

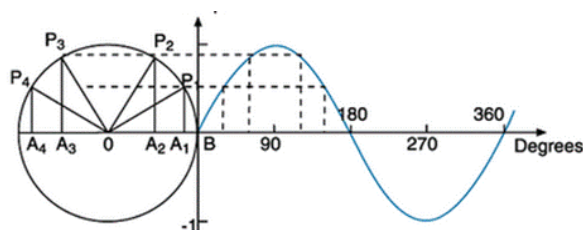
A jegyzet az órán elhangzottak rövid, tömör összefoglalója. A fejezetek az egyes előadások anyagát tartalmazzák. A szövegben vastag betűvel szedett és aláhúzott szavak jelzik azokat a fogalmakat, melyek külön vizsgakérdések lehetnek.

## 1. Rezgések, hullámok, hangkeltő eszközök

### REZGÉSEK

**Harmonikus rezgőmozgás** - az  $y(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  egyenlettel leírható mozgás, vagy szinuszrezgés. Itt az  $y$  egy nyugalmi helyzettől való kitérést jelent, az  $A$  a kitérés nagyságát (amplitúdóját), az  $\omega$  a körfrekvenciát,  $t$  az időt, az  $\omega t$  szorzat azt a szöveget jelenti, melyet az ábrán látható kör sugara bezár a vízszintessel, a  $\varphi$  egy konstans szögérték (fázisszög).

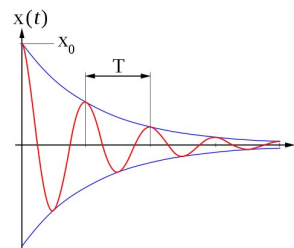
Az ábrán látható hullámvonalat szinuszgörbének nevezzük. Ennek a vízszintes tengelytől való eltérése az **amplitúdó**. Ha a görbe időbeli ingadozást ír le, akkor a hullám hosszát **T periódusidő**nek (egysége: sec), ennek reciprokát pedig  $\nu$  frekvenciának (egysége 1/sec, vagy Hz - Hertz) nevezzük, a **frekvencia** az egy másodperc alatt végzett rezgések száma.



1.1. ábra Szinuszgörbe

A természetben akkor jöhet létre szabályos rezgés, ha valamilyen nyugalmi helyzettől vagy értéktől való kitérés ellenkező irányú ellenerőt kelt és az visszafordítja a folyamatot. Ez történik az ingánál a gravitáció hatására, vagy a hangszerekben a rugalmas ellenerők révén (húrokban, lemezekben). A levegőben keletkező hullám forrása a légnyomáskülönbségek kiegyenlítődése, tehát a levegő is rugalmas közeg.

**Csillapodó rezgések** – valós fizikai körülmények között (hangszerekben, levegőben) minden rezgés csillapodik a közegben fellépő súrlódási hatások révén, melyek felemésztik a mozgás energiáját. Az ábrán a harmonikus rezgőmozgás amplitúdóját egy aszimptotikus görbe a nullához közelíti. Az akusztikából ismerős jelenség: a zongorahang elhalkulása.

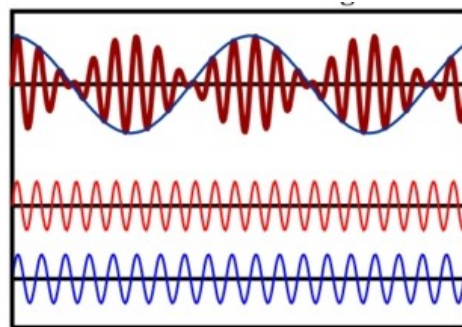


1.2 ábra csillapodó rezgések

**Csatolt rezgések** - ha két rezgő rendszer között energiaátadás lehetséges, akkor ez periodikusan oda-vissza megtörténik. A legegyszerűbb példa két inga, melyek között egy rugó teremt kapcsolatot. A két inga kilengéseinek mértéke váltakozik. Hangszerek részei között is felléphet, pl az azonos magasságra hangolt zongorahúrok között.

**Kényszerrezgések, rezonancia** - Egy külső periodikus hatás rezgésbe hozhat egy rendszert, ezt kényszerrezgésnek hívjuk, a rendszer egy rá jellemző frekvencián, az ún **sajátfrekvencián** fog rezegni. Ha a külső hatás frekvenciája megegyezik a rendszer sajátfrekvenciájával, akkor lesz a kikényszerített rezgés amplitúdója a legnagyobb, ez a rezonancia jelensége (órai példa: Tacoma-híd). A rezonancia rendkívül fontos a hangszerakusztikában, időnként kihasználjuk (marimba), máskor viszont igyekszünk csökkenteni, ha kiküszöbölni nem is tudjuk (hangsugárzó felületek).

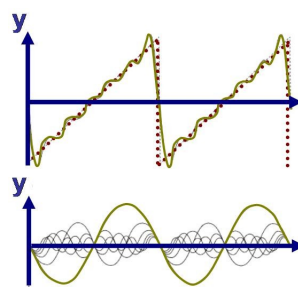
**Rezgések összetevése** Ha egy tömegpontra két független rezgés hat, akkor ezek irány és nagyság szerint (*vektoriálisan*) összegződnek, ez a szuperpozíció elve. Egy fontos zenei példa a **lebegés**, ekkor két közeli frekvenciájú rezgés eredményeként a két frekvencia különbségével ingadozó hangintenzitást érzékelünk. A zongorahangolók addig feszítik egy húrpár egyik tagját, amíg ez az ingadozás el nem tűnik, mert akkor egyenlő a két húr frekvenciája. Az ábra alsó két sorában két közeli frekvenciájú rezgés látható, a felső sorban a szuperpozíciójuk. Figyeljük meg, hogy a felső görbe szélső értékeinél a két alsó görbe azonos fázisú, míg nulla értékeinél ellentétesek.



1.3 ábra rezgések összeadódása

**Fourier tétele** – minden periodikus rezgés felbontható tiszta szinuszos rezgések összegére.

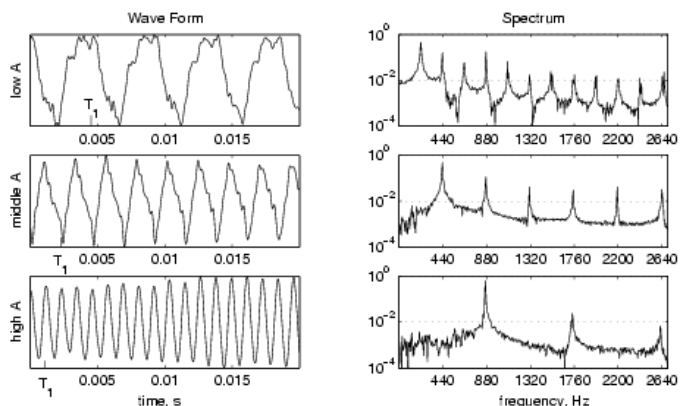
Az 1.4 ábra alsó része hat különböző frekvenciájú és amplitúdójú szinuszgörbét mutat, a felső pedig ezek összegét, mely egy fűrészfogrezgést közelít. A közelítés pontossága további szinuszos komponensekkel tovább javítható. Érdekes pontról pontra követni az alsó komponensek és a felső összeg kapcsolatát. A fő szinuszos komponens (az alaphang) zölddel van jelölve, a többiek a felhangok, vagy felharmonikusok.



1.4. ábra

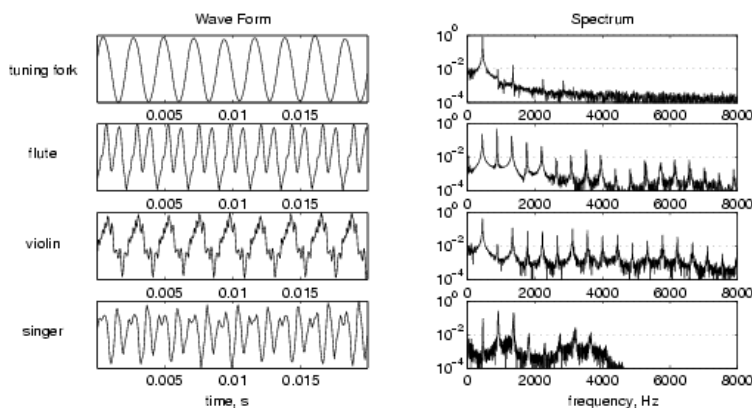
**Hangspektrumok** – a zenei hangok mindig több, különböző frekvenciájú összetevőből állnak. A különböző frekvenciájú összetevők intenzitás szerinti eloszlását hangspektrumnak nevezzük.

Az 1.5 ábra a zongorán megszólaltatott kis a, egyvonalas a, és kétvonalas a hangok hullámformáját (balra) és spektrumát (jobbra) mutatja. A spektrumokon azoknál a frekvenciaértékeknél vannak csúcsok, melyek a három alaphang frekvenciáinak (220, 440 és 880 Hz) egész számú többszörösei. Az ilyeneket nevezzük harmonikus spektrumnak.



1.5 ábra hullámformák és spektrumaik

Az 1.6 ábra a hangvilla, fuvola, hegedű és énekhang egyvonalas a hangjához tartozó hullámformát és spektrumot mutatja. Az alsó három spektrum harmonikus. Az énekhang spektrumán látható két hullám, az első és második formáns, melyeket az énekhang akusztikájánál tárgyalunk.



1.6 ábra

## HULLÁMOK

Ha egy közeg egy pontjának fizikai jellemzője eltér a nyugalmi értéktől és ezzel szemben a közeg rugalmas ellenerőt fejt ki, akkor ez az eltérés - mint zavar – tovaterjed a közegre jellemző sebességgel.

**Típusai** – a hullám lehet torziós, transzverzális és longitudinális. A hanghullámok longitudinálisak, vagyis a közeg részecskéinek elmozdulása a hullámterjedés irányában történik.

A hullám jellemzésére a térbeli **hullámhossz** ( $\lambda$ , mértékegysége m) és az időbeli **frekvencia** ( $\nu$ , mértékegysége 1/s) használatos. A közegre jellemző **terjedési sebességgel** ( $c$ , egysége m/s) a következő az összefüggésük:

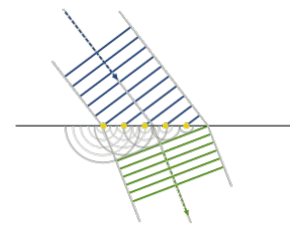
$$c = \lambda \cdot \nu \quad (1.1)$$

A hanghullámok terjedési sebessége 0 Celsius fokú, normális nyomású és nedvességtartalmú levegőben

$$c = 331,5 \text{ m/sec.}$$

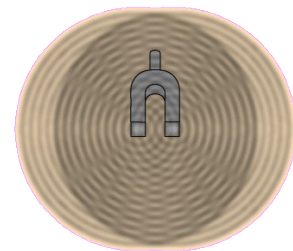
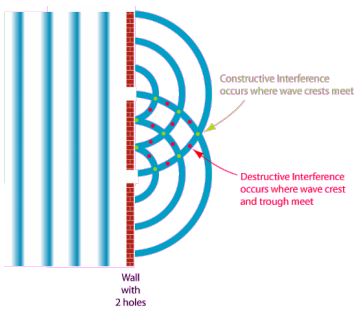
*A hullám egyenlete  $y = A \cdot \sin[\omega(t-x/c) + \phi]$  alakban írható fel, ahol  $c$  a hullám terjedési sebessége és  $x$  a terjedés távolsága. A kifejezés az  $x/c$  hányados által megadott időintervallum segítségével tetszőleges  $x$  pontban megadja a kitérés mértékét.*

**Huygens-Fresnel elv** – Huygens szerint a hullámfrontok minden pontja elemi gömhullámok kiindulópontja és ezek eredőjeként jön létre a hullámfront terjedése. A Fresnel-féle pontosítás fizikailag korrektebb, de Huygens elve szemléletes magyarázatot kínál terjedési sajátosságokra. A hullámok irányának megtörése két különböző terjedési sebességű közeg határán a jobboldali ábrán érthető meg az elv révén. Az alsó térfélben időegység alatt keletkező elemi gömhullámok kisebbek, mint a nagyobb terjedési sebességű felső térfélben.



1.7 ábra Huygens elve törésnél

**Interferencia** – ha két hullámforrás rezgései között állandó a fáziskülönbség, akkor az általuk keltett hullámok a térben periodikus mintázatokat hoznak létre, ez az interferencia. A mintázat maximum/minimum helyei ott vannak, ahol a hullámok úthosszkülönbségei a félhullámhossz páros/páratlan számú többszörösei, ezeken a helyeken a beérkező hullámok erősítik/kioltják egymást.

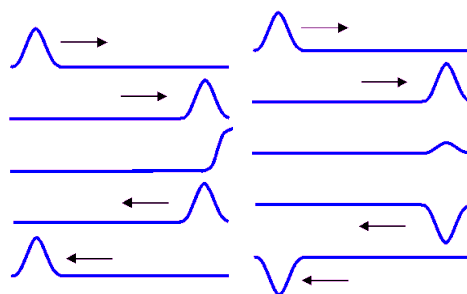


A baloldali kép a Huygens-elv ábrázolása mellett azt mutatja, hogy a falhoz érkező síkhullám a két nyílásnál két gömhullám forrása lesz és ezek találkozásából erősítési és kioltási helyek mintázata jön létre, amint azt a középső ábra is érzékelteti. A jobboldali ábrán egy hangvilla két ága által kibocsátott hullámok interferenciamintázata látható, aminek az oka, hogy a két ág ellentétes fázisban rezeg. Mindenki próbálja ki: ha megüti a hangvillát és elforgatja a füle mellett, akkor a hangintenzitás ingadozását fogja tapasztalni, mivel a különböző szögeknél erősítés illetve kioltás jön létre (órán kipróbáltuk).

A jelenség egyik érdekes következménye pl. az, hogy ha sztereo berendezések egyik hangszóróját tévesen kötjük be, akkor a kisugárzott hullámok ellentétes fázisúak lesznek és a másik hangszóróból jövő jelekkel interferálva jelentősen legyengítik a hallható hangot.

**Állóhullámok** Ha az interferencia révén létrejövő mintázat térbeli helyzete időben állandó, akkor állóhullámokról beszélünk. A zenei hangok keltéséhez a hangszer valamely részében állóhullámoknak kell létrejönniük, melyek a levegővel való kapcsolat révén kisugárzódnak.

**Hullámok visszaverődése** – ha egy hullám eléri egy közeg határához, ahol megváltoznak a terjedés feltételei (pl. a hangsebesség, vagy az ún. akusztikai impedancia, ld. 2. előadás), akkor a hullám egy része továbbhalad – ha tud – más része pedig visszaverődik. A visszaverődés fázisa attól függ, hogy a közeg határa szabad, vagy rögzített véget jelent. Az alábbi ábrán a baloldali rajz a szabad véget mutatja, a beérkező hullám ugyanolyan kitérésű hullámként verődik vissza. A jobboldali (rögzített végű) esetben a visszavert hullám kitérése ellenkező előjelű. A különbség fontos a hangszerekben létrejövő állóhullámoknál.



**1.8 ábra** hullámok visszaverődése szabad és rögzített végén.

## HANGKELTŐ ESZKÖZÖK

Hangkeltésre olyan fizikai egységek alkalmasak, melyek anyaga rugalmas, tehát valamilyen kitéréssel szemben ellenerőt tanúsítanak, széleikről a zavar visszafordul az egység belseje felé, az újabb érkező zavarral interferálva állóhullámot hoz létre, e hullám egy része kicsatolódik a környező közegbe, ahol periodikus zavarként tovaterjedve hangélményt okoz. E fizikai egységek a következők lehetnek: húrok, rudak, lemezek, légoszlopok. Ezek különböző anyagú, geometriájú és gerjesztési módú esetei különböztetik meg a hangszereket.

**Módusok és sajátfrekvenciák** - módusnak nevezzük egy hangkeltő eszköz rezgéseinek geometriáját, vagyis az ún. csomópontoknak vagy csomóvonalaknak a struktúráját, melyek elválasztják egymástól a rezgő test ellentétes fázisban oszcilláló tartományait. Minden módushoz tartozik egy sajátfrekvencia, melyen az adott módus rezegni képes.

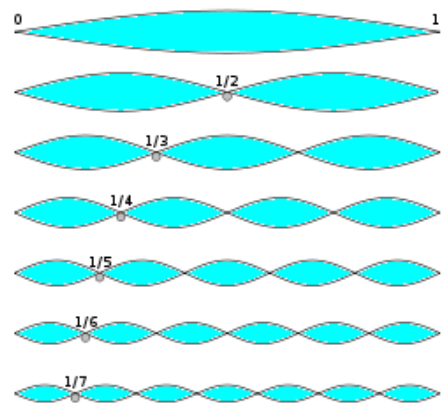
### Húrok

Húrnak nevezzük a hosszához képest elhanyagolhatóan vékony, mindkét végén befogott és megfeszített rugalmas szálat. Fő rezgési módja transzverzális (a kitérés merőleges a húr irányára). Gerjesztése során több különböző rezgést végez, melyek frekvenciáit a **Mersenne-törvény** adja meg:

$$f_n = \frac{n}{2l} \left( \frac{F}{\rho q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

Ahol  $n$  egész számok sorozatát jelenti ( $n=1,2, \dots$ ),  $l$  a húr hossza,  $F$  a feszítőerő,  $q$  a húr keresztmetszetének területe és  $\rho$  (ez a görög 'ró' betű) a húr anyagának sűrűsége. Szavakban: az  $n$ -edik számú rezgés frekvenciája  $n$ -szerese egy alapfrekvenciának, mely fordítottan arányos a húr hosszával (a hosszabb húr mélyebb hangot ad ki), továbbá nagyobb feszítőerőhöz magasabb hang, nagyobb keresztmetszetű ill. sűrűségű húrhoz alacsonyabb hang tartozik. Az alapfrekvencia nem ez utóbbi három mennyiség zárójelben szereplő kifejezésével, hanem annak négyzetgyökével arányos (amint emlékszünk, az  $\frac{1}{2}$ -ik hatvány a négyzetgyököt jelöli). A  $q\rho$  -szorzat egyébként az egységnyi hosszúságú húrszakasz tömegét adja meg. A képlet jelentését érdemes végiggondolni az ismert hangszerek különböző magasságú húrjainak összehasonlításával és hangolási tapasztalatainkkal.

**Harmonikus felhangspektrum**-nak nevezzük azt a hangspektrumot, melyben a felhangok frekvenciái az alaphangénak egész számú többszörösei. A húrok lehetséges rezgéseinek sorozata azért igen kedvező zenei szempontból, mert teljesítik ezt a követelményt, amint az a (1.2)-ből látható. Később látni fogjuk, hogy ilyen spektrumokhoz kapcsolódik hangmagasság-érzésünk is. Az 1.9 ábrából látható, hogy a lehetséges rezgési módusok mind olyanok, hogy a húr két végének (nyilvánvalóan) rögzítettnek kell lenni, a két végpont közötti távolság pedig egyenlő hosszúságú szakaszokból áll, melyeket viszonylag nyugalomban lévőnek tekinthető **csomópontok** választanak el egymástól, ezek két oldalán a szomszédos szakaszok ellentétes fázisban rezegnek. Az alaphangnak a két végponton kívül nincs csomópontja, az elsőnek egy van és í.t.

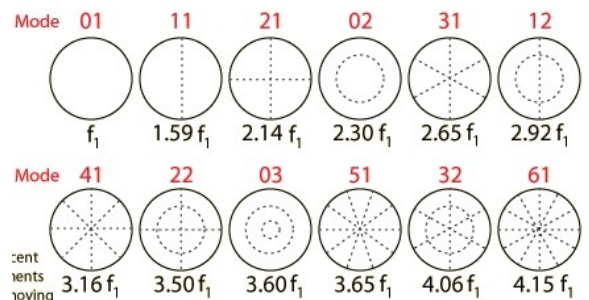


1.9 ábra Egy húr 7 rezgési módusa

**Rudak** Vastagságuk hosszukhoz képest már nem elhanyagolhatóan kicsiny. A hűrtől eltérően nem szükséges megfeszíteni, egy pontján befogva és a végét (végeit) kimozdítva megfelelő ellenőrt tanúsít a kimozdítással szemben és rezgést végez – csillapodással. Felhangspektrumuk már általában nem tekinthető harmonikusnak, nem egy alaphangfrekvencia egész számú többszöröseiből állnak, ezért hozzájuk kötődő hangmagasság-érzésünk sem mindig egyértelmű. Nem feltétlenül körkeresztmetszerűek, tulajdonképpen a lapok is ide sorolhatók. Többnyire ütőhangszerekben használatosak, de pl a hangvilla is ide tartozik.

**Membránok** Peremüknél rögzített rugalmas hártyák, legfontosabb alkalmazásuk a doboknál történik.

Az ütődob módusai és a hozzájuk tartozó frekvenciák. Az eszköz az egydimenziós húrokkal szemben kétdimenziós, ezért itt nem csomópontok, hanem csomóvonalak vannak, egy csomóvonal két oldalán a felületdarabok ellentétes fázisban rezegnek. A módusokat számpárok jellemzik, melyek a korongok fölött láthatók. A számpárok első tagja a radiális (középponton áthaladó), a második a cirkuláris (peremmel koncentrikus) alakú csomóvonalak számát mutatja, ellenőrizzük őket (a perem is csomóvonal). A módusokhoz tartozó sajátfrekvenciák a korongok alatt láthatók az  $f_1$  alaphangfrekvenciával kifejezve. Látható, hogy ezek nem egész számú többszörösei az alaphangfrekvenciának, tehát nem alkotnak harmonikus felhangspektrumot.



1.10 ábra Ütődob-membrán rezgési módusai

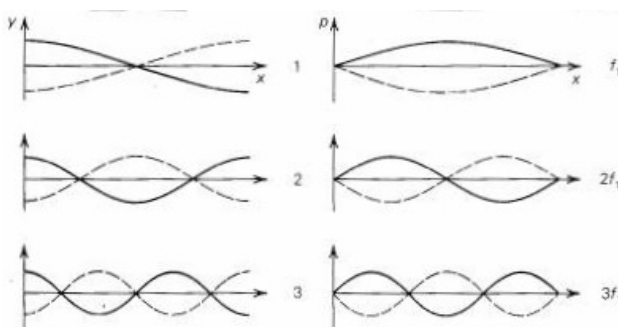
**Lemez**ek a membránokhoz hasonlóan vizsgálhatók, de széleik szabadon rezegnek, ezért egy lemez széle nem csomóvonal. Nemcsak ütőhangszerekben használatosak, hanem pl. húros hangszerek hangszugárzóiként is, mivel a húr önmagában halk hangot ad, mert csak kicsiny levegőtömeget tud megmozgatni, egy nagyobb területű lemez sokkal többet.

**Légoszlopok** a fúvós hangszerek hangkeltésének eszközei, ideértve a beszédet és éneket is. Az alapvető tényezők a következők: a befúvás helyén periodikus zavart keltünk a hangszerre jellemző módon (náddal, ajakkal, stb). Egy elemi zavar egy kicsiny nyomásváltozást jelent, ennek révén egy

nyomáshullám végigfut a csövön. A hullám a cső végénél az akusztikai ellenállás (2. fejezet) ugrásszerű megváltozását tapasztalja, ennek hatásaként a zavar egy része kijut a csőből, egy hányada azonban visszaverődik. Ha éppen akkor érkezik vissza a zavarkeltés helyéhez (ahol szintén visszaverődik) amikor egy következő zavar éppen indul, akkor egymást segítik, erősítik. Ha a befűvés helyén megfelelő periódusban szolgáltatjuk az újabb nyomáshullámokat, akkor ez a folyamat ütemesen zajlik, a nyomáshullám oda-vissza fut, a cső mentén létrejön a sebesség- illetve nyomás-ingadozásoknak egy periodikus struktúrája, melyet állóhullámnak nevezünk. Ez a kiáramlás helyén is periodikus nyomáshullámokat továbbít a külső térbe, ahol zenei hangként jelentkeznek.

Az állóhullámok struktúrája a cső hosszától és a következő nyomáshullám időzítésétől függ. Egy adott hosszúságú cső esetén csak bizonyos frekvenciájú gerjesztések révén alakulnak ki állóhullámok. Ezek egyszerűbb eseteit a 1.11 ábra mutatja egy **mindkét végén nyitott cső** esetén.

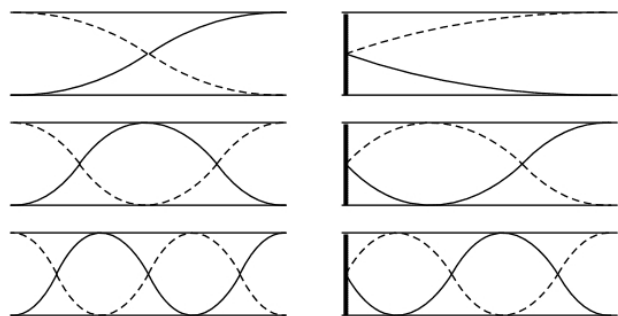
Az ábra bal oldalán a sebesség-ingadozások cső menti eloszlása látható, a jobb oldalon a nyomás-ingadozásé. Ahol a folytonos és szaggatott vonal találkozik, az jelzi az ún. csomópontokat, itt nincs ingadozás, ahol a legjobban eltávolodnak egymástól, ott a legnagyobb az ingadozás, ezek az anticsomópontok. Ahol a sebesség-ingadozásnak csomópontja van, ott a nyomás-ingadozásnak anticsomópontja. Az ábrán látható három módushoz az alapfrekvencia és annak 2 és 3-szoros értéke tartozik. Az alpmódus hullámhossza kétszerese a cső hosszának.



**1.11 ábra** Nyitott cső első három módusa sebesség és nyomás szerint.

A fűvós hangszerek nagyobb csoportjának egyik vége zárt, azok módusait az 1.12 ábra jobboldala mutatja összehasonlítva a mindkét végén nyitott csővel (baloldal). Az ábra a sebesség-ingadozások eloszlását mutatja. A nyitott végeknél csak sebesség-ingadozás maximum lehet, hiszen itt fal nem gátolja a levegőrészecskék mozgását, a nyomásingadozásnak azonban csak minimuma lehet, mert a legkisebb nyomásnövekedés is azonnal elenyészik a szabad térben. A zárt végen pont fordított a helyzet, ott a sebesség-ingadozásnak csak minimuma lehet, a nyomásingadozást azonban megtartja a fal, ezért annak maximuma van. A nyitott cső hossza az alaphang hullámhosszának felét teszi ki (az ábra bal felső sora), a félig zárté pedig csak a negyedét (jobb felső sor). A különbség oka az, hogy a mindkét végén nyitott csőnél minden módusban sebesség-ingadozás-maximum van, az egyik végén zárt cső pedig aszimmetrikus: egyik végén maximum, másik végén minimum van. Ebből következik, hogy míg a nyitott cső felhangjainak frekvenciái az alaphangénak egész számú többszörösei (bal középső és alsó sor, fél- illetve negyed hullámhossz), a félig zárté felhangjainak frekvenciái pedig az alaphangénak páratlan számú többszörösei (jobb középső és alsó sor, 3/4 illetve 5/4 hullámhossz).

Figyeljük meg az ábra jobb oldalán a **félig zárt cső** állóhullám-struktúráit. Az alaphangnál negyedhullám, az első felhangnál háromnegyed hullámhossz, a másodiknál ötnegyed hullámhossz fér a csőhosszra. Emlékeztető: ha a fuvólát átfújuk, oktávot kapunk, az alapfrekvencia kétszeresét, ha a klarinétot fújuk át, akkor duodecimát kapunk, vagyis az alapfrekvencia háromszorosát. Ugyanilyen módon alakul a beszédhang formánsstruktúrája is.



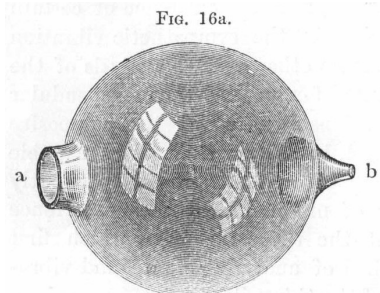
**1.12 ábra** Mindkét végén nyitott és egyik végén zárt cső első három módusa.

A hullámok visszaverődéséről érdemes egy kicsit részletesebben szót ejteni. Utalunk az 1.8 ábránál mondottakra. Ha egy transzverzális hullám rögzített véghez érkezik, akkor ellentétes fázissal verődik vissza, ha szabad véghez, akkor azonossal. A húr esetén a rögzített vég esetét szemlélhettük, ha az egyik irányú kitérés - mint zavar - végigfut a húron, akkor a végről az ellenkező oldali kitérés fog visszafelé futni. A nyomáshullámok másképp viselkednek. Ha egy olyan hullámfront fut végig a csövön, melyben a környezeténél kissé nagyobb a nyomás, akkor a szabad véghez érve kifut a csőből és a cső végénél támad utána egy kis nyomáscsökkentett tartomány, ami a csőből fog kiegyenlítődni (hiszen a magasabb nyomású front eltávozik), az így keletkezett csőbeli nyomáscsökkenés újabb gázt szív el még bentebből, végül visszafelé egy olyan hullámfront fog haladni, amelyben a nyomás az nyugalmi értéknél alacsonyabb. Itt tehát  $180^\circ$ -os fázisugrás történik a nyitott végnél. Amikor a kis nyomású front a befúvási véghez ér, ott egy nagy nyomású fronttal találkozik és azzal úgy lép kapcsolatba, hogy magába szívja, tehát erősíti, és újabb  $180^\circ$ -os fázisugrással így indul megint kifelé egy magasabb nyomású front. Zárt végen nincs ilyen fázisugrás, ezért ott egy oda-vissza úton csak egy fél hullám zajlik le.

**Rezonátorok** a hangszerek kialakításánál szükség van a hang erősítésére is. Ha ezt egy-egy konkrét frekvencián akarjuk elérni, akkor rezonátorokat alkalmazunk, de ha minden frekvencián egyenletesen akarunk erősíteni, akkor a rezonancia éppen hogy káros.

Rezonátorként leginkább üregrezonátor használatos. Egy üregben annak méretétől függően alakulhat ki állóhullám. A marimba lemezei alá helyezett, megfelelően méretezett csövek üregrezonátorként felerősítik a fölöttük rezgő lap hangját. Hallószervünkben is van üregrezonátor: a külső hallójárat, továbbá hangképző szervünknek is van ilyen funkciójú része: a gégefő, ezekre részletesen visszatérünk.

Helmholtz-rezonátor - az üregrezonátor egyik alkalmazása. Ha a 2.5 ábrán látható üveggömb b nyílását a fülünkre helyezzük, akkor az a nyíláson bejutó hangspektrumból az a frekvencia fog felerősödni, amely megegyezik az üreg sajátfrekvenciájával. Egy sorozat ilyen eszközzel megvizsgálható a hangspektrumok összetétele, a komponensek erőssége. Egy ilyen sorozat tulajdonképpen egy egyszerű eszközt kínál a Fourier-elemzésre az elektronika előtti korszakból.



2.5 ábra Helmholtz rezonátor

## 2. Hangok, hangterek

**Hang** Az 1. fejezetben említettek szerint ha a levegő egy kis térrészében megváltoztatjuk az egyensúlyi nyomásértéket, akkor az a nyomáskiegyenlítődés során ezt a zavart továbbítja a szomszédos térrésznek, majd az is tovább, és ez a nyomásváltozás továbbterjed, ezt nevezzük hanghullámnak. A terjedés sebessége a hangsebesség. Ez a zavarterjedés minden rugalmas közegben lejátszódik, pl folyadékban, szilárdtestekben is. Ha a zavarok periodikus, akkor hangról beszélünk. Egyetlen hanghullám csak egy robbanás- vagy kattanás-ként észlelhető, de pl a szirénahangnál egy furatokkal ellátott tárcsa gyorsuló forgása egy nagy nyomású térrész nyílása előtt folyamatos átmenetet eredményez kattanásokból emelkedő magasságú hangba.

**Hangtér** – ha egy rugalmas közeget (pl a levegőt) nyomáshullámok töltenek ki, azt hangtérnek nevezzük, melyet a következő mennyiségek jellemeznek:

$$\begin{aligned} \text{részecskék sebessége} - v &= v_0 + v' \quad [\text{m/sec}] \\ \text{váltakozó sűrűség} - \rho &= \rho_0 + \rho' \quad [\text{kg/m}^3] \\ \text{váltakozó nyomás} - p &= p_0 + p' \quad [\text{N/m}^2 = \text{Pa}] \end{aligned} \quad (2.1)$$

(Emlékeztető: itt a Newton:  $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/sec}^2$  az erő mértékegysége.)

A 0 indexű tagok a stacionárius (időben állandó) értéket jelölik, a hozzájuk járuló, vesszővel jelölt tagok pedig periodikus eltérések.

**Hangnyomás** - a (2.1) kifejezésben a  $p'$  periodikus tag. Ez a stacionárius értékhez képest igen kicsiny értékű. A földfelszíni  $p_0$  légnyomás kb 100.000 Pa (pascal) értékű, ehhez képest a  $p'$  változó tag nagyságrendje a hallásküszöbnél alig több mint a légnyomás tízmilliárdod része, kb  $3 \times 10^{-5}$  Pa. A beszédhang kb  $10^{-2}$  -  $10^{-1}$  Pa hangnyomással jár, a 20 Pa hangnyomás már fájhat is.

**Hangáram** – ( $q$ ) a  $v$  részecskesebesség és  $S$  áramlási keresztmetszet segítségével így definiálható:

$$q = v \cdot S \quad (2.2)$$

mértékegysége a sebesség m/sec és a felület  $\text{m}^2$  mértékegységéből  $\text{m}^3/\text{sec}$ , ezért angolul *acoustic volume flow* -nak is nevezik.

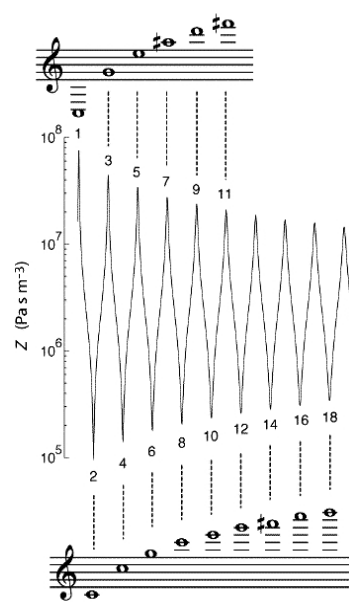
**Akusztikai impedancia** – az impedancia ellenállást jelent, az elektromosságban a váltóáramú ellenállást nevezik impedanciának. Az akusztikai impedancia definíciója: hangnyomás/hangáram:

$$Z_a = p'/q \quad (2.3)$$

mértékegysége a nyomás  $[\text{N/m}^2]$  és hangáram  $[\text{m}^3/\text{sec}]$  mértékegységeiből:  $\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^5$ . A fentiek szerint ezt a mértékegységet úgy is írhatjuk, hogy  $\text{Pa} \cdot \text{sec}/\text{m}^3$ , ezt akusztikai Ohm-nak is nevezik. (2.3) tanulságos hasonlóságot mutat az elektromos Ohm-törvénnyel, ahol az  $R$  ellenállásra, az  $U$  feszültségre és  $I$  áramerősségre:  $R = U/I$ . (2.3)-ban nyilván a hangáram felel meg az áramerősségnek, a feszültségnek pedig a nyomásingadozás, ami az áramot kikényszeríti.

Az akusztikai impedancia a fúvós hangszerek fontos jellemzője. Frekvenciafüggését a 2.1 ábra mutatja egy 597 mm hosszú csőre. Ha befúvási vége nyitott, ott  $p'$  minimális (ld. 1.12 ábra), viszont jelentős a hangáram, ezért az alaphang és felharmonikusai frekvenciáinál  $Z_a$  minimális (alsó felhangsor). A fuvola ezért sebességvezérelt hangszer.

Zárt vég esetén az alaphang egy oktávval mélyebb, átfúvással páratlan sorszámú felhangok gerjesztődnek. Itt a zárt végnél a  $p'$  maximális, a  $q$  minimális, tehát a felhangok (felső sor) ott szólaltathatók meg, ahol  $Z_a$  maximális. A klarinét nyomásvezérelt.



2.1 ábra



**Hangintenzitás** – hangerősség, az egységnyi felületen, egységnyi idő alatt, merőleges irányban, átáramló hangenergia időbeli középértéke:

$$I = E/(t \cdot S) \quad [\text{erg}/(\text{sec} \cdot \text{m}^2) \text{ vagy watt}/\text{m}^2] \quad (2.4)$$

más szavakkal a felületegységen áthaladó hangteljesítmény, mértékegysége  $\text{watt}/\text{m}^2$ .

**Hangteljesítmény** – az a hangenergia, ami 1 sec alatt S felületen áthalad

$$P = I \cdot S \quad [\text{watt}] \quad (2.5)$$

Egy hangforrás hangteljesítménye az időegységenként minden irányban kibocsátott hangenergia. Példák hangteljesítményre (wattban kifejezve):

beszéd:	$10^{-5}$
kiáltás:	$10^{-3}$
zongora ( <i>fff</i> ):	$10^{-1}$

**Hangenergia-sűrűség** – a térfogategységben foglalt hangenergia időbeli közepe. Termék akusztikájánál használt fogalom.

**Hangintenzitás-skála** – az intenzitás fizikai ( $\text{watt}/\text{sec}$ -ban mért) értékei között több nagyságrend különbség lehetséges, ezért mérésére logaritmikus skála is használatos. Bevezették a **decibel** fogalmát, ami két intenzitásérték viszonyát fejezi ki a következőképpen.  $I_1$  és  $I_2$  intenzitások különbsége  $n$  decibel, ahol

$$n = 10 \cdot \lg(I_1/I_2) \quad (2.6)$$

Egyszerű példaként: ha  $I_1$  és  $I_2$  aránya 100, akkor hányadosuk tízes alapú logaritmus 2 és ennek tízszerese 20, ennyi a két intenzitás különbsége decibelben (dB) kifejezve. 1000-szeres intenzitáskülönbség decibel-értéke 30, és í.t.

A decibel tehát viszonyítási skála, ha azt halljuk hogy egy hangforrás valamennyi decibel erősségű, akkor ez a humán hallásküszöbre vonatkoztatott értéket jelenti, ld. a 4. előadást.

## **Teremakusztika**

A teremakusztika több fontos tényezőjét említettük már. Ide tartoznak a hangterjedés sajátosságai (Huygens-Fresnel elv következményei), a visszaverődés, törés, elhajlás, szóródás illetve a hangsebesség.

A **visszaverődés** a hanghullámoknál is az optikai visszaverődéshez hasonlóan zajlik, a visszavert sugár ugyanolyan szöveget zár be a felület normálisával (a felületre merőleges iránnyal), mint a beeső.

A **törésre** is optikai analógia érvényes azzal a különbséggel, hogy a hangterjedés sebessége a nagyobb sűrűségű közegben nagyobb, tehát itt nagyobb a törőszög.

**Szóródás** - a hullámok egy akadály széléhez érve eltérnek irányuktól. A szóródás hullámhossz-függő, a nagyobb hullámhosszak jobban elhajlanak, a rövidebbek jobban tartják az eredeti irányt. Ha egy hangforrástól fal választ el minket, akkor a fal széléin létrejövő hullámelhajlás miatt halljuk a hangot. Minél nagyobb azonban a fal, annál kevésbé jutnak el hozzánk a legmagasabb hangok.

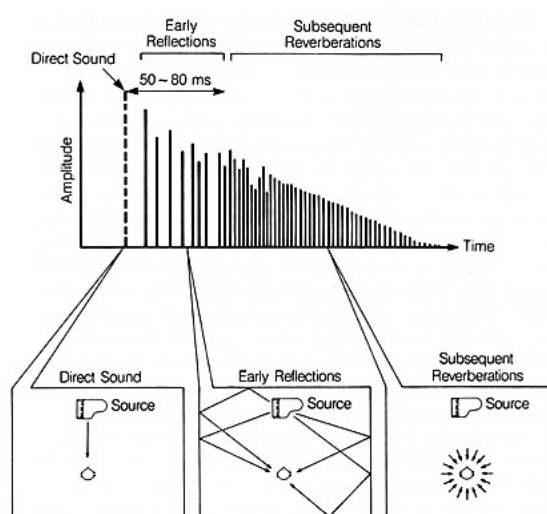
**Elnyelődés** - egy bizonyos út megtétele után a hanghullámok energiája felemésződik, elnyelődik. Ennek mértéke is hullámhossz-függő, a rövidebb hullámhosszak (magasabb frekvenciák) hamarabb eltűnnek, ezért nagy távolságokra csak a mély hangok képesek eljutni. A hanghullámok intenzitása e veszteség nélkül is csökken a távolság négyzetével fordított arányban.

Ha egy hanghullámnak egy fal állja útját, akkor energetikailag a következő mérleg állítható fel. Az E energia EA elnyelt (abszorbeált), ER visszavert (reflektált) és áteresztett ET (transzmittált) hányadára felírhatjuk a következő mérlegegyenletet:

$$\frac{E_A}{E} + \frac{E_R}{E} + \frac{E_T}{E} = \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.7)$$

**Hanggátlásnak** nevezzük a hanghullámok visszaverődését, ez tehát megkülönböztetendő a hangelnyeléstől, vagyis az abszorpciótól, termen kívül a (2.7) mérlegegyenlet szerint alakul a hangenergia.

**Utózengés** - zárt térben a falakról visszaverődő hanghullámok hozzájárulnak zenei élményünkhöz. Egy 100 m hosszúságú hangversenysterem nagynak számít, ezt a hanghullám hosszában egy másodperc alatt háromszor végigfutja. A hanghullámok azonban minden irányban terjednek és visszaverődéseik szinte soha nem merőlegesek. Eközben törést, elhajlást, szóródást szenvednek, melyek révén egy átlagos hangversenysteremben a másodperc tört része alatt kialakul egy hangkeverék. A sematikus 2.2 ábra mutatja a zongorától a hallgatóig eljutó közvetlen hangot, a korai reflexiókat valamint a megsokasodó és összeolvadó reflexiók hatását. Ezt a lecsengő hanghatást nevezzük utózengésnek, ami tehát nem azonos a visszhanggal.



2.2 ábra Utózengés kialakulása

**Utózengési idő** - vagy reverberációs idő,  $RT_{60}$ : a közvetlen hang erősségének 60dB-es csökkenéséhez szükséges idő. A (2.6)-nál említettek értelmében ez azt jelenti, hogy műszerrel azt az időt kell mérni, ami alatt a hangintenzitás az egymilliomod részére csökken. A sokszoros visszaverődések természetesen különbözőképpen érintik a különböző frekvenciájú összetevőket, ezért az  $RT_{60}$  pontosabb megállapításakor azt is meg kell adni, hogy milyen frekvenciatartományban mértünk. A sokszoros reflexiók során az utózengésből a nagyobb frekvenciák hamarabb "kikopnak". Az utózengési idő becslésére a Sabin-féle formula használatos:

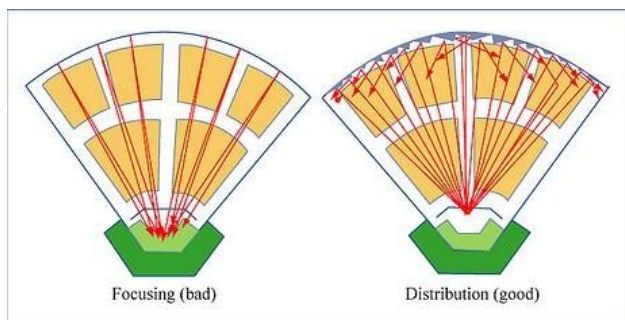
$$RT_{60} = \frac{0,164 V}{\sum F_i \alpha_i} \quad (2.8)$$

A formula kvalitatíve azt jelenti, hogy az utózengési idő növekszik a  $V$  térfogattal és csökken a terem belső felületének hangelnyelő-képességével, ez utóbbi a nevezőben szerepel. Egyiket sem kell bizonygatni. A nevezőben az egyes  $F_i$  felületdarabok és a hozzájuk tartozó  $\alpha_i$  abszorpcióképességek szorzatainak összege van felírva.

Az utózengési idő a terem legfontosabb akusztikai jellemzője, a zenei élmény része. Kamarazenénél rövid, zenekari-oratorikus műveknél hosszabb kell hogy legyen, de pl a szép orgonahangzás hosszú utózengést igényel, a rövid szerencsétlenül hangzik. Az utózengés értéke a tempóválasztást is befolyásolhatja.

További teremakusztikai paraméterek is ismertek, egy újabb cikk több mint negyven eddigi javaslatot sorol fel. Zenei szemmel talán csak a következőket érdemes számon tartani.

**Diffuzitás** - a térbeli-iránybeli hangenergiaelosztás egyenletessége, ld a 2.3 ábrát. A baloldali elrendezésben minden visszafókuszálódik a pódiumra, a jobboldali szórófelülettel ellátott kiképzés egyenletesen elosztja a hangenergiát.



2.3 ábra Fókuszáló és szóró kiképzés

**Tisztaság** - az első 50 ms alatt és azután beérkező energia. Ennek a jelentősége is nyilvánvaló, ha az elsődleges jel beleolvad az utózengésbe, akkor elkenődik, érthetatlenné válik. Többnyire nagy csarnokok esetén probléma, de a rossz hangosítás is ronthatja.

**Visszhangfok** - a visszhangszerű (tehát külön érzékelhető) jelek és az utózengés aránya. Az utózengés visszaverődésekből áll össze, de nem szerencsés, ha ebből egyesek kiemelkednek.

**Időkésés-retesz** - a terem közepén a hangforrástól jövő közvetlen jel és az első visszavert jel időpontja közötti különbség.

Hangversenytermek kialakításánál illetve azok használatánál van egy néhány szempont, amire szerencsés ügyelni. A 2.3 ábra bal oldalán szereplő elrendezésben a játékosok felerősítve kapják vissza produkciójukat, miközben a közönség nem kap egyenletes hangzások eloszlást. A jobb oldalon szereplő, diffuzitást növelő falburkolat minden hangversenyteremnek hasznos kelléke, mivel hatékonyra teszi a hangtér energiaeloszlásának egyenletessé tételét.

A (2.8) formula szerint egy üres teremben tartott főpróba hosszabb utózengés mellett történhet, majd az előadáson beülő közönség (ruhája) megnöveli az  $\alpha_i$  abszorpciókat és lecsökkenti a reverberációt. Más tempó fog kínálkozni, mint a főpróbán.

A fókuszáló felületdarabokat kerülni kell, ezek komoly hibái egy hangverseny-helyszínnek. Különösen szerencsétlen, ha a zenészek ülnek egy homorú felületdarab fókuszában, mert az produkciójukat a közönség felé vetíti és ők egymást alig hallják, miközben a közönség felől érkező zajokat ugyanez a felület rájuk vetíti és őket jobban hallják, mint egymást. Egy templom kupolája alatt a hang keltője saját maga fogja legjobban hallani magát. Ugyanakkor a román templomok szentélyeinek ez a funkciója hasznos lehetett, a pap hangját kivetítette a hallgatóságra. Mindenesetre a hanghullámok közönség felé való terelése - fókuszálás nélkül, csak sík felületekkel - mindenképpen előnyös, mert ezáltal a magas frekvenciák kevésbé vesznek el a hallgatók számára. Ez az eszköz a zongoránál adva van, de egy kórusnál külön kell róla gondoskodni.

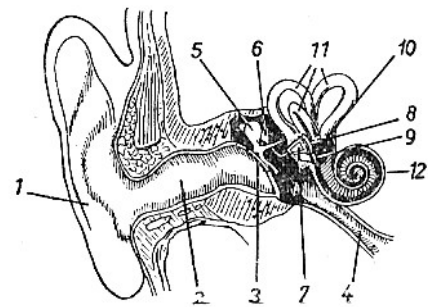
A termék üregrezonátorként is viselkedhetnek azokra a hullámhosszakra nézve, melyek a terem méreteivel összemérhetők és csak magasabb frekvenciájú hanghullámok viselkednek ide-oda verődő sugarakként. Kisebb termék rezonanciái nyilván a magasabb frekvenciatartományba esik ezért érzi mindenki nagy énekesnek magát a zuhany alatt. A termék akusztikáját üregrezonátorokkal is lehet befolyásolni, amint az az ókor óta ismeretes.

Zenetermek akusztikájának fontos eleme a szereplő hangszerek iránykarakterisztikája is. Minden hangszernak van preferált iránya, ahová a legtöbb hangenergiát sugározza, ezt a zenészek elrendezésénél nem lehet figyelmen kívül hagyni. A mai zenekari elrendezés nem véletlen, ezt a hangszerakusztikában részletezzük.

### 3. Hallás

#### A hallószerv részei és akusztikai szerepük:

1. **Fülkagyló** - árnyékolás és irányérzékelés
2. **Külső hallójárat** - Helmholtz-rezonátor kb 3500 Hz-re.  
Itt a legérzékenyebb a hallásunk.
3. **Dobhártya** - innen középfül, ld. 3.2 ábra)
4. **Eustache-kürt** - összekötés a szájüreg felé.
- 5-6-7. **hallócsontok**
- 8-9-10. ld. 3.2 ábránál
- 11 **Félkörös ívjáratok** - egyensúly szerv
12. **Csiga v. Cochlea**



3.1 ábra Az emberi hallószerv

**Dobhártya** (ang. Eardrum) érzékeny membrán, kb 55 mm<sup>2</sup>, a légnyomás ingadozásait továbbítja a hallócsontokhoz.

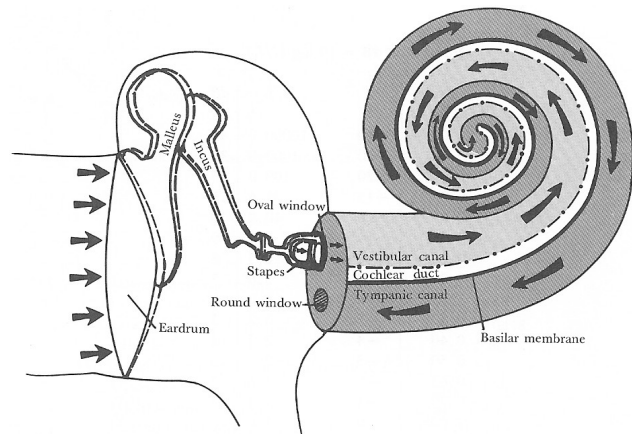
**Hallócsontok:** kalapács-üllő-kengyel (latinul: malleus-incus-stapes) a dobhártyától kapott impulzusokat továbbítják a hallócsiga bemenő ablakához. Az erőhatást egyszerű emelőként felnagyítják. Kis méretük miatt alkalmasak nagy frekvenciák átvitelére.

**Ovális ablak** - a Cochlea "bejárata", mérete a dobhártyánál kisebb ezért a dobhártyánál jelentkező nyomásingadozás itt felnagyítódik. Innentől kezdve a nyomáshullámok a Cochlea belsejében lévő folyadékban futnak tovább.

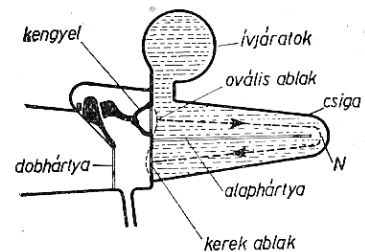
**Kerek ablak** - a Cochlea végén, a nyílak mentén oda-vissza futó nyomáshullám itt hal el.

**Cochlea** - hallócsiga, képzeletben kiegyenesítve látható a 3.3 ábrán. a félkörös ívjáratokkal közös folyadék tölti ki. Az ovális ablakon bejutó nyomáshullám végigfut a rajz szerinti felső csatornán (scala vestibuli), átjut a végén lévő nyíláson (csigalyuk - helicotrema) és visszafut az alsó csatornán (scala tympani) a kerek ablakig.

**Alaphártya** - (lamina basilaris) a nyomáshullám hatására hullámformájú kimozdulást végez, amit a Corti-szerv alakít át elektromos impulzusokká.



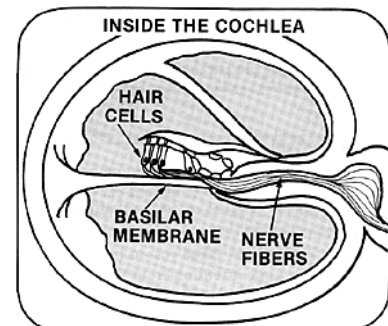
3.2 ábra Közép- és belfül



3.3 ábra Cochlea

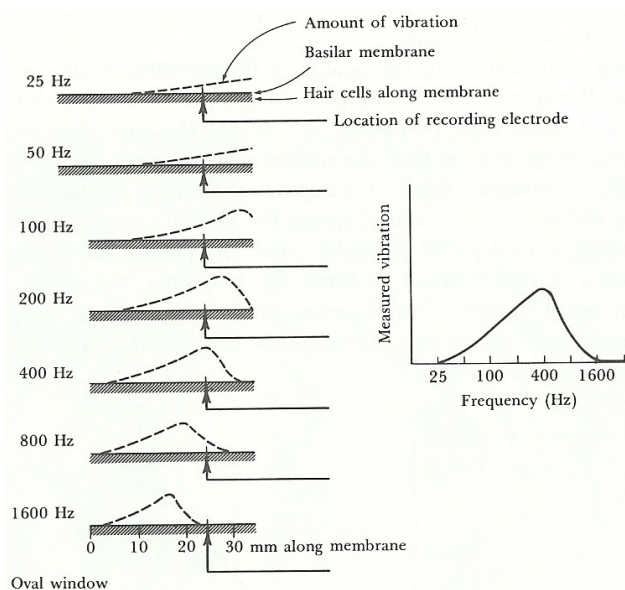
**Corti-szerv** - a hallócsiga mentén végig elhelyezkedő érzékelők, szőrsejtek és fedőhártya együttese. A 3.4 ábra a csiga metszetét mutatja. Itt az alsó tartomány a *scala vestibuli*, ebben fut a nyomáshullám, kimozdítja alaphelyzetéből az alaphártyát, az megemeli a rajta lévő szőrsejteket, azok érintkezésbe lépnek a fedőhártyával, az általuk kiadott impulzusokat az idegvezetékek továbbítják az agyba.

**Szőrsejtek** - kétfélek: a belső szőrsejteknek (kb. 3500) az a funkciója, hogy információt szolgáltatssanak a gerjesztés helyéről és erősségéről. A külső szőrsejtek (kb 14000) szerepe erősítés, a bejövő jelek frekvenciájával megegyező vibrációra képesek és ez hozzáadódik az eredeti jelhez. Ez kb 50 dB erősítést tesz lehetővé, továbbá kitágítja az emlősök (csak náluk van ilyen) frekvencia-



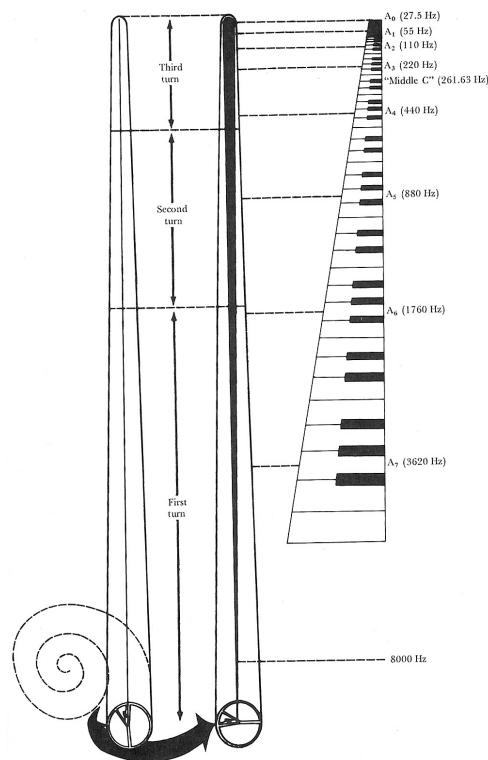
3.4 ábra Corti-szerv

érzékelési tartományát és frekvencia-felbontóképességét.



**3.5 ábra** Békésy György -féle hullámforma

Az alapmembránon létrejövő gerjesztési mechanizmus leírásáért Békésy György Nobel-díjat kapott. A 3.5 ábra mutatja a létrejövő hullámformákat és pozícióikat különböző frekvenciájú hangok esetén.



**3.6 ábra** Hangmagasságok érzékelése az alapmembrán mentén.

Jól látható az ábrán, hogy a hullámforma jellegzetesen aszimmetrikus. Egy adott frekvenciájú hang által gerjesztett hullám maximuma az alapmembrán adott helyén jelentkezik, a kitérés pedig a hang intenzitását jellemzi. A szőrsejtek továbbítják az eloszlásra vonatkozó információt, melynek kiértékelésével az agy érzékelni képes a hang magasságát és intenzitását. A magasabb hangok az alapmembrán elején, az ovális ablakhoz közel, a mélyek attól távol kódolódnak.

A mechanizmus tisztázásával egy sor hallási képesség és korlát értelmezhetővé vált. Érthető például, hogy huzamosabb ideig tartó erős hang miért okoz halláskárosodást: a szőrsejtek egyszerűen elhasználódnak, tönkremennek. Az is látható, hogy ha két hang magasságban egymáshoz közel esik, akkor a két hullám nehezen megkülönböztethetővé válik, ezt fogjuk tárgyalni a 4. fejezetben a kritikus sávoknál. Az is érthető, hogy ha két, egymástól nem túl távoli frekvenciájú, de különböző erősségű hangot hallunk, akkor az erősebb elnyomja a gyengébbet, ez az elfedés jelensége (4. fejezet). Szintén a 4. fejezet témája lesz hallhatósági küszöb, ami a szőrsejtek gerjeszthetőségének alsó határával kapcsolatos. A szőrsejtek regenerálódásához is szükséges egy minimális idő, hogy újból kapcsoló-módusba kerülhessenek, amikor érintés hatására impulzust képesek továbbítani, ezzel kapcsolatos az időérzékelésünk néhány korlátja. (5. fejezet). A mechanizmus egyik legfontosabb hozadéka azonban a spektrális kiértékelés képessége, enélkül nemcsak zenei, hanem beszédképességünk sem lenne (5. és 9. fejezet).

## 4. Hangosság, hangmagasság

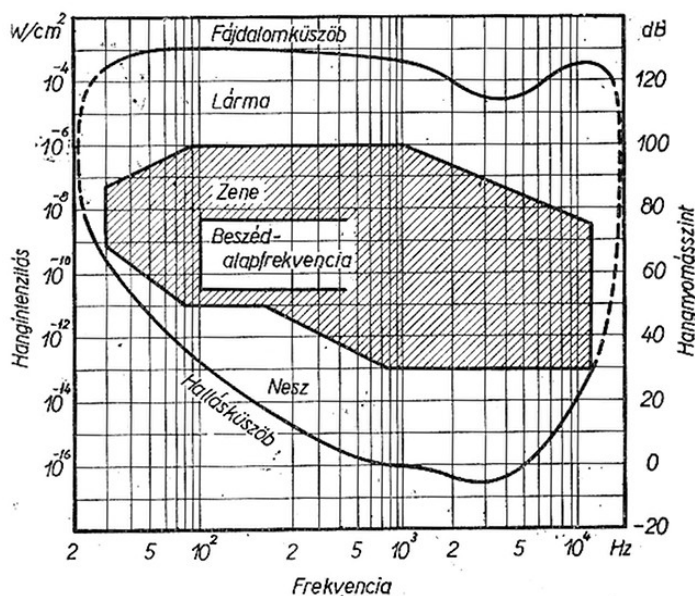
Az első két fejezet a rezgések, hullámok és hangok fizikai leírásával foglalkozott. A fizikai mennyiségek értelmezésénél alapvető a mérési módjuk, fizikai mértékegységeik definiálása, ez teszi lehetővé műszeres vizsgálatukat és skálázásukat. A fizikai ingerekre adott pszichofizikai válaszaink azonban nem mérhetők ezekhez hasonló módon, hanem önkéntes kísérleti alanyok szubjektív visszajelzéseit kell valamilyen rendszerbe foglalni. A korábban tárgyalt fizikai hatások után a következő két fejezetben az érzetoldali válaszokkal foglalkozunk.

**Hangosság** - a fizikai hangintenzitásra adott pszichofizikai válaszunk, szubjektív élményünk.

A 3. fejezetben említett hallási szerveink és azok sajátosságai egy bizonyos frekvencia- és intenzitás-tartományban teszik lehetővé a hanghatások kiértékelését, ezek diagramját nevezzük hallástartománynak, ld. 4.1 ábra.

**Hallásküszöb** az a görbe, mely minden frekvencián megmutatja az éppen érzékelhető hangintenzitást. Jól látható, hogy a legalacsonyabb intenzitást kb 3000Hz-nél érzékeljük, ahol a külső hallójáratunknak üregrezonanciája van (ld. 3. fejezet). A többi frekvencián rohamosan érzékeltlenebb a hallórendszerünk.

**Fájdalomküszöb** a zárt görbét felülről határoló vonal, e fölött orvosilag is ellenjavallt a behatás.

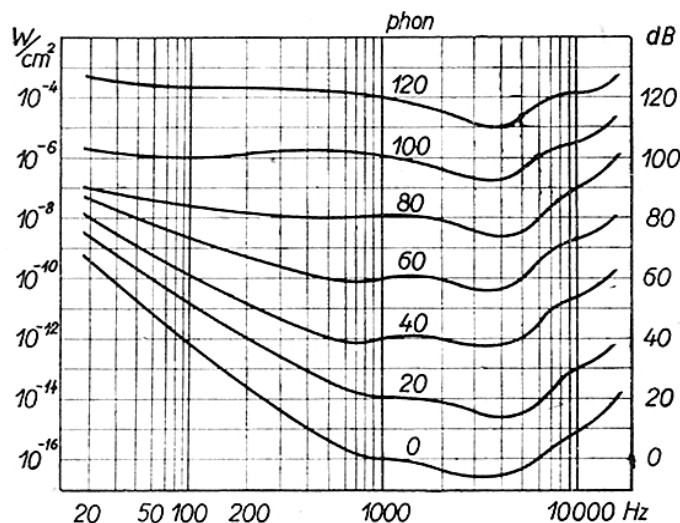


**4.1. ábra** Hallástartomány

Az ábra tanulságosan elkülöníti egy néhány akusztikai élmény tartományát is.

A hangosság skálázása - a hallástartomány méréséhez hasonlóan - csak nagyszámú, fiatal, felnőtt, egészséges ember szubjektív visszajelzéseinek kiértékelésével lehetséges. Amint a 4.1 és 4.2 ábrákon látható, a méréseket olyan műszerrel végzik, mely a mért fizikai hangintenzitás-adatot (ld. (2.4) formulát) tetszőleges frekvencián kijelzi, ami itt watt/cm<sup>2</sup> mértékegységben szerepel.

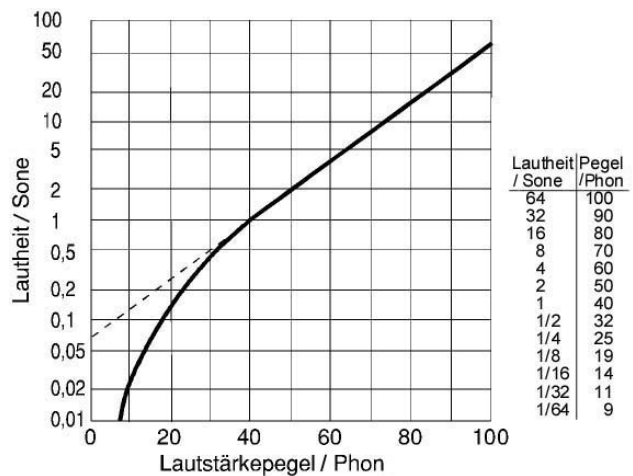
A skála rögzítéséhez szükséges méréssorozat úgy történt, hogy - önkényesen - kiválasztották az 1000 Hz-es frekvenciát, ami közel van a legérzékenyebb értékhez, majd meghatározták a 4.1 ábrán is látható hallásküszöb-vonalat (ez a 0-val jelzett görbe). Ezután 100-szorosára növelték az 1000 Hz-es frekvenciájú jel intenzitását, (10<sup>-16</sup> -ról 10<sup>-14</sup> w/cm<sup>2</sup> -re) és az alanyoknak azt kellett jelezniük, hogy különböző frekvenciájú hangokat milyen intenzitásértéknél érezték ugyanolyan hangosnak, mint az 1000 Hz-es jel, ezeket a pontokat összekötve kapták alulról a második görbét.



**4.2 ábra** Az egyenlő hangosságok görbéi

Decibel-skálán mérve a 100-szoros intenzitás 20 dB emelkedést jelent, ld (2.6), az 1000 Hz-nél mért értéket elnevezték 20 phon. hangosságúnak, a kimért görbe pedig minden frekvencián 20 phon hangosságú. Tovább haladva ugyanezzel a módszerrel lehet meghatározni a 40, 60 stb phon hangosságú görbéket. Ez a görbesereg volt a hangosság skálázásának első eszköze. A phon nem mértékegység-szabvány.

A phon-skálát **Weber-Fechner pszichofizikai törvényének** szellemében alkották, mely szerint az érzet (itt a hangosságélmény) az inger (a fizikai hangintenzitás) logaritmusával arányos. A törvény, vagy inkább szabályszerűség, egy sor területen igen használható, nemcsak a hangintenzitásra, hanem a hangmagasságra, vagy pl. a fényintenzitás-fényesség kapcsolatra is, amint azt a csillagászati magnitúdó-skála is mutatja. Egy másik megközelítés szerint ezt a kapcsolatot inkább hatványfüggvény írja le. Az e szerint alkotott **son-skálának** a phon-skálával való kapcsolatát a 4.3 ábra mutatja. 1 son=40 phon, a többi értéket a görbe mutatja.



4.3. ábra A phon és son skála kapcsolata

A son-skála sem vált szabvánnyá. Az eredeti phon-skálázási görbesereg is több korrekción ment át, mivel a korábbi mérések hibásnak bizonyultak.

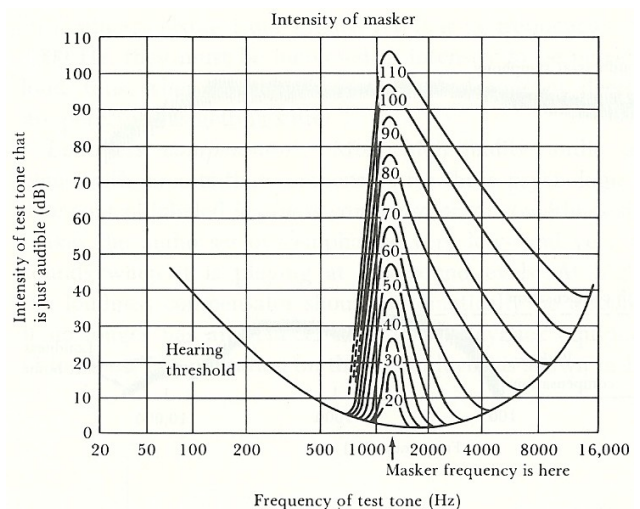
**Decibel-skála** - a 2 fejezetben említettük (2.6)-nál, hogy a decibel viszonyítási mennyiséget jelent, egy konkrét hangintenzitás decibel-értékéről illetve decibel-skáláról csak akkor van értelme beszélni, ha kijelölünk egy nullpontot. A skála nullpontjául a 4.2. ábrán szereplő 1000Hz-es hallhatósági határt választották, ami  $10^{-16}$  w/cm<sup>2</sup>, vagy SI-egységben

$$\text{a decibel skála nullpontja: } 10^{-12} \text{ w/m}^2 \quad (4.1)$$

A skála nullpontja természetesen minden frekvencián ez az intenzitásérték, a phon-skála csak 1000Hz-en esik egybe a decibel-skálával.

Amint a 3. fejezetben szó volt róla, hallószervünk képességei bizonyos korlátokat állítanak érzékelésünk megbízhatósága elé. A hangosságra vonatkozó korlát az elfedés jelensége.

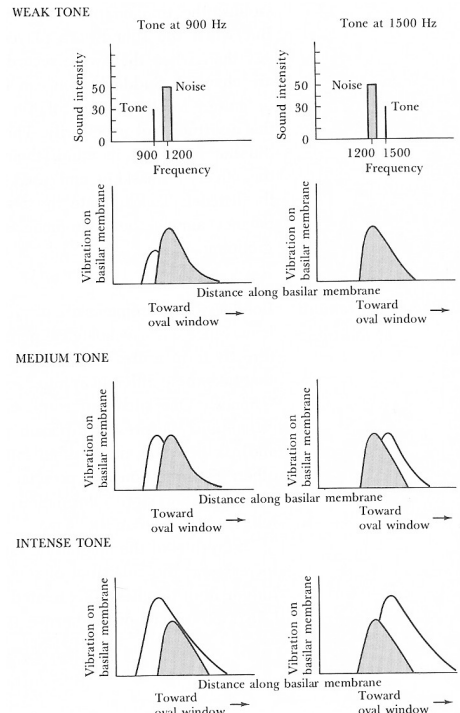
Az **elfedés** a 4.4 ábrán látható görbesereggel szemléltethető. A hallásküszöböt itt csak egy sematikus görbe képviseli. Erre görbék vannak illesztve, melyek azt jelzik, hogy egy adott frekvenciájú (nyíllal jelölve), a hallásküszöbnél 20, 30,...dB-lel erősebb hang hogyan emeli meg a hallásküszöböt. Konkrét példaként tekintsük a 80-jelű görbét, tehát a 80 dB-es, kb 1200 Hz-es zavaró hang esetét. A hallásküszöb kb 78 dB lesz, tehát ezen a frekvencián ilyen erős hangot tudunk a zavarás mellett észrevenni. Ami érdekes: még 4000 Hz-en is kb 24 dB-es erősségű hangnak kell szólnia, hogy észleljük. Fontos sajtáság, hogy magasabb frekvenciák felé az elfedés távolabb hat.



4.4 ábra Elfedés

A 4.5 ábra azt mutatja, mi az érzékelhetősége egy széles-sávú 1200 Hz körüli zaj mellett egy 900 ill. 1500 Hz-es hangnak különböző intenzitásviszonyok mellett. Gondoljunk vissza a 3.5 ábrára. Az alapmembrán Békéshulláma aszimmetrikus, az ovális ablak felé (a 3.5 ábrán jobbkézre) laposabb, a csiga vége felé meredekebb. Ezért a hullámalak a magasabb frekvenciát észlelő szakaszra ráfekszik, miközben a mélyebbet érzékelőt nem zavarja. Ezért az elfedés kevésbé érinti a mélyebb hangokat. Kövessük végig a szürkével kitöltött görbe (zaj) és a fehér görbe (tisza hang) különböző eseteit a tiszta hang különböző frekvenciáinál és intenzitásánál.

A jelenségnek a zenekari élmények között fontos szerepe van. Egy háromvonalas-oktávbeli erős hanghatás mellett a legmagasabb frekvenciatartományokban alig vehetők ki hangszerek külön-külön talán csak egy erős piccolo, miközben a mélyben akár halk basszusok is jól hallhatók.

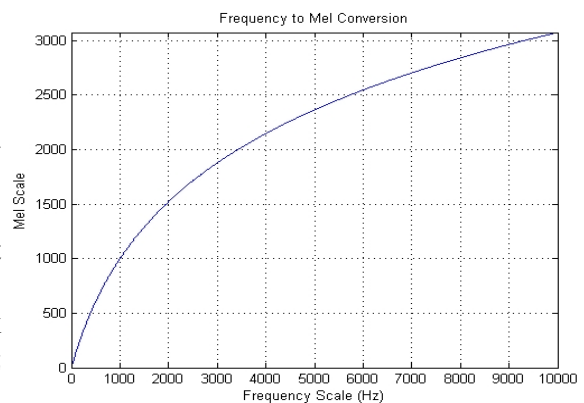


4.5 ábra Az elfedés esetei

## Hangmagasság

A **hangmagasság** szubjektív pszichofizikai élmény, melynek révén képesek vagyunk megkülönböztetni különböző frekvenciájú hangokat, magasabb frekvenciájú hangokat magasabbnak ítélünk. A hangmagasság-élmény azonban nem pontosan követi a frekvenciaértékeket, más szóval a kapcsolat nem lineáris. Ráadásul az is számít, hogy két különböző hangot egyszerre, vagy egymás után hallunk.

**Mel-skála** - Ha nagyszámú kísérleti alany visszajelzései alapján felrajzoljuk azt a görbét, ami összefüggést teremt a fizikai hang frekvenciája és a pszichofizikai hangmagasság-élmény között, akkor a 4.6 ábra szerinti görbét kapjuk. A különböző hangokat egymás után játsszuk, a melodikus hangmagasságérzetet akarjuk mérni, skálájának egységét nevezzük 'mel'-nek. Legyen az 1000 Hz-es frekvenciához tartozó hangmagasság-élményünk 1000 mel. Az ábra szerint a 2000 Hz-es frekvenciához nem 2000 mel tartozik hanem csak kb 1500 mel. Minél magasabb frekvenciájú hang mel-értékét vizsgáljuk, annál laposabb a görbe.

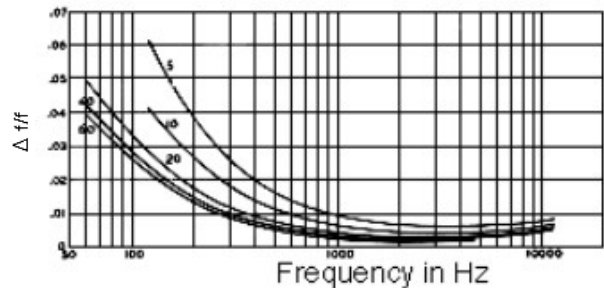


4.6 ábra A frekvencia-Mel kapcsolat

A hangmagasság-különbségnek mindkét (fizikai és pszichofizikai) mérésénél használatos egy legkisebb egység. A fizikainál a legkisebb hangközkülönbséget **különbségi küszöbnek** nevezik, angol nevének fordítása éppen érzékelhető különbség (*just noticeable difference* - jnd) jelölése:  $\Delta f$ . Ezt másképp hallásunk felbontóképességének is nevezzük. Az érzetoldali legkisebb osztás a **cent** (ld a 6. fejezetet), a félhangköz századrésze, vagyis 1200 cent egy oktáv. Egy egészséges ember kb. 1400 hangot tud megkülönböztetni, melynek kevesebb mint tizedét használja a nyugati zene.

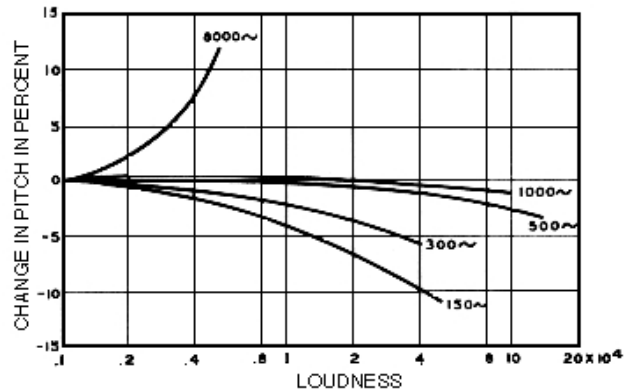


A különbségi küszöb nem alkalmas skálázási egységnek, mert frekvenciafüggő. A  $\Delta f/f$  hányadost relatív különbségi küszöbnek nevezik, frekvenciafüggését a 4.7 ábra mutatja különböző (5,10,20,40,60 dB) intenzitású hangokra. Megint látszik, hogy a 2-3 kHz körüli tartományban legérzékenyebb a hallásunk, itt vagyunk képesek megkülönböztetni a legkisebb frekvenciakülönbségű hangokat. Mélyebb hangok felé felbontóképeségünk rohamosan romlik, amint ezt saját tapasztalataiból mindenki ismerheti.



4.7 ábra Relatív különbségi küszöb frekvenciafüggése

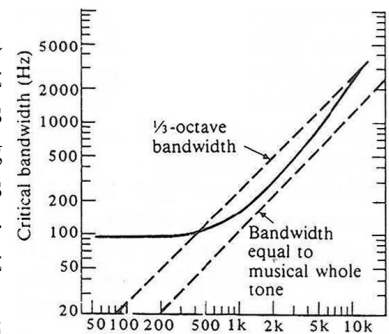
A 4.7 ábrából láthatóan hangmagasság-ítéletünk nemcsak a frekvenciától hanem a hangerőstől is függ. Ezt egy másik ábrán is szemléltethetjük. A 4.8 ábra azt mutatja, hogyan torzul el a hang magassága, ha növeljük a hangerőt. A görbék mellett most frekvencia-értékek szerepelnek. Jól látható itt is, hogy fülünket kb 1000 Hz környékén lehet legkevésbé becsapni. Saját tapasztalataiból mindenki felidézheti, hogy egy mély hangot erősödésekor mélyülni érzünk, egy nagyon magasat pedig magasodni.



4.8 ábra Hangmagasság-hangerősség kapcsolat

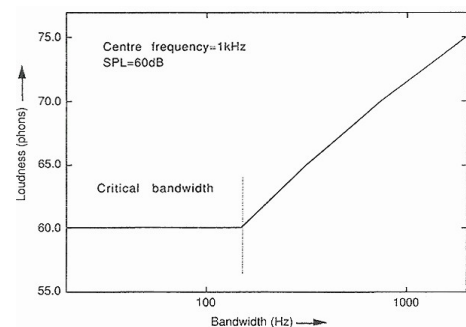
**Kritikus hallási sávok** - hangmagasság-hangerősség élményeink szoros kapcsolatának fontos eleme az a hallási sajátosságunk, hogy egymáshoz közeli frekvenciákon másképp ítéljük meg a hangzásélményt, mint távoliakon. Ez az elfedési jelenség következménye.

Ha visszagondolunk a Békésy-féle hullámalakra, akkor érthető az a korlát, hogy ha két hang szől kis frekvencia-különbséggel, akkor az alapmembrán nem fog közel kétszeresére kitérni, hanem a két hatás összeolvad. Ha növeljük a frekvenciakülönbséget, akkor a két hang által gerjesztett alapmembrán-szakasz is távolodik és önállóan is hozzájárulnak az együttes hatáshoz. A kritikus sávok frekvenciaszélessége szintén frekvenciafüggő, ezt a 4.9 ábra mutatja. A sáv az egyvonalas oktávig kb 90 Hz széles, ezután rohamosan szélesedik. Az ábra összehasonlításul az egészhang és a nagyterc közötti frekvenciasávot mutatja.



4.9 ábra kritikus sávok

Egy érdekes sematikus példa látható a 4.10 ábrán arra, hogyan kell elképzelni a kritikus sáv szélesség szerepét. Szóljon egy növekvő frekvenciatávolságú (sáv szélességű), 60 dB erősségű hangegyüttes, ezt közel 100 Hz-ig nem fogjuk erősebbnek hallani, mint egyetlen 60 dB-es hangot. Ha azonban túllépjük a kritikus sávot, akkor a hangosság elkezd növekedni. Konkrét példa a 'd' hang esete, ami mellett egészen 'c'-disz' hangok (523-622Hz) együttes hangzásáig a hangerősség nem nő, egyre több szomszédos hanggal viszont nő.



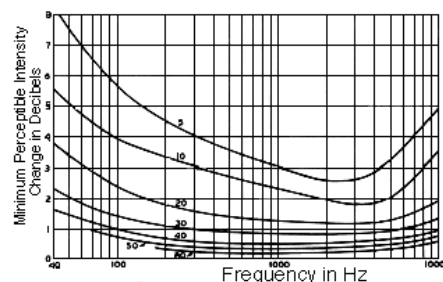
4.10 ábra hangerősség-sáv szélesség

**Bark** - Az egész hallható tartományt be lehet osztani kritikus hallási sávokra. Mivel egy sáv jó közelítéssel 100mel szélességű, ezért Barkhausen tiszteletére a kritikus sávok mérőszáma:

$$1 \text{ Bark} = 100 \text{ mel} \quad (4.2)$$

Mivel a hallható frekvenciatartomány kb 2400 mel, ezért az egész tartomány 24 Bark -ra osztható.

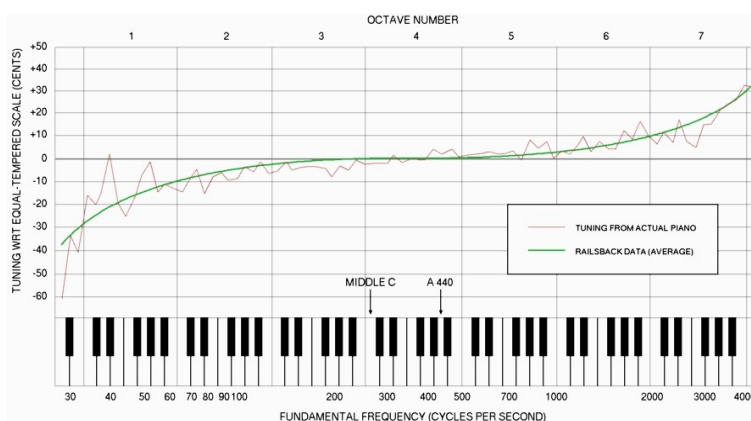
A 4.11 ábra egy további érzékenység frekvenciafüggését mutatja. Különböző erősségű hangok legkisebb érzékelhető erősségváltozása (a fentebb említett jnd-értéke) látható.



4.11 ábra

Végül egy érdekes jelenséget érdemes megmlíteni, mely zongorák hangolásánál jelentkezik, az oktávterpeszkedést.

A 4.12 ábra azt mutatja, hogy a zongora hangolásánál nem lehet a teljes tartományban pontos frekvenciakétszerezésekkel dolgozni, vagyis olyan hangológépet használni, ami az egyvonalas oktáv hangjait kétszerezi ill. felezi az egész hangszeren. Az ábra a pontos értékektől való eltérést mutatja centekben. Felül kissé felfelé, alul kissé lefelé kell hangolni, ezt érezzük megfelelőnek.



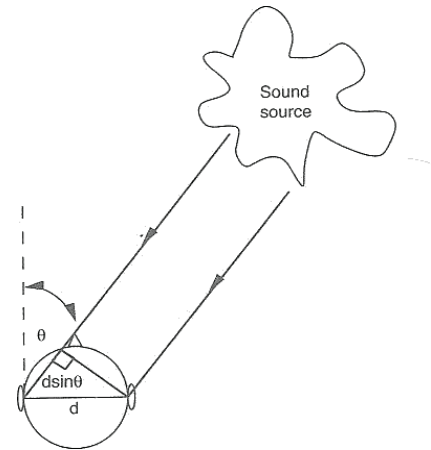
4.12. ábra A zongorahúrok hangolása

## 5. Irány, idő, hangszín, harmónia

Írány- és időérzékelésünk szoros összefüggése a hang terjedési sebességén alapul, ezt az 5.1 ábra segít megérteni. Az ábrán a hangforrásból a jobb fülbe érkezik meg hamarabb a hanghullám, a bal fülbe csak

$$\Delta t = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (5.1)$$

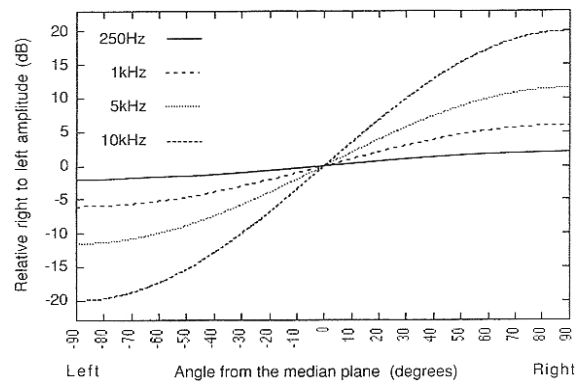
idővel később, ahol  $d$  a két fül távolsága (kb 18 cm),  $\theta$  a hangforrás és a tekintet iránya közti különbség (legyen itt  $40^\circ$ ) és  $c$  a hangsebesség (331 m/s), vagyis ebben az esetben  $\Delta t = 0.00035$  sec, vagyis 350 mikroszekundum. Ezt az időkülönbséget, sőt ennél kisebbet is, képesek vagyunk érzékelni, ez ad módot az irányérzékelésre. Az időkülönbség természetesen nem tudatosul, de az agy földolgozza az információt.



5.1 ábra az irányérzékelés sémája

Mivel a hanghullám a jobb fülbe hamarabb jut el, ezért a kiváltott jel hamarabb indul el az agy hallóközpontja felé, de ehhez még hozzájárul az is, hogy a közelebbi jel egy kissé erősebb is és az erősebb hanghatás révén keltett fiziológiai jel gyorsabban is terjed az idegpályákon. Hozzá kell tenni, hogy az ábra szerinti jobb fülben nem a kb 12 cm-nyi útkülönbség miatt erősebb a jel, hanem a fej árnyékoló hatása miatt. Mint az akusztika minden pszichofizikai jelensége, ez is frekvenciafüggő, a függés módja a 5.2 ábrán látható.

A különböző görbék különböző frekvenciájú hangok gyengülését mutatja az árnyékolt fülben a nem árnyékoltéhoz képest. A legkevésbé a legkisebb frekvenciájú (a rajzon 250 Hz), tehát a legnagyobb hullámhosszú hang különbözik, a legnagyobb frekvenciájú (10 kHz) különbsége azonban  $90^\circ$ -os esetben, (tehát amikor jobb fülünk pontosan a forrás felé néz hall), akkor 40dB. Ez a hullámok akadályon való elhajlásának hullámossz-függése miatt van, a nagyobb hullámhosszak jobban meg tudják kerülni az akadályt, mint a rövidebbek, amint azt több példán is látni fogjuk.



5.2 ábra Irány-erősség-frekvencia függés

Az irányérzékelés eszköze a fülkagyló is, bekötött szemű, hátrafelé irányított mű-fülkagylóval ellátott személy elől-hátul érzékelése megfordul. A fülkagyló a hátulról jövő magas frekvenciákat szintén jobban árnyékolja, mint a mélyeket, ezért a hátulról jövő jel hangszíne más. Amikor fejünket elfordítva a hang irányába fordulunk, akkor tulajdonképpen az említett jelkülönbséget minimalizáljuk. Amikor pedig a nyulak a "fülük botját mozgatják", az náluk a két fülkagyló függetlenségét, irányérzékelő képességük nagyobb hatékonyságát jelenti.

Írányérzékelésünk igen fontos eleme a hangversenytermi élménynek. Közelről pl. nagy szögkülönbség lehet a vonóskar magas és mély részei között, ami a hangszíninformációval kiegészülve komplex élményt nyújt. A terem végéből nézve a szögkülönbség annyira lecsökken, hogy a térélményt csak a terem akusztikai sajátosságai, utózenge nyújtja.

A kétfülű (binaurális) hallás említett sajátosságai módot adnak a sztereo technika különböző trükkjeire, pl sztereo hatás keltésére az egyik csatorna jelének mesterséges késleltetése révén, de az elektroakusztikai módszerek nem tárgyai a jelen kurzusnak.

**Precendencia-effektus**, vagy Haas-effektus - ha egy hang (pl. visszaverődés révén) kétszer egymás után jut a fülbe, akkor egyetlen hangként fogja érzékelni ha 30 ms-on belül érkezik, ha ezen túl, akkor visszhangként. A 30 millisekundum, vagy három század másodperc a fenti (5.1) példa időkésésének majdnem százszorosa. Ezen belül a második jel akár 10 dB-lel is nagyobb lehet az

elsőnél, akkor is egyként észleljük azon túl azonban visszhangként. Ez fontos jelenség nagy terek behangosításánál, de a nagyobb termekben átélt zenei élményt is befolyásolja.

## Hangszín, harmónia

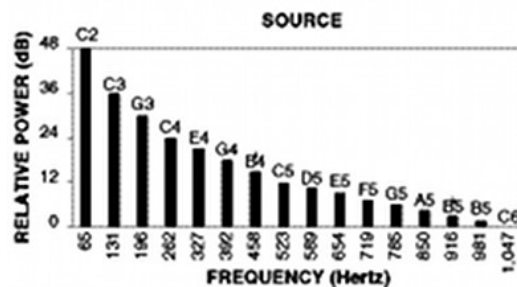
**Hangszín**-érzetünk ingeroldali (fizikai) forrása az akusztikus spektrum.

**Spektrum** alatt általánosan megfogalmazva egy fizikai jelenség vagy folyamat jellemző mennyiségének valamely paraméter szerinti eloszlását értjük. Az akusztikai spektrum valamely hangzás különböző frekvenciájú összetevőinek intenzitás-eloszlása. A zenei hangok nem egyetlen tiszta szinuszos rezgésből állnak, hanem egy sor ilyen rezgés együttesét jelentik.

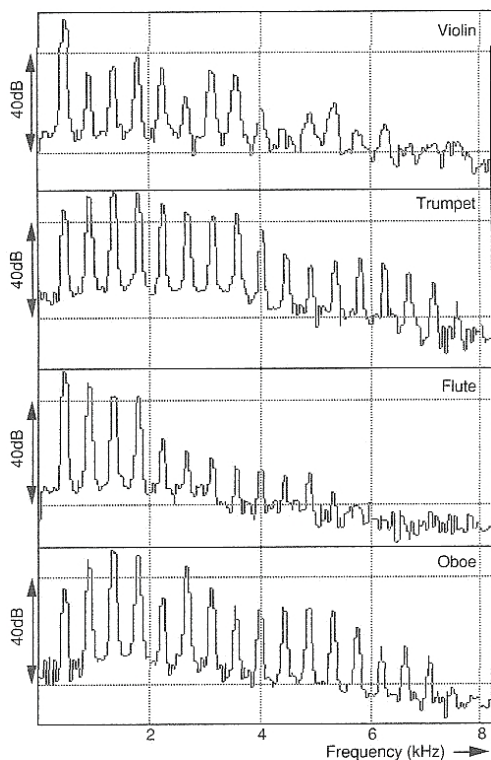
**Harmonikus felhangspektrumnak** azt nevezzük, melyben a felhangok frekvenciái az alaphang egész számú többszörösei, amint azt az 1.5 ábránál már említettük. Hallásunk ilyen spektrumhoz tud egyértelmű hangmagasságot rendelni. Ez olyan fontos képessége hallásunknak, hogy akkor is érzékelünk alaphangot, ha a spektrumban egy adott  $f_1$  frekvencia néhány egész számú többszöröse jelen van, de maga az  $f_1$  nincs jelen, ez a **hiányzó alaphang** jelensége. Elsősorban ütős hangszereknél fontos, ahol igen kevés a harmonikus spektrumú hangforrás, de sok esetben mégis van hangmagasság-élményünk, ha vannak a részhangok között az említett tulajdonságúak.

Példák spektrumokra.

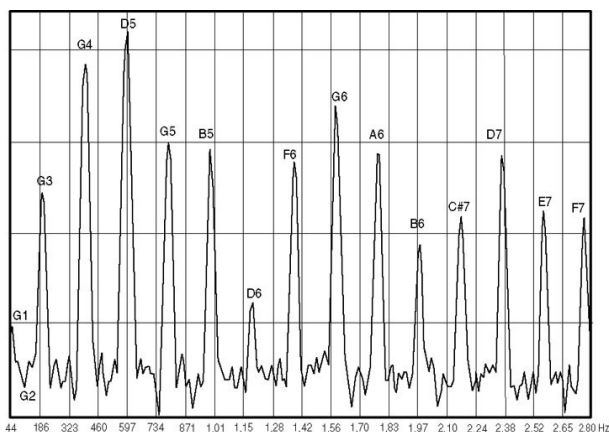
A sematikus 5.3 ábra a zongora nagy C hangja mellett megjelenő felhangok sorozatát mutatja frekvencia- és relatív intenzitás értékekkel, ez utóbbiak dB-ben skálázva. Látható, hogy a diagram vonalainak magassága egy aszimptotikus görbe szerint közelít a nulla értékhez, ezt burkológörbének hívjuk. A burkológörbék minden spektrum fontos jellemzői.



5.3 ábra Zongora C-hang spektrum



5.4 ábra négy hangszer a' hang (440Hz) spektruma



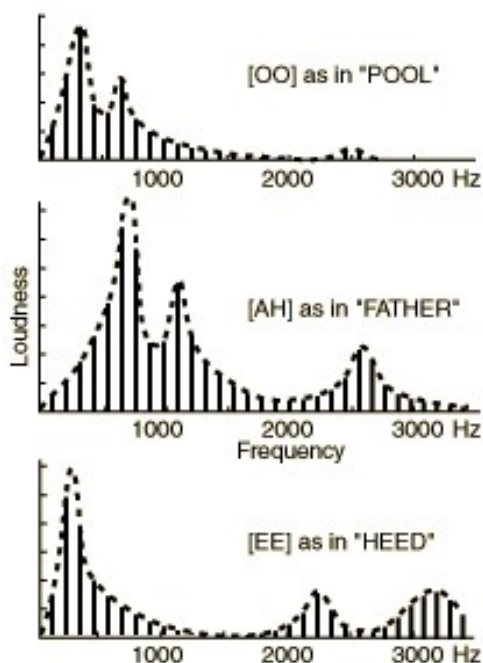
5.5 ábra hegedű g hang spektruma

Itt az első négy felhang mind erősebb, mint az alaphang, mégis utóbbit halljuk legerősebbnek a fentebb említett okok miatt. E spektrumsajátság okait a vonósoknál vizsgáljuk.

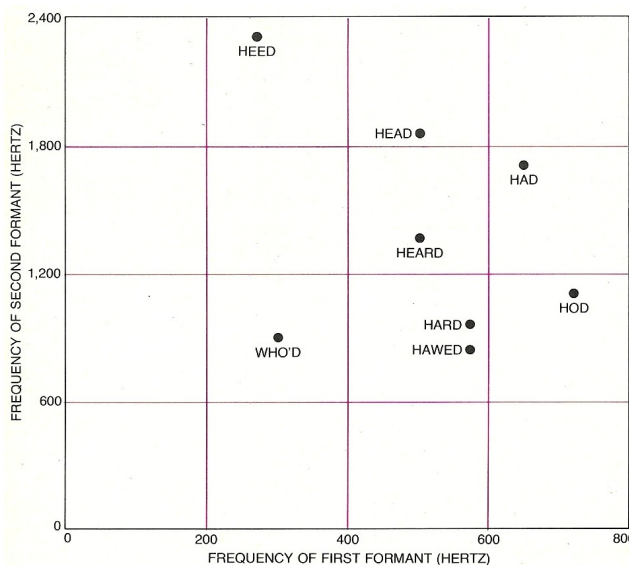
Az 5.4 ábra négy hangszeren megszólaltatott a' (440Hz) hang műszerrel rögzített spektrumát

mutatja. Érdekes közvetlenül összehasonlítani a sajátosságokat. A hasonlóság az, hogy mindegyikben azonos távolságban vannak a felhangok, tehát az alapfrekvencia egész számú többszöröseinél. A különbségek egyrészt az egyes felhangok relatív erősségéből, másrészt a különböző burkológörbékéből adódnak, ez utóbbiak nagyobb léptékű változások a frekvenciaintervallum mentén. Érdekes felfigyelni a hegedű és fuvola hasonlóságára: az alaphang mindkettőnél a legerősebb, és a magasabb felhangok fokozatosan eltűnnek. A trombita és oboa spektrumában azonban nem az alaphang a legerősebb, viszont a felhangok a 6-8kHz tartományban is elég erősek, ezért ezeket gazdag felhang-tartalmú, fényes hangzású hangszereknek halljuk.

**Formánsok** - a hangspektrum burkológörbéjének lokális maximumhelyei. Legismertebb és legfontosabb példák az emberi hang magánhangzó-formánsai.



5.5 ábra magánhangzó-formánsok.



5.6 ábra angol magánhangzók összetartozó első és második formánsainak frekvenciái.

Az 5.5 ábrán három egyszótagú angol szó szerepel azon spektrumok sematikus rajzaival együtt, melyek az adott magánhangzókra jellemzők. Mindegyik spektrumon három maximumhely figyelhető meg, ezek közül az első kettő vesz részt a magánhangzók képzésében. Látható, hogy a két maximumhely mindhárom esetben különböző frekvencián van. Az 5.6 ábra közös diagramon mutatja az angol magánhangzók összetartozó első (vízszintes tengely) és második (függőleges tengely) frekvenciáit.

A formánsok nem "szólnak", csak a megszólaló hang burkológörbéjét jellemzik. A ténylegesen megszólaló hang felhangsorát az ábrákon a függőleges vonalak jelzik. Ha egy énekes az adott hangot éneкли és közben változtatja a magánhangzókat, akkor tulajdonképpen menet közben ide-oda tologatja az első két formáns helyét, tehát bizonyos értelemben változtatja a hangszint.

A formánsok képzése az éneklés akusztikájának tárgyalásánál fog szóba kerülni, de itt is érdemes megemlíteni, hogy a formánsképzésnek, valamint a hangok spektrális kiértékelésének együttes képessége a *homo sapiens* evolúciós sikerének igen fontos eszköze volt, mivel ez tette lehetővé a tagolt beszédet és hatékony kommunikációt. Részben zenei képességünket is ennek köszönhetjük.

**Tranziensek** - átmeneti jelenségek. Tapasztalati tény, hogy a hallgatók összetéveszthetik különböző hangszereket, pl. hegedű vagy fuvola hangját, ha elektronikusan játsszuk le őket úgy, hogy levágjuk a kezdő pillanatokat. Ez azt mutatja, hogy a hangok indítása fontos szereplője hangszín-élményünknek. Az indítási (elektronikában bekapcsolási) eseményeket nevezzük tranzienseknek. Ilyenkor igen

rövid idő alatt igen sok kaotikus esemény zajlik, amíg a stacionárius állapot be nem áll. Ezek többnyire zaj-szerű élményt nyújtanak és igen jellemzők az egyes hangszerekre. Mindenki gondoljon a saját hangszere mellett az ismertebb zenekari szereplőkre. A rezések (főleg a mélyek) reccsenésszerű indítása igen jellegzetes, a csőrezonancia és a szájrezgés kialakuló kölcsönhatásának megnyilvánulása. A vonósok vonásnemétől jelentősen függ a megszólaló hang indítása, a pizzicato például időben kb annyi tranzienszt tartalmaz, mint érzékelhető magasságú hangot.

További jelenségek, melyek hozzájárulnak hangszínelményünkhöz:

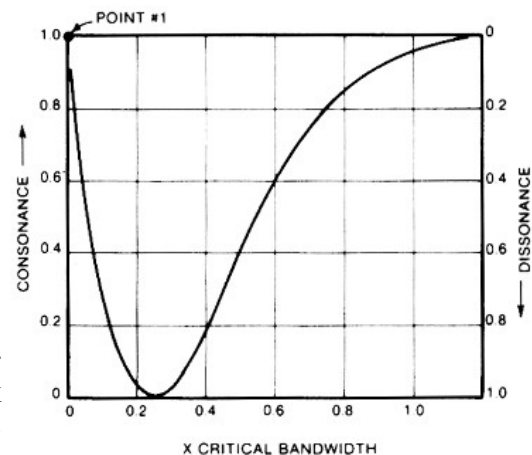
**Vibrató** - frekvenciamoduláció, egy adott hang magasságának kicsiny frekvenciatartományában való ingadozása. Elsősorban a vonósok és énekesek eszköze. A vibrató frekvenciája és amplitúdója fontos, az előadó jó ízlésére bízott eszközök. Igen kifejezővé tehetik a melodikus történéseket, de a harmóniai élményt ronthatják, akár tönkre is tehetik.

**Tremoló** - egyik jelentése amplitúdómoduláció, egy adott hang erősségének periodikus változtatása, a másik a hang gyors ismétlése. Mindkettő hangszínmódosító hatású. Utóbbi esetben a hang megtelik egy tranziens-sorozattal.

**Konszonancia - diszonzancia** - kellemes és kellemetlen harmóniai élmény. A nyugati zene fejlődésének fontos jellemzője a hangközök és harmóniak térnyerése a melodikus történések mellett - eltérően a keleti zenéktől. A hangközök megítélése nem egyforma, sőt a hangzások megítélése is jelentős változáson ment keresztül. Harmóniak konszonanciáját ezért leginkább a klasszikus zene keretében lehet akusztikai eszközökkel vizsgálni

Az 5.7 ábra kísérleti személyek visszajelzései alapján mutatja a konszonancia mértékét két hang között, melyek frekvenciatávolságát változtatták. Látható, hogy a magas (konszonáns) értékeket az unisono-hoz, illetve a kritikus sáv szélességből kijutva jelezték vissza. Ez kb a nagyterc távolságában következik be. A kritikus sáv szélességen belül diszonzánsnak érezzük az együtthangzást, a 0 érték kb a kissetekundhoz esik.

Harmóniak konszonanciája bonyolultabb, a harmonikus felhangsor révén értelmezhető. Ha olyan hangok szólnak együtt az alaphanggal, melyek részei a felhangsornak, akkor nem érzünk ütközést. Ha azonban a felhangsor nem túl magas tagjaival a kritikus sávon belül kerülünk, akkor szintén az 5.7 ábra szerinti ütközés történhet.



5.7 ábra konszonancia-görbe

Együtthangzási jelenségek

**Lebegés** - az 1.3 ábránál említett jelenség, két közeli,  $f_1$  és  $f_2$  frekvenciájú rezgés együttes hatása egy váltakozó magasságú hang lesz, a magasság ingadozásának frekvenciája ( $f_2$  a nagyobb):

$$f_{\text{lebegés}} = f_2 - f_1 \quad (5.2)$$

Zongoristák jól ismerhetik a jelenséget. Egy hanghoz tartozó két húr kis különbsége esetén zavaró ingadozás (tkp vibrató) érzékelhető. Zongorahangolásakor addig feszítik az egyik húrt, amíg a (5.2) frekvencia eltűnik. Vadnyugati filmek lehangolódtott kocsmazongoráinak jellegzetes hangszínt ad.

**Kombinációs hangok** - hallószervünk bonyolult jelfeldolgozási adottságai - a fül ún. nemlineáris viselkedése - egy sor virtuális hangélményt eredményezhetnek. A fent említett hiányzó alaphang jelensége is ennek következménye. Van azonban több is.

Ha az (5.2)-ben a két frekvencia különbsége nő, akkor a lebegési frekvencia is nő. A magasság ingadozása helyett előbb durva berregés jelentkezik, majd a két frekvenciát elkezdjük különböző hangként érzékelni és mellettük egy növekvő magasságú különbségi hang jelentkezik.

A kombinációs hangok jelenségének köre azonban ennél bővebb. E hangokat először Giuseppe

Tartini tanulmányozta, ezért időnként Tartini-hangoknak is nevezik őket. Ezek között nemcsak a (5.2) különbségi frekvencia szerepel, hanem  $(2f_1 - f_2)$ ,  $(3f_1 - 2f_2)$  ... stb. is. Két különböző frekvenciájú hang megszólaltatásakor esetenként a két frekvencia összege is hallható, habár ez ritka élmény. Végül megfelelő akusztikai körülmények között egy  $f$  frekvenciájú erős hang  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ , ... stb felharmonikusai is megjelenhetnek a hallásunkban akkor is, ha fizikailag nincsenek jelen. Ez utóbbi virtuális hangokat nevezik aurális harmonikusoknak. A felsorolt jelenségek - a belső fül nemlineáris viselkedésének következményei - hozzájárulnak hangszínelményünkhöz.

## 6. Hangrendszerek

Az európai zene különböző hangrendszereinek közös alapelvei a következők:

1. Az oktáv-hangköz (2/1 frekvencia-arány) kitüntetett fontosságú, ezt kell kisebb lépésekre beosztani.
  2. A hangsorlépések sem túl nagyok, sem túl kicsik nem lehetnek és nem lehetnek egyformák.
  3. A hangsor tagjainak a harmonikus felhangsor (ld az 1.9 ábránál) tagjaihoz közel kell esniük.
- Emlékeztető: a nagy C **harmonikus felhangspektruma** a felhangok sorszámaival:

C	c	g	c'	e'	g'	#a'	c''	d''	e''	#f''	g''	#g''
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

A továbbiakhoz a következőket kell szem előtt tartani:

- **Egy hangköz egy konkrét frekvencia-arányt jelent.** A fenti táblázatban a felhangok frekvenciái az alaphangénak egész számú többszörösei, tehát két felhang által alkotott hangköz a két felhang sorszámának hányadosával jellemezhető. A táblázatból láthatóan pl. a kvint aránya 3/2.
- **Két egymás utáni hangközlépéssel olyan hanghoz jutunk, melyet a két frekvencia-arány szorzata ad meg,** pl. két kvint lépés révén a kezdőhang frekvenciájának  $(3/2) \times (3/2) = 9/4$  - szeres értékéhez jutunk, ld a fenti táblázatban a c' és d'', tehát a negyedik és kilencedik hangokat, melyek két kvint távolságra vannak egymástól.

Az első zenei teoretikus (sőt az első kísérleti fizikusok egyike): Pythagoras. Húr hosszúságok mérésével definiálta a hangközöket meghatározó arányszámokat. A húr hosszúságok nem a frekvenciával, hanem annak reciprokával (a hullámhosszal) arányosak, de ezzel ugyanúgy számolhatunk. Pythagoras felismerte a következő problémát: ha egy alaphangtól végighaladunk a kvintkörön, elérkezünk a kiindulási hang 7 oktávval magasabban fekvő megfelelőjéhez az alaphang frekvenciájának  $(3/2)^{12}$  - szeresénél (u.i. 12-szer alkalmaztuk a kvinthangközre jellemző 3/2 frekvenciaarányt). Ezt a hangot a kiindulási hang 7-ik oktávjaként is képezhetjük, vagyis frekvenciájának  $2^7$  -szereseként. Ha azonban ennek frekvenciáját pontosan kiszámítjuk, akkor a kvintenként elért hangtól különböző értéket kapunk, vagyis ha a két említett módon kiszámított hang frekvenciáját elosztjuk egymással, eredményül nem egyet kapunk, hanem:

$$\frac{\left(\frac{3}{2}\right)^{12}}{2^7} = \frac{3^{12}}{2^{18}} = \left(\frac{9}{8}\right)^6 = 1,0136 \quad (6.1)$$

A két (a kvintenként és oktávonként elért) hang frekvenciájának aránya 1,0136, ez a **pythagorasi komma**. A hatványkifejezések átalakítása révén kapott  $(9/8)^6/2$  kifejezés is érdekes, a 9/8 ugyanis a fenti táblázatból látható módon a nagyszekund frekvenciaaránya, tehát az említett kifejezés azt jelenti, hogy az ilyen egészhangokkal megtett hat lépés  $((9/8)^6$  -szoros frekvencia) és az oktávugrás (2-szeres frekvencia) hányadosa szintén a pythagorasi komma. Ez felveti azt a kérdést, hogy a nyilvánvalóan legalapvetőbb hangköz - az oktáv - beosztható-e tiszta hangközökre és ha nem, akkor milyen kompromisszumot kell vagy lehet kötni. A legrégebbi és legegyszerűbb európai hangsorok csak kevés - négy vagy öt - hangból állnak, ezeknél ez a dilemma nem jelentkezik, a problémát a diatonikus skála jelenti.

Az európai zenekultúra négy legfontosabb hangrendszere a következő elvek szerint alakult:

**I. Pythagoras-hangrendszer.** Az oktáv után a legfontosabb hangköz a kvint, ezért a hangsor e két hangköz felhasználásával épül fel. A nagyszekund a következő módon állítható elő: tegyünk két kvintugrást felfelé  $((3/2)^2$  - szeres frekvencia) és egy oktávugrást lefelé (1/2 frekvencia):

$$\left(\frac{3}{2}\right)^2 \times \frac{1}{2} = \frac{9}{8} \quad (6.2)$$

vagyis megkapjuk a pontos 9/8 arányt. A kisszekund esete már érdekesebb, ehhez öt kvintugrást teszünk lefelé (itt tehát nem a 3/2 arányt használjuk hanem 2/3-ot), majd három oktávugrást felfelé:



$$\left(\frac{2}{3}\right)^5 \times 2^3 = \frac{256}{243} = 1,0535 \quad (6.3)$$

Ha ez az arány kicsit nagyobb: (260/240) lenne akkor ez megfelelné a táblázat 13 és 12 felhangja közötti hangköznek, ezt talán tisztábbnak éreznénk, de a fenti értékkel kapunk pontosan 3/2-es kvintet két 9/8 -os és egy 256/243 -as lépés után. A hangrendszerben a kvart is tisztának adódik: egy kvint lefelé, egy oktáv felfelé:  $(2/3) \times 2 = (4/3)$ , továbbá ha teszünk öt nagyszekund és két kisszekund lépést, akkor megkapjuk a tiszta oktávot (számoljunk utána!).

Annyi probléma maradt, hogy a nagytercet nem érezzük tisztának, holott ez a legfontosabb harmóniaérzetet keltő hangköz, mivel az oktáv, kvint és kvart magában üresen hangzik. Lépünk két nagyszekundot felfelé:  $(9/8)^2 = (81/64)$ , ez a Pythagoras-rendszerbeli nagyterc, holott, mi a fenti táblázatban látható negyedik és ötödik felhang együtthangzását szeretjük nagytercként, vagyis az  $(5/4) = (80/64)$  frekvenciaarányt. Ez a pythagorasi nagyterctől  $(81/80)$  aránnyal tér el, ez már fülrel érzékelhető különbség, ez az ún **didymosi komma**.

**II. Aristoxenos-hangrendszer.** A didymosi komma kiküszöbölésére Aristoxenos azt javasolta, hogy a nagyterc legyen tiszta, ehhez a pythagorasi második nagyszekundot kisebbre vette,  $(9/8)$  helyett  $(10/9)$  értékűre, a  $(256/243)$  frekvenciaarányú pythagorasi kisszekundot pedig kibővítette  $(16/15)$  arányúra. Ha így lépkedünk felfelé, akkor:

$$\frac{9}{8} \times \frac{10}{9} \times \frac{16}{15} = \frac{4}{3} \quad (6.4)$$

eljutunk a tiszta kvartig, majd ugyanezt a tetrakordot felépítjük a tiszta kvinttől (mely a kvarttól  $(9/8)$ -nyi távolságra van) és eljutunk a tiszta oktávig. A különbség csak annyi, hogy a kvintről induló tetrakordban a  $(9/8)$  és  $(10/9)$  lépéseket felcseréljük, mert ebben az esetben kapunk olyan rendszert, ahol az 1, 4 és 5 fokra épülő hármashangzatok tiszták. A hangsor tehát a következő:

$$\frac{9}{8} \times \frac{10}{9} \times \frac{16}{15} \times \frac{9}{8} \times \frac{10}{9} \times \frac{9}{8} \times \frac{16}{15} \quad (6.5)$$

a skála fokai:      1   2   3   4   5   6   7   8

**III. Középhangú temperálás.** Az aristoxenosi rendszer két különböző nagyszekundja zavaró, ha modulálni szeretnénk, a kvintről induló tetrakord nagyszekund-sorrendje hallhatóan különbözik az első fokról indulóénak, ugyanez a helyzet, ha két kvinttel kerülünk távolabb (C-dűrből D-dűrbe). A reneszánszban született megoldás az, hogy a nagyterc  $5/4$  frekvenciaarányát két teljesen egyforma részre bontjuk, ez pedig az  $5/4$  négyzetgyöke, jelölésben  $(5/4)^{1/2}$  (ugyanis ezt önmagával megszorozva kapunk  $5/4$ -et). A kisszekundot pedig az szabja meg, hogy 5 ilyen nagyszekund lépésnek (a nagyszekund ötödik hatványának) és két megfelelő nagyságú kisszekund lépésnek (vagyis a keresett kisszekund-frekvenciaarány négyzetének) szorzatának pontosan kettőt kell adnia, vagyis az oktáv frekvenciaarányát. A nagy-és kisszekundot nsz és ksz-szel jelölve képletben:  $nsz^5 \times ksz^2 = 2$ , vagyis a kisszekund frekvenciaarányát úgy kapjuk meg, hogy az oktávot elosztjuk öt nagyszekunddal, így megkapjuk két kisszekund frekvenciaarányát, amiből négyzetgyököt vonunk:

$$\left(\frac{2}{(5/4)^{5/2}}\right)^{1/2} = \frac{8}{5} \left(\frac{1}{5}\right)^{1/4} = 1,06998 \quad (6.6)$$

Emlékeztető: az  $1/4$  hatványkitevő a negyedik gyököt jelöli, az  $5/2$  pedig a négyzetgyök ötödik hatványát.

Most már egyforma nagy- és kisszekundjaink vannak és tiszta nagytercünk, de ez újabb gonddal jár, a kvintek nem lesznek tiszták, tehát  $3/2$  értékűek. Lépünk a fenti nagyszekunddal hármat és a fenti kisszekunddal egyet, a kapott kvint:

$$\left(\frac{5}{4}\right)^3 \times \frac{8}{5} \left(\frac{1}{5}\right)^{1/4} = 5^{1/4} = 1,4953 \quad (6.7)$$

egy kicsivel kisebb, mint az 1,5 értékű tiszta kvint, viszont triviálisan pontos nagytercet ad, hiszen négy ilyen kvintugrás (az érték negyedik hatványa, mellyel pl a c'-ről e"-re jutunk) pontosan ötszörös frekvenciát ad és erről két oktávval visszaugorva (ezt 4-gyel osztva) megkapjuk a pontos

5/4 értéket. A pontos kvintnek és e szűkebb kvintnek a hányadosa:

$$\frac{\frac{3}{2}}{5^{1/4}} = \left(\frac{81}{80}\right)^{1/4} \quad (6.8)$$

vagyis a fentebb megismert didymosi komma negyedik gyöke, más szóval e hangköz egynegyede. Ezért ezt negyedkommás középhangú temperálásnak is nevezik.

Ezzel általában ki lehet egyezni, de nézzük, mi a helyzet a pythagorasi kvintkörrel. Tegyük ezzel a szűkebb kvinttel 11 ugrást és nézzük meg, hogy mennyire van a hetedik oktávtól:

$$\frac{2^7}{5^{11/4}} = 1,5312 \quad (6.9)$$

A 12-ik kvint már tűrhetetlenül nagyobb, mint a tiszta kvint, az 1,5-től való eltérés mértéke több mint hat és félszerese a (6.7) tiszta értéktől való eltérésének. Ez a "farkaskvint". A középhangú temperálással hangolt klaviatúrán tehát bizonyára lesz egy olyan hármashangzat, mely rettenetesen szól, de ha ez messze esik a C-dűrtől (pl az Asz-dúr) akkor el lehet kerülni.

**IV. Egyenletes temperálás** Ennyi próbálkozás után szinte kínálkozott az a megoldás, hogy az eddigiektől eltérően az oktáv mellett ne a kvint, nagyterc vagy a nagyszekund legyen a kulcsszereplő, hanem a kisszekund. Osszuk be az oktávot 12 egyenlő részre - kisszekundra - és nézzük meg, hogyan alakulnak a számunkra fontos hangközök. A kisszekund frekvenciaaránya:

$$2^{1/12} = 1,059463 \quad (6.10)$$

vagyis a 2 tizenkettedik gyöke. Ez két félhangnyira lévő hang frekvenciájának aránya. Itt érdemes definiálni a következő hangközfogalmat is:

**Cent** - a félhang századrésze, frekvenciaarányal kifejezve:

$$2^{1/1200} = 1,0005777895 \quad (6.11)$$

vagyis a kettő ezerkétszázadik gyöke. A cent a hangközmérés szabványos egysége, használata olyan, mint a hangközöké, tehát hangközlépéseknél a cent-értékek összeadódnak, a frekvenciaarányokat viszont szorozni kell, az oktáv ezerkétszáz cent-lépést jelent.

*A frekvenciaarány átszámítása cent-értékre a következőképpen történik. Ha van egy  $f_1$  frekvenciájú hang és keressük a tőle  $n$  centnyi távolságra lévő  $f_2$  frekvenciáját, azt így írhatjuk fel:*

$$f_2 = f_1 \times 2^{n/1200} \quad (6.12)$$

*ennek átalakításaként, ha ismerünk két,  $f_1$  és  $f_2$  frekvenciájú hangot, ezek távolsága centben:*

$$n = 1200 \times \log_2 \left( \frac{f_2}{f_1} \right) = 1200 \times \frac{\log_{10} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)}{\log_{10} 2} = 3986 \times \log_{10} \frac{f_2}{f_1} \quad (6.13)$$

A tizenkétfokú skála rendkívül fontos előnyöket kínál egy néhány csekély kompromisszumért cserébe. A legfontosabb, hogy ebben gyakorlatilag nincs korlátozás a modulációkra, minden hangnem egyforma tisztaságú. A másik előny, hogy a darabok transzponálhatók.

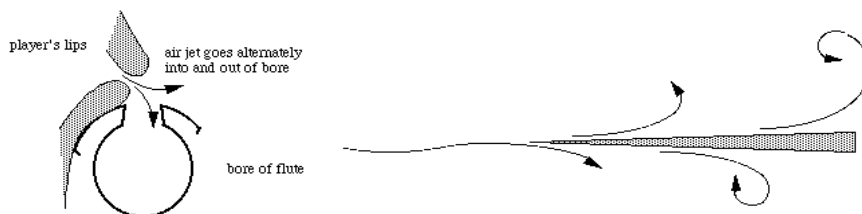
Használhatóságának első demonstrációja a zongorairodalom egyik alapműve, Bach Wohltemperiertes Klavier c. kétkötetes műve, melyekben mind a 12 dúr és moll hangnemben szerepel egy prelúdium és fuga.

## 7. Fafúvós hangszerek

### Fuvola

A fuvola a fafúvósok közé tartozik, az ütőhangszerek mellett valószínűleg a legősibb hangszerek egyike. A hangkeltés eszköze a rezgő légoszlop, melyet az első előadáson tárgyaltunk. A kialakuló állóhullámok sebesség- és nyomásingadozás szerinti struktúráját az 1.11 ábra mutatja.

A légoszlop rezgésbe hozásához szükséges zavart itt a befúvónyílás élére fúj levegőáram idézi elő, az él után a két irányban váltakozva örvények keletkeznek.

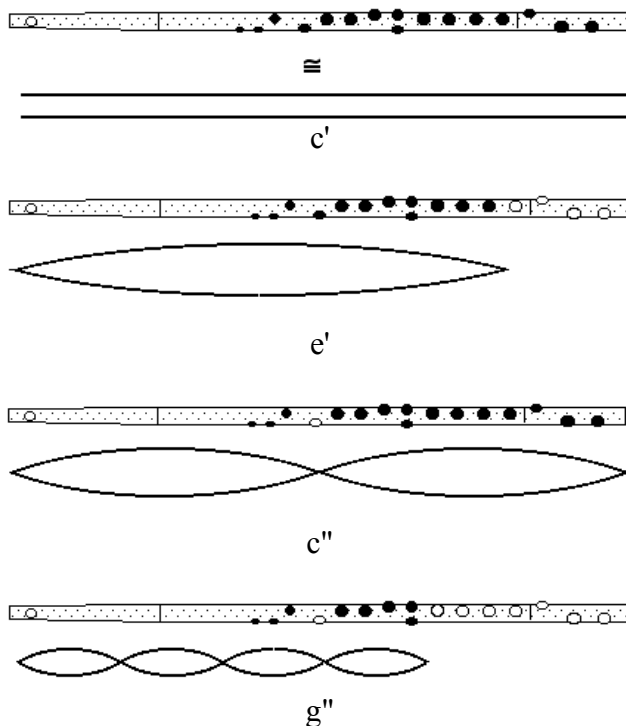


7.1. ábra Befúvás és Kármán-örvények

A 7.1. ábrán látható módon fellépő ún Kármán-féle örvények közül az, amely a csőbe jut (minden második), ott olyan zavart kelt, amely végigfut a csövön, majd annak végéről ellenkező fázissal visszaverődik. A játékosnak nagy gyakorlatra van szüksége az optimális befúváshoz, hiszen az örvényképződés könnyen lehet zaj forrása (szeles a hang), ezért a fúvás irányítottságának és erejének kényes összhangjára van szükség.

A mai harántfuvola hossza 65 cm, alaphangja az egyvonalas c hang, angol szövegekben C4, frekvenciája 261,6Hz. Legfelső hangja a négyvonalas d (D7).

A magasabb módusok nagyobb segességű befúvással (átfúvással) állnak elő. Ha skálát akarunk játszani, akkor sorban felnyitunk lezárt billentyűket, ami rövidíti a cső hosszát. Az első oktáv végére érve újból lefogjuk a billentyűket és átfúvással indul a második oktáv. Ekkor azonban kinyitjuk a cső közepén látható oktávbillentyűt, ami azt jelenti, hogy ezen a helyen nem lehetséges nyomásingadozás-maximum, hiszen itt a nyomástöbblet el tud szökni, itt csak minimum lehet, amint azt az ábrán a c'' hang fogása mutatja. A magasabb kromatikus hangok mindegyikét a billentyűk nyitásával olyan kombinációival kell megszólaltatni, melyeknél az adott hanghoz tartozó nyomásingadozás-eloszlásnak minimum-helyei vannak. Ezekhez a kombinációkhoz természetesen a befúvás módjának is igazodnia kell, hogy a kívánt módus szólaljon meg.



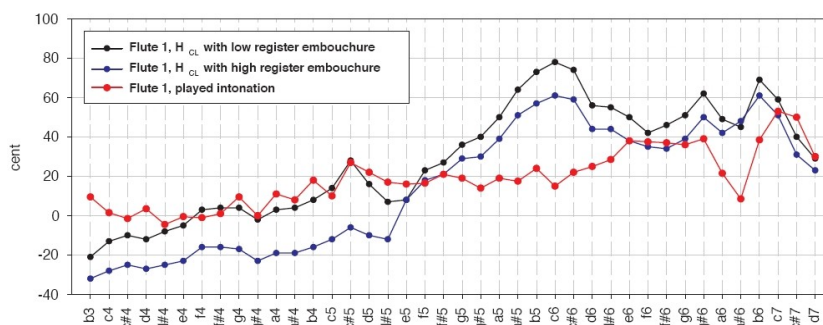
7.2 ábra Kereszt-ujjrend (cross-fingering)

**Dugó** - a fúvókától balra (a csővel ellentétes irányban) van. A cső végein a nyomásingadozás-minimum nem pontosan a geometriai végnél van, hanem kissé kintebb, a különbség a végkorrekció, ami hullámhossz-függő. A dugó távolságának helyes beállításával a hullámhossz-függést lehet minimalizálni, tehát a fuvola intonációját tisztábbá tenni.

A fuvola hangszínét a szegény felhangtartalom határozza meg. Utalunk az 5.4 ábrára, ahol jól

kivehető az a sajátosság, hogy a 440 Hz-es hang megszólaltatásakor a trombita és az oboa magas rendszámú felhangjai is erőteljesen jelen vannak, míg a fuvola (és hegedű) felhangjai a rendszámmal rohamosan gyengülnek. Ez okozza a fuvola lágy hangszínét, ami az orgona rokon regisztereinél (principál) is fontos sajátosság.

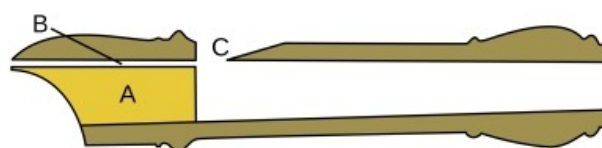
A hangszer intonációs nehézségeit illusztrálja a 7.3 ábra, melyen a hangszeren megszólaltatott hangok eltérései vannak felrajzolva a jól temperált értékektől centekben (Kausel, Kuehnelt 2008). A vörös görbe a játékos által korrigált adatokat mutatja, a két másik különböző befűvások értékeit.



7.3 ábra Fuvola intonációs görbéje

Látható, hogy a magasabb hangok felé egyre nő az eltérés a helyes értékektől, ami gondos befűvási technikával minimalizálható.

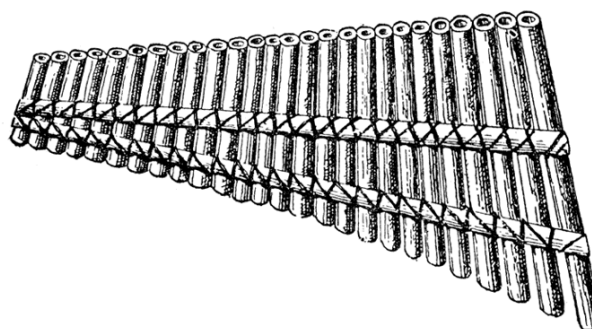
A zenekarokban ma használatos harántfuvola elődje a Blockflöte (népi változata a furulya) jóval egyszerűbb megszólaltatási sajátosságokkal rendelkezik, ami azonban a lehetőségeit is korlátozza. A 7.4 ábrán láthatók a fej részei, a befűvés a B részen keresztül történik, a levegő a



7.4 ábra Blockflöte fejrészének metszete

C ékre irányul, ahol kialakulnak a Kármán-örvények. A játékos itt nyilván nem tudja megválasztani a befűvés irányát, mint a harántfuvolánál, csak a megfűvés erősségét tudja befolyásolni. Emiatt a hangszer dinamikai tartománya is szűkebb, mint a harántfuvoláé, ahol erősebb befűvashoz igazodhat az élre irányítás szöge. A hangszer további hátránya a modern harántfuvolával szemben, hogy mivel csak lefogható nyílásai vannak, nem tud olyan kereszt-ujjrend kombinációkat megvalósítani, mint a bonyolult billentyűzettel ellátott hangszerek, ezért be kell érnie két oktávnyi hangterjedelemmel. E hátrányokat azonban bőségesen kárpótolja a különböző hangfekvésű tagokból álló blockflöte-együttesek barokk művekhez illő hangszíne. A blockflöte igazi alkalmazása azonban az orgonákban történik, ahol a legkülönbözőbb geometriájú regiszterek gyakorlatilag a 7.4 ábra szerinti eszközzel szólaltathatók meg.

A fuvola még korábbi elődje a pánsíp, ami bizonyos értelemben az orgona elődjének is tekinthető. A hangszer egy sor félig zárt sípkból álló sorozat, a sípok megszólaltatása a nyitott vég élére való (megfelelő szögű) ráfűvással történik. A különböző magasságú hangok nemcsak a megfelelő síp kiválasztásával, hanem egy síp átfűvésével is elérhetők, ekkor az adott síp duodecimája szólal meg (a félig zárt sípok jellemzője). A hangszernek ma leginkább népzenei, főleg dél-amerikai és román alkalmazásai vannak, egyetlen klasszikus zenei felbukkanása a Varázsfuvolában többnyire színpadi kellékként történik és modern fuvola helyettesíti.



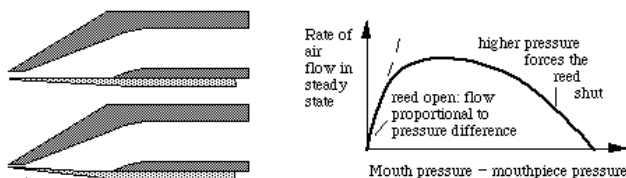
7.5 ábra Pánsíp

### Nyelvsípos fafűvősök

Az ajaksípos fuvola mellett a többi fafűvős hangszer nyelvsípos rendszerű. A rezgő légoszlopok

leírása a fuvoláéhoz hasonló, de a zavarkeltés eszközei a nádsípok.

A klarinét fúvókája egy szimpla nádat tartalmaz, ld a 7.6 ábrát. A diagram azt mutatja, hogy a szájban lévő nyomás növelésével egy darabig nő a fúvókán áthaladó légáram sebessége, de egy bizonyos értéknél a Bernoulli törvény miatt a nád elzárja a nyílást. A nád azonban rugalmas és újból kinyílik, majd újból bezárul, periodikusan.



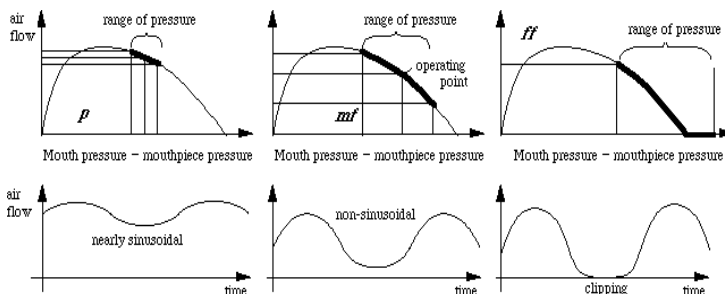
7.6 ábra klarinét fúvóka

A fenti módon a befúvás energiája akusztikai energiává alakul. A hangszer csövébe jutó impulzusok a hangkeltéshez szükséges periodikus zavarok szerepét játsszák.

(Közbevetőleg: a Bernoulli-törvény szerint az áramló levegőben a sebességtől függően csökken a légnyomás, ez azt jelenti, hogy a fúvóka részének terében az átáramló levegő hatására lecsökken a nyomás, a külső légnyomás viszont marad, ezért felnyomja a nádat, majd az a keletkező rugalmas ellenerő hatására megint kinyit és újból áramlik a levegő, stb.)

A klarinét nádja egy 1-2 mm vastag, különleges nádból faragott lemez, mely a fúvókához van erősítve, az ajkak közé kerülő része pedig elvékonyodik kb 0,1 mm-re. Ez a rész igen érzékenyen reagál az említett nyomásváltozásokra.

A 7.7 ábra különböző erősségű befúvásoknál mutatja a létrejövő rezgéseket. Kis nyomásnál a görbe kis, kb lineáris szakasza érintett, ezért halk fúvásnál kb szinuszos görbét kapunk. A nyomás növelésével a görbe egyre hosszabb szakasza érintett és a létrejövő rezgés (alsó sor) egyre kevésbé szinuszos, vagyis egyre nagyobb felhangtartalmú lesz.

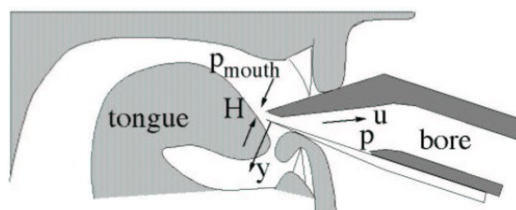


7.7 ábra Befúvás erejétől függő rezgésformák

A nád a periódus nagyobb részében zárva van, tehát a hangszernek ez a vége zártnak tekinthető. Ezért a klarinétra a 2.4 ábra jobb oldalán ábrázolt módusok érvényesek, vagyis felhangjainak frekvenciái az alaphangénak páratlan számú többszörösei, átfúváskor nem oktáv jelentkezik, mint a fuvolánál, hanem duodecima. Felidézzük továbbá a 3.1 ábrát, amely az akusztikai impedancia értékeit mutatja különböző frekvenciákon fuvolára és klarinétra. Látható, hogy az akusztikai impedancia értéke a klarinét rezonanciafrekvenciáinál maximális, más szóval adott hangáram esetén ezeknél a legnagyobb a hangnyomás. Ezért nevezzük a klarinétot nyomásvezérelt hangszernek, megkülönböztetésül a fuvolától, mely sebességvezérelt, hiszen annak a impedanciaminimumai esnek a rezonancia értékeihez.

A zavar a csövön végigfutva visszaér a nádhoz és kölcsönhatásba lép vele, a stabil hang feltétele ennek a csőrezonanciának a létrejötte, vagyis az, hogy a zavar futási ideje és a nád periódusideje szinkronban legyen.

Ennek a szinkronnak érdekes vonatkozása van. A visszatérő zavar nem csak a hangszer csövével van kapcsolatban, hanem azon túl a játékos vokális traktusával, vagyis szájüregével is. Ezt az üreget azonban rutinos játékos olyan módon tudja formálni, hogy a hangszer légoszlopával csatolás révén kölcsönhatásba lép és a csőrezonanciát eltolja.

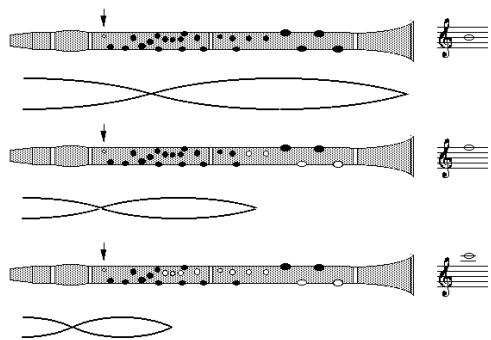


7.8 ábra Szájüreg-fúvóka kapcsolat

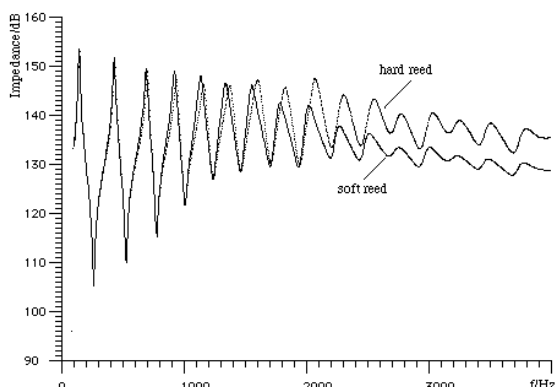
Ezt a játékosbravúrt hallhatjuk a Kék Rapszódia kezdő skálájának glisszandóvá alakulásánál.

A 7.2 ábrához hasonlóan a klarinét hangok ujjrendjeit is lehet a nyomáseloszlásokkal szemléltetni. A 7.9 ábra három hangot mutat be. A 7.10 ábra a kemény és lágy nádak közötti

különbséget szemlélteti: lágynádak a magas frekvenciákat csökkentik és gyengébben adják vissza.

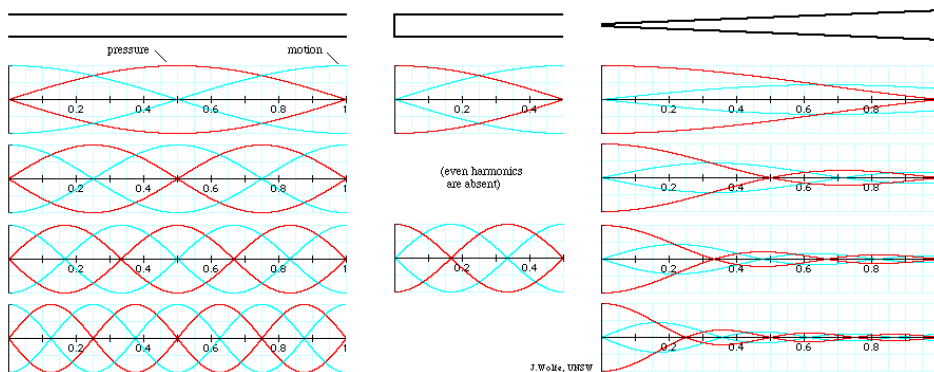


7.9 ábra



7.10 ábra

A szaxofon a klarinét rokona, Adolph Sax találmánya. Fúvókája, nádja gyakorlatilag azonos, csövének anyaga azonban fém, de a legfontosabb különbség az, hogy erősen kúpos a csöve, nyílásszöge a kúpos hangszerek között a legnagyobb, 3-4°. Kúpos csövek módusai különböznek a hengeresekétől, amint azt a 7.11 ábra érzékelteti. A szaxofon spektrumában megjelennek a páros számú felhangok is. Erőteljes, karakteres hangzású hangszercsalád.



7.11 ábra

Az ábrán a nyitott, félig zárt és kúpos csövek módusai láthatók. Ez utóbbinál a nyitott vég felé közeledve fokozatosan csökkennek a nyomásértékek és a nyomásingadozáseloszlás különbözik a félig zárt csövétől

Az oboa dupla nádas hangszer. Itt is a Bernoulli törvény és a nád rugalmassága kényszeríti a lemezeket zárni-nyitni. A hangszer csöve enyhén kúpos. A nádak igen vékonyak, az oboa hangja a fafúvósok között a legnagyobb felhangtartalmú. Különböző magasságú változatai vannak, érdekes rokona a kvinttel mélyebb angolokürt.

A fagott a legmélyebb fafúvós hangszer. Kúpos furatú, 254 cm hosszú, fából készült eszköz. A nagy méretek és bonyolult összeállítás miatt korrekciós billentyűkre van utalva. Mély hangjai gyengén szólnak. Hangzásának érdekes tulajdonsága, hogy spektrumában a két legerősebb formáns az emberi vokális traktuséhoz áll közel (ld. a 9 fejezetet), ezért bársonyos éneklő jellegét érezzük.

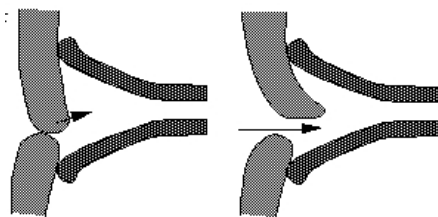
## 8. Rézfúvósok, orgona

A rézfúvósok közös sajátosságai a következők:

1. Anyaguk sárgaréz: réz és cink kb 80-20% arányú ötvözete korróziógátló bevonattal.
2. A hangkeltés eszköze a játékos ajka, mely a bemeneti nyílásnál egy tölcsér alakú fúvókára tapad.
3. A hangszerek csöve hosszú, a megszólaltatható hangok általában az elvi alaphang magas rendszámú felharmonikusai.
4. A hangszercsövek tölcsérben végződnek.

A hangszercsalád egyes tagjai más ötvözetekből vagy anyagokból is készülhetnek, de egyikük sem igazán versenyképes a sárgarézzel, ilyenek pl. a rozsdamentes acél, sőt az alumínium. Egyéb ötvöző anyagok is lehetségesek, mint pl. az ezüst és arany. A különböző anyagok hatása a hangszínre valójában csekély (ha van egyáltalán), használatukat praktikus szempontok befolyásolhatják, mint a korróziógátlás, vagy esetleg a mikroorganizmusok számára kedvezőtlen környezet.

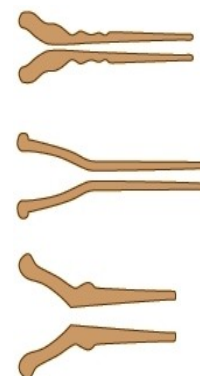
2. A hangszercsalád különlegessége, hogy a cső bemeneti nyílásánál létrehozandó zavar forrása a játékos megfeszített ajkának periodikus nyitása-zárása. Az emberi test legösszetettebb, legbonyolultabb izomcsoport-együttese a szájnyílás körüli izomzat, ennek fejlettségétől és kontrollálhatóságától függ az összes fúvóhangszer megszólaltatásának minősége, különösen a rezeseké. A hangszerekek ajakizomzatán hatalmas a terhelés, de az egész szervezetet is megterheli az, hogy a



8.1 ábra Az ajkak nyitása-zárása

Az ajkak felfekvése és nyitása-zárása a tölcsérszerű fúvókán a sematikus 8.1 ábrán látható.

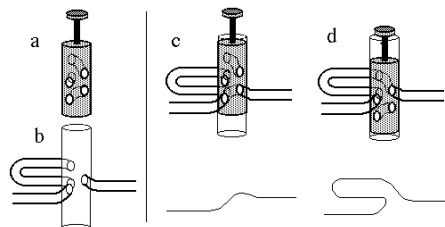
Az egyes hangszerek fúvókái különböző méretűek és alakúak, de közös tulajdonságaik a 8.2 ábrán kivehetők. Itt felülről lefelé a trombita, kürt és harsona fúvókájának sematikus metszete látható. Mindegyiknek van a bemeneti sík mögött (melyre a száj felfekszik) egy öblös része, az ún. "kehely", aztán egy legszűkebb keresztmetszete, a "furat", majd egy kis nyílásszögű kúp alakú furat vezet a hangszer csövébe. Az ajak nyitása-zárása során a kehelyben keletkező nyomásingadozás a furat keresztmetszetében jelentősen megnő, ez felerősíti a csőbe irányuló periodikus zavar hatását. A kehely térfogata magasabb hangfekvésű hangszereknél kisebb, de minden esetben Helmholtz-rezonátorként is működnek. E rezonátor sajátfrekvenciája megjelenik a hangszer által létrehozott hang spektrumában mint egy helyi kiemelkedés, az adott frekvencia körzetében a félhangok a többinél jobban kiemelkednek a spektrumból, ez a kiemelkedés az ún. formáns, amire az énekhang tárgyalásánál részletesebben kitérünk.



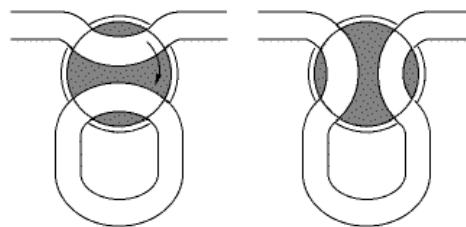
8.2 ábra, fúvókák, trombita, kürt, harsona

A rezesek is félig zárt csőnek tekintendők. A megszólaltatott hang magasságát az ajak feszítettsége határozza meg, de a tényleges hang kialakulásához az szükséges, hogy a nyitott végről visszaérkező hullám megfelelő fázisban találja az ajkat. Ez a stacionárius megszólalás (amikor a rezgés már egyenletesen zajlik) a zavar többszöri oda-vissza futása eredményeként alakul ki, a hang kezdetekor fellépő tranziens folyamat annál hosszabb ideig tart, minél hosszabb a hangszer csöve és jellegzetes szint kölcsönöz az adott hangszertípus hangjának. A kialakult csőrezonancia, ami az összes fúvós hangszernél a hangképzés feltétele, a rezeseknél is visszahat az ajkak nyitására-zárására.

Az ajkak feszítésének változtatásával csak kis hangterjedelem érhető el, a koncerthangszerek szükséges hangterjedelme a csőhossz változtatását is megköveteli. Ez toldalékcső alkalmazásával érhető el, ami technikailag kétfajta módon valósítható meg: a toldalékcső kézi elcsúsztatásával - ez a tolóharsonák eszköze - illetve billentyűk beiktatásával elérhető csőhossz-változtatás. Ez utóbbira két megoldás ismeretes, a nyomó- és forgószelep (8.3-4 ábrák). Ezek megnyomásra egy további szakaszt iktatnak be a hangszer csövébe.



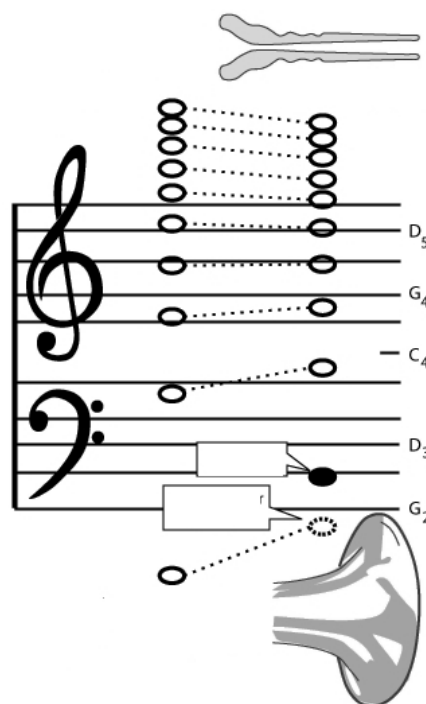
8.3 ábra nyomószelep (piszton)



8.4 ábra forgószelep

A hangszercsalád minden tagja tölcsérben végződik. Ennek elsősorban a hangsugárzás szempontjából van jelentősége, meghatározza annak irányeloszlását. Nyilvánvalóan minden esetben a tölcsértől kifelé mutató irányban a legintenzívebb a hang. Ez érdekes következménnyel jár a kürtre nézve, mivel ennél a tölcsér a játékos háta mögé irányul, ami a kürt hangzását még tovább lágyítja. Egyes esetekben azonban a zeneszerzők éppen ezért előírják a hangszer szokásostól eltérő tartását, ez még klarinétnél is előfordul, kürtnél példa Csajkovszkij Manfréd szimfóniájának első tétele (82 taktus) itt kimondottan a közönség felé kell irányítani a hangszert.

A tölcsérnek egyéb akusztikai hatása is van. A csövön végigfutó hullám nem a tölcsér peremének síkjáról verődik vissza, hanem már jóval korábban érzékeli az akusztikai ellenállás megváltozását, tehát a tényleges hossz rövidebb, mint a tölcsérperem végéig tartó hossz. A tölcsér hatása leginkább a mély hangokra jelentős, ezek hullámhosszát lerövidíti. A fúvóka (és a játékos vokális traktusa) viszont meghosszabbítja a csövet és a magas hangokat hosszabb hullámhosszak felé tolja. A két hatás együttes eredménye a 8.5 ábrán látható. A végeredmény az, hogy az eredetileg csak páratlan sorszámú (félíg zárt cső) felharmonikusok sora közelít a teljes felhangsorhoz. A kúpos furatú csöveknél eleve megjelennek a páros felhangok is, ez a jelenség már a fafúvósoknál (oboa) is létezik, de a fúvóka-tölcsér hatások a hengeres furatúaknál is elősegítik a felhangsor teljessé válását. A végeredmény persze nem tökéletes, de a játéktechnika is besegíthet.



8.5 ábra fúvóka és tölcsér hatása

A tölcséres hangszereknek van egy speciális eszközük a hangszín befolyásolására, a hangfogó. Az eszköz a tölcsérbe helyezve Helmholtz-rezonátorként működik és elnyeli a hangszerből kisugárzott hangspektrumból a sajátfrekvenciáinak megfelelő tartományokat, tehát nemcsak a hang intenzitását,

hanem annak spektrumát, hangszínét is megváltoztatja. A hangszerhez választható hangfogó-készlet a megfelelő Helmholtz-frekvencia megválasztását teszi lehetővé. A kürt esetében a játékos a kezével tudja leghatékonyabban elérni a hangszínváltoztatást, különböző kéztartásokkal különböző spektrum-módosítások lehetségesek.

A hangszercsalád igen nagy formagazdagságú, a klasszikus zenekari gyakorlat azonban túlnyomórészt négy fő típust alkalmaz.

**Trombita** - a legmagasabb hangfekvésű rézfúvós (-csoport), hangjának felhangtartalma igen magas frekvenciákig terjed, a zenekar fényes hangzásának legfontosabb eleme. A rövid csőhossz miatt a csőrezonancia gyorsan létrejön, a tranziens a legrövidebb, ez gyors, virtuóz játékot tesz lehetővé.

**Kürt** - dinamikája a trombitáénál szélesebb, nemcsak erős forte, hanem igen lágy piano hangzásra is képes. Fúvókájának mérete egy kb egyvonalas f-körűli formánsnak kedvez.

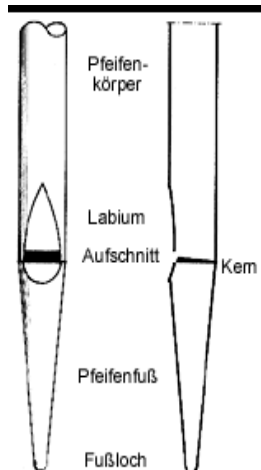
**Harsona** - akusztikailag tulajdonképpen nagyméretű trombita, fúvókája a trombitáénak megnagyobbított mása, bár mérete (Helmholtz-frekvenciája) a kürtével rokonítja. A zenekar legnagyobb hangintenzitású tagja, erről az előtte ülők tudnának mesélni.

**Tuba** - a legmélyebb rézfúvós hangszer (-csoport). Hossza több méteres, csöve széles ezért kis felhangtartalmú, lágy hangzású. Erősen kúpos, fúvókától a tölcsérig 20-szoros átmérőnövekedés.

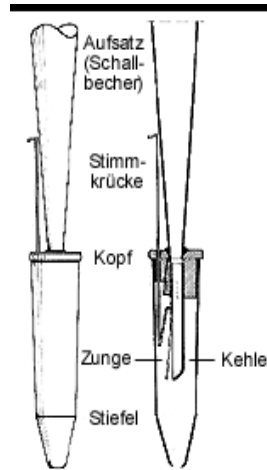


## Orgona

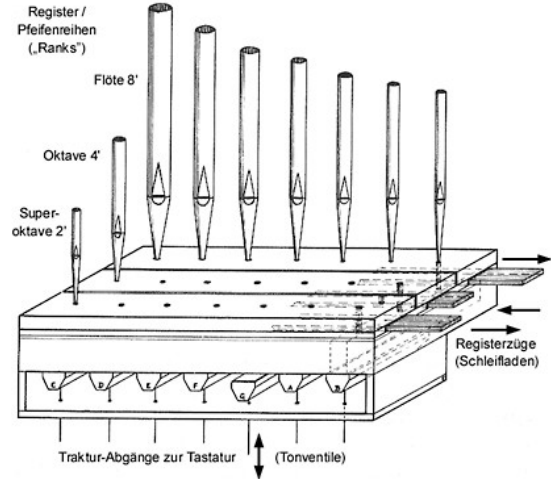
Az orgona ősének a pánsípot tarthatjuk, e különböző hosszúságú sípkból összeállított együttest, melyet a száj előtt mozgattak, így szólaltak meg különböző hangok. Az orgona a kézben tartható hangszerekhez képest néha szinte ipari létesítménynek tűnik. Energiaforrása a fűtató, mely a pufferként működő kiegyenlítő tartályban a kintinél nagyobb nyomást hoz létre, ez a szélsatornákon keresztül a szélkamrába jut, ahol bizonyos szelepek megnyitása révén a levegő átáramlik a sípokon és megszólaltatja őket. A technikai megoldásokat itt nem tárgyaljuk, csak azokat a vonatkozásokat tekintjük, melyeknek akusztikai jelentőségük van.



**8.6 ábra** Ajaksíp



**8.7 ábra** nyelv síp



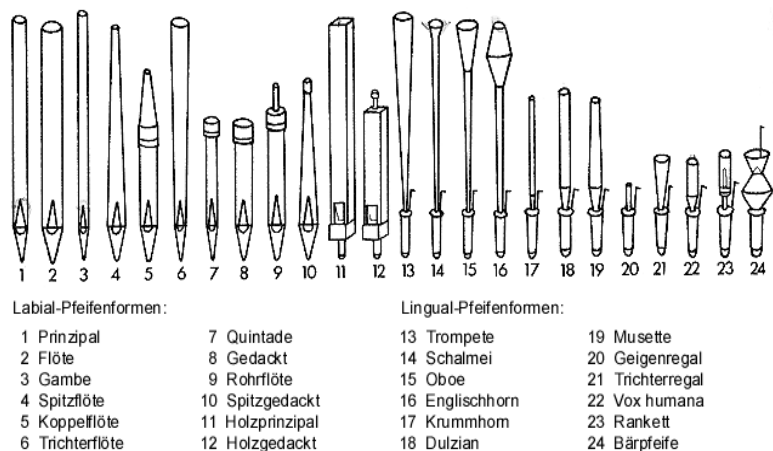
**8.8 ábra** Szélláda

A megszólaltatás módja szerint az orgonasípok is ajaksípkokra (8.6 ábra) és nyelv sípkokra (8.7 ábra) oszthatók. Az ajaksíp részei: síptest (Pfeifenkörper), ajak (Labium), felvágás (Aufschnitt), mag (Kern), sípláb (Pfeifenfuss) láblyuk (Fussloch). A sípok megszólaltatása leginkább a blockflötéhez hasonló, az alulról felfelé áramló levegő a felvágás felső élén kelti a szükséges örvénymintázatot. A hangkeltés eszköze a rezgő légoszlop.

A nyelv síp részei: zengő tölcser (Aufsatz - Schallbecher), hangolókampó (Stimmkrücke), fej (Kopf), nyelv (Zunge), torok (Kehle), lábkamra, v. csizma (Stiefel). A hangkeltés eszköze itt a rezgő nyelv, a fejre illesztett zengő tölcser ezt erősíti rezonancia révén.

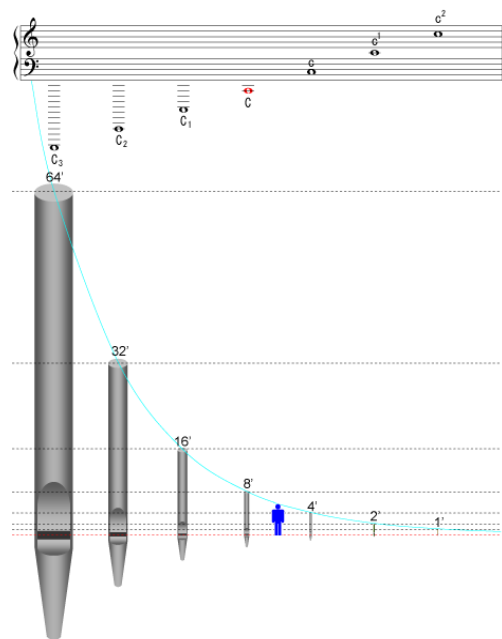
Az ajak- és nyelv sípok hangzása karakteresen különbözik egymástól, de mindkét családon belül nagyszámú, különböző hangszínű variáns használatos. Ezek közül az ismertebbeket sorolja a 8.9 ábra. Az első 12 példa ajaksíp, a többi nyelv síp.

A legfontosabb az ún principál, mely minden orgonának része. A többi ajaksíp ettől viszonylagos szélességben (a menzúrában), hengerestől való eltérésben, illetve a zárt végben különbözhet. A zárt sípok alaptípusa a "Gedackt" (8), mely értelemszerűen fele olyan hosszúságú síptesttel szólaltatja meg ugyanazt az alaphangot, mint a principál, viszont a páros felhangok hiányoznak a spektrumából, tehát hangszíne különböző lesz.



**8.9 ábra** orgonasíp-típusok

Az ajaksípok méretét hagyományosan "láb" -ban adják meg. 1 láb 30 cm-t jelent. Egy sípsort annak a c-sípnek a hosszáról neveznek el, mellyel kezdődik, pl az egyvonalas oktáv sípjait kétlábasnak nevezik, mivel a mindkét végén nyitott egyvonalas c-síp hossza két láb, jelölése: 2' (gondoljunk a fuvolára, mely 65 cm hosszú, kerekítve 2 láb). A 4' -as c-síp értelemszerűen a kis c, a 8'-as oktáv a nagy C-vel indul, és í.t., ld a 8.10 ábrát.

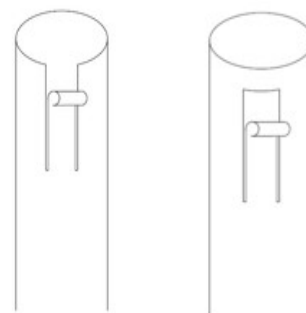


8.10 ábra sípméreték

**Menzúra** - eredeti jelentése mérték, azonban általában méretarányt értünk alatta. Legfontosabb jelentése: a síp hosszának és átmérőjének a viszonya. Ez az arány jelentős hangszínbefolyásoló tényező. Ha egy síp adott hossz esetén szélesebb, akkor a magasabb felhangok gyengék, vagy eltűnnek a spektrumából és lágy fuvolahangot kapunk. A keskenyebb változatok nagyobb felhangtartalmúak, fényesebb hangzásúak.

Német orgonakészítők definiáltak egy normálmenzúra mértéket oly módon, hogy a principál regiszter 8 lábás (120 cm) sípjának 156 mm belső átmérőt állapítottak meg, az ettől eltérő hossz-átmérő arányokat ehhez viszonyítják. Egy adott regiszterben a rövidebb sípok viszonylagos szélessége nagyobb, a hosszabbaké kisebb. Ennek az az oka, hogy mély hangoknál túl széles sípok esetén a magasabb felhangok hiányoznának a spektrumból, a sípnek keskenyebbnek kell lenni, mint az adott hullámhossz fele.

**Hangolás** - félig zárt sípoknál (Gedackt) a hangolás egyszerűen a sapka (ld a 8.9 ábrát) eltolásával végezhető. A nyitott végű sípoknál a 8.11a ábra szerinti bevágás feltekerése révén változtatható a síphossz. A nyelv sípok hangolása (8.7 ábra) a hangoló kampó segítségével történik, melyhez a zengő (rezonáns) tölcse is hozzá kell igazítani.



8.11a ábra

8.11b ábra

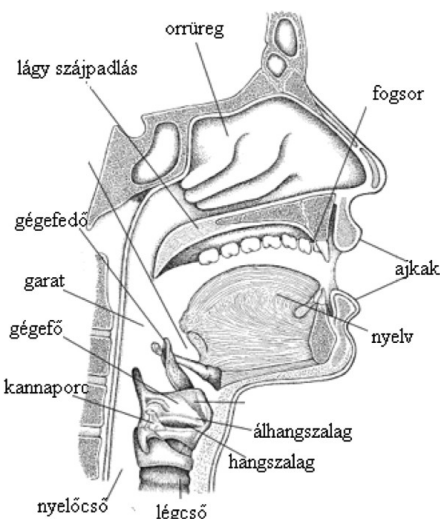
**Intonáció** - nem tévesztendő össze a hangolással, ugyanis nem a hangmagasság változtatására irányul, hanem arra, hogy a sípok megszólalása biztos és egységes legyen, a regiszterben legyen egyenletes a sípok hangszíne (ezt a helyes menzúratervezés is szolgálja). Az intonálási munka egyik eszköze a 8.11.b ábra

szerinti bevágás, ami nem a cső hosszát rövidíti, hanem egyes felhangok erősségét befolyásolja, ami a hang tisztaságát szolgálja. Az intonációnak fontos eszközei a befűvés nyílásának helyes megválasztása, a felvágás mérete, a megszólaltatás biztonsága szempontjából hatásos lehet még a nyílás peremének fogazása, valamint az oldalsó "szakáll", a konflislovak látótér-csökkentőjéhez hasonló irányító lap.

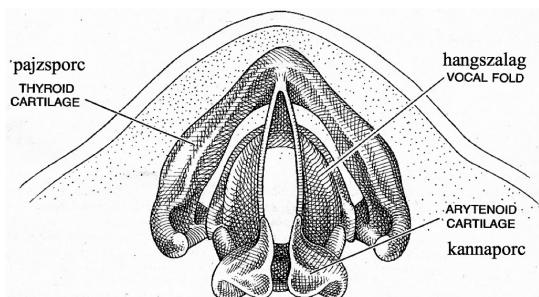
Mivel az orgona ajaksípós regisztereiben a hangkeltés eszköze a légoszlop, ezért a hangszínt alapvetően annak geometriája határozza meg. Némely orgonisták azonban meg vannak győződve arról, hogy a cső anyaga is számít, ez régi vitatéma pl a fuvolistáknál is. Az esetleges szubjektív élmény mögött azonban valószínűleg annyi rejlik, hogy a megszólaltatáskor történő transzienseknél valóban számít a cső anyaga. Utána azonban nem.

## 9. Énekhang

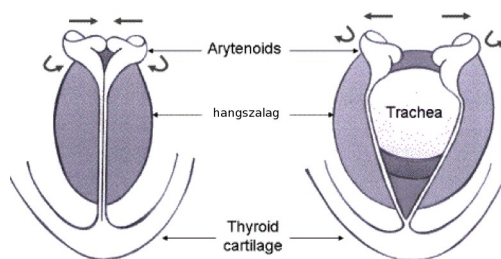
A 9.1 ábra mutatja az emberi hangképzés szerveinek együttesét, az ún vokális traktust. Ez azt a térrészt jelenti, mely a hangszalagtól a száj nyílásáig terjed, felnőtt embereknél egy átlagosan 17,5 cm hosszúságú csőszerű tartományt. Hangszeranalógiaként a klarinét kínálkozik, mivel a hangszalag a nádhoz hasonlóan a rezgés periódusának jelentős részében zárva van, ezért a vokális traktus egyik végén zárt légoszlopnak tekinthető. A különbség az, hogy a hang magasságát teljes mértékben a hangszalag feszítettsége határozza meg, az üreg többi része a kibocsátott hang spektrális sajátosságainak befolyásolására szolgál. A hangszalag fölött helyezkedik el egy rövid csőszerű szakasz, ez beletorkollik a garatnyílásba, majd a levegő a szájüregen keresztül a száj nyílásáig jut. Az emberi hangképzésre az ad lehetőséget, hogy ennek a tartománynak az akusztikai sajátosságait befolyásolni tudjuk.



9.1 ábra Humán vokális traktus



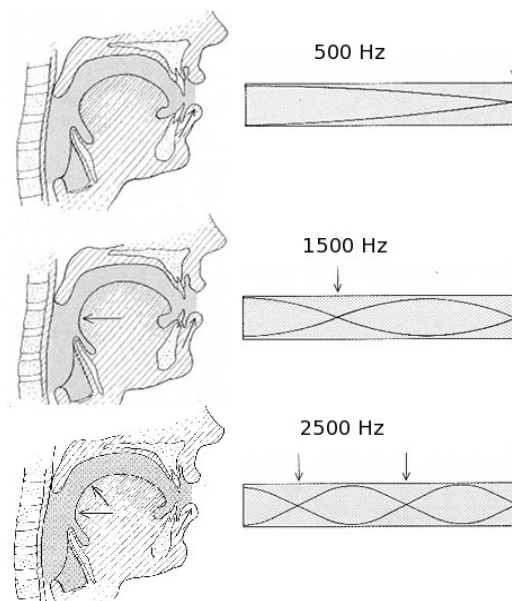
9.2 ábra Hangszalag



9.3 ábra A hangszalag zárása-nyitása

A hangszalag egy rugalmas redőpár a kiáramló levegő útjában, melyet feszítő izmokkal szabályozni tudunk. A redők porcokhoz tapadnak, az izmok egy része ezeket mozgatja. A levegő kiáramlását belső túlnyomás idézi elő, ez beszédnél 40-50 Pa, énekléskor akár 200-250 Pa értékű is lehet.

A vokális traktus nem a hang magasságát, hanem a spektrumát befolyásolja a következőképpen. Mivel a térrész félig zárt légoszlopnak tekinthető, ezért sajátfrekvenciái az alaphangénak páratlan számú többszörösei. A félig zárt 17,5 cm hosszúságú cső alaphangja (kerekítve) 500 Hz, ez kb az egyvonalas b hangnak felel meg. A 9.4 ábra felső sorában az ennek megfelelő nyomásingadozás-eloszlás látható, a cső és a fej rajzán nyíl jelöli a nyomásingadozás-minimum helyét. A második sor az első felharmonikus sematikus rajza, ez a hang szólalna meg a 17,5 cm hosszúságú félig zár cső átfűvésakor, amint az órán szemléltettük, ez kb a háromvonalas f hang, az alapprofrendencia háromszorosán, 1500 Hz -nél. A harmadik felhang kb 2500 Hz-nél található, nyomásminimum-helyeit harmadik sor mutatja. Ezeken a frekvenciákon azonban *nem szólalnak meg hangok*, csak a spektrum alakját szabják meg a következőképpen.

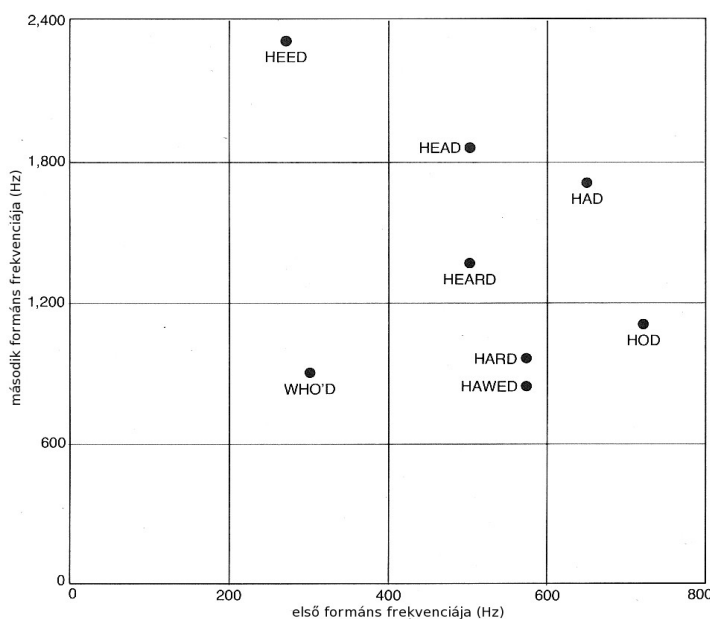
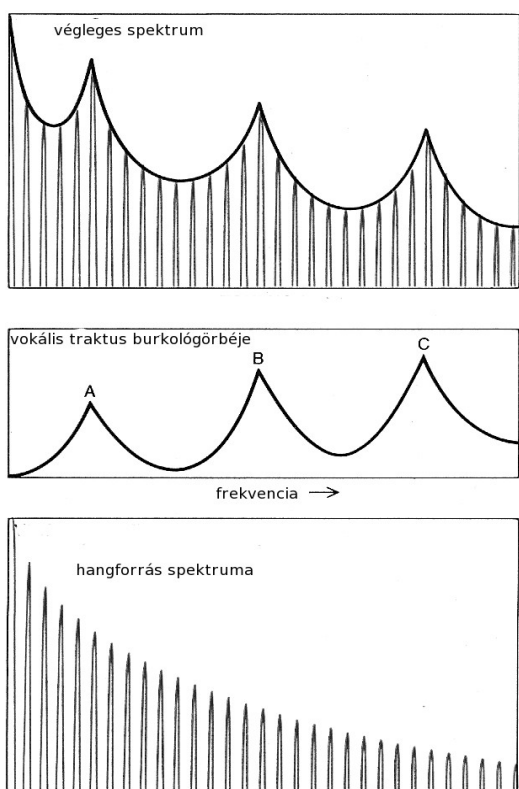


9.4 ábra Formánsképzés

A 9.4 ábrán látható frekvenciákon a vokális traktus átérésztésének maximumhelyei vannak, a spektrum ilyen lokális maximumait formánsoknak nevezzük, ezeket mutatja a sematikus 9.5 ábra középső sora. A hangszalag által kiadott hang (az alaphang és frekvenciájának egész számú többszöröseinél megjelenő részhangok sora) a sematikus 9.5 ábra alsó sorában látható. A középső sorban szereplő átérésztési görbe erre burkológörbéként ráül, az eredményként létrejövő spektrum a felső sorban szerepel.

A humán vokális traktus rendkívül fontos képessége, hogy a formánsok frekvenciáit el tudjuk hangolni azáltal, hogy a szájüreg különböző részeinek geometriáját változtatni tudjuk. Az órán bemutattuk, hogy a fuvola fejrészét megfújva és végét fokozatosan elzárva folyamatosan csökkenő frekvenciájú hangot kapunk, míg a teljes bezárásnál előáll az oktávval mélyebb hang. A fejrész vége sebességmaximum ill nyomásminimum hely. Általában is elmondhatjuk, hogy ha a csövet olyan helyen szűkítjük, ahol sebességmaximum van, akkor a részecskemozgások akadályozása miatt a hullámfrontok átjutása lassul, tehát csökken a frekvencia, ha ugyanott tágítjuk az átmérőt, akkor a frekvencia nő. Hasonló gondolatmenettel, ha olyan helyen csökkentjük az átmérőt, ahol nyomásmaximum van (sebességminimum), akkor ott a szűkítés miatt a nyomásértékek megnövekednek, ez felgyorsítja a részecskemozgásokat, tehát a frekvencia nő. Ez történik a 9.4 ábrán nyíllal jelzett helyeknél.

Az emberi beszéd magánhangzóit ezzel a képességünkkel tudjuk formálni és megkülönböztetni. A 9.6 ábra angol magánhangzók adatait mutatja. Példaképpen a 'heed' szóban ejtett magánhangzónál az első formáns alacsony frekvenciára kell hangolnunk kb 250Hz-re, a másodikat pedig magasra, kb 2300 Hz-re. A 'hod' szóban ejtett magánhangzónál viszont az első formáns frekvenciája magasabb, a másodiké alacsonyabb, mint a 9.4 ábra értékei. Ezeket az elhangolásokat szájnyílásunk méretének és nyelvünk alakjának változtatásával tudjuk elérni.



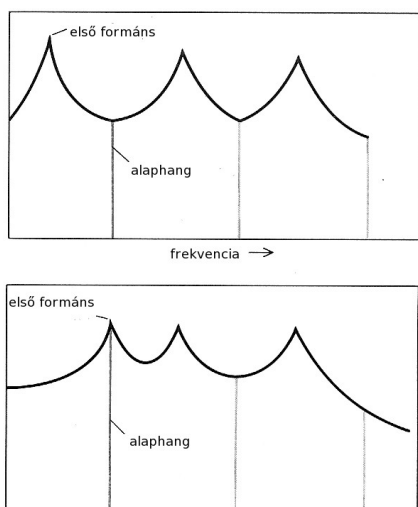
**9.6 ábra** (fent) angol magánhangzók első (vízszintes tengely) és második (függőleges tengely) formánsai.

**9.5 ábra** (balra) A formánsok hatása

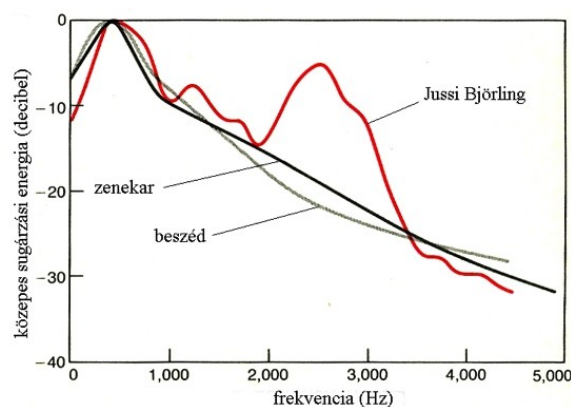
Ez az adottságunk, illetve hallószervünk első félévben tárgyalt spektrális kiértékelő képessége együtt alapvetően fontos volt a tagolt beszéd kialakulása és közvetve a homo sapiens evolúciós sikere szempontjából. Ezek az akusztikai eszközeink azonban az éneklés képessége számára is nélkülözhetetlenek. A sematikus 9.7 ábra azt mutatja, hogyan kell elképzelnünk a formánsok elhangolásának a szerepét.

Az ábrán függőleges vonalak jelzik az alaphang, valamint a kétszeres-háromszoros frekvenciájú

részhangok helyzetét. A felső panelen az alaphang az első és második formáns közé esik, láthatóan gyengén szólalhat meg. Az alsó panelen az első formánst úgy hangoltuk el, hogy egybeessen az alaphanggal, ami így sokkal erősebb lesz. Gondoljunk arra, hogy szopránénekesnők magas hangok kiéneklésénél mindig teljesen kinyitják a szájukat, ilyenkor valójában ezt az elhangolást valósítják meg. A száj nyílásánál ugyanis nyomásminimum van, tehát a fent említettek szerint az átmérőnövekedés frekvencianövekedést okoz - elsősorban az első formánsnál. A hatáshoz még az is hozzájárul, hogy ha a szánkat szélesre - tehát hátra - húzzuk, akkor a vokális traktus egy kissé megrövidül, ez is a frekvencianövekedést szolgálja. Magas hangoknál tehát 'á' magánhangzót ejtünk, akármilyen is a szövegben, ez a körülmény a prozódia fontos eleme. Annak is érdemes utánagondolni, hogy különböző magasságú-mélységű hangok éneklésekor milyen magánhangzót tudunk könnyen kiejteni, ezek általában az itt tárgyalt formáns-hangmagasság illesztés követelménye miatt alakulnak spontán módon.



9.7 ábra Formáns-hangmagasság illesztés



9.8 ábra Énekes formáns a spektrumon

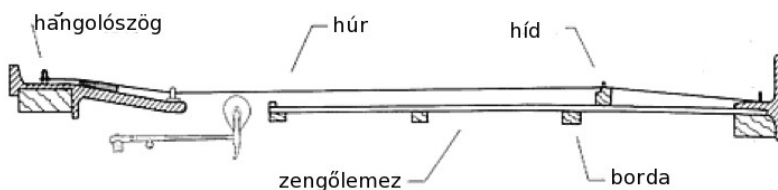
Még egy akusztikai sajátossága van a vokális traktusnak, melyet az énekesek ki tudnak használni. A 9.1 ábránál említett kis bekötő szakasz a garatba, része az eddig tárgyalt vokális traktusnak. Az énekesek azonban kellő gyakorlattal meg tudják változtatni a geometriáját oly módon, hogy egy külön kis üregrezonátorként funkcionáljon, és akkor ennek Helmholtz-frekvenciájánál megjelenhet egy újabb csúcs a spektrumon valahol 2500-3000 Hz körül, a harmadik és negyedik formáns között. Ezt nevezik **énekes formáns**-nak. Az énekesek ezt a technikát nevezik "fedésnek", ehhez az kell, hogy a kis bekötő cső kissé megnyúljon lefelé, keresztmetszete pedig összeszűküljön a garat keresztmetszetének kb egyhatodára.

Ez az átalakulás gyakorlott énekeseknél jelentős előnnyel járhat. A 9.8 ábra a híres tenor, Jussi Björling hangjának spektrális eloszlását hasonlítja össze egy zenekarával ill. a beszéddel. Látható, hogy az említett frekvenciatartományban a nagyzenekar sugárzási teljesítménye monoton csökken, miközben az énekesé az énekes formáns jóvoltából egyes frekvenciákon akár 10 dB-lel is meghaladja a zenekarét. Ezért lehetséges az, hogy egy jól képzett tenor hangját az egész zenekaré sem nyomja el teljesen.

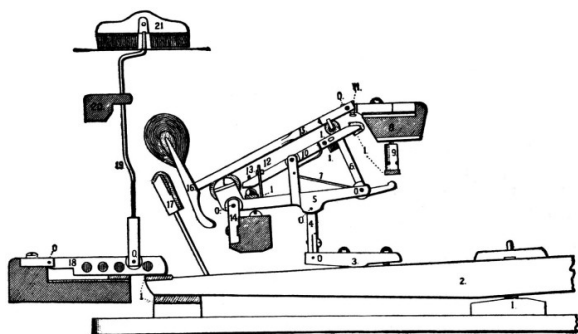
Ennek a fejtegetnek a fejtegetései részben J.Sundberg úttörő munkáira támaszkodnak, ahogyan az ábrák egy része is tőle származik.

## 10. Zongora

Mai formájában a húr két végpontja között a 10.1 ábrán látható fontosabb alkatrészek szerepelnek. Az öntöttvas keretnek a húrok mintegy 16 tonnányi feszítő erejét kell megtartania.



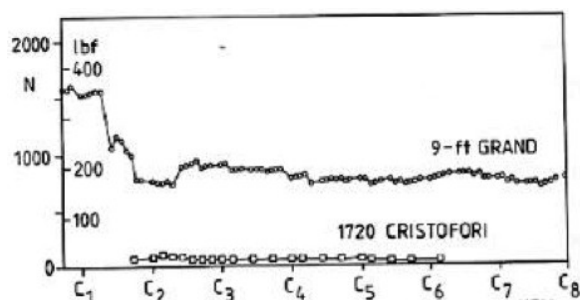
10.1 ábra Zongorahúr környezetének keresztmetszete



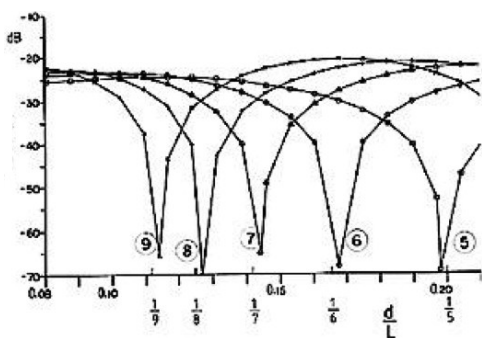
10.2 ábra Kalapácsmechanika

A mai kalapácsmechanika igen hosszú fejlesztés eredménye és rendkívül összetett szerkezet. Legfontosabb feladatai: 1. a billentés folyamán egy bizonyos fázisnál a kalapács szabaddá válik, 2. megütés után a kalapács visszapattan a húrról, 3. egy kar megtartja a teljes visszaeséstől, hogy közel maradjon az esetleges repetáláshoz 4. nyugalmi helyzetbe visszakerülve a hangfogó (Dämpfer) lefogja a húrt. Ezek következtében a billentéskor csak az a lényeges, hogy milyen sebességgel ütöttük meg a billentyűt.

A mai páncélzat hatalmas terhet visel és csak megfelelő öntvénykészítési, valamint acélhuzalgyártási technológiák birtokában lehet korszerű zongorákat készíteni. A korai hangszerek nem is acélhúrokkal, hanem még bélhúrral készültek. A 16.3 ábra mutatja az 1720-beli Cristofori-hangszer és egy mai hanversenyzongora feszítési adatait.



10.3 ábra húrok feszítése



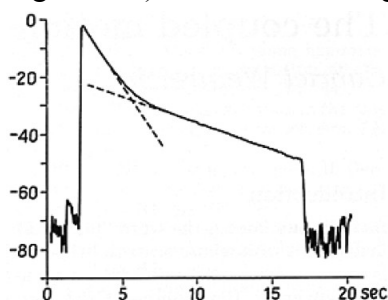
10.4 ábra Húrmegütés helye

Érdekes és sokáig eldöntetlen kérdés volt az, hogy a kalapácsnak hol kell megütnie a húrt. Kísérletezés után a húr egyhetedénél találták legjobb hangzásúnak, aminek a következő a magyarázata. A 10.4 ábrán látható görbék azt mutatják, hogy a megszólaltatott hang hányadik részhangja (bekarikázott szám) a megütés helye szerint milyen hangos. A húrt egyhetedénél (egynolcadánál stb) megütve a hetedik (nyolcadik stb) részhang lesz a leggyengébb. A hatodik részhangig a felhangok a dúr hármashangzat tagjai, a hetedik azonban a kis szeptim, amit zavarónak érzünk.

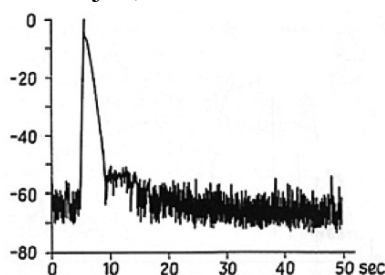
Ezért az egyheted hosszúságnál megütött húr hangzását tisztának fogjuk érzékelni.

A zongora húrjain jól demonstrálható a Mersenne törvény (1.2 formula). A mélyebb hangok húrjai hosszabbak, meg vannak vastagítva, hogy a mozgó tömegük nagyobb legyen. A magasabb hangok húrjai azonban vékony acélhuzalok és nem egyedül, vagy párosan szerepelnek, mint a mélyebbek, hanem hármásával. Ez az elrendezés különleges hangzást eredményez, amit a 10.6 ábrák mutatnak. Az a ábrán egy érdekes jelenség, a változó polarizáció (rezgési sík) hatása látszik. Megütéskor a húrok függőleges irányban mozognak, rezgésük energiáját átadják a zengőlemeznek (ld később) ezért ez a rezgés hamar lecseng. A húrok azonban vízszintes irányban is kimozdulnak, ez a rezgés nem adódik át a zengőlemeznek, ezért jóval halkabban, de tovább is tart, ezt a szakaszt mutatja a kb 5 másodpercnél lévő törés utáni rész. Ez a zongorahangzás fontos jellegzetessége. A b ábrán az

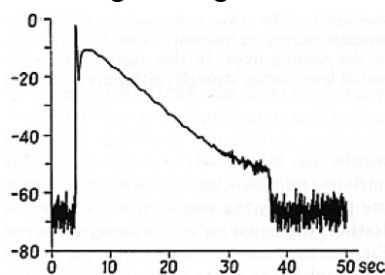
látható, hogy hogyan cseng le egyetlen húr. Végül a c ábra azt mutatja, hogy mi történik, ha egyetlen húrt ütünk meg, de mellette szabadon rezeghet egy másik, ekkor a hídon keresztül csatolás történik a két húr között. A hangok lecsengését tehát a hűrok bonyolult (változó polarizációjú vagyis rezgési síkú) illetve csatolt rezgései alakítják, ez teszi hosszán zengővé a zongorahangot.



10.6a ábra Lecsengés

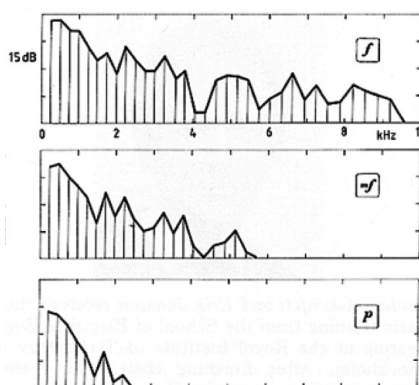


10.6b ábra egyhúros lecsengés



10.6c ábra kéthúros lecsengés

A megszólaló zongorahangot egyértelműen az határozza meg, hogy milyen sebességgel történt a billentyű leütése (pl a könyök mozgásának semmilyen szerepe nincs), hiszen a folyamat egy adott fázisától kezdve a kalapács teljesen szabadon mozog a húr felé. Ha ezt nagy sebességgel üti meg, akkor a hangerő nagyobb lesz, aminek a hangszínre is hatása van. Ismerjük azt a jelenséget, hogy a nagy erejű billentés szinte acélos csengésű hangot eredményez. Ez a 10.5 ábrával szemléltethető. Forte hangzás esetén a magas felhangtartalom erős, ezért ezt csengőnek ércsenek halljuk. Mezzoforte és piano játéknál a felhangtartalom csökken, tehát a hang nemcsak halkabb, hanem puhább, lágyabb hangszínű is.



10.5 ábra Hangerő-spektrum

A hűrok kis hangsugárzó képessége miatt a zongorának is meg kell oldani a hatékony hangsugárzás feladatát, erre szolgál a **zengőlemez**. Ezt az elnevezést Tarnóczy Tamás ajánlja a gyakran használt rezonánslemez helyett. A 10.7a ábrán látható a lemezre erősített híd, melyre a hűrok ráfeksznek a lemezzel kb 1,5 fokos szögben (ld a 10.1 ábrát is) és így rezgési energiájukat átadják a lemeznek a hegedű lábához hasonlóan.



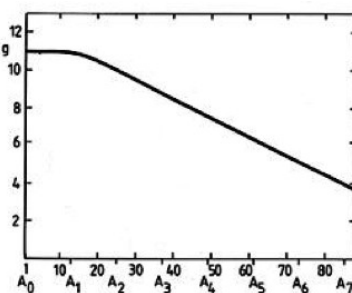
10.7a ábra zengőlemez 1



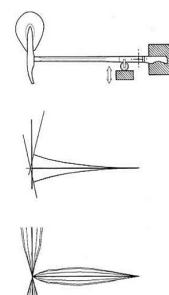
10.7b ábra zengőlemez 2

A zengőlemez anyaga lucfenyő, melynek rostjai mentén nagyon gyors a zavarterjedés, ezért alkalmas nagy frekvenciák átvitelére. A lemezt a rostokra merőleges bordázattal látják el, hogy a zavarterjedés ebben az irányban is összemérhető legyen a rost-irányúval.

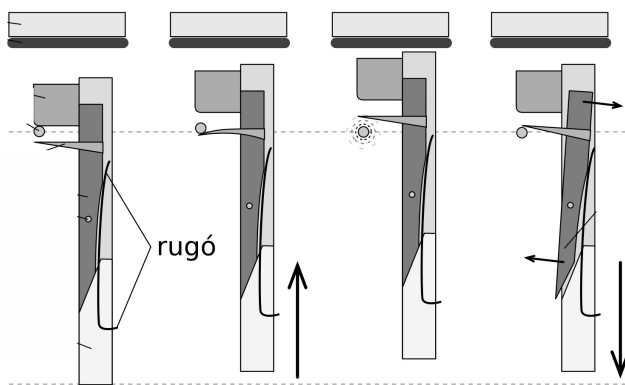
A kalapácsok súlya változó, mélyebb hangokra nagyobb súlyú kalapácsok szükségesek. Mozgásuk is érdekes a megszólalás szempontjából, a megütéskor karjuk berezeg, amint az ábra mutatja, ennek frekvenciája is változik a hangmagassággal. A húrral érintkező felület további fontos intonációs szempont, a filcfelületet gondosan karban kell tartani.



10.8a ábra kalapácsok súlya



A zongora ősei közül ma is használt **csembaló** billentyűs mechanikája ellenére pengetősnek számít. A gitárplektrumnál említett ok miatt hangja fémes, csengő, magas felhangtartalma nagy. A 10.9 ábrán látható pengetőeszköz egy függőlegesen megemelhető rúdon tartalmaz egy tengely körül elforduló nyelvet, erre merőleges a pengető tű. Megemeléskor a tű megpendíti a húr, majd fölé kerül. Visszaengedéskor a nyelv a tengely körül hátramoszdul, engedi a pengetőtűt szabadon a húr alá kerülni, majd egy laprugó visszaállítja azt a pozíciót, mely újbóli emeléskor ismét lehetővé teszi a pengetést.



**10.9 ábra** Csembaló mechanika

A hangszer többi része a zongora alkatrészeinek megfelelője. A zengőlemez szintén lucfenyőből készül a szálirányra merőleges bordázattal. Az orgonával az köti össze, hogy készítői a barokk korban orgonaépítők is voltak, így itt is használatos a 8 lábás elnevezés a nagy C-ről induló 4 és 1/2 oktávnyi hangkészletre, továbbá az orgona mintájára több manuált és regiszttert is építhettek bele.

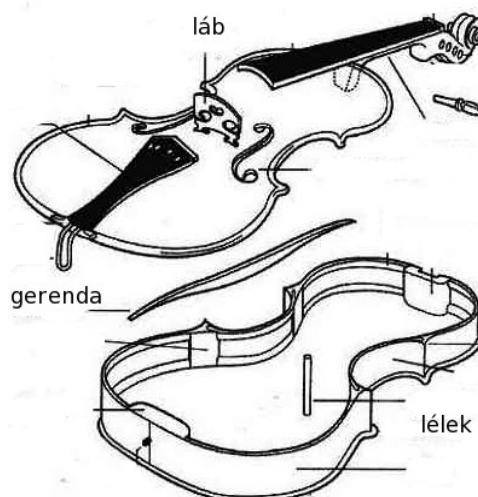


## 11. Vonós és pengetős hangszerek

A vonóscsalád legfontosabb tagja természetesen a Stradivari-korszak idejére kikristályosodott hegedű, melynek fontosabb alkotó részeit a 11.1 ábra mutatja.

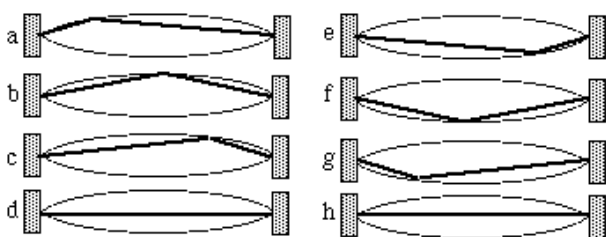
A hangkeltés eszköze a húr (ld a 1. fejezetet, Mersenne-törvény stb). A hurok zenei szempontból nagyon kedvező tulajdonságúak, tekintettel a harmonikus felhangsorra, de az összes húros hangszerek azt a feladatot kell megoldania, hogy mivel a vékony húr igen kis levegőmennyiséget képes megmozgatni, vagyis igen rossz hangsugárzó, ezért rezgését hatékony hangsugárzó alkatrészeknek kell átadni. A vonósoknál ez elsősorban a tető, de a hát és a láda szerepe is fontos.

A hegedű négy húrja (g, d', a', e'') összesen 295 N (kb 30 kg) erővel van megfeszítve. A hurok iránya a lábnaál megtörik olyan szögben, hogy a tetőre kb 10 kg terhelés jut, így jut a húr rezgési energiája a felső lapra.



11.1 ábra A hegedű részei

A hurok mozgásának leírása Helmholtz nevéhez fűződik, ő fogalmazta meg a 11.2 ábrán látható elképzelést, hogy a vonó által keltett zavar milyen formában terjed a két végpont között

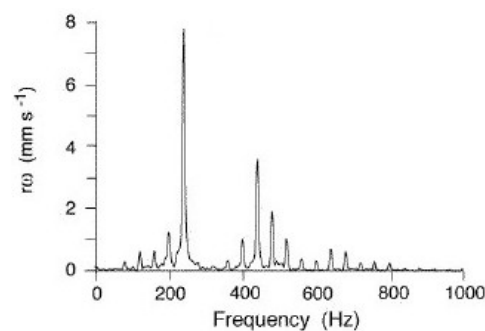
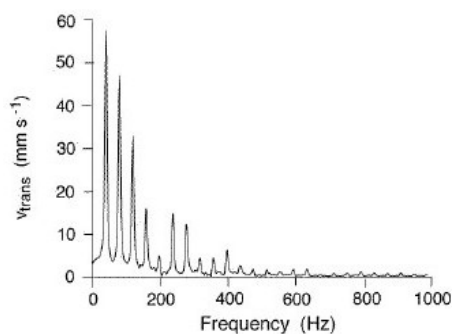
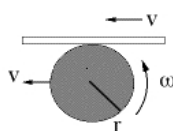


11.2 ábra A hegedűhúr mozgása

A vonó kezdetben a húrhoz tapad és mozgatása révén magával viszi mindaddig, amíg a vonó által kifejtett tapadási súrlódási erő nagyobb, mint a húrban keletkező rugalmas ellenereő. Egy bizonyos kitérésnél ez utóbbi nagyobb és a húr elválk a vonótól, a csúszási súrlódási erő már kisebb, mint a tapadási, amit minden szánkóhúzó megtapasztalhatott már.

Ezután a kitérés, mint zavar, a 11.2 ábrán látható módon végigfut a húr mentén, a végén ellenkező fázissal visszafordul. Az ábra az alaplódust mutatja, a magasabb módusok hasonlóan alakulnak.

A húr nemcsak oldalirányú (transzverzális) kitérést végez, hanem csavarási (torziós) hullámok is keletkeznek benne, amint az a rajzból látható.

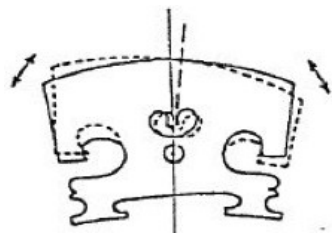


11.3 ábra

Az így létrejövő rezgéseknek a spektruma a transzverzális hullámokéhoz (11.3 ábra felső panel) hasonlóan szintén harmonikus, de jellemző frekvenciaértékei azokénál magasabbak (alsó panel). Ennek az az oka, hogy a torziós zavarral szemben nagyobb visszatérítő erő lép fel, mint a transzverzálissal szemben.

Érdeemes megemlíteni, hogy egy harmadik típusú zavar is terjedhet a húr mentén, a longitudinális. A húr ellenereje ezzel szemben a legnagyobb, hiszen ez sűrűség-hullámot jelent, ezért ennek a terjedése a legnagyobb sebességű. Ez olyankor keletkezhethet, ha a vonómozgás húrirányú, az ilyenkor fellépő 'nyávogó' hang a magas frekvenciájú tartományban keletkezik.

A húrok rezgésének energiáját a hangszer lába továbbítja a tetőre.



11.4 ábra Hegedűláb

A láb nem egyszerű közvetítő, akusztikai sajátosságai fontosak. Kemény fából készül, tömege 2-3 gramm. Amint korábban említettük, a gitár hasonló szerepű alkatrésze - a húrláb - abban különbözik a vonóhangszer-lábtól, hogy tömör gerenda lévén a tető rezgéseit hatékonyan visszacsatolja a húroknak, ezért zeng egy gitárhúr tovább, mint a vonósok pizzicatoja. A vonósok lába a bevágások miatt erre kevésbé képes, itt a rezgések kevésbé csatolódnak vissza, kisugárzódnak, tehát a hang hamarabb lecseng mint a gitárnál, viszont a vonó folyamatosan pótolja a húr energiavesztését. A láb merevsége a bevágásokkal hangolható.

A láb anyaga keményfa, saját frekvenciája hegedűknél 2-2,5 kHz körül van.

A tetőre továbbított rezgéseket a tető felülete már hatékonyan ki tudja sugározni. A tető anyagának hibátlanak kell lennie és alkalmasnak nagy sebességű hullámok továbbítására, tehát magas frekvenciájú rezgések kisugárzására.



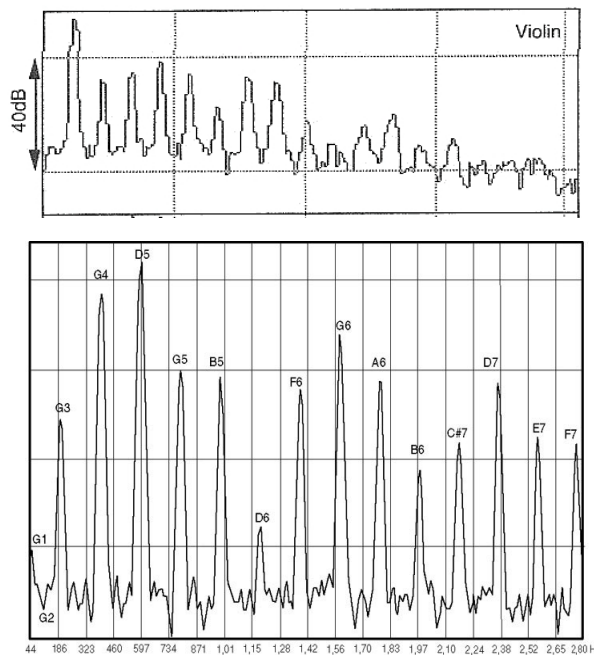
11.5 ábra Chladni

A tető és a hát - hasonlóan a zongora zengőlapjához - nem rezonáns-lemezként működik, de természetesen megvannak a saját frekvenciái, melyek hangolhatók. A mérés a gyakorlatban kopogtatással-hallgatással történik, többnyire nem műszeresen, de a 11.5 ábra azt mutatja, hogy hogyan lehet kirajzolni a lapok módusait a Chladni-féle módszerrel, amikor a finom homokszemcsék adott frekvenciájú gerjesztés hatására adott csomóvonal-struktúrába rendeződnek. Az adott módushoz tartozó frekvenciát azáltal csökkenthetjük, hogy a maximális kitérésű területeken vékonyítjuk az anyagát, ugyanis itt ébred a lemez kimozdulásai (elhajlításai) révén keletkező visszatérítő erő, ami a vékonyítással gyengül.

A tetőről a rezgések továbbjutnak a láda belsejébe. Itt a legfelső húr (hegedűn e") alatt helyezkedik el a 'lélek'-nek nevezett rudacska, ami a magas frekvenciájú rezgéseket továbbítja a háthoz és statikai szerepe is van a nagy húrnyomás miatt. A nagyfrekvenciás rezgéseket a kemény fa a szálirányban tudja hatékonyan közvetíteni. A mély húrnál (hegedűnél g) azonban a hangszer hosszában a 'gerenda' nevű alátámasztás van.

A vonósok hangsugárzásának jelentős tényezője a hangszer teste. Egy kiterjedt vizsgálatban részletesen megmérték hegedűk különböző részeinek sajátfrekvenciáját és azt találták, hogy a legjobb hangzású hegedűknél a tetőlemez sajátfrekvenciája az a' húr közelébe esett, a test Helmholtz-frekvenciája pedig a d' húréhoz. Ez van a 11.6 ábra jellegzetessége mögött, amit a 9 előadásban is említettünk. Az a' húr megszólaltatásakor az alaphang a legerősebb (ezt erősíti a tetőlemez), a g húr esetén azonban a 2-5 felhangok mind erősebbek, mint az alaphang, hiszen a tetőlemez és a test ezeket erősíti inkább.

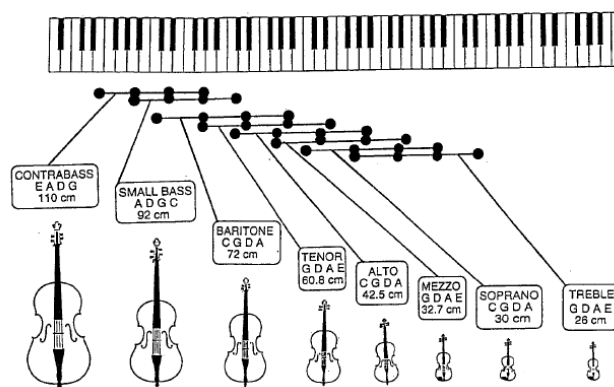
A tetőlemezen van még egy fontos elem: az f-nyílás. Ennek praktikus haszna is van, mert ezen keresztül lehet a test belsejéhez, a lélekhez hozzáférni, de más funkciója is van: a test belsejében keletkező hullámok ezen keresztül sugárzódnak ki.



11.6 ábra hegedű a' és g hang spektruma

A jó hangzású hegedűkre vonatkozó mérések inspirálták az amerikai 'Catgut' társaság hangszereit.

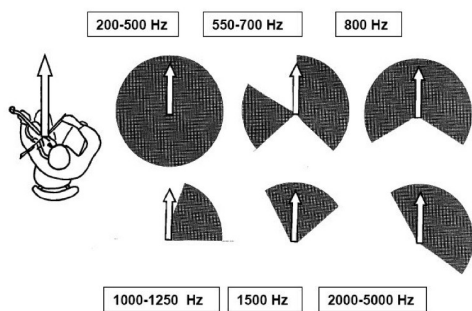
Az elgondolás az volt, hogy a hangszercsalád minden tagjára érvényes legyen az a sajátosság, hogy a tetőlemez sajátfrekvenciája felülről a második húrúhoz, a test Helmholtz-frekvenciája pedig alulról a második húrúhoz álljon közel. A hangszerek el is készültek, akusztikailag igazolták is a várakozásokat, de nem váltak be, mert több tagjukon nem lehet jól játszani a méreteik miatt. Érdekes példa a brácsáé, melynek tetőlemezét lehet megfelelően hangolni, a test méretének azonban túl nagyoknak kellene lennie. Ezért a brácsa mindig halványabb lesz a hegedűnél.



11.7 ábra Catgut-hangszercsalád

A gordonka helyzete ebből a szempontból szerencsésebb, mert itt a test mérete közel esik az optimálishoz. A láb jóval magasabb, mint a hegedűnél, valamint a káva magassága is jelentős. Ez utóbbi révén a mély hangok erősítése hatékony. A gordonkának van egy érdekes sajátossága: a támasz révén akusztikai csatolásba kerül a padlóval, ezért a padló is hozzájárul a sugáráshoz felfelé, ami tekintettel az alacsony frekvenciákra szétterül.

Az összes hangszernél, így a vonósoknál is igen fontos az, hogy milyen irányban sugároznak jól.



11.8 ábra hegedű iránykarakterisztikája

Ezt fejezi ki a hangszer iránykarakterisztikája, mely a hegedűre a 11.8 ábrán látható. A hatékony sugárzás irányait érdemes megkülönböztetni különböző frekvenciák szerint, hiszen láttuk, hogy a mély hangok jobban szétterülnek, a magasak irányítottabbak. Ez jól látható az ábrán is. A legfontosabb azonban az, hogy a vonósok fő sugárzója a tetőlemez, ezért ezt kell leginkább a hallgató felé irányítani. Innen látszik, hogy a zenekarok szokásos elrendezés nem véletlen: az első hegedűnek mindenképpen a karmestertől balra kell ülniük, mert ők játsszák a magasabb hangokat.

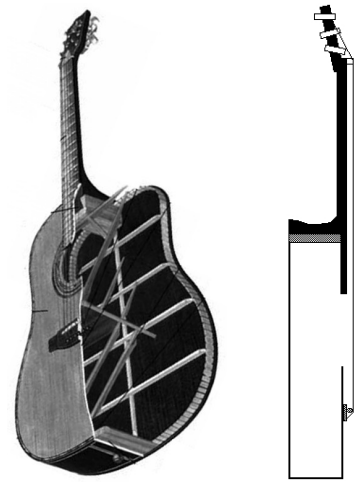
Egy gondolat erejéig érdemes visszatérni a vonóshangszer-lélek szerepéhez. A Németországban élő Molnár Pál (aki valaha a Debreceni Konzervatórium növendéke volt) a szokásos keményfa rudacska helyett karbonszálas megoldást fejlesztett ki, ami a tapasztalatok szerint igen kedvező tulajdonságú helyettesítője a keményfa léleknek. A lélek szerepe azonban egyelőre vita tárgya az akusztikai irodalomban. Az említett magas frekvenciájú közvetítő szerepet támogatja az elterjedtebb nézet, de van olyan elképzelés is, hogy ez a rudacska egy nagy akusztikai impedanciájú támaszték a láb egyik lába számára, miközben a másik láb egykarú emelőként mozgatja a fedlapot és így idézi elő annak hangsugárzását. Akármelyik mechanizmus a döntő, mindenképpen fontos tulajdonsága a léleknek, hogy hosszirányban a lehető legnagyobb ellenállást tanúsítsa az összenyomással szemben.

## Pengetős hangszerek

A húros hangszereket legegyszerűbb pengetéssel megszólaltatni, ezért valószínű, hogy legősibb változataik a pengetősök családjába tartoztak. Mint minden húros hangszernél, itt is a gyenge hangintenzitás erősítése a fő akusztikai feladat, a megoldások közös vonásai jól felismerhetők a különböző hangszereken.

A **gitár** a hangszercsalád legelterjedtebb tagja, a 11.9 ábra részben bontott képét mutatja. A hangszer főbb tagjai: *fej* (hangolóegység a húrfeszítő kulcsokkal), *nyak* a fogólappal és a rajta keresztben lévő fém érintőkkel, *test* mely egy speciális alakú, fedlap-hátlap-oldallap által határolt láda, a fedlapon a hanglyukkal. A húrok a fej-nyak határon lévő *nyereg* és a fedlapon rögzített *húrláb* között vannak kifeszítve.

Az erősítést (a vonósokhoz hasonlóan) elsősorban a fedlap végzi, de kivieszi a részét a testben lévő üreg is. A fedlapnak a zongora zengőlemezéhez és a hegedű fedlapjához hasonlóan alkalmasnak kell lenni a magas frekvenciájú hangok kisugárzására, ezért nagy zavarterjedésű anyagból, lehetőleg lúcvagy vörösfenyő lapokból készítik. A szálirányra merőleges irányokban itt is merevítő rudazatot kell alkalmazni, mint a zongoránál (az ábra bontott testén is látható), ennek mintázata nagy változatosságot mutat a különböző hangszereken.



11.9 ábra Gitár

A fedlap elsősorban a magas frekvenciájú tartományt erősíti, a mélyebb frekvenciák erősítése hatékonyabb a test ürege (Helmholtz rezonátor) révén, továbbá a hátlap is szerepet játszik benne, ez vastagabb a fedlagnál és anyaga inkább juhar-, vagy diófa. Az így erősített mélyebb frekvenciák kisugárzását teszi lehetővé a hanglyuk.

A gitárhangelésnek több változata is lehetséges, a legelterjedtebb klasszikus gitár húrjainak hangolása: E - A - d - g - h - e' . A fogólapon az irányára merőlegesen elhelyezett fém érintők lehetővé teszik, hogy az intonáció biztos legyen, félhang-sorozatokat alkotó távolságban következnek egymás után. Pozícionálásuk az ún 1/18-as szabállyal oldható meg, ez a következőket jelenti. A 10. fejezetben láttuk, hogy a félhang frekvencia-aránya a kettő tizenkettedik gyöke, vagyis:

$$\sqrt[12]{2} = 1,059463$$

ez irracionális szám, tehát nem fejezhető ki két egész szám hányadosaként, de jól közelíthető a következő racionális számmal:

$$18/17 = 1,0588$$

Ha tehát a húr hosszának 1/18 -ad részénél elhelyezünk egy fém érintőt, akkor a hosszabb rész 17/18 hosszúságú lesz és a pengetett húr fél hanggal magasabb hangot ad ki. E hossz fél hangnak megfelelő megváltoztatása e rövidített hosszúságnak szintén 1/18-dal való rövidítését kívánja, tehát az érintők egyre közelebb kerülnek egymáshoz. Az oktáv elérésekor azonban ez a szabály a pontos oktávtól kb 12 centnyi eltérést okoz, ami már érzékelhető, ezért 1/18 helyett inkább az 1/17,817 értéket szerencsés használni.

Van azonban még egy probléma, ugyanis ha lenyomjuk a húrt két érintő között, akkor kissé megváltoztatjuk annak feszítettségét, vagyis frekvenciája az (1.2) Mersenne-törvény értelmében kissé megemelkedik. Ezt a nyereg és húrláb távolságának kicsiny megnövelésével lehet kompenzálni.

A pengetés módja jelentősen befolyásolja a hang minőségét. Ha plektrummal (kemény, háromszög alakú pengető hegyével, vagy körömmel) keltjük a hangot, akkor az ércesebb hangszínű lesz, vagyis a magas frekvenciájú spektrumtartomány gazdagabb, míg ujjbeggyel megszólaltatva lágyabb hangszínt kapunk. A különbség oka az, hogy a húrt egyetlen jól definiált ponton kimozdítva nagyobb hullámszámú módusok gerjeszthetők, míg egy bizonyos kiterjedésű (ujjbegy-szélességnyi) húrdarab kimozdításakor a húrban csak az adott szakasznál hosszabb hullámok (vagyis kisebb hullámszámú módusok) keletkezhetnek. A jelenség hasonlít a kis- és nagy ütővel megütött dobok hangszín-különbségének esetéhez.

A pengetés módja más módon is befolyásolja a hang minőségét. Minden esetben feltűnő a különbség a vonósok pizzicato megszólaltatásától, a gitárhang lecsengése mindig jelentősen

hosszabb. A különbség oka az, hogy a hegedűhúr rezgése a lábón keresztül vezetődik a fedlapra, onnan a lelken keresztül a hátlapra és azonnal lecseng, vagyis ezek az alkatrészek elszívják a húr rezgésének energiáját. A gitárhúr nem ilyen közvetítón keresztül kapcsolódik a fedlaphoz, hanem közvetlenül, így lehetséges a fedlap rezgéseinek visszacsatolása a húrra, ezért a lecsengés hossza jelentősen megnő. Ezen túl a pendítés iránya lehet befolyásoló tényező. Ha a fedlap síkjára merőlegesen mozdítjuk ki a húrt (a zongoránál említett merőleges polarizáció), az a húrrezgés energiáját nagyobb mértékben továbbítja a fedlapra, a hang erősebb lesz, de rövidebb lecsengésű. Ha a fedlap síkjával párhuzamos kitérítést idézünk elő, az a zongora esetéhez hasonlóan halkabb, de tovább zengő hangot ad.

A **Lant** a gitár rendkívüli formagazdagságú családjának egyik legkedveltebb tagja. Korai formája valószínűleg a Közel-Keletről származik, Európában a reneszánszban terjedt el és nyerte el ma ismert formáit. A lantok hangolásai is nagy változatosságokat mutatnak. A húrok párokba vannak rendezve, a pár két tagja azonos hangmagasságú. A reneszánszban a legfelső, a barokkban a két legfelső húr magában áll, az alsó húrpárok pedig oktávnyi távolságra vannak hangolva. A fedlapon a gitár hanglyuka helyett egy gazdag ornamentikájú alakzat (rosetta) van kivésve a fedlap anyagából. A hátlap helyett itt egy kagylóra emlékeztető felület szerepel melynek hangsugárzó képessége nem jelentős, de a hangszertest öblös formája a mély frekvenciák erősítésének hatékony eszköze.

A **mandolin** a lant kisebb rokona. A húrok itt is azonos magasságúra hangolt párokba rendeződnek, melyek tiszta kvintre vannak egymástól.

A **bendzsó** általában öt, ritkábban hat szimpla húrt tartalmaz, különböző hangolású, egy elterjedt változat: c - g - h - d' - g'. Megkülönböztető sajátága az, hogy a fa fedlap helyett itt a dobokéhoz hasonló membrán szerepel, ami ütőhangszeres effektusokat tesz lehetővé. A hangszertest sem feltétlenül zárt üreg, a hátlap hiányozhat is, ekkor üregezonátor-erősítés nincs.



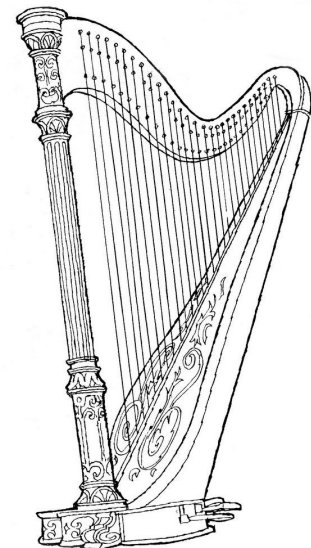
11.10 ábra Lant, mandolin, bendzsó, szitár

Az említett hangszernek egyes népeknél különböző formájú változatai ismeretesek, Európában a legismertebb az orosz balalajka, melynek hangszerteste háromszög alakú, hátlapja domború. Az indiai szitár a fogólap végénél is tartalmaz egy rezonátort, húrjainak száma többnyire 18-21 körüli. A húrok közül néhány csak egyótt rezeg a pengetettekkel. A gitár fém érintői helyett itt íves kötések szerepelnek, melyek helyzete változtatható a fogólap mentén (az ábrán láthatóan mindegyikhez tartozik egy pozicionáló kulcs).

A magyar népi hangszeresek között szereplő citerának a legtöbb népzene gyakorlatában megvan a megfelelője. A magyar hangszernek három húrcsoportja van, a dallamhúrok, melyek két alcsoportjához diatonikus ill. ezt kromatikusra kiegészítő, pentaton hangsort lehetővé tevő érintősor tartozik. A második csoport a basszushúroké, a harmadik a zengőhúroké. A hangláda teteje kevésbé vesz részt az erősítésben, mert a húrok a láda két végén vannak befogva. Más népek gyakorlatában a dallamhúrok melletti húrok száma jelentősen több lehet. Egyes megoldásoknál a húrok a zongoráéhoz hasonló hídra, esetleg húronként saját lábára (mint a japán koto) támaszkodnak és ezen keresztül átadják rezgési energiájukat a fedőlaphoz, így erősebben szólnak.

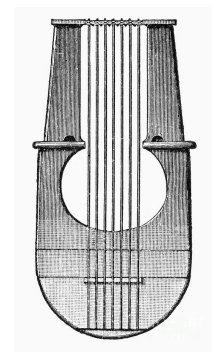
A **hárfa** az eddigiektől teljesen különböző elrendezést használ a húrhang erősítésére. A húrok síkja merőleges a zengőlapra (a 11.11 ábrán a díszes ornamentikájú lap), de maguk a húrok 30-40 fokos szöveget zárnak be a lap síkjával. Ha a húrok merőlegesek lennének a zengőlapra, akkor utóbbi az alaphangot nem erősítené, csak az első felharmonikust. Amint látható, a mély hangok felé a zengőlap (értelemszerűen) szélesedik. A lap a rezonátorüreg sík oldala, a játékos felé egy íves keresztmetszetű felület határolja az üreget, ezen általában öt nyílás helyezkedik el hosszában, melyek szerepe a gitár hanglyukához hasonló, szélességük pedig a zengőlaphoz hasonlóan nő a mélyebb hangok felé, ezeken csatlózik ki az üreg által erősített hang..

A húrok diatonikus skála szerint vannak hangolva, a modern koncerthárfa hangterjedelme a szubkontra Cesz-től a háromvonalas Gisz-ig terjed, ez több mint hat és fél oktáv. A szükséges félhangok előállítására több hosszú kísérletezés után Erard talált hatékony módszert hét darab kétfokozatú pedál beiktatásával, ami a hét skálahang mindegyikének két félhangnyi elhangolását teszi lehetővé.



**11.11 ábra** Hárfa

A hárfa őseit, a lyrát és kitharát kultúrtörténeti okokból is érdemes említeni, mivel magának a költői tevékenységnek is metaforájává váltak. A 11.12 ábrán látható kithara a két hangszer közül a mélyebb változat. Jól felismerhető, hogy a húrok síkja a gitárhoz hasonlóan párhuzamos a zengőlemezzel és a hangszercsalád minden tagján két "szarv" csatlakozik a testhez, melyek a húrok túloldali rögzítésének rúdját tartják. A húrok száma változó volt, juhbélből készültek, pengetővel szólaltatták meg. A Lyra hangládája esetenként nem fából készült, hanem a zengőlemezzel szemben teknőcpáncél szerepelt.



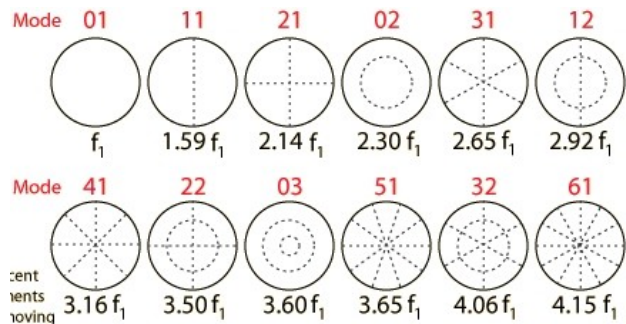
**11.12 ábra** Kithara

## 12. Ütőhangszerek

### Membrafon eszközök

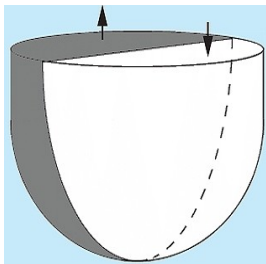
Az ütőhangszerek mindegyikének hangjában dominálnak valamilyen zajszerű elemek, ha más nem, akkor a kezdő tranziensek jellegzetessége igen fontos. Ennek ellenére az ütősök is törekszenek arra, hogy érzékelhető hangmagasságokat tudjanak produkálni, ez azonban a felhasznált anyagok és geometriák miatt általában komoly kihívást jelent. Különböző trükkökre van szükség ahhoz, hogy a keletkezett spektrumban legyenek olyan részhangok, melyekhez hallásunk első félévben tárgyalt elemző képessége (általában virtuális) alaphangot tud rendelni. Ennek a törekvésnek érdekes esete az üstdoboké.

**Timpani** - a 12.1 ábrán a könnyebbség kedvéért megismételjük a 2.2. ábrát. Az üstdob membránjának módusai láthatók, felettük a módus számai, alattuk pedig a hozzájuk tartozó frekvenciák, az  $f_1$  alaphfrekvencia többszörösei. Emlékeztetőül: a módusszámok első számjegye a radiális (középponton átmenő) csomóvonalak száma, a második pedig a cirkuláris (a membrán peremével koncentrikus) csomóvonalaké.

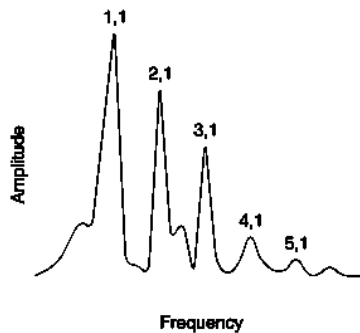


**12.1 ábra** üstdob-módusok és frekvenciák

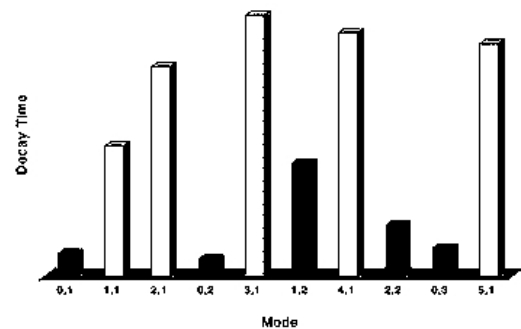
A frekvenciaértékek vizsgálatából kiderül, hogy a cirkuláris módusok frekvenciái nem rendeződnek olyan sorozatba, mely valamilyen frekvencia egész számú többszöröseiként lenne érzékelhető. A radiális módusok azonban, ha a peremen kívül több cirkuláris csomóvonal nincs, közel ekvidisztáns (egyenlő távolságú) sorozatot alkotnak, amint a szematikus 12.3 ábra mutatja. Ezek nem az ábra  $f_1$  frekvenciának az egész számú többszörösei, hanem egy kb  $0,51 \cdot f_1$  -értéknek. Ha olyan módon ütjük meg a membránt, hogy belső cirkuláris módus ne gerjesztődjön, ez láthatóan a membrán sugarának kb felénél-harmadánál lehetséges, akkor csak radiális módusok gerjesztődnek és határozott hangmagasság-érzetünk lehet. Hangsúlyozni kell, hogy annak ellenére halljuk (véljük hallani) a  $0,51 \cdot f_1$  frekvenciát, hogy az fizikailag nincs jelen, ez hallásunk pszichoakusztikai képessége. További érdekességgel szolgál a 12.4 ábrán látható lecsengési idők összehasonlítása: a cirkuláris módusok mind hamar lecsengenek, a radiálisak tovább rezegnek. Ezt érzékelteti a 12.2 ábra. Ha a membrán közepére ütünk, akkor csak a cirkuláris módusokat gerjesztjük és egy tompa puffanást hallunk. Ez hamar elhal, mivel ilyenkor az üst belsejében lévő levegőt összenyomjuk, ami kemény ellenreakciót vált ki. Ha azonban az ütővel a sugár felére ütünk, akkor az a térfél lefelé mozog, a membrán túlsó fele pedig kifelé, tehát a belső térfogat nem nyomódik össze, csak a membrán rugalmas ereje ébred. ezért tovább tarthat a rezgés.



**12.2 ábra** Az (1,1) módus



**12.3 ábra** radiális módusok frekvenciái



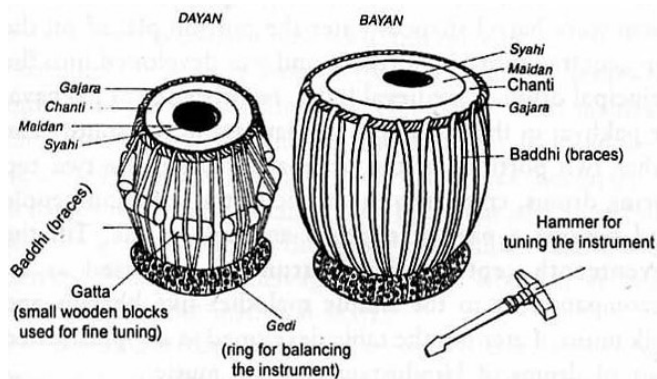
**12.4 ábra** radiális (fehér) és cirkuláris (fekete) módusok lecsengési idői.

A **tom-tom** dobnál hengeres tartóedényre van felvesztve a membrán. Létezik egy- és kétmembrános változata. A hengeres térfogat hozzájárul a hangszer jól érzékelhető hangmagasságához az üregrezonancia révén. Ha mindkét oldalon membrán van, az akusztikailag bonyolultabb, és a hangmagasság kevésbé jól definiált. A létrejövő rezgésekben nemcsak az üreg levegője vesz részt, hanem a hengerpalást is, sőt pontosabb vizsgálatokkal kiderül, hogy a dobtartó állványzat berezgéseinek is van szerepük.



12.5 ábra tom-tom dob

A **tabla** európai zenében nemigen használatos, de ez az ősi indiai hangszer az akusztika egyik legérdekesebb vizsgálati tárgya. Két tagja van, a 12.6 ábrán látható eszközök. A hangszer érdekességét az adja, hogy rutinos játékosai különlegesen gondos eljárás során olyan rétegeket ragasztanak a membránra (egyes leírások szerint akár 100-nál is többet), melyek vastagsága, alakja és helyzete hatékonyan képes befolyásolni a membránon létrejövő módusokat, vagyis hozzájárulni az érzékelhető hangmagassághoz. Ehhez járul még a kéztartás, a megütés megfelelő megválasztása.

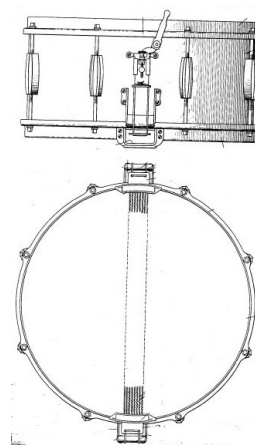


12.6 ábra tabla

A **pergődob** kávája a tom-tomnál keskenyebb, itt hangmagasságot nem kérünk számon, egyértelműen zajszerű hangokra képes, amit a magas frekvenciatartományban az alsó membránra fektetett csavart sodrony hatékonyan erősít.



A darabuka szintén nem használatos az európai zenében, egzotikus népi hangszer. Akusztikai érdekességét az adja, hogy a membrán alatt egy szélesebb rezonátor van, mely a membrán középső tartománya alatt elkeskenyedik. Ezáltal a membrán szélső és középső tartományait megütve különböző geometriájú üregek saját frekvenciáit gerjeszti.



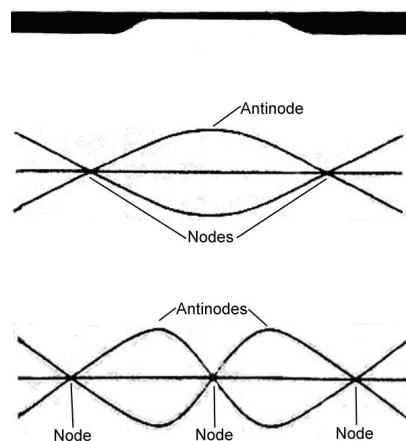
12.8 ábra pergődob

Megemlítjük még a basszusbobot, e nagyméretű ütőhangszert, melynek két szemben lévő membránja közül a passzívát kb egy kvarttal lentebb hangolják, mint az ütött membránt. A hangszernek elsősorban a hangereje (zajkeltő képessége) fontos a zenekari hangzásban.



## Idiofon hangszerek

**Marimba** - az idiofon hangszerek közé tartozik, amelyeknél a hangszer rugalmas teste a hang forrása (nem egy húr, membráné, vagy a levegőé). A marimbánál azonban ezt a saját hangot felerősíti egy rezonátor. A hang forrása egy keményfa lap, mely keresztmetszetben a 12.9 ábrán látható. A lap profilja közepén elvékonyodik, ezen a részen lehet hangolást végezni. A lapok (rudak) két furattal vannak ellátva, melyeken keresztülhúzott huzal függeszti fel őket. E furatokat célszerű az első módus csomópontjainál elhelyezni. Az ütés helyének megválasztásával jelentős dinamikai különbségek érhetők el, a rúd közepén maximális kitérés kelthető, a felfüggesztés helyére ütve viszont nyilván finomabb, halkabb effektust kapunk. A rúdnak nemcsak a lapjára merőleges síkban lehetnek hajlítási módusai, hanem a lap síkjában is, továbbá torziós (csavarási) rezgéseket is végez. Ez utóbbi módusok hozzájárulásának spektruma messze áll a harmonikustól, de igen gyenge intenzitású és az első hajlítási módusra hangolt rezonátorok hatása még inkább elnyomja őket.



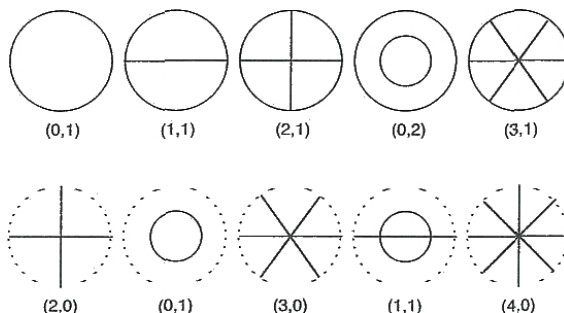
12.9 ábra Marimba rúd, első és második hajlítási módus

A rezonátorok a rúd alá helyezett függőleges helyzetű, félig zárt csövek, melyek frekvenciája a rúd első módusáéval van összehangolva. A félig zárt csövek hátránya, hogy kisugárzásuk a rúd alatt, félig takarva történik, továbbá a gerjesztett spektruma is csak a páratlan sorszámú felhangokból áll, de a fő előnye, a rövidege fontosabb ezeknél. Mélyebb hangú marimbáknál így is meg kell hajlítani a rezonátorcsöveket.

**Vibrafon** - a marimba rokona, de lapjainak anyaga könnyűfém, a rezonátorcsövek nyílásánál pedig egy korong helyezkedik el, mely folyamatosan forgatható a síkjában elhelyezkedő tengely körül, ezáltal periodikusan nyitja-zárja a rezonátort, vagyis változtatja az erősítést. Ez tehát a hang amplitúdómodulációja.

**Csőharang** - kb 3-4 cm átmérőjű krómozott sárgaréz csövek sorozata, melyeket felső peremüknél függesztenek fel és ehhez közel ütnek meg. A harang helyettesítésére használják, mivel kis helyigénye és jó hangolhatósága annál könnyebben kezelhetővé teszi. Akusztikailag igen érdekes tulajdonsága, hogy itt jelentkezik legkifejezettebben az első félévben tárgyalt virtuális alaphang-élményünk, az a hallási sajátság, hogy ha egy hangspektrumban megjelenik valamely frekvencia egész számú többszöröseinek sorozata, akkor az adott frekvenciát halljuk alaphangként akkor is, ha az fizikailag nincs jelen. A cső megszólaltatásánál ez a sorozat a 4- 5- ill. 6-szorosa egy nem megszólaló frekvenciának, és ez utóbbit halljuk alaphangnak.

**Gong** - A dobok membránjához hasonlóan korong alakú hangszer, de idiofon eszköz, tehát a rugalmasságát nem kifeszítés által nyeri el, hanem pusztán felfüggesztés után is rezgésbe hozható. Módusai ennek megfelelően különböznek a 12.1 ábrán látható membránmódusoktól annyiban, hogy a perem itt nem csomóvonal. A 12.10 ábra a membrán és gong módusait hasonlítja össze.

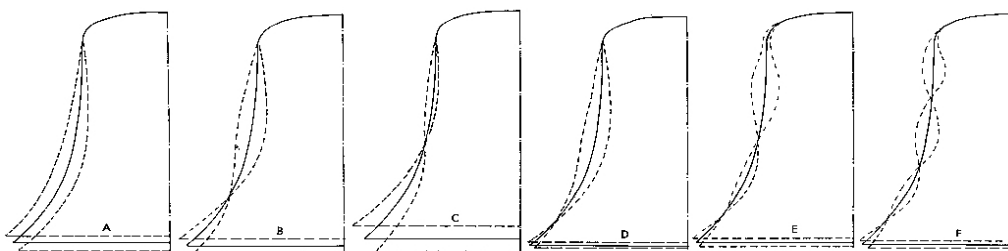


12.10 ábra Membrán és gong módusok

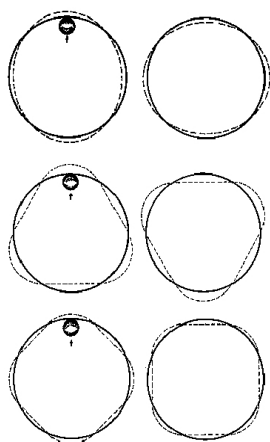
Valójában ez is egy hangszercsalád és a legkülönbözőbb méretű, anyagú és profilú változatai lehetségesek. Az európai zenekari gyakorlatban használt hangszer a tam-tam. Hangmagasság-érzetet nem kelt, nem is ez a funkciója, hanem erős zaj-effektus. Egyik hatásos alkalmazása Sztravinszkij Tavaszí Áldozatában a Tavaszí Körtánc -tételben szerepel (partitúra 53. szám), ahol

több más ütőhangszerrel együtt szinte földrengés-szerű hanghatást kelt. A megütés után rövid idővel sistergés, magas frekvenciájú zajkomponens is fellép. A gongok távol-keleti változatai jóval kifinomultabb technikával készülnek és az elvárások is nagyobbak. Egy részük hatalmas méretű. Hangmagasság-érzet keltésére is alkalmasak a profil megfelelő kialakításával, többnyire a közepén kiképzett kidudorodás révén, de a szélek alkalmasan megválasztott behajlítása is hozzájárul a hangolhatósághoz. A jávai gamelán hangszer család egyes tagjainak (kenong, bonang) pereme annyira mélyen meg van hajlítva, hogy akár harangnak is tekinthetők.

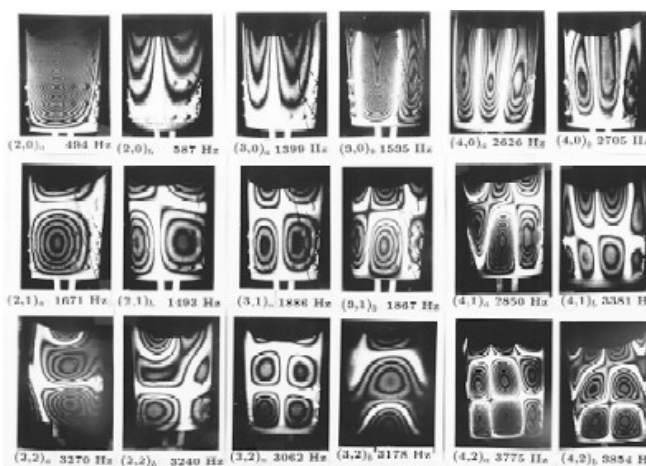
**Harang** - az egyik legkomplexebb móduskészletű és spektrumú hangszer. A 12.11 ábrán látható módusok itt a köpeny alakja miatt úgy módosulnak, hogy a cirkuláris módusok a harang peremével párhuzamos síkokban léphetnek fel (12.11.a ábra), a radiálisak pedig a harang csúcsától a köpeny mentén lefelé a peremig húzódnak, ezeket meridionális csomóvonalaknak is nevezik, keresztmetszetre gyakorolt hatásukat mutatja a 12.11.b ábra. A 12.11.c ábrán a két módus különböző paraméter értékpáraihoz tartozó rezgéseképek interferometriás módszerrel való rögzítése látható a hozzájuk tartozó frekvenciaértékekkel.



**12.11.a ábra** Harangköpeny függőleges keresztmetszetének lehetséges csomópontjai (a cirkuláris csomóvonalak helyzetei). A harang fejénél mindegyik módusnak van csomópontja. Az A módus az ún. zúgóhang, a B az alaphang, a többi egyre magasabb részhang.

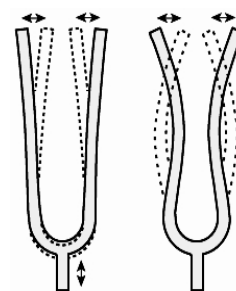


**12.11.b ábra** 2,3 és 4 csomóvonalú meridionális módusok hatása a vízszintes keresztmetszetre.



**12.11.c ábra** Rossing interferometriás képei egy harang különböző rezgési módusairól

**Hangvilla** - az első félév első óráján ezzel demonstráltuk az interferenciajelenséget azt kihasználva, hogy az eszköz két ága ellenkező fázisban rezeg, ezért az általuk keltett hanghullámok bizonyos irányokban kioltják egymást. Elsősorban hangadási eszközként használjuk. Mint a 2.4 ábrán látható, a rezgés során a villa nyele fel-le mozgást végez és egy lapra helyezve azt is rezgésbe tudja hozni, amit az kisugároz, tehát felerősít. A cseleszta korábbi változatainak ez volt a hangkeltő eszköze, de mai formájában fémlapokat alkalmaznak.



**12.12 ábra** Hangvilla