

Zenei akusztika

Ludmány András

Debreceni Egyetem Zeneművészeti Kar

Bevezető

A Zenei Akusztika tantárgy célja az, hogy a felsőfokú zenei tanulmányok hallgatói megismerkedjenek a hangok, hangterek alapfogalmaival, a pszichoakusztika jelenségeivel, a nyugati zene hangrendszereivel és hangszerei működésének fizikai alapjaival. Tematikája nem helyettesíti a gyakorlati hangszerismereti tantárgyakét, hanem a zenei hangok képzésének, a zenei hangzásnak és élménynek a fizikai hátterét tekinti át a tantervi korlátok miatt rövid, tömör formában.

A tárgyalás során elkerülhetetlen a fizikai és matematikai fogalmak használata, de ennek során arra törekedtem, hogy ezek a lehető legegyszerűbb formában jelenjenek meg, a gimnáziumi tananyag egyes elemeinek felidézése során igyekeztem kellő magyarázatokkal érthetővé tenni őket.

A jelen jegyzet felkészülési segédlet a tantárgy vizsgájához a Debreceni Egyetem Zeneművészeti Karának hallgatói számára. A tárgyalás pontosan követi az előadásokon elhangzottakat, de nem váltja ki az előadásokat. Sok évi vizsgáztatói tapasztalat alapján mondhatom, hogy azok tudják jobban megérteni az anyagot, akik az előadásokon elhangzottak után a jegyzettel idézik fel a már hallottakat. A fejezetek végén listák találhatóak az adott témákat demonstráló videók címeiről, ezek megtekintését kötelezőnek tekintem, mert ezek mélyítik el igazán a hallottakat és olvasottakat.

A vizsgára való felkészülés megkönnyítésére vastag, illetve vastag-aláhúzott betűkkel jelöltem azokat a fogalmakat, amelyek vizsgakérdések lehetnek. A tananyag egésze kötelező minden hallgató számára, nem csak a saját hangszerük tudnivalói, ez a félreértés évente előfordul.

Debrecen, 2021

Ludmány András

1. Rezgések, hullámok

REZGÉSEK

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

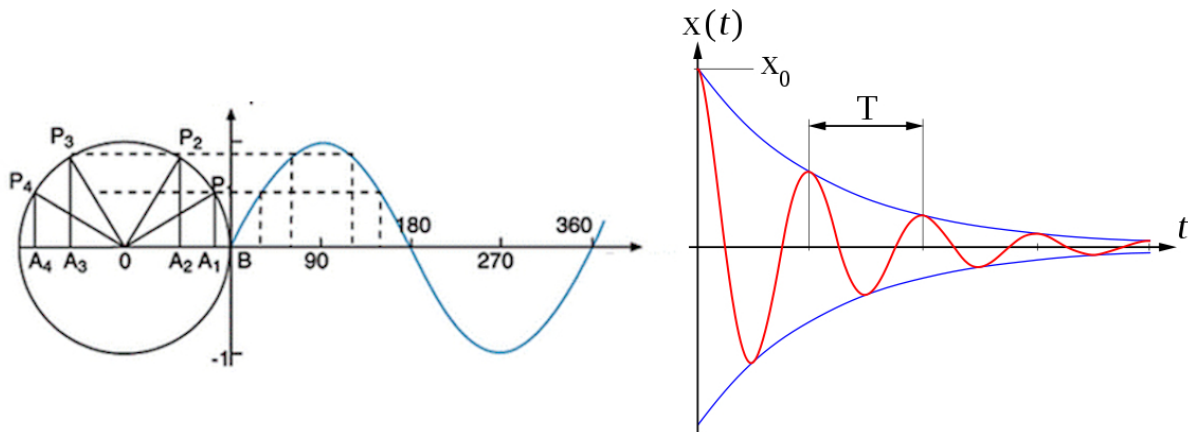


Figure 1: Balra: szinuszgörbe, jobbra: csillapodó rezgések

Az 1 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 **periódusidőnek** (egysége: sec), ennek reciprokát pedig ν **frekvenciának** (egysége 1/sec, vagy Hz - Hertz) nevezzük, a frekvencia az egy másodperc alatt végzett rezgések száma.

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 sűrűlási hatások révén, melyek felemésztik a mozgás energiáját. Az 1 ábra jobb oldalán a harmonikus rezgőmozgás amplitúdóját egy aszimptotikus görbe a nullához közelíti. Az akusztikából ismerős jelenség: a zongorahang elhalkulása.

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

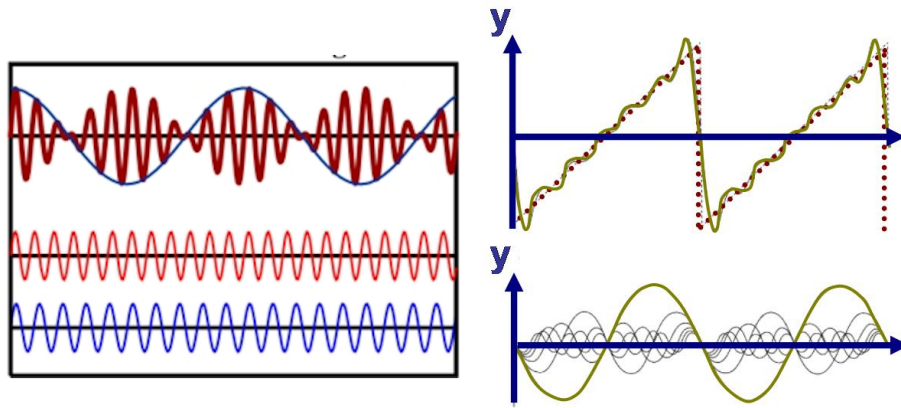


Figure 2: Balra: lebegés, rezgések összeadódása, jobbra: fűrészfog-jel szintézise szinuszhullámokból

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 2 baloldali 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.

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

A 2 jobboldali ábra alsó része hat különböző frekvenciájú és amplitúdójú szinuszgörbét mutat, a felső pedig ezek összegét, mely egy fűrészfog-rezgést 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 más néven felharmonikusok.

Hangspektrumok – a zenei hangok mindig több, különböző frekvenciájú összetevőből állnak, az összetevők intenzitásainak frekvencia szerinti eloszlását hangspektrumnak nevezzük.

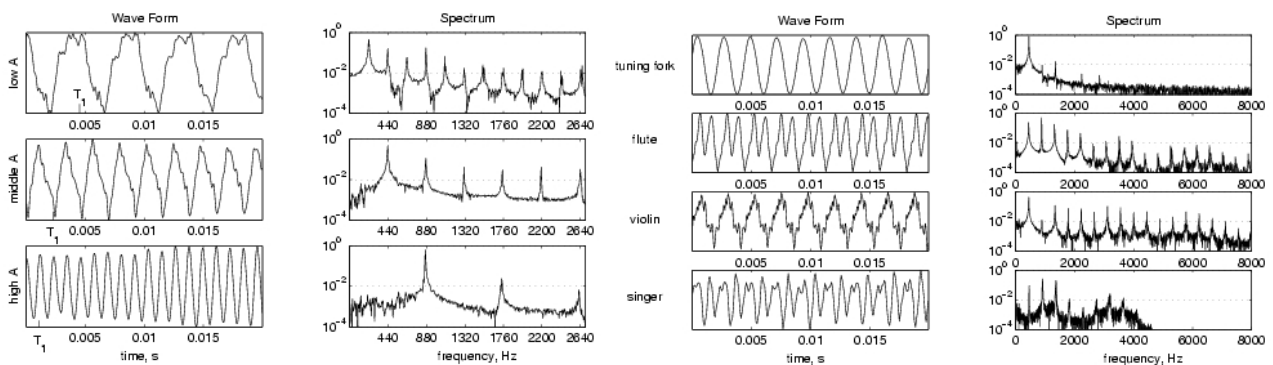


Figure 3: Hullámformák és spektrumaik összehasonlítása. Első oszlop: zongora kis a, a', és a'' hang hullámformája; második oszlop, ugyanezek spektrumaik; harmadik oszlop: kis a hang hullámformája hangvillán, fuvolán, hegedűn, énekhangon; negyedik oszlop: ugyanezek spektrumaik.

A 3 ábra három zongorahang (kis a, a' és a'') hullámformája mellett ezek spektrumait is mutatja, melyeken láthatók az alaphang csúcsa mellett a felhangok csúcsai is, melyek az alaphanggal együtt megszólalnak. Az alaphangok csúcsai 220, 440 és 880 Hz-nél vannak, további csúcsaik pedig ezek egész számú többszöröseinél. Az ilyeneket nevezzük harmonikus felhangspektrumoknak. A harmadik oszlop a hangvilla, fuvola, hegedű és énekhang kis a (220 Hz) hangjának hullámformáját mutatja, mellette láthatók ezek spektrumaik, ezek csúcsai is

harmonikus sorozatot alkotnak. Az énekhang spektrumán látható két hullám, az ún. első és második formáns, melyeket az énekhang akusztikájánál tárgyalunk.

HULLÁMOK

Ha egy közeg egy pontjának fizikai jellemzője eltér a nyugalmi értéktől és ezzel szemben a közeg rugalmas ellenerejt 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** (λ , mértékegysége m) és az időbeli **frekvencia** (ν , mértékegysége 1/s) használatos. A közegre jellemző **terjedési sebességgel** (c , egysége m/s) a következő az összefüggésük:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (1)$$

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.

A Huygens-Fresnel elv szerint a hullámfrontok minden pontja elemi gömhullámok kiindulópontja és ezek eredőjeként jön létre a hullámfront terjedése, továbbá minden interferenciajelenség a hullámtérben.



Figure 4: A Huygens elv révén létrejövő interferenciamintázatok

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 többszöröse, ezeken a helyeken a beérkező hullámok erősítik/kioltják egymást.

A 4. ábra baloldali képe 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 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 irányokban erősítés illetve kioltás jön létre.

Állóhullámok Ha az interferencia révén létrejövő mintázat térbeli helyzete időben állandó, akkor állóhullámokról beszélünk. Állóhullámok haladóhullámok interferenciája révén jönnek létre. A zenei hangok keltéséhez a hangszer valamely részében úgy alakulhatnak ki állóhullámok, hogy egyik irányban haladó hullám egy határról visszaverődik és kölcsönhatásba lép az eredeti irányból érkező következő hullámfrontokkal, a létrejövő állóhullámok a levegővel való kapcsolat révén kisugárzódnak, és a hangszer megszólal. Erre egy sor példát fogunk látni a hangszerek konkrét tárgyalásánál.

Hullámok visszaverődése

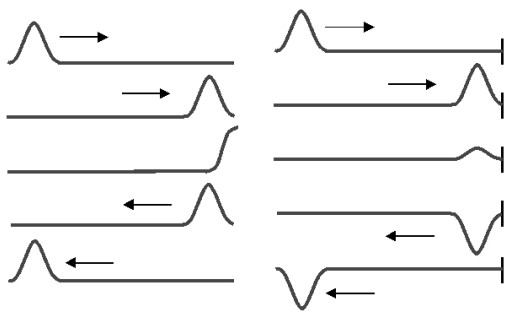


Figure 5: Hullámok visszaverődése szabad és rögzített végen

Ha egy hullám elérkezik egy közeg határához, ahol megváltoznak a terjedés feltételei (pl a hangsebesség, vagy az ún. akusztikai impedancia, ld. a 3. fejezetet), 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.

Szemléltető videók a fentiekhez:

Csillapodó rezgések:

<https://www.youtube.com/watch?v=sP1DzhT8Vzo>

Csatolt rezgések:

<https://www.youtube.com/watch?v=YyOUJUOUvso>

Rezonancia: a Tacoma- híd katasztrófája (1940)

<https://www.youtube.com/watch?v=XggxeuFDaDU>

Lebegés:

<https://www.youtube.com/watch?v=IQ1q8XvOW6g>

Huygens-elv:

<https://www.youtube.com/watch?v=wSFfTM4jAwk>

Interferencia vízfelületen

<https://www.youtube.com/watch?v=ovZkFMuxZnc>

Hullámok visszaverődése és állóhullámok:

<https://www.youtube.com/watch?v=-n1d1rycvj4>

2. 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.

Állóhullámok - Egy rugalmas közegben ellentétes irányban haladó, azonos hullámhosszú hullámok kölcsönhatásából állóhullám jön létre. Azokon a helyeken, ahol a két hullám maximális kitérései találkoznak, az állóhullám anticsomópontjai találhatóak, a csomópontok pedig olyan helyek, melyeken a két ellentétes irányú haladó hullám minden időpontban azonos nagyságú és ellentétes előjelű, ezért ezek a pontok nyugalomban vannak. Minden hangszer megszólaltatása állóhullámok keltése révén történik a hangkeltő eszközben (húrban, csőben, lemezben).

Húrok - hosszukhoz képest elhanyagolhatóan vékony, mindkét végén befogott és megfeszített rugalmas szálak. Három rezgési módjuk van: a transzverzális (a kitérés merőleges a húr irányára), a longitudinális (a zavar húr irányú - összenyomódás) és a torziós (a zavar a húr elcsavarodása). A fő rezgési mód a transzverzális, ennek gerjesztése során a húr több különböző rezgést végez, melyek frekvenciáit a Mersenne-törvény adja meg:

$$f_n = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\rho q}} \quad (2)$$

Ahol n egész számok sorozatát jelenti ($n=1,2,3 \dots$), l a húr hossza, F a feszítőerő, q a húr keresztmetszetének területe és ρ (ez a görög 'ró' betű) a húr anyagának sűrűsége. Szavakban: az n -edik számú rezgés frekvenciája n -szerese egy alaphfrekvenciának, mely fordítottan arányos a húr l hosszával (a hosszabb húr mélyebb hangot ad ki), továbbá nagyobb F feszítőerőhöz magasabb hang, nagyobb q keresztmetszetű ill. ρ sűrűségű húrhoz alacsonyabb hang tartozik. A $q\rho$ -szorzat az egységnyi hosszúságú húrszakasz tömegét adja meg, tehát minél nagyobb ez a tömeg (vagyis a rezgő húr tehetetlensége), annál alacsonyabb a frekvencia, vagyis a megszólaló alaphang. A nevezőben azért szerepel egy kettes faktor, mert a hullámhossz reciprok kapcsolatban van a frekvenciával és az l húrhossz a hullámhossz fele, egy hullám a zavar oda-vissza terjedése révén valósul meg. A képlet jelentését érdemes végiggondolni az ismert hangszerek különböző magasságú húrjainak összehasonlításával és hangolási tapasztalatainkkal.

A (2) formulában a négyzetgyökös kifejezés a húrbeli zavarterjedés sebességét adja meg, az előtte lévő kifejezés pedig geometriai jellemzőjét. A zavarterjedés sebességének megállapítása valójában Vincenzo Galilei lantművész és zeneszerző (Galileo Galilei apja) érdeme, aki Pythagoras után évszázadokkal kezdte újra vizsgálni a húr adottságainak szerepét a hangmagasságban. Kortársa, Marin Mersenne, a szerzetes-polihisztor ismerte eredményeit és ezeket öntötte a fenti formába. Érdekes kitekintés, hogy a mágneses erővonalak mentén terjedő transzverzális zavar sebessége is ilyen alakú, csak a $\sqrt{F/q}$ mechanikai feszültség helyére a mágneses feszültség kifejezését írjuk, ezt Alfvén-sebességnek nevezik.

Harmonikus felhangspektrum

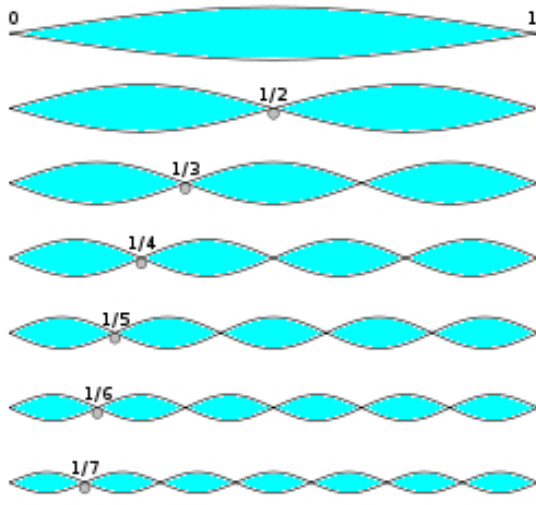


Figure 6: Egy húr 7 első rezgési módusa

sajátfrekvenciákkal a részhangok mind megszólalnak. Az alaphangnak a két végponton kívül nincs csomópontja, az elsőnek egy van és í.t. A legnagyobb kitérésű helyek neve **anticsomópont**.

Így 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 (2)-ből látható. Később látni fogjuk, hogy ilyen spektrumokhoz kapcsolódik hangmagasság-érzésünk. A 6 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, ezeket csomópontok választják el egymástól, melyek két oldalán a szomszédos szakaszok ellentétes fázisban rezegnek. Tudatosítani kell, hogy a csomópontok nincsenek nyugalomban, hanem pl a második módus $1/2$ -jelű csomópontja együtt mozog az első módus kitérésével, csak két oldala oszcillál ellentétes fázisban, vagyis a hangzás során az összes ilyen módus egyszerre működik és a hozzájuk tartozó

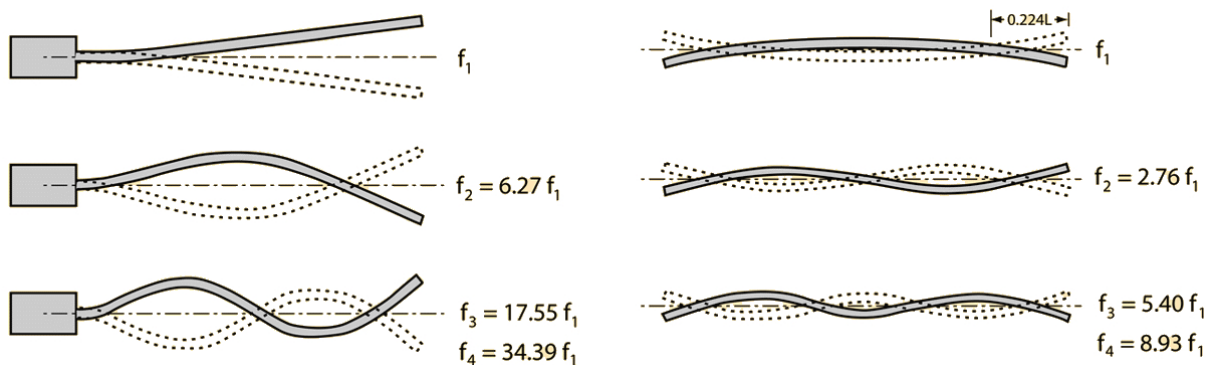


Figure 7: Rudak transzverzális rezgési módusai, balra: egyik végén rögzített, jobbra: mindkét végén szabad

Rudak - Vastagságuk hosszukhoz képest már nem elhanyagolhatóan kicsiny. A húrtól eltérően nem szükséges megfeszíteni, egy pontján befogva és a végét (végeit) kimozdítva megfelelő ellenerőt tanúsít a kimozdítással szemben és rezgést végez – csillapodással. Felhangspektrumuk már általában nem tekinthető harmonikusnak, a felhangsorozat nem mindig egy alaphangfrekvencia egész számú többszöröseit tartalmazza, ezért hozzájuk kötődő hangmagasság-érzésünk sem mindig egyértelmű. Nem feltétlenül kör-keresztmetszerűek, tulajdonképpen a lapok is ide sorolhatók. Többnyire ütőhangszerekben használatosak, de pl a hangvilla is ide tartozik. A 7 ábra mutatja a rezgések csomó- és anticsomópontjait egyik végén rögzített esetben (ilyenek a

hangvilla ágai), illetve mindkét végén szabad rúd rezgése esetén (ilyenek a marimba, vibrafon lemezei).

A rudak frekvenciáinak alábbi formulái nem vizsgakérdések, de tanulságos megemlíteni őket a Mersenne-törvénnyel való összehasonlításához:

$$\text{transzverzális rezgésekre:} \quad f_n = \frac{s_n^2 K}{2l^2 \pi} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\text{longitudinális rezgésekre:} \quad f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\text{torziós rezgésekre:} \quad f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

A formai hasonlóság abban áll, hogy mindhárom esetben a négyzetgyökös kifejezés adja az adott típusú zavarterjedés sebességét a rúdban, a gyök előtti kifejezés pedig a geometriai sajátosságokat, akárcsak a (2) Mersenne-formulában. Itt E a nyújtási modulus (ez határozza meg adott erő esetén a rúdhossz megváltozását), G a torziós modulus (ugyanaz csavarásra), a K a keresztmetszetet jellemző állandó, az s_n értékek pedig elméletileg meghatározott konstansok. Látszik az is, hogy a longitudinális és torziós rezgések felhangjai harmonikus spektrumot alkotnak, az alulfrekvencia egész számú többszöröseiből, de hangforrásként ütés hatására transzverzális rezgések keletkeznek, ezek pedig nem harmonikusak.

Lemezek kétdimenziós rugalmas testek, ezek rezgési módusait már nem csomópontok, hanem csomóvonalak jellemzik, e vonalak két oldalán elhelyezkedő felületdarabok ellentétes fázisban rezegnek. A lemezek szélei szabadok, ezért egy lemez széle nem csomóvonal. Nemcsak ütőhangszerekben használatosak, hanem pl. húros hangszerek hangszugárzóiként is, mivel a húr önmagában halk hangot ad, csak kicsiny levegőtömeget tud megmozgatni, egy nagyobb felületű lemez sokkal többet.

Membránok

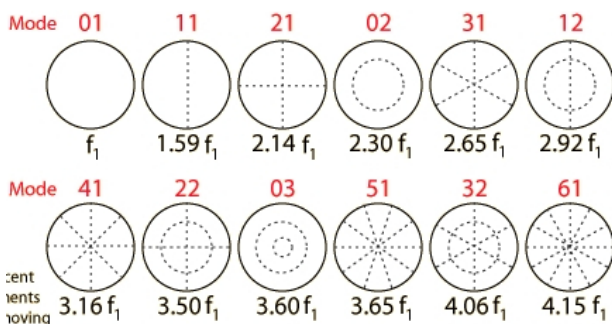


Figure 8: Üstdob-membrán rezgési módusai

láthatók az f_1 alulfrekvenciával kifejezve. A korongok alatti számokból látható, hogy e módusok frekvenciái nem egész számú többszöröse, (tehát nem kétszerese, háromszorosa stb) az alulfrekvenciának, hanem 1.59-szerese, 2.14-szerese, stb, tehát nem alkotnak harmonikus felhangspektrumot. Erre az ütőhangszereknél visszatérünk.

Peremükön rögzített rugalmas hárták, legfontosabb alkalmazásuk a doboknál történik. Az ütődob módusai és a hozzájuk tartozó frekvenciák. A lemezekhez hasonlóan kétdimenziós hangkeltők, itt is csomóvonalak vannak, melyek különböző geometriájúak. A rezgési módusokat számpárok jellemzik, melyek a 8 ábrán 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

Légoszlopok a fúvós hangszerek hangkeltésének eszközei, ideértve a beszédet és éneket is. Az alapvető tényezők a következők: a befúvás helyén periodikus zavart keltünk a hangszere jellemző módon (náddal, ajakkal, stb). Egy elemi zavar egy kicsiny nyomásváltozást jelent, ennek révén egy nyomáshullám végigfut a csővön. A hullám a cső végénél az akusztikai ellenállás (3. 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 befúvás 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, a fejezet elején említett állóhullám. 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 9 ábra mutatja egy **mindkét végén nyitott cső** esetén.

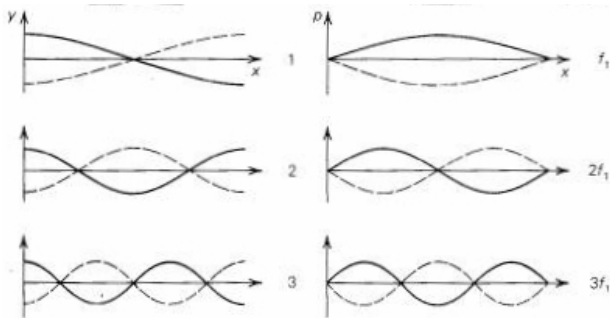


Figure 9: Nyitott cső első három módusa sebesség és nyomás szerint.

jobboldala mutatja összehasonlítva a mindkét végén nyitott csővel (baloldal). Az ábra a sebességingadozások eloszlását mutatja.

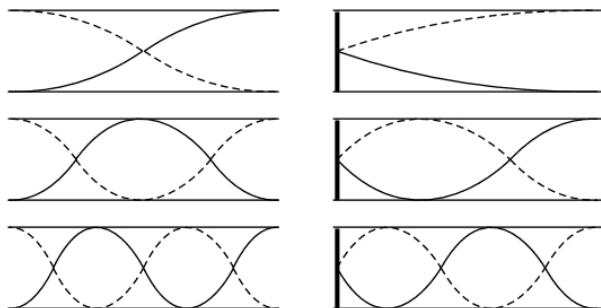


Figure 10: Mindkét végén nyitott és egyik végén zárt cső első három módusa.

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

Az ábra bal oldalán a sebességingadozások cső menti eloszlása látható, a jobb oldalon a nyomás ingadozásáé. 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 anticomópontok. Ahol a sebességingadozásnak csomópontja van, ott a nyomásingadozásnak anticomópontja. Az ábrán látható három módushoz az alaphékvencia és annak 2 és 3-szoros értéke tartozik. Az alaphékvény hullámhossza kétszerese a cső hosszának.

A fúvós hangszerek nagyobb csoportjának egyik vége zárt, azok módusait a 10 ábra végén nyitott csővel (baloldal). Az ábra a

A nyitott végeknél csak sebességingadozás 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 végén pont fordított a helyzet, ott a sebességingadozásnak 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 sebességingadozás-maximum van,

számú többszörösei (bal középső és alsó sor, fél- illetve negyed hullámhossz), a félig zárt 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 fuvolát átfújuk, oktávot kapunk, az alapfrekvencia két-szeresét, ha a klarinétot fújuk át, akkor duodecimát kapunk, vagyis az alapfrekvencia háromszorosát. Ugyanilyen módon alakul a beszédhang formánsstruktúrája is.

A hullámok visszaverődéséről érdemes egy kicsit részletesebben szót ejteni. Utalunk az 5 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° -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° -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 fölötti rövid szakasz, ezekre részletesen visszatérünk.

Helmholtz-rezonátor - az üregrezonátor egyik alkalmazása. Ha a 11 ábrán látható üveggömb b nyílását a fülünkre helyezük, 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

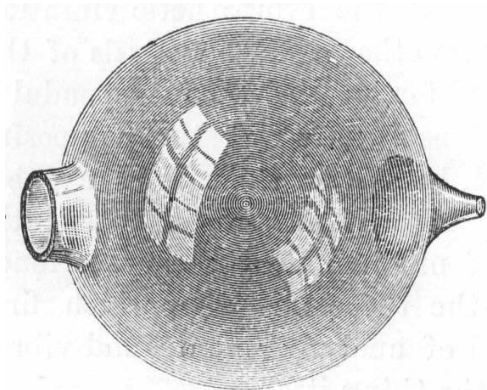


Figure 11: Helmholtz rezonátor

Fourier-elemzésre az elektronika előtti korszakból.

Szemléltető videók:

húr rezgési módusai (hasonlítsuk össze a 6 ábrával):

<https://www.youtube.com/watch?v=BSIW5SgUirg>

egyik végén befogott rúd rezgési módusai (ld. 7 a ábra):

<https://www.youtube.com/watch?v=IKT3wBIUFhA>

membrán rezgési módusai (ld. 8 ábra)

<https://www.youtube.com/watch?v=v4ELxKKT5Rw>

és:

<https://www.youtube.com/watch?v=asr7QfLksGo>

lemez rezgési módusai

<https://www.youtube.com/watch?v=GtiSCBXbHAg>

légoszlop rezgési módusai (Ruben cső)

<https://www.youtube.com/watch?v=pWekXMZJ2zM>

3. 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 zavarkeletés periodikus, akkor hangról beszélünk. Egyetlen hanghullám csak egy robbanás- vagy kattanásként 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:

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

(A Newton: $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/sec}^2$ az erő mértékegysége, a Pa (Pascal) pedig a nyomásé.)

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

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

Hangáram

$$q = v' \cdot S \quad (3)$$

ahol v' a részecskesebesség és S az áramlási keresztmetszet, mértékegysége a sebesség m/sec és a felület m^2 mértékegységéből m^3/sec , ezért angolul *acoustic volume flow* -nak is nevezik.

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

$$I = \frac{E}{t \cdot S} \quad (4)$$

mértékegysége $\text{erg}/(\text{sec} \cdot \text{m}^2)$, más szavakkal a felületegységen áthaladó hangteljesítmény, mértékegysége watt/m^2 .

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

$$P = I \cdot S \quad (5)$$

mértékegysége watt. Egy hangforrás hangteljesítménye az időegységenként minden irányban kibocsátott hangenergia. Példák hangteljesítményre:

$$\begin{aligned} \text{beszéd:} & \quad 10^{-5} \text{ watt} \\ \text{kiáltás:} & \quad 10^{-3} \text{ watt} \\ \text{zongora (fff):} & \quad 10^{-1} \text{ watt} \end{aligned}$$

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

$$Z_a = \frac{p'}{q} \quad (6)$$

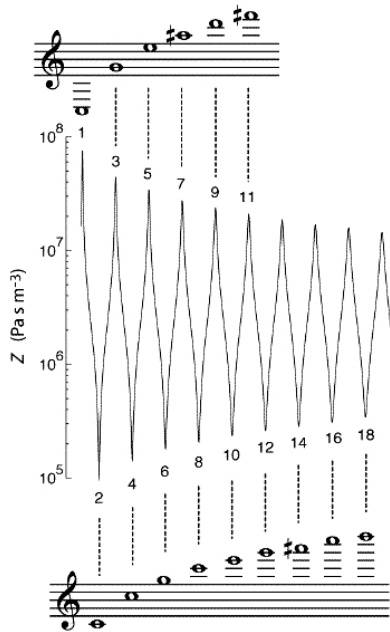


Figure 12: Az akusztikai impedancia sematikus ábrázolása a klarinét (felső kottasor) és fuvola hangjaira.

mértékegysége a nyomás $[N/m^2]$ és hangáram $[m^3/sec]$ mértékegységeiből: $N \cdot sec/m^5$. A fentiek szerint ezt a mértékegységet úgy is írhatjuk, hogy $Pa \cdot sec/m^3$, ezt akusztikai Ohm-nak is nevezik. (6) tanulságos hasonlóságot mutat az elektromos Ohm-törvénnyel, ahol az R ellenállásra, az U feszültségre és I áramerősségre: $R = U/I$. (6)-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 12 ábra mutatja egy 597 mm hosszú csőre. Ha befúvási vége nyitott, ott p' minimális (ld. 10 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.

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

Hangintenzitás-skála – az intenzitás fizikai (watt/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 viszonyát n decibel jellemzi, ahol

$$n = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_2} \quad (7)$$

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 mégis azt halljuk hogy egy hangforrás valamennyi decibel erősségű, akkor ez a humán hallásküszöbön vonatkoztatott értéket jelenti, ld. a 5. 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 szélein 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 E_A elnyelt (abszorbeált), E_R visszavert (reflektált) és átteresztett E_T (transzmittált) hányadára felírhatjuk a következő, energiamegmaradást kifejező mérlegegyenletet:

$$\frac{E_A}{E} + \frac{E_R}{E} + \frac{E_T}{E} \equiv \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (8)$$

Hanggátlásnak nevezzük a hanghullámok visszaverődését, ez tehát megkülönböztetendő a hangelnyeléstől, vagyis az abszorpciótól, termén kívül a (8) mérlegegyenlet szerint alakul a hangenergia.

Utószengés

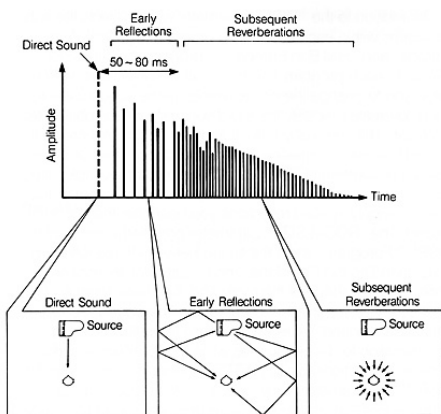


Figure 13: Utószengés kialakulása

Zárt térben a falakról visszaverődő hanghullámok hozzájárulnak zenei élményünk-höz. Egy 100 m hosszúságú hangversenytér 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 hangversenytérben a másodperc törtrésze alatt kialakul egy hang-keverék. A szemantik 13 ábra mutatja a zongorától a hallgatóig eljutó közvetlen hangot, a korai reflexiókat valamint a megsokasodó és összeolvadó reflexiók hatását. Ezt a lecsengő hanghatást nevezzük utószengésnek, ami tehát nem azonos a visszhanggal.

Utószengési idő - vagy reverberációs idő, RT_{60} : a közvetlen hang erősségének 60dB-es csökkenéséhez szükséges idő. A (7)-nél 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 utószengésből a nagyobb frekvenciák hamarabb "kikopnak". Az utószengési idő becslésére a Sabine-féle formula használatos:

$$RT_{60} = \frac{0,164V}{\sum F_i \alpha_i} \quad (9)$$

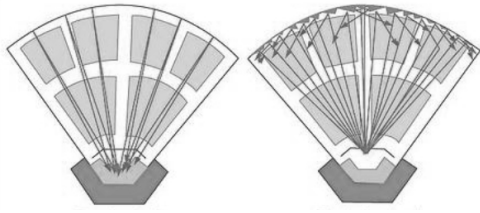


Figure 14: Fókuszáló és szóró kiképzés

Diffuzitás - a térbeli-iránybeli hangenergiael-oszlás egyenletessége, ld a 3.3 ábrát. A baloldali elrendezésben minden visszafókuszálódik a pódiumra, a jobboldali szórófelülettel ellátott kiképzés egyenletesen elosztja a hangenergiát.

Visszhangfok - a visszhangszerű (tehát külön érzékelhető) jelek és az utóztengés aránya. Az utóztengés 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 3.3 ábra bal oldalán szereplő elrendezésben a játékosok felerősítve kapják vissza produkciójukat, miközben a közönség nem kap egyenletes hangzáseloszlást. A jobb oldalon szereplő, diffuzitást növelő falburkolat minden hangversenyteremnek hasznos kelléke, mivel hatékonyá teszi a hangtér energiaeloszlásának egyenletessé tételét.

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

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

Szemléltető videók:

Hosszú és nulla utóztengési idejű szobák összehasonlítása:

<https://www.youtube.com/watch?v=cvr-TRuOzqM>

és:

<https://www.youtube.com/watch?v=zq07ZFMvo-c>

Süketszoba:

<https://www.youtube.com/watch?v=mXVGib3bzHI>

Egy kórusmű nagy utóztengési idejű csarnokban (Berlini Dóm)

<https://www.youtube.com/watch?v=ve-P2Vr2lm8>

4. Pszichoakusztika I. hallás, hangosság

A hallószerv részei és akusztikai szerepük:

1. **Fülkagyló** - szerepe árnyékolás és irányérzékelés.
2. **Külső hallójárat** - Helmholtz-rezonátor kb 3500 Hz-re. Ezen a frekvencián a legérzékenyebb a hallásunk.
3. **Dobhártya** - innen középfül,
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**

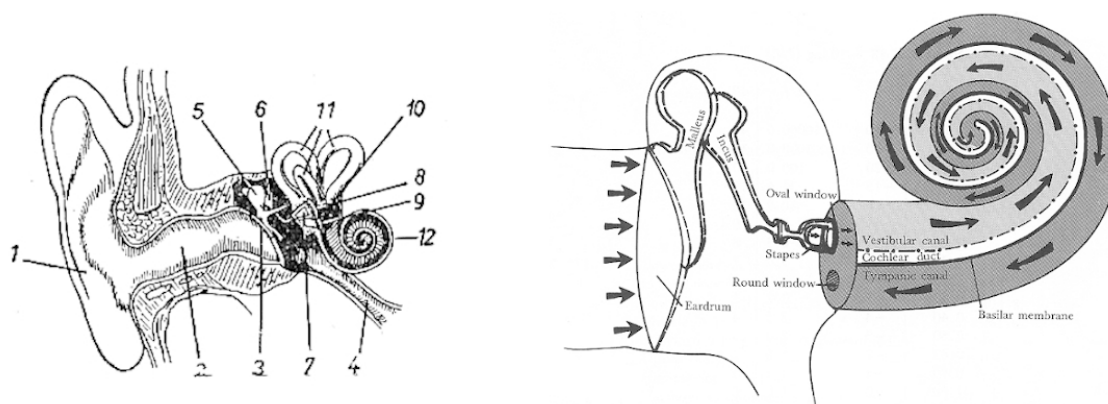


Figure 15: Baloldal: az emberi hallószerv; jobboldal: közép- és belfül.

Dobhártya (ang. Eardrum) érzékeny membrán, kb 55 mm², 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 17 ábra jobb oldalán. 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 hullám-formájú kimozdulást végez, amit a Corti-szerv alakít át elektromos impulzusokká.

Corti-szerv - a hallócsiga mentén végig elhelyezkedő érzékelők, szőrsejtek és fedőhártya együttese. A 16 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 szolgáltatassanak 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-érzékelési tartományát és frekvencia-felbontóképességét.

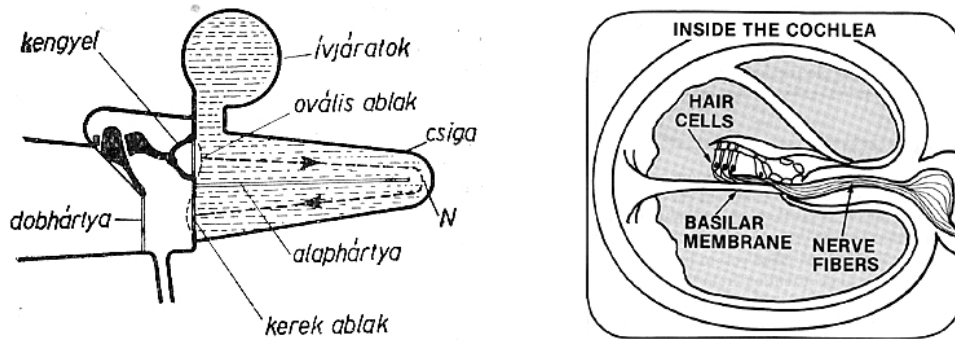


Figure 16: Baloldal: Cochlea; jobboldal: Corti-szerv.

Az alapmembránon létrejövő gerjesztési mechanizmus leírásáért Békésy György Nobel-díjat kapott. A 17 ábra mutatja a létrejövő hullámformákat és pozícióikat különböző frekvenciájú hangok esetén.

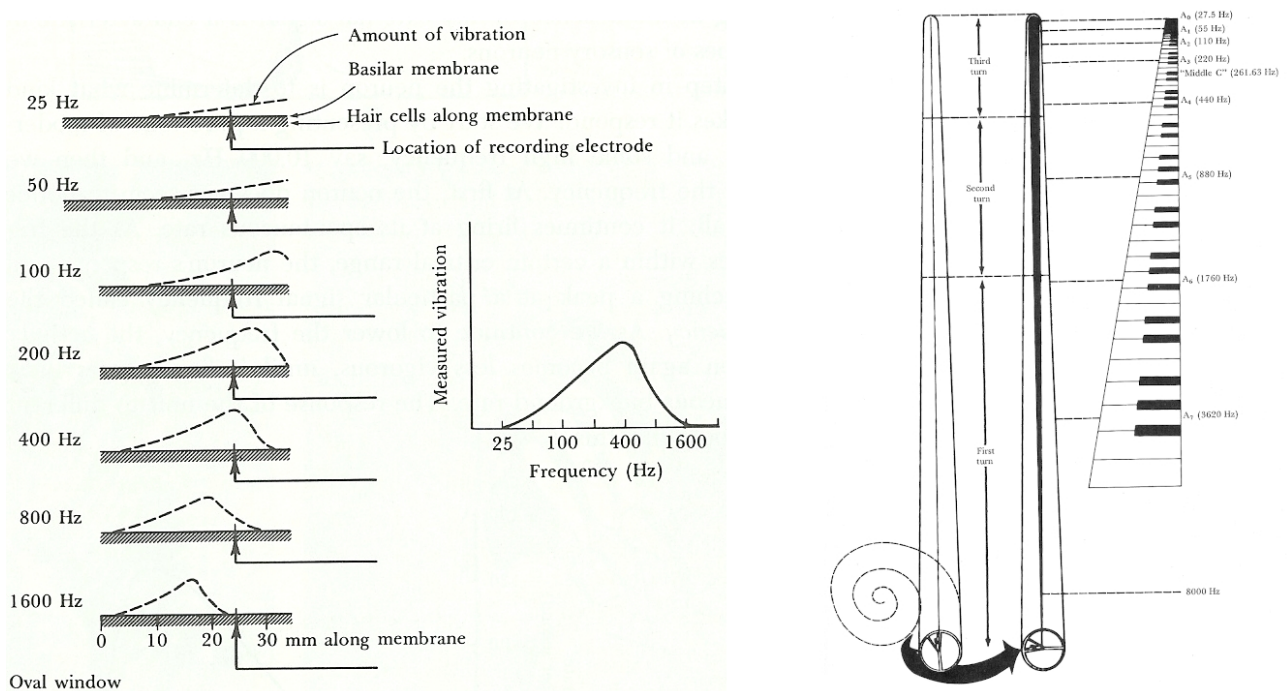


Figure 17: Baloldal: Békésy-féle hullámforma; jobboldal: hangmagasságok érzékelése az alapmembrán mentén.

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 érzékeli 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. 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, a 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).

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 továbbiakban az érzetoldali válaszokkal foglalkozunk.

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

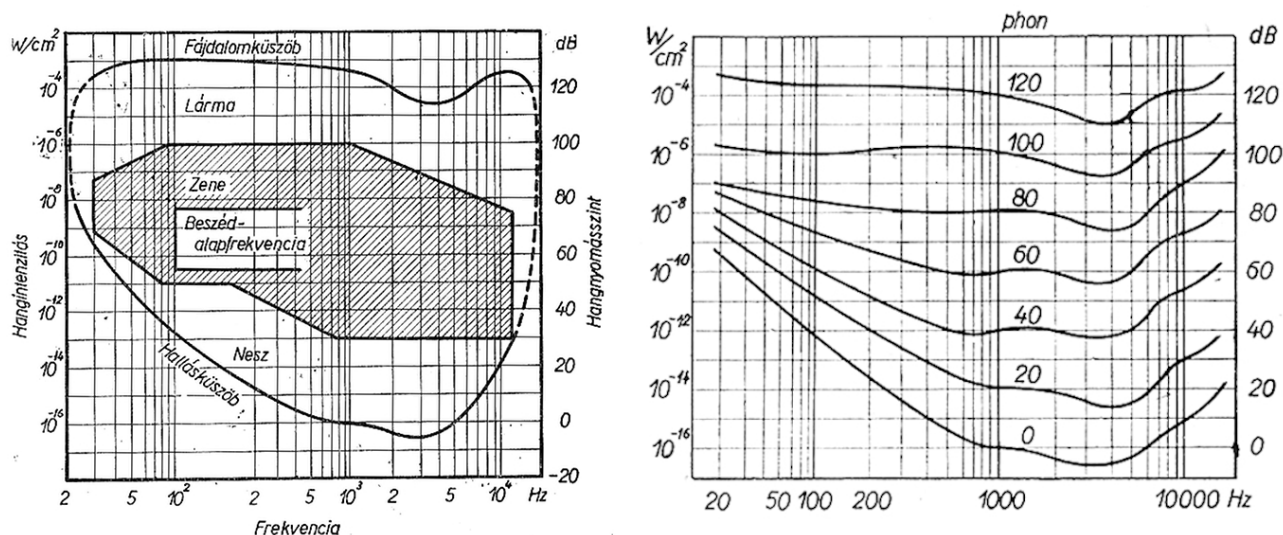


Figure 18: Baloldal: hallástartomány; jobboldal: egyenlő hangosságok görbéi.

A fentiekben említett hallási szerveink és azok sajátosságai egy bizonyos frekvencia- és intenzitástartományban teszik lehetővé a hanghatások kiértékelését, ezek diagramját nevezzük hallástartománynak, ld. a 18 ábrát.

Hallásküszöb az a görbe, mely minden frekvencián megmutatja az éppen érzékelhető hangintenzitást. Jól látható, hogy a legalacsonyabb intenzitást kb 3000 Hz-nél érzékeljük, ahol a külső hallójáratunknak üregrezonanciája van (ld. 2. fejezet). A többi frekvencián rohamosan érzéketlenebb a hallórendszerünk.

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

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 18 ábrán látható, a méréseket olyan műszerrel végzik, mely a mért fizikai hangintenzitás-adatot (ld. a 4 formulát) tetszőleges frekvencián kijelzi, ami itt W/cm^2 mértékegységben szerepel.

A skála rögzítéséhez szükséges mérés-sorozat úgy történt, hogy - önkényesen - kiválasztották az 1000 Hz-es frekvenciát, ami közel van a legérzékenyebb értékhez, majd meghatározták

a 18 ábra bal oldalán látható hallásküszöb-vonalat (ez a 0-val jelzett görbe). Ezután 100-szorosára növelték az 1000 Hz-es frekvenciájú jel intenzitását, (10^{-16} -ról 10^{-14} w/cm² -re) és az alanyoknak azt kellett jelezniük, hogy különböző frekvenciájú hangokat milyen intenzitásértéknél éreztek ugyanolyan hangosnak, mint az 1000 Hz-es jel, ezeket a pontokat összekötve kapták alulról a második görbét.

Decibel-skálán mérve a 100-szoros intenzitás 20 dB emelkedést jelent, ld (7), 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.

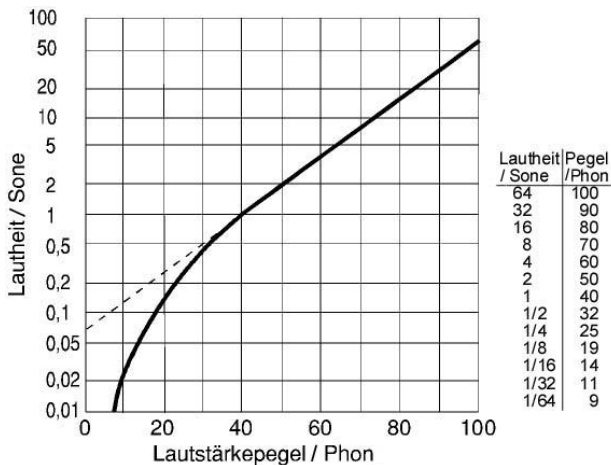


Figure 19: A phon és son skála kapcsolata

rekción ment át, mivel a korábbi mérések hibásnak bizonyultak.

A 3. fejezetben említettük (7)-nél, hogy a decibel viszonyítási mennyiséget jelent, egy konkrét hangintenzitás decibel-értékéről illetve decibel-skáláról csak akkor van értelme beszélni, ha kijelölünk egy nullpontot. A hangosságskála nullpontjául a 18 ábrán szereplő 1000 Hz-es hallhatósági határt választották, ami az ábráról leolvashatóan 10^{-16} w/cm², vagy SI-egységben

$$\text{a hangosság decibel skálájának nullpontja: } 10^{-12} \text{ w/m}^2$$

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

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

Az elfedés a 20 ábra bal oldalán 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.

A phon-skálát a Weber-Fechner pszichofizikai törvény 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 hangintenzításra, 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 19 ábra mutatja. 1 son = 40 phon, a többi értéket a görbe mutatja.

A son-skála sem vált szabvánnyá. Az eredeti phon-skálázási görbesereg is több kor-

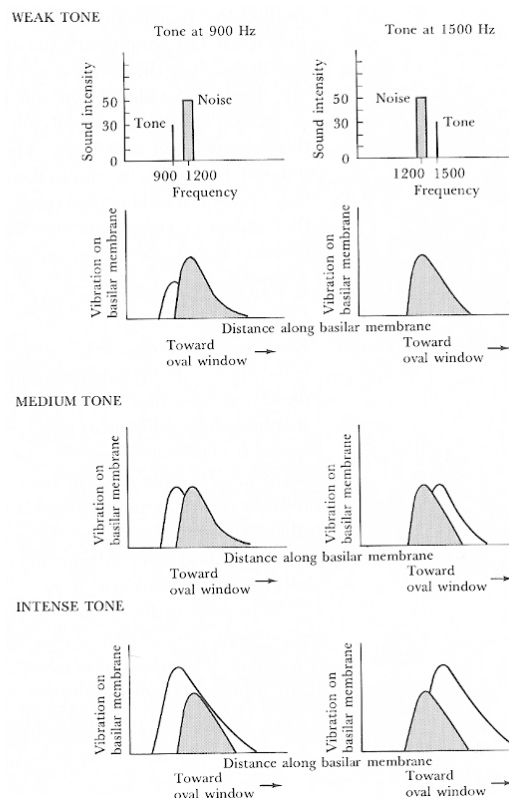
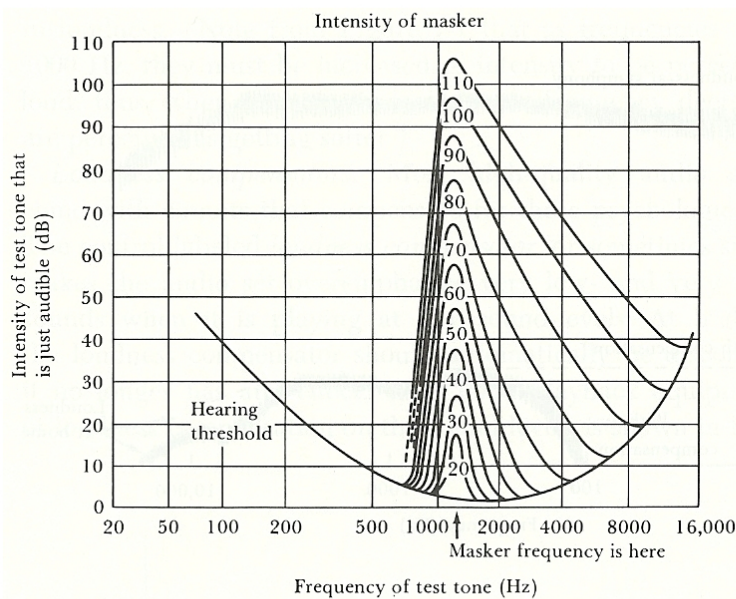


Figure 20: Baloldal: elfedés; jobboldal: az elfedés esetei.

A 20 ábra jobb oldala azt mutatja, mi az érzékelhetősége egy széles-sávú 1200 Hz körüli zaj mellett egy 900 ill. 1500 Hz-es hangnak különböző intenzitásvizonyok mellett. Gondoljunk vissza a 17 ábrára. Az alapmembrán Békésy-hulláma aszimmetrikus, az ovális ablak felé (a 17 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 (tiszta 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 hallhatóak.

Video illusztrációk:

A hallószerv működése

<https://www.youtube.com/watch?v=PeTriGTENoc>

Az alapmembrán gerjesztése különböző frekvenciájú hangokkal:

<https://www.youtube.com/watch?v=fuEswszwFRg>

A Corti-szerv:

<https://www.youtube.com/watch?v=1JE8WduJKV4>

5. Pszichoakusztika II. hangmagasság, irány, idő, hangszín

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. Ha egyszerre szólnak, a jelentkező hangköz-élményünket frekvenciáuk aránya határozza meg, amint azt a 6. fejezet tárgyalja. Ha egymás után szólnak, akkor a melodikus élményünk ettől kissé különbözhet.

Mel-skála

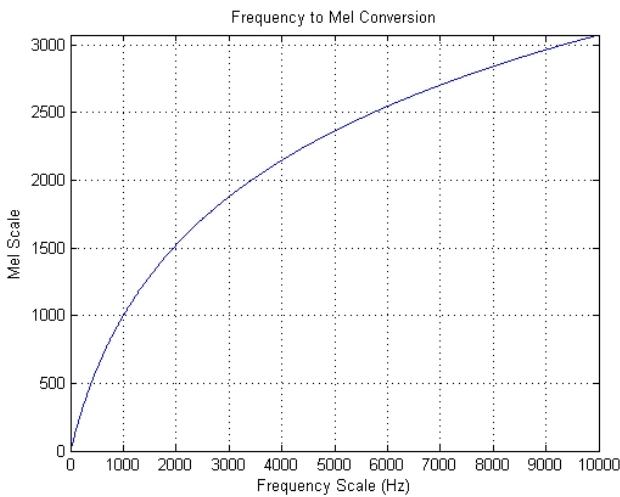


Figure 21: Frekvencia-mel kapcsolat

érezhető különbség (*just noticeable difference - jnd*) jelölése: Δf . 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.

[h]

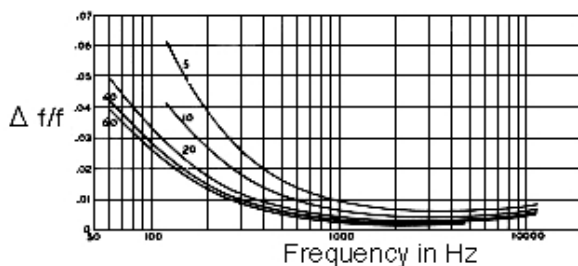


Figure 22: Relatív különbségi küszöb frekvenciafüggése

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 21 ábra szerinti görbét kapjuk. A különböző hangokat egymás után játszunk, a melodikus hangmagasság-élményt 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.

A hangmagasság-különbségnek mindkét (fizikai és pszichofizikai) mérésénél használatos egy legkisebb egység. A fizikainál a legkisebb hangköz-különbséget különbségi küszöbnek nevezik, angol nevének fordítása éppen

A különbségi küszöb nem alkalmas skálázási egységnek, mert frekvenciafüggő. A $\Delta f/f$ hányadost relatív különbségi küszöbnek nevezik, frekvenciafüggését a 22 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 felbontóképességünk rohamosan romlik, amint ezt saját tapasztalatából mindenki ismerheti.

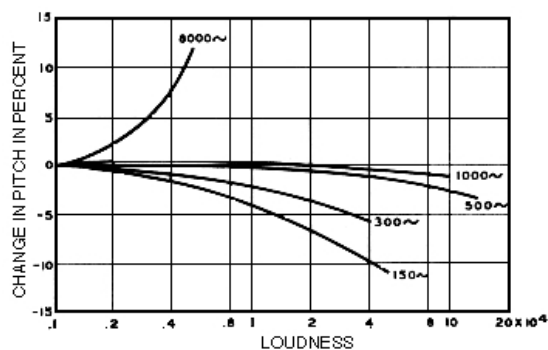


Figure 23: Hangmagasság-hangerősség kapcsolat

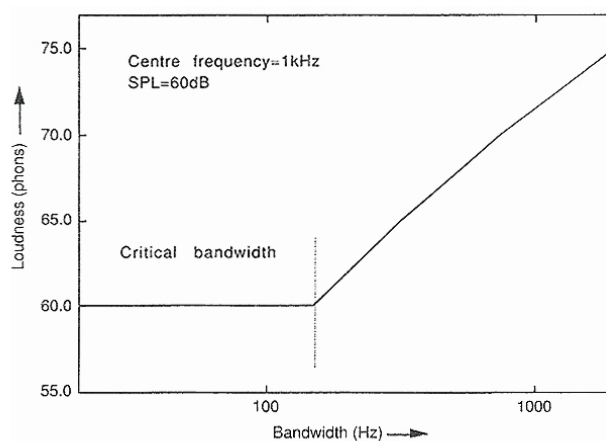
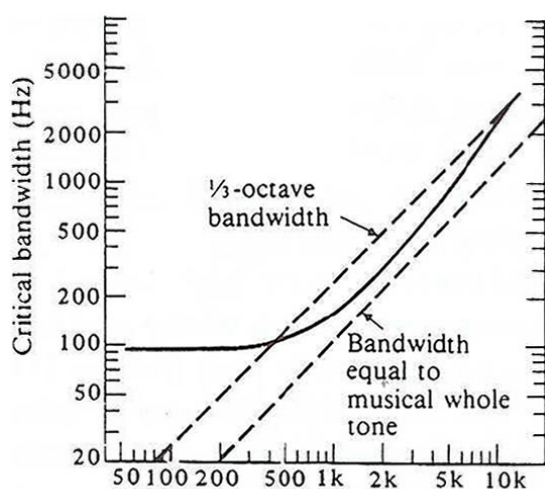


Figure 24: Baloldal: kritikus sávok; jobboldal: hangerőség-sávszélesség összefüggés

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 szól 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 frekvencia-szélessége szintén frekvenciafüggő, ezt a 24 ábra bal oldala mutatja. A sáv az egyvonalas oktávig kb 90 Hz széles, ezután rohamosan szélesedik. Az ábra összehasonlításul az egészhang és a nagyterc közötti frekvenciasávot mutatja.

Egy érdekes sematikus példa látható a 5. 24 ábra jobb oldalán arra, hogyan kell elképzelni a kritikus sávszélesség szerepét. Szóljon egy növekvő frekvenciatávolságú (sávszélességű), 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.

Fentebb láttuk, hogy hangmagasság-ítéletünk nem csak a frekvenciától, hanem a hangerősségtől is függ. Ezt egy másik ábrán is szemléltethetjük, mely 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 tapasztalatából mindenki felidézheti, hogy egy mély hangot erősödéskor mélyülni érzünk, egy nagyon magasat pedig magasodni.

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:

$$1 \text{ Bark} = 100 \text{ mel}$$

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

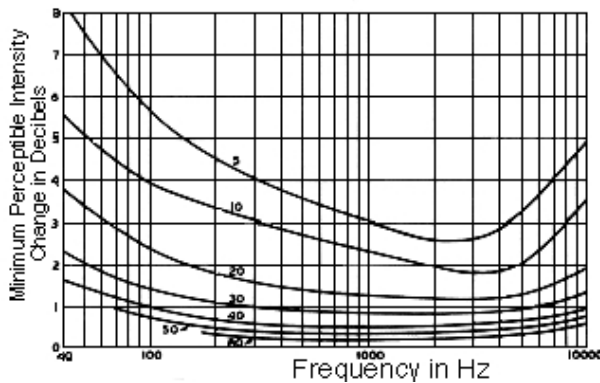


Figure 25: Az érzékelhető intenzitáskülönbség frekvenciafüggése

Irány- és időérzékelés

Irány- és időérzékelésünk szoros összefüggése a hang terjedési sebességén alapul, ezt a 26 ábra segít megérteni.

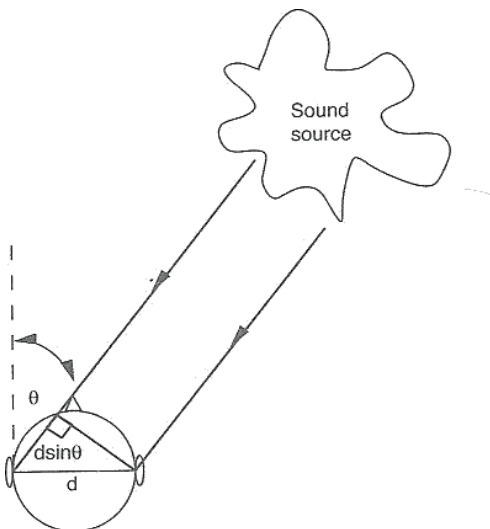


Figure 26: Az irányérzékelés sémája

erősebb a jel, hanem a fej árnyékoló hatása miatt. Mint az akusztika minden pszichofizikai jelensége, ez is frekvencia-függő, a függés módja az 5.8 ábrán látható.

A 25 ábra egy további érzékenység frekvenciafüggését mutatja. Különböző erősségű hangok legkisebb érzékelhető erősség-változása (a fentebb említett jnd-értéke) látható. A görbék feletti számok a hang erősségét mutatják decibelben. Látható, hogy hallásunk itt is a néhány ezer Hertz tartományban a legérzékenyebb, vagyis itt tudjuk érzékelni a legisebb intenzitáskülönbségeket.

Az ábrán a hangforrásból a jobb fülbe érkezik meg hamarabb a hanghullám, a bal fülbe csak

$$\Delta t = \frac{d \cdot \sin \Theta}{c} \quad (10)$$

idővel később, ahol d a két fül távolsága (kb 18 cm), Θ a hangforrás és a tekintet iránya közti különbség (legyen itt 40°) 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.

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

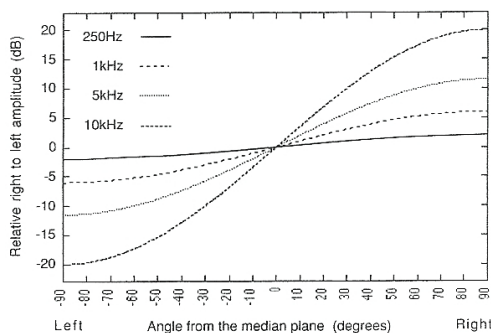


Figure 27: Irány-erősség-frekvencia függés

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 "fülüket botját mozgatják", az náluk a két fülkagyló függetlenségét, irányérzékelő képességük nagyobb hatékonyságát jelenti. Irányérzékelésünk igen fontos eleme a hangversenytermi élménynek. Közelről pl. nagy szög-különbség lehet a vonóskar magas és mély részei között, ami a hangszíninformációval kiegészülve komplex élményt nyújt. A terem végéből nézve a szögekülönbség 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.

Precedencia-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 (10) 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 hangszerek-nél fontos, ahol igen kevés a harmonikus spektrumú hangforrás, de sok esetben mégis van hangmagasság-élményünk, ha vannak a részhangok között az említett tulajdonságúak.

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° -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.

Az irányérzékelés eszköze a fülkagyló is, bekötött szemű, hátrafelé irányított mű-fülkagylóval ellátott személy elől-hátul érzékelése megfordul. A fülkagyló

Példák hangspektrumokra

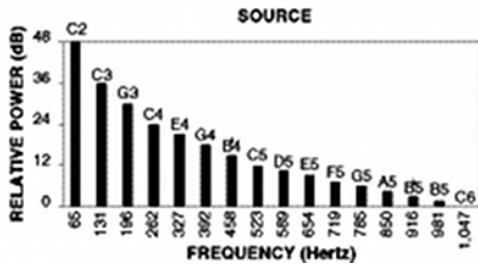


Figure 28: Zongora C-hang spektruma

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 felhangtartalmú, fényes hangzású hangszereknek halljuk.

A sematikus 28. ábra a zongora nagy C (angol nomenklatúrában C2) 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 frekvencia szerinti eloszlások burkológörbéi minden spektrum fontos jellemzői.

Az 29. 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

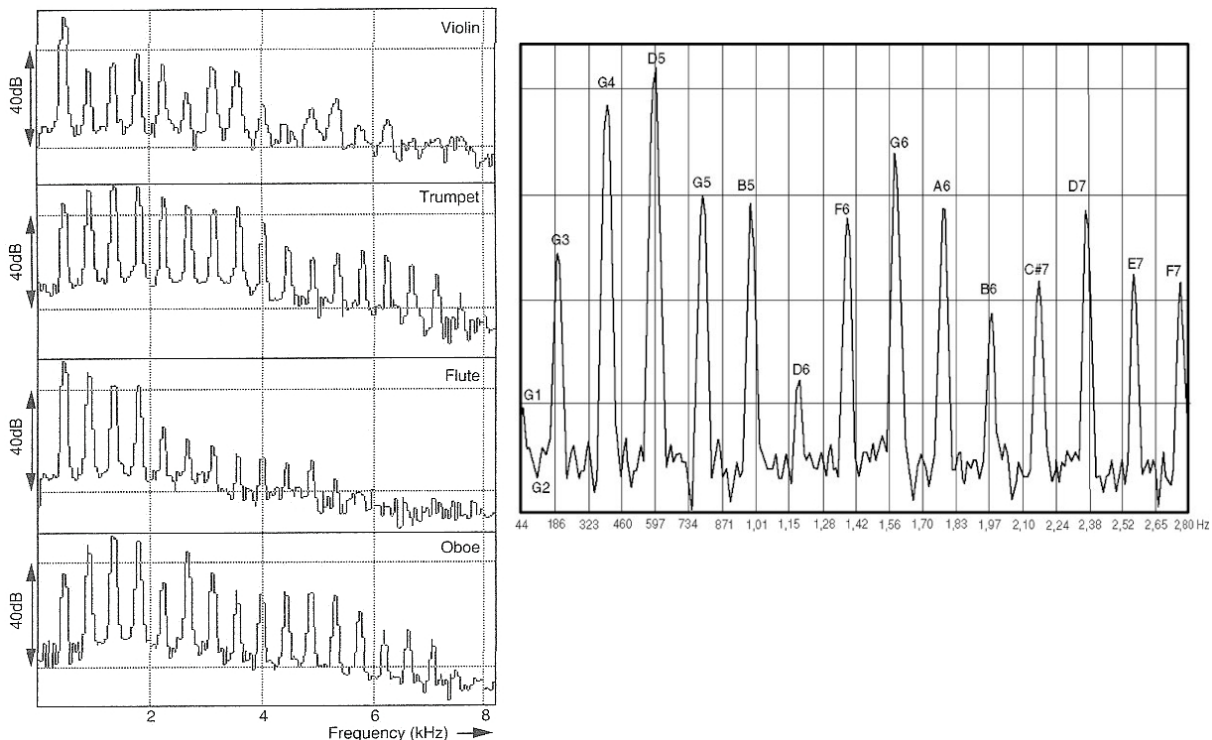


Figure 29: Baloldal: négy hangszer a' hangjának spektruma; jobboldal: hegedű g hang spektruma

A hegedű g húrjának ábrán látható spektrumában az első négy felhang mind erősebb, mint az alaphang, mégis utóbbit halljuk legerősebbnek a fentebb említett okok miatt. E spektrum-sajátság okait a vonósoknál vizsgáljuk.

Formánsok - a hangspektrum burkológörbéjének lokális maximumhelyei. Legismertebb és legfontosabb példák az emberi hang magánhangzó-formánsai, ezek a 9 fejezet témái.

Tranziensek - átmeneti jelenségek. Tapasztalati tény, hogy a hallgatók összetéveszthetik különböző hangszereket, pl. hegedű vagy fuvola hangját, ha elektronikusan játszunk 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 hangszínélményünkhöz:

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.

Konzonancia - diszonancia - 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 konzonanciáját ezért leginkább a klasszikus zene keretében lehet akusztikai eszközökkel vizsgálni

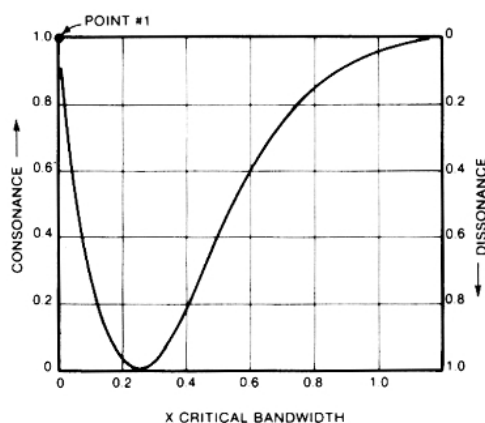


Figure 30: Konzonancia-görbe

Az 30 ábra kísérleti személyek visszajelzései alapján mutatja a konzonancia mértékét két hang között, melyek frekvenciatávolságát változtatták. Látható, hogy a magas (konzonáns) értékeket az unisonohoz, illetve a kritikus sáv szélességből kijutva jelezték vissza. Ez kb a nagyterc távolságában következik be. A kritikus sáv szélességen belül diszonánsnak érezzük az együtthangzást, a 0 érték kb a kissetundhoz esik.

Harmóniak konzonanciája 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 30 ábra szerinti ütközés történhet.

Együtthangzási jelenségek

Lebegés - az 2 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):

$$f_{lebegés} = f_2 - f_1 \quad (11)$$

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 (11) 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 (11)-ban 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 (5.3) 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 (kétszeres 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 tagjaihoz közel kell esniük.
- Emlékeztető: a nagy C harmonikus felhangspektrumának első tizenhárom tagja a felhangok sorszámával:

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 többszöröse, 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 hangot, 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 (ne tévesszen meg bennünket, hogy a zongorán ezt a két hangot ugyanaz a billentyű képviseli), vagyis ha a két említett módon kiszámított hang frekvenciáját elosztjuk egymással, eredményül nem egyet kapunk, hanem:

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

A két (a kvintenként és oktávonként elért) hang frekvenciájának aránya négy tizedesjegy pontossággal 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 a c'' és d'' hangok között, 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, vagy ha nem, akkor milyen kompromisszumokat kell vagy lehet kötni. A legrégebb és legegyszerűbb európai hangsorok csak kevés - négy vagy öt - hangból állnak, mint például a pentaton hangsor, 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):

$$\left(\frac{3}{2}\right)^2 \times \frac{1}{2} = \frac{9}{8} \quad (13)$$

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:

$$\left(\frac{2}{3}\right)^5 \times 2^3 = \frac{256}{243} = 1,0535 \quad (14)$$

Ha ez az arány kicsit nagyobb: $(260/240)$ lenne akkor ez megfelelne 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 együtt hangzását szeretjük nagytercként, vagyis az $(5/4) = (80/64)$ frekvenciaarányt. Ez a pythagorasi nagyterctől $(81/80)$ aránnyal tér el, ez már füllel érzékelhető különbség, ez az ún **didymosi komma**.

II. Aristoxenos-hangrendszer. A didymosi komma kiküszöbölésére az a javaslat született, hogy a nagyterc legyen tiszta, ehhez a pythagorasi második nagyszekundot kisebbre kell venni, $(9/8)$ helyett $(10/9)$ értékűre (ez felel meg a fenti táblázatban a d" - e" hangköznek), a $(256/243)$ frekvenciaarányú pythagorasi kisszekundot pedig ki kell bővíteni $(16/15)$ arányúra. Ha így lépkedünk felfelé, akkor:

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

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 esetben kapunk olyan rendszert, ahol az 1, 4 és 5 fokra épülő hármashangzatok tiszták. A hangsor tehát a következő:

$$\begin{array}{cccccccc} \cdot & \frac{9}{8} & \times & \frac{10}{9} & \times & \frac{16}{15} & \times & \frac{9}{8} & \times & \frac{10}{9} & \times & \frac{9}{8} & \times & \frac{16}{15} \\ 1 & 2 & & 3 & & 4 & & 5 & & 6 & & 7 & & 8 \end{array}$$

Az alsó sor mutatja a hangsor hangjainak sorszámát.

III. Középhangú temperálás. Az aristoxenosi rendszer két különböző nagyszekundja zavaró, ha modulálni szeretnénk, a kvintről induló tetrakord nagyszekund-sorrendje hallhatóan különbözik az első fokról indulótól, ugyanez a helyzet, ha két kvinttel kerülünk távolabb (C-dúrból D-dúrba). 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 lépés (vagyis a keresett kisszekund-frekvenciaarány négyzete) szorzatának pontosan kettőt kell adnia, vagyis az oktáv frekvenciaarányát. A nagyszekundot S-sel, a kisszekundot s-sel jelölve képletben: $S^5 \times s^2 = 2$, vagyis a kisszekund frekvenciaarányát úgy kapjuk meg, hogy az oktávot elosztjuk öt nagyszekunddal, így megkapjuk két kisszekund frekvenciaarányát, amiből négyzetgyököt vonunk:

$$\left(\frac{2}{(5/4)^{5/2}}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{8}{5} \cdot \left(\frac{1}{5}\right)^{\frac{1}{4}} = 1,06998 \quad (16)$$

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 (16) kisszekunddal egyet, a kapott kvint:

$$\left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{8}{5} \cdot \left(\frac{1}{5}\right)^{\frac{1}{4}} = 5^{1/4} = 1,4953 \quad (17)$$

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 az egyvonalas c-ről a háromvonalas 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:

$$\frac{3}{\sqrt{2}} = \left(\frac{81}{80}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

vagyis a fentebb megismert didymosi komma negyedik gyöke, más szóval e hangköz egynevede. 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:

$$\frac{2^7}{5^{11/4}} = 1,5312 \quad (19)$$

A 12-ik kvint már tűrhetetlenül nagyobb, mint a tiszta kvint, az 1,5-től való eltérés mértéke több mint hat és félszerese a (17) szerinti kvint 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-dúrtól (pl a Desz-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 - 12 kisszekundra - és nézzük meg, hogyan alakulnak a számunkra fontos hangközök. E kisszekund frekvenciaaránya hat tizedesjegy pontossággal:

$$2^{1/12} = 1,059463 \quad (20)$$

vagyis a 2 tizenkettedik gyöke, ha ugyanis ezzel a hangközzel tizenkettőt lépünk, tehát a (20) tizenkettedik hatványát vesszük, akkor eljutunk az oktávig. Ez két félhangnyira lévő hang frekvenciájának aránya. Itt érdemes definiálni a következő hangközfogalmat is:

Cent - a félhang századrésze, frekvenciaarányal kifejezve:

$$2^{1/1200} = 1,0005777895 \quad (21)$$

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. Használata azért előnyös, mert egy centnyi különbséget a legérzékenyebb hallású személy sem képes érzékelni, ezért a pszichoakusztikai mérések skálázásánál jól használható egység.

A tizenkét fokú skála rendkívül fontos előnyöket kínál egy néhány csekély kompromisszumért cserébe. A legfontosabb, hogy ebben gyakorlatilag nincs korlátozás a modulációkra, minden hangnem egyforma tisztaságú, vagy pontosabban fogalmazva minden hangnem hangközei egyforma mértékben térnek el a pythagorasi értelemben vett tiszta értékektől. A másik előny, hogy a darabok transzponálhatók.

Tanulságos a hangsorfejlődést zenetörténeti szempontból szemlélni. A pythagorasi rendszer nagyon megfelel az egyszólamú zene tisztaságigényének. Az aristoxenosi rendszerben már szerepelhetnek tiszta akkordok (reneszánsz), a középhangú rendszerben már egy kicsit el lehet távolodni az alaphangnemtől (korai barokk), az egyenletes temperálás pedig felszabadítja a modulációs fantáziát.

A függelékben a hangrendszerek számszerű összehasonlító táblázata található.

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.

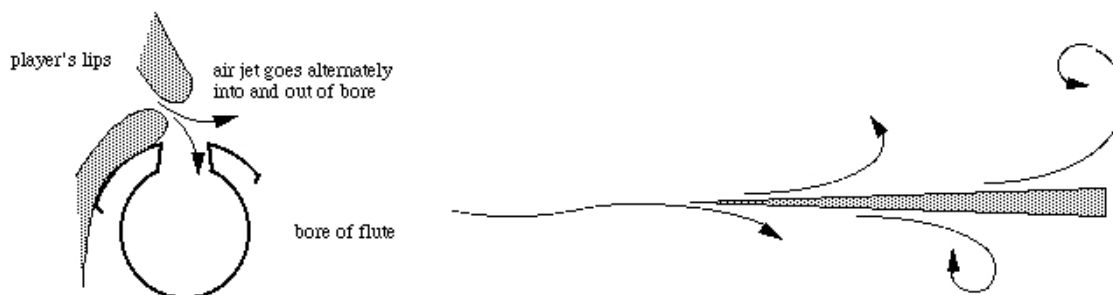


Figure 31: Befúvás a fuvola fejnél és Kármán-örvények

A légoszlop rezgésbe hozásához szükséges zavart itt a befúvónyílás élére fújtt levegőáram idézi elő, az él után a két irányban váltakozva ún Kármán-örvények keletkeznek. Az örvénysor egymást követő tagjai közül az egyik kifelé halad, a következő pedig bejut a csőbe, ahol olyan zavart (nyomáshullámot) kelt, amely végigfut a csövön, majd annak végéről ellenkező fázissal visszaverődik. A visszaverődő nyomáshullám a befúvás helyénél kölcsönhatásba lép a következő Kármán-örvény által keltett nyomásváltozással és ha ez megfelelő időzítéssel történik, akkor a visszafutó, de legyengült nyomáshullám újabb impulzust kap és megerősödve újra a túlsó vég felé halad. Az eseménysor dinamikája emlékeztet a kísérő által mozgásban tartott gyermekhintára, ahol az ingamozgás fenntartásához ütemesen szükséges a hinta szélső helyzetben való meglökése, illetve az, hogy ez a periodikus hatás megfelelő ütemben érkezzon, egyébként az inga leáll. Ez a fúvóshangszerre vonatkoztatva azt a feladatot rója a játékosra, hogy a megszólaltatni kívánt hangnak megfelelő sebességű legyen a befúvás, vagyis a Kármán-örvények frekvenciája, különben ezek nem találkoznak a visszatérő hullámokkal a megfelelő időpontokban és a hangszer nem (jól) szólal meg.

A cső végén kijutó nyomáshullám-sorozatot halljuk zenei hangként, ez veszteséget jelent a hullám számára, amit a visszafutó rész számára a következő örvény pótol. Az oda-vissza futó haladó hullámok kölcsönhatásaként a stabilan megszólaló hang esetén (stacionárius esetben) állóhullám jön létre, ahogy azt a 2. fejezetben említettük. A cső mentén váltakozva található olyan helyek, melyeken a nyomásingadozás maximális illetve minimális, ezek csőmenti pozíciója állandó, vagyis ezek állóhullámok. Ahol nyomásingadozásnak maximuma van, ott a csőirányú sebességingadozásnak minimuma és fordítva. A kialakuló sebesség- és nyomásingadozás struktúráját a 9 ábra mutatja.

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

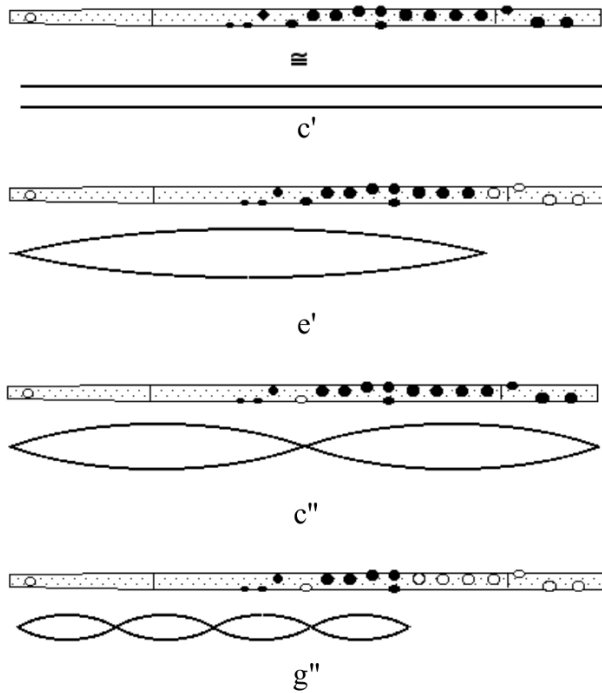


Figure 32: Kereszt-ujjrend (cross-fingering)

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.

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.

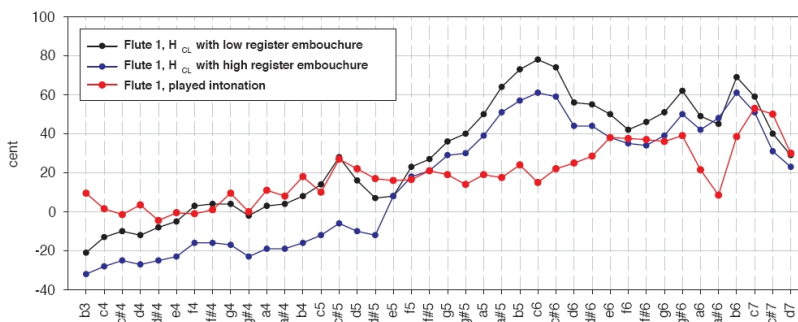


Figure 33: Fuvola intonációs görbéje (Kausel, Kuehnelt 2008)

magas hangok megszólaltatását szolgáló befúvást képviseli. Látható, hogy a magasabb hangok felé egyre nő az eltérés a helyes értékektől, ami gondos befúvási technikával minimalizálható.

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 nyitásának 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.

A fuvola hangszínét a szegény felhangtartalom határozza meg. Utalunk az 29 ábrára, ahol jól ivehető az a sajátosság, hogy a 440 Hz-

A hangszer intonációs nehézségeit illusztrálja a 33 ábra, melyen a hangszeren megszólaltatott hangok eltérései vannak felrajzolva a jól temperált értékektől centekben. A vörös görbe a játékos által korrigált adatokat mutatja, a két másik különböző befúvások értékeit, a fekete görbe alacsony hangok megszólaltatásához alkalmas befúvás esetén mutatja az eltérést, itt a magas hangok nagyon eltérnek a standard értékektől, a kék görbe esete fordított, ez a ma-

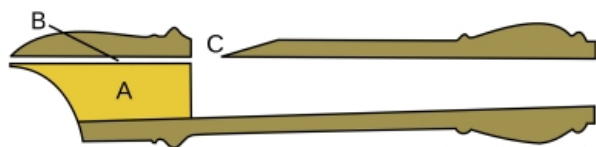


Figure 34: Blockflöte fejrészének metszete

a harántfuvolánál, csak a megfúvás erősségét tudja befolyásolni. Emiatt a hangszer dinamikai tartománya is szűkebb, mint a harántfuvoláé, ahol erősebb befúváshoz 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 34 ábra szerinti eszközzel szólaltathatók meg.

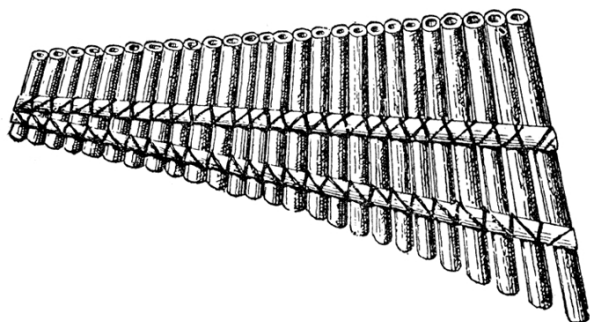


Figure 35: Pánsíp

A zenekarokban ma használatos harántfuvola elődje a Blockflöte (népi változata a fuvulya) jóval egyszerűbb megszólaltatási sajátságokkal rendelkezik, ami azonban a lehetőségeit is korlátozza. A 34 ábrán láthatók a fej részei, a befúvás a B résen keresztül történik, a levegő a C ékre irányul, ahol kialakulnak a Kármán-örvények. A játékos itt nyilván nem tudja megválasztani a befúvás irányát, mint

A fuvola még korábbi elődje a pánsíp, ami bizonyos értelemben az orgona elődjének is tekinthető. A hangszer egy sor félig zárt sípokból álló sorozat, a sípok megszólaltatása a nyitott vég élére való (megfelelő szögű) ráfúvással történik. A különböző magasságú hangok nemcsak a megfelelő síp kiválasztásával, hanem egy síp átfúvásával 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.

Nyelvsípos fafúvósok

Az ajaksípos fuvola mellett a többi fafúvós hangszer nyelvsípos rendszerű. A rezgő légoszlopok leírása a fuvolához hasonló, de a zavarkeltés eszközei a nádsípok. Ezeknél az eszközöknél a Bernoulli-törvény játssza a kulcsszerepet:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = \text{const.} \quad (22)$$

itt ρ a vizsgált gáz (levegő) sűrűsége, v az áramlás sebessége, g a gravitációs gyorsulás, z a magasság, p a nyomás. A jobboldal első tagja a mozgási energia, a második a gravitációs potenciális energia, a p pedig a gáz nyomása. A Bernoulli-egyenlet tulajdonképpen mérlegegyenlet, azt fejezi ki, hogy mivel a fenti szereplők összege állandó, ezért egyikük megváltozása a többiek értékét is megváltoztatja. A potenciális energia itt állandónak tekinthető, tehát ha az áramlás sebessége (az első tag) megnő, vagy a nyugalomban lévő gáz elkezd áramlani, akkor a nyomásnak le kell csökkennie. Ez játszik szerepet a nádsípok rezgésbe hozásánál.

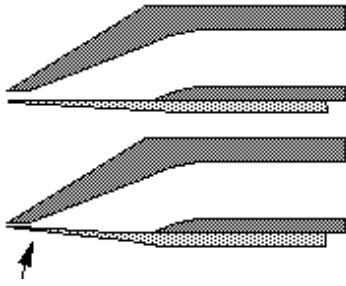


Figure 36: klarinét fúvóka

A klarinét fúvókája egy szimpla nádat tartalmaz, ld az ábrát. A felső rajzon a nád nyitott helyzetben van. A fúvókán áthaladó légáram sebessége miatt a Bernoulli-törvény értelmében a fúvóka belsejében lecsökken a nyomás, a külső nyomás viszont marad az eredeti értéken, tehát felnyomja a nádat, elzárja a légáramot. A nádban azonban rugalmas ellenerő keletkezik, ami visszaállítja eredeti helyzetébe, tehát a csatorna kinyílik és újból a Bernoulli-törvény hatása érvényesül. A nád rezgését, periodikus zárását-nyitását tehát két szereplő váltakozó ellentétes hatása idézi elő. Ez megköveteli a nád megfelelő rugalmasságát. Nagyobb sebességű befúvásnál a nád gyorsabban megkapja az összenyomáshoz szükséges külső nyomást, nagyobb frekvenciával fog rezegni. A klarinét nádjá 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.

Az, hogy a befúvás helye a rezgési periódus egy részében zárt, azt eredményezi, hogy itt a nyomáshullámok feltorlódhatnak, vagyis ez nyomásingadozás maximumhely, más szóval nyomási anticsonópont. Felidézve a 10 ábrát, a klarinét légoszlopa félig zárt, a túlsó vég értelemszerűen nyitott. Az ábra jobb oldalán ábrázolt módusok gerjeszthetők, vagyis a klarinét felhangjainak frekvenciái az alaphangénak páratlan számú többszörösei, átfúváskor nem oktáv jelentkezik, mint a fuvolánál, hanem duodecima. Emlékeztetünk továbbá a 12 ábrára, amely az akusztikai impedancia értékeit mutatja különböző frekvenciákon fuvolára és klarinétára. 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, és mivel a befúvás helyén nyitott, nyomásingadozás nem lehetséges.

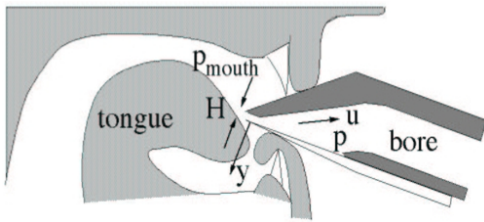


Figure 37: Szájüreg-fúvóka kapcsolat

lép és a csőrezonanciát eltolja. Ezt a játékosbravúrt hallhatjuk a Kék Rapszódia kezdő skálájának glisszandóvá alakulásánál.

A 32 ábrához hasonlóan a klarinéthangok újrendjeit is lehet a nyomáseloszlásokkal szemléltetni. A 38 ábra három hangot mutat be. Az ábra jobb oldala a kemény és lágy nádak közötti különbséget szemlélteti: lágy nádak a magas frekvenciákat csökkentik és gyengébben adják vissza.

A szaxofon a klarinét rokona, Adolph Sax találmánya. Fúvókája, nádjá 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 39. ábra érzékelteti. A szaxofon spektrumában megjelennek a páros számú felhangok is. Erőteljes, karakteres hangzású hangszercsalád.

A nyomáshullám a klarinét csövén végigfutva, majd a végről részben visszaverődve visszaér a nádhoz és kölcsönhatásba lép vele, a stabil hang feltétele a fuvolánál mondottakhoz hasonlóan ennek a csőrezonanciának a létrejötte, vagyis az, hogy a zavar oda-vissza 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.

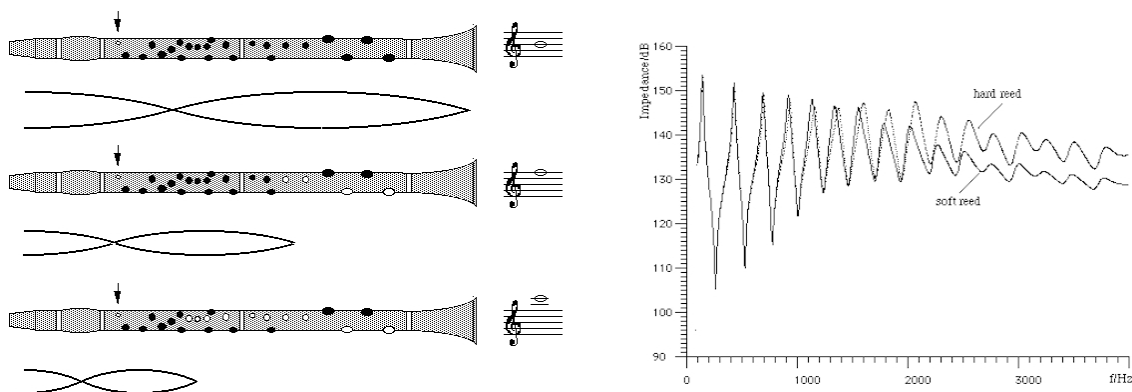


Figure 38: Baloldal: klarinét hangok ujjrendje és a vonatkozó nyomási állóhullámok; jobboldal: klarinét-felhangok impedanciagörbéi kemény (felső görbe) és lágy (alsó görbe) nád esetén.

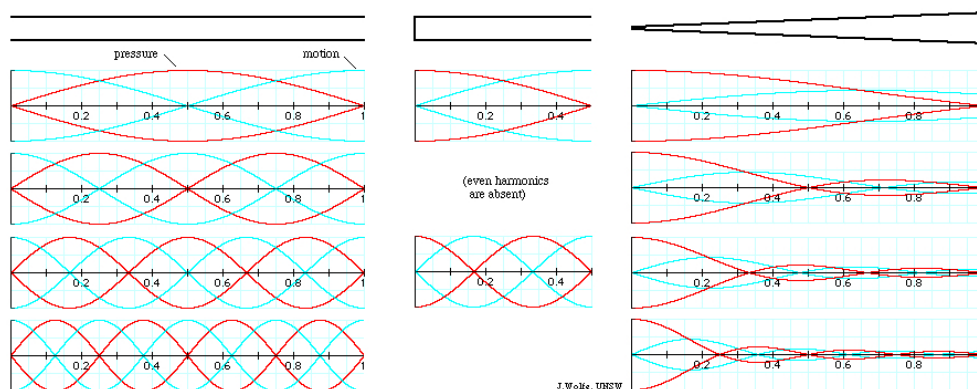


Figure 39: Az ábrán a nyitott, félig zárt és kúpos csövek módusai láthatók. Ez utóbbinál a nyitott vég felé közeledve fokozatosan csökkennek a nyomás-értékek és a nyomás-ingadozáseloszlás különbözik a félig zárt csövétől.

Az oboa dupla nádas hangszer. Itt is a Bernoulli törvény és a nád rugalmassága kényszeríti a lemezkéket 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 angolkiürt.

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.

Illusztrációk a fafúvósokhoz:

Kármán-örvények:

<https://www.youtube.com/watch?v=3mULL6O6f38>

fuvola-klarinét összehasonlítás

<https://www.youtube.com/watch?v=N5Ch2NThFvY>

állóhullámok és harmonikusok

<https://www.youtube.com/watch?v=Ew0fZh9INbQ>

8. Rézfúvós hangszerek, 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 sárgarézrel, 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.

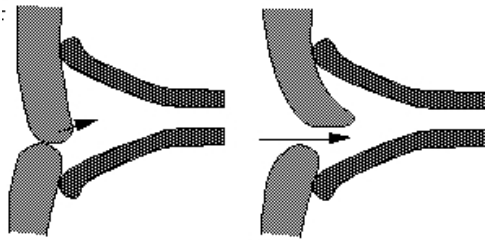


Figure 40: Az ajkak nyitása-zárása

is érzékelteti, hogy a feladat elsősorban a felső ajakra hárul.

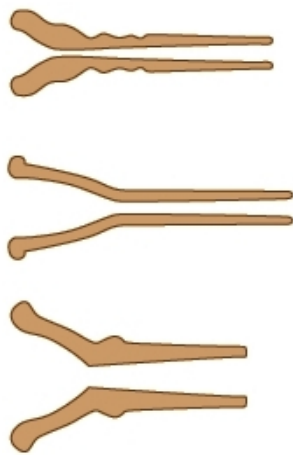


Figure 41: Fúvókák, trombita, kürt, harsona

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 fúvóshangszer megszólaltatásának minősége, különösen a rezeseké. A hangszerekek ajkizomzatán hatalmas a terhelés, de az egész szervezetet is megterheli az, hogy a művelethez nagy akusztikai nyomást kell produkálni. Az ajkak felfekvése és nyitása-zárása a tölcsérszerű fúvókán a sematikus 40 ábrán látható. Az ábra azt

Az egyes hangszerek fúvókái különböző méretűek és alakúak, de közös tulajdonságaik a 41 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 felhangok a többinél jobban kiemelkednek a spektrumból, ez a kiemelkedés az ún. formáns, amire az énekhang tárgyalásánál részletesebben kitérünk.

A rezesek is félig zárt légoszlopú hangszereknek 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 színt kölcsönöz az adott hangszertípus hangjának. A kialakult csőrezonancia, ami az összes fúvós hangszernél a hangképzés feltétele, a rezeseknél is visszahat az ajkak nyitására-zárására.

A rézfúvós hangszerek korai formái a hangszer átfúvásával csak a felhangsor hangjait tudták megszólaltani. Ez egy katonai trombitásnak elég volt arra, hogy a 3-4-5 hangot megfújva egy kvartszext-akkordfelbontást játsszon, de dallamot, pláne kromatikát nem tudott játszani. Az alaphang - melyet pedálhangnak is neveznek - egyébként is nehezen szólaltatható meg és nem kellemes hangzású.

A megoldást a szeleppel ellátott rézfúvósok jelentették. Három szelep működtethető különböző kombinációkban, mindegyik a csőhosszat változtatja valamilyen mértékben. A 42. ábra a három szelepet és a kombinációi révén félhangonként eltolt felhangsorokat mutatja egy C-trombitán. Érdekes gondolatban eljátszani egy skálát a hangkészletek alapján, t.i. kiválasztani a szükséges billentyűkombinációkat, melyekhez persze a játékosnak megfelelő szájfeszültséget is kell hozzárendelni.

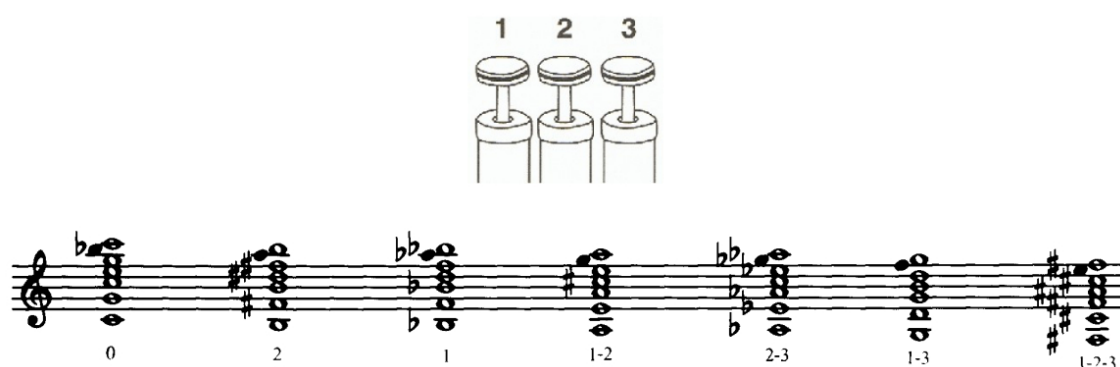


Figure 42: Három szelep és a kombinációik révén előálló felhangkészletek

A szelepekre két megoldás ismeretes, a nyomó- és forgószelep (43. ábrák). Ezek megnyomásra egy további szakaszt iktatnak be a hangszer csövébe. A trombitások szerint a két megoldás a hangváltások gyorsasága ill. simasága szempontjából kissé különbözhet. A harsonának van szelepes változata, de túlnyomó többségük a fenti hét hosszválasztást kézzel eltolt csőszakasszal oldja meg.

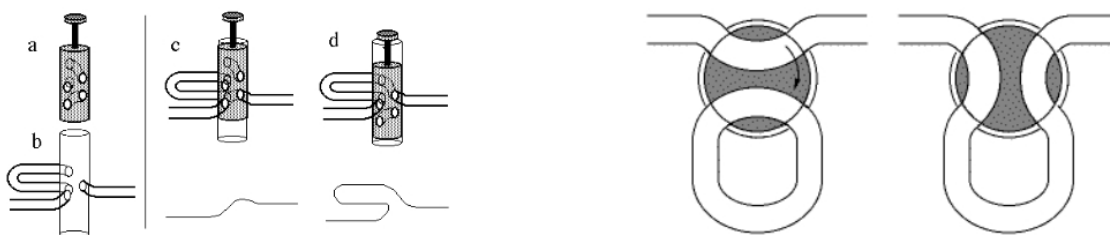


Figure 43: Balra: nyomószelep (piszton), jobbra: forgószelep

A hangszercsalád minden tagja tölcserben végződik. Ennek elsősorban a hangsugárzás szempontjából van jelentősége, meghatározza annak irányeloszlását. Nyilvánvalóan minden esetben a tölcseről kifelé mutató irányban a legintenzívebb a hang. Ez érdekes következménnyel jár a kürtre nézve, mivel ennél a tölcser a játékos háta mögé irányul, ami a kürt hangzását még tovább lágyítja. Egyes esetekben azonban a zenészek éppen ezért előírják a hangszer szokásostól eltérő tartását, ez még klarinétnál is előfordul, a közönség felé irányított kürt pedig a megszokott lágy hangzás helyett erőteljes megszólalást eredményez.

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 végeredmény az, hogy az eredetileg csak páratlan sorszámú (félig 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 besegít.

A tölcséres hangszereknek van egy speciális eszközüik 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 -körüli 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.

Illusztrációk a rézfúvósokhoz:

trombita harmonikus felhangjai és a pedálhang:

<https://www.youtube.com/watch?v=HK-m0rENx00>

harsona:

<https://www.youtube.com/watch?v=C8EmOaYIffs>

rézfúvós szelepek:

<https://www.youtube.com/watch?v=4HTtIV88rPY>

Orgona

Az orgona ősének a pánsípot tarthatjuk, e különböző hosszúságú sípköböl 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 fújtató, mely a pufferként működő kiegyenlítő tartályban a kintnél nagyobb nyomást hoz létre, ez a szélcsatornákon 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. A megszólaltatás módja szerint az orgonasípkok is ajaksípkokra és nyelv sípkokra (44. ábra) oszthatók. Az ajaksíp részei: síptest (Pfeifenkörper), ajak (Labium), felvágás (Aufschnitt), mag (Kern), sípláb (Pfeifenfuß) láblyuk (Fussloch). A sípkok megszólaltatása leginkább a blockflötééhez hasonló, az alulról felfelé áramló levegő a felvágás felső élén kelti a szükséges örvénymintázatot. A hangkeltés eszköze a rezgő légoszlop.

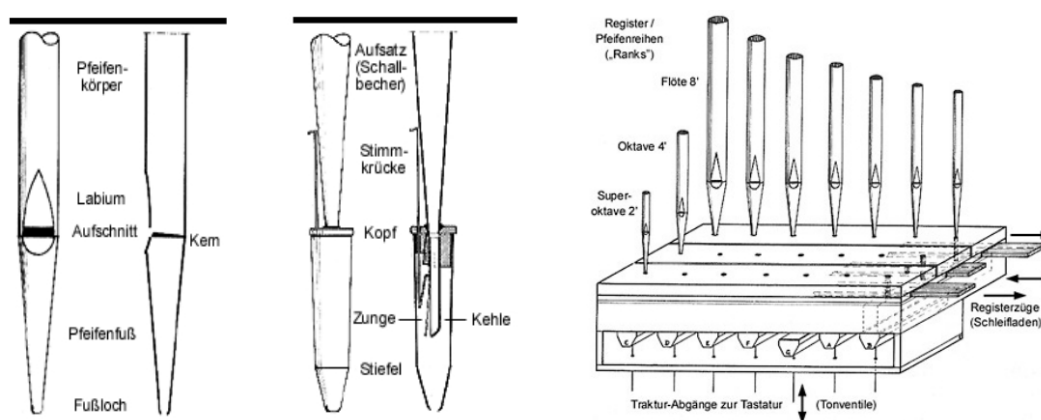


Figure 44: Ajaksíp; nyelv síp; szélláda

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 sípkok hangzása karakteresen különbözik egymástól, de mindkét családon belül nagyszámú, különböző hangszínnű variáns használatos. Ezek közül az ismertebbeket sorolja a 45 ábra. Az első 12 példa ajaksíp, a többi nyelv síp.

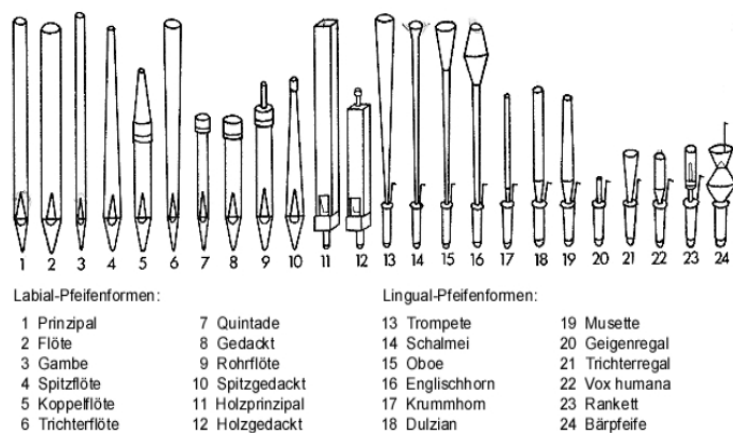


Figure 45: Orgonasíp-típusok

hangok hiányoznak a spektrumából, tehát hangszíne különböző lesz.

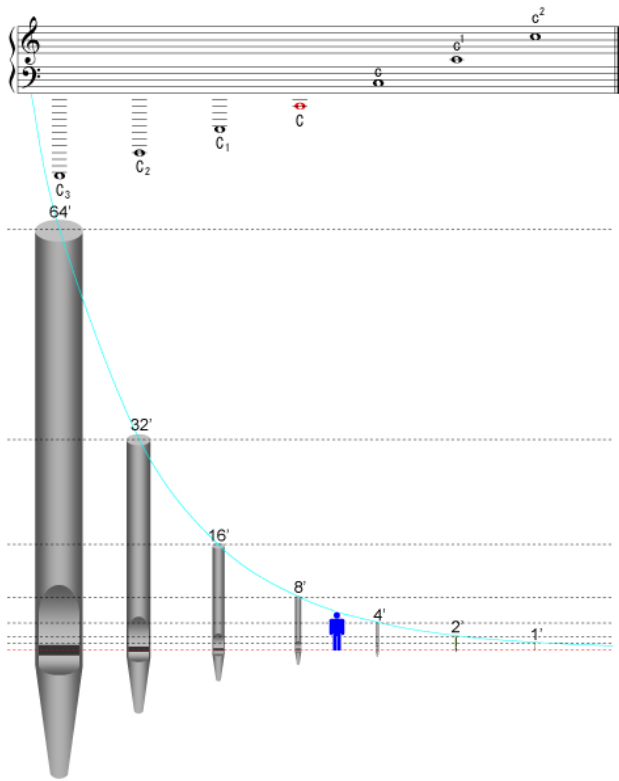


Figure 46: Síp méretek

sípek viszonylagos szélessége nagyobb, a hosszabbaké kisebb. Ennek az az oka, hogy mély hangoknál túl széles sípek 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 45 ábrát) eltolásával végezhető. A nyitott végű sípoknál a 47 ábra szerinti bevágás feltekerése révén változtatható a síphossz. A nyelvcsípők hangolása (44 ábra) a hangolókampó segítségével történik, melyhez a zengő (rezonáns) tölcse is hozzá kell igazítani.

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 47 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

Figure 47: Síp alakítások

látótérszűkítőjéhez hasonló irányító lap. Mivel az orgona ajaksípös 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 tranzienseknél valóban számít a cső anyaga. Utána azonban nem.

Az ajaksípok méretét hagyományosan "láb" -ban adják meg. 1 láb 30 cm-t jelent. Egy sípsort annak a c-sípnak 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 46 ábrát.

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 felhangtartalmaik, fényesebb hangzásúak.

Német orgonakészítők definiáltak egy normálmenzúra mértéket oly módon, hogy a principál regiszter 8 lábas (120 cm) sípjának 156 mm belső átmérőt állapítottak meg, az ettől eltérő hossz-átmérő arányokat ehhez viszonyítják. Egy adott regiszterben a rövidebb

9. Énekhang

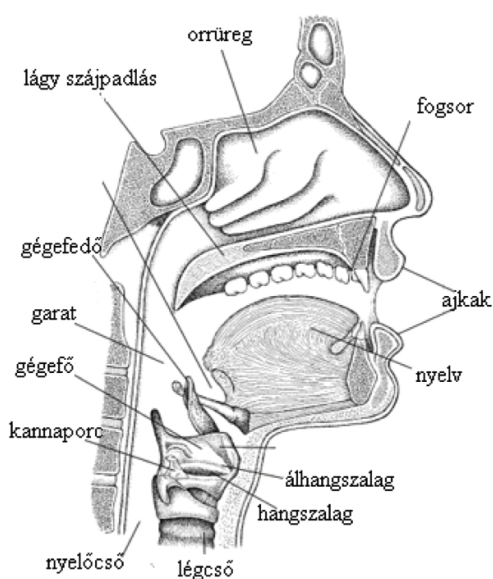


Figure 48: Humán vokális traktus

A 48 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. Hangszer-analógiaként a klarinét kínálkozik, mivel a hangszalag a nádhoz hasonlóan a rezgés periódusának jelentős részében zárva van, ezért a vokális traktus egyik végén zárt lég-oszlopnak 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.

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.

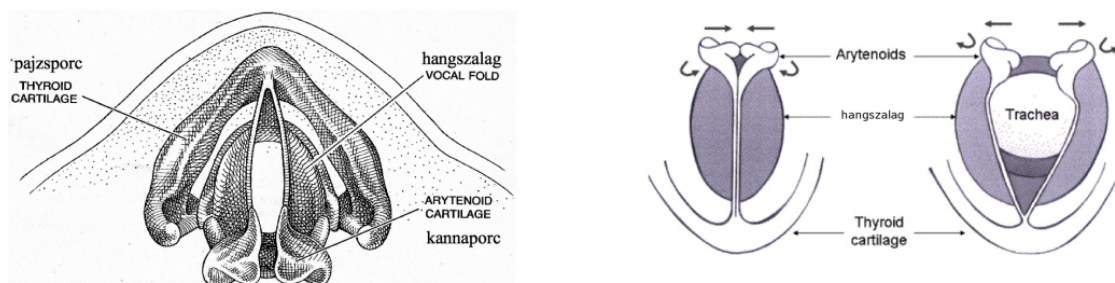


Figure 49: Balra: hangszalag; jobbra: hangszalag zárása-nyitása

A vokális traktus nem a hang magasságát, hanem a spektrumát befolyásolja a következőképpen. Mivel a térrész félig zárt légoszlopnak tekinthető, ezért sajátfrekvenciái az alaphangnak páratlan számú többszörösei. A félig zárt 17.5 cm hosszúságú cső alaphangja (kerekítve) 500 Hz, ez kb az egyvonalas b hangnak felel meg. Az 50 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 átfúvásakor, amint az órán szemléltettük, ez kb a háromvonalas f hang, az alaphang háromszorosán, 1500 Hz -nél. A harmadik felhang kb 2500 Hz-nél található, nyomásminimum-helyeit harmadik sor mutatja. Ezekon a frekvenciákon azonban nem szólalnak meg hangok, csak a spektrum alakját szabják meg a következőképpen.

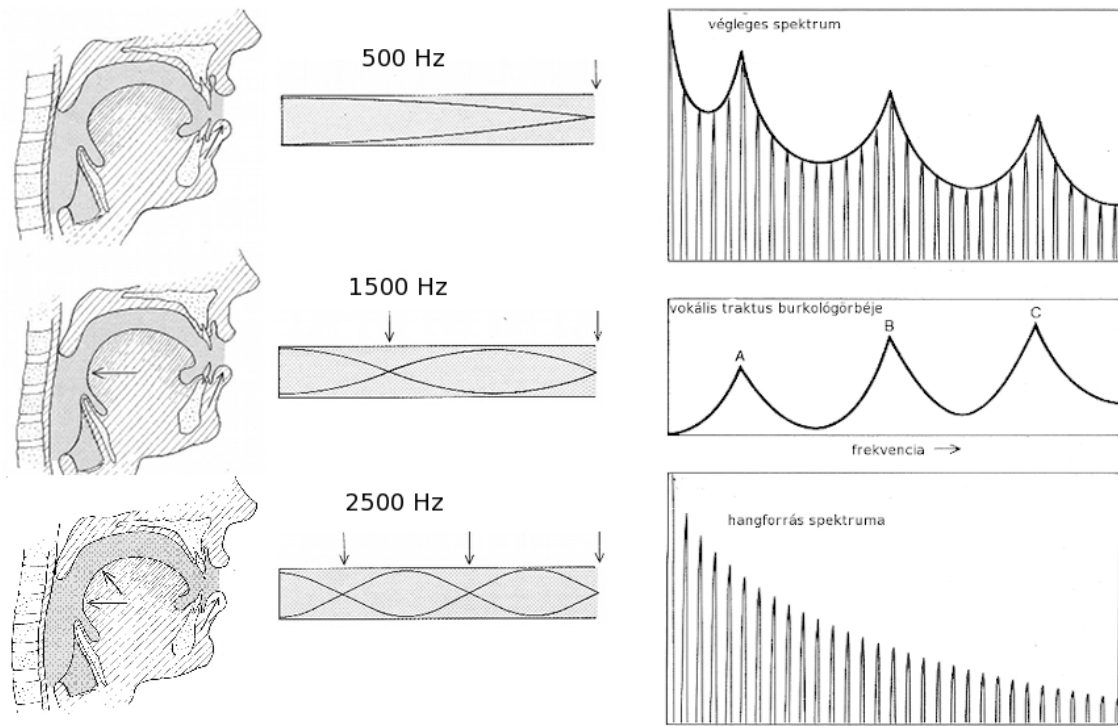


Figure 50: Balra: formánsképzés; jobbra: a formánsok - helyi maximumok - hatása a spektrumra

Az 50 ábrán látható frekvenciákon a vokális traktus átérésztésének maximumhelyei vannak, a spektrum ilyen lokális maximumait formánsoknak nevezzük, ezeket mutatja a sematikus 50 ábra felső középső sora. A hangszalag által kiadott hang (az alaphang és frekvenciájának egész számú többszöröseinél megjelenő részhangok sora) a sematikus 50 ábra jobboldali alsó sorában látható. A jobb középső sorban szereplő átérésztési görbe erre burkológörbéként ráül, az eredményként létrejövő spektrum a jobb 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 megnőnek, ez felgyorsítja a részecskemozgásokat, tehát a frekvencia nő. Ez történik az 50 ábrán nyíljal jelzett helyeknél.

Az emberi beszéd magánhangzóit ezzel a képességünkkel tudjuk formálni és megkülönböztetni. A 51 ábra angol magánhangzók adatait mutatja. Példaképpen a 'heed' szóban ejtett magánhangzónál az első formánst alacsony frekvenciára kell hangolnunk kb 250 Hz-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 50 ábra értékei. Ezeket az elhangolásokat szájnyílásunk méretének és nyelvünk alakjának változtatásával tudjuk elérni. Az 51 ábra jobb oldala 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 éneklés közben változtatja a magánhangzókat, akkor tulajdonképpen menet közben ide-oda tologatja az első két formáns helyét, tehát bizonyos értelemben változtatja a hangszínt.

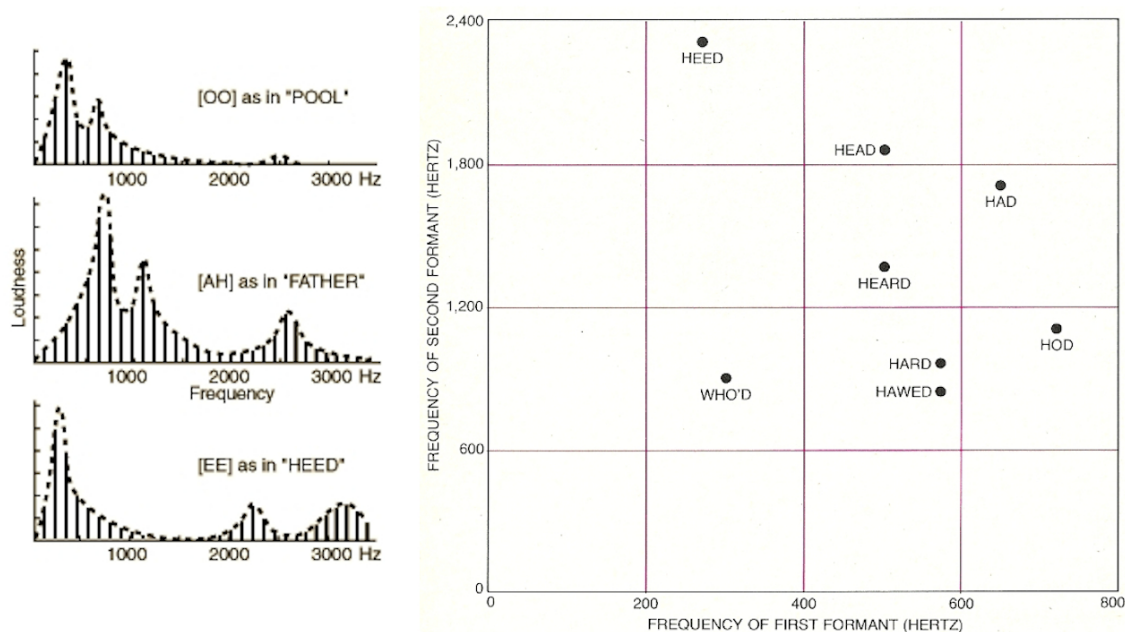


Figure 51: Balra: Magánhangzó-formánsok; jobbra: angol magánhangzók első (vízszintes tengely) és második (függőleges tengely) formánsfrekvenciáinak diagramja.

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 52 ábra bal oldala azt mutatja szematikusan, hogyan kell elképzelnünk a formánsok elhangolásának a szerepét a hangképzésben.

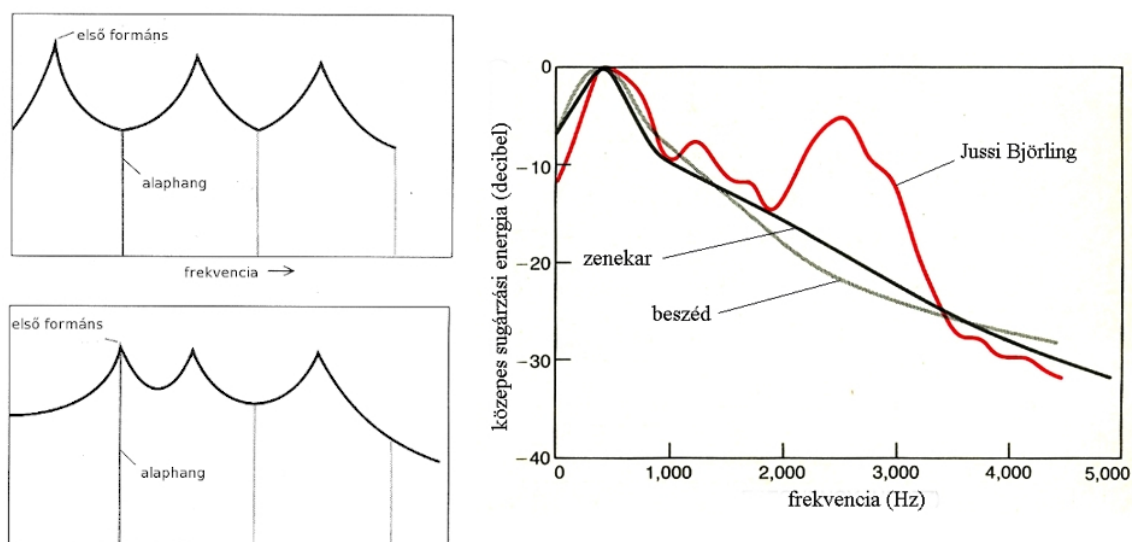


Figure 52: Balra: formáns-hangmagaság illesztés; jobbra: énekes formáns a spektrumon.

Az ábrán függőleges vonalak jelzik a kiénekelte alaphang, valamint a kétszeres-háromszoros frekvenciájú felhangok helyzetét a frekvenciatengelyen. A felső panelen az alaphang az első és második formáns közé esik, láthatóan gyengén szólalhat meg. Az alsó panelen az első formáns 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, akármi van 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.

Még egy akusztikai sajátossága van a vokális traktusnak, melyet az énekesek ki tudnak használni. A 48 ábránál említett kis bekötő szakasz a garatba, része az eddig tárgyalt vokális traktusnak. Az énekesek azonban kellő gyakorlattal meg tudják változtani 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 formánsnak. 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 52 ábra jobb oldala a híres tenor, Jussi Björling hangjának spektrális eloszlását hasonlítja össze egy zenekaréval 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 fejzetnek a fejtegetései részben J.Sundberg úttörő munkáira támaszkodnak, ahogyan az ábrák egy része is tőle származik.

Illusztrációk:

emberi hang

<https://www.youtube.com/watch?v=hKLBjH6C5ns>

<https://www.youtube.com/watch?v=b89RSYCaUBo>

<https://www.youtube.com/watch?v=P2pLJfWUjc8>

<https://www.youtube.com/watch?v=BGX2dc75Js> *jóóóó*

énekes formánsok:

<https://www.youtube.com/watch?v=sx5KNQYYcg>

itt az emelkedő hangmagasságnál látszik, hogy a felharmonikusok ritkábbá válnak, de a magánhangzóra jellemző formáns helyzete megmarad:

<https://www.youtube.com/watch?v=s5ypALATOLiIlist=PLD517BBEE00B11D3C>

10. Zongora

A húros hangszereknek, közöttük az elsőként ismertetett zongorának, van egy közös akusztikai jellegzetessége. A hangkeltő eszközök között zenei szempontból a húrok a legkedvezőbb tulajdonságúak, itt teljesül leginkább az, hogy az alaphang frekvenciájának a mellette megszólaló felhangok frekvenciái az egész számú többszörösei, vagyis harmonikus felhangspektrumot alkotnak, amint azt a (2) Mersenne-törvénynél említettük, valamint a 6 ábrán és a 6. fejezet bevezető táblázatával illusztráltuk. Ez azért fontos sajátság, mert ilyen felhangspektrum szükséges a hangmagasság-érzethez. A húrnak ez az előnyös tulajdonsága a hosszához képes igen kicsiny vastagságának köszönhető, de ez okozza a hátrányát is, mivel vékonysága miatt csak igen kicsiny levegőmennyiséget képes megmozgatni, vagyis magában csak igen halk hangot tud kelteni. A feladat minden húros hangszer esetén az, hogy a húr rezgését egy kétdimenziós felületnek kell átadni, ami már hatékony hangsugárzó.

Mai formájában a húr két végpontja között a 53 ábra bal oldalán látható fontosabb alkatrészek szerepelnek. Az öntöttvas keretnek a húrok mintegy 16 tonnányi feszítő erejét kell megtartania.

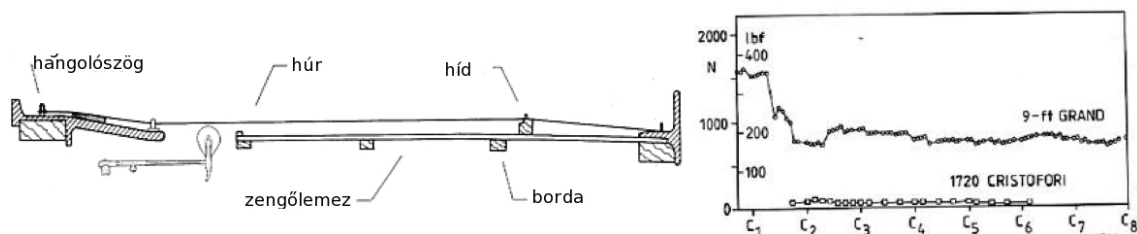


Figure 53: Balra: zongorahúr környezetének keresztmetszete; jobbra: húrok feszítése

A mai páncélzat hatalmas terhet visel és csak megfelelő öntvénykészítési, valamint acélhuzalgyártási technológiák birtokában lehet korszerű zongorákat készíteni. A korai példányok, az első kalapácsos zongora megalkotójának, Bartolomeo Cristoforinak a hangszerei nem is acélhúrokkal, hanem még bélhúrokkal készültek. A 53 ábra jobb oldala mutatja az 1720-beli Cristofori-hangszer és egy mai hanversenyzongora feszítési adatait. Ez utóbbinál a húrok többségének feszítése 1000 Newton közelében van, ami 100 kg körüli hízóerő húronként.

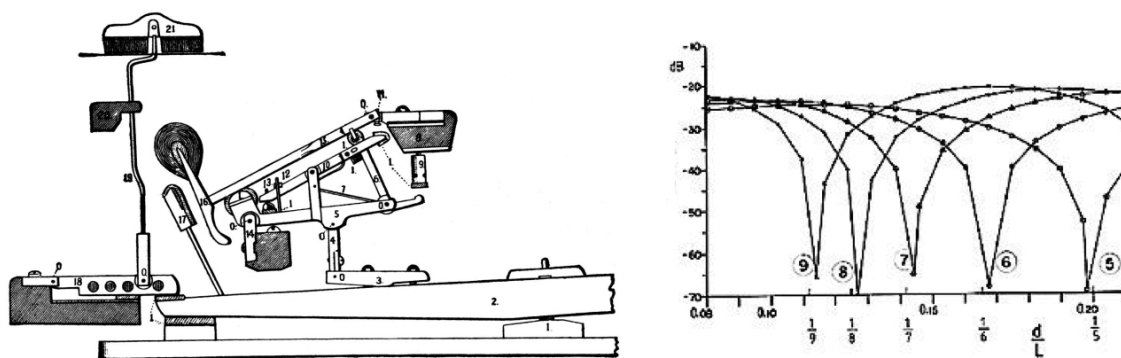


Figure 54: Balra: kalapácsmechanika; jobbra: húr megütési helye

A mai kalapácsmechanika (54 ábra baloldala) 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.

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 54 ábra jobb oldalán látható görbék azt mutatják, hogy a megszólaltatott hang hányadik részhangja (bekarikázott szám) a megütés helye szerint milyen hangos. A húrt egyhetedénél (egynyolcadánál 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 (2) Mersenne törvény. A mélyebb hangok húrjai hosszabbak, meg vannak vastagítva, hogy a mozgó tömegük nagyobb legyen. E húrok is acélból vannak, mert csak azok bírják a feszítést, egyre vastagabban viszont egyre kevésbé felelnének meg az említett vékonysági, vagyis flexibilitási követelménynek. Rézhuzalt tekernek rá, ami húrként nem bírná a feszítést, kinyúlna, viszont fajsúlya nagyobb az acélénál, ami a Mersenne törvény szerint csökkenti a húr frekvenciáját. 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 55 ábrák mutatnak. A bal oldali 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 középső ábrán az látható, hogy hogyan cseng le egyetlen húr. Végül a jobb oldali 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 húrok bonyolult (változó polarizációjú vagyis rezgési síkú) illetve csatolt rezgései alakítják, ez teszi hosszan zengővé a zongorahangot.

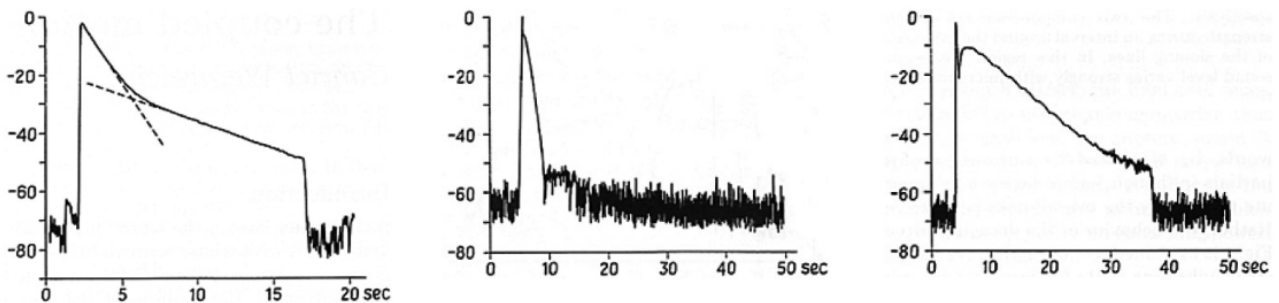


Figure 55: Balra: lecsengés; középen: egyhúros lecsengés; jobbra: kéthúros lecsengés

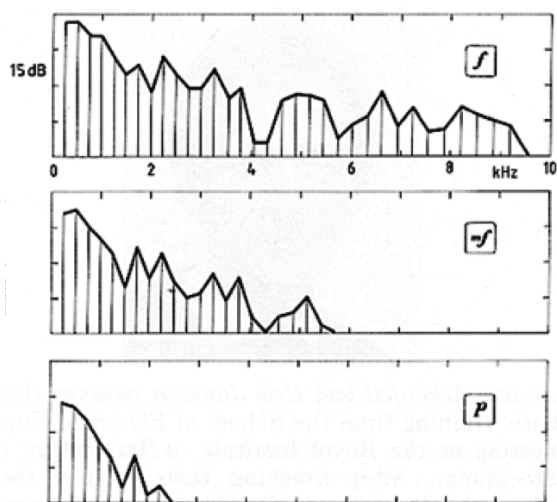


Figure 56: Hangerő-spektrum

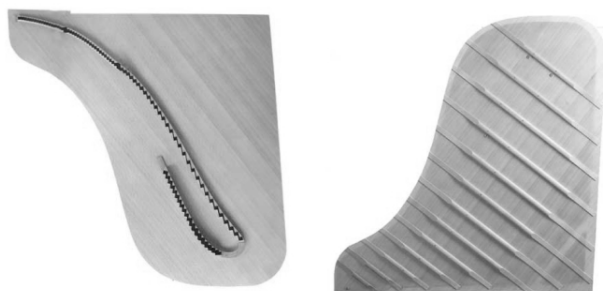


Figure 57: zengőlemez két oldala

Az E dimenziója nyomás jellegű, a fenyő szálirányú értéke kb 12 GPa (Gigapascal), a szálirányra merőlegesé azonban csak kb 0,1 GPa. A szálirányú értékénél vannak nagyobb Young-modulusú keményfák, azonban a szükséges alkalmasságot nem önmagában ez a paraméter, hanem az E/ρ hányados határozza meg, ahol ρ a fa sűrűsége, vagyis a fának nemcsak rugalmasnak, hanem könnyűnek is kell lennie és ez a fenyőre teljesül a legjobban. A szálakra merőleges irányban nemcsak az E kisebb, hanem a zavarterjedési sebesség is kb. huszada a szálirányúnak. A gyors zavarterjedés szükséges a nagy frekvenciák átvitelére (kisugárzási képességére), ezért a lemezt a rostokra merőleges bordázattal látják el, hogy a zavarterjedés ebben az irányban is összemérhető legyen a rost-irányúval, vagyis közel izotróp (irányfüggetlen) legyen. Így tud közel egységes felületként viselkedni hasonlóan az ütőhangszerek membránjához és ennek megfelelően a 8 ábrán látható módusokhoz hasonló rezgési módusokat működtetni. A bordázatnak az erősítő funkciójára is szükség van. A lemez a közepén kb 9 mm vastag, a széleinél elvékonyítják kb 6 mm-re, így a szélei mozgékonyabbak és az egész lemez flexibilisebb.

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, a 54 ábránál említettük, hogy ez elvárás a korszerű kalapácsmechanikával szemben. Ha a kalapács nagy sebességgel üti meg a húrt, 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 56 ábrával szemléltethető. Forte hangzás esetén a magas felhangtartalom erős, ezért ezt csengőnek ércesnek halljuk. Mezzoforte és piano játéknál a felhangtartalom csökken, tehát a hang nemcsak halkabb, hanem ezzel együtt puhább, lágyabb hangszínű is.

A húrok kis hangsugárzó képessége miatt a zongorának is meg kell oldani a hatékony hangsugárzás feladatát, erre szolgál a zengőlemez (melyet egyesek helytelenül rezonánslemeznek hívnak). A 58 ábrán látható a lemezre erősített híd, melyre a húrok ráfeksznek a lemezzel kb 1,5 fokos szögben (ld a 53 ábrát is) és így rezgési energiájukat átadják a lemeznek a hegedű lábjához hasonlóan.

Zengőlemez céljára a lucfenyő a legalkalmasabb több okból. Rugalmasságát az E -vel jelölt Young-modulus jellemzi, ez határozza meg, hogy milyen könnyen hajlítható a lemez.

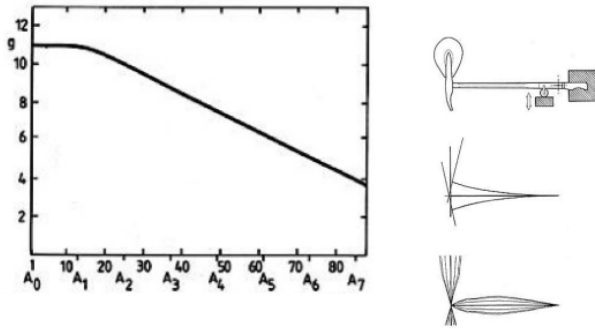


Figure 58: Kalapácsok súlya és a karok rezgése

Ennek az az oka, hogy rugalmas ütközés esetében a hatás-ellenhatás törvény értelmében az energiaátadás akkor optimális, ha a húr tömege megegyezik a kalapács tömegével. A valóságban ettől kis eltérést valósítanak meg, fent nagyobb alul kissé kisebb tömegű kalapáccsal. 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. Kezdetben bőrfelület szerepelt a kalapácson, de ezt később felváltotta a filc, ráadásul két rétegben, hogy a különböző erősségű ütésekre különbözőképpen reagálhasson. A filcfelületet gondosan karban kell tartani fel-lazítással, hogy a felület puhasága ne romoljon. További szempont a kialakításnál, hogy a mély hangok kalapácsainak íve nagyobb görbületi sugarú, mint a magasaké. Ennek az az oka, hogy a rövidebb hullámhosszú magas hangoknak az az előnyös, ha a húr csak igen korlátozott szakaszon hozzuk mozgásba. Ez a szempont a pengetéseknél és a különböző dobütőknél is fel fog merülni.

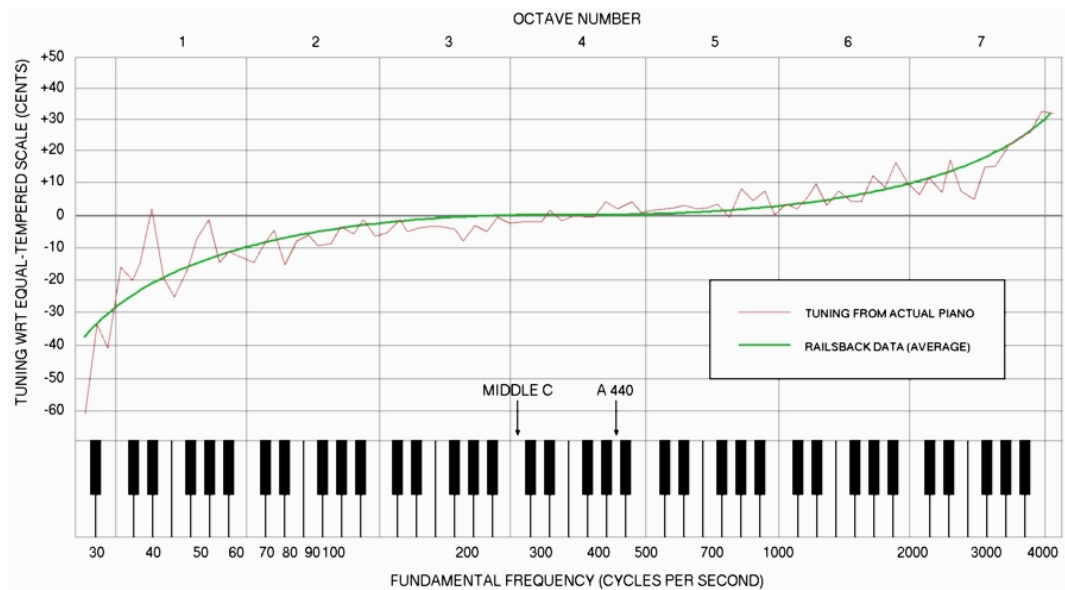


Figure 59: Railsback-diagram, a zongora hangolási görbéje.

A zongora hangolása a húr ideális viselkedése miatt első látásra egyszerű feladatnak tűnhet úgy, hogy a legalsó 'A' hangtól kezdve kétszerezük a frekvenciákat az összes 'a' hang beállításához, aztán ezeket az oktávokat 12 egyenlő részre osztjuk. O.L. Railsback vette észre, hogy a fül után hangolt zongorán az egymás után következő 'a' hangoknak a frekvenciái nem pontosan kétszeresei az előzőknek az egész 88 billentyűs zongorán, a hangolók a számukra kellemes hangzást figyelték. A pontos értékektől való eltérések méréseit, valamint az ezeket képviselő simított görbét az 59 ábra mutatja centekben. Az eltérésnek az az oka, hogy egy húr vastagsága ugyan elhanyagolható a hosszúságához képest, de a magasabb felharmonikusok hullámhosszához mérve egyre kevésbé. Ha összehasonlítjuk a 6 ábra húrmódusait a 7 ábra rúdmodusaival, akkor érthetővé válik, hogy a rudak a vastagságuk miatt merevebbek, rugalmatlanabbak, ezért rövid távon nagyobb ellenállást tanúsítanak a görbültséggel szemben, ami a magas (rövid

hullámhosszú) felharmonikusok frekvenciáját kissé megemeli. Ez azzal jár, hogy a közepén lévő húrok magas rendszámú felhangjai nem lesznek azonos frekvenciájúak a pontosan hangolt magas húrok alaphangjával és lebegés lép fel. Ezért a jó hangzás érdekében a magas húrokat kissé felfelé kell hangolni és ugyanilyen okok miatt lefelé kell eltolni a mély húrok alaphangjait, hiszen ezek vastagsága meg van növelve, ami csökkenti a hajlékonyságukat. Ezért nem lehet az egész zongorát műszerrel hangolni.

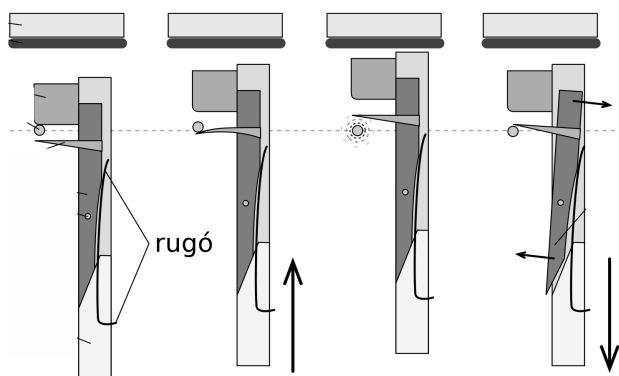


Figure 60: Csembaló mechanika

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 60 ábrán látható pengetőeszköz egy függőlegesen megemelő rúdon tartalmaz egy tengely körül elforduló nyelvet, erre merőleges a pengető tű. Megemeléskor a tű megpendíti a húrt, majd fölé kerül. Visszaengedéskor a nyelv a tengely körül hátrahajlik, engedi a pengetőtűt szabadon a húr alá kerülni, majd egy laprugó visszaállítja azt a pozíciót, mely újbóli emeléskor ismét lehetővé teszi a pengetést.

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 regisztert is építhettek bele.

Illusztrációk:

<https://www.youtube.com/watch?v=vFXBIFyG4tU>

<https://www.youtube.com/watch?v=XthnCDTnAGw>

11. Vonós és pengetős hangszerek

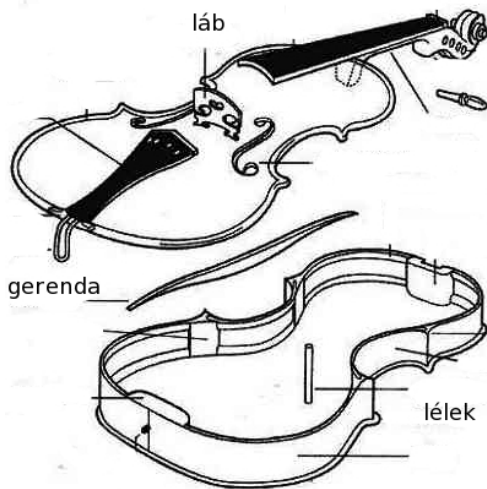


Figure 61: A hegedű részei

A vonóscsalád legfontosabb tagja természetesen a Stradivari-korszak idejére kikristályosodott hegedű, melynek fontosabb alkotó részeit a 61 ábra mutatja. A hangkeltés eszköze a húr (ld a 1. fejezetet, Mersenne-törvény stb). A húr kedvező tulajdonságát a zongoráról szóló fejezetben állítottuk szembe a hátrányával: gyenge hangsugárzó képességével. A vonósoknál ezt a feladatot elsősorban a tető végzi, 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 húr irányja a lánál megtörik olyan szögben, hogy a tetőre kb 10 kg terhelés jut, így jut a húr rezgési energiája a felső lapra.

A húr mozgásának leírása Helmholtz nevéhez fűződik, ő fogalmazta meg a 62 ábra bal felső szegmensében látható elképzelést, hogy a vonó által keltett zavar milyen formában terjed a két végpont között.

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 ellenerő. Egy bizonyos kitérésnél ez utóbbi nagyobb és a húr elválik a vonótól, a csúszási súrlódási erő már kisebb, mint a tapadási, amit minden szánkó-húzó megtapasztalhatott már. Ezután a kitérés, mint zavar, az ábrán látható módon végigfut a húr mentén, a végén ellenkező fázissal visszafordul. Az ábra az alaplómódust mutatja, a magasabb módusok hasonlóan alakulnak.

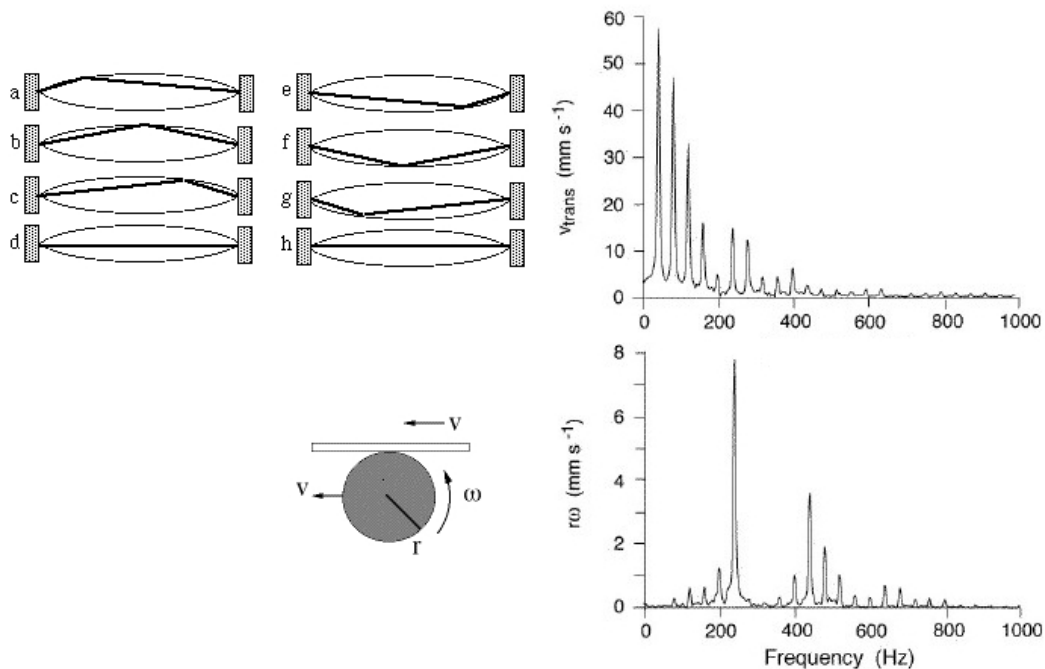


Figure 62: A hegedűhúr transzverzális és torziós mozgása (baloldalt) és a megfelelő spektrumok (jobbaldalt).

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

Az így létrejövő rezgéseknek a spektruma a transzverzális hullámokéhoz (62 ábra jobb felső panel) hasonlóan szintén harmonikus, de jellemző frekvenciaértékei azokénál magasabbak (jobb alsó panel). Ennek az az oka, hogy a torziós zavarral szemben nagyobb visszatérítő erő lép fel, mint a transzverzálissal szemben. Érdekes 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 keletkezhet, ha a vonómozgás húrirányú, az ilyenkor fellépő 'nyávogó' hang a magas frekvenciájú tartományban keletkezik.

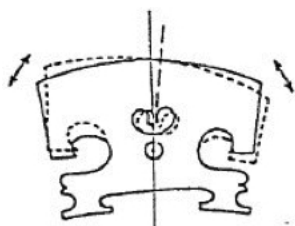


Figure 63: Hegedűláb

A húrok rezgésének energiáját a hangszer lába továbbítja a tetőre. A láb nem egyszerű közvetítő, akusztikai sajátosságai fontosak. Kemény fából készül, tömege 2-3 gramm. Amint később látni fogjuk, 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. Ez érdekes egybeesést mutat a külső hallójárat Helmholtz-frekvenciájával, valamint az énekes formáns frekvenciacsúcsával, melyeket a korábbi fejezetekben ismertettünk. Egyesek hajlanak arra a vélekedésre, hogy a hegedű 'éneklo' hangja mögött ez a hasonlóság lehet a magyarázat.

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



Figure 64: Chladni -mintázat

A tető és a hát - hasonlóan a zongora zengőlapjához - nem rezonáns-lemezként működik, de természetesen megvannak a saját frekvenciái, melyek hangolhatóak. A mérés a gyakorlatban kopogtatással-hallgatással történik, többnyire nem műszeresen, de a 64 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.

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 (hegedűn g) azonban a hangszer hosszában a 'gerenda' nevű alátámasztás van, ennek hajlítás rezgései alacsonyabb frekvenciájúak, jobban megfelelnek a mély hangú tartománynak.

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 az 5. fejezet 29 ábrájának jellegzetessége mögött. 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. Ennek ellenére a g-hangot halljuk alaphangként.

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.

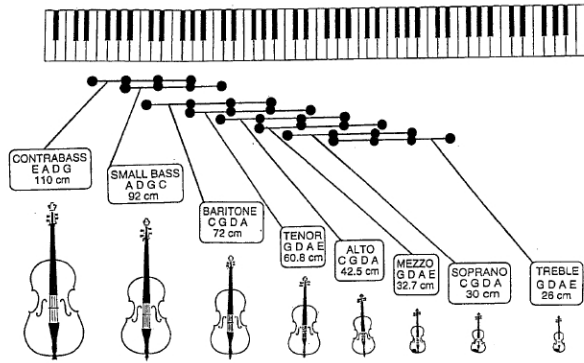


Figure 65: Catgut hangszercsalád

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 sugárzáshoz felfelé, ami tekintettel az alacsony frekvenciákra szétterül.

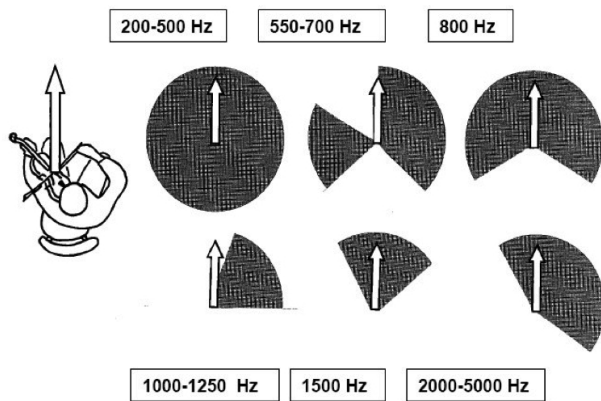


Figure 66: A hegedű iránykarakterisztikája

a vonóshangszer-lélek szerepéhez, mely 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 feladata a léleknek, hogy hosszirányban a lehető legnagyobb ellenállást tanúsítsa az összenyomással szemben.

A jó hangzású hegedűkre vonatkozó mérések inspirálták az amerikai 'Catgut' társaság hangszerait. 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 hangszerrel is készültek, akusztikailag igazolták is a várakozásokat, de nem váltak be, mert több tagjukon nem lehet jól játszani a méreteik miatt. Érdekes példa a brácsaé, melynek tetőlemezét lehet megfelelően hangolni, a test méretének azonban túl nagy-nak kellene lennie. Ezért a brácsa mindig halványabb lesz a hegedűnél.

Az összes hangszerénél, így a vonósoknál is igen fontos az, hogy milyen irányban sugároznak jól. Ezt fejezi ki a hangszer iránykarakterisztikája, mely a hegedűre a 66 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, mely 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 feladata 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.

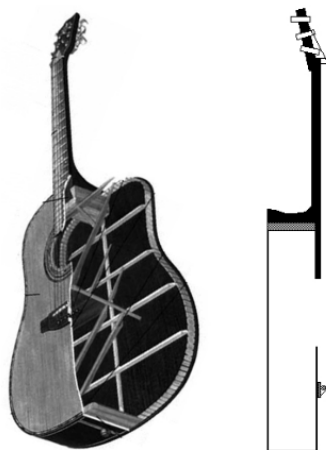


Figure 67: Gitár

A gitár a hangszerfamilia legelterjedtebb tagja, a 67 ábra részben bontott képét mutatja. A hangszer főbb tagjai: fej (hangolóegység a húrfeszítő kulcsokkal), nyak a fogólapal 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 kivészi a részét a testben lévő üreg is. A fedlaponak 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.

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 gitárhangolásnak 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-sorozatot alkotó távolságban következnek egymás után. Pozícionálásuk az ún 1/18-as szabállyal oldható meg, ez a következőket jelenti. A 6. fejezetben láttuk, hogy a félhang frekvencia-aránya a kettő tizenkettedik gyöke, vagyis:

$$\sqrt[12]{2} = 1,059463 \quad (23)$$

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

$$\frac{18}{17} = 1,0588 \quad (24)$$

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 a (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 húr egyetlen jól definiált ponton kimozdítva nagyobb hullámszámú módusok gerjeszthetők, míg egy bizonyos kiterjedésű (ujjbegyszélességnyi) 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 vonások pizzicato megszólaltatásától, a gitárhang lecsengése mindig jelentősen hosszabb. A különbség oka az, hogy a hegedűhúr rezgése a lábön 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 húr (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.

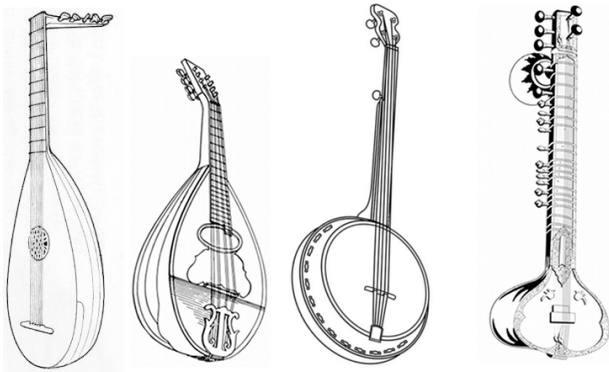


Figure 68: Lant, mandolin, bendzsó, szitár

de a hangszerestest öblös formája a mély frekvenciák erősítésének hatékony eszköze.

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

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

Az említett hangszereknek egyes népeknél különböző formájú változatai ismeretesek, Európában a legismertebb az orosz balalajka, melynek hangszerestest háromszög alakú, hátlapja domború. Az indiai szitár a fogólap végénél is tartalmaz egy rezonátort, húrjainak száma többnyire 18-21 körüli. A hurok 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 hangszerek között szereplő citerának a legtöbb népzene gyakorlatában meg-

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 hurok párokba vannak rendezve, a pár két tagja azonos hangmagasságú. A reneszánszban a legfelső, a barokkban a két legfelső húr magában áll, az alsó húrparok 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 hangszugárzó képessége nem jelentős,

van 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 lábra (mint a japán koto) támaszkodnak és ezen keresztül átadják rezgési energiájukat a fedőlapnak, így erősebben szólnak.

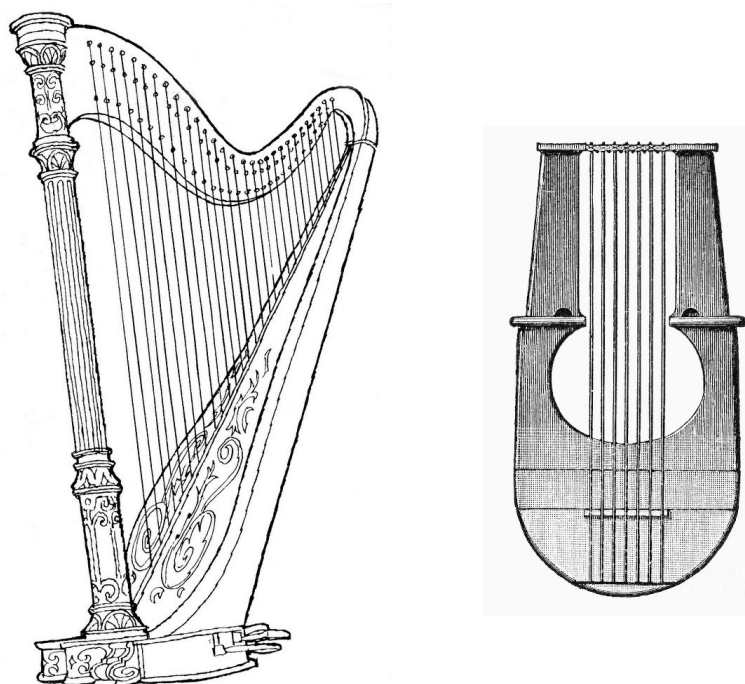


Figure 69: Hárfa és kithara

A hárfa az eddigiektől teljesen különböző elrendezést használ a húrhang erősítésére. A húrok síkja merőleges a zengőlapra (az ábrán a díszes ornamentikájú lap), de maguk a húrok 30-40 fokos szöget zárnak be a lap síkjával. Ha a húrok merőlegesek lennének a zengőlapra, akkor utóbbi az alapmódust 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 csatolódik 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.

A hárfa őseit, a lyrát és kitharát kultúrtörténeti okokból is érdemes említeni, mivel magának a költői tevékenységnek is metaforájává váltak. A kithara a két hangszer közül a mélyebb változat. Jól felismerhető, hogy a húrok síkja a gitárhoz hasonlóan párhuzamos a zengőlemezzel és a hangszer család 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.

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 korábban tárgyalt elemző képessége (általában virtuális) alaphangot tud rendelni. Ehhez ezeknek a részhangoknak teljesíteni kell azt a követelményt, hogy valamilyen frekvencia egész számú többszöröseiként alkotnak sorozatot. Ennek a törekvésnek érdekes esete az ütődoboké.

Timpani

A 70 ábrán a könnyebbség kedvéért megismételjük a 8 ábrát.

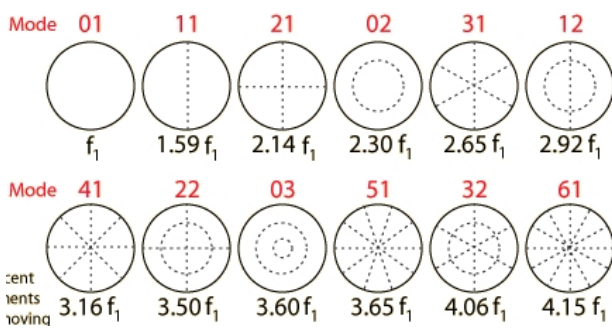


Figure 70: Ütődob-módusok és sajátfrekvenciáik

távolságú) sorozatot alkotnak, amint a sematikus 71 ábra mutatja. Ezek nem az ábra f_1 frekvenciának az egész számú többszöröse, 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.

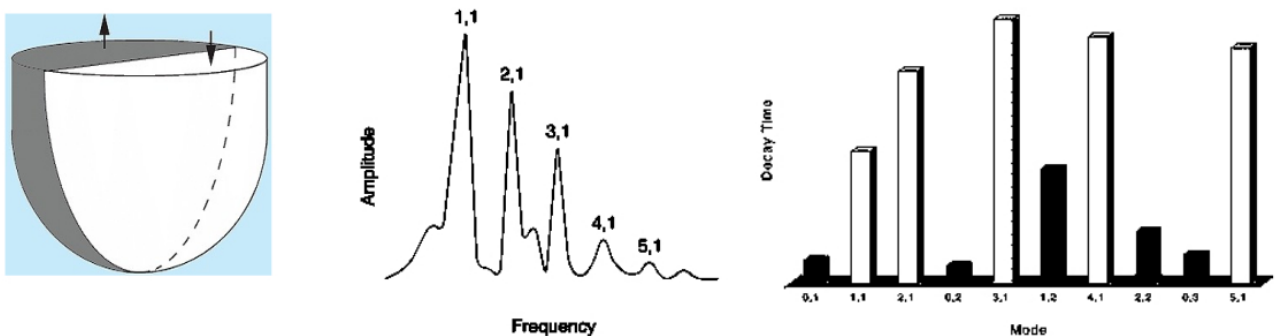


Figure 71: Baloldal: az (1,1) módus; közepén: radiális módusok frekvenciái; jobboldal: radiális (fehér) és cirkuláris (fekete) módusok lecsengési idői.

További érdekességgel szolgál a 71 ábrán látható lecsengési idők összehasonlítása: a cirkuláris módusok mind hamar lecsengenek, a radiálisak tovább rezegnek. Ezt érzékelteti a 71 ábra bal oldali rajza. 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.



Figure 72: tom-tom dob

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 berezgései is van szerepük.

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, játék közben két különböző magasságú hang között lehet váltogatni.

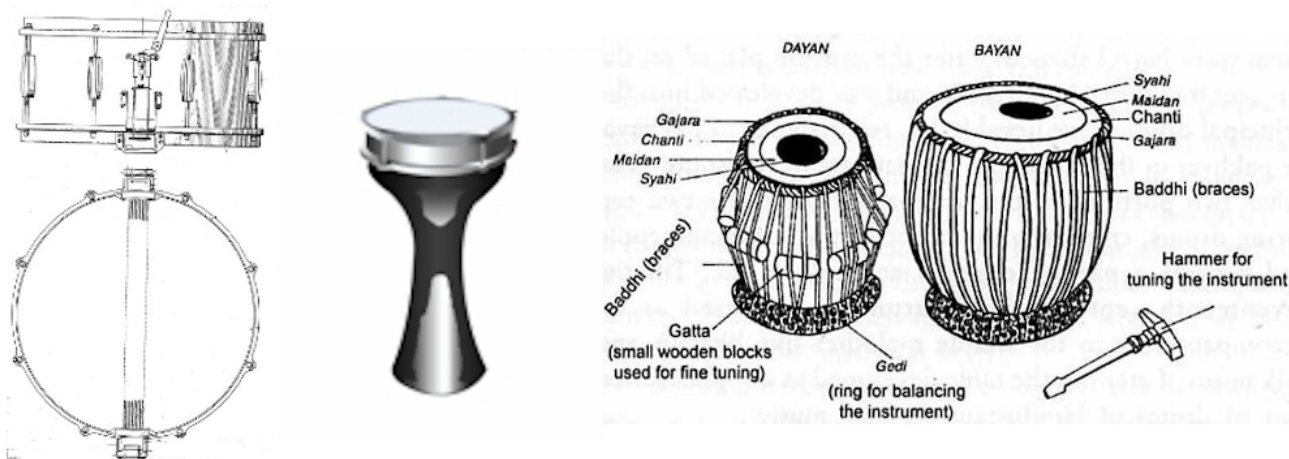


Figure 73: Baloldal: pergődob; közepén: darabuka; jobboldal: tabla.

A **tabla** európai zenében nemigen használatos, de ez az ősi indiai hangszer az akusztika egyik legérdekesebb vizsgálati tárgya. Két tagja van, a 73 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.

Megemlítjük még a basszusdobot, e nagyméretű ütőhangszert, melynek két szemben lévő membránja közül a passzív 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, membrán, vagy a levegő). A marimbánál azonban ezt a saját hangot felerősíti egy rezonátor.

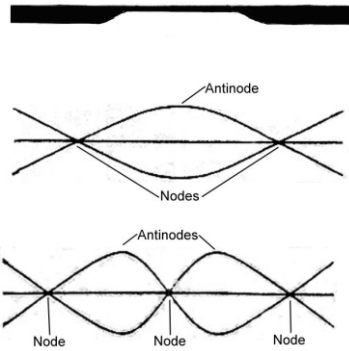


Figure 74: Marimba rúd metszete, valamint első és második hajlítási módusa

A hang forrása egy keményfa lap, mely keresztmetszetben a 74 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 rúdnek 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.

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 rövidsége 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.

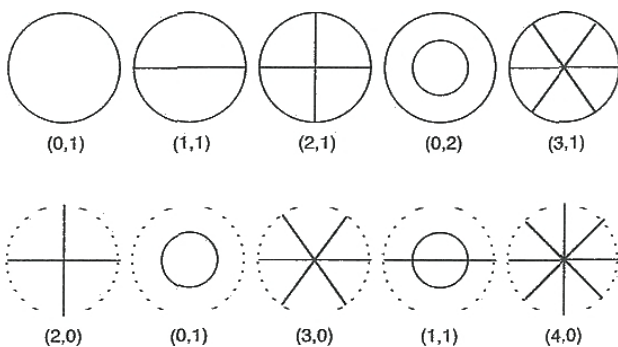


Figure 75: Membrán és gong módusok összehasonlítása

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 70. ábrán látható membránmódusoktól annyiban, hogy a perem itt nem csomóvonal. A 75. ábra a membrán és gong módusait hasonlítja össze.

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. 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 hangszercsalád egyes tagjainak (kenong, bonang) pereme annyira

mélyen meg van hajlítva, hogy akár harangnak is tekinthetők.

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.

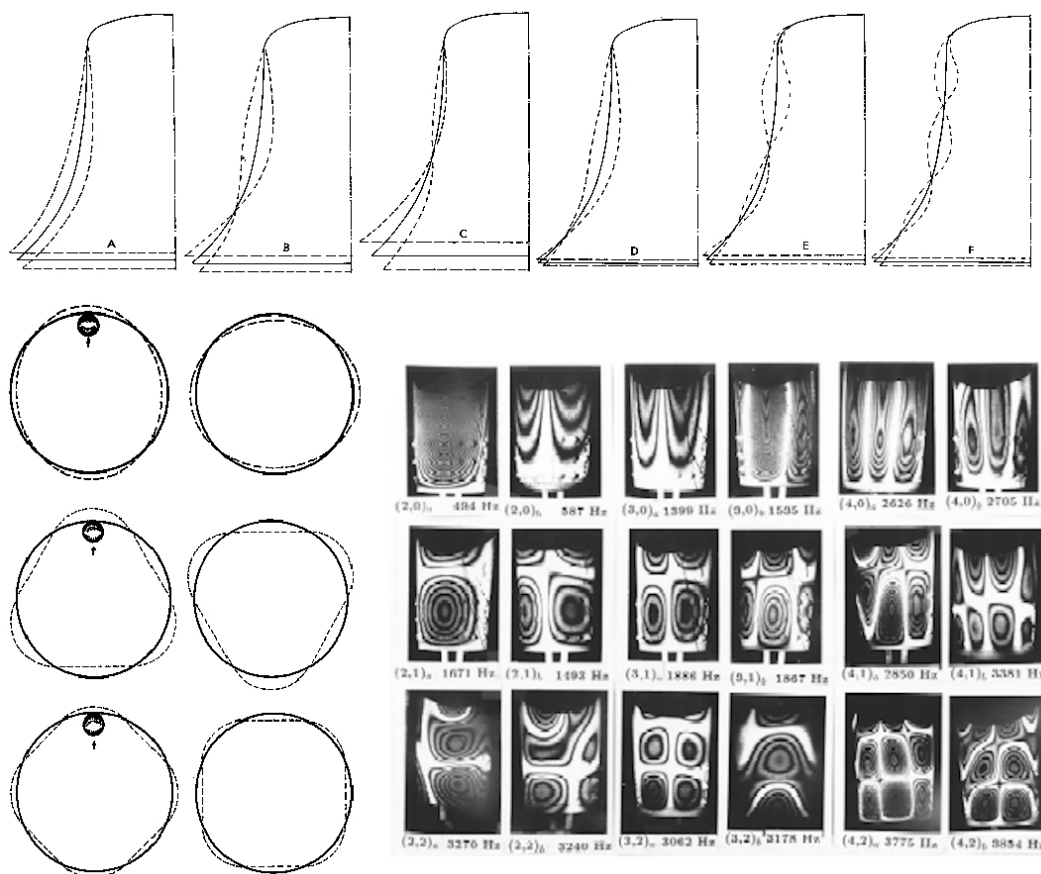


Figure 76: Harang módusai

Harang - az egyik legkomplexebb móduskészletű és spektrumú hangszer. A 76 ábrán látható módusok itt a köpeny alakja miatt úgy módosulnak, hogy a cirkuláris módusok a harang peremével párhuzamos síkokban léphetnek fel. Az ábra felső sora a harangköpeny függőleges keresztmetszetének lehetséges csomópontjait (a cirkuláris csomóvonalak helyzeteit) mutatja. A harang fejénél mindegyik módusnak van csomópontja. Az A módus az ún. zúgóhang, a B az alaphang, a többi egyre magasabb részhang. A radiális módusok itt a harang csúcsától a köpeny mentén lefelé a peremig húzódnak, ezeket meridionális csomóvonalaknak is nevezik, a 2, 3 és 4 csomóvonalú meridionális módusok vízszintes keresztmetszetre gyakorolt hatását mutatja az ábra bal alsó szegmensében. Az ábra jobb alsó szegmensében a két módus különböző paraméter értékpáraihoz tartozó rezgéseképek Rossing interferometriás módszerével való rögzítése látható a hozzájuk tartozó frekvenciaértékekkel.

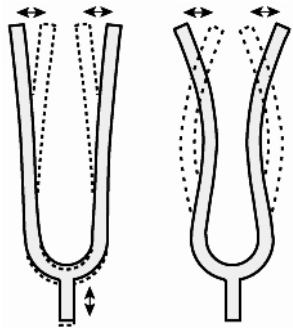


Figure 77: Hangvilla

Hangvilla - az első órán ezzel demonstráltuk az interferencia-jelenséget 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 77 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. .

.
.
.
.
.
.

Függelék I. Hangrendszerek összehasonlítása

A 6. fejezetben ismertetett skálaszerkesztési elveket a legjobban egy konkrét skála megvalósításaival lehet illusztrálni és tanulságos összehasonlítani centekben kifejezett különbségeiket a Pythagoras-skálától.

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:

$$f_2 = f_1 \times 2^{\frac{n}{1200}} \quad (25)$$

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

$$n = 1200 \times \log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) = 1200 \times \frac{\log_{10} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)}{\log_{10} 2} = 3986 \times \log_{10} \frac{f_2}{f_1} \quad (26)$$

Az alábbi táblázat a Pythagoras (P), Aristoxenos (A), középhangú (K) és egyenletes (E) temperálás alkalmazásával előállított diatonikus skálák hangjainak frekvenciáit tartalmazza a 100 Hz -es hangról kiindulva, a megfelelő oszlopok mellett pedig az adott temperálás hangjainak a Pythagoras-hangsor hangjaitól való távolságai láthatók centekben a (26) formula alapján számolva (szerkesztési okokból tizedespontokat használunk, a cent-értékeket csak egy tizedes pontossággal írjuk ki).

No	P	A	A-P	K	K-P	E	E-P
.	Hz	Hz	cent	Hz	cent	Hz	cent
1	100.00	100.00	0	100.00	0	100.00	0
2	112.50	112.50	0	111.80	-10.8	112.25	-3.9
3	126.56	125.00	-21.5	125.00	-21.5	125.99	7.8
4	133.33	133.33	0	133.33	0	133.48	2
5	150.00	150.00	0	149.54	-5.4	149.83	-2
6	168.75	166.67	-21.5	167.19	5.4	168.18	-5.9
7	189.84	187.50	-21.5	186.92	-26.9	188.77	-9.8
8	200.00	200.00	0	200.00	0	200.00	0

A táblázat szemléletes illusztrációja az ismertetett hangolások különbségeinek. Az aristozenosi nagyterc aránya a pythagorasihoz (abszolút értékben 21,5 cent) a didymosi komma 81/80 frekvenciaarányának felel meg. Ez majdnem negyedhang, jól érzékelhető különbség, ennyivel tisztább az aristozenosi dúr hármashangzat. A középhangú temperálás első nagyszekundja a félhang kb egytizedével (10,8 cent) különbözik a pythagorasitól, ez az érzékelhetőség határán van, de a nagyszekunddal szemben nincs olyan szigorú elvárásunk, mint a kvinttel, vagy a dúrhármassal szemben. Itt a nagy szeptim negyed hangú eltérése a legnagyobb, de a nagy szeptim sem kritikus hangköz a hallásunknak. Az is látszik, hogy a középhangú temperálás kvintje valóban a dydimosi komma egynegyedével különbözik a tiszta kvinttől (-5,4 cent).

A számunkra legérdekesebb hangsor az egyenletes temperálású, itt is a nagy szeptim eltérése a legnagyobb, az érzékelhetőség határán (-9,8 cent) de a hallásunk ez ellen nem tiltakozik. A

legérzékenyebb hangközök, a kvart és kvint eltérése a tiszta értékektől a legkisebb az összes bemutatott eltérés között, 2 és -2 cent. Egy pythagorasi és egy egyenletes hangolású kvintet egymás után játszva nem érzünk különbséget, egyidejűleg lassú lebegést érzékelhetünk, azonban a gyakorlatban nem használunk két különböző hangolást egyszerre. A táblázat jól érzékelteti, hogy miért optimális kompromisszum az egyenletes temperálás.

Tanulságosak továbbá az alábbi hangközök cent-értékei:

Pythagorasi komma ((12) formula): 23,46 cent, kb. negyed hang, jól érzékelhető.

Farkaskvint ((19) formula) eltérése a tiszta kvinttől: 35,68 cent, nagyon durva.

Függelék II, felhasznált irodalom

- Bogár István: A rézfúvós hangszerek, Zeneműkiadó, Budapest, 1975
- Darvas Gábor: A zenekari muzsika műhelytitkai, Zeneműkiadó, Budapest, 1960
- Darvas Gábor: Évezredek hangszerei, Zeneműkiadó, Budapest, 1961
- Fletcher, N.H., Rossing, T.: The Physics of Musical Instruments, Springer-Verlag, 1991
- Gát József: A zongora története, Zeneműkiadó, Budapest, 1964
- Klotz, H. Az orgonáról, Zeneműkiadó, Budapest, 1972
- Kotoński, W.: A modern zenekar ütőhangszerei, Zeneműkiadó, Budapest, 1967
- Lindsay, P.H., Norman, D.A.: Human Information Processing,
An Introduction to Psychology, Academic Press, New York, 1972
- Nicholas J. Giordano, Sr: Physics of the Piano, Oxford Univ.Press, 2010
- Pierce, J.: The Science of Musical Sound, W.H. Freeman and Co., New York, 1992
- Sundberg, J.: The Acoustics of the Singing Voice, Scientific American, 1977, p.82.
- Tarnóczy Tamás: Zenei akusztika, Zeneműkiadó, Budapest, 1982
- Veit, I.: Műszaki akusztika, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1977
- Williams, J.-P.: A zongora, Vince kiadó, Budapest, 2003

Az ábrák jelentős részének forrása a WorldWideWeb.