

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Művészeti Kar
Zeneművészeti Intézet

SZAKDOLGOZAT

A trombitahang fizikai jellemzése

Karsai Márton
trombita tanár, kamaraművész szak

Konzulens: Vidovszky László
egyetemi tanár

2006.

Kivonat

Szakdolgozatom célja a trombita hangszer fizikai paramétereinek leírása valamint a trombita hangjának összehasonlító elemzése egyszerű matematikai módszerekkel különböző szordínók használata esetén. Feltevéseimet a fizikus diplomám megszerzése során megismert eszközökre alapoztam.

Módszerek: A hangról készített digitális felvételeket felhasználva, Fourier-transzformáció segítségével számoltam ki a hangok spektrumát. Méréseket végeztem eltérő hangmagasságokra és dinamikákra, és az így kapott spektrumképeket hasonlítva össze vontam le következtetéseimet.

Eredmények: A témához kapcsolódó irodalmat feldolgozva, értelmeztem az ide tartozó elméleti eredményeket és alkalmazott módszereket. Rámutattam a spektrumon belül lévő alapvető különbségekre eltérő szordínók használata esetén. Eredményesen vizsgáltam a hangspektrum változását különböző frekvenciákon és szélsőséges és folytonosan változó dinamikai esetekben.

Összefoglalás: A trombita fizikai paramétereit tárgyaltam és ehhez kapcsolódóan a hangszer hangspektrumát elemeztem. Az így kapott eredmények hasznosak lehetnek mind kutatási célokra, mind egy hangszeres művész számára a könnyed technika elsajátításához.

Kulcsszavak: trombita, szordínó, hangspektrum, digitális jelfeldolgozás

Tartalomjegyzék

1	Irodalmi áttekintés.....	2
1.1	A trombita mint rendszer	2
1.2	Rézfúvós hangszerek fizikai paraméterei, mérése	5
1.3	A trombitahang fizikai jellemzése:	6
1.3.1	A rézfúvós hangszerek osztályozása.....	7
1.3.2	A segédfogások és a felhangrendszer	8
1.3.3	A trombita rezonanciagörbéje.....	10
1.4	A trombita szordínó fizikai jellemzése	12
1.4.1	A dinamika.....	13
1.4.2	A hangszín	15
1.4.3	A hang iránya.....	16
1.4.4	A frekvenciamenet és intonáció.....	17
2	A kutatás célkitűzése	18
3	Elméleti tárgyalás	19
3.1	Alapvető akusztikai definíciók	19
3.1.1	A Fourier-sor és a Fourier-transzformált	21
3.1.2	Cepstrumanalízis.....	23
4	Mérési eredmények.....	24
4.1	Mérési eszközök és azok tulajdonságai	24
4.1.1	A hangszer	24
4.1.2	A szordínók.....	25
4.1.3	Alkalmazott környezet.....	25
4.2	Eredmények bemutatása és elemzése	26
4.2.1	A mf F' hang vizsgálata.....	26
4.2.2	A ppp B' hang vizsgálata.....	27
4.2.3	A fff B' hang vizsgálata.....	29
4.2.4	A B' hang elemzése változó dinamika esetén	30
4.3	Eredmények összefoglalása	32
5	Konklúzió.....	33

Bevezetés

Sokszor halljuk a mindennapi életben, hogy egy jó trombitásnak minden hangszeren jól kell játszania. Azonban mi különbözteti meg a hangszereket? Miért más két trombita hangja annak ellenére, hogy ugyanaz az ember játszik rajtuk, valamint miért hasonlít két hangszer hangja egymáshoz? Mi különbözteti meg egy professzionális zenész hangját egy amatőrétől? Habár a trombita, mint hangszer nem analizálható kizárólag mérhető fizikai paramétereinek alapján, mégis felmerül a kérdés, milyen változókkal jellemezhető.

Sajnos egy zenész számára nem mindig nyilvánvaló, hogy a saját hangszere hogyan működik, hogyan kelti a hangot, és a hangszer fizikai jellemzői hogyan befolyásolják azt. Ez probléma lehet akár hangszervásárlásnál, de játéktechnikai szempontból is fontos. A hangszerkatalógusokban leírt jellemzők már képet adhatnak egy hangszerről, azonban ezeken túl számos olyan paraméter mérhető, amelyek segítségével több szempontból különböztethetjük meg a hangszereket. A hang fizikai leírása, törvényszerűségeinek feltérképezése közelebb vezet bennünket a rendszer megértéséhez és modellezéséhez. Így vizsgálódva kereshetjük a kapcsolatot a hangszer tényleges fizikai paramétereinek és az általa keltett hang között.

Dolgozatom célja a trombita hang összehasonlító elemzése egyszerű matematikai eszközökkel, különböző szordínók használata esetén, és olyan mérhető paraméterek bevezetése, melyek a hangot befolyásolják. Mivel egy hangot nem csak a fizikai paramétereinek írhatjuk le, hanem számos más tényező is befolyásolhatja, ezért elsőként azt keresem, hogy mik az általános jellemzők, és milyen csoportokba lehet sorolni azokat. Majd a trombitát jellemző általánosan ismert fizikai paramétereikről lesz szó, majd áttérek a hangszer hangjának leírására. Ezt követően a trombita szordínókkal foglalkozom, azokon belül is a legsűrűbben használt típusokat vizsgálom meg alaposabban. Ezt követi egy rövid elméleti tárgyalás és a végzett mérések leírása, értelmezése.

Munkám másik célja az, hogy rámutassak arra, egy gyakorló zenész számára mennyire fontos a hangszerének fizikai ismerete, mivel nagyban segítheti a hangok természetes megformálását, a könnyed technika elérésében, így kiegészítve és teljessé téve a művészi előadást.

1 Irodalmi áttekintés

Az irodalmi áttekintés során célom a témához kapcsolódó módszerek megalapozása és eredmények ismertetése úgy, hogy a leírtak egy a témában kevésbé jártas olvasó számára is érthető legyen.

1.1 A trombita mint rendszer

A trombita, mint rendszer parametrizálása során számos fizikai jellemzőt és pszichológiai kölcsönhatást figyelembe kell vennünk, amelyek alapján csoportokba gyűjthetjük a változóinkat. [1] Azonban így is le kell mondanunk a teljesség igényéről. A játékost, mint egyént nem lehet rendszerként tárgyalni, mivel játékmódját nagyban befolyásolja aktuális fizikai és lelki állapota.

Ebben a fejezetben Matthias Bertsch: Variabilities in Trumpet Sounds [1] című cikkének jelölésmódját használom, ezekkel próbálom meg a trombita, mint nyitott rendszer jellemzőit leírni.

A trombita hang (*ts*) jellemzése során az első kölcsönhatás, amit figyelembe kell vennünk a játékos (*ply*) és a hangszer (*inst*) között van. Erre a kapcsolatra hatással van még a környezet (*evi*), mivel a játékos szempontjából nem mindegy, hogy a hang egy koncerten keletkezik, vagy a gyakorlóteremben. Így első megközelítésben a megszólaló trombita hang ettől a három paramétertől függ:

$$ts = f(inst, ply, evi)$$

A hangszert különböző objektív minőségi paraméterekkel (*qp*) tudjuk jellemezni, mint a hangszer hangolása (*int*), megszólalási érzékenysége (*rsp*), ami a mechanikai sajátosságaitól (*mcp*) függ. Ilyen a befúvócső furata (*bor*), a hangszer alakja (*shp*) és anyaga (*mat*). Magát a hangszert tárgyalhatjuk még szubjektív oldalról (*sq*) is, mint a márkája (*bn*), tulajdonosa (*own*) és kinézete (*ol*). Így a hangszer, mint függvény a következő alakban áll fel:

$$inst = f(qp(int, rsp, mcp(bor, shp, mat)), sq(bn, ow, ol))$$

A játékost (*ply*) a szándéka (*itt*), (amit játszani akar), képessége (*aby*), (amit tud játszani) tudjuk definiálni, és az alapján, amit megvalósít mindebből (*rlz*). Mindegyik tag nagymértékben függ az előadó kognitív fiziológiai és pszichológiai jellemzőitől.

$$ply = f(itt, aby, rlz)$$

A következőkben vizsgáljuk meg a környezet jellemzőit. Nyilvánvalóan első közelítésben a hely (room) és az idővel (*time*) definiálható. Befolyásolja a terem akusztikája (*pra*), a levegő hőmérséklete (*atmp*), a hely utóhangsági ideje – visszhangossága (*rvt*) és a levegő minősége (*aqty*), valamint a helység kinézete (*opa*) és népszerűsége (*hap*) is hat az előadó pszichéjére:

$$evi = f(time, room(pra(atmp, rvt, aqty), opa, hap))$$

Azonban a fent bevezetett változók még mindig összetettek. Például a játékos függvényt jobban bonthatjuk még további szempontok szerint. Így a játékos szándékát közelebbről megvizsgálva, az függ a zenész zenei háttérétől (*mbg*) (amit meghatározóan a szüleitől vett át) és a zenei rendszertől, amiben gondolkodik. A hangszerjátékos szándékát befolyásolja az általa ismert és játszott zenei stílusok (*gms*) és, hogy mennyire képes megformálni a játékát (*sctx*).

$$itt = f(mbg, gms, sctx)$$

A játékos képességei (*aby*) alapvetően kapcsolatban állnak a tehetségével (*tal*), a korával (*age*), az intelligenciájával (*iq*) az iskolázottságával (*elv*), a tanára oktatási stílusával (*tea*), tapasztaltságával (*exp*). Meghatározó a földrajzi hely, ahova született és annak kultúrája (*reg*), a játékos és hangszere közti kapcsolat, (*fami*) és az előadó fiziológiai felépítése (*phyp*). Ez tartalmazza a nemet (*gnd*), a fogak állapotát és formáját (*teeth*), az ajkak rezgőképességét és vastagságát (*lips*), a tüdőkapacitást (*lung*), a hallást (*hear*), az állóképességet (*endu*) és csoportos izommunka minőségét (*musc*):

$$aby = f(tal, age, iq, elv, tea, exp, reg, fami, phyp(gnd, teth, lips, lung, hear, endu, musc))$$

A hang aktuális megvalósítását befolyásolhatja még a motiváció (*motv*), a koncentráció (*conc*), a játék szituációja (*sit*), a pszichológiai alkat (*psyc*), a játékos gondolkodás struktúrája (*fom*), egészségi állapota (*hlth*) és nem utolsósorban a játéktechnikája. A technikára jellemző a hangszeres légzése (*aflw*), brüölése (*osci*), rekesznyomása (*epre*), szájtartása (*tngp*), hangszertarása (*iplc*), izmainak állapota – be van-e fújva rendszeren (*amct*), és ujjtechnikája (*fing*):

$$rlz = f(motv, conc, sit, psyc, fom, hlth, pltq(aflw, osci, epre, tngp, iplc, amct, fing))$$

A fent bevezetett 58 változóval tudjuk leírni és szemléltetni egyetlenegy trombitahang komplexitását:

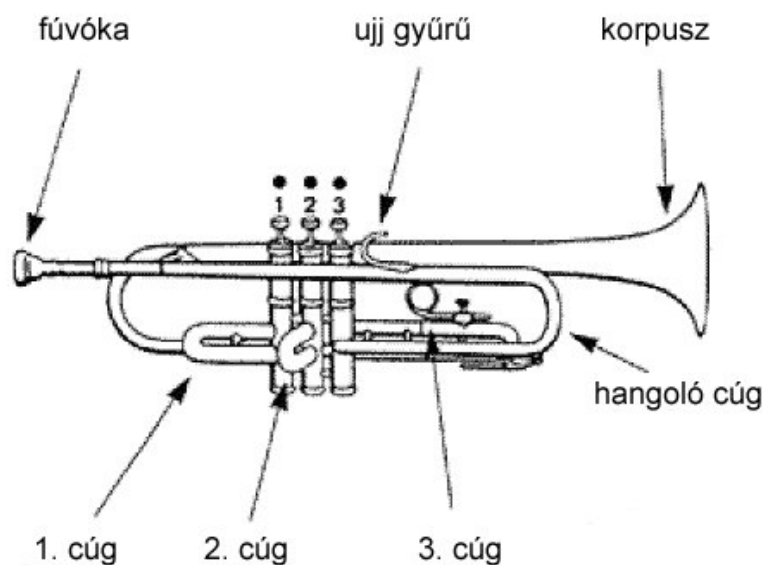
$$ts = f(inst(qp(int, rsp, mcp(bor, shp, mat)), sq(bn, ow, ol)), ply(itt(mbg, gms, sctx), aby(tal, age, iq, elv, tea, exp, reg, fami, phyp(gnd, teth, lips, lung, hear, endu, musc)), rlz(motv, conc, sit, psyc, fom, hlth, pltq(aflw, osci, epre, tngp, iplc, amct, fing))), evi(time, room(pra(atmp, rvt, aqty), opa, hap))).$$

Nyilvánvalóan a fent felsorolt paraméterek nagy része nem mérhető mennyiség. Azonban csak a hangszer fizikai paramétereit vizsgálva és a hangra, mint fizikai jelenségre tekintve, már jobban megkülönböztethetőek a hangszerek és játékosok. A szakdolgozatban az eredeti célkitűzésének megfelelően a továbbiakban ezzel a kérdéskörrel foglalkozom először.

1.2 Rézfúvós hangszerek fizikai paramétereit, mérése

A következő fejezetben a rézfúvós hangszereket fizikai oldalról próbálom megvizsgálni. Arra a kérdésre keresem a választ, hogy milyen kapcsolat van a hangszer mért, objektív fizikai paramétereit és a játékos érzései, például intonációja között.

Egy hangszer vásárlása során sok dolgot figyelembe kell vennünk, és mivel a piac egyre nagyobb, ezért a választás egyre nehezebb. A játékos szempontjából talán a legfontosabb dolgok a hangszer hangminősége és a hangszíne. Ezek a jellemzők nem derülnek ki a hangszereket leíró táblázatokból és adatokból, de megismerve a leírásokat, információt kaphatunk a hangszerről, és ez segíthet a választásban.



1. ábra: A trombita részei

A katalógusokban egy hangszert több fő paraméterrel jellemeznek [15]. Az egyik legfontosabb paraméter a hangszer anyaga. A trombiták, mint általában a rézfúvós hangszerek nagyrészt rézből készülnek, azonban általában valamilyen arányban (tipikusan 30%) cinkkel ötvözik. Külön ötvözet szokta jellemezni a hangszerkorpusz anyagát (**1. ábra**). Ez lehet a test anyagával megegyező, de vörösréz, vagy akár 99%-os ezüst is.

Fontos paraméter még a hangszerbevonat anyaga. Itt két alaptípus van Ha a hangszer lakkozott (lehet simán polírozott felületen, vagy aranyozás után), akkor a hangszín tompább, sötétebb, ezzel szemben, ha ezüst bevonat kerül a hangszertestre, akkor a hangja fényesebb, nyíltabb lesz. Mindezek ellenére sok igen értékes hangszer mindenféle felületi kezelés nélkül kerül ki a műhelyből, pontosan a fenti befolyásoló tényezők kizárása végett.

A következő befolyásoló tényező a belső furat, ami trombita esetén a második cúgnál (**1. ábra**) lévő belső átmérővel szokás definiálni, és nagysága a hangszín fényességét befolyásolja. Öt jellemző mérete terjedt el: M (11.51 mm), ML (11.66 mm), L (11.74 mm), XL (11.89 mm), MLV (11.51 mm, vagy 11.66 mm). Minél nagyobb a furat, annál több levegő szükséges a hangszer megszólaltatásához és a hangja sötétebb lesz. A hangszín fényét és az átfújhatóságot befolyásolja még furat változása is a befúvócsőtől a korpuszig, ami miatt szokás megadni a belső furaton kívül az ezen a két helyen mért átmérő arányát.

A hangszerkorpusz anyagáról már beszéltünk, azonban nagyon fontos még annak mérete is. A korpusz mérete a hangszer megszólalási érzékenységet és a hang vastagságát változtatja meg attól függően, hogy mennyire vastag a tölcsér hajlatánál, de egyéb fontos tulajdonságairól még a későbbiekben is lesz szó. Fontos még megemlítenünk a befúvócsövet, ami a befújt levegő sebességét határozza meg. Az átmérő növelésével csökken a levegő sebessége, de a befúvócső illeszkedésénél ez megakadhat. Ezért fontos, hogy a beleillesztett fúvóka mennyire fekszik fel a befúvócső belső részén lévő peremre.

1.3 A trombitahang fizikai jellemzése:

A hang, mint fizikai jelenség tulajdonságait vizsgálom ebben a részben. A jellemzők alapján osztályozom az egyes rézfúvós hangszereket, és írom le a trombita hangjának jellemzőit.

1.3.1 A rézfúvós hangszerek osztályozása

Egy rézfúvós hangszer olyan réz cső, melynek átmérője a cső egyik végétől a másik végéig növekszik. Ez alapján két osztályba sorolhatjuk a hangszereket. Az egyik a kónikus hangszerek csoportja, ahol az átmérő az egész hangszertest hosszában folyamatosan tágul. Ilyen hangszer a vadászkürt vagy a tuba, melyekre puhább, tompább hang jellemző. A másik csoportba tartozó hangszereknél vannak ún. cilindrikus részek a hangszercsőben, ahol az átmérő állandó. Ide tartozik a harsona és a trombita is, melyeknek hangja jellemzően fényesebb, nyíltabb, mint a kónikus hangszereké.

A rézfúvós hangszerek által keltett hang a száj (membrán) rezgéséből származik, ami periodikus mozgásra kényszeríti a közvetítő közeg, esetünkben a levegő részecskéit, és ezt a rezgést erősíti fel a hangszertest. A hang magassága két dologtól függ: a száj rezgési frekvenciájától, valamint a rezgésbe hozott légoszlop, vagyis a cső hosszától.

Azonban ez nem ennyire egyszerű, mivel egy adott hosszúságú csövet megfújva, csak bizonyos kitüntetett frekvenciájú hangokat tudunk megszólaltatni (2. *ábra*). Nevezetesen a cső alaphangját, és az ehhez tartozó felhangokat. Ezek frekvenciája az alaphangtól indulva rendre úgy aránylik egymáshoz, mint a természetes számokból felírható törtek számlálójára és nevezőjére:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{x}{y}, \quad x, y \in \mathbb{N}, \quad y = x + 1$$

Ez szemléletesen azt jelenti, hogy ha az alaphang frekvenciájához az 1-es számot rendeljük, akkor a frekvenciája úgy aránylik az első felhang frekvenciájához, mint 1:2, vagyis az első felhang frekvenciája kétszer nagyobb, mint az alaphangé (egy oktávval feljebb szól). Ehhez hasonlóan az első és második felhangok frekvenciái úgy aránylanak egymáshoz, mint 2:3 (kvint), és így tovább. Ezek alapján nemcsak a felharmónikusokat tudjuk meghatározni, hanem az egyes hangközökhöz is egy arányt tudunk rendelni.

Ha változtatjuk a cső hosszát, akkor változik a hozzárendelt felhangrendszer is, amit kihasználva tudunk kromatikus skálát létrehozni a rézfúvós hangszereken. A hangszertestre szerelt szelepek lenyomásával eltérő hosszúságú csöveket toldunk be, így megnövelve a rezgő légoszlop hosszát, és változtatva az alaphangot és a megszólaltatható felhangrendszert. Trombita esetén az első szelep egy N2-al mélyíti az alaphangot, a második szelep egy K2-al, míg a harmadik egy K3-el. Az így betoldott csövek hossza szemmel áthatóan is úgy aránylik egymáshoz, mint 2:1:3.



2. ábra: A felhangsor

Az alaphang tekintetében szintén két csoportra oszthatjuk a réz hangszereket. Vannak olyanok, melyekkel megszólaltatható a teljes felhangsor az alaphangtól egészen a játékos képességei által engedett magasságig, vagyis a hangszer alaphangja a felhangsor hangjával egyezik meg (teljes felhangsoros hangszerek). Ebbe a csoportba tartozik minden rézfúvós hangszer, a trombiták családját kivéve. A trombiták teste ugyanis nem elég hosszú, ezért csak az első felhangtól szólaltatható meg velük a felhangsor (a hangszer alaphangja az első felhang, így a következő megfújható hang egy kvinttel van feljebb, nem egy oktávval). Ez a csoport a fél felhangsoros hangszerek csoportja.

1.3.2 A segédfogások és a felhangrendszer

Tegyük most pár egyszerű matematikai megfontolást a már fent említett billentyű arányokkal kapcsolatban. A kromatikus skálát a trombitával különböző billentyűkombinációk lenyomásával tudjuk létrehozni. Egy adott hang úgy keletkezik, hogy a megfelelő billentyűk lenyomásával kiválasztjuk a nekünk kellő felhangsort, és a szánkat kívánt felhang frekvenciáján rezgésbe hozzuk. Egy könnyű számolással rájöhetünk, hogy a trombitával $2^3 = 8$ különböző felhangsort tudunk megszólaltatni, melyek első felhangja rendre a trombita alaphangja és attól félhangnyi távolságokban lefelé helyez-

kednek el. A legmélyebb hang az alaphangtól lefelé egy tritónusz távolságban lesz, mivel hat K2-ot tudunk lefelé menni. Azt, hogy miért csak hatot, arról a következőkben lesz szó.

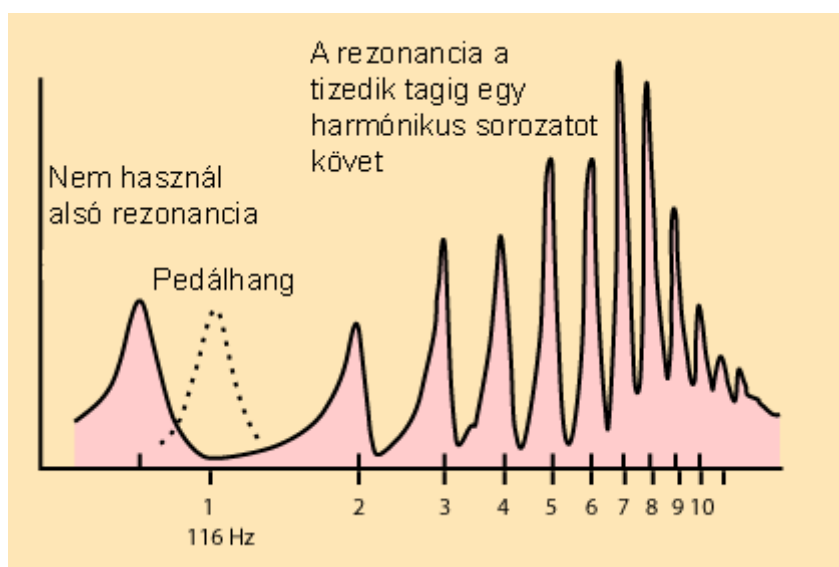
A megszólaltatható felhangsorok, mivel mind félhangnyi távolságra vannak a szomszédos hangsoroktól, nyilvánvalóan átfednek. Ez többféleképpen is magyarázható. Egyrészt akkor van átfedés, ha az adott felhang frekvenciája azonos, egy másik felhangrendszer felhangjának rezgésszámával. Vagyis ha az egyik felhangot leíró frekvenciaarány egészszámu többszöröse a másik felhanghoz rendelt aránynak. A trombitánál ez ritka eset, mivel csak a magasabb regiszterekben fordul elő. Az európai zenében bevezetett temperált hangsor azonban csak növelte ezek számát, mivel elmozdított egyes természetes felhangokat, így már közeli frekvenciájú felhangok esetén is átfedést várunk az uniformizált hangsor alapján. Az átfedések a hangszeren a segédfogásokban jelennek meg, vagyis, vannak hangok, amikhez több fogás is tartozik, de ezek hamisságát pont a temperáció okozza.

Egy másik oka és magyarázata az átfedéseknek nagyon egyszerűen tárgyalható egész számok és azok összegeik segítségével. Rendeljünk egész számokat az egyes billentyűkhöz, a már korábban tárgyalt csőhosszak aránya alapján. Az első billentyűhöz rendeljünk 2-öt, a másodikhoz 1-et és a harmadikhoz 3-at. Ekkor, ha az egyes hangokhoz vesszük a megszólaltatásukhoz lenyomott billentyűk összegét, látszik, hogy akkor tudunk segédfogást alkalmazni, ha ez az összeg megegyezik egy másik kombináció összegével. Ez trombitán például az E'-hez rendel 1-2 fogás, amihez $2+1=3$ összeg megegyezik a hármas billentyű súlyával, így az összes 1-2 kombinációt 3-al is lehet fogni. Ez a magyarázat arra, hogy csak hat félhangot tudunk lefelé menni az alaphangtól a trombitán, mivel két megszólaltatható felhangsor megegyezik. Ez a játék érdekesebb a piccolo-trombita esetén, ahol négy billentyű van. A segédfogások hamissága itt is a temperációra vezethető vissza, mert a csövek hosszát a kialakult fogásrendszerhez igazították, így nem pontosan egyezik meg az első két cső hosszának összege a harmadikéval.

1.3.3 A trombita rezonanciagörbéje

Most tekintsük egy kicsit részletesebben a megszólaltatható felhangrendszert [13]. A trombita egy természetes példája a felhangsoroknak, amelyek egy harmonikus sorozatot követnek a tizedik felhangig. A felharmonikus frekvenciák a korpusz és a fúvóka sajátságai miatt szólaltathatóak meg tisztán a hangszeren.

A **3. ábrán** (Backus után) a megszólaltatható felharmonikusok ábrázolását szemlélteti, amit minden egyes fogáskombinációra egyesével meg tudunk fújni, csak az alaphangot változtatva.



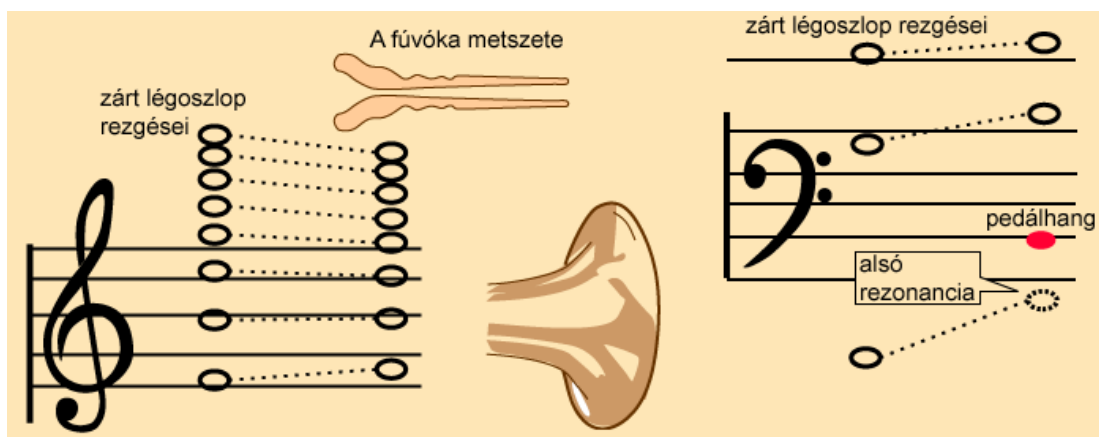
3. ábra: A trombita rezonancia görbéje.

Az ábrázolt rezonancia frekvenciák sorozata a tizedik tagig jól megegyeznek az első tíz felharmonikussal. (Backus, [13])

Mivel a trombita egy fél felhangsoros hangszer, ezért ebben a sorozatban nem jelenik meg az alaphang. Az első felharmonikus tartományába eső hangokat pedálhangoknak szokás nevezni, azonban hangszínük nagyban különbözik a normális trombitahangétól. A pedálhangok csak úgy szólaltathatóak meg, ha a rezgő ajkak frekvenciája megegyezik a pedálhangok frekvenciájával. Ekkor az összes felharmonikus frekvenciája összeadódik, létrehozva a pedálhangot.

A trombita felhangrendszere néhány nem harmonikus hangban eltér a várt felharmonikus sorozattól. Ennek oka abban keresendő, hogy a hangszerben, mint egy félig

lezárt csőben, nem harmonikus állóhullámok keletkeznek. A hangszer korpusza és a fúvóka szerepe az, hogy az így keletkezett rezonáns frekvenciákat a harmonikus frekvenciákhoz közelítse. A korpusz az alsó rezonáns hangok frekvenciáját emeli meg úgy, hogy a magasabb frekvenciákra nincs hatással (**3. ábra**). Mindemellett a pedálhangok keletkezésében is van szerepe és ennek köszönhető a hangszer felhangdús hangszíne is



4. ábra: A fúvóka és a hangszerkorpusz hatása a rezonáns frekvenciákra.

A magasabb regiszterben a fúvóka ezeket lefelé transzformálja, míg az alsó regiszterben a korpusz hatására ezek felfelé mozdulnak el. (Backus után, [13])

A fúvóka szerepe a korpuszéval pont ellentétes, a magasabb frekvenciatartományokban érvényes. (**4. ábra**) A harmonikus hangoknál magasabb frekvenciájú enharmonikus hangokat szállítja le. Ez azért történik, mert maga a fúvóka egy üregrezonátorként működik. Ha a játszott frekvencia a harmonikus frekvencia közelében van, akkor a fúvóka miatt a rezgő légoszlop effektív hossza megváltozik, egy olyan légoszlop hosszára, ami a harmonikus frekvenciához tartozik, így konvertálva a hangot a megfelelő magasságba. Ez a jelenség a magasabb felhangtartományban jelenik meg, az ott lévő enharmonikus hangokat leszállítja.

A tizedik felhang azért jelent határt a rezonanciasorozatban, mert az ehhez tartozó $f \sim 1170$ Hz frekvenciájú hang hullámhossza megegyezik a korpusz területével és e fölött a hullám energiája nagyobb része szétsugárzódik, és nem történik meg a visszaverődés, ami az állóhullámok létrejöttéhez szükséges vagyis a hang instabillá válik..

1.4 A trombita szordínó fizikai jellemzése

Hogyan változtatja meg a szordínó a trombita hangját? Erre a kérdésre nem is olyan könnyű választ találnunk, mivel csak személyes érzéseinkre támaszkodhatunk. ([3], [11]) Azonban ha a különböző hangtompítókat ugyanazon szempontok szerint vizsgálunk, akkor szubjektív véleményunktől független megkülönböztetést vezethetünk be. Legyenek ezek a szempontok a dinamika, a hangszín, az intonáció, a kiadott hang iránya és a szordínó megszólalási érzékenysége, és vizsgálódjunk a legtöbbet használt szordínók esetében. [3]



5a. ábra: Kalapszordínó



5b. ábra: Tűszordínó

A korai zeneirodalomban a zeneszerzők csak jelezték a kottákban, ha szordínó használata volt szükséges, de nem kötötték ki, hogy milyen típusra gondoltak. Azonban, a szordínók fejlődésével, az 1940-es évektől vált gyakorlattá, hogy a szerzők kikötik, hogy milyen hangszínre és szordínóra írták az állást. A hangszeres jazz zenében általában a használt szordínó fajtája a játékostól függ ami nyilvánvalóan nagyobb szabadságot jelent. Egy felmérés szerint a legnépszerűbb szordínófajták Németországban és Ausztriában a következők:

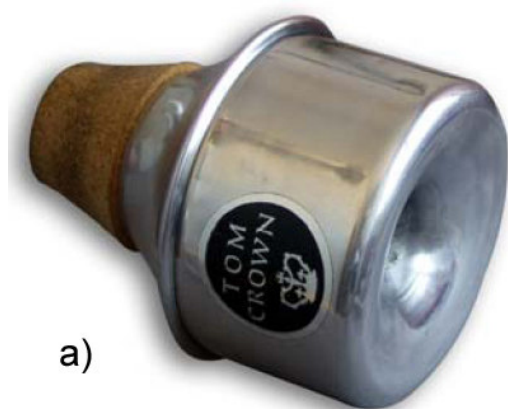
1. kalapszordínó (93 %-os használat)
2. tűszordínó (92%)

3. harmon szordínó (75%)
4. plunger szordínó (44%)
5. wah-wah szordínó (40%)
6. velvet szordínó (22%)
7. elektronikus szordínó (8%)
8. derby szordínó (6%)
9. mega-clear-tone szordínó (3%)
10. buzz-wow szordínó (3%)
11. mel-o-wah szordínó (2%)
12. pixie szordínó (2%).

Ebben a felsorolásban nem szerepelnek a gyakorló vagy szállodai szordínók egyes fajtái, amelyek egyébként összességében 47%-os népszerűségnek örvendenek. A következőkben a trombita natúr hangját és a hat legnépszerűbb szordínót vizsgálom meg a már felsorolt szempontok szerint.

1.4.1 A dinamika

A trombita hangossága szordínó nélkül függ attól, hogy milyen magas regiszterben játszunk. Az alsóbb regiszterben nagyjából 30 phon (lásd **4. fejezet**) a hangosság mértéke, míg a felső regiszterben 13 phon (Meyer, 1980).



6a. ábra: Harmon szordínó

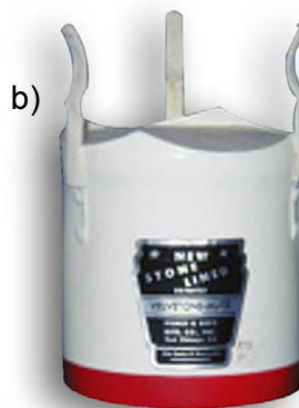


6b. ábra: Wah-wah szordínó

A vizsgálataim során a dinamika jellemzésére az un. logaritmusos intenzitásskálát használom, melyet az elméleti tárgyalás során definiálok. Válasszuk a referencia intenzitást a leghalkabb trombitahang (ppp) intenzitásának, amit meg tudunk fújni szordínó nélkül (0 dB), (**1. táblázat**). A dinamikai osztályozásunk során először az intenzitás maximumokat keressük. Mérésekből adódóan a nem szordinált fortissimo trombitahang és a nyitott plunger (**7a. ábra**) szordinó hangja hasonlóan 30 dB körüli. Ezt követi a zárt plunger szordinó (24 dB), majd nagyjából egy csoportban a kalap- (**5a ábra**), velvet- (**7b. ábra**), tű- (**5b. ábra**), és wah-wah (**6b. ábra**) szordinók következnek 16 dB körüli értékkel.



7a. ábra: Plunger szordinó



7b. ábra: Velvet szordinó

A leghalkabb szordinó a harmon (**6a. ábra**) szordinó melyhez 9 dB hangintenzitás érték tartozik, ez az oka, hogy a harmon szordinót általában erősítik. A redukált hangosságot figyelve is a harmon szordinó a legutolsó a sorban, mivel a vele leghalkabb megfújható hang -8 dB, így a redukált hangosság 17 dB. Érdekes jelenség, hogy a nyitott plunger szordinó minimuma nagyobb (3 dB), mint ha szordinó nélkül fújnánk.

	Ppp	fff	Maximum eltérés
Szordinó nélkül	0	30	
Tűszordinóval	-7	17	(-13)
Kalapszordinóval	-5	18	(-12)
Velvet szordinóval	-7	17	(-13)
Harmon szordinóval	-8	9	(-21)

Wah-wah szordínóval	-7	16	(-14)
Zárt plunger szordínóval	3	24	(-6)
Nyitott plunger szordínóval	0	27	(-3)

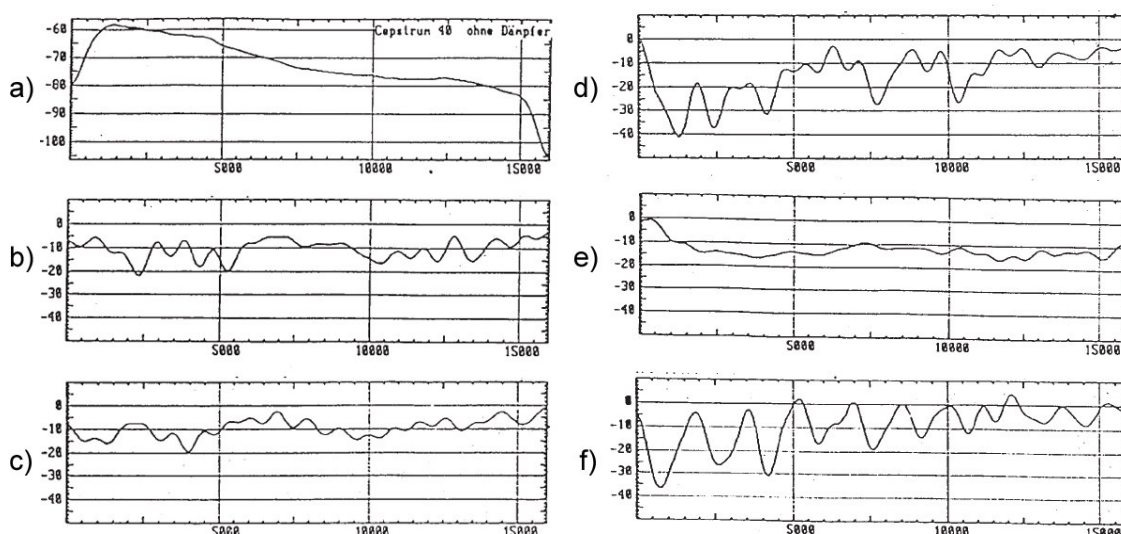
1. táblázat: Dinamikai tartományok összehasonlítása.

*Az értékek relatív dB értékekkel szerepelnek a nem szordinált trombita hangjához viszonyítva.
A 0 dB érték 64 dB reális értéknek felel meg.*

1.4.2 A hangszín

A különböző szordínók által keltett hangszínek nagyon jellegzetesek lehetnek, de nagyon hasonlíthatnak is egymásra. A hangszínbeli különbségeket fizikai szempontból a hangcepstrumot, vagy a hangspektrumot vizsgálva, a formánsok és antiformánsok elhelyezkedésével tudjuk tárgyalni. Az ehhez kapcsolódó definíciókról később, az elméleti tárgyalásban lesz szó.

A szordínó nélküli c' hang cepstruma a **8a. ábrán** látható. A formáns szakasz a 1.2-1.5 kHz körül helyezkedik el, ahonnan az intenzitás folyamatosan csökken. A **8b. ábrán** látható kalapszordínó cepstrumában már antiformánsok is megjelennek 2.5 kHz és 5 kHz-nél, és valamivel gyengébben 10 kHz felett. A lehetséges hullámhosszak azonban csak a kalap átmérőjénél kisebbek lehetnek.

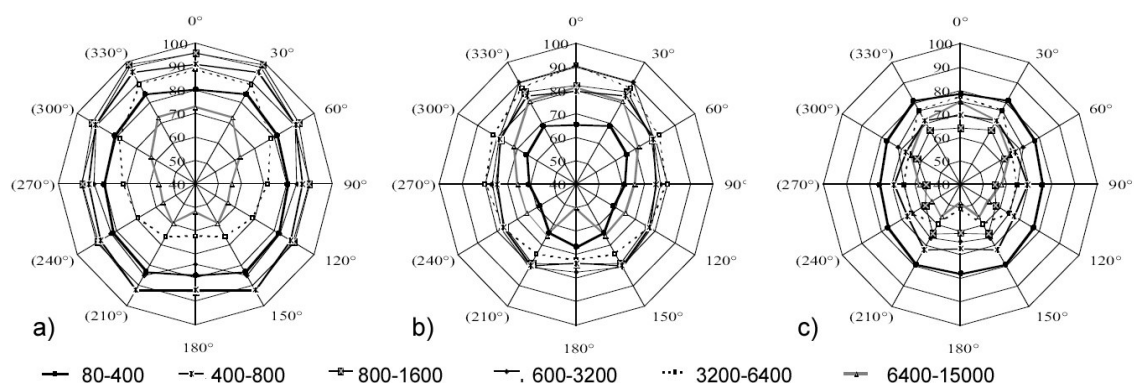


8. ábra: A szordínók hangcepstruma

Az ábrázolt szordínók hangjai: a) szordínó nélküli hang b) kalapszordínó c) tűszordínó d) harmon szordínó e) velvet szordínó f) wah-wah szordínó. (Bertsch után)

A wah-wah szordínó kacsa hangját a cepstrumban váltakozó formánsok és antiformánsok okozzák. A jellegzetes nazális hangszínért a 1.5 kHz körüli tartomány felelős (8f. ábra). A klasszikus tűszordínó (8c. ábra) cepstrumában is megfigyelhető 10 kHz körül gyengébb alsó komponensek, de a 2 kHz-nél elhelyezkedő formáns és a 4 kHz-nél elhelyezkedő antiformáns a meghatározóak a spektrumon belül. A velvet szordínó esetén (8e. ábra) nincs domináns formáns és antiformáns sem. Ez okozza a szordínó sötét hangszínét, mivel a magasabb hullámhosszú hangkomponensek elnyelődnek a textil betétben.

1.4.3 A hang iránya



9. ábra: Eltérő frekvenciájú hangtartományok intenzitása különböző irányokba
a) szordínó nélküli hang b) tűszordínó c) harmon szordínó.

A hang terjedési iránya megváltozik, ha szordínót használunk. (9. ábra) Ennek mérése egy olyan elrendezéssel lehetséges, ahol hét mikrofont helyezünk el 180°-ban 30°-onként a hangszerkorpusz körül úgy, hogy 0°-nak a korpusszal szembeni pozíciót választjuk. Ezután vizsgáljuk a különböző frekvenciájú hangtartományok intenzitásának irányeloszlását.

A vizsgált frekvenciatartományok:

80-400 kHz,

400- 800 kHz,
800-1600 kHz,
1600-3200 kHz,
3200-6400 kHz,
6400-15000 kHz. (*Bertsch után*)

A spektrumban az antiformánsak lesznek dominánsak minden irányban, a magasabb frekvenciákon pedig a 0° -os, frontális irányba fókuszálódnak.

1.4.4 A frekvenciamenet és intonáció

Az akusztikai impedancia méréséből látszik (definíciót lásd a 3. fejezetben), hogyan változtatja meg a szordínó a hang akusztikai képét. [2] Minden vizsgált hangtompító esetén (kivéve a velvet szordínó) egy új rezonancia csúcs jelenik meg az impedancia-görbén, egy eltolást okozva az azt követő csúcspontokon. Az eltolódás az újonnan megjelent csúcs helyétől, és szélességétől függ. Ez nem zavaró abban az esetben, ha a csúcs-hoz tartozó frekvencia a játékhoz használt frekvenciatartomány alatt van. Ez az eset a kalap-, a tű-, harmon- és wah-wah szordínókra igaz. Rosszabb esetben elnyomja az alacsonyabb regiszterbe eső rezonancia-csúcsokat. Plunger szordínó esetén a megjelenő csúcs a használt regiszterbe esik és eltolja a korrekt hangmagasságot, azonban ebben az esetben nem zavaró, mert ezt a szordínót leginkább különleges effektek megszólaltatására használják.

A rezonanciacsúcsok léptetése, eltolja a hangmagasságot, azonban így nemcsak az önálló komponensek frekvenciája változik, hanem a teljes intonáció. A jelenség a gyakorlatban ott jelenik meg, mikor szordínó használata esetén megemelkedik a hangolás, amit csak a hangolóúg (*1. ábra*) korrigálásával lehet kompenzálni. Ez kisebb gondot okoz a tű-, kalap- és bucket szordínók esetén, azonban harmon-, wah-wah- és leginkább a zárt plunger szordínók esetében már zavaró lehet, és főleg az alsó regiszterekben domináns.

2 *A kutatás célkitűzése*

Szakdolgozatom célja a trombitahang fizikai paramétereink definiálása és elemzése egyszerű matematikai módszerekkel. Elsődleges célom az, hogy rámutassak arra, hogyan változik meg a hang különböző szordínókat használva és a hang dinamikáját változtatva. Ennek céljából akusztikai méréseket végeztem, amelyek során felvételeket készítettem a fent említett mérési esetekben. Ezt követve Fast Fourier-transzformációt alkalmazva sikerült a hangok spektrumát kiszámítanom, majd próbáltam rámutatni a hangok közötti eltérésekre.

Másodlagos célom a témával kapcsolatos irodalom feldolgozása – a teljesség igénye nélkül – azért, hogy a témával nem foglalkozók számára rámutassak a hangszer fizikai ismeretének fontosságára.

Következőkben az általam mért és számolt eredményekkel foglalkozom, valamint bevezetem azokat az alapvető matematikai és akusztikai definíciókat, amelyek feltétlenül szükséges a leírtak megértéséhez.

3 *Elméleti tárgyalás*

Ebben a fejezetben a részben már korábban használt alapvető akusztikai fogalmak kerülnek bevezetésre, valamint a később alkalmazott módszerek matematikai alapjait próbálom röviden szemléltetni.

3.1 *Alapvető akusztikai definíciók*

Az első ilyen fogalom – az **1.4.1**-es fejezetben használt – a hangintenzitás fogalma, ami nem más, mint az egységnyi felületre jutó hangenergia, tehát a mértékegysége watts/m^2 . Egy hang intenzitását azonban szokás viszonyítani a hallásküszöb intenzitásához: $I_0 = 10^{-12} \text{ watts/m}^2$, és ennek segítségével tudjuk definiálni a leginkább használt mértéket, a logaritmikus intenzitás-skálát, vagy más néven a decibel skálát:

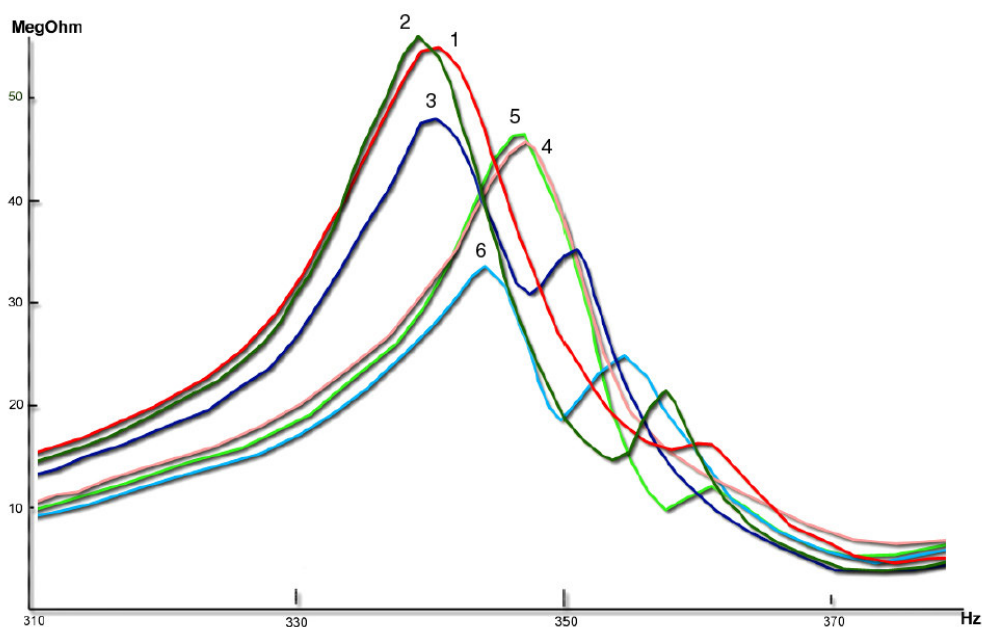
$$I[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left[\frac{I}{I_0} \right]$$

Tehát így a hallásküszöbhez rendeltük a 0 dB értéket. Az **1.4.1**-es fejezetben ezt annyival módosítottuk, hogy I_0 nem a hallásküszöb intenzitása, hanem a leghalkabb megszólaltatható trombitahang intenzitása volt.

Az **1.4.1**-es fejezetben használt hangosság fogalma szintén a dinamika egyik mértéke, azonban definíciója eltér a hangintenzitásától. A hangosság egy szubjektív fogalom, ami a fül érzékenységétől függ. Mivel az így érzett hangosság nem lineárisan, hanem logaritmikusan változik az intenzitással, ezért terjedt el a decibel-skála használata. A hangosság mértékegysége a *son*, vagy a *phon*. A *phon* definíció szerint a hang intenzitásától [dB] és frekvenciájától függ, méghozzá úgy, hogy egy I_0 intenzitású, rögzített frekvenciájú hanghoz viszonyítjuk a hallott hangot. I_0 nem más, mint $10^{-12} \text{ watt/m}^2$

intenzitás érték egy 1000 Hz-es hang esetén, ami nagyjából a hallásküszöb értéke ezen a frekvencián és azt mondjuk, hogy egy hang hangossága 0 phon, ha ugyan olyan hangosnak hallatszik, mint ez a 1000 Hz-es tiszta hangot. A son-hangosság skála egy teljesen szubjektív, sok személyen végzett kísérlet alapján felállított mérték.

Az 1980-as években kezdtek használni az akusztikusok egy olyan mennyiséget, amivel egyértelműen azonosítható egy hangszer a hangszíne alapján. [7] A definiált akusztikai impedancia (akusztikai ellenállás) a hangforrásra merőleges egységnyi távolságra lévő felületet érő hangnyomás, és a terjedési sebesség hányadosaként felírható komplex mennyiség, ami tulajdonképpen egy akusztikai ujjlenyomatként is felfogható. Ha az impedanciát egy adott hangra ábrázoljuk a frekvencia függvényben (**10. ábra**), akkor a kapott görbe csúcsa (a hang alapfrekvenciája) az adott hang intonációját azonosítja.



10. ábra: Impedancia csúcsok a 340 Hz-es g' (írott f') hangra egy hangszer és három különböző befúvócső esetén.

Az 1-3. görbék esetén a hangot billentyűlenyomás nélkül, a 4-6. görbék 1+3 billentyűkombinációt alkalmazva szólaltattuk meg [7].

Majd ezt egy referencia frekvenciával összehasonlítva következtetni tudunk a hangszer hamisságára. Azonban ez sok esetben eltér a játék közben érzett intonációtól. Ezért van, hogy ugyanaz a hangszer különböző játékosok kezében máshogy szól.

A következő részben az általunk használt matematikai eljárást, valamint a hang digitalizálásához szükséges feltételeket kerülnek tárgyalásra.

3.1.1 A Fourier-sor és a Fourier-transzformált

Ebben a részben szereplő elméleti módszert, Norbert Hesselmann : Digitális jel-feldolgozás [4] című könyvében szereplő leírás alapján vezetem be.

A jelek mind az idő-, mind a frekvenciatartományban leírhatóak különböző jellegzetes paraméterekkel, amelyek szigorú matematikai összefüggésben állnak egymással. [4] Erre először *Jean Baptiste Joseph de Fourier* francia matematikus figyelt fel 1822-ben. Arra jött rá, hogy minden periodikus függvény felbontható amplitúdó- és fázissúlyozású harmonikus rezgések összegére. Ezt az állítást később nemperiodikus függvényekre is bebizonyították, és ebből kiindulva felállítottak egy transzformációs eljárást, amit azóta is *Fourier-transzformáció* néven ismert.

Fourier tételét a következő alakban írta fe:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(\omega_k t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(\omega_k t)$$

ahol $f(t)$ egy periodikus függvény, vagyis $f(t) = f(t + nT_0)$, $n = -\infty \dots + \infty$. Ebben a kifejezésben az ω a körfrekvenciát jelenti ($\omega_k = 2\pi f_0 k$ ahol k a hullámszám, f pedig a frekvencia), valamint $T_0 = 1/f_0$ a periódusidőt jelöli.

Ez átírható egy könnyebben kezelhetőbb alakra:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_k t + \varphi_k)$$

Ahol az egyes felbontott rezgések amplitúdója és fázisa közvetlenül látszik, nevezetesen:

$$A_0 = a_0, \quad A_k = a_k / \cos \varphi_k = -b_k \sin \varphi_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{és} \quad \varphi_k = \arctg(b_k / a_k)$$

A periodikus időfüggvény A_k és φ_k értékekkel leírt spektrumát a szokásnak megfelelően az $\omega_k = k\omega_0$ helyeken vonalakkal ábrázoljuk, melyek hosszúságát az amplitúdó és a fázis számértékei határozzák meg, előjelük pedig a fázis előjelétől függ. Abban az esetben, ha ez pozitív, akkor a komponens formánsnak, ellenkező esetben, ha a fázis negatív, akkor antiformánsnak nevezzük. Az ilyen un. vonalas spektrum két szomszédos vonalának előfordulási helyének távolsága fordítottan arányos a periódusidővel. Ha az alaphfrekvencia minden egész számú többszörösénél létezik spektrumvonal, akkor ezekből akkor is lehet következtetni az alaphfrekvenciára, ha az a spektrumban nem jelenik meg (tipikus eset a telefonon való hangátvitel). Az ember hallórendszerének elegendő a spektrumvonalak távolságának ismerete, hogy a hangot a megfelelő hangmagasságba interpretálja

A Fourier-sort azonban leginkább komplex alakban szokás használni, mivel ebben az esetben a harmonikus rezgés két, fél amplitúdójú, pozitív és negatív frekvenciájú rezgés összegével ábrázolható és abban az esetben, ha $f(t)$ valós függvény, a komplex Fourier-sor teljesen megegyezik a korábban definiált valós alakkal.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{(jk\omega_0 t)} \quad , \quad \text{ahol} \quad C_k = \frac{1}{T} \int_{-T_0/2}^{+T_0/2} f(t) e^{jk\omega_0 t} dt \quad \text{az amplitúdó tag.}$$

Eddigi tárgyalásunk során feltettük, hogy a rendelkezésünkre álló $f(t)$ függvény folytonos. Ez azonban mintavételezett jelek esetén nyilvánvalóan nem igaz, mivel ekkor T_f időtartam alatti $f_m = 1/\Delta t$ mintavételi frekvenciával történő mintavételezés esetén az $f(t)$ függvény $N = T_f / \Delta t$ számú diszkrét mérési adattal van leírva.

Ebben az esetben a használatos a Diszkrét Fourier-transzformált, ami a következőképp írható:

$$F(\omega_M) = \Delta t \sum_{n=-N/2}^{(N/2)-1} f(n\Delta t) \exp(-jM\Delta\omega n t)$$

ahol ω_m egy diszkrét változó, valamint $M=\omega/\Delta\omega=f_M/\Delta f$ a folytonos frekvenciatartomány osztásainak a száma.

Kérdés azonban, hogy egy mintavételezett jelből származó diszkrét adatsor mennyire pontosan ír le egy folytonos függvényt, és az ebből számolt Fourier-transzformált mennyire változik meg, ha a mért jel ráadásul még időben korlátozott, tehát véges. A Shannon-tétel szerint egy analóg jel mintavételezése során ahhoz, hogy a jel által tartalmazott információ teljes mértékben megmaradjon, a mintavételezési frekvenciának legalább kétszer nagyobbnak kell lennie, mint a jelben előforduló legnagyobb frekvenciájú komponens. Az így előállított jel már megfelel az elvártaknak, így a spektrum torzulása csak a mintavételezés végeességéből származhat. Ezt az eltérést azonban a mintavételezés idejének meghosszabbításával csökkenthetjük.

3.1.2 Cepstrumanalízis

Ezt a módszert csak röviden tárgyalom, mivel nem kapcsolódik szorosan a használt módszerekhez, csak a korábbi fejezet megértéséhez nyújt segítséget. [4]

A cepstrum fogalmát *Bogert* definiálta 1963-ban, és először földrengéshullámokra alkalmazták. Ez a fajta analízis akkor alkalmazható, ha a spektrum több részspektrum szorzataként áll elő:

$$F(\omega) = Q(\omega)H(\omega)$$

Ekkor a $\log_a(xy) = \log_a(x) + \log_a(y)$ tételt alkalmazhatjuk a fenti szorzatra bontott spektrumra, így előállíthatjuk a spektrum "spektrumát" az ún cepstrumot. Abban az esetben, ha komplex cepstrumot használunk, az információt tartalmaz az kezdeti spektrum amplitúdójáról és fázisáról. Ezzel szemben valós cepstrum esetén csak a spektrum amplitúdója állapítható meg. Szemléletesen a cepstrumanalízis abban az esetben hasznos, mikor a Fourier-transzformációval számolt spektrum további periódikus viselkedést mutat.

4 *Mérési eredmények*

Ebben a fejezetben először a használt eszközöket és azok tulajdonságait mutatom be, majd az eredményeinket vizsgálom meg és elemzem azokat. A mérések a Szegedi Tudományegyetem Optika és Kvantumelektronika Tanszékén készültek, a Dr. Kovács Attila és Vass Csaba által irányított hallgatói digitális laboratóriumban.

4.1 *Mérési eszközök és azok tulajdonságai*

A mérésekkel a trombita hang spektrumának meghatározása volt a cél, először hangtompító használata nélkül, majd különböző szordínók használata esetén. Ennek érdekében laborkörülmények között felvételeket készítettem az eltérő hangtípusokról, és a hangok Fourier-transzformáltját meghatározva kaptam az egyes hangokra jellemző spektrumokat. A mérések során egy hangszer által kiadott hangot mikrofonnal elektromos jellé alakítva, számítógép segítségével rögzítettem azokat. A hangot jellemző periodikus függvényt valós számokkal ábrázoltam az idő függvényében.

4.1.1 *A hangszer*

A használt hangszer egy a Bach gyár által gyártott Stradivarius 72GH típusú B-hangolású trombita volt, melynek hangzó A hangja (írott H') 442 Hz-re volt kalibrálva. A hangszer teste vörösréz-ből készült, a furat ML méretű, a hangszer 72 heavy korpuszal készítették. A megszólaltatására használt fúvóka szintén Bach 1¼ típusú volt.

4.1.2 A szordínók

A mérésekhez négy szordínót használtam, melyek közül kettő "Denis Wick", és kettő "aS" gyártmányú volt. Az első típus egy Denis Wick tűszordínó, a második egy kalapszordínó, amihez két mérési eset tartozott: mikor a kalap nyitott állásban volt, a hangszerkorpuszól 1.5 cm távolságban, valamint mikor a kalap teljesen rá volt tolva a korpuszra. Az aS szordínók közül az egyik egy harmon szordínó, a másik egy wah-wah szordínó volt.

Így hat különböző mérési esetet vizsgáltam, egyet szordínó nélkül, ötöt pedig szordínók segítségével. Az összes esetben eltérő hangmagasságra és dinamikára is differenciáltam a méréseket, vagyis megkülönböztettem ppp, mf és fff dinamikai eseteket.

4.1.3 Alkalmazott környezet

A mérésekhez használt hangkártya egy *Terratec Aureon Space 7.110ter* típusú hangkártya volt, amivel 24 biten 192 kHz felbontással lehet felvételeket készíteni. Az alkalmazott mikrofon-előerősítő-hangkártya rendszer átviteli függvénye nem ismert de feltettem, hogy a 16 Hz – 20 kHz tartományon lineáris és semmi torzulást nem okoz a jelben.

A felvételek a *GoldWave 4.24* programmal készültek. Mivel a hallható tartomány spektrumára vagyunk kíváncsiak, ezért a Shannon-tétel szerint a hallható tartomány felső, 20kHz-es tartományánál a mintavételezési frekvenciát ennek legalább kétszeresére kell választani. Esetünkben ez minden esetben $f_m=44.1$ kHz volt.

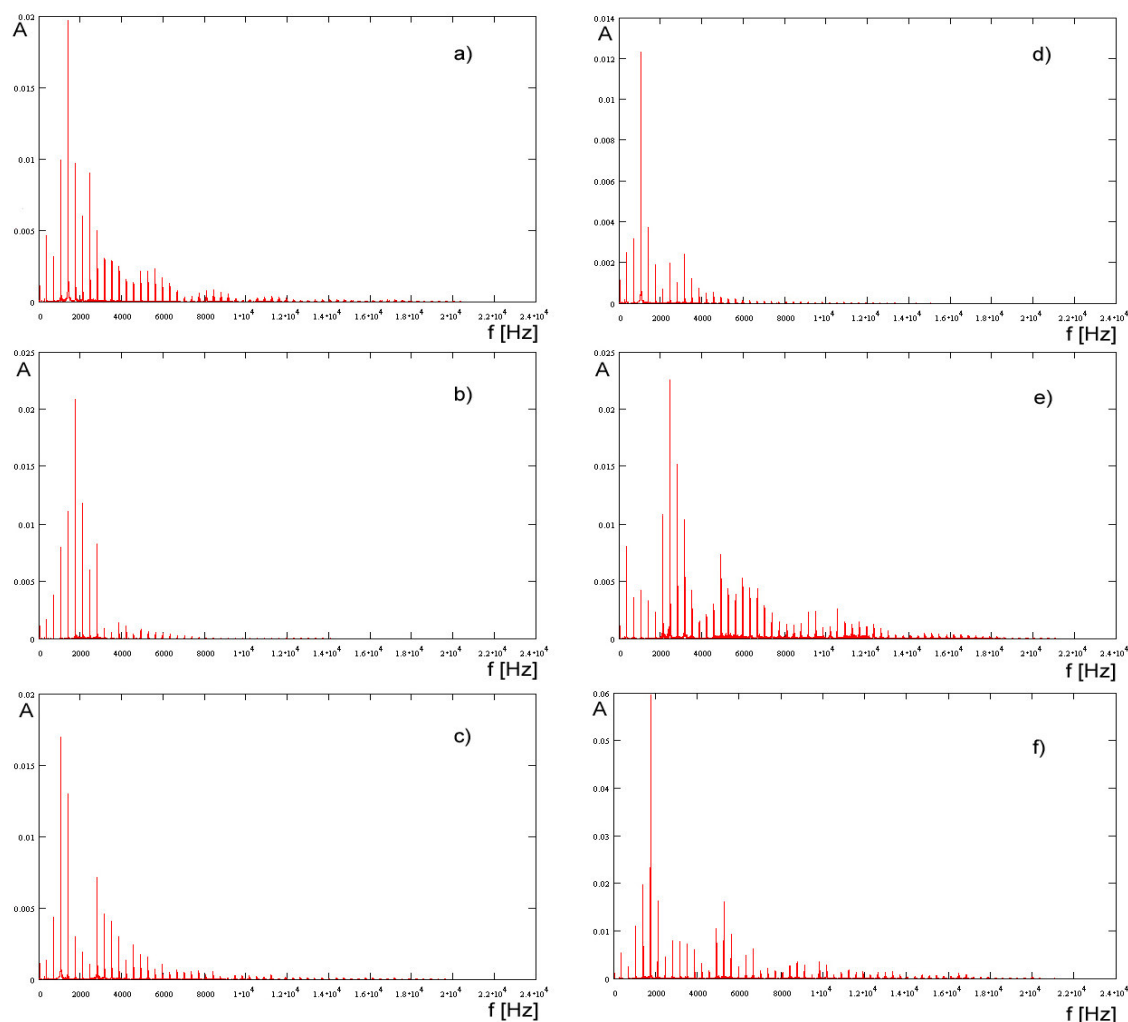
A mintavételezés során az egyes feszültségértékeket valós számokként mentettem el. Az így kapott adatsorból Diszkrét Fourier-transzformáltat alkalmazva a *MathCad* program segítségével számoltam a spektrumot.

4.2 Eredmények bemutatása és elemzése

A méréseket a már a fent említett mérési esetekre végeztem el. Az ábrázolt vonalas spektrum x tengelyén minden esetben a frekvencia [Hz] szerepel, az y tengelyen pedig az amplitúdót ábrázoltam. Ez egy dimenzó nélküli mennyiség, mivel az egyes spektrumvonalakhoz tartozó amplitúdók arányai érdekelnek bennünket.

4.2.1 A mf F' hang vizsgálata

Megfontolásainkat kezdjük a B trombita számára írott G', hangzó F' hang vizsgálatával, egy közepes mf dinamikán.



11. ábra: A hangzó F' hang spektruma

a) szordínó nélkül, b) tűszordínóval, c) kalapszordínóval, d) zárt kalapszordínóval, e) harmon szordínóval, f) wah-wah szordínóval.

A fenti ábrán látszik, hogy a nem szordinált trombitának (**11a. ábra**) és a harmon szordinónak (**11e. ábra**) vannak a legfelhangdúsabb spektruma. Ezeknél egy elég erősen csillapodó periodicitást is megfigyelhetünk, amiből az következik, hogy ezek a hangok alkalmasak lennének cepstrum-analízisre is.

A túsordinó esetén (**11b. ábra**) a spektrumvonalak ~ 3000 Hz fölött eltűnnek, aminek következménye a szordinóra jellemző éles, felhangszegény hangzás. A kalapszordinó nyitott állapotban (**11c. ábra**) egy furcsa viselkedést mutat, miszerint ~ 2800 Hz környékén megjelenik egy második domináns felhangcsoport. Az ehhez tartozó $\lambda = 0.12m$ a szordinó méretével van kapcsolatban. A zárt eset (**11d. ábra**) a nyitott szordinóhoz hasonlít, csak sokkal gyengébb intenzitással.

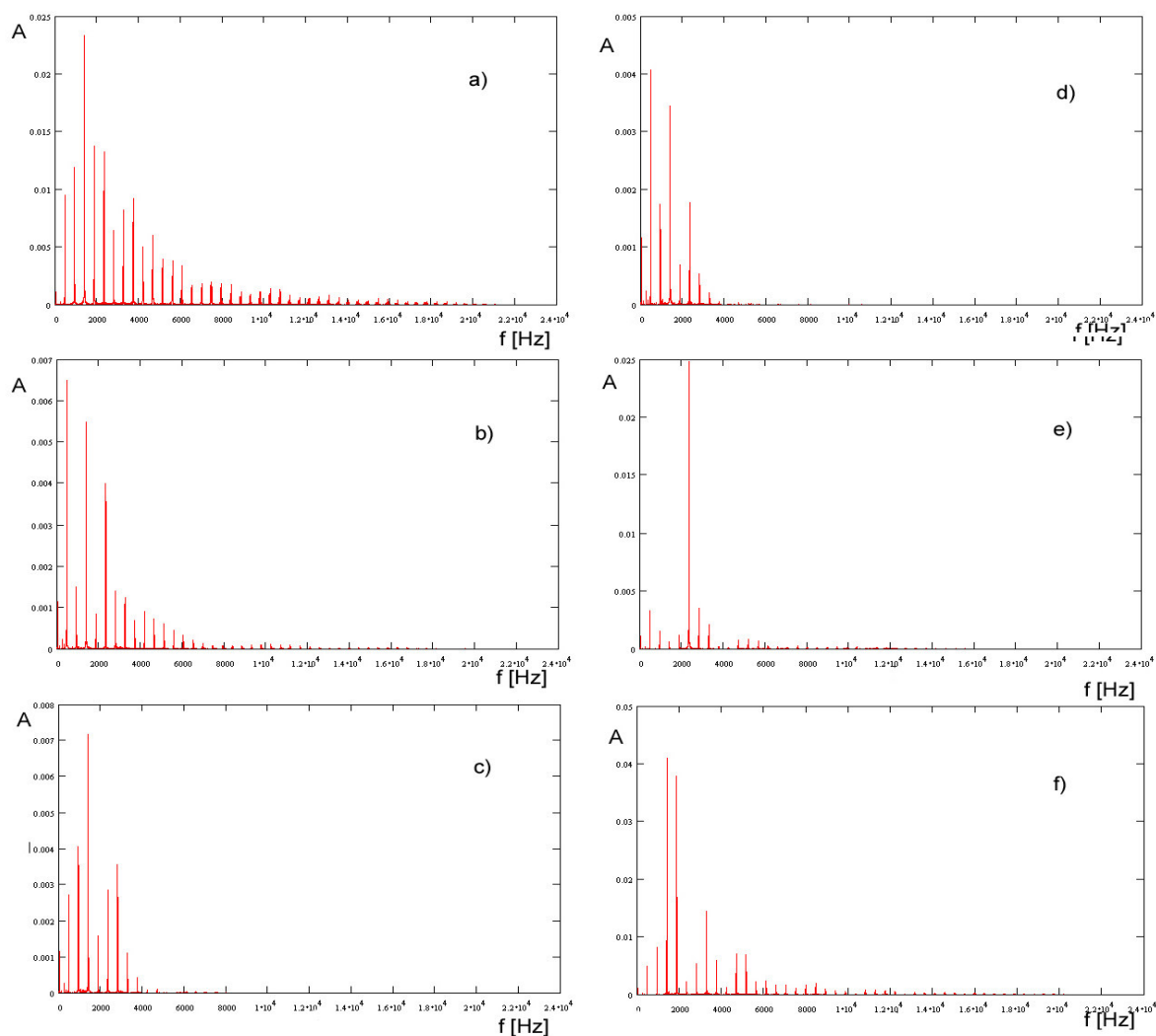
A harmon szordinó (**11e. ábra**) esetén a már említett periodicitáson kívül a legnagyobb intenzitású felharmonikus eltolódása ~ 1800 Hz-től a magasabb ~ 2100 Hz frekvenciához. Összehasonlítva az **11a. ábrával** itt a spektrum szélesebb, és a maximumok is jóval nagyobbak, ami a harmon szordinó teljesen eltérő hangszínét okozza. Ez a szordinó főleg a jazz zenében alkalmazott, mint ahogy a wah-wah szordinó is, melynek spektruma nagyon hasonló.

4.2.2 A ppp B' hang vizsgálata

A következő mérési a hangzó B' hangra készült (írott C'). A hang dinamikája minden esetben ppp volt.

Az első szembetűnő különbség a fenti **11. ábrától** abban mutatkozik, hogy a spektrumvonalak sűrűsége kisebb, ahogy az elméleti tárgyalásban leírtak alapján vártuk. A natúr trombitahang spektruma (**12a. ábra**) megőrizte nagyjából az alakját, azonban a harmon szordinó spektrumképe (**12e. ábra**) jelentősen megváltozott. A legnagyobb intenzitású frekvencia megmaradt a ~ 2100 Hz környékén, azonban gyakorlatilag az összes többi spektrumvonal eltűnt.

Kalapszordínó esetén (**12c. ábra**) a két csúcsfrekvencia megmaradt, de a lecsengés sokkal erősebb ebben az esetben. A zárt kalapszordínó hangképe is jelentősen megváltozott. Az előző esetben domináns harmadik spektrumvonal amplitúdója ebben az esetben lecsökken, és a szomszédos két spektrumvonal válik relevánssá.



12. ábra: A hangzó ppp G' hang spektruma

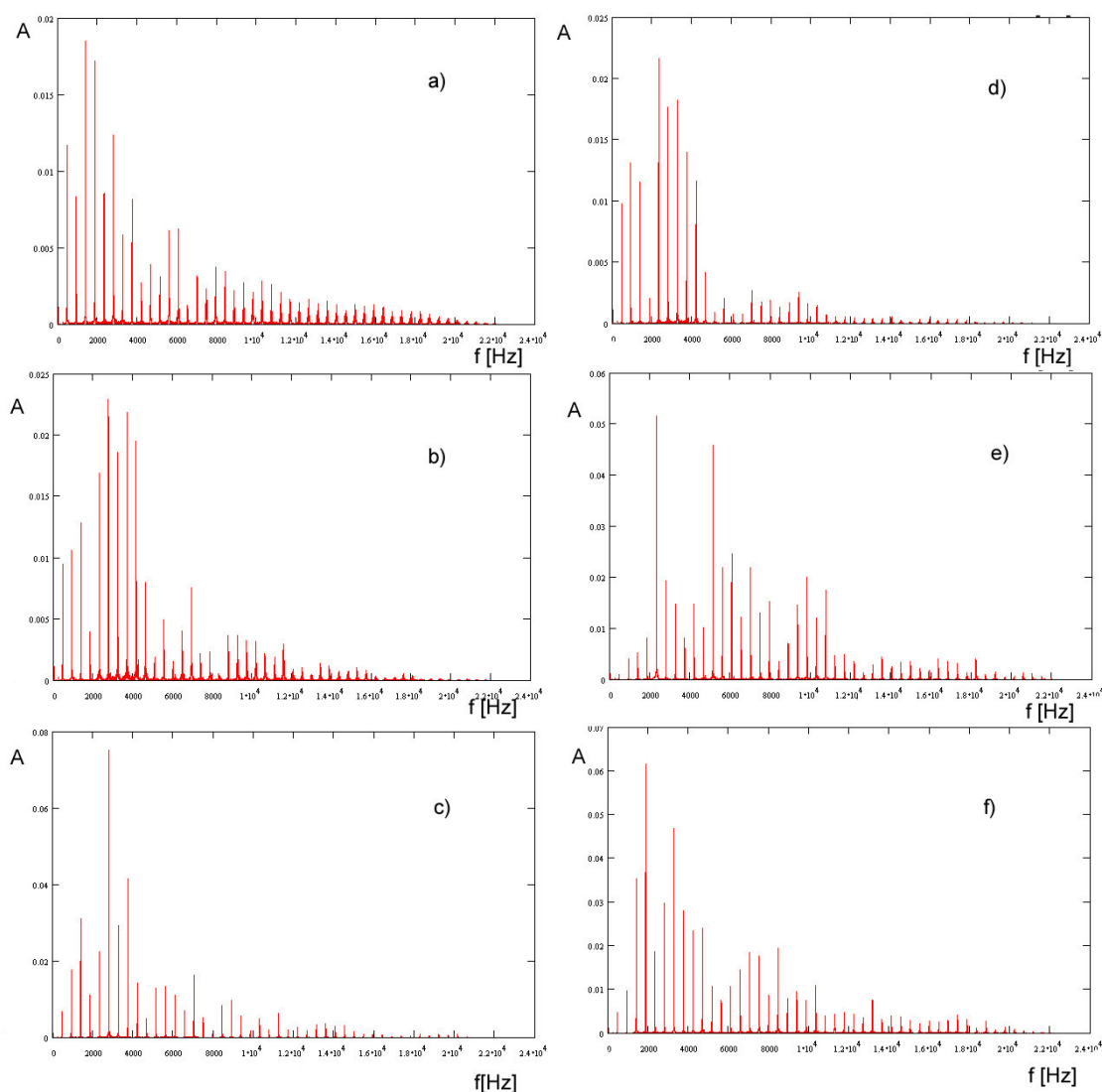
a) szordínó nélkül, b) tűszordínóval, c) kalapszordínóval, d) zárt kalapszordínóval, e) harmon szordínóval, f) wah-wah szordínóval.

A tűszordínó (**12b. ábra**) spektrumában több nagy amplitúdójú felhang jelenik meg, valamint a wah-wah szordínó esetén (**12f. ábra**) a második domináns felhang áttolódik a harmadik intenzitás csúcsról a másodikra, valamint domináns csúcs megkettőződik.

4.2.3 A fff B' hang vizsgálata

Ez a mérés az előzőhöz hasonlóan hangzó B' hangra készült, azonban az előzővel ellentétben szélsőséges forte dinamikával.

Ebben az esetben a natúr hang (13a. ábra) 20 kHz-ig tartalmaz felhangokat, vagyis a lecsengés jóval hosszabb, mint az előző esetben, ahol a spektrum 10 kHz fölött kisebb intenzitást mutatott.



13. ábra: A hangzó fff G' hang spektruma

a) szordínó nélkül, b) tűszordínóval, c) kalapszordínóval, d) zárt kalapszordínóval, e) harmon szordínóval, f) wah-wah szordínóval.

Az egyik igazán érdekes viselkedést a harmon szordínó (**13e. ábra**) mutatja, amit az előző esetben egy szegény spektrumkép jellemzett egy ~2200 Hz körüli kiugró csúccsal. fff dinamika esetén ez a csúcspont megmarad, de ~5100 Hz-nél megjelenik egy újabb maximum, és a köztes frekvenciákhoz tartozó felhangok is felerősödnek. Ezen túl érdemes megfigyelni azt a jelenséget, ami már a **12. ábrán** látszott, miszerint ha a spektrum burkolóját tekintjük az amplitúdó maximumok periodicitást mutatnak, és ehhez az ingadozáshoz adódnak hozzá a hangra jellemző spektrális összetevők.

4.2.4 A B' hang elemzése változó dinamika esetén

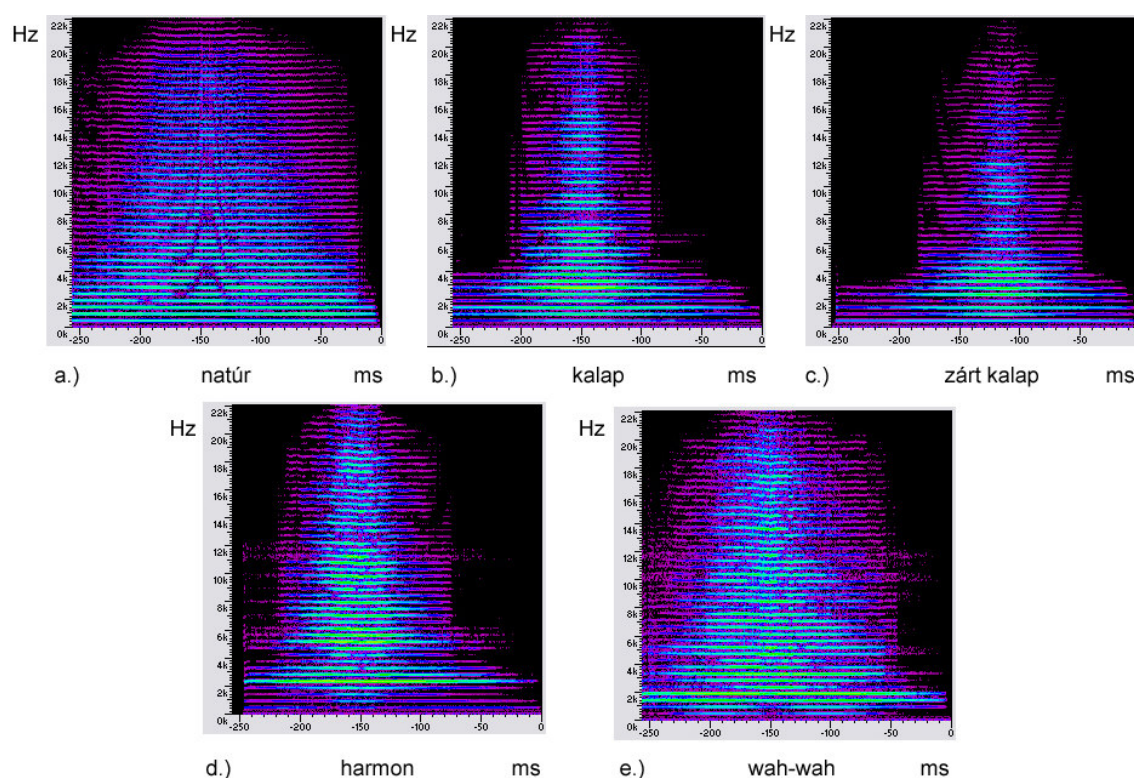
Igazán érdekes kérdést vet fel a spektrum változása abban az esetben, ha a dinamikát változtatjuk. Észrevehetően változik a hangszín folytonos intenzitás átmenet esetén. A következőkben ezzel kapcsolatban teszünk néhány megfontolást.

Öt szordínó esetében vizsgáltam a hangszín változását, crescendo-decrescendo dinamika esetén (**14. ábra**). A grafikus megjelenítéshez nem vonalas spektrumot használtam, mivel a hang időbeli változására vagyunk kíváncsiak, hanem egy olyan színes frekvenciaspektrumot ábrázoltam, ahol a vízszintes tengelyen az idő áll, a függőleges tengelyen a frekvencia. Az ábra színei az egyes frekvenciakomponensek intenzitását jelölik. A növekvő intenzitáshoz rendelt színek sorban: fekete, lila, kék, cián, zöld, sárga és piros.

A **14a** ábráról látszik, hogy a natúr trombitahang spektruma nagyon gazdag, és már halk hang esetén is tartalmaz magas frekvenciás tagokat, amik az intenzitás növelésével periodikusan kioltják egymást. Ez okozza a ~150 ms körüli csúcsok megjelenését.

Kalapszordínó esetén (**14b ábra**) a magasabb frekvenciájú komponensek egy szűkebb tartományban helyezkednek el, így nagyon eltérő a két határesetben a hang-

szín. Ez okozza azt, hogy kalapszordínót használva nagy intenzitás esetén a hang hirtelen kinyílik és torz lesz. Ugyan ez jellemző a zárt kalapszordínó esetében is (**14c ábra**). A kettő közötti különbség az intenzitás maximum szélénél kialakult periódikus kioltás sűrűsége. Mindkettő szordínó esetén az alsóbb frekvenciák szólnak nagyobb intenzitással, ami abból látszik, hogy az intenzitás csúcsok alsó, 4 kHz körüli része jóval világosabb, mint a tetejük. Harmon- és wah-wah szordínók esetén (**14d-e ábra**) ~14 kHz frekvenciáig nagy intenzitással vannak jelen a frekvenciatagok, bár ez maximum wah-wah szordínó esetén jóval tovább, -200ms-tól -50 ms-ig tart.



14. ábra: A hangzó B' hang spektrogramja cresc.-decresc. dinamika esetén

a) szordínó nélkül, b) kalapszordínóval, c) zárt kalapszordínóval,
d) harmon szordínóval, e) wah-wah szordínóval.

4.3 *Eredmények összefoglalása*

A fenti négy méréssorozatot tekintve levonhatjuk a következtetést, miszerint egy hang spektruma függ a hang dinamikájától és magasságától. Jól látszik a spektrum szélessége ppp dinamika esetén, és ez hogyan változik meg, ha extrém nagy dinamikát alkalmazunk. A szordínók használatakor minden esetben volt egy a hangtompítóra jellemző alapspektrum. A hang dinamikájának és magasságának változtatásával ehhez adódtak hozzá komponensek, vagy a spektrumkép tolódott el.

ppp dinamika esetén minden esetben a spektrum korlátos, maximum ~10 kHz-ig terjedt ki, azonban ez a jelenség már mf dinamika esetén eltűnt, és a hangintenzitást növelve ez a küszöbérték egyre jobban tolódott el a magasabb frekvenciatartományok felé, fff esetén pedig már ez a határfrekvencia megközelítette a 20 kHz-es felső hallásküszöböt. Megfigyelhettük, hogy nagy dinamikánál jelentek meg a spektrumban több csúcsból álló maximumok, míg mf és alacsony dinamikák esetén csak egy csúcsos maximum volt jellemző. A spektrogramokból szembetűnik, hogy a szordínó nélküli trombitahang felhanggazdagsága mennyire eltér a szordinált esetektől, és ez minden vizsgált dinamika esetén igaz.

A hangmagasság változásával, mint vártuk a spektrumvonalak sűrűsége változott, még hozzá a frekvencia növelésével fordított arányban, ahogy ezt az elméleti tárgyalásban már feltettük.

5 **Konklúzió**

Dolgozatom témája a trombita fizikai paramétereinek leírása és a trombita hangjának spektrális elemzése volt. Ennek érdekében a kapcsolódó irodalom feldolgozása után vezettem be a trombita hang függvényét és azon változókat, melyek ezt befolyásolják. A hangszer általános fizikai leírása során több szempont szerint csoportosítottam a rézfúvós hangszereket és a trombita esetében sorra vettem azokat a paramétereket, melyekkel általánosan jellemezni szokták azt.

A trombita hangjának vizsgálata érdekében bemutatam azokat az elméleti és alkalmazott módszereket, amelyek segítségével a hangot jellemezni szokás. Megvizsgáltam különböző trombita szordínók hangjának fizikai tulajdonságait, és ezzel kapcsolatban méréseket folytattam. A mérések során Fourier-transzformációt alkalmaztam a hang spektrumának meghatározására, és az így kapott eredményeket elemeztem. Így sikerült a szordínók közti alapvető különbségekre rámutatnom, a hangintenzitás és a hangmagasság változtatásával.

Szakdolgozatom során törekedtem arra, hogy a leírtak, a témában kevésbé jártas olvasók számára is értelmezhetőek legyenek. Igyekeztem rámutatni arra, hogy a hangszer fizikai ismerete mennyiben tudja elősegíteni az előadó munkáját, és érdemes arra, hogy a hangszeres oktatás szerves részévé váljon.

Az itt elvégzett mérések folytatásaként tanulmányozhatnánk a spektrum alakulását eltérő trombitatípusok esetén és más matematikai módszereket alkalmazva egy teljesebb képet kaphatnánk a trombitahang természetéről.

Összességében elmondhatjuk, hogy a vizsgált jelenségeket sikerült értelmezni, és későbbiekben az eredmények hatékonyan alkalmazhatóak a hang megismeréséhez és egy teljesebb előadásmód elsajátításához.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom konzulensemnek Vidovszky László a Pécsi Tudományegyetem, Művészeti Kar, Mediális Művészetek Intézete egyetemi tanárának, hogy lehetővé tette és támogatta diplomamunkám elkészítését.

Köszönetemet szeretném kifejezni Keresteš Szabolcsnak, a Pécsi Tudományegyetem, Művészeti Kar, Mediális Művészetek Intézetének zenei informatikusának, hogy bármikor áldozatkészen és gyakorlati módon segítette munkám elkészülését.

Külön köszönöm illeti Dr. Kovács Attilának a Szegedi Tudományegyetem Optika és Kvantumelektronika Tanszékének egyetemi adjunktusának, és Vass Csaba PhD hallgatónak, hogy lehetőséget biztosítottak számomra a mérések elvégzéséhez és bármikor készségesen segítettek a felmerülő problémákkal kapcsolatban.

Ez úton szeretném megköszönni Ella Attila, Simon Attila, Tóth Tamás és Solymosi Péter trombitaművész-tanáraimnak azt az áldozatos munkát és türelmet, amivel segítettek tanulmányaim alatt. Az ő odaadó munkájuk nélkül talán sose írhattam volna meg ezeket a sorokat.

Hálás vagyok szüleimnek, amiért mindig biztosították számomra a döntés szabadságát és teljes odaadással támogatnak, bíznak bennem. Ezen kívül testvéreimnek Eszternek és Mátyásnak, és barátaimnak, akik lankadatlanul bátorítottak.

Irodalomjegyzék

- [1] **BERTSCH, M.: Variabilities in Trumpet Sounds.** in: Proceedings of the International Symposium of Musical Acoustics Band 2 [ISMA 1997]. St Alban (UK), Institute of Acoustics, 1997. S.: 401-406.
- [2] **BERTSCH, M.: Intonation on trumpets.** in: Proceedigs of ISMA '98 (International Symposium on Musical Acoustics). Leavenworth, Washington (USA): ASA, Catgut, 1998
- [3] **BERTSCH, M.: Trumpet Mutes.** in: Proceedings of the 32nd Czech Conference on Acoustics SPEECH - MUSIC - HEARING. Prag: VUZORT, 1995. S.: 83-86.
- [4] **HESSELMANN, N.: Digitális jelfeldolgozás,** Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [5] **BERTSCH, M.: Studien zur Tonerzeugung auf der Trompete.** Dissertation. Wien: Universität Wien, 1998
- [6] **BERTSCH, M.: Visualization of Brass Players' Warm up by infrared Thermography.** Jean-Pierre Mathez (Hg). in: Brass Bulletin: International magazine for brass players. Nr. 114. Vuarmarens (CH): BRASS BULLETIN, 2001. S. 26-33. (BERTSCH, MATTHIAS; MACA, THOMAS.)
- [7] **BERTSCH, M.: Bridging instrument control aspects of brass instruments with physics-based parameters.** Bertsch, Matthias. in: Proceedings of the SMAC03 (Stockholm Music Acoustics Conference 2003). Volume I Roberto Bresin (Hg). Stockholm: KTH Speech, Music and Hearing, 2003. S. 193-196.

- [8] **BERTSCH, M.: Collected Papers in Musical Acoustics: 1995/2003.**
Schriftenreihe des Instituts für Wiener Klangstil (Musikalische Akustik) an der
Universität für Musik und darstellende Kunst Wien. Band 6. Wien 2003.
ISBN: 3-900914-04-4 (Habilschrift Teil 2)
- [9] **WILFRIED, K.: Computer optimization of brass wind instruments.** Diderot
Forum on Mathematics and Music (Joint meeting in Wien/Paris/Lissabonn),
p.227, 1999, OECG: ISBN 3-85403-133-5
- [10] **BERTSCH, M. - K. WALDHERR, - W. KAUSEL: Sensory Evaluation Test-
ing of Trumpets and Correlation with Acoustic Measurements.** Forum
Acusticum, 2005 – Budapest
- [11] **KÜHTREIBER, R.: 13 Spitzdämpfer für Trompeten (Straight Mutes) im
Vergleich.** Vienna, March 2004
- [12] **BERTSCH, M.: W. KAUSEL, A. MAYER, G. WILDHOLM - Trumpet
Response Project.** IWK Vienna, <http://www.bias.at>
(módosítva: 2005.11.12)
- [13] **HyperPhysics** © 2005 C.R. Nave – Georgia State University
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>
(módosítva: 2006.02.06)
- [14] **The Virtual Trumpet Studio -** <http://www.petrouska.com>
(módosítva: 2003.08.08)
- [15] **BachBrass.com -** <http://www.bachbrass.com>
(módosítva: 2006.03.28)