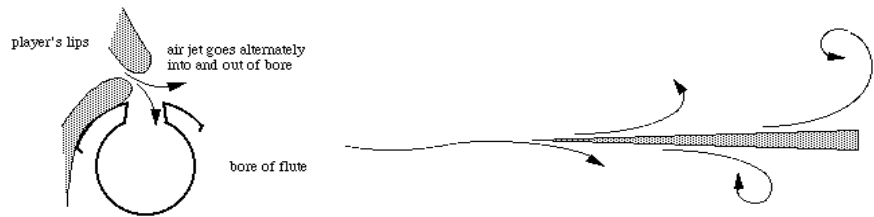


11. Fuvola

A fuvola a fáfúvósok közé tartozik, az ütőhangszerek mellett valószínűleg a legősibb hangszerek egyike. A hangkeltés eszköze a rezgő légoszlop, melyet az első félév 2. előadásán tárgyaltunk. A kialakuló állóhullámok sebesség- és nyomásingadozás szerinti struktúráját a 2.3 ábra mutatja.

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

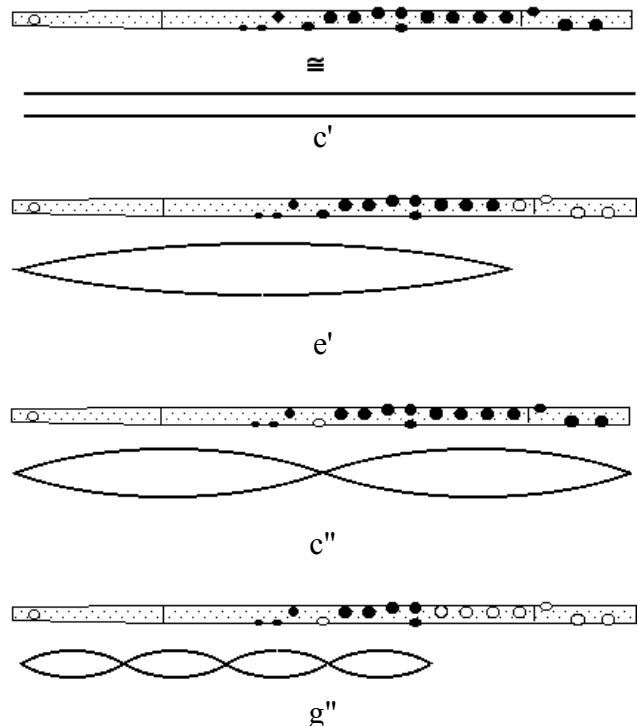


11.1. ábra Befúvás és Kármán-örvények

A 11.1. ábrán látható módon fellépő ún Kármán-féle örvények közül az, amely a csőbe jut (minden második), ott olyan zavart kelt, amely végigfut a csövön, majd annak végéről ellenkező fázissal visszaverődik. Ezt a folyamatot és a kialakuló állóhullámok fajtáit az első félév 2. előadásában részleteztük. A játékosnak nagy gyakorlatra van szüksége az optimális befúváshoz, hiszen az örvényképződés könnyen lehet zaj forrása (szeles a hang), ezért a fúvás irányítottaságának és erejének kényes összhangjára van szükség.

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

A 2.3 ábrán (első félév) bemutattuk a nyitott cső módusait nyomásingadozás eloszlásokként. 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.



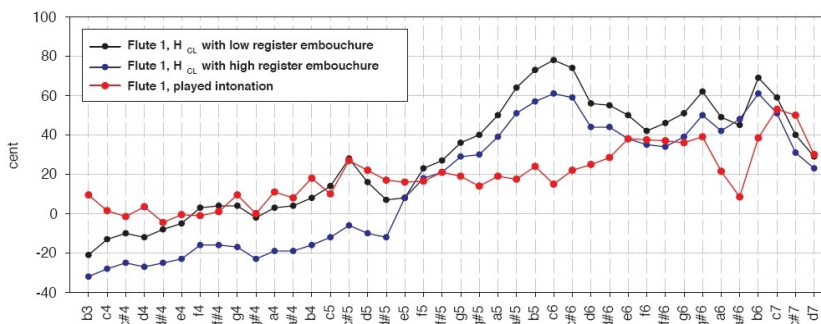
11.2 ábra Kereszt-ujjrend (cross-fingering)

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

A fuvola hangszínét a szegény felhangtartalom határozza meg. Utalunk az első félév hangszín-előadásának 9.2 ábrájára, ahol jól kivehető az a sajátosság, hogy a 440 Hz-es hang megszólaltatásakor

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

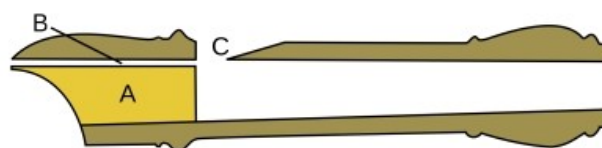
A hangszer intonációs nehézségeit illusztrálja a 11.3 ábra, melyen a hangszeren megszólaltatott hangok eltérései vannak felrajzolva a jól temperált értékektől centekben (Kausel, Kuehnelt 2008). A vörös görbe a játékos által korrigált adatokat mutatja, a két másik különböző befúvások értékeit.



11.3 ábra Fuvola intonációs görbéje

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

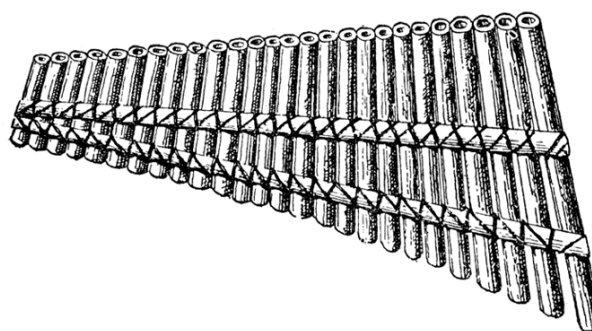
A zenekarokban ma használatos harántfuvola elődje a Blockflöte (népi változata a furulya) jóval egyszerűbb megszólaltatási sajátosságokkal rendelkezik, ami azonban a lehetőségeit is korlátozza. A 11.4 ábrán láthatók a fej részei, a befúvás a B résen keresztül történik, a levegő a



11.4 ábra Blockflöte fejrészének metszete

C ékre irányul, ahol kialakulnak a Kármán-örvények. A játékos itt nyilván nem tudja megválasztani a befúvás irányát, mint 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 11.4 ábra szerinti eszközzel szólaltathatók meg.

A fuvola még korábbi elődje a pánsíp, ami bizonyos értelemben az orgona elődjének is tekinthető. A hangszer egy sor félig zárt sípkból álló sorozat, a sípok megszólaltatása a nyitott vég élére való (megfelelő szögű) 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.

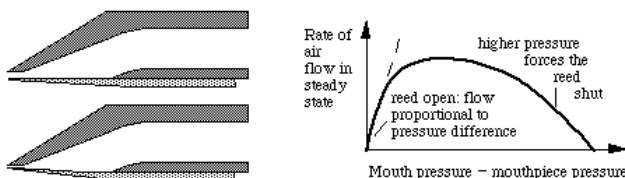


11.5 ábra Pánsíp

12. Fafúvós hangszerek

Az ajaksípos fuvola mellett a többi fafúvós hangszer nyelv sípos rendszerű. A rezgő légoszlopok leírása a fuvoláéhoz hasonló, de a zavarkeltés eszközei a nádsípok.

A klarinét fúvókája egy szimpla nádat tartalmaz, ld a 12. ábrát. A diagram azt mutatja, hogy a szájban lévő nyomás növelésével egy darabig nő a fúvókán áthaladó légáram sebessége, de egy bizonyos értéknél a Bernoulli törvény miatt a nád elzárja a nyílást. A nád azonban rugalmas és újból kinyílik, majd újból bezárul, periodikusan.



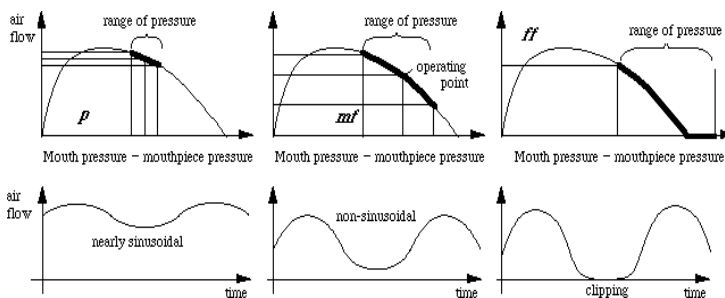
12.1 ábra klarinét fúvóka

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

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

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

A 12.2 ábra különböző erősségű befúvásoknál mutatja a létrejövő rezgéseket. Kis nyomásnál a görbe kis, kb lineáris szakasza érintett, ezért halk fúvásnál kb szinuszos görbét kapunk. A nyomás növelésével a görbe egyre hosszabb szakasza érintett és a létrejövő rezgés (alsó sor) egyre kevésbé szinuszos, vagyis egyre nagyobb felhangtartalmú lesz.

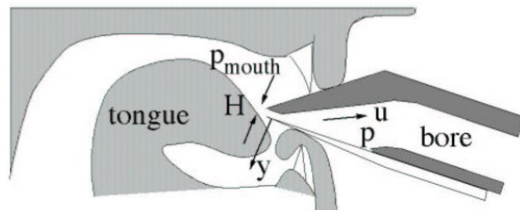


12.2 ábra Befúvás erejétől függő rezgésformák

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

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

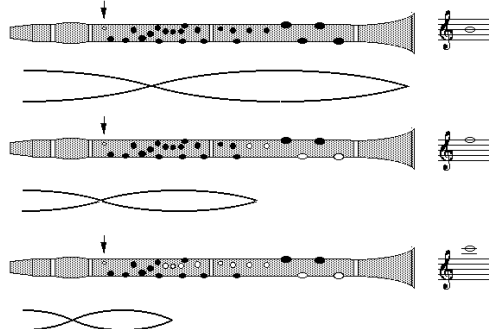
Ennek a szinkronnak érdekes vonatkozása van. A visszatérő zavar nem csak a hangszer csövével van kapcsolatban, hanem azon túl a játékos vokális traktusával (ld a 15 fejezetet), vagyis szájüregével is. Ezt az üreget azonban rutinos játékos olyan módon tudja formálni, hogy a hangszer légoszlopával csatlós révén kölcsönhatásba lép és a csőrezonanciát eltolja.



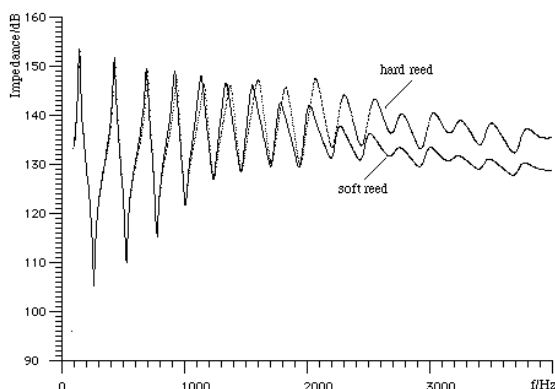
12.3 ábra Szájüreg-fúvóka kapcsolat

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

A 11.2 ábrához hasonlóan a klarinéhangok újrendjeit is lehet a nyomáseloszlásokkal szemléltetni. A 12.4 ábra három hangot mutat be. A 12.5 ábra a kemény és lágy nádak közötti különbséget szemlélteti: lágy nádak a magas frekvenciákat csökkentik és gyengébben adják vissza.

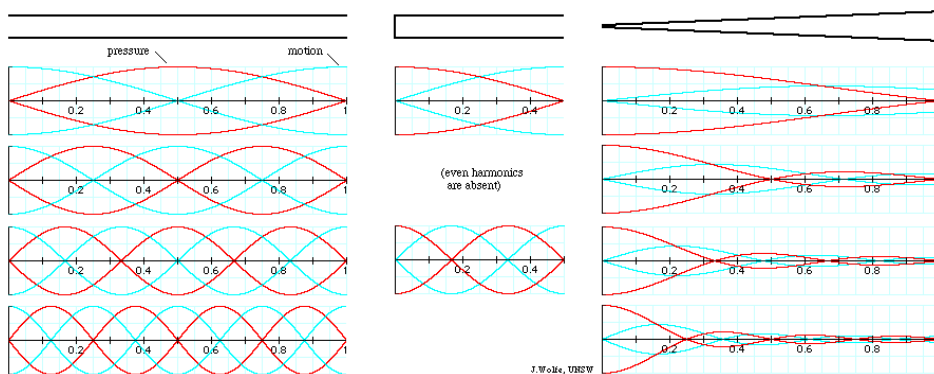


12.4 ábra



12.5 ábra

A szaxofon a klarinét rokona, Adolph Sax találmánya. Fúvókája, nádja gyakorlatilag azonos, csövének anyaga azonban fém, de a legfontosabb különbség az, hogy erősen kúpos a csőve, nyílásszöge a kúpos hangszerek között a legnagyobb, 3-4°. Kúpos csövek módusai különböznek a hengeresekétől, amint azt a 12.6 ábra érzékelteti. A szaxofon spektrumában megjelennek a páros számú felhangok is. Erőteljes, karakteres hangzású hangszercsalád.



12.6 ábra

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

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

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 15 fejezet), ezért bársonyos éneklő jellegét érezzük.

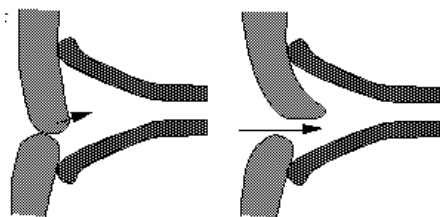
13. Rézfúvós hangszerek

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 hangszercsővek 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.

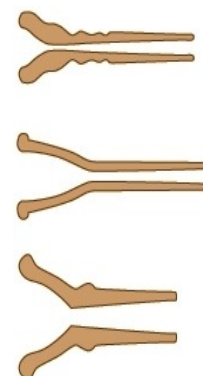
2. A hangszercsalád különlegessége, hogy a cső bemeneti nyílásánál létrehozandó zavar forrása a játékos megfeszített ajkának periodikus nyitása-zárása. Az emberi test legösszetettebb, legbonyolultabb izomcsoport-együttese a szájnyílás körüli izomzat, ennek fejlettségétől és kontrollálhatóságától függ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



13.1 ábra Az ajkak nyitása-zárása

Az ajkak felfekvése és nyitása-zárása a tölcsérszerű fúvókán a sematikus 13.1 ábrán látható.

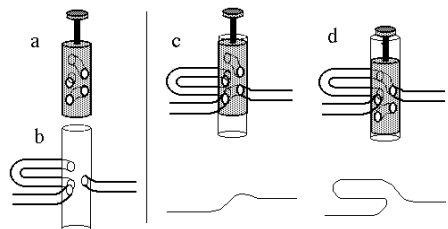
Az egyes hangszerek fúvókái különböző méretűek és alakúak, de közös tulajdonságaik a 13.2 ábrán kivehetők. Itt felülről lefelé a trombita, kürt és harsona fúvókájának sematikus metszete látható. Mindegyiknek van a bemeneti sík mögött (melyre a száj felfekszik) egy öblös része, az ún. "kehely", aztán egy legszűkebb keresztmetszete, a "furat", majd egy kis nyílásszögű kúp alakú furat vezet a hangszer csövébe. Az ajak nyitása-zárása során a kehelyben keletkező nyomásingadozás a furat keresztmetszetében jelentősen megnő, ez felerősíti a csőbe irányuló periodikus zavar hatását. A kehely térfogata magasabb hangfekvésű hangszereknél kisebb, de minden esetben Helmholtz-rezonátorként is működnek. E rezonátor sajátfrekvenciája megjelenik a hangszer által létrehozott hang spektrumában mint egy helyi kiemelkedés, az adott frekvencia körzetében a felhangok a többinél jobban kiemelkednek a spektrumból, ez a kiemelkedés az ún. formáns, amire az énekhang tárgyalásánál részletesebben kitérünk.



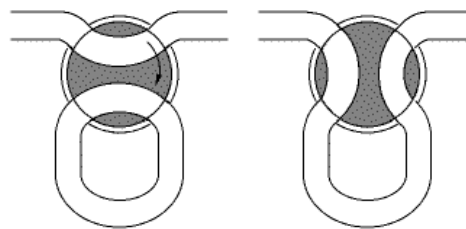
13.2 ábra, fúvókák

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

Az ajkak feszítésének változtatásával csak kis hangterjedelem érhető el, a koncerthangszerek szükséges hangterjedelme a csőhossz változtatását is megköveteli. Ez toldalékcső alkalmazásával érhető el, ami technikailag kétfajta módon valósítható meg: a toldalékcső kézi elcsúsztatásával - ez a tolóharsonák eszköze - illetve billentyűk beiktatásával elérhető csőhossz-változtatás. Ez utóbbira két megoldás ismeretes, a nyomó- és forgószelep (13.3-4 ábrák). Ezek megnyomásra egy további szakaszt iktatnak be a hangszer csövébe.



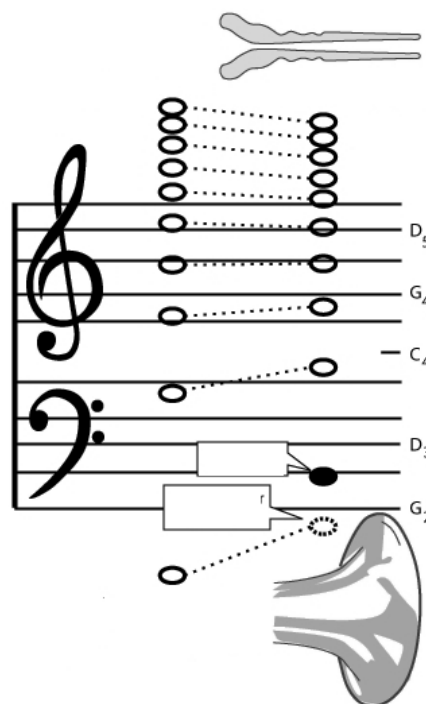
13.3 ábra nyomószelep (piszton)



13.4 ábra forgószelep

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

A tölcsérnek egyéb akusztikai hatása is van. A csövön végigfutó hullám nem a tölcsér peremének síkjáról verődik vissza, hanem már jóval korábban érzékeli az akusztikai ellenállás megváltozását, tehát a tényleges hossz rövidebb, mint a tölcsérperem végéig tartó hossz. A tölcsér hatása leginkább a mély hangokra jelentős, ezek hullámhosszát lerövidíti. A fúvóka (és a játékos vokális traktusa) viszont meghosszabbítja a csövet és a magas hangokat hosszabb hullámhosszak felé tolja. A két hatás együttes eredménye a 13-5 ábrán látható. A végeredmény az, hogy az eredetileg csak páratlan sorszámú (félleg zárt cső) felharmonikusok sora közelít a teljes felhangsorhoz. A kúpos furatú csöveknél eleve megjelennek a páros felhangok is, ez a jelenség már a fafúvósoknál (oboa) is létezik, de a fúvóka-tölcsér hatások a hengeres furatúaknál is elősegítik a felhangsor teljessé válását. A végeredmény persze nem tökéletes, de a játéktechnika is besegíthet.



13.5 ábra fúvóka és tölcsér hatása

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

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

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

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

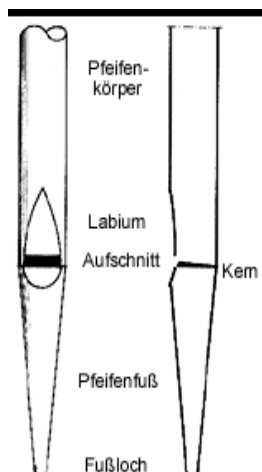
Kürt - dinamikája a trombitáénál szélesebb, nemcsak erős forte, hanem igen lágy piano hangzásra is képes. Fúvókájának mérete egy kb egyvonalas f-körűli formánsnak kedvez.

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

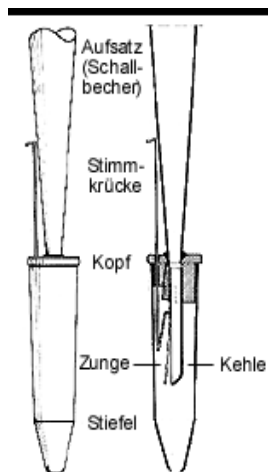
Tuba - a legmélyebb rézfúvós hangszer (-csoport). Hossza több méteres, csöve széles ezért kis felhangtartalmú, lágy hangzású. Erősen kúpos, fúvókától a tölcsérig 20-szoros átmérőnövekedés.

14. Orgona

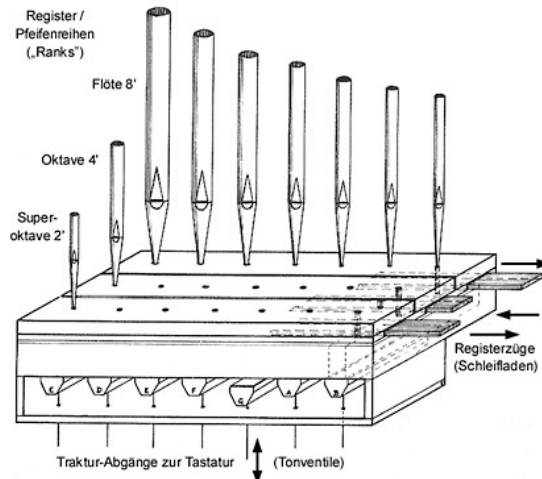
Az orgona ősének a pánsípot tarthatjuk, e különböző hosszúságú sípköböl összeállított együtttest, melyet a száj előtt mozgattak, így szólaltak meg különböző hangok. Az orgona a kézben tartható hangszerekhez képest néha szinte ipari létesítménynek tűnik. Energiaforrása a fűjtató, mely a pufferként működő kiegyenlítő tartályban a kintinél 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, (→orgonaismeret), csak azokat a vonatkozásokat tekintjük, melyeknek akusztikai jelentőségük van.



14.1. ábra Ajaksíp



14.2. ábra nyelvcsíp



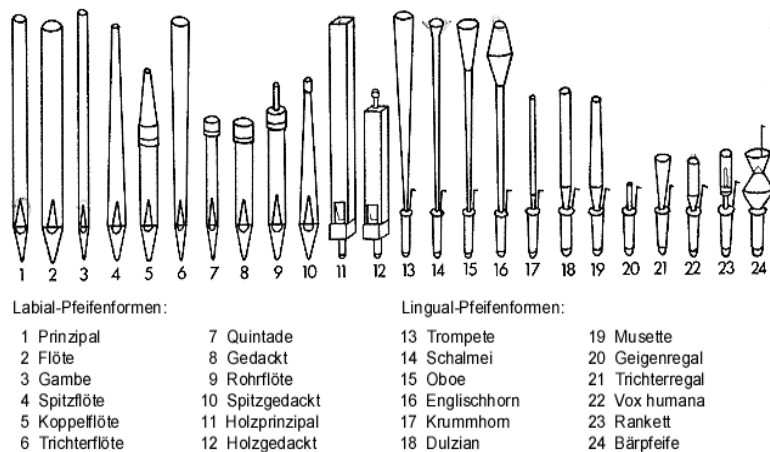
14.3 ábra Szélláda

A megszólaltatás módja szerint az orgonasípkok is ajaksípkokra (14.1 ábra) és nyelvcsípkokra (14.2 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.

A nyelvcsíp 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.

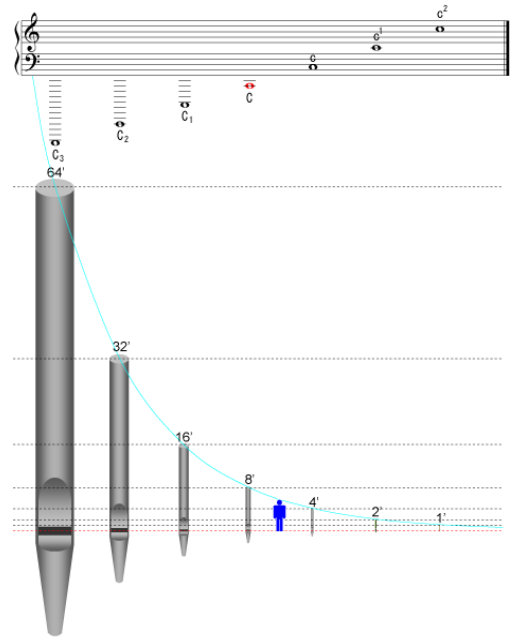
Az ajak- és nyelvcsípkok hangzása karakteresen különbözik egymástól, de mindkét családon belül nagyszámú, különböző hangszínű variáns használatos. Ezek közül az ismertebbeket sorolja a 14.4 ábra. Az első 12 példa ajaksíp, a többi nyelvcsíp.

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



14.4 ábra orgonasíp-típusok

Az ajaksípok méretét hagyományosan "láb" -ban adják meg. 1 láb 30 cm-t jelent. Egy sípsort annak a c-sípnek a hosszáról neveznek el, mellyel kezdődik, pl az egyvonalas oktáv sípjait kétlábasnak nevezik, mivel a mindkét végén nyitott egyvonalas c-síp hossza két láb, jelölése: 2' (gondoljunk a fuvolára, mely 65 cm hosszú, kerekítve 2 láb). A 4' -as c-síp értelemszerűen a kis c, a 8'-as oktáv a nagy C-vel indul, és í.t., ld a 14.4 ábrát.

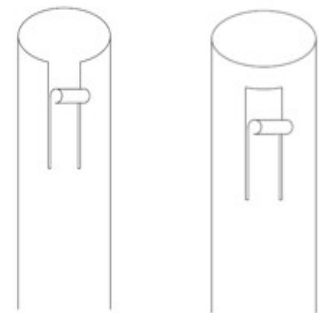


14. 5 ábra sípméreték

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

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

Hangolás - félig zárt sípoknál (Gedackt) a hangolás egyszerűen a sapka (ld a 14.4 ábrát) eltolásával végezhető. A nyitott végű sípoknál a 14.6a ábra szerinti bevágás feltekerése révén változtatható a síphossz. A nyelvcsípok hangolása (14.2 ábra) a hangolókampó segítségével történik, melyhez a zengő (rezonáns) tölcsért is hozzá kell igazítani.



14.6a ábra

14.6b ábra

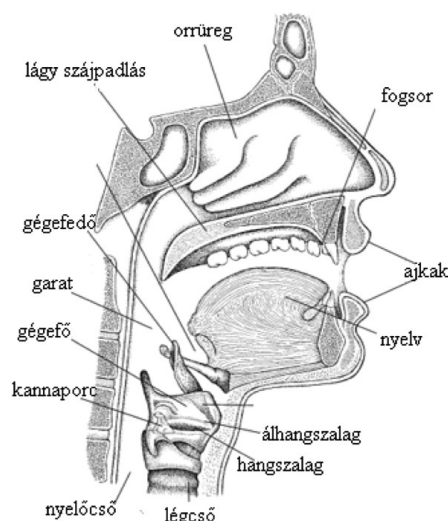
Intonáció - nem tévesztendő össze a hangolással, ugyanis nem a hangmagasság változtatására irányul, hanem arra, hogy a sípok megszólalása biztos és egységes legyen, a regiszterben legyen egyenletes a sípok hangszíne (ezt a helyes menzúratervezés is szolgálja). Az intonálási munka egyik eszköze a 14.6.b ábra

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

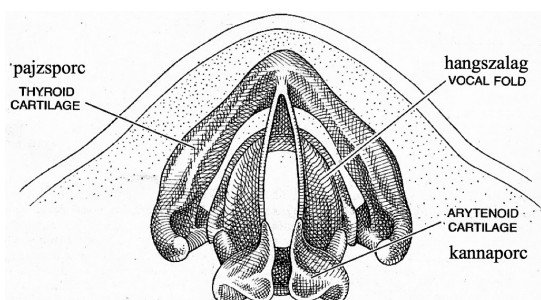
Mivel az orgona ajaksípok regisztereiben a hangkeltés eszköze a légoszlop, ezért a hangszínt alapvetően annak geometriája határozza meg. Némely orgonisták azonban meg vannak győződve arról, hogy a cső anyaga is számít, ez régi vitatéma pl a fuvolistáknál is. Az esetleges szubjektív élmény mögött azonban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

15. Énekhang

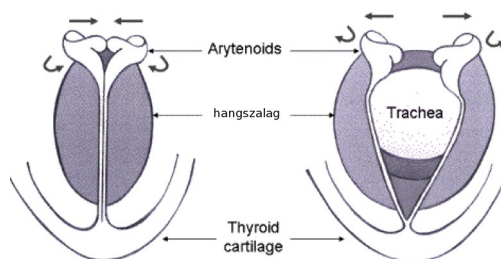
A 15.1 ábra mutatja az emberi hangképzés szerveinek együttesét, az ún vokális traktust. Ez azt a térrészt jelenti, mely a hangszalagtól a száj nyílásáig terjed, felnőtt embereknél egy átlagosan 17,5 cm hosszúságú csőszerű tartományt. Hangszeranalógiaként a klarinét kínálkozik, mivel a hangszalag a nádhoz hasonlóan a rezgés periódusának jelentős részében zárva van, ezért a vokális traktus egyik végén zárt légoszlopnak tekinthető. A különbség az, hogy a hang magasságát teljes mértékben a hangszalag feszítettsége határozza meg, az üreg többi része a kibocsátott hang spektrális sajátosságainak befolyásolására szolgál. A hangszalag fölött helyezkedik el egy rövid csőszerű szakasz, ez beletorkollik a garatnyílásba, majd a levegő a szájüregen keresztül a száj nyílásáig jut. Az emberi hangképzésre az ad lehetőséget, hogy ennek a tartománynak az akusztikai sajátosságait befolyásolni tudjuk.



15.1 ábra Humán vokális traktus



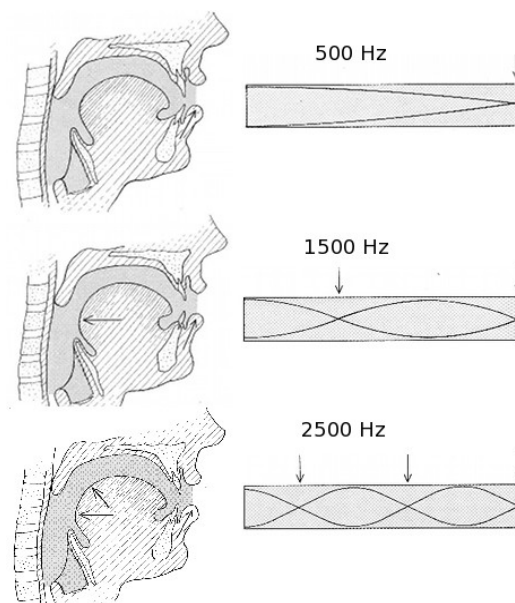
15.2 ábra Hangszalag



15.3 ábra A hangszalag zárása-nyitása

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

A vokális traktus nem a hang magasságát, hanem a spektrumát befolyásolja a következőképpen. Mivel a térrész félig zárt légoszlopnak tekinthető, ezért sajátfrekvenciái az alaphangénak páratlan számú többszörösei. A félig zárt 17,5 cm hosszúságú cső alaphangja (kerekítve) 500 Hz, ez kb az egyvonalas b hangnak felel meg. A 15.4 ábra felső sorában az ennek megfelelő nyomásingadozás-eloszlás látható, a cső és a fej rajzán nyíl jelöli a nyomásingadozás-minimum helyét. A második sor az első felharmonikus sematikus rajza, ez a hang szólalna meg a 17,5 cm hosszúságú félig zár cső átfűvésakor, amint az órán szemléltettük, ez kb a háromvonalas f hang, az alaphang háromszorosán, 1500 Hz -nél. A harmadik felhang kb 2500Hz-nél található, nyomásminimum-helyeit harmadik sor mutatja. Ezekon a frekvenciákon azonban *nem szólalnak meg hangok*, csak a spektrum alakját szabják meg a következőképpen.

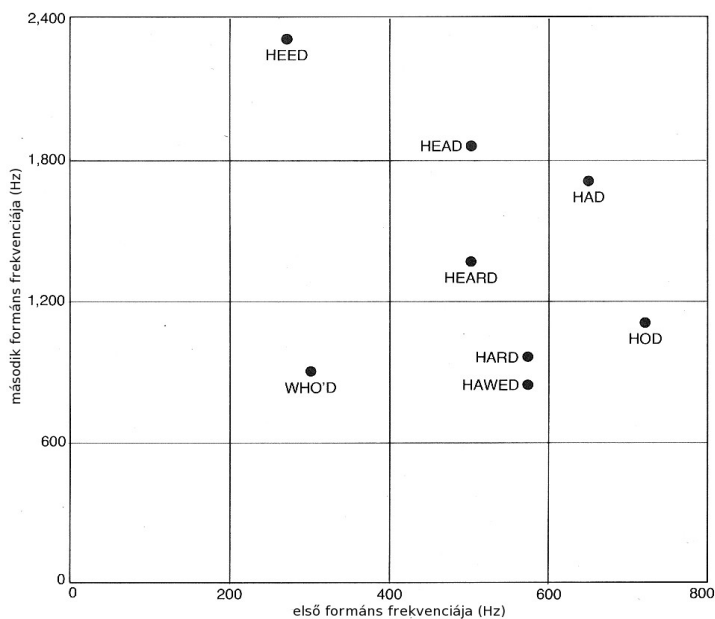
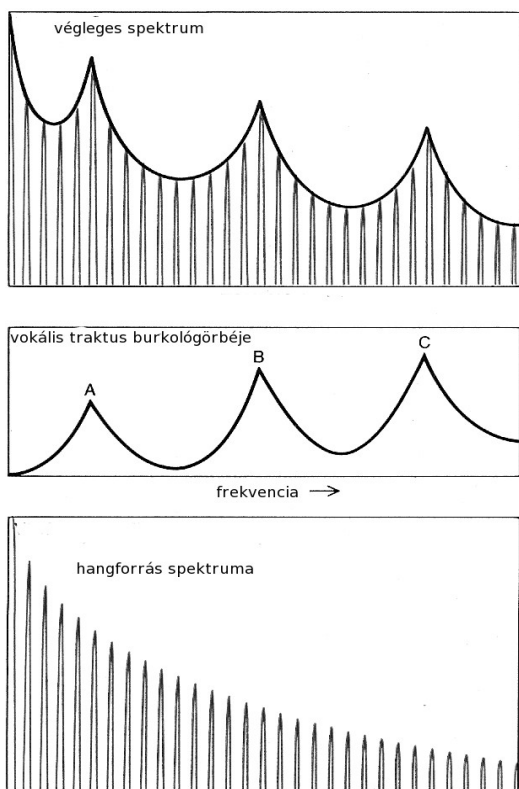


15.4 ábra Formánsképzés

A 15.4 ábrán látható frekvenciákon a vokális traktus átérésztésének maximumhelyei vannak, a spektrum ilyen lokális maximumait formánsoknak nevezzük, ezeket mutatja a sematikus 15.5 ábra középső sora. A hangszalag által kiadott hang (az alaphang és frekvenciájának egész számú többszöröseinél megjelenő részhangok sora) a sematikus 15.5 ábra alsó sorában látható. A középső sorban szereplő átérésztési görbe erre burkológörbéként ráül, az eredményként létrejövő spektrum a felső sorban szerepel.

A humán vokális traktus rendkívül fontos képessége, hogy a formánsok frekvenciáit el tudjuk hangolni azáltal, hogy a szájüreg különböző részeinek geometriáját változtatni tudjuk. Az órán bemutattuk, hogy a fuvola fejrészét megfújva és végét fokozatosan elzárva folyamatosan csökkenő frekvenciájú hangot kapunk, míg a teljes bezárásnál előáll az oktávval mélyebb hang. A fejrész vége sebességmaximum ill nyomásminimum hely. Általában is elmondhatjuk, hogy ha a csövet olyan helyen szűkítjük, ahol sebességmaximum van, akkor a részecskemozgások akadályozása miatt a hullámfrontok átjutása lassul, tehát csökken a frekvencia, ha ugyanott tágítjuk az átmérőt, akkor a frekvencia nő. Hasonló gondolatmenettel, ha olyan helyen csökkentjük az átmérőt, ahol nyomásmaximum van (sebességminimum), akkor ott a szűkítés miatt a nyomásértékek megnövekednek, ez felgyorsítja a részecskemozgásokat, tehát a frekvencia nő. Ez történik a 15.4 ábrán nyíllal jelzett helyeknél.

Az emberi beszéd magánhangzóit ezzel a képességünkkel tudjuk formálni és megkülönböztetni. A 15.6 ábra angol magánhangzók adatait mutatja (a 9.5 ábrát ismétli itt meg). Példaképpen a 'heed' szóban ejtett magánhangzónál az első formánst alacsony frekvenciára kell hangolnunk kb 250Hz-re, a másodikat pedig magasra, kb 2300 Hz-re. A 'hod' szóban ejtett magánhangzónál viszont az első formáns frekvenciája magasabb, a másodike alacsonyabb, mint a 15.4 ábra értékei. Ezeket az elhangolásokat szájnyílásunk méretének és nyelvünk alakjának változtatásával tudjuk elérni.

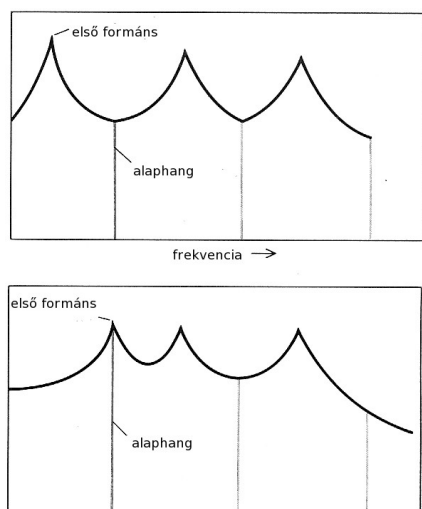


15.6 ábra (fent) angol magánhangzók első (vízszintes tengely) és második (függőleges tengely) formánsai.

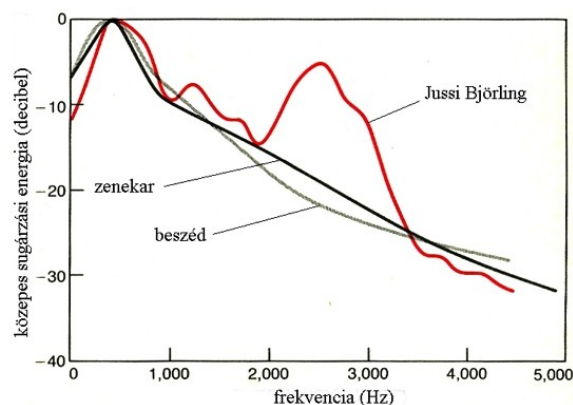
15.5 ábra (balra) A formánsok hatása

Ez az adottságunk, illetve hallószervünk első felében tárgyalt spektrális kiértékelő képessége együtt alapvetően fontos volt a tagolt beszéd kialakulása és közvetve a homo sapiens evolúciós sikere szempontjából. Ezek az akusztikai eszközeink azonban az éneklés képessége számára is nélkülözhetetlenek. A sematikus 15.7 ábra azt mutatja, hogyan kell elképzelnünk a formánsok elhangolásának a szerepét.

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



15.7 ábra Formáns-hangmagasság illesztés



15.8 ábra Énekes formáns a spektrumon

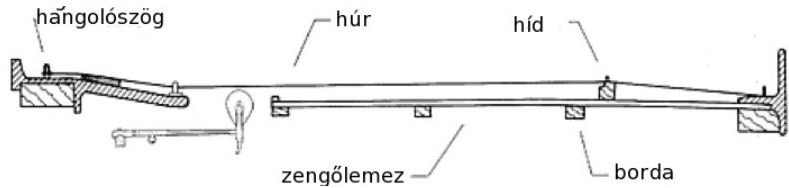
Még egy akusztikai sajátossága van a vokális traktusnak, melyet az énekesek ki tudnak használni. A 15.1 ábránál említett kis bekötő szakasz a garatba, része az eddig tárgyalt vokális traktusnak. Az énekesek azonban kellő gyakorlattal meg tudják változtatni a geometriáját oly módon, hogy egy külön kis üregrezonátorként funkcionáljon, és akkor ennek Helmholtz-frekvenciájánál megjelenhet egy újabb csúcs a spektrumon valahol 2500-3000 Hz körül, a harmadik és negyedik formáns között. Ezt nevezik **énekes formáns**-nak. Az énekesek ezt a technikát nevezik "fedésnek", ehhez az kell, hogy a kis bekötő cső kissé megnyúljon lefelé, keresztmetszete pedig összeszűküljön a garat keresztmetszetének kb egyhatodára.

Ez az átalakulás gyakorlott énekeseknél jelentős előnnyel járhat. A 15.8 ábra a híres tenor, Jussi Björling hangjának spektrális eloszlását hasonlítja össze egy zenekarával ill. a beszéddel. Látható, hogy az említett frekvenciatartományban a nagyzenekar sugárzási teljesítménye monoton csökken, miközben az énekesé az énekes formáns jóvoltából egyes frekvenciákon akár 10 dB-lel is meghaladja a zenekarét. Ezért lehetséges az, hogy egy jól képzett tenor hangját az egész zenekaré sem nyomja el teljesen.

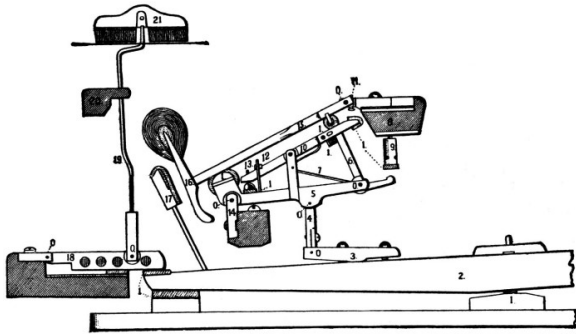
Ennek a fejzetnek a fejtegetései részben J.Sundberg úttörő munkáira támaszkodnak, ahogyan az ábrák egy része is tőle származik.

16. Zongora

Mai formájában a húr két végpontja között a 16.1 ábrán látható fontosabb alkatrészek szerepelnek. Az öntöttvas keretnek a húrok mintegy 16 tonnányi feszítő erejét kell megtartania.



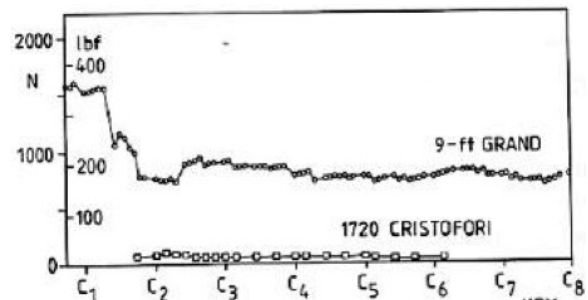
16.1 ábra Zongora keresztmetszete a húr mentén



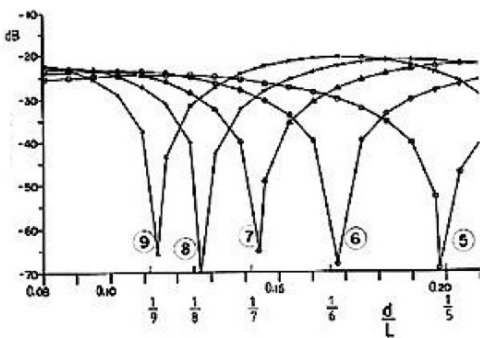
16.2 ábra Kalapácsmechanika

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

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



16.3 ábra húrok feszítése



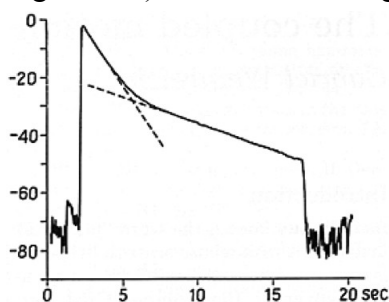
16.4 ábra Húrmegütés helye

Érdekes és sokáig eldöntetlen kérdés volt az, hogy a kalapácsnak hol kell megütnie a húrt. Kísérletezés után a húr egyhetedénél találták legjobb hangzásúnak, aminek a következő a magyarázata. A 16.4 ábrán látható görbék azt mutatják, hogy a megszólaltatott hang hányadik részhangja (bekarikázott szám) a megütés helye szerint milyen hangos. A húrt egyhetedénél (egynolcadánál stb) megütve a hetedik (nyolcadik stb) részhang lesz a leggyengébb. A hatodik részhangig a felhangok a dúr hármashangzat tagjai, a hetedik azonban a kis szeptim, amit zavarónak érzünk.

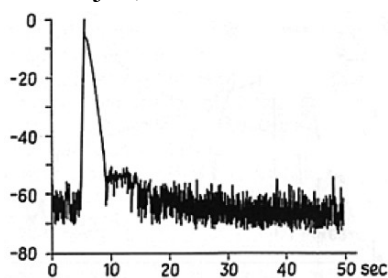
Ezért az egyheted hosszúságnál megütött húr hangzását tisztának fogjuk érzékelni.

A zongora húrjain jól demonstrálható a Mersenne törvény (2.1 formula). A mélyebb hangok húrjai hosszabbak, meg vannak vastagítva, hogy a mozgó tömegük nagyobb legyen. A magasabb hangok húrjai azonban vékony acélhuzalok és nem egyedül, vagy párosan szerepelnek, mint a mélyebbek, hanem hármásával. Ez az elrendezés különleges hangzást eredményez, amit a 16.6 ábrák mutatnak. Az a ábrán egy érdekes jelenség, a változó polarizáció (rezgési sík) hatása látszik. Megütéskor a húrok függőleges irányban mozognak, rezgésük energiáját átadják a zengőlemezeknek (ld később) ezért ez a rezgés hamar lecseng. A húrok azonban vízszintes irányban is kimozdulnak, ez a rezgés nem adódik át a zengőlemezeknek, ezért jóval halkabban, de tovább is tart, ezt a szakaszt mutatja a kb 5 másod-percnél lévő törés utáni rész. Ez a zongorahangzás fontos jellegzetessége. A b ábrán az

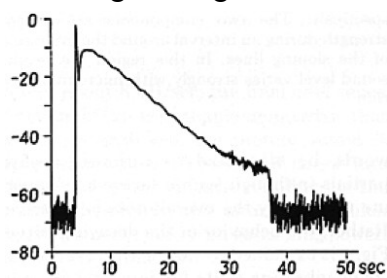
látható, hogy hogyan cseng le egyetlen húr. Végül a c ábra azt mutatja, hogy mi történik, ha egyetlen húrt ütünk meg, de mellette szabadon rezeghet egy másik, ekkor a hídon keresztül csatolás történik a két húr között. A hangok lecsengését tehát a hűrok bonyolult (változó polarizációjú vagyis rezgési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



16.6a ábra Lecsengés

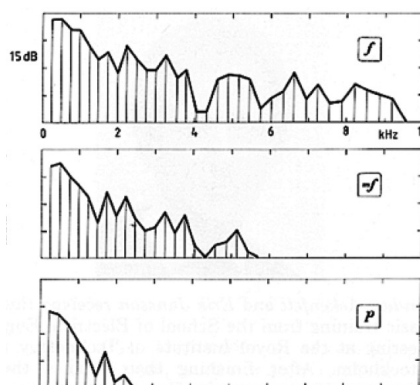


16.6b ábra egyhúros lecsengés



16.6c ábra kéthúros lecsengés

A megszólaló zongorahangot egyértelműen az határozza meg, hogy milyen sebességgel történt a billentyű leütése (pl a könyök mozgásának semmilyen szerepe nincs), hiszen a folyamat egy adott fázisától kezdve a kalapács teljesen szabadon mozog a húr felé. Ha ezt nagy sebességgel üti meg, akkor a hangerő nagyobb lesz, aminek a hangszínre is hatása van. Ismerjük azt a jelenséget, hogy a nagy erejű billentés szinte acélos csengésű hangot eredményez. Ez a 16.5 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 puhább, lágyabb hangszínű is.



16.5 ábra Hangerő-spektrum

A hűrok kis hangszugárzó képessége miatt a zongorának is meg kell oldani a hatékony hangszugárzás feladatát, erre szolgál a **zengőlemez**. Ezt az elnevezést Tarnóczy Tamás ajánlja a gyakran használt rezonánslemez helyett. A 16.7a ábrán látható a lemezre erősített híd, melyre a hűrok ráfeksznek a lemezzel kb 1,5 fokos szögben (ld a 16.1 ábrát is) és így rezgési energiájukat átadják a lemeznek a hegedű lábához hasonlóan.



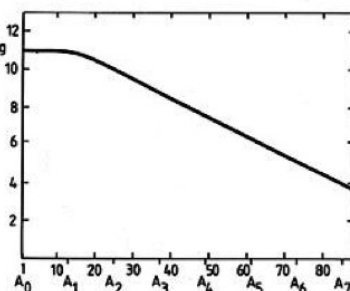
16.7a ábra zengőlemez 1



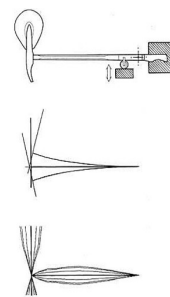
16.7b ábra zengőlemez 2

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

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



16.8a ábra kalapácsok súlya

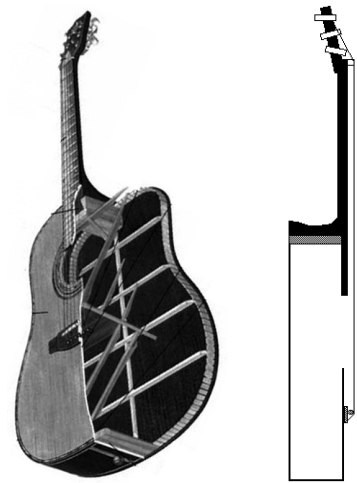


17 Pengetős hangszerek

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

A **gitár** a hangszercsalád legelterjedtebb tagja, a 17.1 ábra részben bontott képét mutatja. A hangszer főbb tagjai: *fej* (hangolóegység a húr feszítő kulcsokkal), *nyak* a fogólappal és a rajta keresztben lévő fém érintőkkel, *test* mely egy speciális alakú, fedlap-hátlap-oldallap által határolt láda, a fedlapon a hanglyukkal. A hurok a fej-nyak határon lévő *nyereg* és a fedlapon rögzített *húrláb* között vannak kifeszítve.

Az erősítést (a vonósokhoz hasonlóan) elsősorban a fedlap végzi, de kiveszi a részét a testben lévő üreg is. A fedlapnak a zongora zengőlemezehez 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.



17.1 ábra Gitár

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

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

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

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

$$18/17 = 1,0588$$

Ha tehát a húr hosszának 1/18 -ad részénél elhelyezünk egy fém érintőt, akkor a rövidebb rész 17/18 hosszúságú lesz és 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 (2.1) Mersenne-törvény értelmében kissé megemelkedik. Ezt a nyereg és húrláb távolságának kicsiny megnövelésével lehet kompenzálni.

A pengetés módja jelentősen befolyásolja a hang minőségét. Ha plektrummal (kemény, háromszög alakú pengető hegyével, vagy körömmel) keltjük a hangot, akkor az ércesebb hangszínű lesz, vagyis a magas frekvenciájú spektrumtartomány gazdagabb, míg ujjbeggyel megszólaltatva

lágyabb hangszínt kapunk. A különbség oka az, hogy a húrt egyetlen jól definiált ponton kimozdítva nagyobb hullámszámú módusok gerjeszthetők, míg egy bizonyos kiterjedésű (ujjbegy-szélességnyi) húrdarab kimozdításakor a húrban csak az adott szakasznál hosszabb hullámok (vagyis kisebb hullámszámú módusok) keletkezhetnek. A jelenség hasonlít a kis- és nagy ütővel megütött dobok hangszín-különbségének esetéhez.

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

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

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

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



17.2 ábra Lant, mandolin, bendzsó, szitár

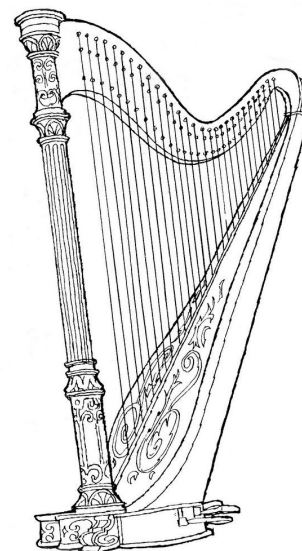
Az említett hangszereknek egyes népeknél különböző formájú változatai ismeretesek, Európában a legismertebb az orosz balalajka, melynek hangszerteste háromszög alakú, hátlapja domború. Az indiai szitár a fogólap végénél is tartalmaz egy rezonátort, húrjainak száma többnyire 18-21 körüli. A húrok közül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

A magyar népi hangszerek között szereplő citerának a legtöbb népzene gyakorlatában megvan a megfelelője. A magyar hangszereknek három húrcsoportja van, a dallamhúrok, melyek két alcsoportjához diatonikus ill. ezt kromatikusra kiegészítő, pentaton hangsort lehetővé tevő érintősor tartozik. A második csoport a basszushúroké, a harmadik a zengőhúroké. A hangláda teteje kevésbé vesz részt az erősítésben, mert a húrok a láda két végén vannak befogva. Más népek gyakorlatában a dallamhúrok melletti húrok száma jelentősen több lehet. Egyes megoldásoknál a húrok a

zongoráéhoz hasonló hídra, esetleg húronként saját lábára (mint a japán koto) támaszkodnak és ezen keresztül átadják rezgési energiájukat a fedőlapnak, így erősebben szólnak.

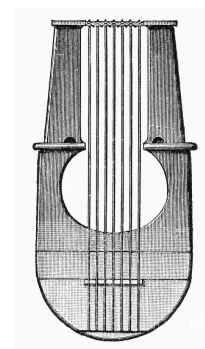
A **hárfa** az eddigiektől teljesen különböző elrendezést használ a húrhang erősítésére. A húrok síkja merőleges a zengőlapra (a 17.3 ábrán a díszes ornamentikájú lap), de maguk a húrok 30-40 fokos szöveget zárnak be a lap síkjával. Ha a húrok merőlegesek lennének a zengőlapra, akkor utóbbi az alapmódust 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 hanglyukáéhoz 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.



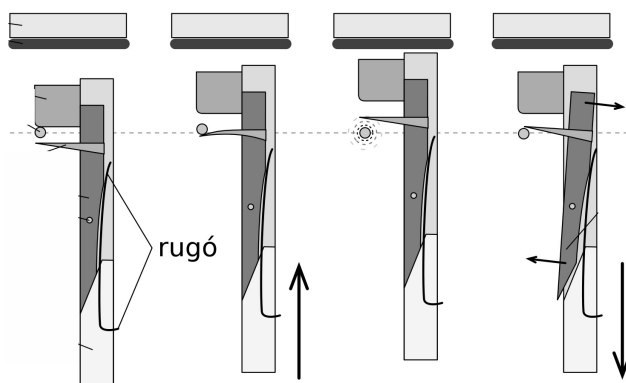
17.3 ábra Hárfa

A hárfa őseit, a lyrát és kitharát kultúrtörténeti okokból is érdemes említeni, mivel magának a költői tevékenységének is metaforájává váltak. A 17.4 ábrán látható 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 túldoldali 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.



17.4 ábra Kithara

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



17.5 ábra Csembaló mechanika

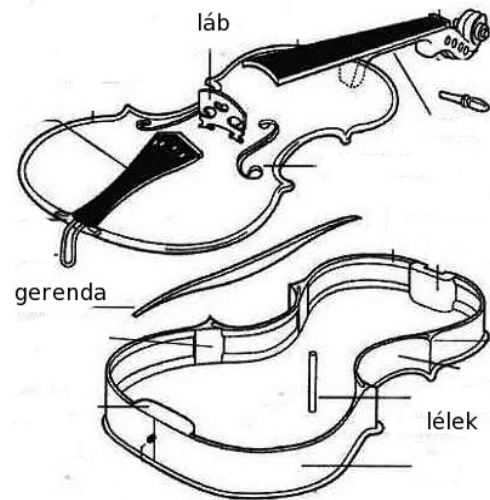
A hangszer többi része a zongora alkatrészeinek megfelelője. A zengőlemez szintén lucfenyőből készül a szálirányra merőleges bordázattal. Az orgonával az köti össze, hogy készítői a barokk korban orgonaépítők is voltak, így itt is használatos a 8 lábás elnevezés a nagy C-ről induló 4 és 1/2 oktávnyi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

18. Vonósok

A vonóscsalád legfontosabb tagja természetesen a Stradivari-korszak idejére kikristályosodott hegedű, melynek fontosabb alkotó részeit a 18.1 ábra mutatja.

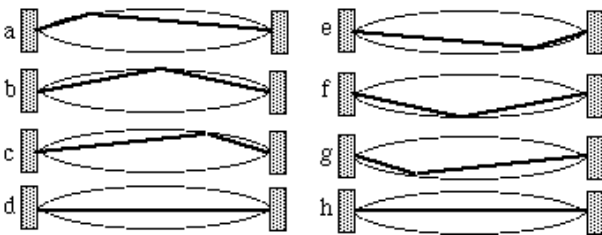
A hangkeltés eszköze a húr (ld a 2. fejezetet, Mersenne-törvény stb). A hurok zenei szempontból nagyon kedvező tulajdonságúak, tekintettel a harmonikus felhangsorra, de az összes húros hangszernek azt a feladatot kell megoldania, hogy mivel a vékony húr igen kis levegőmennyiséget képes megmozgatni, vagyis igen rossz hangsugárzó, ezért rezgését hatékony hangsugárzó alkatrészeknek kell átadni. A vonósoknál ez elsősorban a tető, de a hát és a láda szerepe is fontos.

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



18.1 ábra A hegedű részei

A hurok mozgásának leírása Helmholtz nevéhez fűződik, ő fogalmazta meg a 18.2 ábrán látható elképzelést, hogy a vonó által keltett zavar milyen formában terjed a két végpont között

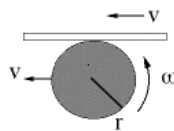


18.2 ábra A hegedűhúr mozgása

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

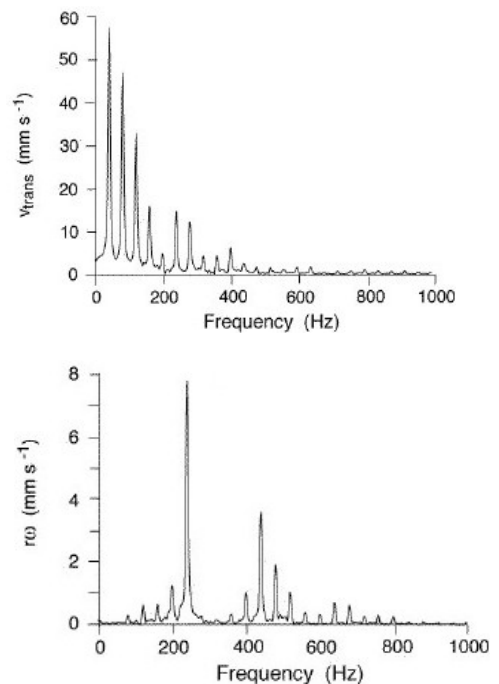
Ezután a kitérés, mint zavar, a 18.2 ábrán látható módon végigfut a húr mentén, a tvégén ellenkező fázissal visszafordul. Az ábra az alpmódust mutatja, a magasabb módusok hasonlóan alakulnak.

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



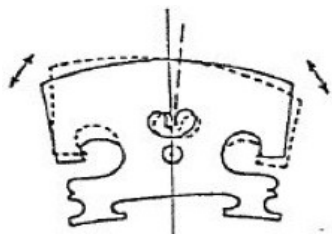
Az így létrejövő rezgéseknek a spektruma a transzverzális hullámokéhoz (18.3 ábra felső panel) hasonlóan szintén harmonikus, de jellemző frekvenciaértékei azokénál magasabbak (alsó panel). Ennek az az oka, hogy a torziós zavarral szemben nagyobb visszatérítő erő lép fel, mint a transzverzálissal szemben.

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



18.3 ábra

A húrok rezgésének energiáját a hangszer lába továbbítja a tetőre.



18.4 ábra Hegedűláb

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

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

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



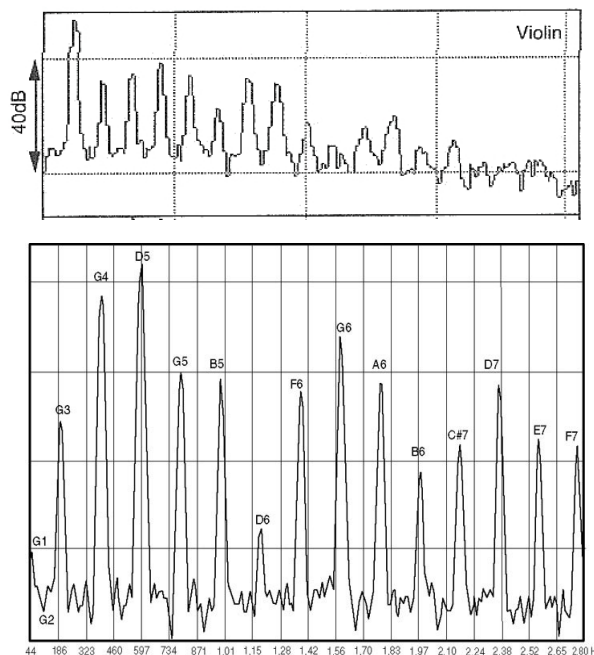
18.6 ábra Chladni

A tető és a hát - hasonlóan a zongora zengőlapjához - nem rezonáns-lemezként működik, de természetesen megvannak a saját frekvenciái, melyek hangolhatók. A mérés a gyakorlatban kopogtatással-hallgatással történik, többnyire nem műszeresen, de a 18.6 ábra azt mutatja, hogy hogyan lehet kirajzolni a lapok módusait a Chladni-féle módszerrel, amikor a finom homokszemcsék adott frekvenciájú gerjesztés hatására adott csomóvonal-struktúrába rendeződnek. Az adott módushoz tartozó frekvenciát azáltal csökkenthetjük, hogy a maximális kitérésű területeken vékonyítjuk az anyagát, ugyanis itt ébred a lemez kimozdulásai (elhajlításai) révén keletkező visszatérítő erő, ami a vékonyítással gyengül.

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

A vonósok hangsugárzásának jelentős tényezője a hangszer teste. Egy kiterjedt vizsgálatban részletesen megmérték hegedűk különböző részeinek sajátfrekvenciáját és azt találták, hogy a legjobb hangzású hegedűknél a tetőlemez sajátfrekvenciája az a' húr közelébe esett, a test Helmholtz-frekvenciája pedig a d' húréhoz. Ez van a 18.5 ábra jellegzetessége mögött, amit a 9 előadásban is említettünk. Az a' húr megszólaltatásakor az alaphang a legerősebb (ezt erősíti a tetőlemez), a g húr esetén azonban a 2-5 felhangok mind erősebbek, mint az alaphang, hiszen a tetőlemez és a test ezeket erősíti inkább.

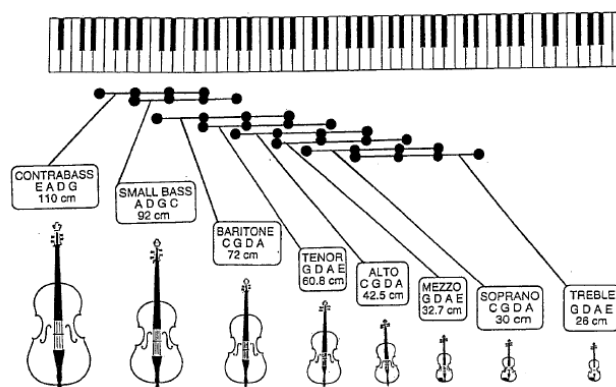
A tetőlemezen van még egy fontos elem: az f-nyílás. Ennek praktikus haszna is van, mert ezen keresztül lehet a test belsejéhez, a lélekhez hozzáférni, de más funkciója is van: a test belsejében keletkező hullámok ezen keresztül sugárzódnak ki.



18.5 ábra hegedű a' és g hang spektruma

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

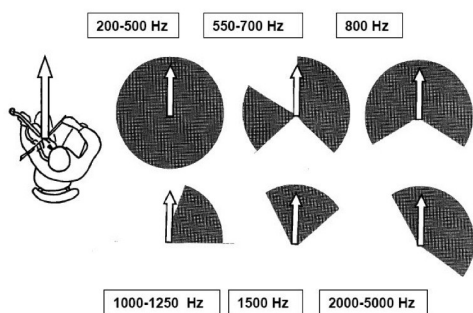
Az elgondolás az volt, hogy a hangszercsalád minden tagjára érvényes legyen az a sajátosság, hogy a tetőlemez sajátfrekvenciája felülről a második húréhoz, a test Helmholtz-frekvenciája pedig alulról a második húréhoz álljon közel. A hangszerek el is készültek, akusztikailag igazolták is a várakozásokat,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



18.6 ábra Catgut-hangszercsalád

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

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



18.7. ábra hegedű iránykarakterisztikája

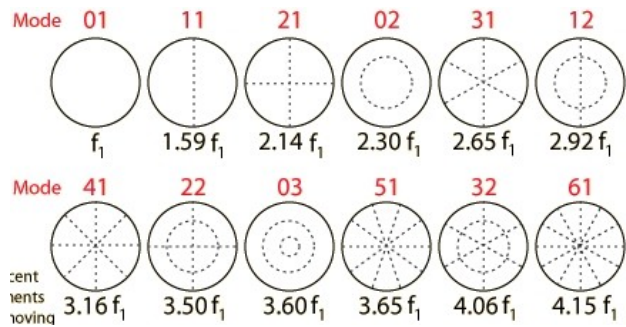
Ezt fejezi ki a hangszer iránykarakterisztikája, mely a hegedűre a 18.7 ábrán látható. A hatékony sugárzás irányait érdemes megkülönböztetni különböző frekvenciák szerint, hiszen láttuk, hogy a mély hangok jobban szétterülnek, a magasak irányítottabbak. Ez jól látható az ábrán is. A legfontosabb azonban az, hogy a vonósok fő sugárzója a tetőlemez, ezért ezt kell leginkább a hallgató felé irányítani. Innen látszik, hogy a zenekarok szokásos elrendezése nem véletlen: az első hegedűnek mindenképpen a karmestertől balra kell ülniük, mert ők játsszák a magasabb hangokat.

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

19. Ütőhangszerek 1 - membranofon eszközök

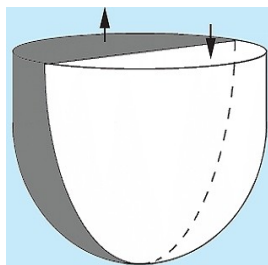
Az ütőhangszerek mindegyikének hangjában dominálnak valamilyen zajszerű elemek, ha más nem, akkor a kezdő tranziensek jellegzetessége igen fontos. Ennek ellenére az ütősök is törekszenek arra, hogy érzékelhető hangmagasságokat tudjanak produkálni, ez azonban a felhasznált anyagok és geometriák miatt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

Timpani - a 19.1 ábrán a könnyebbség kedvéért megismételjük a 2.2. ábrát. Az üstdob membránjának módusai láthatók, felettük a módus számai, alattuk pedig a hozzájuk tartozó frekvenciák, az f_1 alaphfrekvencia többszörösei. Emlékeztetőül: a módusszámok első számjegye a radiális (középponton átmenő) csomóvonalak száma, a második pedig a cirkuláris (a membrán peremével koncentrikus) csomóvonalaké.

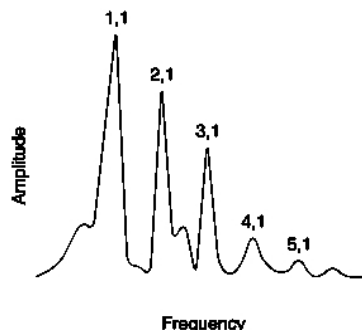


19.1 ábra üstdob-módusok és frekvenciák

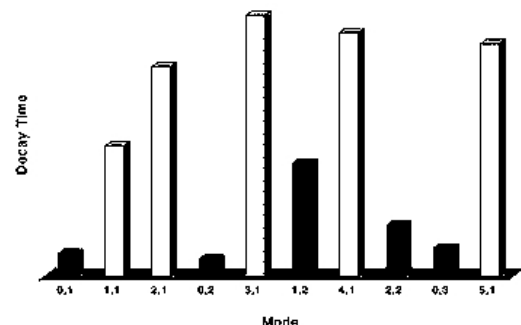
A frekvenciaértékek vizsgálatából kiderül, hogy a cirkuláris módusok frekvenciái nem rendeződnek olyan sorozatba, mely valamilyen frekvencia egész számú többszöröseiként lenne érzékelhető. A radiális módusok azonban, ha a peremen kívül több cirkuláris csomóvonal nincs, közel ekvidisztáns (egyenlő távolságú) sorozatot alkotnak, amint a sematikus 19.3 ábra mutatja. Ezek nem az ábra f_1 frekvenciának az egész számú többszörösei, hanem egy kb $0,51 \cdot f_1$ -értéknek. Ha olyan módon ütjük meg a membránt, hogy belső cirkuláris módus ne gerjesztődjön, ez láthatóan a membrán sugarának kb felénél-harmadánál lehetséges, akkor csak radiális módusok gerjesztődnek és határozott hangmagasság-érzetünk lehet. Hangsúlyozni kell, hogy annak ellenére halljuk (véljük hallani) a $0,51 \cdot f_1$ frekvenciát, hogy az fizikailag nincs jelen, ez hallásunk pszichoakusztikai képessége. További érdekességgel szolgál a 19.4 ábrán látható lecsengési idők összehasonlítása: a cirkuláris módusok mind hamar lecsengenek, a radiálisak tovább rezegnek. Ezt érzékelteti a 19.2 ábra. Ha a membrán közepére ütünk, akkor csak a cirkuláris módusokat gerjesztjük és egy tompa puffanást hallunk. Ez hamar elhal, mivel ilyenkor az üst belsejében lévő levegőt összenyomjuk, ami kemény ellenreakciót vált ki. Ha azonban az ütővel a sugár felére ütünk, akkor az a térfél lefelé mozog, a membrán túlsó fele pedig kifelé, tehát a belső térfogat nem nyomódik össze, csak a membrán rugalmas ereje ébred. ezért tovább tarthat a rezgés.



19.2 ábra Az (1,1) módus



19.3 ábra radiális módusok frekvenciái



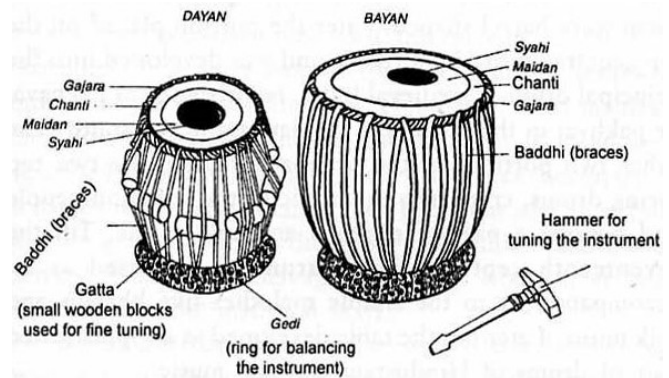
19.4 ábra radiális (fehér) és cirkuláris (fekete) módusok lecsengési idői.

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



19.5 ábra tom-tom dob

A **tabla** európai zenében nemigen használatos, de ez az ősi indiai hangszer az akusztika egyik legérdekesebb vizsgálati tárgya. Két tagja van, a 19.6 ábrán látható eszközök. A hangszer érdekességét az adja, hogy rutinos játékosai különlegesen gondos eljárás során olyan rétegeket ragasztanak a membránra (egyes leírások szerint akár 100-nál is többet), melyek vastagsága, alakja és helyzete hatékonyan képes befolyásolni a membránon létrejövő módusokat, vagyis hozzájárulni az érzékelhető hangmagassághoz. Ehhez járul még a kéztartás, a megütés megfelelő megválasztása.



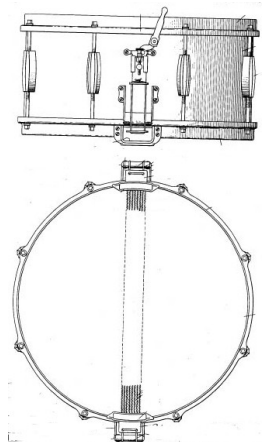
19.6 ábra tabla

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

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



19.7 ábra darabuka

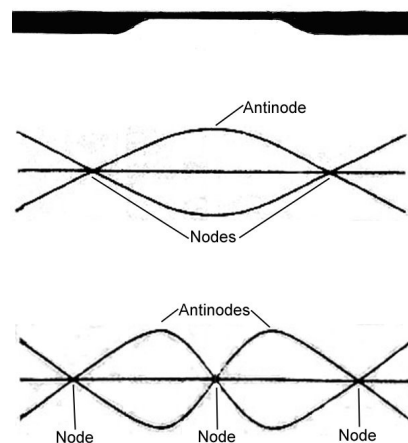


19.8 ábra pergődob

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

20. Ütőhangszerek 2

Marimba - az idiofon hangszerek közé tartozik, amelyeknél a hangszer rugalmas teste a hang forrása (nem egy húr, membráné, vagy a levegőé). A marimbánál azonban ezt a saját hangot felerősíti egy rezonátor. A hang forrása egy keményfa lap, mely keresztmetszetben a 20.1 ábrán látható. A lap profilja közepén elvékonyodik, ezen a részen lehet hangolást végezni. A lapok (rudak) két furattal vannak ellátva, melyeken keresztülhúzott huzal függeszti fel őket. E furatokat célszerű az első módus csomópontjainál elhelyezni. Az ütés helyének megválasztásával jelentős dinamikai különbségek érhetők el, a rúd közepén maximális kitérés kelthető, a felfüggesztés helyére ütve viszont nyilván finomabb, halkabb effektust kapunk. A rúdnak nemcsak a lapjára merőleges síkban lehetnek hajlítási módusai, hanem a lap síkjában is, továbbá torziós (csavarási) rezgéseket is végez. Ez utóbbi módusok hozzájárulásának spektruma messze áll a harmonikustól, de igen gyenge intenzitású és az első hajlítási módusra hangolt rezonátorok hatása még inkább elnyomja őket.



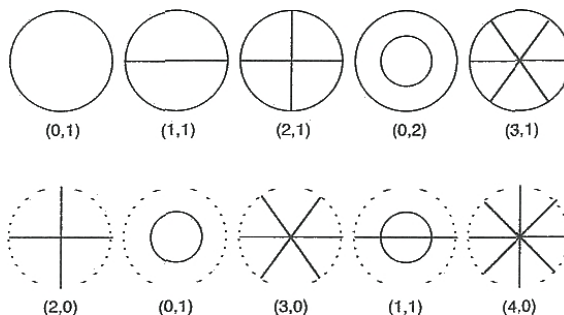
20.1 ábra Marimba rúd, első és második hajlítási módus

A rezonátorok a rúd alá helyezett függőleges helyzetű, félig zárt csövek, melyek frekvenciája a rúd első módusáéval van összehangolva. A félig zárt csövek hátránya, hogy kisugárzásuk a rúd alatt, félig takarva történik, továbbá a gerjesztett spektruma is csak a páratlan sorszámú felhangokból áll, de a fő előnye, a 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.

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

Gong - A dobok membránjához hasonlóan korong alakú hangszer, de idiofon eszköz, tehát a rugalmasságát nem kifeszítés által nyeri el, hanem pusztán felfüggesztés után is rezgésbe hozható. Módusai ennek megfelelően különböznek a 19.1 ábrán látható membránmódusoktól annyiban, hogy a perem itt nem csomóvonal. A 20.2 ábra a membrán és gong módusait hasonlítja össze.

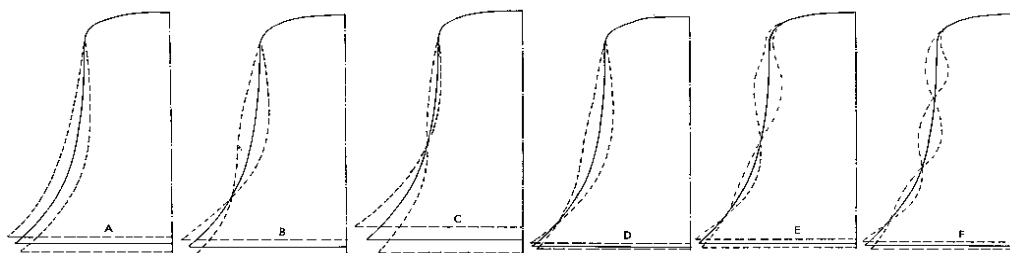


20.2 ábra Membrán és gong módusok

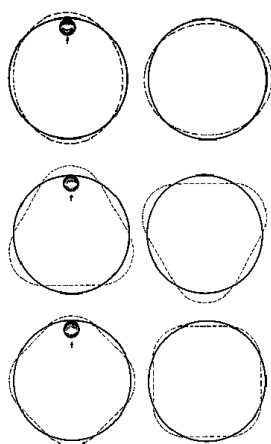
Valójában ez is egy hangszercsalád és a legkülönbözőbb méretű, anyagú és profilú változatai lehetségesek. Az európai zenekari gyakorlatban használt hangszer a tam-tam. Hangmagasság-érzetet nem kelt, nem is ez a funkciója, hanem erős zaj-effektus. Egyik hatásos alkalmazása Sztravinszkij Tavaszí Áldozatában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

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

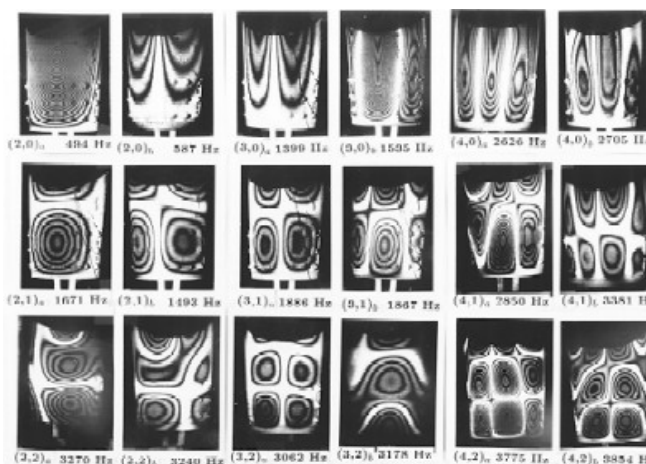
Harang - az egyik legkomplexebb móduskészletű és spektrumú hangszer. A 20.2 ábrán látható módusok itt a köpeny alakja miatt úgy módosulnak, hogy a cirkuláris módusok a harang peremével párhuzamos síkokban léphetnek fel (2.3.a ábra), a radiálisak pedig a harang csúcsától a köpeny mentén lefelé a peremig húzódnak, ezeket meridionális csomóvonalaknak is nevezik, keresztmetszetre gyakorolt hatásukat mutatja a 2.3.b ábra. A 2.3.c ábrán a két módus különböző paraméter értékpáraihoz tartozó rezgéseképek interferometriás módszerrel való rögzítése látható a hozzájuk tartozó frekvenciaértékekkel.



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

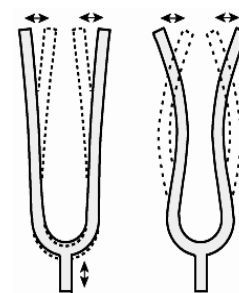


20.3.b ábra 2,3 és 4 csomóvonalú meridionális módusok hatása a vízszintes keresztmetszetre.



20.3.c ábra Rossing interferometriás képei egy harang különböző rezgési módusairól

Hangvilla - az első félév első óráján 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 2.4 ábrán látható, a rezgés során a villa nyele fel-le mozgást végez és egy lapra helyezve azt is rezgésbe tudja hozni, amit az kisugároz, tehát felerősít. A cseleszta korábbi változatainak ez volt a hangkeltő eszköze, de mai formájában fémlapokat alkalmaznak.



20.4 ábra Hangvilla