmagasságfüggő, tehát a visszaverődés hangonként változik. Ez a hatás azonban éppenséggel kellemes érzetet kelt az idegrendszer nem túl egyoldalú leterhelése miatt, de erre a pszichoakusztikai fejezetekben még visszatérünk. (Hogy egy teremben a falfelületek mennyire szórják a hangokat, a *diffuzitás foka* fejezi ki. Ez a teremakusztikai adat a diffúzan kiképzett falfelületű terem és a helyére képzelt leegyszerűsített geometriai formájú terem felületeinek aránya.) A diffuzitás a hang terembeli teltségét, a zenekar hangszereinek tökéletes összeolvadását jelzi. A túlzottan diffúz termekben azonban már a hangok összefolyása, az egyes hangszerek hangjának megkülönböztethetlensége a jellemző. Éppen ez utóbbi jelenségből kiindulva vezettek be egy újabb teremakusztikai fogalmat, a *hangtisztaság* fogalmát. A *hangtisztaság fokát* úgy definiálják, hogy egy rövid hang az első 50 ms alatt a megfigyelési ponthoz érkező jeleinek energiáját elosztják a teljes folyamat összenergiájával. Ha a hangtisztaság túl jó, akkor a diffuzitás lesz rossz. A két értéket úgy kell egy teremben beállítani, hogy egyensúlyban legyenek, azaz a teremben mindenhová verődjön hang, de a direkthang (közvetlen hang) is erős legyen. A hangtisztasággal rokon fogalom a *világossági szint*, amelyet az első 80 ms, ill. az ezt követő időtartam alatt a megfigyelő helyén mért energiák viszonyából határozhatunk meg. Ennek szubjektív megfelelője az *áttekinthetőség*. Ez utóbbi egyszerre jellemzi a hangok különállóságának, ill. a zenei szövetbe történő beágyazódásának meglétét.

#### 5.5 A kétfülű együttfutási fok és egyéb szubjektív teremadatok

Mint az eddigiekből is kitűnt, a termeket a szabad tértől a visszaverődések léte különbözteti meg. Ezek iránya, mértéke szabja meg egy-egy terem tulajdonságait. Magát a szubjektív érzetet, a *térszerűséget* főként az oldalirányú visszaverődések okozzák. A fülünk is a fej árnyékoló hatása miatt rájuk érzékenyebb. Ezért fontos az oldalirányú és nem oldalirányú energiák viszonyát objektíve meghatározni. Az új paraméter elnevezése és definiálása is meglehetősen eltérő formákban történt; mi az *oldalhatás* elnevezést használjuk. Ahogy a modellvizsgálatokból is kiderült, az oldalhatás szempontjából a hagyományos téglalap alakú termék a legjobbak. Mindenki tapasztalta már, hogy a sztereo hangfelvétel jobb térélményt reprodukál mint a mono, különösen műfjes felvételnél és fejhallgatós visszahallgatásnál tapasztaljuk ezt. Ahogy már a térbeli hallással foglalkozó fejezetben említettük, a fülnek azon tulajdonságából kiindulva, hogy a két fülünkbe érkező jelek eltérésének, inkoharenciájának növekedésével a térszerűség élménye is nő, bevezethető egy újabb objektív teremakusztikai

fogalom, a *kétfülű együttfutási fok*. (Az elnevezés a "maximaler interauraler Korrelationsgrad" Tarnóczy Tamás -féle magyarításából származik.)

Sajnos nem áll módunkban az összes teremakusztikai paramétert részletesen jellemezni. Az alábbiak említésre méltóak még: objektív teremadat a *színeképi változás mértéke* (a magas összetevők energiaviszonyait hasonlítják össze a mélyekével); a *hangerősségi fok* a hangforrás teljesítményére vonatkoztatott, a hallgatónál mért energiasűrűség (minél nagyobb a hangforrás hangereje, annál kiterjedtebbnek érezzük); az *időbeli diffúzió* mérése az energia időbeli eloszlásának vizsgálatát jelenti (itt különösen fontos a terem berezgési folyamata, mivel a kezdeti jelekre legérzékenyebb a fülünk); a *támogatás* nevű paraméter a játékos saját hangjának visszahallására vonatkozik; a *korai előadói szint* az egymás közelében játszó zenészek egymásra hatását fejezi ki.

**A szubjektív teremértékelési paramétereket** Tarnóczy Tamás nyomán egyetlen alapfogalommal, a *hangtetszetősséggel* jellemezhetjük. A hangtetszetőség összetevői: - a teremben tartózkodás érzete, - a terem nagyságának érzete, - a térszerűség, - a zengés vagy zengősség, - a zenei áttekinthetőség (hangtisztaság). Meglepő, de tény, hogy a közönség és a karmester nem ugyanazt a zenét hallják. Mivel a karmester a zenekar közvetlen közelében, attól körülvéve vezényel, az ún. direkthangot hallja. Úgy is mondhatjuk, hogy a karmester a hangforrások *közelterében* helyezkedik el. A közönség viszont általában a *hangforrások távolterében*, a *zengőtérben*, ahol már a teremtulajdonságok dominálnak. Művészi fokmérőként kezelik a karmestereknek a közönség által hallott hangzásba beleérző tulajdonságát. Ez a tulajdonság éppen az ellenben, amit a teremakusztikai összefüggések megismerése révén fejleszthetünk ki leggyorsabban. Toscaniniről jegyezték fel, hogy a mikrofont mindig a feje közelében helyeztette el, mondván, hogy a hangfelvételt hallgató is azt hallja, amit ő. Az tehát, hogy egy koncerttermet a karmester vagy a szólista hogyan ítél meg, nem feltétlenül korrelál a közönség ítéletével.



# Kiegészítő fejezetek

## 2.2.1. fejezet folytatása

### A hallóideg hangkódolási tulajdonságai

A szőrsejtek a *hallóideg dúcának*, a *ganglion spirale-nak* a *neuronjaival* (idegsejtjeivel) kommunikálnak. Amikor a hanghullám hatására egy szőrsejt receptor potenciálja megváltozik, a ganglion spirale neuronja *dendritjében* (a neuronok ágszerű jelfelfogó nyúlványai) a megnövelt töltés következményeként a potenciál eléri a kisülési küszöbértéket, és a neuron „tüzelni” kezd, *akciós potenciálhullámot* gerjeszt, ami az idegsejt viszonylag hosszú jeltovábbító tengelynyúlványán, az *axonon* terjed tova. Az axon véges hosszúságú. Végződése, a *szinapszis*, tulajdonképpen egy rés, amely arra szolgál, hogy „külső” segítséggel, kémiai anyagokkal, ún. neurotranszmitterekkel, az elektromos jelet egy másik idegsejtre átvigye. Ezen axonok sokaságát nevezzük jelen esetben *hallóidegnek*, amely a VIII. agyideghez tartozik. A hallóideg rostjaiban az akciós potenciálok, a kisülések időbeli sorozata és térbeli eloszlása (hogyan melyiken terjed) kódolja a hangok fizikai tulajdonságait.

Az idegrostokat a spontán, külső hatás nélküli *elektromos aktivitásukkal* is jellemezhetjük. A spontán aktivitást a szőrsejtekben véletlenszerűen kioldódó neurotranszmitterek okozzák. Az egy másodperc alatt kialakult akciós potenciálhullámok adják meg az aktivitás mértékét. Így megkülönböztetünk magas (18 kisülés/s-nál nagyobb), közepes (0.5 – 18 kisülés/s) és alacsony (0-0.5 kisülés/s) „tüzelésű” idegrostokat.

A hangerő érzékeléséről két felismerés nyújt hasznos információt: (1) a hangerő növekedésével a tüzelések száma nő; (2) a különböző spontán aktivitású rostoknak más és más az ingerküszöbe. A magas aktivitásúaké alacsony (0-20 dB), azaz már halk hangokra is reagálnak. A dinamikai sávjuk azonban szűkebb (kb. 40 dB). A közepes aktivitású rostok ingerküszöbe magasabb (40-80 dB), ill. az alacsony spontán aktivitásúaké 80 dB körüli érték, de a dinamikai sávjuk már szélesebb (50-60 dB). Ebből arra következtethetünk, hogy más rostok szállítják a hangos hangok kódjait és mások a halkakét. Mindebből a későbbiekben majd értelmezhetővé válik, miért viselkedik a fül a 40 dB alatti hangokra másként, mint a 40 dB felettiekre.

Mivel az alacsony-közepes spontán aktivitású rostok dinamikai sávja szélesebb, azaz alkalmasabbak a dinamikai változások kódolására, *hangerő feldolgozó csatornának* is tekinthetők.

A hallóideg rostjaiban a hangmagasság is kódolva van hely, ill. időbeli sorozatok szerint. A hely szerinti kódolás azt jelenti, hogy az adott helyen lévő, adott karakterisztikus frekvenciájú szőrsejtről ered az idegrost, azaz csak az erre jellemző frekvencián alacsony az ingerküszöbe.

Az időbeli kódolás fogalmát az alábbiak szerint értelmezhetjük:

megfigyelték, hogy alacsony frekvenciájú hangoknál az egyes idegrostokban történő kisülések a megszólaló hang fázisához (időbeli állapotához) szinkronizálódnak, illeszkednek. Azaz a kisülések időbeli története a periódusidő egy meghatározott időtartamához (fázistartományához) köthető. A jelenség neve *fázis-szinkronizáció* (*phase-locking*). Szokás még *fáziskapcsolásnak* is nevezni. A kisülési hisztogramok (gyakorisági eloszlás-grafikonok) alapján állapíthatók meg az időbeli kódolások. A fázis-szinkronizáció 1 kHz-ig jól működik, magasabb hangokra fokozatosan elromlik, és 5 kHz felett már nem detektálható a hallóideg rostjaiban. Nagy valószínűséggel ez is okozója annak, hogy a hangérzékelés tulajdonságai 1 kHz felett megváltoznak.

Azt találták, hogy 5 kHz felett, tehát egészen magas hangokra a helykódolás az információhordozó, míg 5 kHz alatti hangoknál a hely- és időkódolás együttesen történik.

A magas spontán aktivitású rostok fázis-szinkronizációs előnyeiről szóló mérések alapján arra lehet következtetni, hogy ezek a rostok elsősorban a hangmagasság kódolására valók, amit

úgy is általánosíthatunk, hogy a jeltranszformációnál egy *időbeli feldolgozó csatornát* képviselnek.

Hallástani jelenségek kulcsa az az effektus, amikor egy tiszta hang hallgatásakor a kisülések száma lecsökken, ha valamilyen másik tiszta hang is megszólal. A jelenség neve *két hang elnyomás (two-tones suppression)*. Ez az összes hallóidegre jellemző, és az alaphártyán kialakuló gátló mechanizmusokra vezethető vissza.

Számos pszichoakusztikai jelenség magyarázható abból a tényből kiindulva, hogy a hangosabb hang kisebb késéssel terjed a rostokban, ill. hogy ha 2-3 kHz –nél mélyebb a hangmagasság, akkor az alacsonyabb nagyobb késéssel halad.

Összetett hangok hallóidegi kódolását is elemezték, különös tekintettel a beszédhangokra, ezen belül is a zöngékre. A vizsgálatok azonban nem embereken történtek, hanem macskákon. A komplex (tehát zenei) hangok hallóidegi reprezentációja ma is a hallástan vitákat kiváltó területei közé tartozik. Az egyes halláselméletek, azaz a helyelmélet, ill. a fázis-szinkronizációt vizsgáló *periodicitási-elmélet* szerint más és más az értelmezés módja. Korai mérések szerint a macska hallóideg rostjaiban alacsony dinamikákon a hallott zöngé formánshelyeinek megfelelő karakterisztikus frekvenciák kódolódnak. Azonban nagyobb hangerőn, 60 dB felett ezek a kisülési minták telítődnek, azaz elérik a maximumukat, és egyre több új, más karakterisztikus frekvenciákhoz tartozó kisüléssorozat csatlakozik, verbuválódik a régiekhez. A dinamika függvényében tehát más és más idegrost típusok jeleznek kisüléseket a hallóideg működésének intenzitásfüggése alapján. A tapasztalatokat összegezve az állapítható meg, hogy ilyenkor a formánsok jellemző alakja elvész, kivéve azt az esetet, amikor a mérés a kisülési küszöbérték feletti közepes és alacsony dinamikákon történik.

A fenti helyelméletnél egyértelműbb eredményekkel zárultak a fázis-szinkronizációs mérések, amelyeknél a kisülési hisztogramok Fourier-analízisét végezték el. Azt tapasztalták, hogy a formánsszerkezetet jóval nagyobb dinamikai sávban reprodukálható, mint az a helyelmélet szerint várható. Azóta más mérések is megerősítették ezt az eredményt.

A periodicitási-elmélet (amikor is a fül a hangjel periódusát, az attól való eltéréseket elemzi) alkalmazása a hallóidegre valójában egy időbeli (fázis-szinkronizációs) és egy helyfüggő (a rostok karakterisztikus frekvenciájához igazodó) jelkódolást ír le. A halláselméletek vitája még nincs lezárva, a kutatókra még sok kérdés tisztázása vár.

Mivel megállapításaink eddig csupán az afferens rostokra vonatkoztak, vizsgáljuk most meg mi történik a hallóideg efferens rostjaiban.

Az efferens idegrostok vizsgálata azt mutatta, hogy sokkal szabályosabb a bennük tovaterjedő kisülések sorozata, mint az afferens rostoknál. Fontos szerepük van a kétfülű hallásnál. Ráadásul az ellenoldali fülbe bocsátott zaj radikális hatással van a hallásra: lecsökkenti az ingerküszöböt és megnöveli a kisülések számát, valamint lecsökkenti a jelkésést. Azonban az efferensek aktiválása csökkenti az afferensek ráfelelését. Összességében jóval kevesebbet tudunk róluk, mint az afferensekről. Hasonló hiányosságok jellemzik a II.típusú, a külső szőrsejtekből kiinduló afferensekről származó ismereteinket is.]

## 2.3 A hallás ontogenezise

### 2.3.1 Magzati hallásfejlődés

Tudományos bizonyítékok sorozata jelzi, hogy az ember már magzati állapotában hall, amit bármelyik kismama hétköznapi tapasztalataival megerősíthet; az anyaméhben a magzat, a 3. trimeszterben erős hangingerekre reagálni, mozogni kezd. A hangok akusztikai paramétereit módosítva mérni tudjuk pl. ezen magzati reakciók intenzitásának megváltozását, vagy a magzatvízbe helyezett mikrofonnal rögzíthetjük a külső világ hangjait, amiből a magzat intrauterin hallására következtethetünk. Egyet nem tudunk kontrollálni: nem tudjuk, mit is

hall tulajdonképpen. Ehhez fülének és központi idegrendszerének fejlettségéből, ill. megszületése utáni képességeiből nyerhetünk információkat.

(Az intrauterin hallás szerepének fontosságát legkorábban *Alfred A. Tomatis*, francia fülészorvos vizsgálta. Több évtizedes munkássága sajnos számos kérdésben kívánnivalókat hagy maga után, elsősorban téziseinek hiányos bizonyítása miatt. Sejtéseinek érvényessége, hangterápiás eredményei azonban az elmúlt 25 év ilyen irányú kutatásainak alapvető ösztönzői voltak szerte a világban. Eszméinek gyors elterjedése természetesen a téma iránti rendkívüli érdeklődésnek is köszönhető.)

A magzat fizikai szempontból bizonyosan másképpen hall, mint csecsemő korában, hiszen hallójáratában levegő helyett magzatvíz van. Problémát jelenthet tehát a dobhártyánál az impedancia-illesztés; más frekvenciatartományt fog a füle kiemelni. Mindehhez társul, hogy a fül és az agy folyamatosan fejlődik, és nem az érett állapotra jellemző módon érzékeli és dolgozza fel, tárolja el a hangokat.

A táblázatban a fül és az agy fejlődési fázisai láthatók, elsősorban *Chr. Fassbender* összefoglaló munkája alapján. (A táblázatban nem jelöltük, de az agyfejlődést folyamatos myelinizáció jellemzi, amitől az ingerület átvitel egyre tisztább, zavar mentesebb lesz.)

Mivel a magzat fejlődésének a genetikai tényezőkön túl külső, környezeti aspektusai is vannak, hiszen központi idegrendszere, neuronhálózatainak alakulása, növekedése, komplexitásának fokozódása külső ingerek hatására kimutatható, hasznos azt is megvizsgálunk, milyen hangok érik az anyaméhben.

A *foetus* nagyon nagy zajban él. Ez a zajszint, ami elsősorban az anya testhangjaiból, másodsorban a környezet hangjaiból tevődik össze, folytonos és megnyugtató alapállapot. (Így érthető, miért alszunk el felnőtt korunkban is olyan könnyedén monoton zajban.)

Állandó ingerforrás pl. az anya szívhangja. Kísérletileg igazolták, hogy ha a mesterséges szívhangok tempóját fokozzák, az újszülöttek izgatottabbak lesznek. Ebből az anyai stressz élettani következményei is kiolvashatók (Salk, 1973). A magzat a hallott hangot megtanulja, és mivel az újszülött számára a normális szívhang kellemes, ilyen hangok mellett jobban gyarapodik. (Egyes kultúrákban az anyák a testükön hordják csecsemőiket, ami által a szívhangokat továbbra is érzékelik.)

Egy másik stabil ingerforrás magának az anyának a hangja. A magzat füle mellé, a magzatvízbe helyezett mikrofonnal mérve, ha az anya 60 dB-es dinamikával beszél, akkor belül 52 dB mérhető, és ez jóval a belső zajok (emésztés, légzés, szívhangok) felett található, tehát elvileg az anya hangja tisztán hallható.

Ennél sokkal intenzívebb a külső hangok csillapítása. Elsősorban az anyától származó mély frekvenciájú emésztési hangok fedik el a kevésbé csillapodó mély külső hangokat, a magasak pedig maguktól is csillapodnak a hasfalban és a méhfalban. Tulajdonképpen alig lehet különbséget tenni a kívülről jövő férfi és a női hangok között. És csak nagyon hangos beszédnél (inkább üvöltésnek nevezhetjük), érthetők jól az egyes szavak. Azonban a magzatvízben pontosan követhető a beszéddallam és a beszéd más prozódiai jegyeinek változása, azaz az emberi beszéd zenéje. Közismert *DeCasperék* kísérlete, amikor ugyanazt a meserészletet olvastatták fel az anyákkal a gyermekük születését megelőző hat hétben, és az újszülöttek más szövegek közül „ki tudták választani” az ismertet, még akkor is, ha azt nem az édesanyjuk olvasta fel nekik. A magzat tehát az anya hangjának azokat a jellemzőit tanulja meg, ami elsősorban a thalamikus szintű hangfeldolgozásra jellemző. Hasonló eredményeket tapasztaltak a 8-9. magzati hónapban zenehallgatásnál. A magzat a fenti okok (csillapítás, hallószervi elégtelenség) miatt lesz tehát figyelmesebb a magasabb hangokra, és a prozódiai képességek alapján választja ki édesanyja hangját más nők hangja közül a megszületése után.

**I.táblázat A fül fejlődési fázisai**

IDŐ	FÜL	HALLÓPÁLYA, AGY	AKUSZTIKAI FUNKCIÓK
8.hét	Fül felveszi végső formáját		
3.hónap	Alaphártya morfológiailag kifejlődik	Közti agy –thalamus kialakul	
4.hónap	Vesztibuláris rendszer működni kezd		
5.hónap	Alaphártya, Corti-szerv teljes méretét eléri	Alsóbb szintű hallópályai és collicul. inferior aktivitás	Nem reagálnak nagyon hangos szavakra sem
5-6. hónap	Hallócsontok kialakulnak, de porcosak, Belsőfül érzékelő sejtjei működésképesek, fokozatos eltolódás a bazális sejtek hangérzékelő képességében a magas hangok irányába		Közepes magasságú frekvenciatart. érzékeny, reagál az erős zajokra
6.hónap			Állandó reagálás erős hangokra
7.hónap	Cortikális funkciók megkezdődnek		
7-8. hónap	Hallócsontok megérnek, könnyebbek lesznek		Magasabb hangokra is érzékenyebbé válik
8.hónap	Belsőfül érzékelő sejtjei a felnőttkével azonos tulajdonságokat mutatnak		
8-9. hónap		A hang már eljut a thalamusig, Az agykéreg még éretlen	1 héttel a születés előtt zöngé megkülönböztetési képesség
Születés	A vestibuláris rendszer érett	Csak az agykéreg 5-6. rétege funkcióképes, tehát nincs cortico-corticális kapcsolat	

Ugyan az apák hangja csak kb. egy oktávval mélyebb az anyákénál, de a hasfali-méhfali torzító hatások miatt a születés után a babák nem preferálják jobban édesapjuk hangját, pl. más, idegen női hangokhoz képest. Ahogy a táblázatból is kiolvasható, a mély hangokra viszonylag érzéketlen a fülük. Mindezt az is kiegészíti, hogy születés után 10-18 napig magzatvíz-dugó marad a hallójáratukban és a középfülben, ami lerontja a hallásukat, miközben a csontvezetéses hallás változatlan marad. Ajánlott tehát az apáknak ekkor emeltebb hangon beszélni.

A magzatot körülvevő akusztikai tér ismeretében létrehozható olyan mesterséges anyai hangtér, amelyben a koraszülöttek jobban fejlődnek. Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy erős hangok esetén testfelületi taktilis

ingerek is kialakulnak, azaz a magzat érzékeli a magzatvíz rezgését. Ahogy már korábban megjegyeztük, a colliculus inferiorban, a külső magokban lévő neuronokban taktilis és hangigerekre is tapasztalható aktivitás. Talán nem csupán spekuláció, hogy az agykéreg kifejlődése nélkül is érzékelheti a magzat az akusztikai ingereket, hangként vagy „érintésként”. Valószínűleg ezért nagy a vonzódás egyeseknél a testrezgéseket kiváltó, mindent betöltő nagy hangerejű zenékhez.

Lehet, hogy a rezgéseknek a korai magzati állapotban csupán annyi a szerepük, hogy a központi idegrendszer fejlődését serkentsék (a gravitációs térben mozgó magzat testhelyzetének változásai mellett). Ha valamilyen módon megismerjük, hogy ezeket a korai, intrauterin akusztikai élményeket hol tárolja el a magzat, hogyan hívja elő, és azok a megszülető babánál, majd a felnövő embernél hogyan jelennek meg, pl. későbbi, a személyiségre jellemző vonásokban, a korai magzat-anya kommunikáció fontosságára vonatkozó laikus hipotézisek túlzásai valóságtartalommal telítődhetnének.

### **2.3.2 Hallásfejlődés a születés után**

Az első két évben az emberpalánta kognitív fejlődését elsősorban érzékelésének és egyszerű motoros (mozgásos) viselkedésének koordinációja jelenti. A hallási képességek a megismerés céljainak alárendelve folyamatosan gazdagodnak. Ezen idő fő jellemzője a folyamatos myelinizáció. Az idegrostok szigetelésének kiépülése, vastagodása megnöveli az idegrostban a vezetési sebességet. A cochlea kb. az első hónap végére fejlődik ki teljesen. Már említettük, hogy a magzatvíztől származó „füldugó” megemeli a születés után a hallásküszöböt, és megszűnésével a magzatnak újra kell tanulnia a hangzó világot. Egy 18 hónapos baba hallásküszöbe mély frekvenciákon egyébként még mindig magasabb, kb. 15-20 dB-lel, mint a felnőtteké (Schneider-Trehub, 1985). A hangmagasság érzékelése kezdetben alapvető, született reflexes képesség, ami később eltűnik, de azután a megismerési folyamatok révén újrászerveződik.

Az irányhallás csak kb. kétéves korra stabilizálódik. A születéskor meglévő, hangokra hangirányba történő fejfördítési reflex hamar megszűnik, és csak négy és fél hónapos korától figyel a baba a megfelelő irányokba ismét. Elsősorban az emberi hangot preferálja, ahogy már korábban említettük, az édesanya hangját. Az anya hangjára hosszabban tartó, intenzív végtagmozgásokkal reagál, amit gyakran megismétel. Zenére nincsenek ilyen kifejezett reakciói, csupán oda-odafigyel a hangforrásra.

A szívhangoknak ellenben nincs akkora hatása a csecsemő későbbi magatartására, mint azt korábban sokan feltételezték. Valószínűleg felülírhatják a memóriában más környezeti hangok vagy éppen a csecsemő saját hangjai.

Bizonyítékot találtak pl. arra, hogy az újszülött nagyobb figyelmet szentel a környezetében beszélt nyelvre, ha mellette más, számára teljesen idegen nyelveket is hall. Érzékeli már a hangváltásokat is pl. /p/→/b/. Sőt 6-8 hónapos koráig a világ beszélt nyelveinek összes beszédhangját megkülönbözteti. Ezután a környezet hatására a beszédhang tartomány fokozatosan az anyanyelvre kezd szűkülni (Kuhl et al., 1992). (A beszédhangok megkülönböztetési képessége nem igazán tekinthető csupán az ember sajátjának, ellenben a többi emlőssel ellentétben, képes belőlük nyelvet szerkeszteni.)

Hogy a beszédhangok felismerése idővel beszűkül, az részben a csecsemő hangkeltésének is köszönhető. Egyre gyakrabban utánozza környezetének beszédhangjait, sőt az első év végére már anyanyelvi karakterű „halandzsát” hallhatunk tőle. Az egyre gyakoribb beszédszerű hangkeltés révén megerősítést kap a hallórendszere, az anyanyelvi hangok stabilan rögzülnek. A hangokkal történő kommunikáció kialakulása számottevően hozzájárul az agykérgi aktivitás növekedéséhez, és fejlődik az emlékezete is.

A második év végére tökéletesedik a homloklebeny és a limbikus rendszer, a primer hallókéregbe beérkező idegek myelinizációja fokozódik. Ennek köszönhetően a hallásküszöb

azonos lesz a felnőttkével. A különböző agyterületek közötti egyensúly már a felnőtti szint közelébe kerül. Jelentős pszichológiai változások következnek be: éntudat kialakulása, akaratlagos viselkedés szabályozása, problémamegoldás, kifejtettebb formában jelenik meg a nyelv, azaz a hangalakos szimbólumképzés. A kislányoknál valamivel gyorsabb az érési folyamat (bár az adatok nem egyértelműek).

[A kettő és fél éves kortól hatéves korig terjedő időszakban, a kisgyermekkor idején az agy tömege kb. 80 %-kal nő. A hallókéreg intenzív fejlődési szakaszba kerül, a nyelvi aktivitásnak köszönhetően. Az egyes agyi részek közötti kapcsolatok teljes körű információfeldolgozást biztosítanak. Kapcsolatuk a hallókéreggel javítja a kommunikációt és a szimbólumok képzését. Három éves kor körül az emlékezet munkamódszere megváltozik, a képi adatrögzítés helyett áttér a nyelvi szimbólumok használatára, ehhez nagyban hozzájárul a hippocampus myelinizációja is. Ettől az időszaktól számítva lesznek tartós, felnőttkorban is felidézhető emlékeink, akár hangiai is.

Az iskoláskorú fejlődés során megváltozik az agyféltekék közötti munkamegosztás, kialakul a lateralizáció, bizonyos szempontból, azonban, éppen a tanuláshoz köszönhetően, egyre nagyobb agyi területek (esetleg éppen kétoldali) aktivációja figyelhető meg. 6-8 éves korban a myelinizáció teljesen befejeződik.

### **2.3.3 Férfiak és nők hallása**

Nem szabadna ezen viccelődni, de mi, férfiak és nők, valóban nehezen értjük meg egymást... . Már a fülünknel, sőt az agyunknál, a hallókérgi részen is vannak eltérések. A férfiak fülkagylója nagyobb, valószínűleg a különbség a koponyák arányát követi. Elképzelhető, hogy ennek evolúciós haszna a vadászat alatti tájékozódásból származott, a jobb irányhallás miatt. Ezt látszik megerősíteni az elálló fül dominanciája is. A beszédfeldolgozásért felelős bal agyféltekei Wernicke-terület a nőknél koncentráltabb, a férfiaknál szétszórta.

Sokáig az volt a nézet, hogy a nőknél a két agyféltekét összekötő corpus callosum (kérge test) fejlettebb, bőségesebb idegi kapcsolatot kínál, mint a férfiaknál. Ha ez így van, akkor ennek egyik előnye pl. a figyelem megosztásában nyilvánulhat meg, hogy a nők akkor is képesek a hallókérgüket használni, amikor más érzékszerveik is aktívak, sőt egyszerre több „hangsatorrán” beérkező információt is el tudnak tárolni az asszociációs hallókérgükben. (Éppen a színesztéziásokkal kapcsolatban jegyeztük meg korábban, hogy a többségük nő.) Lehet azonban, hogy mindezt mégsem a corpus callosum a felelős, mert a legújabb vizsgálatok azt mutatták ki, hogy a kérge test a többi agyrészhez viszonyítottan nagyobb csupán a nőknél, és nem abszolút értelemben.

Általában a nőknek jobb a hangmagasság megkülönböztetési képessége, érzékenyebbek a hang egyéb akusztikai paramétereinek változásaira, amiből az érzelmi állapotokra következtetnek.

De ez csak vagy metaforaszerű általánosítás vagy az én tapasztalataim nem az átlagos férfi-nő viszonyról szólnak, mivel zeneakadémista hallgatóim hallástani tesztekben mutatott eredményei nem erősítik meg. A nemek közötti teljesítmények nem jeleztek különbségeket, és olykor a fiúk javára billentették a mérleget. Hogy a különleges zenei képességekkel rendelkező fiatal emberek agya „nőiesebb” lenne, ahogy azt egyes bestseller szerzők állítják, és ezért jók a hallási tulajdonságaik, még nem bizonyított. Én túlzó leegyszerűsítésnek vélem.]



## Kiegészítés a hullámtanhoz:

### **Elektromos-mechanikai-akusztikai analógia**

A visszaverődés-átjutás mértékét a falak akusztikai minősége, azok *(z) fajlagos akusztikai ellenállása* vagy más néven *akusztikai keménysége* határozza meg.

Ezzel egy nagyon fontos fogalomhoz érkeztünk. Bevezetésével számos kérdésre frappáns válasz adható, főként a hangenergia terjedésével kapcsolatos problémáknál. Az egyetlen gond a fogalom viszonylagos elvontságában van, ugyanis bevezetését az *elektromos-akusztikai-mechanikai analógia* felismerése tette lehetővé. Ez azon alapszik, hogy a mechanikai, elektromos és akusztikai rezgések ugyanazzal a matematikai formalizmussal írhatók le. Haszná, hogy egy „hangforrás – hangtér – mikrofon – erősítő – hangszóró - hangtér-hallgató” - rendszer egységes elmélet szerint tárgyalható, mivel a különböző fizikai (akusztikai-mechanikai-elektromos) mennyiségek megfeleltethetők egymásnak.

Csupán röviden, csak a lényeget vázolva:

egy váltakozó áramú áramkörben, amelyben ellenállás, tekercs és kondenzátor is van, a feszültség és az áramerősség hányadosa a váltakozó ellenállás vagy *impedancia*;  $Z_{elektr.} = U_{vált.}/I_{vált.}$ . Ez azt mutatja, hogy mekkora potenciálkülönbség, azaz feszültség hoz létre a rendszerben egységnyi áramot. Mind a feszültség, mind az áram az időben változó mennyiség.

Egy mechanikai rezgőkörben, egy rugóra függesztett testnél is létezik hasonló jellegű fizikai mennyiség, a *mechanikai ellenállás* vagy *mechanikai impedancia*, ami azt hivatott kifejezni, hogy mekkora erő képes egységnyi idő alatt egységnyi elmozdulást létrehozni, azaz egységnyi sebességet;

$$Z_{mechanikai} = F/v.$$

Az akusztikában pl. a levegőben terjedő hanghullámnál az *akusztikai ellenállás* vagy *akusztikai impedancia* azt jelzi, hogy mekkora nyomásingadozás képes az S keresztmetszethez tartozó részecskéket  $v$  sebességgel elmozdítani, azaz egységnyi idő alatt mekkora nyomás képes a részecskékkel kitölteni egy egységnyi térfogatot;

$Z_{akusztikai} = p/(S \cdot v)$ , ahol  $S$ : a felület keresztmetszete. Az  $S \cdot v$  szorzatot szokás még *térfogati sebességnek* nevezni.

A kapcsolat a korábban már sokat emlegetett hullámenellenállás vagy akusztikai keménység  $(z)$  és az akusztikai ellenállás  $(Z_a)$  között:

$$Z_a = z / S.$$

Az analógia azon nyugodott tehát, hogy a mozgásokat létrehozó hatásokat, az okokat (feszültség - erő – nyomás), valamint az okozatokat, a létrehozott mozgásokat (töltésáramlás – sebesség – térfogati sebesség) feleltettük meg egymásnak. Sajnos néhány kutató mindig megfélekedezik arról, hogy az analógiák csak megadott határok között érvényesek.

## IRODALOM

*A jegyzet 1-3. fejezete Pap J. „Hang-ember-hang” c. könyvének 1., 4. és 5. fejezetére épült.*

- Damasio, A.R.(1996): *Descartes tévedése*. Aduprint, Budapest
- Fassbender,Chr. (1993): *Auditory grouping and segregation processes in infancy*. Kaste Norderstedt
- Helmholtz von, H. (1877): *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Vieweg und Sohn, Braunschweig
- Iversen,S.-Kupfermann, I.-Kandel, E.R. (2000): *Emotional States and Feelings*. (in Kandel, E.R.-Schwartz,J.H.-Jessell,T.M. (eds): *Principles of Neural Science*. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill Comp.), 982-997.
- Khanna,S.M., Ulfendahl, M., Flock, A. (1989): *Waveforms and spectra of cellular vibrations in the organ of Corti..* Acta otolaryngol. (Stockholm) Suppl. 467, 189-193.
- Kuhl, P.K.-Williams,K.A.-Lacerda, F.-Stevens,K.N.-Lindblom,B: *Linguistic experiences alters phonetic perception in infants by 6 months of age*. Science, 255, 606-608.
- LeDoux, (1992):*Brain mechanism of emotion and emotional learning*. Cur. Biol. 2, 191-197.
- Moor,B.C.J. (1997): *Frequency analysis and pitch perception*. In M.J. Crocker (Ed.): *Encyclopedia of Acoustics*. John Wiley & Sons, New York, 1447-1460.
- Pap J. (2002): *Hang-ember-hang*. Vince Kiadó, Budapest
- Pöppel,E.(1988): *Gehirnzeit und Musikempfinden*. In Götze,H.- Simon,W. (Hrsg.): *Wo Sprache aufhört*. Springer, Berlin, 31-49.
- Salk,L. (1973): *The role of the hearthbeat in the relationship between mother and infant*. Scientific American, 228, 24-29.
- Schneider, B.A.- Trehub, S.E.(1985): *Behavioral Assesment of Basic Auditory Abilities*.( in S.E. Trehub, B.A.Schneider eds. : *Auditory Development in Infancy*. Plenum Press, New York)
- Spoendlin, H.(1974): *Neuroanatomy of the cochlea*. In E.Zwicker – E.Terhardt (eds.) *Fact and Models in Hearing*. Springer, New York, 18-34.
- Szentágothai,J. (1977): *Functionális anatómia*. Medicina, Budapest
- Tarnóczy,T. (1982): *Zenei akusztika*. Zeneműkiadó, Budapest
- Tarnóczy, T. (1986): *Teremakusztika*. Akadémiai Kiadó, Budapest