

Horváth Balázs – Szigetvári Andrea

Bevezetés a zenei informatikába

A tananyag a számítógépes zenéhez kapcsolódó alapfogalmakat tárgyalja. Az első hét fejezet a hagyományos zenei paraméterekkel és az emberi hallás működésével foglalkozik. A zenei paramétereket – a konvencionális magyarázaton és lejegyzéseken túl – a számítógépes szoftverek számára kommunikálható formában is bemutatja. A következő két fejezet az akusztikus tér érzetét meghatározó tulajdonságokat elemzi. Ezután a számítógépes hangzások megszólaltatáshoz szükséges elektroakusztikai ismeretek, majd a digitalizálás folyamatának leírása és a digitális hangformátumok bemutatása következik. Az utolsó három fejezet a számítógépes zene egyes területeit, a hanganalízis-hangszintézist, a MIDI és az OSC protokollt, valamint a zenei szerkesztő programokat tekinti át.

Kulcsszavak: hangmagasság, hangosság, hangszín, akusztikai terek, pszichoakusztika, elektroakusztika, digitalizálás, hanganalízis, hangszintézis, MIDI, OSC, hangtömörítés, hangfájl-formátumok

BUDAPESTI KOMMUNIKÁCIÓS ÉS ÜZLETI FŐISKOLA



SZÉCHENYI TERV

**Typotex Kiadó
2014**

COPYRIGHT: © 2014-2019, Horváth Balázs, Szigetvári Andrea, Budapesti Kommunikációs és Üzleti Főiskola

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)

A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

Lektorálta: Jeney Zoltán

ISBN 978 963 279 218 7

Készült a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

Felelős vezető: Votisky Zsuzsa

Készült a TÁMOP-4.1.2/A/1-11/1-2011-0010 számú, „Digitális és kollaboratív művészet” című projekt keretében.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszecenytterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

TARTALOM

1. A hangmagasság	7
1.1. A periódusidő és a frekvencia	8
1.2. Hangmagasságérzet	10
1.2.1. A regiszter és a hangmagasságérzet	11
1.2.2. A spektrum és a hangmagasságérzet	12
1.2.3. A hanghossz és a hangmagasságérzet	13
1.3. Hangmagasságok lejegyzése	14
1.3.1. A hagyományos ötvonalas lejegyzés kialakulása	14
1.3.2. Más lejegyzési módszerek	19
1.3.3. XX. századi lejegyzési módszerek	20
2. A hangosságérzet	22
2.1. A decibelskála	22
2.1.1. A hangteljesítményszint, a hangintenzitás és a hangnyomásszint	23
2.1.2. A decibel értékének kiszámítása	24
2.1.3. A környezetünkben előforduló hangok relatív hangossága	24
2.1.4. A decibelértékek összegzése	26
2.2. A hangosságérzet	28
2.3. Az amplitúdó-burkológörbe (ADSR-görbe)	29
3. A hang spektruma és a hangszínérzet	32
3.1. Szinuszhangok összeadása	33
3.1.1. A lebegés és az érdeesség	33
3.1.2. Az összeolvadás	36
3.2. Hangspektrumok osztályai	39
3.2.1. A harmonikus hangok	39
3.2.2. Az inharmonikus hangok	41
3.2.3. Zajok, zörejek	42
4. A hallás	45
4.1. A hallószervrendszer működése	45
4.1.1. A külső fül és a dobhártya	46
4.1.2. A középfül	47
4.1.3. A belső fül	49
4.1.4. A hangok felismerése	52
4.2. A hallórendszer működésének hatása a hallási érzetekre	52
4.2.1. A hallásküszöb	53
4.2.2. A hangosság érzékelése	53
4.2.3. A kritikus sávok	54
4.2.4. A hangmagasságok felismerése	55
4.2.5. Az elfedés	55
4.2.6. Az összeolvadás feltételei	56
4.2.7. Kombinációs hangok	56
4.2.8. Az interaurális hangerőkülönbség	57

4.2.9. Az interaurális időkülönbség	57
4.2.10. Tévesztési kúp	58
4.2.11. A koktélparti effektus	58
5. Hangközök, skálák, hangolások.....	59
5.1. A hangközök	59
5.1.1. A hangmagasságok megkülönböztetése	59
5.1.2. Különbség vagy arány?	59
5.1.3. A tiszta hangközök.....	61
5.2. A hangmagasságok kombinációiból eredő pszichoakusztikai jelenségek	64
5.2.1. Különbségi hang	64
5.2.2. Összhang.....	65
5.2.3. Virtuális alaphang.....	65
5.3. Skálák	65
5.3.1. Pentaton (ötfokú) skála	66
5.3.2. Diatonikus (hétfokú) skálák	67
5.3.3. Kromatikus (tizenkét fokú) skála	67
5.3.4. Mikrointervallumokat tartalmazó skálák.....	68
5.3.5. A diatonikus skálák megjelenései alaphangtól függően	68
5.4. A temperálás.....	69
5.4.1. A püthagorasz kvintek.....	69
5.4.2. Középhangos hangolások	71
5.4.3. Egyenletes temperálás.....	72
6. Ritmus01	75
6.1. A ritmus fogalma.....	75
6.2. A ritmus kialakulása az európai zenében.....	77
6.2.1. A ritmus az ókori görögöknél.....	77
6.2.2. A ritmus a gregorián énekek korában	78
6.2.3. Ars nova	79
6.2.4. A napjainkban használatos ritmusértékek kialakulása	80
6.3. A ritmusértékek és jelöléseik.....	80
6.3.1. Alap ritmusértékek	80
6.3.2. A ritmusok megnyújtása: átkötés, pontozás.....	81
6.3.3. Nem-páros osztások (triola, kvartola stb.)	82
7. Ritmus02	84
7.1. A tempó és a metrum	84
7.1.1. Tempóértékek	84
7.1.2. A metrum	87
7.1.3. A leggyakrabban használt ütemmutatók. Páros és páratlan ütemek.....	87
7.1.4. Aszimmetrikus metrumok	90
7.1.5. Váltakozó metrumok	91
7.1.6. A metrum belső változásai	92
7.2. Ritmusképletek kialakulása.....	94
7.2.1. A klasszikus zenére jellemző ritmusképletek.....	94
7.2.2. Kortárs zenei ritmustechnikák	95
7.3. A számítógép és a ritmus.....	100
8. Az akusztikus tér	102

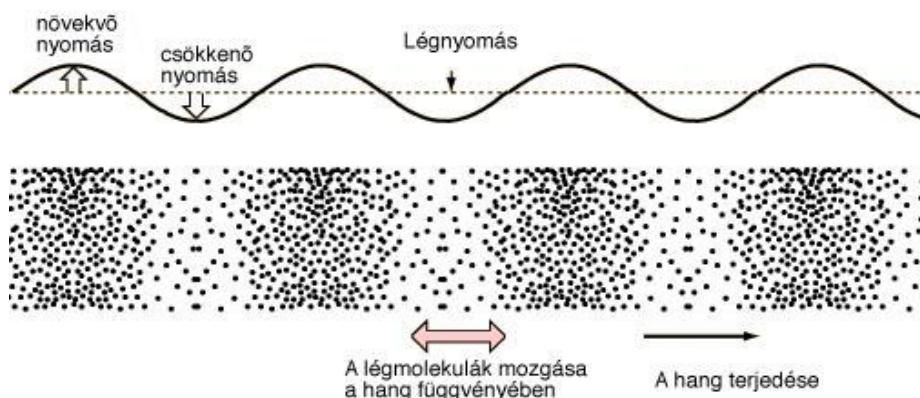
8.1. Az akusztikus tér érzetét meghatározó tulajdonságok.....	102
8.1.1. A direkt hang és a visszaverődések	102
8.1.2. A hang visszaverődései és a felület tulajdonságai	104
8.1.3. A hang irányának érzékelése.....	108
8.2. A teremakusztika tudományának kezdeti fázisa.....	108
9. A hangzástér modellezése.....	110
9.1. Terek akusztikus építése, módosítása.....	110
9.1.1. Görög színházak	110
9.1.2. Velencei iskola.....	111
9.1.3. Opera – zenekari árok	112
9.1.4. Koncerttermek.....	114
9.1.5. Moduláris termek, ahol az akusztika és/vagy az ültetés szabadon változtatható.....	114
9.2. Az elektroakusztikus hangosítás tervezése.....	114
9.2.1. Monó-sztere, quadro, surround	115
9.2.2. Sokcsatornás rendszerek.....	116
10. Az audiojel útja: az elektroakusztikus átviteli lánc. A mikrofon és a keverőasztal.....	127
10.1. A mikrofon.....	127
10.1.1. A mikrofon működési elve	128
10.1.2. Mikrofonok iránykarakterisztikái	129
10.2. A keverőasztal.....	131
10.2.1. A keverőasztal szerkezete.....	131
10.2.2. Keverőasztal virtuális modellje	134
11. A hang digitalizálása.....	137
11.1. Analóg-digitális hang.....	137
11.2. A digitalizálás folyamata	138
11.2.1. Mintavételezés.....	138
11.2.2. Kvantálás	139
11.2.3. A kódolás	139
11.3. A digitalizált hang minőségét meghatározó tényezők.....	140
11.3.1. A mintavételezési frekvencia.....	140
11.3.2. A kvantálás finomsága.....	144
11.3.3. A digitális túlvezérlés (clipping)	146
11.4. A digitalizált hang minőségét meghatározó tényezők.....	148
12. Digitális audio tömörítése, hangfájlformátumok.....	149
12.1. Digitális hangfájlok mérete, bitsebessége	149
12.2. Digitális audio tömörítése	150
12.2.1. Veszteséges és veszteség nélküli tömörítés.....	151
12.2.2. A pszichoakusztikai modell, azaz a percepció szerinti kódolás	151
12.2.3. Az elfedés jelensége és alkalmazása a tömörítés során	152
12.3. Az MPEG-kódolás.....	152
12.3.1. MPEG-rétegek (Layers).....	153
12.3.2. Az MP3.....	153
12.3.3. A tömörített hangok minősége és mérete közötti összefüggések	154
12.4. Digitális hangformátumok.....	155

12.4.1. Digitális hangfájlok szerkezete	155
12.4.2. Általánosan elterjedt audioformátumok és -típusok	156
13. Hanganalízis, hangszintézis	159
13.1. Hanganalízis	159
13.1.1. Kezdeti hangelemzési módszerek	159
13.1.2. A hullámforma reprezentáció	162
13.1.3. A spektrum ábrázolása	163
13.2. Hangszintézis	170
13.2.1. Szintézistechnikák	170
13.2.2. Szintetizátorok	171
13.2.2.2. Szoftver-szintetizátorok	172
14. A MIDI- és az OSC-protokoll	176
14.1. MIDI	176
14.1.1. A MIDI adatsor szerkezete	177
14.1.2. A MIDI-üzenetek	178
14.1.3. A MIDI korlátai, hátrányai	179
14.2. OSC	180
14.2.1. Az OSC szerkezete: a kliens-szerver architektúra	180
14.2.2. OSC-üzenet	180
14.2.3. OSC felhasználása	181
15. Számítógépes zenei szerkesztők	182
15.1. Kottaszerkesztő programok	182
15.2. A szekvencer	185
15.3. DAW	187
15.4. Mintavevők	188
15.5. Integrált rendszerek	190

1. A hangmagasság

Fizikai értelemben a hang a levegőmolekulák gyors váltakozású összesűrűsödése, majd ritkulása, mely mozgási folyamat amennyiben eléri a dobhártyánkat, elménkben is hangként jelenik meg. (Pszichikai értelemben a hang addig nem is létezik, míg a fizikai rezgés jellé nem alakul agyunkban.) Az egyes molekulák mozgása hullámszerű alakzatot vesz fel, a sűrűbb csomópontokon nagyobb, a ritkábbakon kisebb levegő-, azaz hangnyomást eredményez.

A hang terjedésének sebessége szobahőmérsékleten (20 °C) 343 m/sec. Különböző tulajdonságú közegekben a hang terjedése, terjedési sebessége, energiavesztése erősen eltérő (pl. vízgőzben 35 °C esetén 402 m/s, héliumban 20 °C esetén 927 m/s).



1.1. ábra: Levegőmolekulák nyomásváltozásai

Az 1.1. ábrán a légnyomásváltozás ingadozásának görbéje egy szinuszgörbe, melynek három fizikai jellemzője van: az **amplitúdója** (azaz a nyomásváltozás mértéke – zenei értelemben a hang ereje), a **frekvenciája** (azaz rezgések egységnyi idő alatti száma – zenei értelemben a hang magassága) és a **fázisa** (a szinuszhullám eltolódása az x tengely mentén).

A hangmagasság a hang egyik alapvető paramétere. Az európai zene történetében a hang magassága az 1950-es évekig elsődleges zenei paraméter volt, azaz változásai a ritmussal együtt határozták meg a zenei formát. Ez lényegében összefügg az Európában használt hangszerek működésével és az énekhang használatával.

A hangmagasság érzékelése szubjektív módon történik, amely nem analóg a hang fizikai váltoásaival. Az érzékelés az agyban történik meg, az emberi intelligenciának köszönhető, hogy a hangmagasságok közötti összefüggés

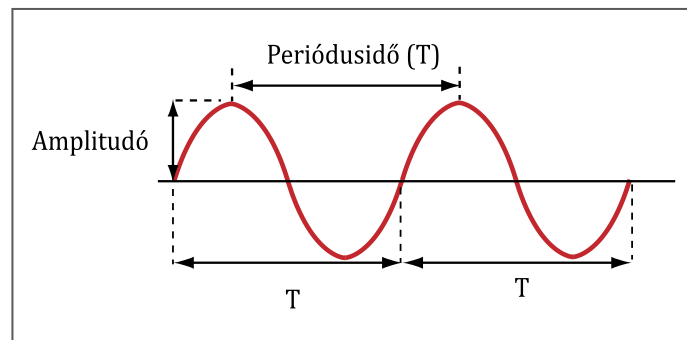
létrejön. A hang fizikai természete határozza meg, hogy milyen hangmagasságot hallunk, és hogy melyik hangmagasság-kapcsolatokat halljuk feszültebbnek vagy oldottabbnak.

1.1. A periódusidő és a frekvencia



1.1. Hang

Bach c-moll szvitjének Sarabande-tételét hallgatva a szolfézst ismerők meg tudják mondani, milyen hangmagasságok követik egymást. Ez azért lehetséges, mert a cselló mint hangforrás, olyan hanghullámokat kelt, melyek egyenletes légnyomásváltozás-periódusokat hoznak létre. Az így létrejövő egyenletes lökések – úgynevezett ciklusok – hasonló hullámformával rendelkeznek, a közel ismétlődő egységeket periódusoknak nevezzük. A periódust szinuszhullámok esetén lehet a legkönnyebben felismerni, hiszen ilyenkor a hullámforma a szinuszgörbe (lásd 1.2. ábra).



1.2. ábra: Szinuszhang periódusa

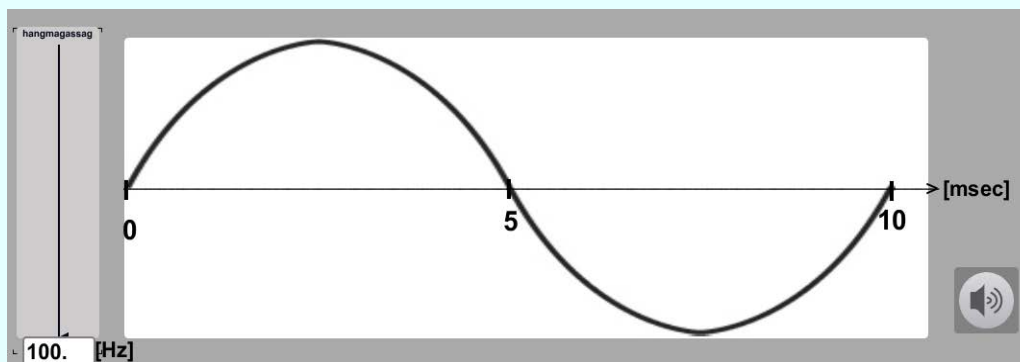
A hasonló hullámformák ismétlődésének gyakorisága határozza meg a hang frekvenciáját, ami attól függ, hányszor ismétlődik a periódus egy másodperc alatt. A frekvencia a periódusidővel (vagy hullámhosszal) fordítottan arányos. Kiszámításának módja:

$$f = 1/T \text{ [Hz]},$$

ahol f – frekvencia, T – periódusidő. A frekvencia mértékegység a Hertz (Hz) vagy ennek ezredrésze, a kiloHertz (kHz). A mértékegység elnevezése Heinrich Rudolf Hertz német fizikus iránti tisztelegés, aki először bizonyította az elektromágneses hullámok létezését.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).

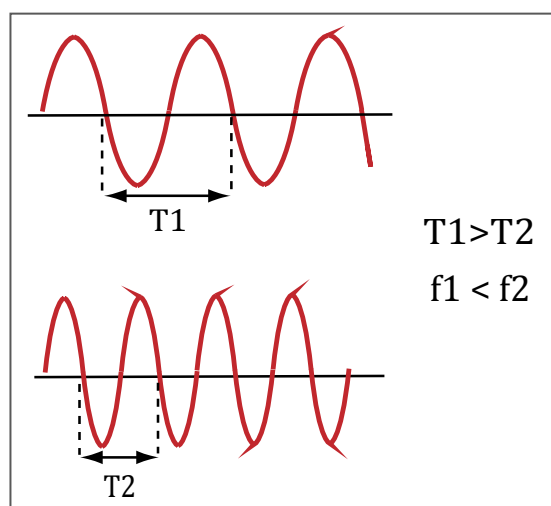
MAX: emelkedő hangmagasság, rövidülő periódus ms értékekkel.



A példa bal oldalán látható potméter tolókáját fel-le húzva lehet állítani a hang magasságát, azaz a frekvencia növekedését. A frekvencia növelésével a periódus hossza csökken, ez látható a hullámformán.

1.3. ábra: Szinuszhang hangmagasságának változtatása

A növekvő frekvenciaértékek emelkedő hangmagasságérzetet keltenek. A képletből könnyen kikövetkeztethető, hogy minél hosszabb a periódusidő, annál kisebb a frekvenciaérték, azaz egyre mélyebb a hang. A hang hullámforma-reprezentációjáról ezért világosan leolvasható, melyik hang mélyebb, melyik magasabb:



1.4. ábra: Periódusidő és frekvencia összefüggése

Példák a hang frekvenciája, a periódusidő és a hullámhossz összefüggéseiről:

1. Mennyi a hang frekvenciája, ha az ismétlődő ciklus 440-szer fordul elő egy másodperc alatt?

Válasz:

Mivel a frekvencia az egy másodperc alatti ismétlődés mennyisége, a hang frekvenciája 440 Hz.

2. Mennyi az 1 msec hosszú periódusidővel rendelkező hang frekvenciája?

Levezetés, válasz:

$$T = 1 \text{ msec} = 0.001 \text{ sec}$$

$$f = 1 \text{ sec} / 0.001 \text{ sec} = \underline{1000 \text{ Hz}}$$

3. Mekkora a 20 Hz frekvenciájú hang hullámhossza?

$$f = 20 \text{ Hz}$$

$$20 \text{ Hz} = 1 \text{ sec} / x \text{ sec} \quad \longrightarrow \quad x = 1 / 20 = 0.05 \text{ sec} = \underline{50 \text{ msec.}}$$

1.2. Hangmagasságérzet

Számos hang magasságát nem tudjuk pontosan meghatározni (ilyen például a harang vagy a tam-tam hangja). Egyes hangszerekre még azt is szoktuk mondani, hogy nincs hangmagasságuk (például dob vagy két fadarab egymáshoz ütése). Ha ezeket a hangokat megpróbáljuk visszaénekelni, nem fog sikerülni, mert nincs világosan megkülönböztethető alaphangjuk. Azokat a hangokat, amelyek egyértelműen visszaénekelhetők, zenei (vagy harmonikus) hangoknak nevezzük, és meg lehet állapítani az alaphangjuk frekvenciáját.

Hallásgyakorlat:

Hallgasd meg a következő hangokat, és próbáld kiénekelni a hangmagasságukat!



1.2. Hang



1.3. Hang



1.4. Hang



1.5. Hang



1.6. Hang



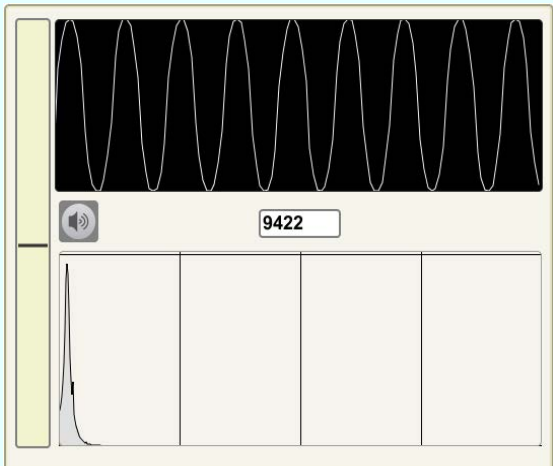
1.7. Hang

Hogy egy hang rendelkezik-e jól felismerhető hangmagassággal, több faktortól is függ. A legmeghatározóbbak a regiszter, a spektrum és a hanghossz. A hangerő is befolyásolja, milyen hangmagasságot hallunk, de nem játszik szerepet a felismerhető hangmagasság kialakulásában.

1.2.1. A regiszter és a hangmagasságérzet

Az emberi hallástartomány kb. 20 Hz és 20 kHz között van. A két szám az ideális állapotot írja le, az életkor előrehaladtával a magas tartomány beszűkül. Különböző kimutatások szerint ugyanazt a hangerejű hangmagasságot a 18–24 évesek 17 kHz-ig, a 30–39 évesek 16 kHz-ig hallják, az 50 évesek pedig 12 kHz-ig hallják.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



Teszteld, milyen magas hangot hallasz meg! A bal oldali csúszka mozgatásával lehet változtatni a szinuszhullám frekvenciáját. A középső számdobozban látható, hány Hz a hang.

1.5. ábra: Hangmagasság meghallása

A 20 Hz alatti tartományba eső hangokat infrahangoknak, míg a 20 kHz felettieket ultrahangoknak nevezzük.

A mindennapi életben használt hangmagasságokat a 60 és 8000 Hz közötti tartományba soroljuk. A zenei hangok hangmagassága 50 Hz alatt és 4000 Hz felett elkezdi bizonytalaná válni. Halljuk ugyan, hogy mélyül vagy magasodik a hang, de a pontos hangmagasság valamelyik transzponált oktávjának kiéneklése vagy a hangközök megállapítása egyre nehezebbé válik.

Hallásgyakorlat:

d, r m, d tesztelése magas MIDI hangokon szinuszhullámmal (kis szekund és nagy szekund megkülönböztethető-e?)

Kiválasztani, melyik verzió felel meg a két oktávval mélyebben hallható do, re, mi, do, do, re, mi, do motívumnak

Eredeti:



1.8. Hang

1. transzp.:



1.9. Hang

2. transzp.:



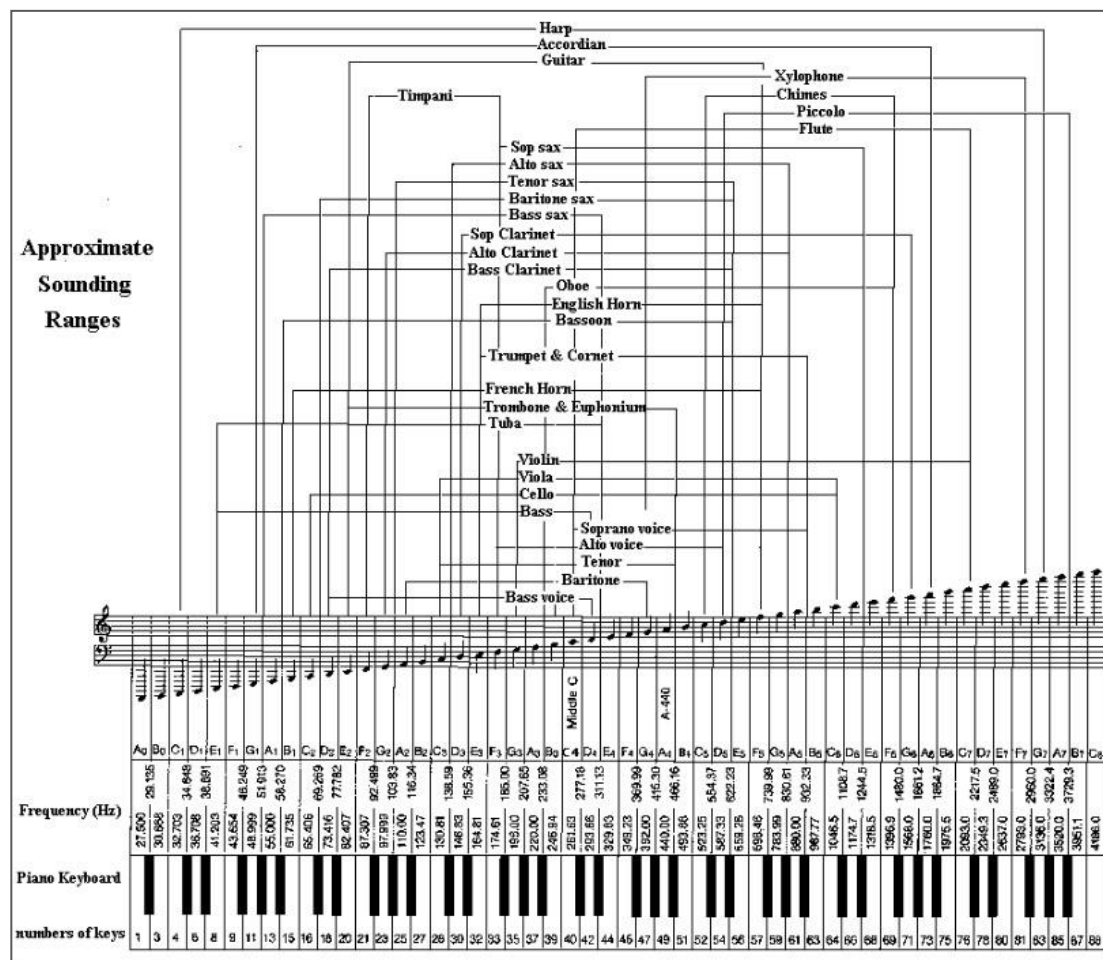
1.10. Hang

3. transzp.:



1.11. Hang

A zenei szempontból jól értelmezhető hangmagasságoknak a zongora hangterjedelmét tekinthetjük, ami 27,5 Hz–4186 Hz-ig terjed. A 2.5. ábrán látható, hogy a zongora lefedi a hagyományos hangszerek teljes hangterjedelmét.



1.6. ábra: Hagyományos hangszerek hangterjedelme

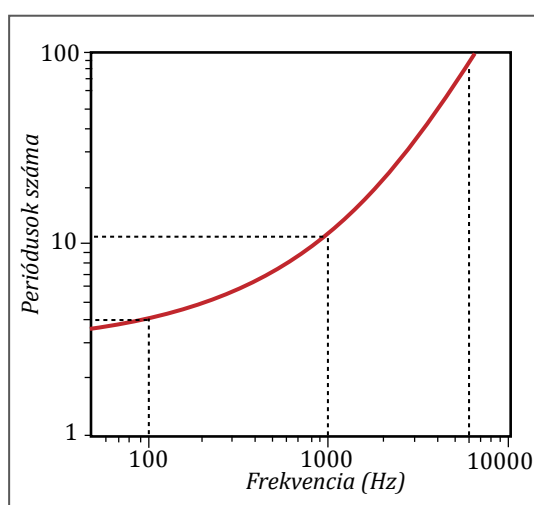
1.2.2. A spektrum és a hangmagasságérzet

A spektrumösszetevők mennyisége és frekvenciáik arányai nagyban befolyásolják a hangmagasságérzet kialakulását. A spektrum szempontjából három fő hangzástípust lehet megkülönböztetni (bővebb leírásukat lásd a 3. fejezetben):

1. harmonikus hangok: az összetevők egymás egész számú többszörösei, amit az emberi hallás képes egy alaphanggá olvasztani, így a hangmagasság nagy biztonsággal megállapítható (ld. 1.05_Hang).
2. inharmonikus hangok: az összetevő frekvenciák aránya racionális és irracionális is lehet, ami miatt nem alakul ki összeolvadás, így egyszerre több hangmagasság is érzékelhető. Ez bizonytalanná teszi a hangmagasság meghatározását (ld. 1.03_Hang).
3. zajok, zörejek: a spektrum rendkívül sűrű, az összetevők frekvenciája véletlenszerű, nem alakul ki hangmagasságérzet (ld. 1.02_Hang).

1.2.3. A hanghossz és a hangmagasságérzet

A nagyon rövid hangokat kattánó zajnak érzékeljük akkor is, ha az összetevőik harmonikusak. Hogy a fülünk el tudja dönteni, milyen hangmagasságot hall, bizonyos számú, de kettőnél mindig több ciklust kell érzékelnie. A 1.7. ábráról leolvasható, hogy a frekvencia növekedésével együtt növekszik a hangmagasság megítéléséhez szükséges ciklusok száma is. Azonban mivel a magasabb frekvenciájú hangok periódusideje rövidebb még a ciklusszámok növekedése mellett is, kevesebb idő kell egy magasabb hang magasságának felismeréséhez, mint egy mélyebbhez. A táblázat adatait felhasználva ki lehet számítani, hogy adott frekvencián milyen hosszúságú hang esetén nyújt a hang biztos hangmagasságérzetet.



1.7. ábra: Hangmagasság pontos érzékeléséhez szükséges ciklusok száma a frekvencia függvényében

Példák a hang frekvenciája és a hangmagasság érzékeléséhez szükséges hanghossz kiszámítására:

1. Milyen hosszúnak kell lenni a hangnak, hogy meg lehessen ítélni a hangmagasságát a következő frekvenciákon:

a) $f = 100 \text{ Hz}$

A számításhoz szükség van a periódusok számára, melyet a 2.5. ábráról le tudunk olvasni: $n = 3$,

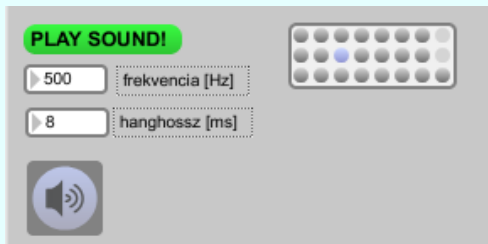
1 periódus időtartama: $T = 1/f = 1/100 = 0.01 \text{ sec} = 10 \text{ ms}$, 3 periódus = **30 ms**

b) $f = 1000 \text{ Hz}$

$n = 10$,

1 periódus időtartama: $T = 1/f = 1/1000 = 0.001 \text{ sec} = 1 \text{ ms}$, 10 periódus = **10 ms**

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



A példán be lehet állítani a szinuszhang magasságát és időtartamát. A felső adat a Hertzben megadott frekvencia, az alsó az ezredmásodpercben megadott időtartam.

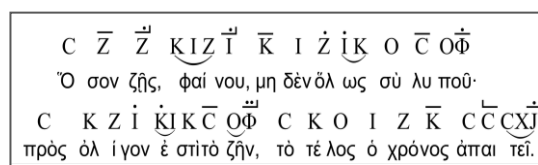
Az előre elkészített táblázat három sorában 200, 500 és 1000 Hz magasságú, különböző hosszúságú szinuszhangot lehet kiválasztani, majd a „PLAY SOUND” feliratú gombbal lejátszani. Az előre elkészített hangsorozatokban tesztelhető egyrészt, hogy milyen hosszú hangra van szükség ahhoz, hogy az adott szinuszhang magasságát meg lehessen állapítani, másrészt az, hogy a különböző szinuszhang felismeréséhez szükséges időtartam milyen mértékben tér el egymástól. (Az egymás fölött lévő gombokhoz rendelt időtartamok nem egyformák.) A számdobozokban az előre megadottól eltérő értéket is be lehet állítani, és más magasságokkal vagy időtartamokkal tesztelni a jelenséget.

1.8. ábra: Szinuszhang magasságának felismerése időtartam függvényében

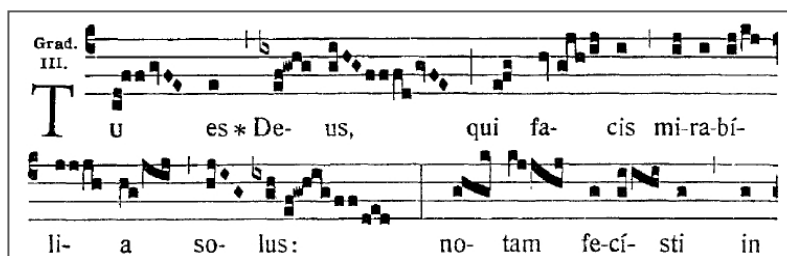
1.3. Hangmagasságok lejegyzése

1.3.1. A hagyományos ötvonalas lejegyzés kialakulása

A zene rögzítésének nyomai már i. e. 600 körül fellelhetők. A görögök betűket használtak az egyes hangok megjelölésére, mégpedig a vokális és a hangszeres zenéhez eltérő formában. Mivel a betűnotáció a későbbiekben nem vált be, ezeket absztrakt jelekkel kezdték felváltani. A korai európai hangjegyzés szerepe a dallamok kontúrájának jelölésében merült ki, mellyel emlékeztetni akarták az előadót a dallam irányaira (Bizánc – IX. század). A hangmagasságok lejegyzésére az európai zenében legkorábban a gregorián zenék esetében volt szükség. A dallamokat az irányukat követő neumákkal jegyezték le, melyek a kétdimenziós koordináta-rendszerhez hasonlóan két tengely mentén rögzítették a hangmagasság időben történő változását. A függőleges tengely vonatkozott a hangmagasságára, és már ekkor a vízszintes tengelyen jelölték az időt, de pontos ritmust nem rögzítettek. A neumákból fejlődött ki a kvadrát notáció (a XII. század körül), majd a gótikus patkószeg-notáció (XIV–XV. század). A notációkat l. a 1.9–11. ábrákon.



1.9. ábra: Görög kotta – betűnotáció



1.10. ábra: Középkori kotta – kvadrát notáció



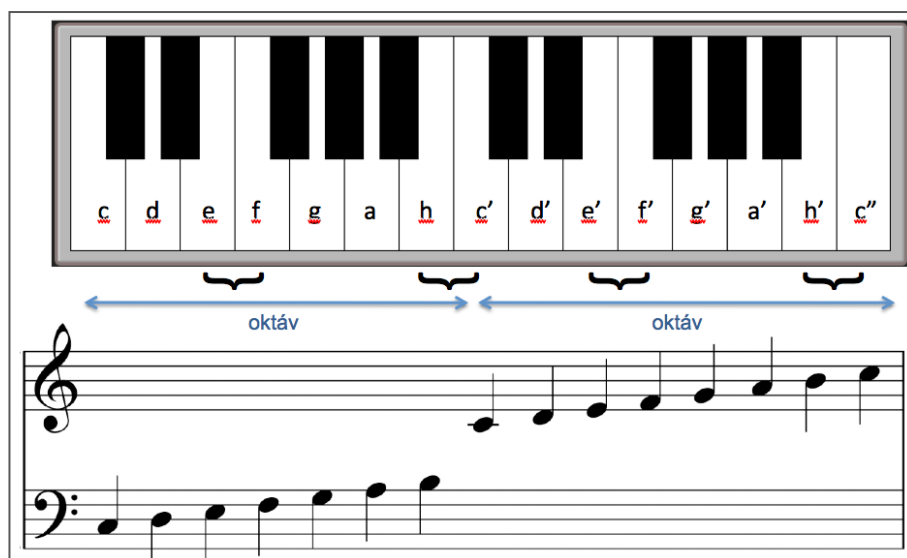
1.11. ábra: Patkószeg notáció (Josquin des Prés: Agnus Dei a Missa l'homme Arme-ből)

A mai notációs technika direkt előzménye Arezzói Guidó zeneelmélet-író (1000–kb. 1050) által kifejlesztett, vonalrendszerre illesztett hangokkal és kulcsokkal jelölt hangmagasság-rögzítési metódusa. (*Epistola de ignotu cantu* című művében ír a szótaghoz rendelt hangmagasságok rendkívül hasznos voltáról az énekek betanításához.) A hangok közötti könnyebb tájékozódást a vonalak egymástól terctávolságra történő elhelyezése segítette, pontosította. A hangok elnevezését az *Ut queant laxis* kezdetű gregorián himnusz soraiból nyerte.

Ut Queant Laxis (Hymn to St. John the Baptist)

Guido of Arezzo
(circa 991-1033)

1.12. ábra: „Ut queant laxis” gregorián himnusz



1.14 ábra: A zongora fehér billentyűi, a hozzá tartozó hangnevek és az ötvonalas rendszerben megfeleltetett hangok

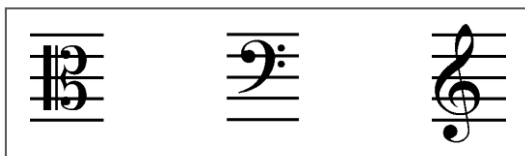
A notáció problémája, hogy mind a zongorabillentyűket, mind a kottafejeket tekintve az látszik, hogy a hangok egyenlő távolságra vannak egymástól. Ez azonban akusztikailag nem igaz. Az 1.14. ábrán kapoccsal jelölt helyeken kishang (azaz félhang távolság), a többi hang között nagyszekund (azaz egészhang távolság) hallható. E speciális ellentmondás – hangmagasság-ismétlődés héthangonként vs. a hangok elhelyezése egy öt vonalból+négy vonalközből álló rendszeren – máig meghatározza zenei notációnkat. Ahhoz, hogy az egészhangok közötti további félhangokat is létre lehessen hozni, illetve le lehessen írni, szükség volt azok notációs megjelenítésére. A többi félhangot a zongora fekete billentyűinek megfeleltetve az eredeti hangok módosításával hozták létre. A módosításhoz módosítójelekre volt szükség.



1.15. ábra: Módosítójelek (kettős kereszt – angolul: double sharp, olaszul: doppio diesis; kereszt – angolul: sharp, olaszul: diesis; bé – angolul: flat, olaszul: bemolle; feloldójel – angolul: natural, olaszul: naturale; kettős bé – angolul: double flat, olaszul: doppio bemolle)

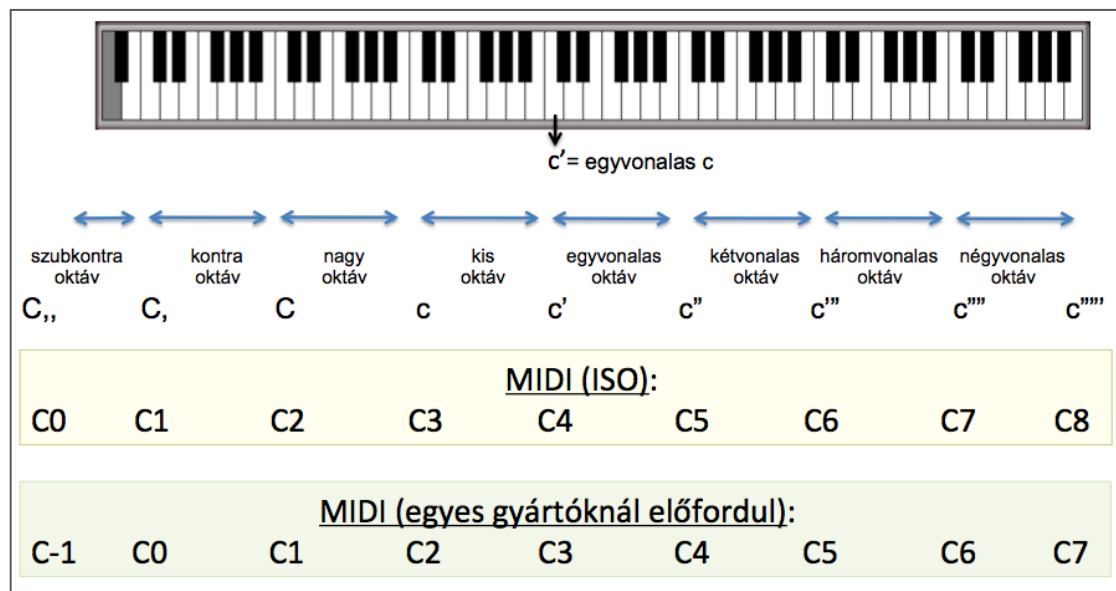
Az 1.15. ábrán látható módosítójelek felfelé vagy lefelé tudják módosítani az adott hangot, ha egy hangfej előtt állnak. A kereszt fél hanggal fel, a bé fél hanggal lefelé módosítja az öt követő hangot. A feloldójel minden, az ütemben előzőleg szereplő módosítójel érvényességét megszünteti. Egy zenemű hangnemétől függően dupla módosításokra is sor kerülhet. Ezekhez a kettős keresztet és kettős bét használjuk. A XX. század első harmadától kezdve az európai zeneszerzők nem csak az említett módosítójeleket használták, hanem a félhanglépésnél kisebb – negyedhang vagy még finomabb, úgynevezett mikrotonális – módosításra alkalmas jeleket is.

Az ötvonalas notáció két szélső vonala közötti távolság nagyjából akkora, mint az énekhang hangmagasságának regisztere. A különböző hangfajú énekesek számára a vonalrendszer elejére úgynevezett kulcsokat kellett helyezni, amely megmutatta, melyik vonal felel meg a hangfajnak. A XV–XVI. század során ezért olyan kulcsokat találtak ki, amelyek bármely vonalra helyezhetőek, és ezáltal igazodnak a hangfajokhoz. A kulcs (l. 1.16. ábra – első jel) középső törése a c' -t jelölte, ezért c -kulcsnak nevezzük. A máig is legelterjedtebb kulcsok a basszuskulcs (2.15. ábra – második jel), mely a mély szólamok, és a violinkulcs (1.16. ábra – harmadik jel), mely a magas szólamok olvasásához szükséges. A basszuskulcs (más néven f -kulcs) két pontja közé eső – alulról 4. vonal – a (kis) f -t, a violinkulcs (más néven g -kulcs) belső kezdőpontja – alulról a 2. vonal – a g' -t jelöli. A vonalrendszeren túllépő hangmagasságokat pótvonalak segítségével lehet elhelyezni.



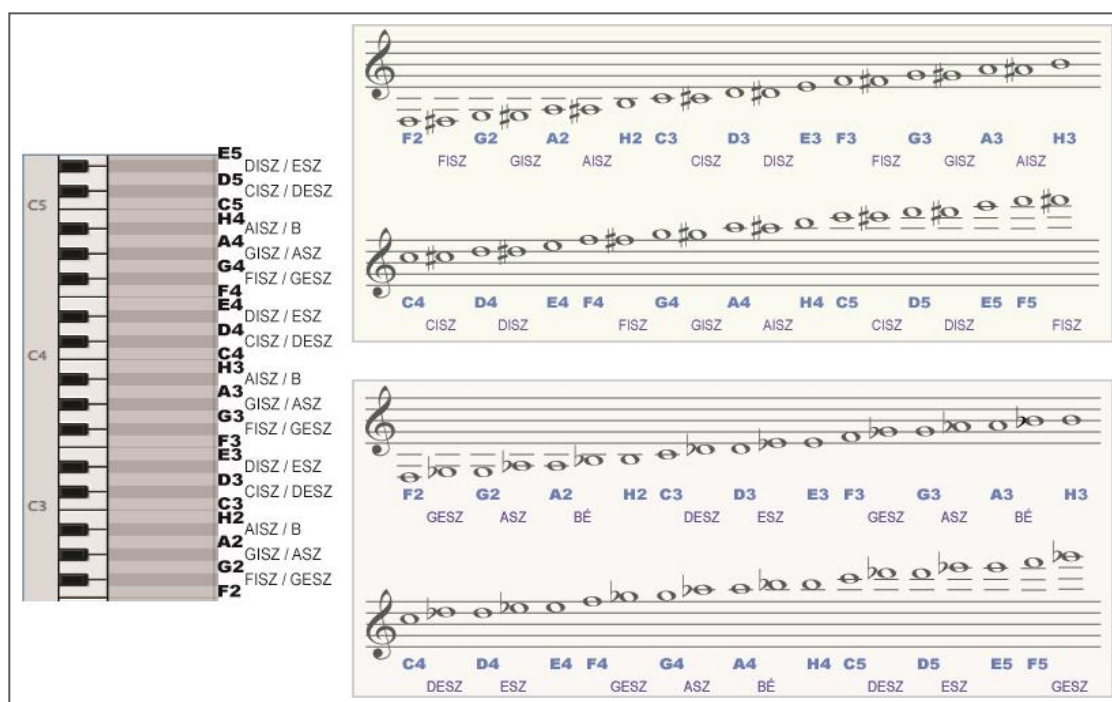
1.16. ábra: Kulcsok – altkulcs (c -kulcs), basszuskulcs (f -kulcs), violinkulcs (g -kulcs)

A hangkészlet hangjait betűkkel (a , b , c , d , e , f , g és h) is meg lehet adni. (Az elnevezések különböző nyelvterületeken másképpen néznek ki.) A különböző magassági regisztereket a betű mellé tett vonalkával vagy számmal lehet megadni (l. 1.17. ábra).



1.17. ábra: Hangmagasságok regiszterei és elnevezéseik

A módosítójelek segítségével lehet az ötvonalas kottában leírni a tizenkét fokú hangkészletet. (A tizenkét fokú hangsorról bővebben az 5.3.3. szakaszban írunk.)



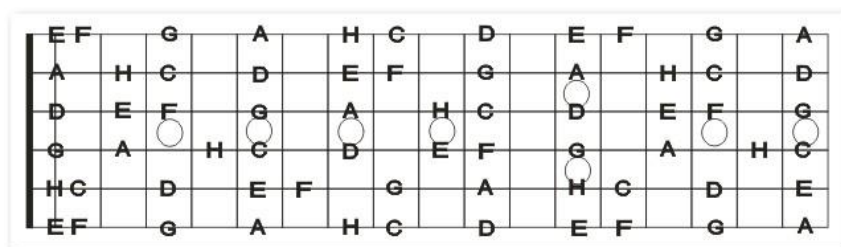
1.18. ábra: A tizenkét fokú hangkészlet lejegyzése

1.3.2. Más lejegyzési módszerek

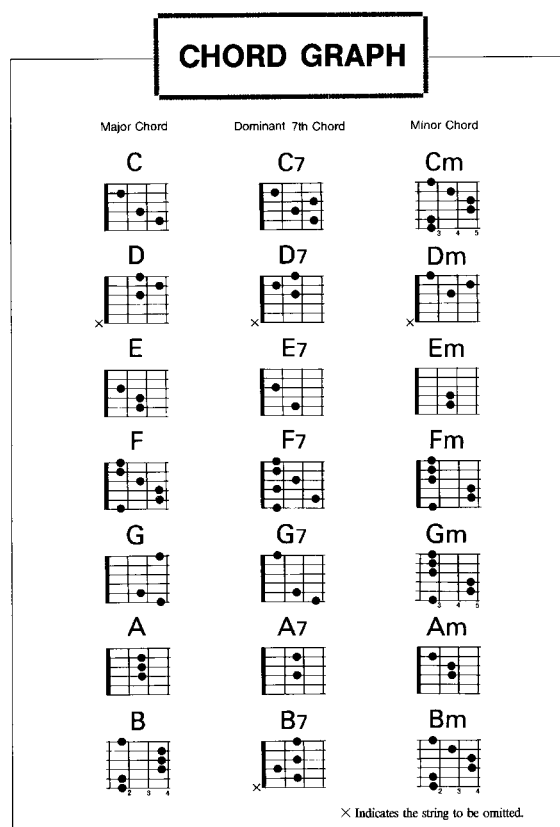
Az ötvonalas notációs rendszer mellett több száz éve létezik a tabulatúra, azaz fogástáblázatos lejegyzés. A XVI. században divatos lanthoz köthető notációs technika nem a hangok absztrakt magasságát, hanem a hangok megszólaltatásának helyét mutatják meg az adott hangszeren. A lant (és később gitár) húrjain pontokkal vagy számokkal (és ritmussal) lehet jelölni azt a fogást, mely a kívánt hangok lejátszásához szükséges. (Az itáliai lanttabulatúra Petrucci nevéhez köthető.)



1.19. ábra: Lanttabulatúra



1.20. ábra: Gitártabulatúra



1.21. ábra: Gitártabulatúra: akkordfogások

1.3.3. XX. századi lejegyzési módszerek

A MIDI rendszerek megjelenésével a hangmagasságok lejegyzése már számokkal is megvalósítható. MIDI-ben a c' (azaz C_4) száma a 60-as, az ennél magasabb számok félhangonként a magasabb hangokat, az alacsonyabb számok a mélyebb hangokat jelölik. Ennek oka a MIDI 128-as készletlehetősége, mely kb. 30 elemmel nagyobb, mint a zongora billentyűinek száma, ezért a középregiszterre helyezve a középső számértéket a zongoráénál több hangmagasság használatára van lehetőség.

A XX. század második felének új zenei ötleteihez nem minden esetben passzolt a hagyományos ötvonalas notáció, még akkor sem, ha azokat hagyományos akusztikus hangszereken szólaltatták meg. Ennek köszönhető a grafikus kották megszületése, melyek annyi fajták, ahány szerzőről vagy műről beszélünk. A hagyományos kotta időtengelyén szabályosan elhelyezett kottafejek

helyett különböző ábrák, rajzok, jelek is kottává válhatnak, melyek értelmezése gyakran szabad, illetve az előadóra van bízva.

Az általánosan használt notációk lehetőségei összefoglalva:

- 5 vonalas szisztéma: hagyományos kotta – a tizenkét fokú rendszer hangjainak egyenrangú használata előjegyzésekkel (Arnold Schönberg által használatba hozott notáció)
- latin betűs elnevezések (Guido nyomán),
- szolmizációs elnevezések (elsősorban a diatonikus zenénél nyújt segítséget, az angol zene nyomán nálunk Kodály Zoltán által kifejlesztett technika),
- gitártabulatúra (fogástáblázat),
- MIDI (számok segítségével 0–127-ig),
- MIDI-grafikus reprezentáció zongorabillentyűs notáció
- grafikus ábrázolás (egyedi grafikus megoldásokkal).

2. A hangosságérzet

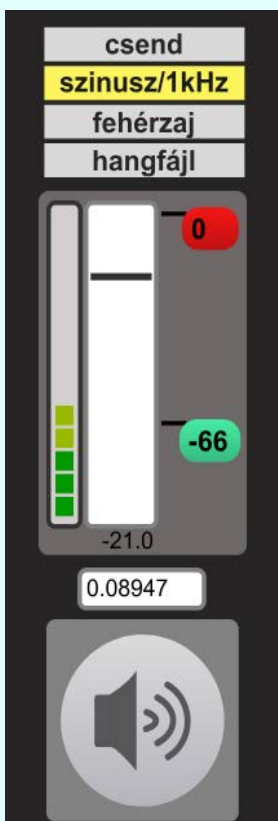
A hangerő és dinamika kifejezések mindennap használatosak a zenészek körében. A zenészek körében ezek a kifejezések egyértelműnek tűnnek, abszolút értékük azonban nem könnyen kifejezhető. A hangerő problémája kicsit hasonló a hangmagasságéhoz, amennyiben azok notációját vagy viszonyait vizsgáljuk. Az emberi hallás a hangmagasságok egymáshoz való viszonyát érzékeli, azaz a hangerőhallás relatív, nem abszolút. A hangerő esetében könnyen meg lehet mondani, ha egy hang hangosabb vagy halkabb egy másiknál, de hogy pontosan milyen hangos, azt nehéz meghatározni. A zenei notációban még a ma relatíve pontos meghatározások mellett is csak homályos információt közöl egy kottában a ***p*** (piano – halk) vagy a ***f*** (forte – hangos) jelzés. Az elektronikus hangrögzítésben használt mértékegység, a decibelskála objektívebb mérési eredményt tükröz, azonban a decibelértékek tudatában sem mindig egyértelműek a hangossági viszonylatok. Az elektronikus zene MIDI hangosságértékei is csak körülbelüli tájékoztatást adnak, hiszen a MIDI-nek nincs szabványértéke, még azonos gyártó esetén is hangszínprogramtól függ, milyen az adott hang maximális és minimális hangossága.

A hangerő mérésére nincs objektív eszközünk, de még a hang objektíven mért hangintenzitása sem közöl túl sokat annak általunk érzékelt hangosságáról. A hangosság ugyanis számos dologtól függ, pl. a frekvencia, hangnyomásszint, visszaverődések, elfedés, spektrum, melyekkel a későbbiekben foglalkozunk. A hangosság mérésének nehézségei abból fakadnak, hogy a kutatások elsősorban szinuszhangokkal végezhetőek el, mert az összetett hangok túl sokfélék. Az agyban a hangok elemzése egy összetett spektrum minden tulajdonságának figyelembevételével történik, vagyis azok intenzitásának és frekvenciájának vizsgálata után.

2.1. A decibelskála

A hanghullámot nagyon kicsi periodikus nyomásváltozások jellemzik, melyekre a fülünk bonyolult módon reagál. A minimális nyomásváltozás, melyet fülünk már érzékel, kisebb, mint a légnyomás egybilliomodik (10^{-9}) része. Ha tudatosítjuk, hogy a viharfrontok néhány perc alatt 5-10%-os légnyomásváltozást okozhatnak, el tudjuk képzelni, milyen érzékeny műszer a fülünk. A hallhatóság alsó határa (amely szubjektív, nem állandó érték), kb. 2×10^{-5} N/m² 1000 Hz frekvencia esetén. A fájdalomküszöb kb. egymilliószoros (10^6) értéknek felel meg, amely még mindig kisebb, mint a légnyomás 1/1000 része.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



A példán be lehet állítani az olvasó hangrendszerének hangerejét úgy, hogy a legkisebb (a példán -66dB) értéke határozza meg a hallásküszöböt, azaz éppen hallható legyen. Ekkor a 0 dB már a fájdalomhoz közeli, nagyon hangos hang lesz a fejhallgatóban.

3 mérőhang közül lehet választani a példa felső részén: szinusz 1 kHz, fehérzaj vagy hangfájl.

A piros és zöld színű gombok megnyomásával a hangerő 0 (maximum) illetve -66 (minimum) dB-re ugrik. A csúszka használatával folyamatosan is lehet változtatni a hangerőt, illetve a minimumot le lehet vinni -96 dB-ig. Ekkor azonban a 0 dB már komoly halláskárosodást is okozhat, vigyázzunk a használatával!

A csúszka alatti fehér mezőben megfigyelhetjük, hogy a leghangosabb (1) értékhez képest milyen lineáris nyomásértékarányok jellemzik a halkabb területeket.

A példán a hangosságtartományt 96 dB-re szűkítettük, a szakirodalom 120 dB-t határoz meg, ezt mi oktatási célokra veszélyesnek tartottuk.

2.1. ábra: Hallásküszöb beállítása

Mivel a fülünket érő hangnyomásinger nagyon széles skálán mozog, kényelmesebb a hangnyomást logaritmikus skálán mérni, melyet decibel- (dB) skálának nevezünk.

A logaritmikus skála azért is megfelelőbb hangnyomásszint mérésére, mert a fülünk is logaritmikus módon reagál a hangerőre. Amint a hang egyre erősebbé válik, a hangintenzitás növekvő mértékű változása szükséges ahhoz, hogy egyforma hangerőváltozást érzékeljünk.

2.1.1. A hangteljesítményszint, a hangintenzitás és a hangnyomásszint

A hangerő meghatározására több fizikai fogalom is létezik, ezért sokszor megtévesztő lehet, hogy milyen mértékegységgel dolgozunk. A három kifejezés, amivel a leggyakrabban lehet találkozni, a hangteljesítmény, a hangintenzitás és a hangnyomás. A hangteljesítmény az egy időegységre jutó hangenergiát jelenti. Jele a P , mértékegysége a watt (W). A hangintenzitás azt fejezi ki, milyen hangteljesítmény jut egységnyi felületre. Jele az I , mértékegysége a watt / másodperc (W/s). A hangnyomás a hanghullámok által keltett változó nyomás, amely közvetlenül mérhető. Jele a p , mértékegysége a pascal (Pa). A három

mennyiség között matematikai összefüggés van. Mindhárom mennyiség szintjét decibelben szokás megadni, ezért fontos, hogy amikor decibelértékekkel dolgozunk, tudjuk, hogy az melyik mértékegységre vonatkozik.

A hang teljesítménye illetve intenzitása okozza a hangnyomásváltozást, ami hat a dobhártyára vagy bármilyen más membránra. Ezért a hang erősségét általában mikrofonnal méri, mely arányos a hangnyomással, ezért a hangfelvétel, hangátalakítás és hangszintézis területén az a legáltalánosabb, hogy a hangnyomásból indulnak ki. A hangnyomásszint angol nyelvű rövidítése a SPL (sound pressure level).

2.1.2. A decibel értékének kiszámítása

A decibel (dB) terminus a Bel egytizedét jelenti. A Bel mértékegységet Alexander Graham Belről nevezték el (ezért szerepel nagy B a dB rövidítésben). A Bel a két hang vagy jel teljesítményszint-arányának tízes alapú logaritmus:

$$L_p (\text{IL}) = \lg P/P_r.$$

Ebben az esetben Bel mértékegységben kapjuk meg a hangerősséget, mely általában valamely tört szám. Hogy kényelmesebb értéket (dB) kapjunk, tízzel kell szorozni:

$$LP (\text{IL}) = 10 \lg P/P_r.$$

Amennyiben hangnyomásértékekből indulunk ki, a képlet a következő módon módosul:

$$L_p (\text{SPL}) = 20 \lg p/p_r$$

(Mivel a teljesítmény a nyomás négyzetével arányos, a $\log(p/p_r)^2$ kifejezés a logaritmus szabályainak megfelelően $2 \times \lg p/p_r$ kifejezéssel egyenlő.)

A logaritmus

A logaritmus két szám között értelmezett matematikai művelet, a hatványozás egyik megfordított (inverz) művelete (a másik a gyökvonás). A pozitív b szám a alapú logaritmusán (ahol a egytől különböző pozitív szám) azt a kitevőt értjük, melyre a -t emelve b -t kapjuk. A b szám a alapú logaritmusát $\log_a b$ jelöli.

Pl.:

$$\log_2 8 = \log_2 (2^3) = 3$$

$$\lg 100 = \lg (10^2) = 2 \quad (10\text{-es alapú logaritmus jelölése: } \lg)$$

2.1.3. A környezetünkben előforduló hangok relatív hangossága

Bár a decibelskála arra szolgál, hogy két hangnyomást összehasonlítsunk, definiálhatunk olyan skálát, melynek kiindulási (referencia) nyomásamplitúdó-értéke $p_0 = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (tehát a hallásküszöb), melyet elláthatunk a 0 dB értékkel. Így a hangnyomásszint értékét a következő módon számíthatjuk ki:

$$L_p (\text{SPL}) = 20 \lg p/p_0.$$

Ebben az esetben a 0 dB SPL egy fiatal, ép fül hallásküszöbét jelenti. Ekkor a hangnyomásszint-értékek pozitív számok, amelyek azt mutatják meg, mennyivel hangosabb az adott hang a hallásküszöbnél.

Az alábbi táblázatban példákat láthatunk arra, hogy ha a hallásküszöb hangosságát feleltetjük meg 0 dB SPL-nek, akkor körülbelül milyen hangosak a környezetünkben található hangzások.

2.1 táblázat: Köznapi hangosságok dB-ben megadva

Relatív nyomásszint	SPL (dB)	Hang
10.000.000 x	140	Colt 45 pisztoly (8 m)
	130	tűzoltósziréna (30 m)
		fájdalomküszöb
1.000.000 x	120	felszálló sugárhajtású repülő (100 m)
	115	rockkoncert (3 m)
100.000 x	100	harsona (3 m)
	95	hangos klasszikus zenekar
10.000 x	80	repülőkabin
hogy	70	forgalmas nagyvárosi utca
	65	átlagos párbeszéd
1.000 x	60–65	nagy iroda
	45–55	étterem
	50	autó (60 km/h)
100 x	40	nagyvárosi otthon (éjjel)
	25–35	üres koncertterem
	20–30	hangstúdió
10 x	20	levélzörgés
	15–20	átlagos suttogás
	10–15	halk suttogás
referenciaszint	0	hallásküszöb

Hangpéldák:

halk suttogás



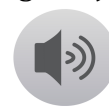
2.1. Hang

forgalmas nagyvárosi utca



2.2. Hang

felszálló sugárhajtású repülő



2.3. Hang

Feladat: készíts hallgatási naplót! 1 héten keresztül minden nap figyelj meg egy teret (utca, mező, tópart, étterem, éjszakai szobabelső stb.), és próbáld meg behatározni, milyen a zajszint a fenti példák segítségével)

2.1.4. A decibelértékek összegzése

Decibelértékek összegzésekor első ránézésre úgy tűnik, hogy 2x2 néha 5. A logaritmusszámítás matematikai szabályai miatt a decibelértékeket nem lehet egyszerűen összeadni egymással:

$$60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} \neq 120 \text{ dB} !!!$$

Az eredeti logaritmusszámítási képletekbe helyettesítve, a következő eredményeket kapjuk intenzitásszint illetve hangnyomásszint esetén:

Intenzitásszint:

$$(IL) = 10 [\lg (P+P)/P_r] = 10 [\lg 2P/P_r] = 10 [(\lg 2 + \lg P/P_r)] = 10 [0.301] = 3.01 \text{ dB} + \lg P/P_r, \text{ tehát } 3 \text{ dB a növekedés mértéke.}$$

Hangnyomásszint:

$$(SPL) = 20 [\lg (p+p)/p_r] = 20 [\lg 2p/p_r] = 20 [(\lg 2 + \lg p/p_r)] = 20 [0.301 + \lg p/p_r] = 6.02 \text{ dB} + \lg p/p_r, \text{ tehát } 6 \text{ dB a növekedés mértéke.}$$

A két példán láthattuk, hogy nem mindegy, melyik mennyiséget duplázzuk, a hangintenzitásszintet vagy a hangnyomásszintet. Természetes akusztikai körülmények között, azaz ha például egy teremben két hang egyszerre szól, és így duplázzuk a hangot, a hangnyomásszintet kell figyelembe venni. A hangnyomásszint megduplázódása azonban nem jelenti azt, hogy a hangosságérzet is kétszeresére növekedik. Csak körülbelül lehet megmondani, hány decibeles növekedés esetén halljuk kétszer olyan hangosnak a hangot, mivel az érzetet befolyásolja a hangzás típusa és a tér is, melyben megszólal. Pszichoakusztikai tesztek átlagolása alapján ma már elfogadott nézet, hogy ugyanakkor a hangnak a hangosságérzetének megkétszereződéséhez kb. 10 dB-es növekedés szükséges.

A 02_Interaktív példa lehetővé teszi, hogy közeli térben felvett zongorakkordon kipróbáljuk, és gyakoroljuk, milyen érzetet okoz a 3, 6, illetve 10 dB-es növekedés.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).

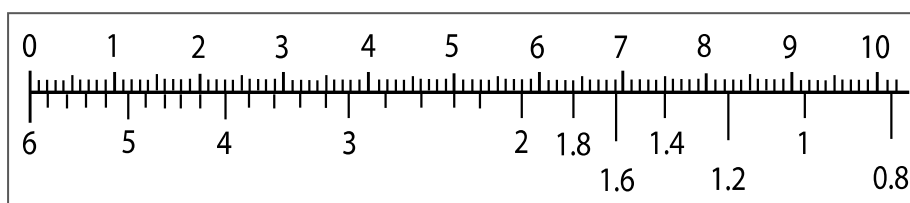


A példa felső részén meg tudjuk hallgatni, milyen hangos a referenciahang és hozzá képest a 3, 6 és 10 dB-es növekedés.

A tesztfelületen a zöld gombok megnyomásával tudjuk a referenciahangot meghallgatni. A feladat, hogy kitaláljuk, mennyivel hangosabb a mellette lévő, sárga gombbal indítható hang. A lehetséges esetek: ==, 3 dB, 6 dB, 10 dB. Az eredményt minden sorban a „Mutasd!” utasításra kattintva lehet megnézni.

2.2. ábra: Hangerők duplázódása

A decibelérték kiszámítása hangok duplázásakor viszonylag egyszerű művelet, csak a 3-as és a 6-os számra kell emlékeznünk. Kicsit bonyolultabb a feladat, ha különböző decibelmennyiségű hangok együttes hangnyomásszintjét kell kiszámolni (ilyenkor már szükség lehet függvénytáblázatra vagy számológépre is). Ennek megkönnyítésére találták ki a nomográfot, ami egy szellemes grafikai eszköz hangnyomásszintek összeadására.



2.3. ábra: Nomográf

A nomográf működése:

1. A két decibelérték közül kiválasztjuk a nagyobbát, és kivonjuk belőle a kisebbet.
2. A nomográf felső skáláján megkeressük a kapott értéket, és leolvassuk az alsó skálán hozzá tartozó számot.
3. A nagyobb decibelértékhez hozzáadjuk a kapott számot.

Példa a nomográf működésére:

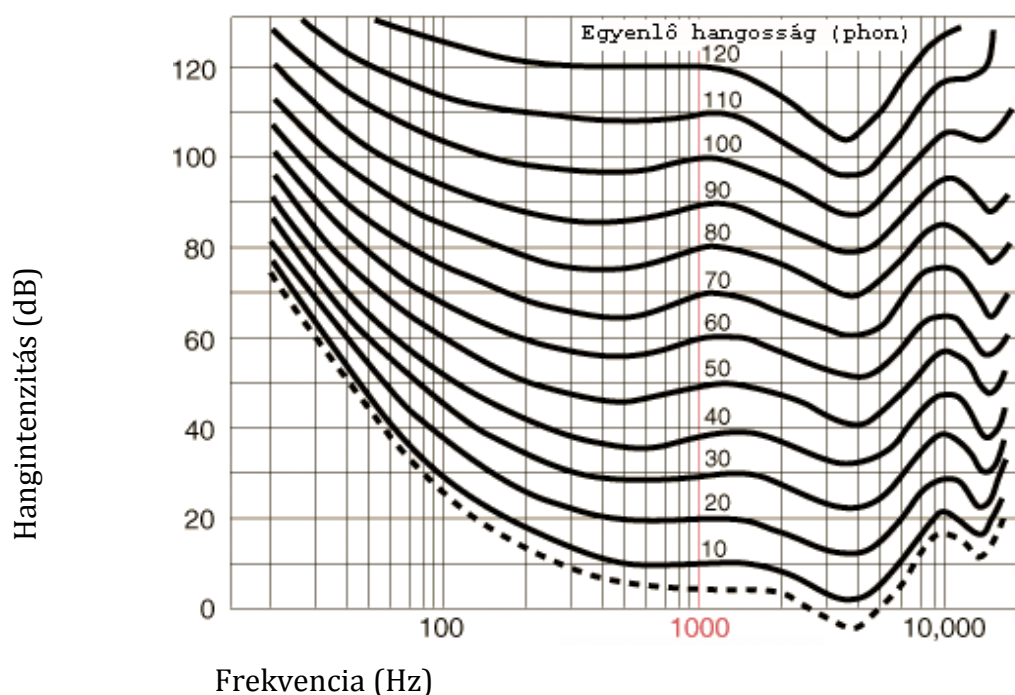
Hány decibeles hangnyomásszintet kapunk, ha egyszerre szólal meg egy 80 és egy 75 decibeles hang?

Levezetés, válasz:

1. $80 - 75 = 5$
2. A nomográf felső skálájának 5-ös értékéhez az alsó skálán 3.55 tartozik.
3. $80 + 3.55 = \mathbf{83.55 \text{ dB}}$

2.2. A hangosságérzet

A hangosságérzet nemcsak a hang intenzitásától, hanem a hang frekvenciájától is függ. A Fletcher–Munson-görbe azt ábrázolja, hogyan reagál az emberi fül a különböző hangosságú frekvenciákra. Az ábra Fletcher és Munson kísérletei alapján alakult ki a Bell laboratóriumban az 1930-as években. A kísérleti alanyoknak meg kellett ítélni, milyen beállítás esetén volt két különböző szinuszhullám egyenlő hangosságú. A görbék nagy számú kísérleti alany eredményeinek átlagolásából jöttek létre.



2.4. ábra: Hagyományos hangszerek hangterjedelme

Az egyes görbéket azonosító – a görbék felett található – számok phon mértékegységben jelzik, milyen kontúr mentén található egyenlő mértékű hangosságérzet.

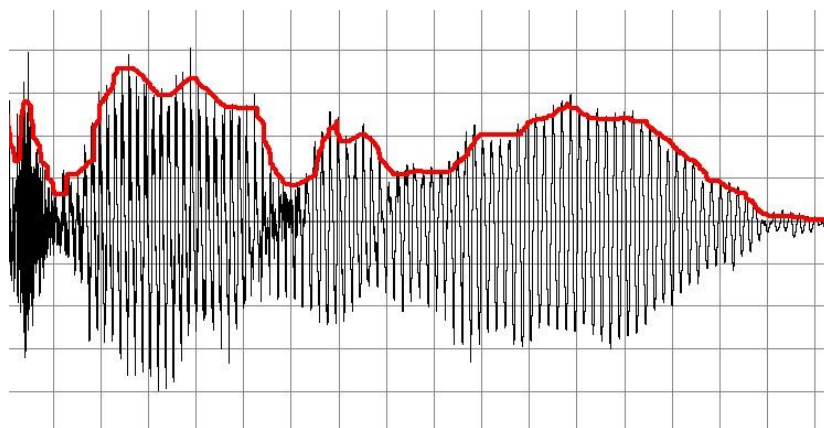
1 phon = 1 dB (SPL) 1 kHz frekvencián

Az egyenlő hangosság vagy phon-görbék az átlagos emberi fül által érzékelt egyenlő hangosságérzetet reprezentálják. A következő fontos jellemzőket lehet kiolvasni segítségükkel:

- a hang decibelben megadott intenzitásértéke nem tükrözi közvetlenül a fül által érzékelt, az adott hang frekvenciájától függő hangosságérzetet,
- a fül kevésbé érzékeny az alacsony frekvenciákra, és ez a tulajdonság erősebb a halk hangok esetén (itt a görbe meredekebb),
- a fül érzékenysége 3-4 kHz között maximális, ami a hallócsatorna rezonanciájára vezethető vissza.

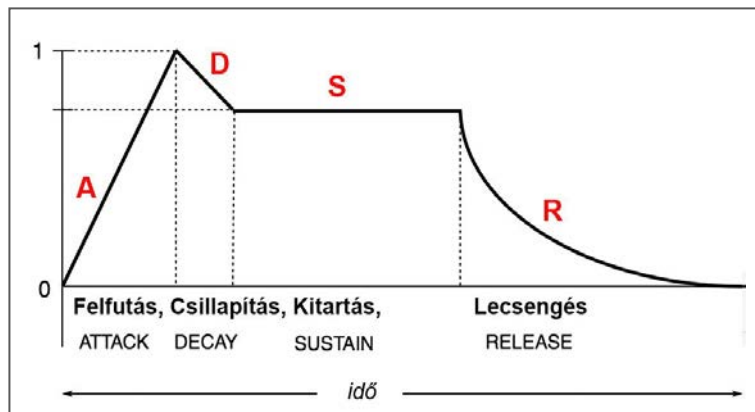
2.3. Az amplitúdó-burkológörbe (ADSR-görbe)

A burkológörbe a hanghullám maximális amplitúdójának időbeli lefolyását leíró görbe. Amint az a 2.5. ábrán látható, a hang dinamikájának időbeli változásai nagyon hektikusak lehetnek, és csak sok törésponttal írhatóak le pontosan.



2.5. ábra: Amplitúdó-burkológörbe végtelen törésponttal

Különböző adatredukciós kutatások eredményeképpen sikerült létrehozni az amplitúdógörbe egyszerűsített, 4 szakasszal jellemzett reprezentációját, melynek segítségével elvileg bármilyen hang dinamikai változása leírható. A négy szakasz: 1. a felfutás (attack), 2. a csillapítás (decay), a kitartás (sustain) és a lecsengés (release) a 2.6. ábrán figyelhető meg. A fázisok angol neveinek kezdőbetűiből született az ADSR elnevezés, mely széles körben elterjedt a szintetizátoriparban.



2.6. ábra: ADSR-görbe

A négy szakasz jellemzője:

1. Felfutás – az a szakasz, melynek során az amplitúdó a csendtől az első maximumig növekszik.
A felfutás/beregzés időtartama néhány ezredmásodperctől bármilyen hosszú ideig tarthat. Énekhangon és vonós hangszereken a hangot folyamatosan lehet fokozni egészen a hallásküszöb szintjétől. Fúvós hangszereken ez az idő a nád vagy az ajakberegés létrejötte miatt szükséges. Az ütött hangok beregzése a legrövidebb, de fontos tudnunk, hogy bár egy ilyen rövidségű hangot úgy hallunk, mintha felfutással nem is rendelkezne, hanem azonnal megszólal, szonogramanalízis során látható, miként változik meg a hangszín, és mennyi időre van szükség a spektrum kialakulásához.
2. Csillapítás – az első maximumponttól a stabil állapotra történő visszaesés.
A csillapítási szakaszra azért van szükség, mert egyes hangszerek (például rézfúvós) esetében az ajak beregzése nagyobb dinamikai szintet (és más spektrumot) ér el, mint a kitartás szintje. Ilyenkor a beregzés hektikus folyamata után kell valamennyi idő a hang stabilizálódásához.
3. Kitartás – a viszonylagosan stabil, konstans állapot.
A kitartási szakasz jellemzője többé-kevésbé az állandóság, bár ebben a szakaszban is kialakulhatnak dinamikai fluktuációk, például a tremoló.
4. Lecsengés – a záró szakasz, melynek során az amplitúdó eléri a csendet.

Természetesen nem minden hang tartalmazza mind a négy fázist, gyakran csak a felfutás és a lecsengés van jelen.

Az amplitúdó-burkológörbe hangszínt befolyásoló hatását számos pszichikus kísérlettel vizsgálták. Leggyakrabban a felfutás és/vagy a lecsengés eltávolításával tanulmányozták, mennyire sérül a hangok felismerhetősége hiányukban. Az eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a felfutás nélküli hangokat kevésbé lehet azonosítani, azaz a hangszínt nagymértékben befolyásolja a felfutási szakasz.

A következő hangpéldák azt illusztrálják, mi történik, ha a zongorahangot megfordítjuk. A hangok felett látható hullámformákon látható, hogy a megfor-

dított zongorahangoknak teljesen megváltozik a burkológörbéje, a gyors felfutás lassúra, a lassú lecsengés gyorsra változik. A megfordított zongorahangok hangzása nem hasonlít az eredetire; más hangszer – tangóharmonika – hangjára emlékeztet.



2.7. ábra



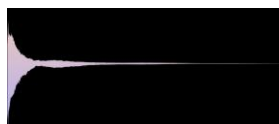
2.4. Hang



2.8. ábra



2.5. Hang



2.9. ábra



2.6. Hang



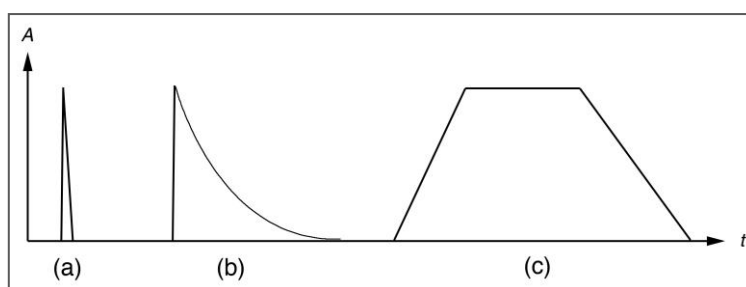
2.10. ábra



2.7. Hang

A felfutás és a lecsengés meghatározására két paraméter használatos: az időtartam és a dőlés formája (például lineáris, exponenciális). A felfutás a hangok megütöttségét, a lecsengés pedig a rezonanciaérzetet befolyásolja.

Denis Smalley a hangszeres hangok dinamikai változásának három archetípusát különbözteti meg, melyek variánsaival az összes dinamikai állapot előállítható¹.



2.11. ábra: Amplitúdó-burkológörbe archetípusok

- csak felfutás (lásd 2.11a ábra): két fázis, a felfutás és a lecsengés egy formába olvad, ilyenkor pillanatnyi energiimpulzus, koppanás, pattanás-szerű hang keletkezik.
- felfutás-lecsengés (lásd 2.11b ábra): a felfutás szakaszt rezonancia prolongálja. A kezdő gesztus elindítja a hangot, nincs további energiaközlés, a hang fokozatosan lecseng. Rezonáns testtel rendelkező, ütött, pengetett hangszerek (például zongora, vibrafon, hárfa) tompítatlan hangzásainak morfológiája.
- fokozatos folyamatos (lásd 2.11c ábra): a három legfontosabb fázis (felfutás, kitartás, lecsengés) van jelen. A hang fokozatosan kezdődik, és a kitartás szakasz után fokozatosan végződik. A kitartás szakasz fenntartásához folyamatos energiaközlés szükséges, ami miatt Smalley szerint ez az archetípus a leginkább alkalmas variánsok kialakítására.

¹ Smalley (1997), 113. old.

3. A hang spektruma és a hangszínérzet

A különböző hangforrásoknak más és más a hangszínezete. Ennek az az oka, hogy a rezgésbe hozott test nem csak a saját (alaphang) frekvenciájával rezeg, hanem ennek különféle többszöröseivel is. A hang színezetét az alaphanggal együtt felhangzó összetevők keveréke határozza meg, melyet a hang spektrumának nevezünk.

A hang színe annak magasságához, időtartamához és erejéhez hasonlóan fontos zenei paraméter. Két hangot könnyen meg tudunk egymástól különböztetni, ha az említett paraméterek bármelyikében eltérnek egymástól. Ha két hang magassága (frekvencia), időtartama (összetett értelemben ritmus) és ereje (dinamikája) megegyezik, mégis különbözőnek halljuk őket, akkor hangszínükben különböznek egymástól.



3.1. Hang



3.2. Hang



3.3. Hang

Az egyes hangok hangösszetevőinek eltérő struktúrája teszi lehetővé, hogy a hangforrásokat megkülönböztethessük egymástól. A hangzások összetevőit hanganalízis segítségével tudjuk megismerni, amely részeire bontja a fülünkben egy hangként megszólaló hangszínt. A hanganalízis ismerete azért is fontos, mert a hallásunk hasonlóképpen, hangelemzés útján különbözteti meg a hangokat, hangszíneket, és nem a hangrezgés időbeli lefolyása (azaz a hullámformája) alapján.

A többi hangzástulajdonságtól eltérően a hangszín nem egydimenziós, azaz nem mérhető két végpont között. Míg a többi paraméter esetében könnyen megállapítható, hogy egy hang magasabb vagy mélyebb, hangosabb vagy halkabb, hosszabb vagy rövidebb a másiknál, addig a hangszínnél ez nem egyértelmű. A hang színének leírásához ugyanis egyszerre több tulajdonságra is szükség van; egy hang lehet egyszerre fényes, éles és szemcsés is például.

Feladat: találj három különböző hangzáshoz olyan jelzőpárokat, amelyekkel le tudod írni a hangszínüket!

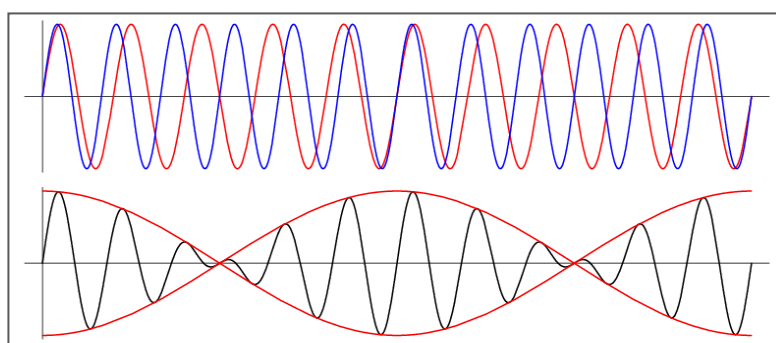
Ahhoz, hogy uraljuk a hangszínek világát, tudnunk kellene, melyik paraméter-kombináció melyik érzetet okozza. Egyelőre nem rendelkezünk teljes tudással a hangszín természetéről, a XXI. század egyik fontos zeneelméleti kihívása a hangszín multidimenzionális természetének feltárása.

3.1. Szinuszhangok összeadása

A különböző hangszínek jellege attól függ, milyen a belső szerkezetük, azaz hány és milyen tulajdonságú szinuszhangból épülnek fel. Ezért a hangszínekkel való ismerkedést tanácsos különböző szinuszhang-kombinációk vizsgálatával kezdeni.

3.1.1. A lebegés és az érdesség

Közeli frekvenciájú hangok együtthangzása esetén a rezgések szuperpozíciója az amplitúdó változását (növekedését vagy csökkenését) eredményezi. A jelenséget lebegésnek, ill. érdességnek nevezzük. A 3.1. ábrán kék és piros színnel jelölt szinuszhullámok frekvenciája alig tér el egymástól. Azonos fázishelyzetből indulnak, de mire megint azonos helyzetbe kerülnek (a képen megadott időtartam felénél és végén), a kék hullám hat-, a piros csak ötperiódusnyit rezeg. A két rezgés összeadódásakor a minimális frekvenciakülönbség speciális amplitúdó-változást hoz létre, melyet az ábra alsó részén látni. Ha a hullámformák minden egyes pontján összeadjuk az aktuális amplitúdóértékeket, az együtthangzás burkológörbéje lebegéssé módosul. A lebegés lüktetésének sebességét a frekvenciaértékek közötti különbség határozza meg. Ahány Hertz különbség van két hang között, annyi hullámzást hallunk másodpercenként.

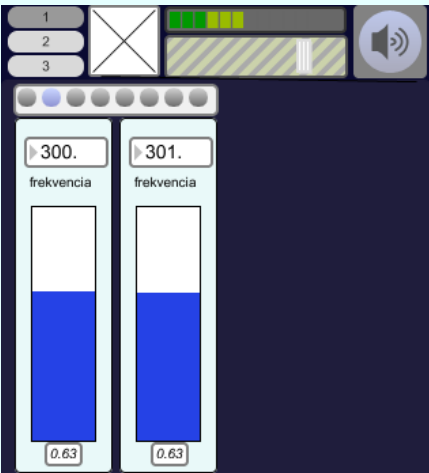
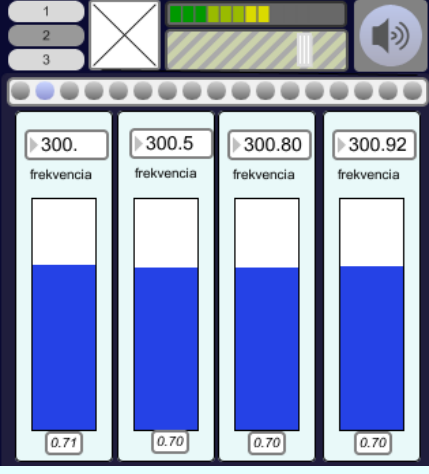
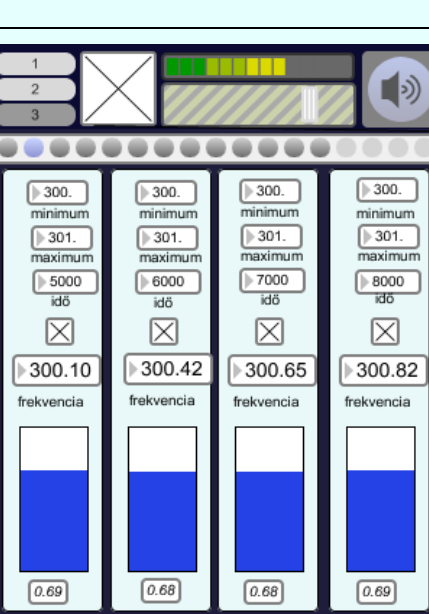


3.1. ábra: Közeli frekvenciájú szinuszok összeadása – lebegés kialakulása

A lebegés/érdesség jelensége nagyban meghatározza a hangszínérzékelést. Már két szinuszhang esetén is több állapotot tudunk megkülönböztetni attól függően, mekkora a különbség a jelek frekvenciája között. 1–10 Hz közötti különbség esetén a két szinuszhullám összegét **lebegésnek** érzékeljük. 10–20 Hz közötti különbség esetén a két szinuszhullám összegét **érdességnek** halljuk. 20 Hz-nél nagyobb különbségek esetén két szinuszhullám összegét külön hangmagasságnak érzékeljük vagy összeolvadó, új színezettel rendelkező hangnak halljuk.

A 3.2. ábrán látható interaktív példában a lebegés, az érdeesség és hangok szétválásával lehet kísérletezni. A teszt bal felső sarkában lehet kiválasztani, melyik példát szeretnénk kipróbálni (Example 1, 2, 3). A jobb felső sarokban lehet a hangszórót bekapcsolni, középen pedig a hangerőt beállítani. A fehér négyzetre kattintva indul el vagy áll le a hang. A körökbe kattintva előre beállított paraméterekkel lehet kísérletezni, de természetesen a kék kijelzők fölött saját frekvenciaértékeket is meg lehet adni.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).

	Lebegés_1 Az első példában két szinuszhang együttes megszólalását lehet megfigyelni. A körökre kattintva a lebegés, az érdesség és két külön hangból álló hangzás jellegzetességeit lehet meghallgatni, majd a frekvencia beállításával tovább kísérletezni.
	Lebegés_2 A második példában négy szinuszhang együttes megszólalását lehet megfigyelni. A körökre kattintva a lebegés, az érdesség és több külön hangból álló hangzás jellegzetességeit lehet meghallgatni, majd a frekvencia beállításával tovább kísérletezni. E példában érdemes figyelni, hogy az egymástól eltérő szinuszhangok frekvenciái arányukat tekintve milyen ritmusösszefüggéseket hoznak létre. Egy bizonyos bonyolultsági szint fölött a ritmus követhetlenné, véletlenszerűvé válik.
	Lebegés_3 A harmadik példában négy szinuszhang együttes megszólalását lehet megfigyelni, melyek adott idő alatt adott mértékben változtatják frekvenciájukat. A körökre kattintva a lebegés, az érdesség és több külön hangból álló hangzás jellegzetességeit lehet meghallgatni, majd a frekvencia és a változások mértékének beállításával tovább kísérletezni. E példában érdemes figyelni, hogy az egymástól eltérően változó szinuszhangok teljesen véletlenszerű lebegés-mintázatokat hoznak létre.

3.2. ábra: Lebegés etűd készítése két vagy négy állandó, illetve négy változó szinuszhullám segítségével

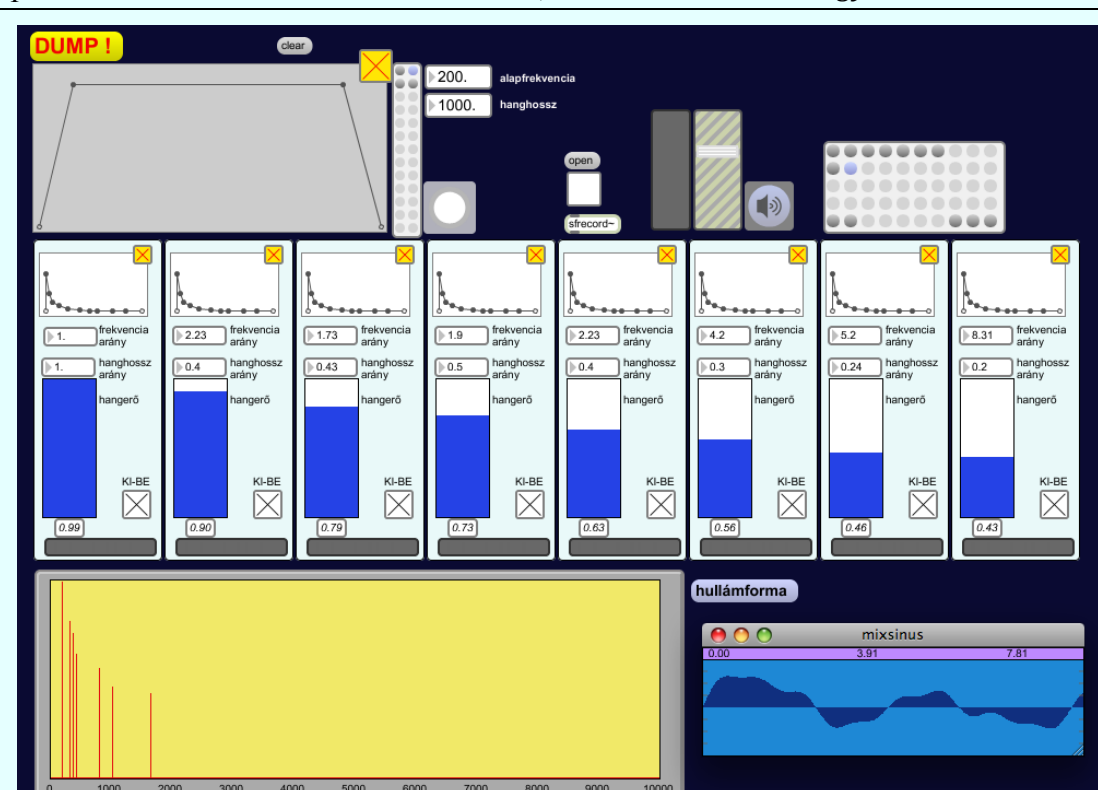
3.1.2. Az összeolvadás

A spektrumot alapvetően egységként érzékeljük, vagyis az összetevőket, még ha azok harmonikus felhangok is, nem halljuk külön. Ez az összeolvadás tulajdonsága. A hangszínhallást fejlesztve azonban ki lehet alakítani azt a képessé-
günket, hogy az egyes összetevőket külön is meghalljuk. (Hasonló az eljárás ahhoz, amit egy zongorán leütött hármashangzatnál gyakorolnak a zenét tanulók. Az akkordokat a zenésznek hangjaira bontva és egészében is tudnia kell meghallani, megérteni. A több hangból álló akkordok, illetve sűrű hangzások a gyakorlatlan hallgatónak értelmezhetetlen hangzástömegként jelennek meg, míg a képzett zenész érti őket, mert képes részeire bontani az említett elemeket.) E képességet hívjuk **analitikus hallásnak**, ellentétben az egészet egységként érzékelő **holisztikus hallással**.

Az összeolvadást befolyásoló tényezők:

- spektrum összetevőinek aránya: a harmonikus összetevők olvadnak össze a legkönnyebben,
- kiegyensúlyozott elhelyezkedés a frekvenciatengelyen,
- kiegyensúlyozott amplitúdóviszonyok,
- hasonló amplitúdó-burkológörbe

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#). – összeolvadás gyakoroltatása



Interaktív példánkban az összeolvadás létrejöttét lehet tesztelni a feltételeknek megfelelően paraméterváltozások segítségével. A példa alsó harmadában az adott megszólaló hang kétdimenziós spektrumát (frekvencia- és amplitúdó-

arányok), valamint a hullámformát lehet látni. Az itt kirajzolódó ábrák minden esetben a megadott frekvenciaarányokból létrejövő formát mutatják.

A felület felső harmadának közepén a hangszóró bekapcsológombja és az általános hangerő tolokája valamint kijelzője található. Tőle jobbra előre elkészített beállítások közül lehet válogatni, de természetesen saját értékekkel is lehet kísérletezni. A hangerőkijelző mellett hangfelvételre alkalmas gombok láthatók. Az „open” megnyomásával hangfájlt lehet létrehozni, melybe a fehér négyzet megnyomásával az éppen lejátszott hangok kerülnek rögzítésre. A bal felső sarokban lehet beállítani vagy berajzolni a komplex hang burkológörbét. Az előre elkészített fokozatos-folyamatos, gyors felfutás-lassú lecsengés, illetve kétféle lassabb felfutás-lassú lecsengés burkológörbe közül lehet választani, de a „clear” gomb megnyomása után a szürke felületen új görbét is létre lehet hozni. A burkológörbe sarkában található gombbal az adott görbét az egyes összetevőkhöz is hozzárendelhetjük, de azokat is lehet külön-külön beállítani, módosítani vagy átrajzolni. Az adott burkológörbe érvénybe léptetéséhez a „DUMP!” feliratú, a hang lejátszásához pedig a középső fehér gombot kell megnyomni. A lejátszógomb fölött találhatóak az alaphangfrekvencia és a hang idejének beállítására szolgáló számdobozok.

A teszt középső síkja az egyes összetevők paramétereit tartalmazza. A nyolc összetevőből álló hang spektrumát itt összetevőnként lehet változtatni, ezzel megfigyelni, milyen változást hoz egy hang színében, ha csak egy részét módosítjuk. Az egyes összetevők paramétereit közül változtatható a burkológörbe, az alaphangfrekvenciához viszonyított arány, az alap időtartamhoz viszonyított arány és az alaphangerőhöz képest megadott arány. Vagyis lehetőség van egyenként beállítani az összetevőket, majd paramétereiket az egész hangra vonatkoztatva is módosítani. Az összetevők kikapcsolásával lehetőség van kevesebb összetevővel való kísérletezésre is.

Az előre elkészített példák az összeolvadás jelenségét vizsgálják. Ezek leírására lentebb kerül sor.

3.3. ábra: Összeolvadás feltételeit bemutató interaktív példa

Az összeolvadás feltételei:

- a fúzió létrejöttéhez az összetevőknek harmonikus relációban kell állni egymással, azaz egy alaphang felhangjainak kell lenni. A teszt 1–2. elmentett példája harmonikus és inharmonikus spektrumú hangokat tartalmaz. (A 2., inharmonikus hang összetevői közül mindössze kettő lép ki az egész számú többszörösök sorából.) Bármelyik burkológörbét használjuk is, az összeolvadás az 1. példával megtörténik, a 2.-kal nem. (Jelen esetben a fúzió további feltételei – kiegyensúlyozott frekvencia- amplitúdóarányok, hasonló burkológörbe, összetevők azonos kezdőpontja időben.)

(fuzio_vezérles.maxpat elnevezésű interaktív példa 1–2. mentés)

- összetevők kezdőpontjának szinkronitása: ha az összetevők egyszerre indulnak, a hang kezdete (felfutása) összeolvad, egységesnek hat. Ha az összetevők különböző időpontban indulnak, a szinkronitás megszűnik, az összetevőket egyenként is lehet hallani. (Hasonlít ez a jelenség a harmóniahallás fejlesztésénél ahhoz, amikor törve, nem egyszerre szólaltatunk meg akkordokat a zongorán.) A teszt 3–6. elmentett példájában az összetevők megszólalásukat tekintve eltérnek egymástól. A 3. hangpélda összetevői egyszerre indulnak. A 4.-ben a magasabb összetevők egyre később lépnek be. A sorban történő belépésnek köszönhetően az összetevőket képesek vagyunk külön hallani. Bár a fúzió a hang végére létrejön, addigra már egyenként is halljuk a hangrészeket. Az 5. példa annyiban más, hogy a megszólaló összetevők felfutása gyors, ezért még élesebben hallani, mikor lépnek be, tehát valóban külön szólamoknak hallani őket. A 8. példa megegyezik a 7.-kel, de időtartama 4000 msec helyett csak 300 msec. A rövidség miatt nagyobb esély van a fúzióra. (A fúzió további feltételei – kiegyensúlyozott frekvencia-, amplitúdóarányok, harmonikus, azaz egész számú arányok.) Érdemes próbálgatni a fúzió létrejöttét úgy, hogy az alappéldákból csak egy-egy paraméter módosuljon.

(fuzio_vezérles.maxpat *elnevezésű interaktív példa 3–6. mentés*)

- hasonló amplitúdóforma (burkológörbe) szükségessége: ha az egyes összetevők dinamikai változása az időben hasonló, az a fúziót segíti. Ha az összetevők burkológörbéje eltér, az analitikus hallás kerül előtérbe. (Analogiaként képzeljünk el egy hármashangzatot vonósnégyesen, melynek tagjai a brácsa kivételével halkítanak egy akkordon, míg a brácsa hangja hangosodik. Az eltérő dinamikának köszönhetően a brácsa hangmagasságát külön lehet hallani.) A 7. hangpélda 5000 msec hosszúságú. Lényegében megegyezik a 3.-kal, de burkológörbéje középen csúcsosodik, tehát a maximum amplitúdót az összetevők adott idejük felénél éri el. Mivel az egyes összetevők időtartama különböző, más időpontokban éri el amplitúdó-maximumukat. A hangzó eredmény lassan változó harmonikus hangszín, melyben helyenként összeolvadnak, máskor finoman az előtérbe kerülnek a felharmonikusok.

(fuzio_vezérles.maxpat *elnevezésű interaktív példa 7. mentés*)

- Az egyes szempontok különböző variálásával tovább lehet vizsgálni a fúzió lehetőségét. Nem egyértelmű kombinációkban is létre lehet hozni fúziót. A 11–12. példa azt mutatja, hogy különböző hosszúságú inharmonikus arányú összetevőkkel is lehet fúziót előidézni, amennyiben az összetevők burkológörbéje megegyezik (elsősorban gyors felfutásnál).

(fuzio_vezérles.maxpat *elnevezésű interaktív példa 11–12. mentés*)

A fenti feltételek betartása mellett a fúzió többé-kevésbé létre tud jönni, és a hangzást egy hangnak halljuk, illetve nehezebb analitikusan hallgatni e hangot.

3.2. Hangspektrumok osztályai

3.2.1. A harmonikus hangok

A **harmonikus hangok** azok az összetett hangok, melyek összetevői az alaphang (f) egész számú többszörösei ($2f$, $3f$, $4f$ stb.). Spektrumuk vonalas, azaz diszkrét frekvenciaértékeket tartalmaz. Az érzékelés szempontjából a harmonikus hullámok konkrét hangmagassággal, összeolvadó, jellegzetes színezettel rendelkező „kellemes” hangzások. (Pl. énekhang, kürt, fuvola vagy Bach-példánk – 1.1. Hang) A harmonikus hang összetevőit másképpen **felhangoknak**, **felharmonikusoknak** is hívjuk. Sajátos jellemzőjük, hogy külön nem halljuk őket, mert összeolvadnak hallásunkban.

Egyes harmonikus hangoknak külön nevük van, mert struktúrájukban könnyen megkülönböztethetőek más, komplexebb spektrumoktól.

- Szinuszhang: csak egy szinuszosztetevő.
- Háromszöghang: csak páratlan számú összetevőket (f , $3f$, $5f$, $7f$ stb.) tartalmazó spektrum; jellemzően puha hangszín.
- Négyszöghang: csak páros számú összetevőket ($2f$, $4f$, $6f$ stb.) tartalmazó spektrum; fényesebb, mint a háromszöghang.
- Fűrészhang: minden egész számú összetevőt (f , $2f$, $3f$, $4f$ stb.) tartalmazó spektrum.

Tristimulus diagram

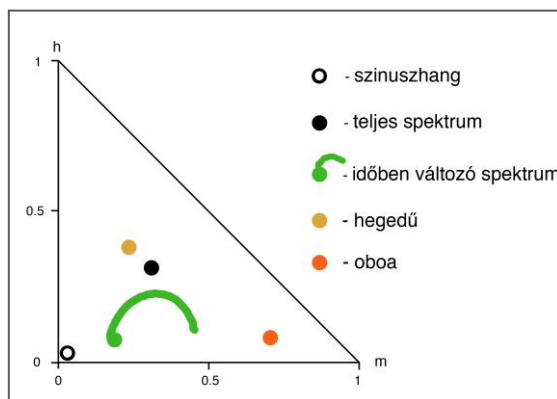
A spektrum általános tulajdonságainak tömör összegzésére dolgozta ki „tristimulus” elméletét Pollard és Jansson², akik a látás régóta érvényben lévő színdefiníáló technikájának analógiáját követték. A szem három különböző típusú pálcikadetektort tartalmaz, melyek mindegyike a látható spektrum más részére érzékeny: az egyik csoport túlnyomóan a vörös fényre, a másik a zöldre, a harmadik pedig a kékre reagál. Amikor a szem egy összetett spektrumú fényt fogad, az agy képes megítélni a fény spektrális felbontását összehasonlítva azt a három típusú receptor jeleivel. A szín így meghatározható három számmal, melyek a vörös, a zöld és a kék régiók komponenseinek relatív erejét reprezentálják.

A hangspektrum fő tulajdonságai a színekhez hasonlóan redukálhatóak három számra, melyek a spektrum három régiójának hangosságát reprezentálják. Az első régió csak az alaphangot tartalmazza (1. harmonikus), a második a 2., 3., és 4. harmonikust, a harmadik pedig az összes magasabb harmonikust. A három terület átlagolt hangosságainak egymáshoz viszonyított arányát egy derékszögű háromszög által határolt koordináta-rendszeren, az ún. tristimulus diagramon (lásd 3.4. ábra) lehet ábrázolni.

A 3.4. ábrán a tristimulus diagram bal alsó pontján található üres kör jelzi a szinuszhangot. Mivel mind a közép-, mind pedig a magas tartományhoz rendelt

² Campbell, M.–Greated C. (2001), 150. old.

érték 0, a fennmaradó 1 az alaphang hangossága, ami nyilvánvalóan igaz a szinuszhang esetén. A teljes, kiegyenlített tartományt az ábrán a sötét pont jelzi. Az okker illetve narancssárga pontok egy hegedű- és egy oboahang tristimulus reprezentációját mutatják. A hegedű kiegyensúlyozott hangszíne a diagram közepétől kissé a magas tartomány felé tolódik, míg az oboában dominálnak a középtartomány összetevői. A zöld színnel ábrázolt pont és a hozzá kapcsolódó görbe jelzi, hogy a tristimulus diagram alkalmas időben változó spektrális folyamatok ábrázolására is.



3.4. ábra: Tristimulus diagram

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).

A középső háromszögben található pontot mozgatva lehet változtatni a tristimulus reprezentáció spektrum három sávjának amplitúdóját. A felső (zöld) ábrán látható a kiindulási hang spektrum, az alsó, három (barna/okker/sárga) ábrán pedig a belőle keletkező hangszín spektruma. A „Play sound” gombok megnyomásával össze lehet hasonlítani, hogyan változik a hangszín a tristimulus sávok különböző helyzeteiben.

3.5. ábra: Tristimulus diagram

3.2.2. Az inharmonikus hangok

Az inharmonikus hangok a harmonikus, jól elkülöníthető, összeolvadó hangmagassággal rendelkező hangok és a zajok közötti területen helyezkednek el. Instabil, többértelmű típusok, melyek elmozdíthatóak mind a harmonikus, mind a zajos tartomány felé.

A hangszerek hangszínét vizsgáló pszichoakusztikai kutatások az inharmonikus tartományt három kategóriára osztották, amelyek: a) majdnem harmonikus hangok, b) elszórtan elhelyezkedő összetevőkkel rendelkező inharmonikus hangok és c) sűrűn elhelyezkedő összetevőkkel rendelkező inharmonikus hangok.

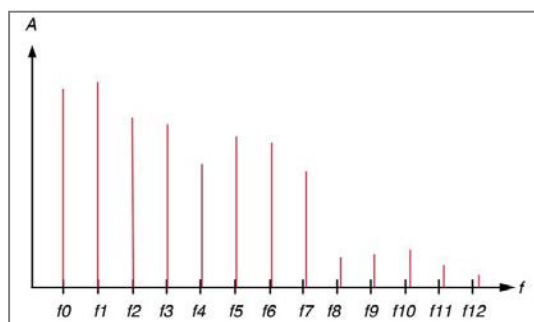
a) Majdnem harmonikus hangok

A főleg húrok pengetésekor vagy megütésekor keletkező hangszínek összetevőinek kismértékű eltérését a harmonikus arányoktól ún. inharmonicitás együtthatóval lehet leírni a következő képlet segítségével:

$$I_n = n f_1 (n^2 - 1) A / 2,$$

ahol I = inharmonicitás mértéke, n = összetevő sorszáma, f_1 = alaphangfrekvencia, A = inharmonicitás együttható, melynek mértéke a húr anyagának jellemzőitől függ.

Az inharmonicitás mértéke az összetevő sorszámaival négyzetesen arányos, így minél magasabb sorszámu az összetevő, annál nagyobb a különbség a harmonikus esetben létrejövő értéktől, amint az a 3.6. ábrán látható. A zongorahangok esetében az inharmonicitás növelésének következtében válik a hangzás fényesebbé, tisztábbá, élesebbé.

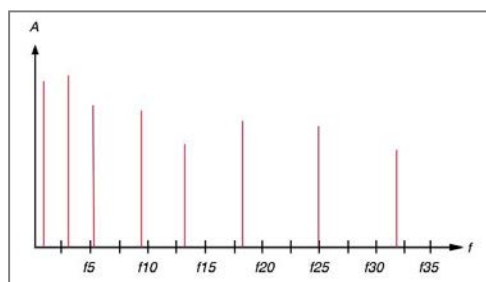


3.6. ábra: Majdnem inharmonikus hang spektruma

b) Elszórtan elhelyezkedő összetevőkkel rendelkező inharmonikus hangok

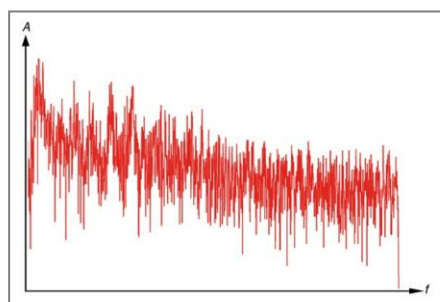
Az akusztikus hangszerek közül a fa- és fémlappal rendelkező ütőhangszerek spektruma tartalmaz elszórtan elhelyezkedő inharmonikus összetevőket, melyek egymástól jól elkülönülnek, és gyakran felfelé tágnak, mint az a 3.7. ábrán látható.

Az összetevők egymástól való távolsága miatt nem az érdességérzet kialakulása a jellemző, az összetevők egy részét inkább külön hangmagasságként érzékeljük. Azok az összetevők, amelyek között közel harmonikus arányok alakulnak ki, összeolvadhatnak egy hangmagasságéretté.



3.7. ábra: Elszórt összetevők inharmonikus hangban

c) Sűrűn elhelyezkedő összetevőkkel rendelkező inharmonikus hangok



3.8. ábra: Sűrűn elhelyezkedő összetevők inharmonikus hangban

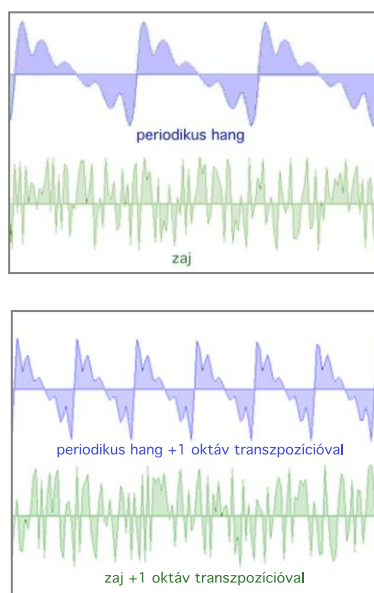
A vékony fémlemezek és a kifeszített membránok spektruma nagyon sűrű, sokszor közelít a fehérzajhoz. A cintányér hangjának elemzéséből például az derül ki, hogy az egyik legerőteljesebb alkotóeleme, a 2200 Hz a 110. sorszámú összetevő. Lineáris megoszlás esetén 20 Hz-ként találnánk összetevőket, ami a magasabb tartományban egészen kicsi hangköznek felel meg (8000 Hz esetén a kisszekund 475 Hz-nek felel meg, a 20 Hertz nem éri el a fél centet sem – a cent mértékegységéről az 5.4.3. szakaszban esik szó). A közeli összetevők miatt a hangzás nagymértékű érdekességgel rendelkezik, így hangmagasságot nélkülöző, zajos érzet keletkezik (lásd 3.8. ábra).

3.2.3. Zajok, zörejek

A harmonikus hangzások és a zaj közötti érzékelési különbség nagyon jelentős spektrális meghatározó, azonban a pontos határérték nehezen definiálható a két minőség között. Ennek oka egyrészt a „zaj” szó széles körű jelentésében keresendő, amely gyakran magában foglalja az elutasítást, a védekezést minden olyan hangzással szemben, amelynek funkciója egykor az volt, hogy veszélyre figyelmeztessen. A háborgó vizek, viharok, lezúduló kövek, robbanások hangja negatív reakciót kiváltó kategóriaként rögzült az evolúció folyamán. A civilizáció előrehaladtával valamelyest megszélidült jelentése, de ma is általános, hogy a zavaró, a hallásra veszélyes hangok nagy csoportját tekintjük zajnak. Egy másik ok a két kategória közötti folyamatos átmenetben keresendő, hiszen elég széles az a határterület, ahol még a kontextustól függ, mit tekintünk inharmonikus hangnak, zajos hangmagasságnak vagy hangmagassággal rendelkező zajnak.

A zaj matematikai definíciója szerint véletlenszerű folyamat. A digitális hangkeltésben a zaj egyes hangmintái között nincs kódolható viszony. A teljesen véletlenszerű zaj spektrumában minden összetevőnek egyforma az átlagolt amplitúdója. Smalley ezt az állapotot „telített spektrális állapotnak”³ nevezi, mely nem bontható hangmagasságokra.

A zaj behatárolását az is megnehezíti, hogy befogadásának módja lényegesen különbözik a periodikus hangokétól. A 3.9. ábrán periodikus hang és fehérzaj hullámforma-reprezentációjának összehasonlításán jól látható, hogy a periodikus jel ismétlődő hullámformákkal tagolt, zérusátmenetei egymástól egyenlő távolságra helyezkednek el. A hallás ezt az időtartomány-információt is figyelembe veszi a hangmagasság- és hangszínérzet kialakításakor. A periodikus hang transzpozíciója világosan megjelenik rövidebb periódusok formájában. A zaj időtartomány-reprezentációja véletlenszerű amplitúdóértékeket és zérusátmeneteket tartalmaz. Transzpozíciója nem okoz a periódusos hangokéhoz hasonló változást az időtengelyen, és ami még meglepőbb, az oktávval feljebb transzponált fehérzajt ugyanolyannak érzékeljük, mint transzponálatlan verzióját. Összetettebb zajos hangzások esetén még furcsább érzékelési eredmények fordulnak elő. Wishart egyik hangzó példája pl. az oktáv-transzpozíció után egy terccel feljebb szól⁴.



3.9. ábra: Zaj transzpozíciójának hullámformája

A zaj véletlenszerűségfoka változtatható, azaz a zaj amplitúdójának és/vagy spektrumformájának változtatásával különféle módokon lehet „színezn” a fehérzajt. Az amplitúdómoduláció a moduláló frekvenciával megegyező hangmagasságot ad a zajhoz. A zaj spektrumformáját szűréssel változtathatjuk. A széles sávokkal behatárolt zaj továbbra is zajos karakterű, de eltérő színezetű

³ Smalley, D. (1997), 120. old.

⁴ Wishart (1996). 58. old.

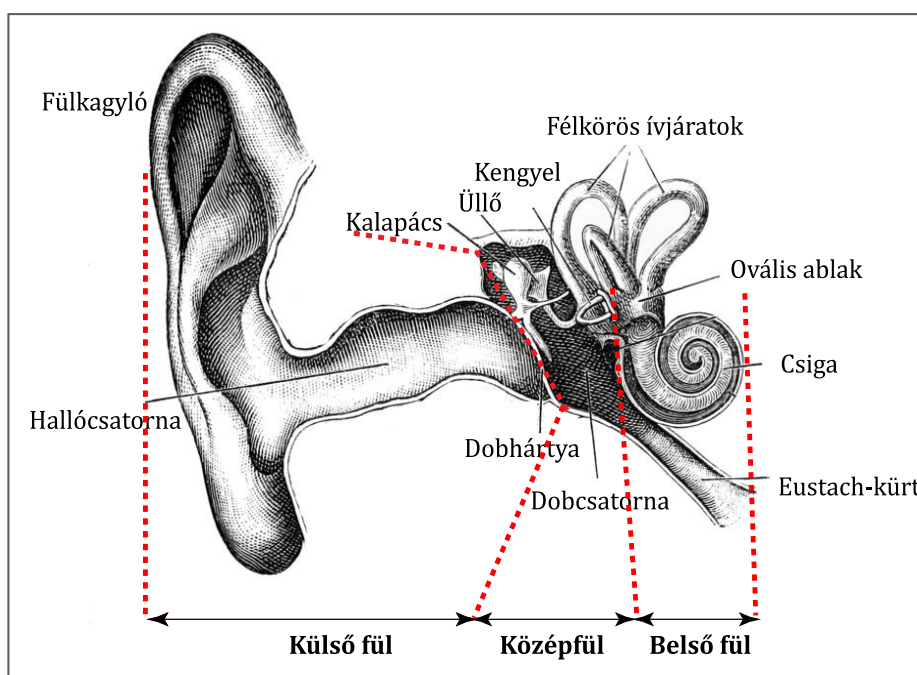
hangzásokat eredményez. Keskenyebb sávok esetében hangmagasságérzet is kialakul. A zaj színezésével hozzávetőlegesen meg tudjuk ítélni, milyen hangmagasságok keletkeznek az egyes deformációk eredményeképpen, amely megkönnyíti a közlekedést a hangmagasság-zaj kontinuumon.

4. A hallás

A hang a levegő rezgése, mely rezgés a fülön át jut a hallóközpontba, ahol elektromos jellé alakulva továbbítódik az agyba. A hangokat minden útjukba kerülő szilárd akadály ellenére meghalljuk, mert a hanghullámok – legalábbis részben – megkerülik azokat, ezért jóval több hang-, mint fényhatás ér minket. Nem csak arra vagyunk képesek, hogy felismerjünk hangokat (és azok jellemzőit, pl. magasságukat, színüket, dinamikájukat), hanem arra is, hogy azonosítsuk, merre, milyen távol van tőlünk a hang forrása. A beazonosított hangösszetevők segítségével tájékozódunk a körülöttünk lévő világban.

A hanghullámok a fülön keresztül eljutnak az agyba, ahol tapasztalataink alapján értelmezni tudjuk őket. Hallásunk egyfajta élő elemzőként működik: úgy bontja részeire a hangot, mint egy spektrumanalizátor, nem a hullámformát, hanem a hangösszetevők struktúráját érzékeli. Mivel a hanganalízishez hasonlóan hallásunk is az összetevők meghatározása segítségével különbözteti meg a hangokat, a spektrumkép, illetve a szonogramanalízis az a reprezentáció, ami a legjobban hasonlít a hallás folyamatához.

4.1. A hallószervrendszer működése



4.1. ábra: A fül felépítése

Hallószervrendszerünk azon része, mely közvetlenül találkozik a hanggal, a fül. A fül felépítése több szempontból befolyásolja a hang befogadását, továbbítását, majd felismerését. A fül három részre oszlik: **külső, középfül** és **belső fül** (4.1. ábra).

A fülben a hang háromféle, részenként különböző anyag segítségével továbbítható. A külső fülbe a levegő rezgéseként jut, a középfülben szilárd anyagban, a hallócsontocskák segítségével, míg a belső fülben folyadékban terjed tovább.

4.1.1. A külső fül és a dobhártya

A külső fül jól látható része a **fülkagyló** (4.2. ábra), mely stabilan helyezkedik el fejünk két oldalán. Alakja és belső porcelrendeződése segíti, hogy a hang minél hatékonyabban, az érzékelést segítő visszaverődésekkel és színmódosulásokkal jusson tovább a fülbe. Mivel a fülünk nem mozgatható, a stabil helyzetet arra használjuk, hogy a bordázat és az alak segítségével létrejövő hangszínmódosulásokat megismerve be tudjuk azonosítani a hangforrás helyét.



4.2. ábra: A fülkagyló

A szemből érkező hang direkt, a hátulról jövő hang pedig visszaverődéssel jut a **hallójáratba**. A körülbelül 2,5 cm hosszú, 7 mm átmérőjű hallójárat szerepe, hogy továbbítsa és felerősítse a hangokat. Az erősítés mértéke – a hallójárat saját rezonáns frekvenciája miatt – a 3000 Hz körül a legerőteljesebb.

A hallójárat végén, már védett körülmények között helyezkedik el a **dobhártya** (4.3. ábra), amely elhatárolja a középfület a külső fültől. Az ovális alakú hártya a levegő rezgését átvéve maga is mozgásba jön. A dobhártya olyannyira érzékeny, hogy még a nagyon kis amplitúdójú hangok rezgését is át tudja venni, és alig mérhetően finom mozgást végezve továbbítja. A külső fül tehát a fülkagylóból, a hallójáratból és a dobhártyából áll.

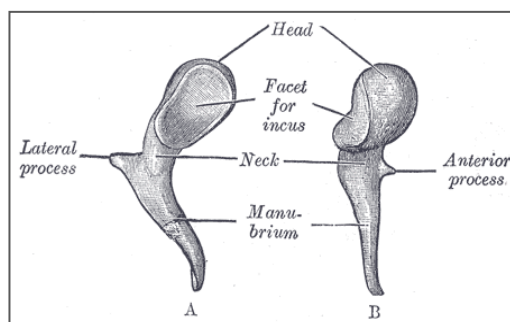
A dobhártya időnként összehúzódik vagy elernyed. Ez a jelenség az akusztikus reflex, melyre a különböző nyomású hangok áteresztése miatt van szükség, hogy a belső fül érzékeny szervei ne sérüljenek. Az akusztikus reflex kb. 30 dB-lel képes csökkenteni a hangnyomás szintjét, de ez szinte kizárólag a mély hangoknál működik.



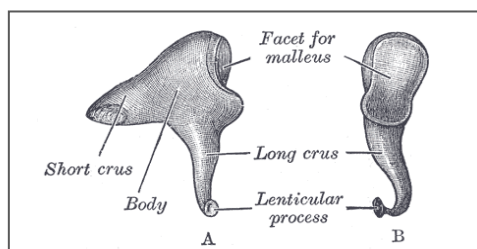
4.3. ábra: A dobhártya képe felnagyítva

4.1.2. A középfül

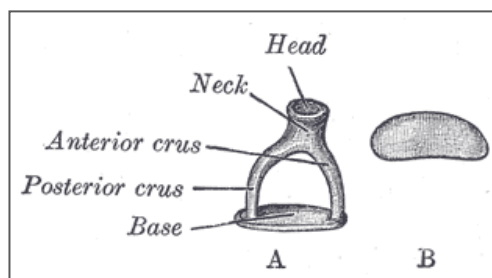
A dobhártya egyben a **középfül** külső fala is. A középfül másik fala az úgynevezett **ovális ablak**, melyet a dobhártyánál hússzor kisebb hártya fed. A két fal között egy pici kamra (a dobcsatorna) található, benne levegővel, valamint három **hallócsontocska**, mely a két hártyára tapadva összeköti azokat. A néhány milliméter nagyságú csontocskák neve: **kalapács** (malleus) (4.4. ábra), **üllő** (incus) (4.5. ábra) és **kengyel** (stapes) (4.6. ábra).



4.4. ábra: Kalapács



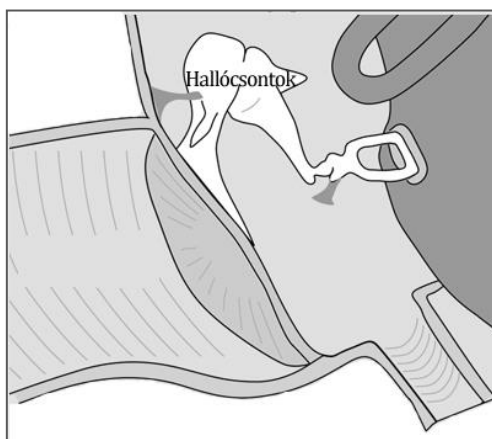
4.5. ábra: Üllő



4.6. ábra: Kengyel

A középfül elsődleges feladata, hogy továbbítsa a külső fülből a nyomáshullámokat a belső fülbe. Ez a feladat azért különleges, mert a külső fülben még a levegőben terjedő hanghullámokat át kell alakítani folyadékban terjedő hullámokká, mivel a belső fül csigájában a hang már folyadékban terjed.

A középfülben a dobhártya rezgéseit a hallócsontok közvetlenül továbbítják a belső fülben található csiga ovális ablakához (4.7. ábra).



4.7. ábra: A dobhártya rezgésének továbbítása a középfülben

A hallócsontok feladata a klasszikus felfogás szerint, hogy mechanikusan konvertálják a dobhártya rezgéseit felerősített nyomáshullámokká a csiga folyadékában 1,3-szoros erőkar-áttétellel. Mivel a dobhártya területe kb. tizenhét-szer nagyobb, mint az ovális ablak, a hangnyomás koncentrálódik, és legalább huszonkétszeres nyomásérték keletkezik. A dobhártya a kalapácszhoz, a kalapács az üllőhöz, az üllő pedig a kengyelhez kapcsolódik. A kengyel lábazata nyomáshullámokat küld a belső fülbe az ovális ablakon keresztül.

Kimutatták, hogy a kalapács és az üllő az erőkar törvényei szerint erősíti a nyomáshullámot a középfülben. Ez az arány változó mértékű, és a frekvenciától függ. A középfül 1 kHz körül a leghatékonyabb. A külső fül és a középfül kombinált átviteli függvénye miatt az emberi hallás 1 kHz és 3 kHz között a legérzékenyebb.

A középfülnek védő szerepe is van a túl nagy hangnyomások romboló hatásától. A hallócsontok arra is képesek, hogy mérsékeljék a hangnyomást, szétválván egymástól bizonyos izmok segítségével. A középfül ellenállás-csökkentő hatása akkor is tud érvényesülni, ha a külső fülben és a középfülben a

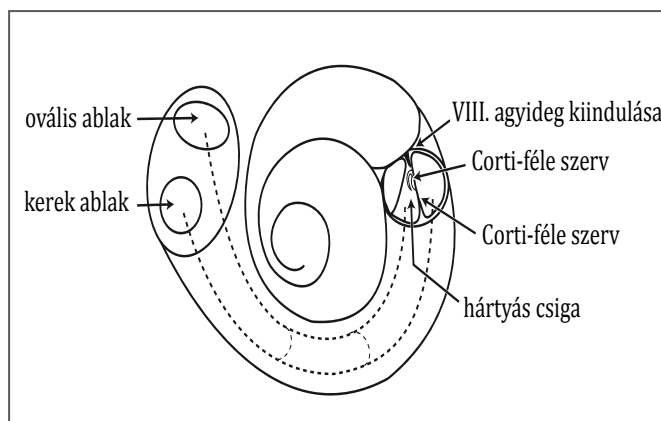
levegő nyomása megegyezik. Ezért folytatódik a középfül a torkunk felé az úgynevezett **Eustach-kürtben**. Nyeléssel helyreállítható a nyomáskülönbség, amely nélkül a hangokat nem vagy csak rosszul halljuk. Azonban ha nagyon váratlan és/vagy hangos hanghatás ér minket, a külső és a belső nyomás közötti különbség miatt könnyen veszélybe kerülhet a dobhártya. Nagy hangnyomás esetén tehát érdemes szánkat nyitva tartani, és folyamatosan nyelni, hogy a nyomás a dobhártya két oldalán megegyezzen.

A középfül tehát a hang továbbviteléért és a megfelelő hangosságérzet stabilizálásáért felelős, és ellenállás-csökkentő, túlnyomásvédő szerepe van.

4.1.3. A belső fül

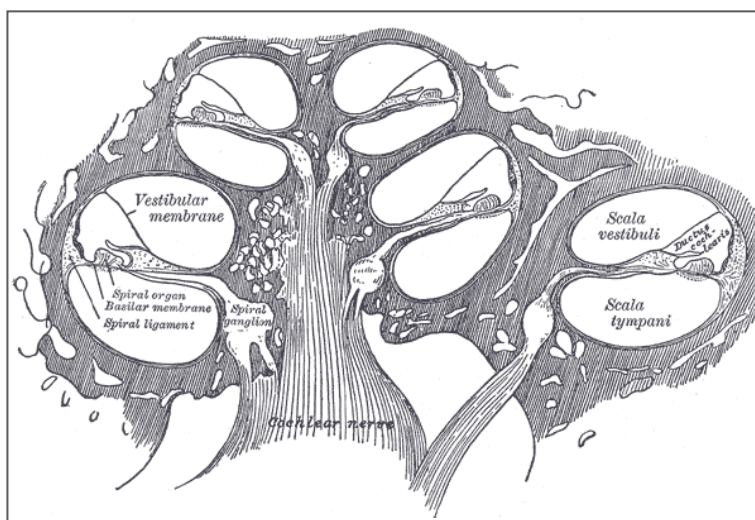
A belső fül a sziklacsont mélyén, a csontos labirintusban helyezkedik el, ami egy előcsarnokból és az abból kiinduló csontos csigából (hallószerv), valamint három félkörös ívjáratból (egyensúlyozó szerv) áll.

A hang mint inger végső soron a **belső fülben**, a **csigában** (cochlea) alakul át idegi üzenetté. A csiga egy valóban csiga alakú szerv, melynek belső szerkezete az alaptól a csúcsáig állandó, átmérője azonban folyamatosan növekszik. Benne folyadék található, mely átveszi az ovális ablak hártyájának felnagyított rezgését. A folyadék rezgései átadódnak a csiga vízszintes hártyáinak, melyeket az itt található receptorsejtek fognak fel, és adnak tovább az idegrostoknak, immáron elektromos energia formájában.

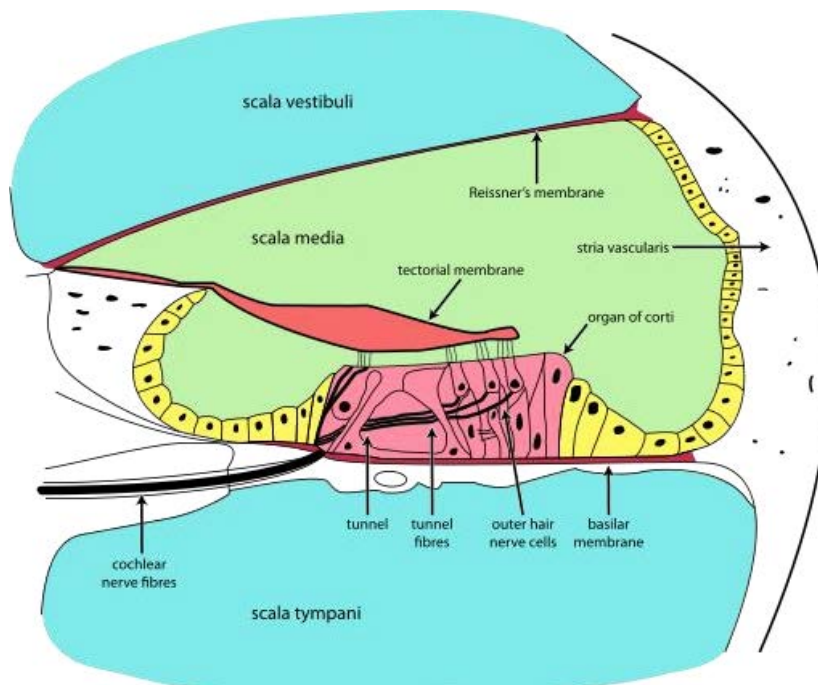


4.8. ábra: A csiga (cochlea) szerkezete

A kívülről csontfalú csiga metszetét nézve látható, hogy a cső három kamrára oszlik. A felső és az alsó kamra kapcsolatban áll egymással, a folyadék átjár a két szélső kamra között, míg a középső kamrában másféle folyadék található. A felsőt **vestibuláris csatornának**, az alsót **dobcsatornának** nevezzük. A két szélső kamra a csiga csúcsában egy kis nyíláson ér össze. Az ovális ablakhoz hasonlóan a dobcsatorna végét is egy vékony hártya, a **kerek ablak** zárja, mely az ovális ablak nyomásváltozása esetén rugalmasan reagál, és kiegyenlíti a nyomásváltozást.

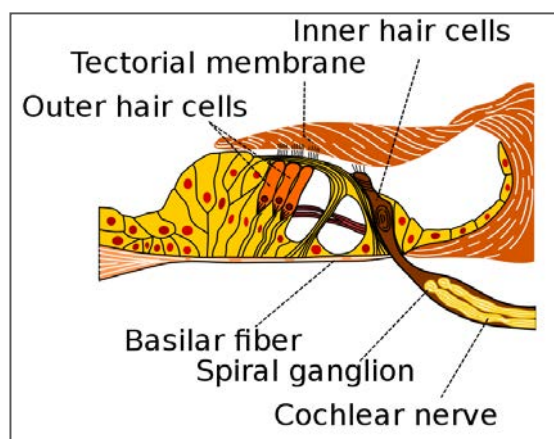


4.9. ábra: A csiga keresztmetszete



4.10. ábra: A csiga egy csatornájának keresztmetszete

A középső kamra neve **csigavezeték**. A vestibuláris csatornától és a dobcsatornától egy-egy vékony hártya választja el. Az alsó hártya neve: **alaphártya**. Az alaphártya a csúcs felé szélesedik, benne hosszabbodó húrok vannak.



4.11. ábra: Corti-féle szerv

Az alaphártyán helyezkedik el a **Corti-szerv**, itt alakul át a mechanikai rezgés idegi üzenetté. Hogy ez miként történik, azt Békésy György, Nobel-díjas tudós fedezte fel (<http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz9910/bekesy.html>).

A Corti-szerv alapjából **szőrsejtek** állnak ki, melyeket felülről a **fedőhártya** zár. A szőrsejtek **külső** és **belső szőrsejtekre** osztódnak. A belső szőrsejtek száma fülenként kb. 3500, míg a külsőké 12 000, melyek több sorban helyezkednek el. A szőrsejtekből kiálló **csillószőrök** elhajlása hozza létre az elektromos jeleket, melyek a csillók végéhez kapcsolódó idegsejteken továbbítódnak. (A belső és külső szőrsejtek számarányával ellentétben a hallóidegrostoknak csak töredéke kapcsolódik a külső szőrsejteken lévő csillókhoz. Nagy részük a belső sejtek végén található.)

A csillószőrök elhajlása az alaphártya rezgésével is összefügg. Az alaphártyában lévő különböző hosszúságú húrok miatt ott lesz a legnagyobb kitérés, ahol a hangmagasságnak megfelelő hosszúságú húr van. Magas hangoknál a csiga alapján, mély hangoknál a csúcs felé. Ahol nagy amplitúdójú kitérés van, ott a szőrsejtek kapcsolatba lépnek a felettük lévő fedőlemezzel, és a szőrsejtekben létrejött elektrofiziológiai változás elindul a hallóidegen.

Az adott szőrsejtnak bizonyos frekvenciák felelnek meg, tehát a legerősebben ingerelt sejtek alapján az alaphártya frekvenciatartománya pontosan beskálázható. (Az alaphártyának a frekvenciákra adott rendezett reakcióját hívják **tonotópiás szerveződésnek**.) Az adott frekvencia hangosságát az alapján méri fel a belső fül, hogy a legnagyobb kilengési pontnál mekkora volt a kilengés amplitúdója, vagyis milyen szinten lesznek a szőrsejtek ingerelve. Minél erősebb a hang, annál nagyobb lesz a kitérés, és annál nagyobb számú elektromos jel keletkezik.

A csiga tehát képes a hang analízisére. Meg tudja különböztetni a hang magasságát és erősségét. A jelek a hallóidegen, a bonyolult hallóidegpályán az agykéreg halántéklebenyéhez jutnak, és itt keletkezik a hangérzet.

4.1.4. A hangok felismerése

A szőrsejtek által átalakított hanghullámok a **hallóidegeken** jutnak át az agyba. A hallószervrendszer ezen része már a hallópályákhoz tartozik. Az idegek sajátos tulajdonsága, hogy egyes hangparaméterekre vannak kiélezve. Egyes idegek a hangforrás helyét, míg mások a hang színét vagy dinamikáját, magasságát közvetítik. A szőrsejtekhez kapcsolódó hallóidegrostok hang hatására tüzelni kezdenek. Minden egyes hangfrekvencia esetében létezik egy olyan minimum hangerőszint, amely alatt az idegrostok nem reagálnak. Ez a szint a **hangerőküszöb**. Vagyis a küszöb alatti hangokat nem halljuk. Minden egyes frekvenciára más hangerőküszöb érvényes. A mélyebb hangok meghallásához nagyobb hangerőre van szükség, azaz hangerőküszöbünk az alacsonyabb frekvenciák esetében magasabban van.

Az idegrostok lefedik a teljes frekvenciatartományt. Természetesen nem csak szinusz-, hanem komplex hangok is megjelennek hallásunkban. Az adott idegeket ingerlő szőrsejtek a csigában sorban, a magastól mély hangokig érzékelve (alaptól a csúcsig) helyezkednek el. Egy hang erejének növelésekor az idegrost aktivitása is nőni fog. Az összetett hangok esetében a sok idegrost különböző mértékben válik aktívvá.

A hangok felismerése elsősorban az egyes frekvenciákhoz rendelt szőrsejteknek, ill. idegrostoknak köszönhető. Az idegsejtek egy része kifejezetten az élet szempontjából létfontosságú hangokra koncentrálódik, mint pl. a beszédhangra. Mivel a beszéd középfrekvenciában zajlik, ezért erre a frekvenciaterületre több idegrost koncentrál, mint az alacsonyabb vagy magasabb frekvenciákra.

A hangforrások helyét elsősorban két fülünk segítségével állapítjuk meg. Az egyik fül csak az egyik hallóideghez szállít információt, míg a másik csak a másikhoz. A hallóidegek összekeverednek, a két fülbe érkező információ időkülönbségét feltérképezve az agy meghatározza a hangforrás helyét. A két fülbe nem csak időkéssel, de különböző hangerővel is érkezik egy hang, mely a fülek között lévő fej árnyékolásának következménye.

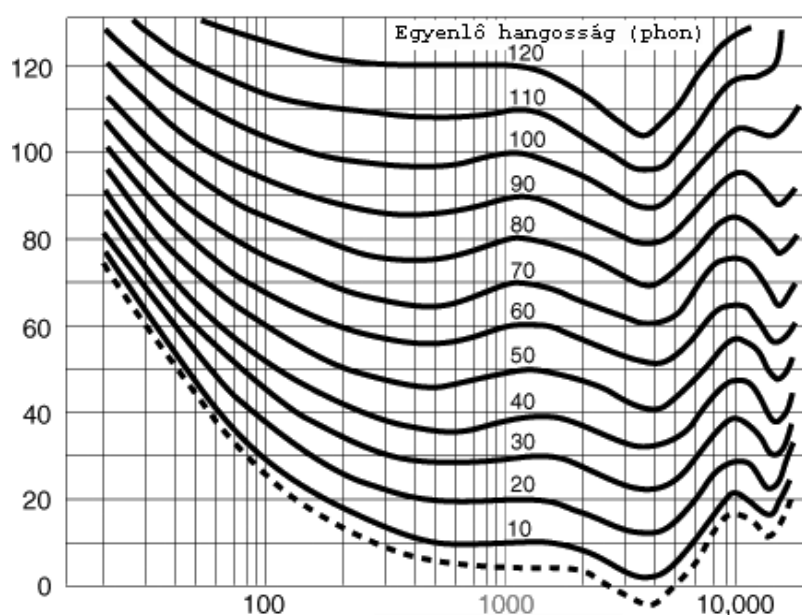
4.2. A hallórendszer működésének hatása a hallási érzetekre

Hallási érzeteinket nagymértékben befolyásolja a hallórendszer működése. Fizikai elemzések során szerzett akusztikai adatokból nem lehet lineáris módon következtetéseket levonni arra vonatkozóan, hogyan hallunk. A hangok szubjektív észlelésével foglalkozó tudományág a pszichoakusztika, mely a hangok objektív paramétereinek változásai, és tudati leképzése közötti mérésekkel mutat ki megfeleléseket.

Mivel különböző frekvencia-összetevők, hangerőfeltételek, hangszínek mellett eltérő módon hallunk, számos olyan zenei és akusztikai feladat van, ahol fontos tudatában lenni a már feltárt pszichoakusztikai törvényeknek.

4.2.1. A hallásküszöb

Az egyik legelső szempont egy hang észlelésekor, hogy halljuk-e egyáltalán. Ha egy hang ereje átlépi a hallásküszöböt, akkor továbbítódik az agyba. A hangerő észlelése összefügg a frekvenciával. A frekvenciatartomány közepén (kb. 1000–9000 Hz között) sokkal halkabb hangokat is meghallunk, mint 1000 Hz alatt vagy 9000 Hz felett. A 4.12. ábrán az alsó szaggatott vonal mutatja, hogyan változik a hallásküszöb egyes frekvenciákon. Hallásunk 1000 és 3000 Hz közötti hangokra a legérzékenyebb. (Ide hangolják általában az ébresztőórákat, riasztókat is.) Ennek oka a fülcsatorna saját rezonanciája. Azok a hangok, amelyek egy zeneműben ebben a regiszterben szólalnak meg, erősebbnek tűnnek, pedig pusztán a hallásunk emeli ki őket környezetükből.



4.12. ábra: Egyenlő hangosságérzet görbe (Fletcher–Munson-görbe)

A tartós és nagy hangerő rongálja hallásunkat, hatására a hallásküszöb eltolódik.

4.2.2. A hangosság érzékelése

A hallásküszöböt átlépő hangok erejét szubjektív **hangosságként** érzékeljük. A hangosság érzete azért szubjektív, mert bár két egymás utáni hang összehasonlításakor mindenki egyformán hallja, melyik a halkabb vagy a hangosabb, de az eltérés mértékét különbözőképpen mérjük fel.

A különböző erejű hangok különböző mértékben adják át a rezgést a dobhártyának, a hallócsontocskáknak, majd az ovális ablakon keresztül az alaphártyának. Az említett szervek erősítik vagy tompítják a rezgések mértékét. Az alaphártyáig eljutó rezgések, ingerelve a szőrsejteket, idegi impulzusként haladnak tovább. A hangerő továbbításáért más idegrostok felelnek, mint pl. a hangmagasság továbbításáért.

Hasonlóan a hallásküszöbhez, egyes frekvenciákon halkabban, másutt hangosabban halljuk az egyforma hangnyomásértékkel rendelkező hangokat. A halkabban és hangosabban hallott hangok közötti különbség változik attól függően, milyen hangosságon történik az összehasonlítás. A 4.12. ábrán látható, hogy a legnagyobb különbségek a hallásküszöbhez közeli, halk hangok esetén jönnek létre. Ahogyan növekedik a hangnyomás mértéke, az egyenlő hangossággörbék kissé kisimulnak, csökkennek a különbségek a leghalkabb és a leghangosabb érzet között.

Bizonyos hangerőváltozás fölött a rostok aktivitása már nem változik. Vagyis nagy hangerő mellett egyszer csak nem halljuk a hangosság változását, ennek neve **telítődési hatás** (szaturáció).

A telítődéshez hasonló az **adaptáció** jelensége. Adaptáció akkor lép fel, amikor egy bizonyos hangerejű hangzás sokáig szól. Ahogy hozzászokunk e hanghoz, úgy csökken az idegrostok aktivitása.

4.2.3. A kritikus sávok

Eltérő frekvenciájú hangok esetében különböző hallási összefüggések alakulnak ki. Ha két hang frekvenciája elég távol van egymástól, különböző szőrsejteket ér az ingerület, melyek, még ha kiterjedt területet is fednek le, nem érik el egymást. Közeli frekvenciájú hangoknál az aktivizált szőrsejtek között átfedések lehetnek. Ha két hang frekvenciája annyira közeli, hogy azonos szőrsejtterületeket ingerelnek, a kritikus sávon belülre esnek. A kritikus sávon belülre eső hangok megkülönböztetése nem, vagy csak nehezen lehetséges. Mérések alapján az 500 Hz alatti hangok kritikus sávja kb. 100 Hz szélességű. 500 Hz fölött a frekvencia növekedésével a kritikus sáv mérete is nő.

A kritikus sávon belülre eső frekvenciapárok esetén a távolság mértékétől függően többféle hallási élményben lehet részünk. Ha két külön hangnak érzékelt frekvenciát – melyek kívül esnek a kritikus sávon – közelíteni kezdünk egymáshoz, először egyfajta **érdességet** fogunk hallani. A kritikus sáv negyedét elérve, azaz a frekvenciák különbségét tovább csökkentve ez az érdességérzet erősebb lesz. (Az alaphártya szőrsejtjei között ebben az esetben még nagyobb az átfedés.) Annak ellenére, hogy nem hallunk két nyilvánvalóan elkülönülő hangot, a két frekvencia közötti frekvenciakülönbség megjelenik hallásunkban periodikus amplitúdóváltozás formájában. Pl. ha 30 Hz a két hang közötti különbség, az azt jelenti, hogy másodpercenként harminc lüktetést lehet hallani. A 20-30 Hz kb. az a határ, ahol az **érdesség** átfordul a **lebegésbe**. A lebegést igazán 20 Hz különbség alatt érzékeljük. Két hang frekvenciájának közelítésével először tehát érdesség jön létre, mely közben egyre kevésbé halljuk a két hangot elkülönülni, inkább egy-egy hangot érzünk durvának, „göröngyösnek”. További közelítés során már tényleg csak egy hangot hallunk, melyhez hozzáadódik a lebegés érzete. A lebegést hangosságváltozásban megnyilvánuló szinuszos pulzálásként érzékeljük.

A lebegésre vonatkozó kísérleteket szinuszhangokkal szokták végezni, ezért a megfigyelések szinte kizárólag szinuszhangokra igazak. Összetett hangok esetében a jelenségek jóval komplexebbek. Ha valamely összetett harmonikus hanggal kísérletezünk (pl. zongorán ütjük le az adott szinuszoknak megfelelő billentyűket), az érdesség helyett világosan, két külön hallható hangot hallunk. Ennek oka az, hogy a harmonikus hangok magasabb összetevői kívül esnek a kritikus sávon, ezért a felhangok által ingerelt szőrsejtek sincsenek egymáshoz közel.

Az érzékelt (nem tanult) disszonancia okát is a kritikus sávban kereshetjük. Mennél közelebbi szőrsejteket ingerel két hang, annál disszonánsabbnak halljuk őket. Vagyis a disszonanciaérzetünk az érdesebb hangzások jelenségével függ össze.

4.2.4. A hangmagasságok felismerése

A hangmagasságok felismerése – az abszolút hallással rendelkező emberek képességétől eltekintve – az összehasonlításon alapul. Általában nem egyes hangokat ismerünk fel, hanem hangok kapcsolatát, egymáshoz fűződő viszonyukat. Az összetett hangok felismerése persze komplexebb, mint a szinuszhangoké. Úgy tűnik, hallásunk **hallási képzeteket** használ ahhoz, hogy a megszólaló hangokat részekre bontsa. A spektrumban gazdag hangok eszerint csoportokra bomlanak az agyban, amelyek frekvenciátávolságuk szerint kerülnek egymással kapcsolatba.

A frekvenciák közötti különbséget (a hangmagasság változásait) nem észleljük egyenletesen a teljes hangtartományban. Az egyes frekvenciák megkülönböztethetőségének az aránya (a relatív különbségi küszöb) az 1 kHz körüli tartományban a legkisebb, és a magas, ill. a mély hangok felé haladva egyre nő.

A frekvencia megkülönböztetése a hang dinamikájától is függ, hangosabb hangok hangmagasság-különbségeit könnyebben érzékeljük. A relatív különbségi küszöb 40 dB alatt (kb. a pp dinamikája) jelentősen megnő.

4.2.5. Az elfedés

Ha egy szinuszhang frekvenciája beleesik a zaj frekvenciatartományába, a szinuszt elfedi a zaj, vagyis megemelkedik a fedett hang hangosságküszöbe. Az **elfedés** (angolul **masking**) a fedett és az eredeti, nem fedett hangok küszöbének különbségével mérhető. Mennél szélesebb a zaj frekvenciasávja, annál magasabb lesz a szinuszhang küszöbértéke. Egy bizonyos sáv szélesség felett a küszöbérték azonban már nem emelkedik tovább.

Ha a jelenséget összevetjük a csigában zajló működéssel, rögtön világos lehet, hogy egy széles sávú zaj esetében a sáv szélességnek megfelelő mennyiségű szőrsejt hajlik el, és aktiválja az idegrostokat, ami nagyobb terület, mint az egyszerű jel által lefedett. Bár az egyszerű jelnek is egy sáv felel meg az alaphártyán, ha ez a sáv ingerlésre kerül a zaj által, az elegendő az elfedéshez.

Amennyiben az adott szinuszhang frekvenciája nem esik bele a zaj sávjába, nincs elfedve. Az erős hangok hangosságát a zaj nem tudja annyira elfedni, mint a halk hangokét.

E jelenség fontos szempont az akusztikus és az elektronikus zeneszerzésben egyaránt. Egy hangzás komponálásakor fontos tudni, hogy az adott hangok spektruma mennyiben esik egybe, hogy a lehetséges elfedést elkerüljük.

4.2.6. Az összeolvadás feltételei

Egy adott hang összetevői általában egyszerre módosulnak. Ehhez hallásunk is hozzáidomul: a változásokat nem az adott hang egyes összetevőit külön elemezve, hanem azt egybehallva követi. Ha azonban egy frekvencia-összetevő a többitől eltérő frekvenciaarányban, időben, esetleg hangerővel szólal meg, akkor azt már egy más hangforrásból származó hangnak halljuk. Vagyis ha az ingerelt szőrsejtek egyikének helye jelentősen eltér a többitől, netán időben máskor éri inger, agyunk független eseményként értékeli. Az egyszerre megszólaló hangok összefüggésének jelenségét tesztelhetjük azzal is, hogy ha egy zongorán egy akkordot egyszerre ütünk le vagy a hangokat „felbontva” egymás után, akkor utóbbi esetben könnyebb azokat felismerni, de nehezebb egybehallani.

Hallásunkban tehát frekvenciamintázatok alakulnak ki, melyek egyrészt az összetevők intenzitásával, azok megszólalásának időpontjával, harmonikus viszonyával függnek össze.

4.2.7. Kombinációs hangok

A fül és a hallórendszer aktív szerepének a következménye az ún. összeg- és különbségi hang. A különbségi hangot először Giuseppe Tartini (1692–1770) írta le: a jelenség lényege, hogy a belső fül nem-lineáris működése alapján két frekvencia együttes hangzása esetén azok összegét vagy különbségét is hallja, azaz

$f_1 + f_2$ együtthangzás esetén megjelenik a két hang összegének, ill.

$f_1 + f_2 = f_1 + f_2 + (f_2 - f_1)$, azaz a két hang együtthangzása esetén megjelenik a két hang különbségének megfelelő frekvencia is.

A különbségi hang elsősorban az akusztikusan tiszta helyzetekben figyelhető meg; tiszta nagyterc mi-do (5:4) megszólalásakor halljuk az alaphang két oktávval mélyebb hangját is (5-4=1), vagy so-mi kisterc (6:5) esetén ugyanezt az alaphangot. A különbségi hang fizikailag nem létező virtuális hang, szerepe azonban a napi zenegyakorlatban általános. Például a különbségi hang segítségével szólaltatnak meg orgonákon olyan mély hangokat, amelyekhez tartozó síp már túlságosan hosszú lenne.

A különbségi hang akkor is létrejön, ha a hallgató a ténylegesen hangzó hangmagasságot egyébként már nem hallja. Olyan személy, aki a 6 és 7 kHz-es hangokat már nem képes meghallani, együttes megszólalásukkor hallja az 1 kHz-es virtuális hangot.

A kombinációs hangok másik fajtája az összhang, azaz a két megszólaló frekvencia összege. Az összhang fizikailag is megjelenik elsősorban a hang-erősítő berendezések intermodulációs torzításaiként; az ebből eredő hanghatások az elektronikus zenében kerülnek alkalmazásra.

4.2.8. Az interaurális hangerőkülönbség

A hangforrás helyének megállapításához, azaz a hang lokalizációjához elengedhetetlen, hogy két füllel rendelkezünk. A fej két oldalán szimmetrikusan elhelyezkedő fülek ugyanis térbeli helyzetkülönbségük miatt tudják beazonosítani a hangforrás helyét. A hangforrás helyét háromdimenziós rendszerben tudjuk kijelölni.

Egy hang megszólalásakor a két fülbe érkező jelet nem két összetevőként, hanem egységében érzékeljük. Ha egy jel tőlünk balról érkezik, akkor nem azt mondjuk, hogy a bal fülünkbe erősebb jel jutott, illetve a hang előbb érte el a bal fület, mint a jobbot, hanem hogy a hang tőlünk balra szól. Ha egy hangot pontosan előttünk, az orrunk vonalában hallunk, nem lesz sem idő, sem hangerőkülönbség a két fülünkbe jutó jelek között. Az **interaurális (két fül közötti) hangerőkülönbség** tehát fejünk és hallászerveink szimmetrikus elhelyezkedésén alapul. Ha egy hangforrást pont a fülünk vonalából hallunk, az hangosabb és teltebb hangszínű, mint ha az orrunk előtt szólalna meg. Tehát a fül vonalában hangzó hang direktebb, miközben ugyanezen hangforrás hangja a másik fülbe késve, szűrve (ld. fej árnyékoló hatása) és halkabban jut el.

A vízszintes és függőleges irányt fülünk helyzetének, ill. fejünk forgatásának segítségével tudjuk megállapítani, melyhez a két fül közötti hangerőkülönbség információját használja fel az agy.

4.2.9. Az interaurális időkülönbség

Az interaurális hangerőkülönbség jelentősebb a magasabb frekvenciák esetében. 200 Hz frekvencia alatt az eltérés jelentősen kisebb. Ennek oka az, hogy az alacsonyabb frekvenciájú hangok hullámhossza nagyobb, ezért könnyebben érik el a fej túloldalán lévő fülünket is, és nem változik a hang ereje sem akkora mértékben. A fej megkerüléséhez szükséges idő, ha mégoly csekély is, de hallható. Ezért a két hang érzékelése között eltelt időt fel tudjuk fogni. E jelenséget **interaurális (két fül közötti) időkülönbségnek** nevezzük. Mivel az interaurális hangerőkülönbség a mélyebb hangok esetén kevésbé befolyásolja az érzékelést, ezért a mély hangoknál a fül elsősorban az időkülönbségre, a magasabb hangoknál a hangerőkülönbségre építve próbálja lokalizálni a hangot. (Természetesen általában mindkét képesség mentén folyamatosan vizsgáljuk a hangokat.)

A két fülbe érkező hangok közötti időkülönbséget a nagyobb frekvenciájú hangok helyének felismeréséhez használjuk.

4.2.10. Tévesztési kúp

Hanglokalizációs képességünk nem hibátlan. **Tévesztési kúp**nak nevezték el azt a térbeli felületet, amelyen belül megsaccoljuk a hang helyét. A terület azért kúp alakú, mert a fülhöz közeli hangforrásokat sokkal pontosabban jelöljük meg, mint a távolabbiakat, ezért egyfajta kúp alakzatba rendezhető a tévedés mértéke.

Jellemző emberi tulajdonság, hogy egy hang észlelésekor azonnal a hang irányába fordítjuk fejünket. Ez a mozdulat a tévesztési kúp jelenségéből fakadó hibákat próbálja korrigálni. Automatikusan megkeressük azt a szélességi irányt, amely a hang helyét jellemzi, vagyis a hangot orrunk vonalába próbáljuk „helyezni”, ezzel megbizonyosodva annak pontos helyéről.

4.2.11. A koktélparti effektus

Koktélparti effektus a neve annak a jelenségnek, amikor folyamatos zajból ki tudjuk szűrni azt az információt, ami fontos számunkra. (Az elnevezés az adott szituációra, a koktélpartikról ismert beszédzajra utal.) A két fül elhelyezkedésének, illetve a binaurális hallásnak (ld. 4.2.8. és 4.2.9. szakasz) köszönhető, hogy képesek vagyunk egyes információk kiszűrésére.

Ha az egyik fülbe egy fejhallgatón át egy hangot és egy olyan zajt küldünk, melynek középfrekvenciája közel van az adott hanghoz, a zaj elfedi a hangot. Érdekes jelenség azonban, hogy ha a másik fülbe is bejuttatjuk a zajt, de csak a zajt, akkor az elfedett tiszta hang hallhatóvá válik. A két fülnek köszönhető jelenség neve **binaurális felfedés**. Ha tehát a zaj és a tisztább hang azonos helyről szól, akkor az elfedés egyértelmű. Ha azonban a kétféle hangforrás helye eltér, az elfedés megszűnik vagy gyengül.

Az elfedés térbeli pozíciótól való függése meghatározza a zene térbeliségéhez fűződő viszonyunkat. A monó vagy sztereó hangképnél sokkal gazdagabb többcsatornás vagy élő zenei rendszerek tisztábbá teszik a hangképet, sok szólam esetén megkönnyítik a hangzások meghallását, értelmezését.

5. Hangközök, skálák, hangolások

5.1. A hangközök

A hangmagasságok közötti összefüggés leírására a hangközöket használjuk. Két hangmagasság távolsága a hangköz. Ezt a távolságot megadhatjuk frekvencia-értékkel vagy a hangköz elnevezésével.

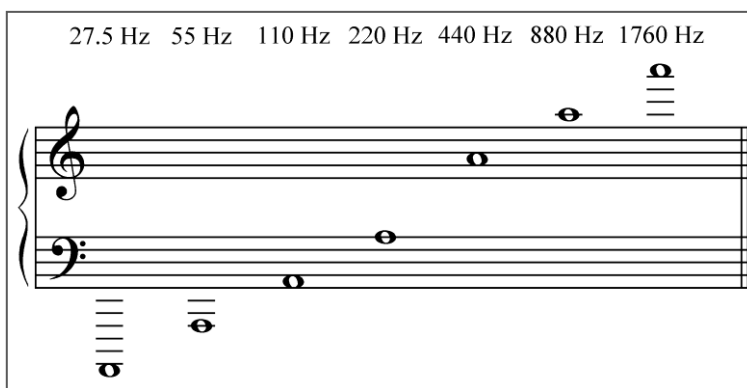
5.1.1. A hangmagasságok megkülönböztetése

A relatív megkülönböztetés az egyszerre, illetve gyors egymásutánban bemutatott hangközpárok összehasonlításán alapul. (Abszolút megkülönböztetés, amikor egymástól elszigetelten bemutatott alakzatok közötti különbség is megállapítható.)

Hangközérzet csak bizonyos frekvenciatávolság esetén alakul ki, két, hangmagasságban nagyon közeli hangot nem hangköznek, hanem egy hang dinamikai és színváltozásának hallunk; elsősorban közeli szinuszhangok együtthangzásakor jön létre a „lebegésként” ismert jelenség vagy az érdességként leírható hangszín.

5.1.2. Különbség vagy arány?

A hangmagasságokat általában sorokba, skálákba rendezzük. Egy skála hangjain lépegetve az egyformának érzékelt hangközök azonos távolságúnak tűnnek, miközben a frekvenciáik közötti különbség nem egyforma, hanem a hangmagasság növekedésével egyre távolul (l. 5.1. ábra). Az egyenlő frekvenciamennyiségekkel növekedő hangmagasság-sorozatot (pl. felhangsor – l. az 5.5. ábrán) pedig hangközben felfelé szűkülőnek halljuk.

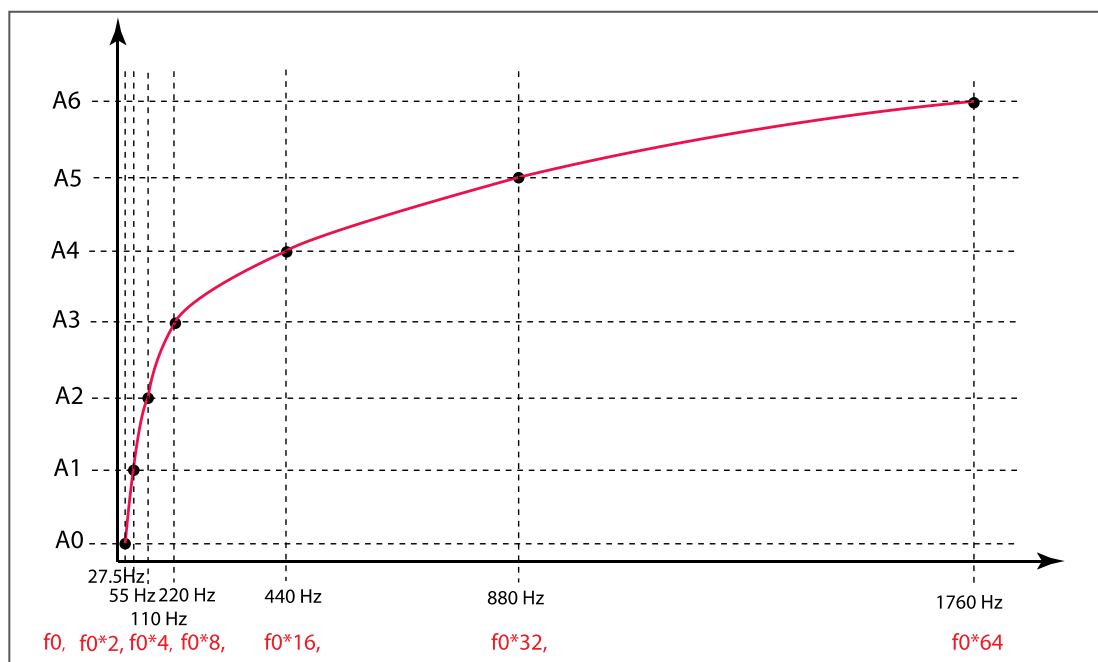


5.1 ábra: Hangmagasság és frekvencia összefüggése ötvonalas kottával megjelenítve

Az 5.1. és az 5.2. ábrán oktávonként változik a hangmagasság, melyek érzetben egyformák, frekvenciaértékük azonban mindig kétszeres, tehát a magasság növekedésével növekszik közöttük a különbség.

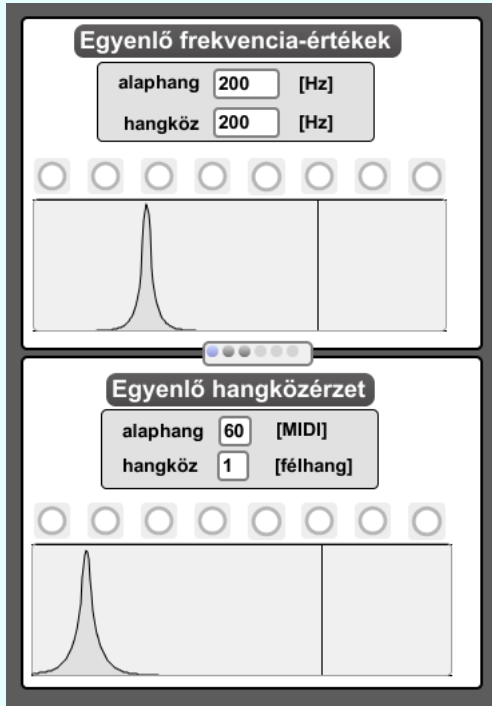
A hangmagasság érzete a frekvencia kettes alapú logaritmusaival arányos. Ennek megfelelően a fülünk által egyenletes távolságra, például egy-egy oktávra elhelyezkedő hangok frekvenciája 2-, 4-, 8-, 16-szorosa az eredeti hangnak, azaz egy oktávnak dupla frekvencia felel meg (lásd még 5.5. ábra).

Következő ábránkon (és a tesztben) a frekvenciában vagy hangközlépésben megadott hangok különbségét lehet megfigyelni.



5.2 ábra: Hangmagasság és frekvencia összefüggése függvény formájában

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



The screenshot shows two panels. The top panel, titled 'Egyenlő frekvencia-értékek' (Equal frequency values), has input fields for 'alaphang' (fundamental) at 200 [Hz] and 'hangköz' (interval) at 200 [Hz]. Below these are seven circles representing a scale, with a frequency spectrum graph showing a single peak at the fundamental frequency. The bottom panel, titled 'Egyenlő hangközérzet' (Equal interval perception), has input fields for 'alaphang' at 60 [MIDI] and 'hangköz' at 1 [félszhang] (half step). It also shows seven circles and a frequency spectrum graph with multiple peaks representing harmonics.

Hangközsorozatok

A példán egyenletes távolságokban lehet lépéseket meghallgatni egy alaphangtól felfelé. A felület két részből áll; a felső részben egy adott alaphangfrekvenciához képest a hangköztávolságokat frekvenciában, az alsó részen egy MIDI értékben megadott alaphanghoz képest a hangköztávolságokat félhanglépésekben lehet megadni. A felület középső részén három előre elmentett állapotot lehet kipróbálni, de az értékek átállításával más összefüggések is kipróbálhatók.

(A példa a harmonikus és a temperált skála összehasonlítására is alkalmas – l. 6.4. fejezet.)

5.3 ábra: Frekvenciasorozat és hangközsorozat összehasonlítása

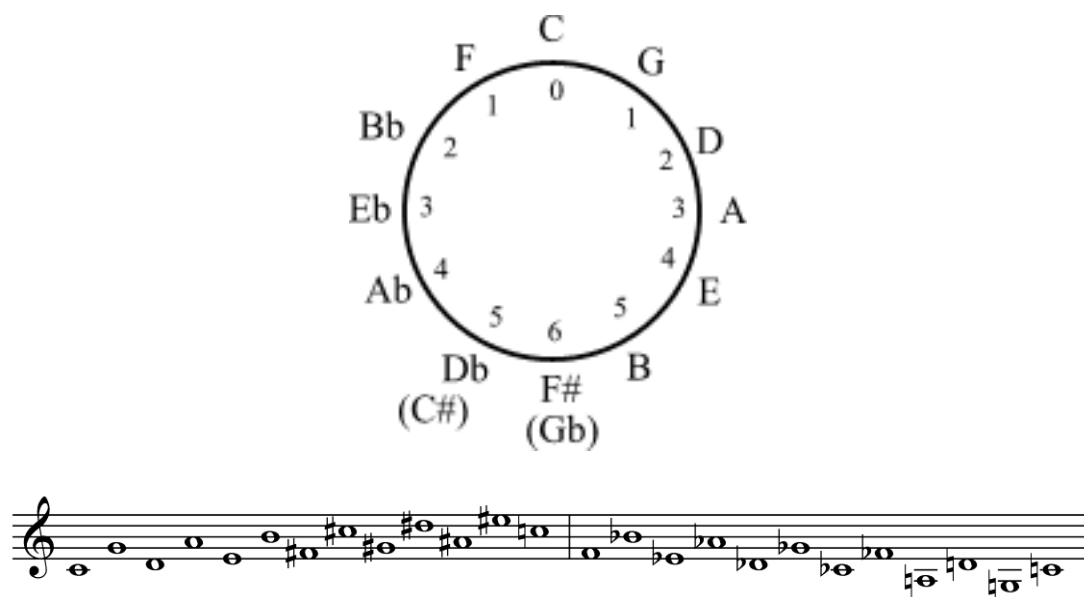
5.1.3. A tiszta hangközök

A püthagoraszai skálában lévő hangközviszonyok a felharmonikus kvintekre épülnek. A tiszta kvint egész számú hangközarányát Püthagorasz húrok rezgését vizsgálva mutatta ki. Megfigyelése szerint egy húrt a felénél elvágva (vagy ujjal lefogva) a hang egy oktávval magasabb lesz. Ez az 1:2 arány az oktávhangköz jellemzője. Ha a húrt a kétharmadánál vágjuk el, az eredeti hang oktávval magasabb kvintjét kapjuk. Vagyis a 2:3 a kvinthangköz aránya. A tiszta kvartot a húr háromnegyedénél történő elvágással kapjuk meg (3:4). Vagyis a hangközöket arányokkal le lehet írni, melyeket a felhangok összetevőinek számából lehet kiolvasni (ld. 6.5. ábra).

A felhangok frekvenciái mindig az alaphang frekvenciájának egész számú többszörösei. Ezen összetevők felfelé haladva csökkenő hangközöket eredményeznek hallásunkban (1:2 > 2:3 > 3:4... stb.). Az egymástól azonos hangköztávolságra fekvő hangok frekvenciaaránya mindig ugyanaz marad (oktáv = 2:1, kvint = 3:2, kvart = 4:3 stb.). A harmonikus hangok összetevőarányai alapján kiszámolt hangmagasság-távolságokat tiszta hangközöknek nevezzük.

Bármely, oktávon belüli hangköz aránya kiszámolható a felhangsorból. A kvinthangköz aránya 3:2. Ha két kvintet helyezünk egymásra, hangköztávolságuk (3:2)(3:2) = 9:4 lesz. A két kvint egymásra helyezésével átlépjük az oktávot, mint referenciahangközt. Ezért ha a 9:4-et elosztjuk az oktáv számával, kettővel (2:1),

a 9:8 arányt kapjuk meg, amely megfelel a nagyszekund, vagyis egy skála két egymást követő hangja arányának.

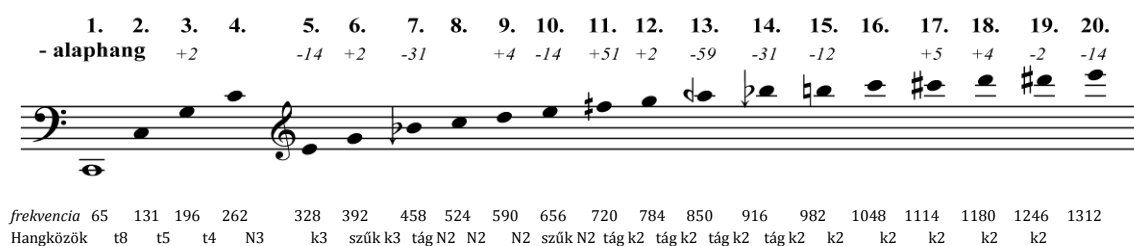


5.4. ábra: Kvintkör grafikus és ötvonalas ábrázolása

A tiszta kvintek egymásra halmozásával, illetve a megfelelő számú oktáv-transzpozícióval bármely hangköz arányát ki lehet számolni. Pl.

- két tiszta kvintből (t5) nagyszekund (n2): $(3:2)^2 / 2 = 9:8$
- három tiszta kvintből (t5) nagyszekund (n6): $(3:2)^3 / 2 = 27:16$
- négy tiszta kvintből (t5) nagyterc (n3): $(3:2)^4 / 4 = 81:64$

Ha az alaphangunk c', akkor az első kvint a g', a második (oktávon belül) az d', a harmadik a', a negyedik pedig e'.



- azon osztási pontjaként, ahol az adott hang megszólal.) Ha a 2. és 4. összetevő viszonyát vizsgáljuk (131 Hz:262 Hz), ugyanezt az arányt lehet látni,
3. a hangközök az alaphangtól távolodva egyre szűkebbek, bizonyos frekvencia fölött már nem is érzékelhető a különbség, és elnevezés sincs rá.

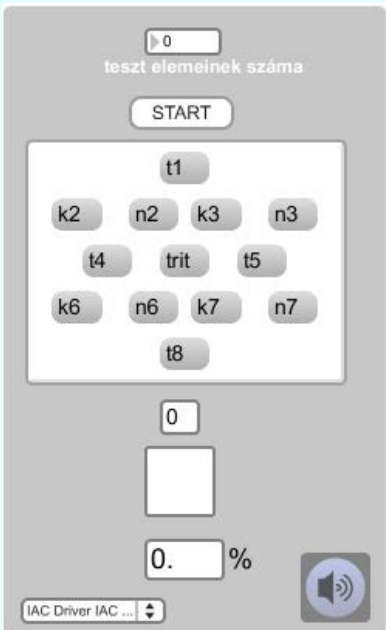
Az alábbi táblázatból kiolvasható, hogy a klasszikus zenében használatos hangközöknek milyen a tisztahangköz-aránya.

5.1 táblázat: Hangköz-összetevő arány

tiszta prím	t1	=	0 félhang	1:1
tiszta oktáv	t8	=	12 félhang	2:1
tiszta kvint	t5	=	7 félhang	3:2
tiszta kvart	t4	=	5 félhang	4:3
nagyterc	n3	=	4 félhang	5:4
kisterc	k3	=	3 félhang	6:5
nagyszekund	n2	=	2 félhang	9:8
kisszekund	k2	=	1 félhang	16:15
nagyszext	n6	=	9 félhang	5:3
kisszext	k6	=	8 félhang	8:5
kisszeptim	k7	=	11 félhang	16:9
nagyszeptim	n7	=	10 félhang	15:8

A hangközök tanulása hosszú folyamat. Gyakorlásukhoz segítséget nyújt a következő teszt

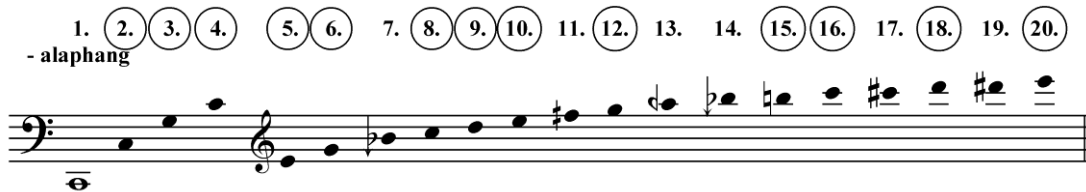
Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



A példán egymás után megszólaló hangok közötti távolság felismerését lehet gyakorolni adott hangmagasságról. Az ablak felső számdobozában be lehet állítani, hogy a teszt hány példából álljon. A START gomb megnyomása után a program lejátszik egy hangpárt. Az elhangzó hangköznek megfelelő gombot kell megnyomni. Helyes válasz esetén az üres négyzetben X jelenik meg. A gombok alatti számdobozban az adott hangnak megfelelő sorszám, az alsó dobozban pedig teljesítményünk százalékban kifejezett eredménye látható.

5.6. ábra: Hangközök felismerése

A következő ábrán bekarikáztuk azokat az összetevőket, melyek a felhangsornak és a diatonikus skálának is tagjai. Azon skálahangok, melyek egymásnak egész számú többszörösei (pl. 3, 6, 12), a diatonikus skálában csak egyszer jelennek meg, míg a diatonikus skála bizonyos hangjai csak nagyon magasan – a 20. összetevő felett – jelennek meg a harmonikus skálában (pl. f, a).



5.7. ábra: A C alaphanghoz tartozó felhangok sora a tiszta kvint-toronyból kinyerhető hangokkal

5.2. A hangmagasságok kombinációiból eredő pszichoakusztikai jelenségek

5.2.1. Különbségi hang

A fül és a hallórendszer aktív szerepének a következménye az ún. különbségi hang. A jelenség lényege, hogy a fül két frekvencia együttes hangzása esetén azok különbségét is hallja, azaz

$$f_1 + f_2 = f_1 + f_2 + (f_2 - f_1)$$

A különbségi hang elsősorban az akusztikusan tiszta helyzetekben figyelhető meg: például tiszta nagyterc (5:4) vagy kisterc (6:5) megszólalásakor halljuk a jóval mélyebb alaphangot is (5-4=1; 6-5=1). A különbségi hang akkor is létrejön, ha a hallgató a ténylegesen hangzó hangmagasságot egyébként már nem hallja. Olyan személy, aki a 6 és 7 kHz-es hangokat már nem képes meghallani, együttes megszólalásukkor hallja az 1 kHz-es virtuális hangot.

Amennyiben a két hang hangközaránya egymáshoz közeli egész értékekben kifejezhető, a különbségi hang tulajdonképpen megegyezik a két hang virtuális alaphangjával. Ha a két hang frekvenciája egymáshoz közelebbi, érdes hang, még közelebbi hangoknál a lebegés jön létre. E jelenség a disszonancia egyik fokmérője lehet. A különbségi hangok megjelenésének feltételei korlátozottak:

- a két hang magas regiszterben szólaljon meg, különben a különbségként létrejövő hang túl mélyre kerül, ezért nem hallható,
- a két összetevő amplitúdója nagy kell hogy legyen, mert különbségi hangjuk általában eléggé halk,
- a két hang spektrumban szegény kell hogy legyen, különben összetevőik különbségeinek megjelenése miatt nem hallható az eredmény egyértelműen.

Ha kettőnél több hang szólal meg egyszerre, különbségi hangjaik száma jelentősen megnő, és azokat világosan hallani már nehezebb. A jelenség gazdagabb spektrumú hangok elszíneződéséhez vezet.

5.2.2. Összeghang

A kombinációs hangok másik fajtája az összeghang, azaz a két megszólaló frekvencia összege. Az összeghang nem csak a fülben, hanem fizikailag is megjelenik elsősorban a hangerősítő berendezések intermodulációs torzításaként; az ebből eredő hanghatások az elektronikus zenében kerülnek alkalmazásra.

5.2.3. Virtuális alaphang

A virtuális alaphang jelensége is a felhangokra vezethető vissza. Ha egy harmonikus spektrumnak csak a felhangjai szólnak meg, az alaphangot agyunk kiszámítja, és belehallja a hangzásba. Ilyenkor ezt a fizikailag nem létező alaphangot nevezzük meg a hang magasságaként.

5.3. Skálák

A skála általában egy zeneműben felhasznált hangok készlete, illetve a hangközlehetőségek kis mennyiségre történő redukciója. A (redukált) skálázás oka a kategorikus percepció, vagyis hogy agyunk a minket érő hatásokat egyszerűsíteni, kategorizálni próbálja. A különböző elemeket – a skálák esetében hangmagasságokat – egy általunk ismert rendszerhez igazítva értelmezzük.

A skálákat különböző szempontok szerint csoportosíthatjuk, pl. oktáv felosztású – oktávot túllépő, egyenletes lépéseket – különböző lépéseket tartalmazó skálák. A skálák elméleti konstrukciók, melyek akusztikai jelenségeken alapulnak, és struktúrájukat sokféleképpen lehet változtatni.

Néhány hangolási szisztéma, illetve skála jól bevált és gyakran használt a zene-történet során. Az európai skálák alapja a kvintkör. A tiszta kvint az egyik legfontosabb hangköz (a felhangrendszer 3. összetevője), nagy szerepe van a különböző hangolásokban is, erről l. az 5.4. fejezetben. A skálák szempontjából is fontos, hogy kvintkör az egymásra halmozott tiszta kvintek láncolata, mely a tizenkettedik kvint megjelenése után visszafordul önmagába. (Mindez csak egyenletes temperálás esetén igaz, melyről bővebben az 5.4.3. fejezetben lehet olvasni.)

A kvintkörből felhasznált hangoknak eleinte egy része, később az egésze, majd kibővített készlete határozta meg az európai zenében használatos skálákat. A tiszta kvintekből létrehozott hangkészlet tizenkét hangonként ismételtető, mert a 13. hang ismét *c* hang. A skálák oktávfelosztása az európai skálátípusok általános jellemzője.



5.1. Hang

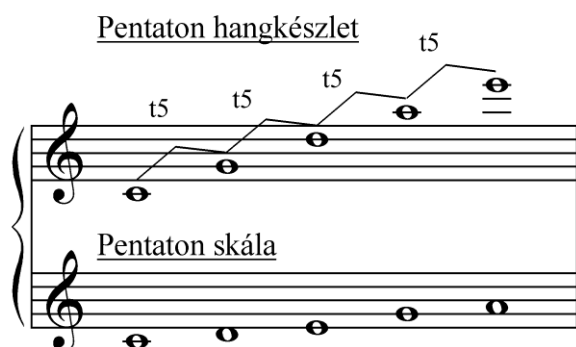
5.1. hangpélda: Kvintkör hangjainak oktávazonossága



5.8. ábra: Kvintkör hangjainak oktávazonossága

5.3.1. Pentaton (ötfokú) skála

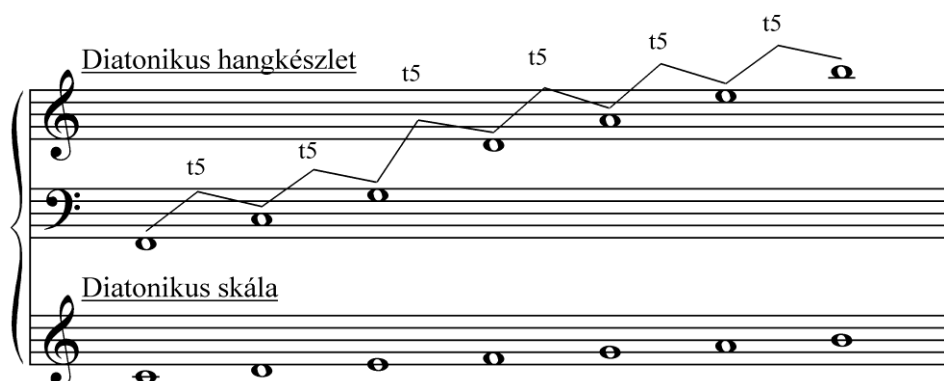
A különböző népzeneekben is használatos pentatónia hangkészlete négy tiszta kvint egymásra halmozásából, azaz az alaphanggal együtt öt hangból áll. Az 5.9. ábrán a tiszta kvintek és az ebből nyert skála látható. A skálában a nagyszekundok és a kistercek a jellemző hangközök. A pentaton skála alábbi ábránkon c' hangról kezdve jelenik meg, de adott zeneműtől függően a skála kezdőhangja lehet a hangkészlet bármely hangja.



5.9. ábra: Pentaton hangkészlet és skála

5.3.2. Diatonikus (hétfokú) skálák

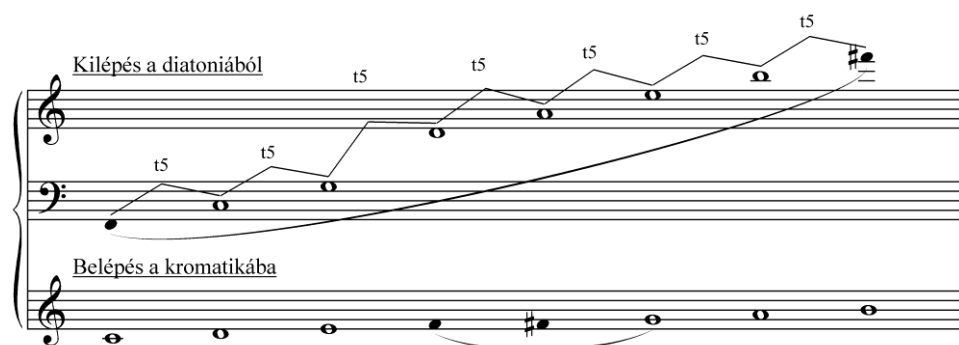
A pentaton skála hangjai két további tiszta kvinttel (C-től lefelé F-ig és a E-től felfelé H-ig) kiegészülve adják ki a diatonikus hangkészletet, mely az európai műzene alapja. A héthangú skálában öt egész- és két félhangtávolság van. A diatonikus skála alábbi ábránkon c' hangról kezdve jelenik meg, de – a pentaton skálához hasonlóan – adott zeneműtől függően a skála kezdőhangja lehet a hangkészlet bármely hangja.



5.10. ábra: Diatonikus hangkészlet és skála

5.3.3. Kromatikus (tizenkét fokú) skála

Az európai zene félhangjait kromatikának (elszínezés) szoktuk nevezni. A kromatikus skála létrejött a diatonia kiszínezéséből adódik. Ha a diatonia hét hangjához hozzáadunk még egy tiszta kvintet, a fisz'''-t, a hangkészlet nyolc hangmagasságból áll, tehát kilép a diatoniából. E hangkészlet egyszerre tartalmazza az f és a fisz hangot, melyek skálában egymás mellé helyezve kromatikus, azaz félhanglépéseket (f'-fisz'-g') adnak ki. A kromatika tehát a hangkészlet újabb kvinttel történő bővülését jelenti a kvinttoronyban, miközben a skálában megnő a félhanglépések száma.



5.11. ábra: Kromatikává kiegészülő diatonikus hangkészlet

Ha a diatonikus kvinttornyot kiegészítjük a kvintkör további öt hangjával, létrejön a tizenkét fokú, más néven kromatikus skála. A következő ábrán az 5.4. ábra kvintköréből származó hangokat kromatikusan leírva látjuk (felfelé és lefelé). A kromatikus skála lépései között a távolságok egyformák. A kromatikus skála alábbi ábránkon *c'* hangról kezdve jelenik meg, de – a pentaton és a diatonikus skálához hasonlóan – adott zeneműtől függően a skála kezdőhangja lehet a hangkészlet bármely hangja.



5.12. ábra: Tizenkét fokú, kromatikus skála

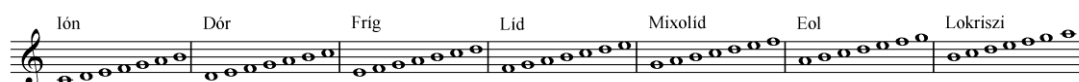
5.3.4. Mikrointervallumokat tartalmazó skálák

Félhangoknál kisebb hangközök létrehozására is van lehetőség. Az oktávot huszonnégy egyenletes részre osztva az ún. negyedhangos skála jön létre. Negyedhangos skálát további mikrointervallumok beiktatásával még kisebb lépésekkel lehet bővíteni. Míg a mikrointervallumok megszólaltatása hagyományos akusztikus hangszereken nehézséget jelent, addig a számítógép segítségével könnyen és precízen kivitelezhető.

A felhangokból létrehozott skálák tiszta hangközöket tartalmaznak, azonban lépéstávolságuk nem egyenletes. Ezért e skálával az európai zenében ritkán lehet találkozni.

5.3.5. A diatonikus skálák megjelenései alaphangtól függően

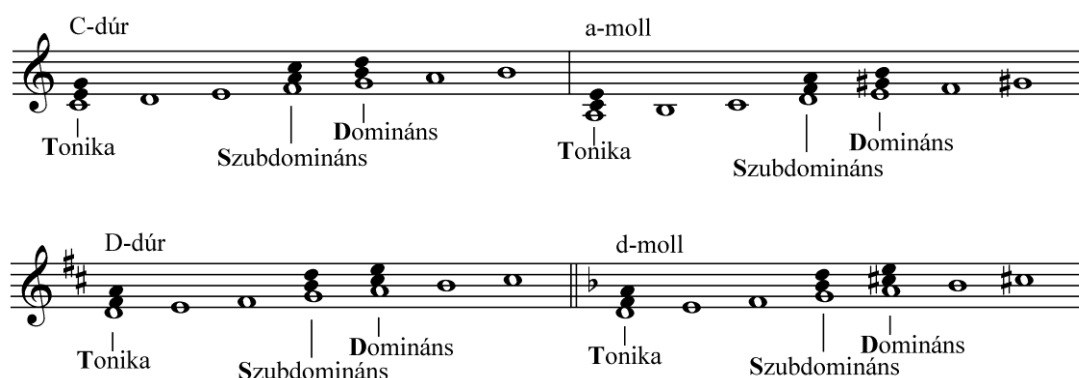
A diatonikus skála önmagában egy hangkészlet. Skálává akkor válik, ha meghatározzuk, hét hangjából melyik az alaphang (azaz egy zenei hangsorozat záróhangja). A lehetséges hét skálát móduszoknak nevezzük, mely görög eredetükre vezethető vissza. A móduszokat más néven egyházi hangnemeknek is szokták nevezni. Használatuk a középkortól a XVII. századig volt jellemző. Az előjegyzés nélküli móduszok és neveik az 5.13. ábrán láthatóak.



5.13. ábra: Diatonikus hangkészlet módusai (előjegyzés nélkül)

A hét diatonikus móduszt közül a XVII. század során fokozatosan kiemelkedett az iónból származó (de a lídre és a mixolídre is emlékeztető) dúrskála és az eolból származó (de a dórra és a frigre is emlékeztető) mollskála. Megszilárdulásuk együtt járt a hangolások változásával is (l. 5.4. szakasz).

Bár hangkészletük alapvetően megegyezett, a dúr- és moll skála nem csak záróhangjában volt meghatározva, hanem az is fontos volt, hogy a zenemű során megszólaló harmóniák és dallamok minden pillanatban a kiinduló hanghoz, az úgynevezett *tonikához* viszonyuljanak. E viszonyrendszert az egyes fokokhoz rendelt funkciók teremtik meg. A tonikának nevezett alaphangi funkció mellett a *domináns* és *szubdomináns* funkciók határozzák meg a hangzások sorrendjét. Az 5.14. ábrán a három fő funkciót a C-dúr és az a-moll skálához tartozó legfontosabb hangokhoz rendelve mutatjuk be.



5.14. ábra: Dúr- és moll skála három fő funkciója (tonika, szubdomináns, domináns)

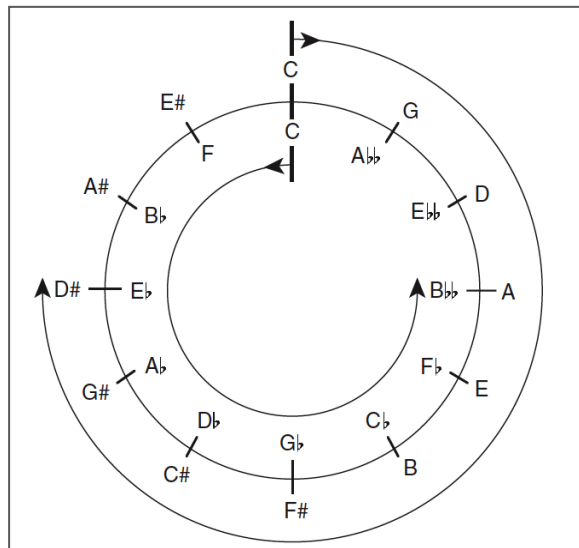
A XVIII. századtól a diatonikus skálák kétpólusú redukciója és a funkciók megjelenése hozta a moduláció, azaz a hangnemváltás igényét. Ebből következik, hogy a zene nem csak egy hangnemben szólhatott (pl. C-dúr), hanem más hangnemekbe is elmozdulhatott. Sőt, egy zenemű eleve más-más hangnemekben is indulhat. A hangnemek kijelölésére hozták létre az előjegyzést, mely nem csak egy adott alaphangot, de a hangkészlet jellegét is meghatározta. A kottában a sorok elejére helyezett keresztekkel és békkkel adták meg az adott hangnemet.

5.4. A temperálás

5.4.1. A püthagoraszai kvintek

A püthagoraszai kvintek fontos problémára hívják fel a figyelmet: ha a kvintek egymásra építésével nem állunk meg a negyedik kvint után, hanem folytatjuk a

tizenkettedikig, és a hangokat traszponáljuk az eredeti oktávba, akkor a 12. hang („hisz” hang, mely enharmonikusan, azaz a zongorabillentyűket tekintve megegyezik a c'-vel), finom hangmagasságbeli eltérést mutat.



5.15. ábra: Kvintkör spirális ábrázolása

$(3:2)^{12} = 531441:4096$ oktávtranszpozíciók után $531441:524288 = 1,0136$, nem pedig 1, ami a tiszta prím szorzószáma. Ezt a – két hang közötti – különbséget nevezzük *püthagoraszi kommának*. Ez azt jelenti, hogy a tiszta kvintek egymásra halmozásával soha nem érhető el a tiszta hetedik oktáv. A püthagoraszi kvintekből álló hangsor felépítésekor, illetve az eszerint hangolt hangszer felhangolásakor a 13. hangot csak úgy lehet az alaphanggal megegyező hangmagasságúvá alakítani, ha az egyik kvintet a többinél szűkebbre hangoljuk. Ezt a nyolcadhangnyi eltéréssel felhangzó kvintet nevezzük *püthagoraszi farkskvintnek*.

A püthagoraszi farkskvint kiszámolása a következő ábrán látható. (Összehasonlításképpen: a tiszta hangolású kvint aránya centben kifejezve 701,96 cent, az egyenletesen temperálté – erről bővebben l. az 5.4.3. szakaszban – 700 cent.)

$$\left(\frac{1}{2}\right)^7 : \left(\frac{2}{3}\right)^{11} = \frac{3^{11}}{2^{18}} = \frac{177147}{262144} \approx \frac{2}{2,9596} \approx 678,50 \text{ Cent.}$$

5.16. ábra: A püthagoraszi farkskvint kiszámolása

A tiszta kvintekből felépített skálák (l. 5.3. szakasz) egymást követő hangközei nem egyeznek meg a felharmonikus sor hangközeivel. A tiszta kvintek egymásra halmozásával a 13. kvint – mely elvileg egy önmagába visszaérő, az 1. hanggal megegyező hang lenne – hamis lesz (farkskvint).

Hallásgyakorlat:

Kvint, farkaskvint összehasonlítása:



5.2. Hang



5.3. Hang



5.4. Hang

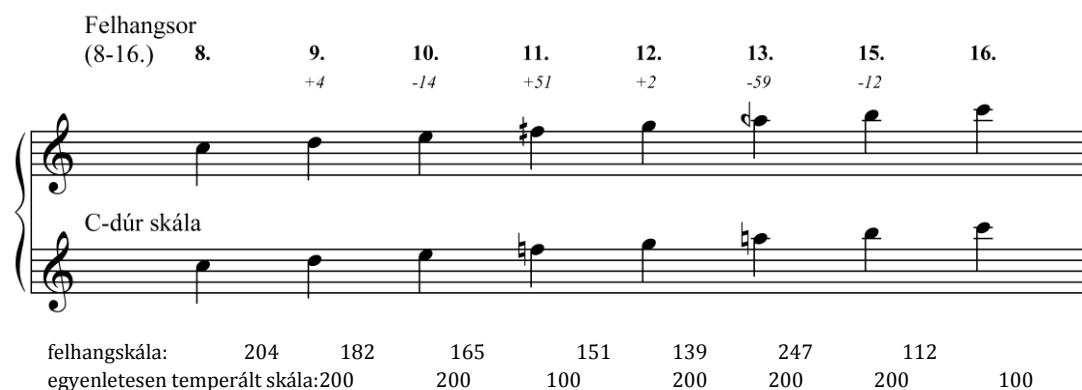
5.2., 5.3., 5.4. hangpélda: Kvintek összehasonlítása (440 Hz-es szinuszhang fölött)
1. Akusztikus tiszta kvint; 2. Farkaskvint; 3. Temperált tiszta kvint

5.4.2. Középhangos hangolások

A reneszánsz zeneszerzők egyik újítása, a terc alkalmazása nehézkesnek bizonyult a phüthagorasz, kvintalapú hangolás keretein belül, mivel négy egymásra épített kvint (például C-G-D-A-E) nem ad tiszta nagytercet; az 5. hang magasabb, mint a kiinduló hangra épített tiszta nagyterc. Az eltérést *szintonikus komma* névvel nevezzük. A probléma megoldásához a tiszta nagytercet (frekvenciaaránya 5:4) vették alapul, és ennek segítségével építették fel az ún. középhangú temperálást. Ebben a szintonikus komma eltüntetéséhez kissé szűkített kvinteket alkalmaztak, amiből négy együtt kiadja a tiszta nagytercet. Tizenegy középhangú kvint egymásra építésével megkapjuk a hangrendszer 12. hangját.

A középfokú hangolásban egyes hangnemek (pl. Esz-dúr, Cisz-dúr) rendkívül diszsonánsak voltak. Mivel a reneszánsz zenében még nem volt jellemző a moduláció, hosszú ideig elegendőnek bizonyult a jól hangzó hangnemek használata. Történtek ugyanakkor kísérletek a többi hangnem játszhatóvá tételére, készültek például olyan billentyűs hangszerek, amelyeken az oktávot 31 hangra osztották.

gyobb „kárt szenvednek”. Az oktáv tizenkét részre osztásával kapott arányszám $12\sqrt{2} = \text{kb. } 1,05946$ ($1,05946^{12} = \text{kb. } 2$) nem minden esetben praktikus. A bonyolult irracionális számolás helyett találták ki a félhang egységes felosztását. Egy félhang 100 centnek felel meg. A *cent* segítségével bármely temperált hangközt könnyű meghatározni (az oktáv 1200 cent), de a negyed-, nyolcad- stb. hangokat is egyszerűbb kifejezni.



5.18. ábra: A C (65.41 Hz) alaphanghoz tartozó felhangok sorából létrehozott skála, valamint az egyenletes temperálású C-dúr skála hangjai centkülönbségekkel megadva

Az 5.2. táblázat az egyenletesen temperált rendszerben és tiszta hangolásban használt hangközök értékeit közli összehasonlításban. A temperált, azaz egyenlő félhanglépések gyökös és decimális és centértékeit és összevetve a tiszta hangolás arányban és decimális és centértékben megadott adatokkal látható, hogy pontos egyezés csak a prím és az oktáv hangközénél fordul elő. A legkisebb torzítást a temperált rendszerben a tiszta kvint szenved el, a legnagyobb nagyszekund és a kisszeptim.

5.2. táblázat: Az egyenletes és a tiszta hangközök összehasonlítása

	Egyenletes temperálás			Tiszta hangolás		
hangköz	gyökös	decimális	cent	arány	decimális	cent
tiszta prím	1	1	0	1	1.0	0
kisszekund	$12\sqrt{2}$	1.0595	100	16/15	1.0667	111.73
nagyszekund	$(12\sqrt{2})^2$	1.1225	200	9/8	1.125	203.91
kisterc	$(12\sqrt{2})^3$	1.1892	300	6/5	1.2	315.64
nagyterc	$(12\sqrt{2})^4$	1.2599	400	5/4	1.25	386.31
tiszta kvart	$(12\sqrt{2})^5$	1.3348	500	4/3	1.3333	498.04
tritónusz	$(12\sqrt{2})^6$	1.4142	600	45/32	1.4063	590.22
tiszta kvint	$(12\sqrt{2})^7$	1.4983	700	3/2	1.5	701.96
nagyszett	$(12\sqrt{2})^8$	1.5874	800	8/5	1.6	813.69
kisszett	$(12\sqrt{2})^9$	1.6818	900	5/3	1.6667	884.36
kisszeptim	$(12\sqrt{2})^{10}$	1.7817	1000	9/5	1.8	1017.6
nagyszeptim	$(12\sqrt{2})^{11}$	1.8877	1100	15/8	1.875	1088.27
tiszta oktáv	$(12\sqrt{2})^{12}$	2	1200	2/1	2.0	1200

Míg a hagyományos akusztikus hangszerek egy részének (rézfúvósok, vonósok) a temperált rendszerben való játék okoz nehézséget, addig a zongorán a tiszta hangközök hiányoznak. Eközben számítógéppel megoldható a különböző skálák modellezése, sőt új felosztáson alapuló skálák létrehozása is. Pl. egy tízfokú egyenletesen temperált skála hangköztávolságai 120 centesek lesznek. (Ebben az esetben az 5. hang – 600 cent) megfelel a kromatikus skála 6. hangjának.) Ha pedig nem oktávot, hanem ettől eltérő hangközt osztunk fel egyenlő távolságokra, csak a megfelelő távolságot kell tudnunk arányosan felosztani. (Pl. egy kishóna – 1300 cent – tízfelé történő osztása 130 centes lépéseket eredményez.)

A cent a félhangtávolság századrésze. A temperált skálában egy félhang távolsága 100 cent, azaz az oktáv 1200 centnek felel meg. A tizenkét fokú, illetve huszonnégy fokú notációs rendszerben a hangokat temperált skála szerint használjuk, ezért szükséges az eltérés megmutatása. A hangközök beazonosítása tehát a felhangsor szerinti helyük, vagyis egy adott alaphanghoz viszonyított arányuk szerint, hangközelnevezéssel és centben megadott távolsággal is lehetséges. A cent és az egyenletesen temperált félhang kiszámításának módja:

Egyenletes temperálás:

1 félhang távolság f_0 -hoz képest = $f_0 \cdot \sqrt[12]{2} = 1.05946$

1 cent távolság f_0 -hoz képest = $f_0 \cdot \sqrt[1200]{2} = 1.000578$

6. Ritmus01

6.1. A ritmus fogalma

A ritmus görög eredetű szó, jelentése visszatérő mozgás, szimmetria. „Mozgás”, amely erőteljes és gyenge elemek vagy ellentétes illetve különböző állapotok szabályozott egymásutánja. Ez a szabályos mintázatra vonatkozó általános jelentés sokféle ciklikus, periodicitással, illetve frekvenciával rendelkező természeti jelenségre vonatkoztatható, melyek periódusideje ezredmásodpercektől évmilliókig tarthat. A ritmus alapegysége az időtartam.

A ritmust, illetve egyes ritmusképleteket egyforma vagy különböző időtartamú hangok sorozatából lehet felépíteni. A ritmus tehát eseménysorozat, mely a zene különböző szintjein jelentkezik. Lehet ritmusa egy hangsorozatnak, egy harmóniasorozatnak, a funkciórendnek, a formarészek arányának is, de hasonlóan ritmusa van a zenei hangok és csendek váltakozásának, a tánclépéseknek, a beszélt nyelvnek és a költészetnek, mint ahogy a videovágás is ritmikus szinten történik. Tulajdonképpen a ritmus a zene talán legfontosabb összetevője, hiszen annak leglényegesebb részét, az időbeli megjelenést határozza meg.

A ritmus: egymás utáni hangok sora, sorozata. A hangok lehetnek megegyező vagy különböző időtartamúak. A hangok között csönd, illetve szünetek is állhatnak, melyek szintén módosítják a ritmusképletek mintázatát. Egybefüggő ritmusképletek akkor tudnak jól hallhatóan kialakulni, ha:

- a hangok inkább gyors felfutású, perkusszív burkológörbével rendelkeznek,
- az egyes elemek nem válnak el egymástól túl hosszú időre vagy nincsenek túl közel egymáshoz,
- a ritmusképlet tempója nem szélsőségesen gyors vagy lassú,
- a ritmuselemek sorában ismétlődésekre kerül sor.

Egy zenei anyag ritmikai képletei különböző időpontokban megszólaló, különböző időtartamú elemek sorozataiból jönnek létre. Ha az elemek egyforma időtartamúak, de követési távolságuk különböző, a ritmus akkor is kialakul. A ritmust tehát elsősorban az egymás után megszólaló hangok kezdőpontjai határozzák meg.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



A példában ritmus, dallam, sebesség és hanghosszúság összefüggését lehet megfigyelni. A bal felső sarokban található bekapcsológomb alatt a BPM-ben, azaz percenkénti ütésszámban megadott tempót lehet beállítani. A program jobb felső sarkában egyszeri vagy állandó ismétlés melletti lejátszás, illetve a hang burkológörbéje változtatható. A burkológörbe trapéz, háromszög vagy perkusszív megszólaltatásával a ritmus érzetének kialakulása jelentősen megváltozhat.

A példában nyolc különböző hangmagasság követi egymást. E hangokat a három számoszlop közül a középsőben található adatokkal lehet megváltoztatni. A hangmagasságokat MIDI értékekben adtuk meg. (Egy-egy, a hangok többségétől eltérő magasságérték beállításával a folyamatos dallam és ritmusérzet felborulhat.) A bal oldali oszlopban a hangok követésének időarányát lehet beállítani. A megadott tempónak megfelelő lüktetésnek az 1 érték felel meg. A 2-nél kétszer, 3-masznál háromszor ilyen gyorsan stb. szólal meg az adott hang.

A jobb oldali oszlopban a hangok hosszúságát is lehet változtatni. A tempótól és a hangok hosszától függően egyes hangok átlóghatnak a következő hang(ok) idejébe, amely szintén befolyásolhatja a ritmusérzet kialakulását.

Előre elkészített példáink közül az első beállítás alapidallamát és ritmusát megtartva a tempó, a burkológörbe és a hanghossz változtatásával jött létre a többi példa. A 2. példában trapéz burkológörbe mellett ugyanúgy hallható a ritmus. A 3. példában viszont 500 helyett 1000 msec hosszúságúak az egyes hangok. Emiatt átfedéssel szólalnak meg, és a ritmust meghatározó hangindítási helyek kissé elmosódnak. A teljes összemosódást, azaz a ritmusérzet megszűnését a 4. példára történő kattintás után lehet meghallgatni. A burkológörbe háromszög alakja miatt a hang indítása eltűnik, a hangok 2000 msec-os hossza miatt annyira fedik egymást, hogy folyamatos textúra hallható ritmus helyett.

Bár az 5–6. példa rövid, perkusszív, ill. trapéz burkolójú hangokból áll, az alaptempó sebessége 360 BPM. A ritmikus anyag a gyors tempó és a rövid hangidőtartam mellett is érzékelhető.

A 7–8. példában az alaptempó igen lassú. Hiába éri el egyik hang vége a következő elejét (l. hanghossz), ebben a tempóban ritmikus érzet helyett egymástól független hangokat lehet hallani.

6.1. ábra: Ritmus felismerése

6.2. A ritmus kialakulása az európai zenében

6.2.1. A ritmus az ókori görögöknél

Az ókori görög archaikus korban (Kr. e. VII–VI. század) a tánc–zene–nyelv esszenciájaként alakult ki a lírikus költészet (lírakíséretes ének), amelyben a versritmus – a hosszú és rövid szótagok váltakozása, emelkedése süllyedése – megújult, kiemelt szerepet kapott. Ugyanekkor jelent meg a versben a változó hangmagasság is, ami körülbelül egy kvint terjedelmet jelentett. Az előadó egy személyben költő és énekes is volt, a nyelv zenévé vált. Ekkor alakultak ki a görög prozódia (énekbeszéd) jelei és elnevezései:

6.1. táblázat: Szótagok hossza és elnevezéseik

szótagok		
típusa	jele	görög/latin elnevezése
hosszú	—	makrosz; longa
rövid	∪	brakhusz; brevis
hangsúlyos	—	daszeia; aspiratio
hangsúly nélküli	—	philer; siccitas

Az időmértékes verselés a rövid és hosszú szótagok váltakozására épülő forma:

- rövid szótag: ha egy szótag rövid magánhangzót tartalmaz, és a rövid magánhangzó egy mássalhangzóval áll együtt. Jelölése: ∪
- hosszú szótag: ha egy szótag hosszú magánhangzót tartalmaz, vagy egy rövid magánhangzó után két vagy több mássalhangzó áll. Jelölése: —

Az időmértékes verselés alapegysége a versláb, melynek mértékegysége a mora. Egy rövid szótag 1 mora, egy hosszú szótag 2 mora értékű. Ennek megfelelően megkülönböztethetünk 2, 3 sőt 4 morás verslábakat. Az időmérték alapja a szótagok időtartama.

A legismertebb időmértékes ritmusrend a görög-római verselés.

Verslábak:

6.2. táblázat: Antik verslábak

Jambus	U — (rövid-hosszú)	szökő
Trocheus	— U (hosszú-rövid)	perge, lejtő
Anapesztus	U U — (rövid rövid hosszú)	lebegő, doboló
Daktilus	— U U (hosszú rövid rövid)	lengedi, görgedi
Spondeus	— — (hosszú hosszú)	járó, lassú

A verslábak mennyiségére és típusára vonatkozó szabályok is kialakultak, ezeket versmértéknek nevezünk. Gyakran használt versmérték például a hexameter (hat mérték), mely hat verslábból áll, az utolsó versláb spondeus és az utolsó előtti daktilus, a többi szabadon változhat.

Pl.:

„Jaj, bizony úgy szóltok, mint kis gügyögő gyerekek mind,
kiknek a háboru dolgaiból nincs semmire gondjuk.”

(Homérosz: Iliász, ford.: Devecseri Gábor)

6.3. táblázat: A szavak versláb szerinti elemzése

— U U	— —	— —	— U U	— U U	— —
Jaj, bi-zony	úgy szól-	tok, mint	kis gü-gyö-	gő gye-re-	kek mind

— U U	— U U	— U U	— —	— U U	— —
kik-nek a	há-bo-ru	dol-ga-i	ból nincs	sem-mi-re	gond-juk.

Az időmértékes verselés hosszú és rövid hangzóinak viszonya megfelel a zenei ritmusképletek 1:2 arányú elemeivel (pl. „ti” és „tá”). Az egyes verslábak a szótagok változó hossza és azok egyégekbe történő elrendezése zenei lüktetést ad ki. Az idézett részlet „jaj, bizony úgy szól-” ütemeinek ritmusa megfelel a „tá-ti-ti – tá-tá” ritmusnak. Az antik szövegek ritmusa tehát igen zeneien hangzik.

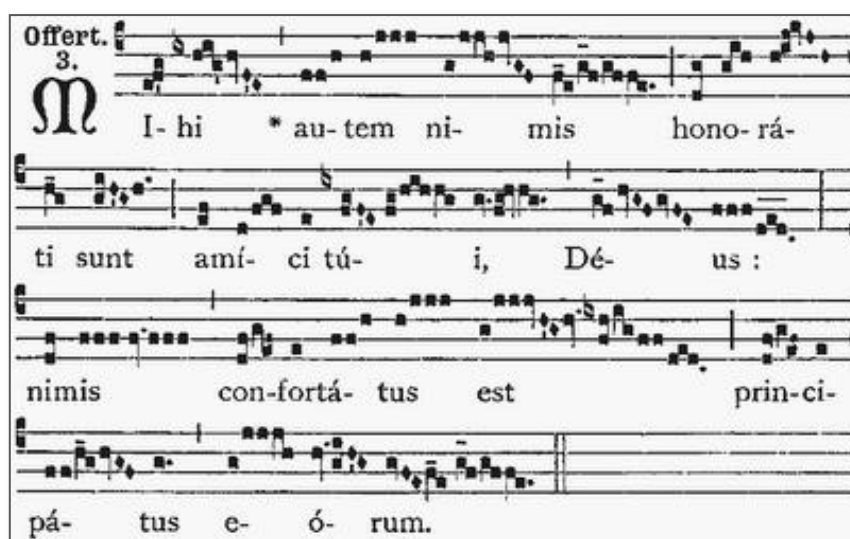
6.2.2. A ritmus a gregorián énekek korában

A gregorián ének ritmusa szabad, a ritmus metrikai tagolása sem volt jellemző. A zenei tagolást és a dallam ritmusát a szöveg tartalma, összefüggései és nyelvi gesztusai határozták meg. Az általános gyakorlatban kétféle módszer, a szillabikus vagy szótagoló és a melizmatikus előadás volt jellemző.

6.2. ábra: Szillabikus éneklés gregorián énekben

Szillabikus éneklés: minden szótagra egy hangot énekeltek, vagyis a ritmust a dallam és a szöveg szótagjainak együttes változása hozta létre. Ezért ezt az éneklést ritmusosnak halljuk. A 6.2. ábrán látható, hogy minden szótag fölött van egy-egy hangjegy (*punctum vagy virga*), itt a ritmus a szöveghez és annak hangsúlyaihoz igazodik.

Melizmatikus éneklés: egy-egy szótagra több hang is juthat. A csoportdallamnak is nevezett éneklésmód jellemzője, hogy egy-egy szótaghoz több hangmagasság is tartozik, a notációban a szótagok felett több neuma is állhat (6.3. ábra). A több különböző hangmagasságot és csak egy szótagot magába foglaló szakaszt dallamosabbnak halljuk, mert nem társul minden hanghoz újabb szótag, mely direkt váltást jelent a hangzásban.



6.3. ábra: Melizmatikus éneklés gregorián éneken

6.2.3. Ars nova

A XIV. században a többszólamúság megjelenésével a zeneművek írásbeli rögzítése elengedhetetlenné vált. A ritmus fejlődésére ezért hatással volt a notáció fejlődése is. A ritmus alapját az időtartamok aránya (1:2, 1:3) határozta meg. A ritmusképleteket négyféle módon határozták meg és jelölték. A tökéletességet a hármassal osztás jelentette, melyet további három (*tempus perfectum cum prolatione maiori*) vagy két elemre lehetett felosztani (*tempus perfectum cum prolatione minori*). Ha az alapfelosztás a kettes volt, tökéletlen osztásnak nevezték a megszólló ritmusképleteket. A tökéletlen alapfelosztás további hármassal (*tempus imperfectum cum prolatione maiori*) és kettes (*tempus imperfectum cum prolatione minori*) osztására is volt mód. (E felosztásoknak felelnek meg a mai 9/8 3/4 6/8 és 2/4-es metrumok – l. 7.1.3. szakasz.)

A felosztásokból és a tánczenei lüktetésből alakultak ki azok a ritmusképletek, melyek meghatározták az európai zene ritmikáját a XV. századtól. A XVI. században a hangmagasságokat, valamint a ritmusértékeket már pontosan, az adott zenét – az előadói finomságoktól eltekintve – hűen rögzítették.

Metrumjelzéseket is megadtak, de az ütemeket egymástól nem választották el. A zene lüktetése tehát adott volt, de metrikusan a mai értelemben nem jelent meg a kottában. Megjelent a triola, mint a kisebb alapegység hármas felosztása, valamint az ütemek belső arányainak átértékelése (6/8 vs. 3/4) egy darabon belül is. A ritmuselemek egymással proporciós viszonyban álltak. E bonyolult elv összefüggésben állt a korabeli zeneszerzők racionális, matematikailag is sokfajta összefüggést teremtő gondolkodásával.

6.2.4. A napjainkban használatos ritmusértékek kialakulása

A XV–XX. század során a ritmusok bonyolultsága fokozatosan növekedett. A XVI. században kezdték a zeneszerzők ütemekbe rendezni az egyre komplexebb ritmikus struktúrákat. Ekkortájt az alapegységet (tactus, azaz ütem) lassabb vagy gyorsabb időértékekkel (menzúra) tagolták. Az alaplüktetéshez (mérőütés) képest történő tempóváltozások mindig szigorú proporció mentén történtek. A XVII. századtól, a tánczene kialakulásával párhuzamosan a hosszegységek helyett a hangsúlyokkal való tagolás kerül előtérbe, hogy segítsék a megfelelő lépések helyének felismerését.

A XX. század második felében a ritmusképletek komplexitása ugrásszerűen megnőtt. Ezzel együtt a felhasznált ritmuselemek skálája csak részben változott. A szélsőségesen rövid és hosszú hangok megjelenése részben összefügg az elektronikus zene megjelenésével. A ritmikai elemek használatában azonban nincs jelentős változás a korábbi zenéhez képest.

6.3. A ritmusértékek és jelöléseik

A ritmus hagyományosan egymástól különböző, jól megjegyezhető képletekből álló sorozat. Legprecízebb leírása számsorozatként képzelhető el az egyes hangok kezdeti időpontjának és időtartamának megadásával. Ez a notációs módszer a számítógépek megjelenése után, a zenei informatika térhódításával jelent meg.

6.3.1. Alap ritmusértékek

Az európai zenében használt ritmusértékek a kettes osztáson alapulnak. Egy hang hosszát a többi hanghoz való időtartamviszonyában lehet megadni. Képzeljünk el egy fiktív alaplüktetést egy zeneműhöz rendelt ritmuselemként, aminek valamilyen mértékű osztásával (néha szorzásával) bármilyen ritmusképlet kialakítható.

Írásban a kottafejek formájával és a szárhoz csatolt zászlókkal és gerendákkal határozzuk meg a ritmusértékeket. Az arányok a nagyobb értékek kettes felosztásán, illetve a kisebbek többszörözésén alapulnak. Alapegységnek általában az „egészértéket” tekintjük. Ennek fele a „félérték”, negyede a „negyed” stb. A 6.4. táblázatban az egészérték felülről a második hang, melynek jele üres ovális hangfej. Alatta látható a félkotta (üres ovális hangfej szárral), a negyed (telített

hangfej szárral), valamint a még kisebb értékek mind telített hangfejjel (nyolcad egy zászlóval, tizenhatod két zászlóval, harmincketted három zászlóval, hatvan-negyed négy zászlóval). A legfelső jel az úgynevezett „brevis”, az egészérték duplája.

6.4. táblázat: Ritmusértékek

hangjegy	elnevezés	hossz kiszámítása	szünet
	„brevis”	egészérték duplája	
	egészérték		
	félkotta	egészérték fele	
	negyed	egészérték negyede	
	nyolcad	egészérték nyolcada	
	tizenhatod	egészérték tizenhatoda	
	harmincketted	egészérték harminckettede	
	hatvanegyed	egészérték hatvanegyede	

A táblázat jobb oszlopában láthatók a hangértékeknek megfelelő szünetjelek. Mivel a zenei időt nem csak hanggal, de csönddel is ki lehet tölteni, a hangok közötti szünetek idejének, ritmusának is zenei szerepe van. Ezért a szünetek jelei megfeleltethetők a hangok jeleinek.

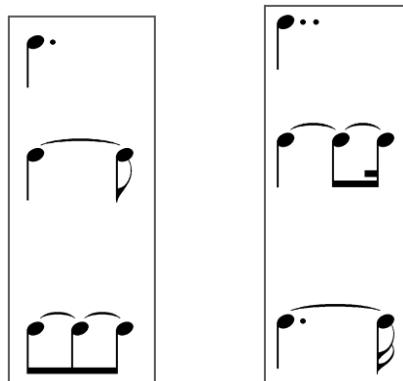
6.3.2. A ritmusok megnyújtása: átkötés, pontozás

Lehetséges nagyon hosszú hangok komponálása és eljátszása is. Ha egy hang hossza a leírásban szereplő legnagyobb értéket is túllépi vagy hossza eltér a kettes szorzással megadott értékektől (pl. hét nyolcad hosszúságú), akkor azonos vagy különböző ritmusértékek átkötésével lehet megnyújtani a hangot.



6.4. ábra: Hét nyolcad hosszúságú hang lejegyzése különböző ritmusértékek átkötésével

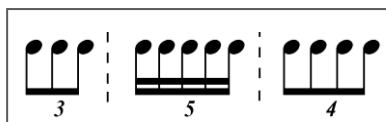
Mivel a hármassal történő szorzás, azaz egy hang értékének háromszorosára vagy másfélszeresére történő nyújtása igen gyakori az európai zenében, szükség volt egy olyan rövidítő jelzésre, amely megkönnyíti a leírást. Ez a segédjel a nyújtópont. Ha a hangjegy mögé (értsd: időben mögé, azaz a hangfej jobb oldalára) pontot helyezünk, a pont az adott hang értékét 50%-kal megnöveli. A pontozott negyed értéke a negyed másfélszerese, tehát $1/4 + 1/8$ -ad. (Létezik duplapont is, ilyenkor a hangjegy mögött két pont áll. A második pont a fenti esetben az $1/8$ felét, tehát $1/16$ -ot ad hozzá a hang értékéhez, tehát $1/4 + 1/8 + 1/16$ -ot ér.)



6.5. ábra: Nyújtópont; dupla nyújtópont

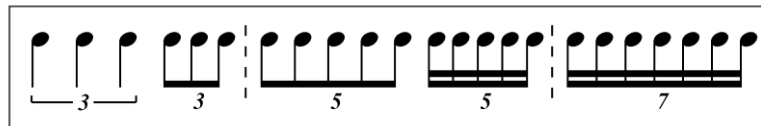
6.3.3. Nem-páros osztások (triola, kvartola stb.)

A ritmusok komplexitása érdekében a zeneszerzők nem csak kettes és hármass felosztásokat, hanem ennél bonyolultabb arányokat is használnak. Egy ritmusérték páros osztása helyett hármass (triola), ötös (kvintola), hetes (szeptola) és további osztások is elképzelhetők. A 6.6. ábrán a triola, a kvintola és a kvartola lejegyzését lehet látni.



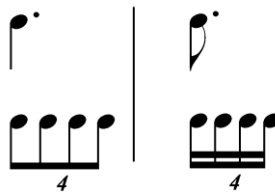
6.6. ábra: Triola, kvintola, kvartola

Bármely ritmuselem felosztható a nála kisebb elemekből álló páratlan értékekre. Pl. egy félkottát három negyedtriolára vagy öt nyolcadkvintolára, a negyedértéket három nyolcadtriolára vagy öt tizenhatodkvintolára lehet osztani. A hét részre tagolás neve szeptola. Hét tizenhatod szeptolát egy negyedérték alatt lehet elhelyezni. A 6.7. ábrán a felsorolt páratlan osztásokat mutatjuk be.



6.7. ábra: Negyedtriola, nyolcadtriola, nyolcadkvintola, tizenhatod kvintola és tizenhatod szeptola

A pontozott értékek páros osztására is van lehetőség. Pontozott, azaz másfélszeresre nyújtott ritmuselem felosztása három- vagy hatfelé nem igényel új elemet, négy- vagy nyolcfelé osztása igen. A négyfelé osztás neve kvartola.



6.8. ábra: Kvartola pontozott negyed- és nyolcadérték alatt

7. Ritmus02

7.1. A tempó és a metrum

A ritmusok felismerhetőségének fontos jellemzője az ismétlés. Az egyenletes időközönként megszólaló hangokat pulzációnak, lüktetésnek nevezzük. Ennek ritmusa önmagában szegényes, de a pulzációhoz viszonyított sűrűbb ritmusok komplexnek tűnnek. A folyamatos lüktetés vagy az ehhez viszonyított ritmusok sebességéből jön létre a tempó.

7.1.1. Tempóértékek

Egy zenemű tempóját alaplüktetése határozza meg. A lüktetés vagy pulzáció szabályosan visszatérő, egyenletes időközönként megjelenő inger. Bár a lüktetés érzetét általában valamilyen fizikai esemény (hang) váltja ki, és tartja fenn, szubjektív módon is létezhet. Az egyenletes lüktetés érzete, ha kialakult, folytatódik a tudatban akkor is, ha leáll a kiváltó hang, vagy ha több elem lép be a folyamatba. Ha a ritmusképletek sora nem tartalmaz túl komplex arányokat, illetve a ritmus egyes hangjai megerősítik a lüktetést, akkor a tempó világosan érezhető. A tempót a hallható vagy csak a tudatban jelenlévő lüktetés elemei közötti időtartamból lehet kiszámolni. A tempót meg lehet adni a lüktetést kiváltó hangok között eltelt idővel (sec vagy msec) vagy a percenkénti ütésszámmal (BPM – beat per minute).

A kottában a tempót BPM segítségével és a hozzárendelt ritmusértékekkel adjuk meg. A 7.1. ábrán ugyanazt a tempót jelöltük különböző ritmusértékekre vetített BPM-ek segítségével. A példákban látható, hogy az ábrán jelölt tempóban egy perc alatt 50 negyed, 100 nyolcad vagy 25 félhang játszható le. Felmerülhet a kérdés, mi értelme van ugyanazt a tempót különböző ritmusérték-BPM párokkal megadni. A különböző ritmusértékek szerepe az, hogy kijelöljék, hogy milyen az adott zenemű alaplüktetése.

$$\text{♩} = 50 \quad \text{♩} = 100 \quad \text{♩} = 25$$

7.1. ábra: Tempójelzések különböző ritmusértékekhez rendelve

Ha két hang megszólalása között egy másodperc (1000 msec) idő telik el, akkor a lüktetés sebessége 60 BPM, hiszen egy percben 60 másodperc van. Ha a hangok fél másodpercenként (500 msec) követik egymást, akkor a tempó 120 BPM stb.

Példák a tempóértékek, a hangok megszólalása között eltelt idő és az egyes ritmusértékek közötti összefüggésekre

1. Ha BPM=240, milyen időközönként követik egymást az alaplüktetést adó hangok?

Levezetés:

240 BPM azt jelenti, hogy 1 perc, azaz 60 000 msec alatt 240 ütés követi egymást. Hogy megkapjuk a köztük eltelt időtartamot, a 60 000-et el kell osztani az ütések számával.

$$60\,000:240 = 250\text{ ms}$$

2. Milyen tempóban vagyunk (BPM-ben megadva), ha az alap-ütések 200 msec-ként követik egymást?

Levezetés:

Meg kell vizsgálni, 1 percbe (azaz 60 000 msec-be) hányszor fér bele 200 msec, azaz 60 000-et el kell osztani 200-zal.

$$60\,000:200 = 300\text{ BPM}$$

3. Ha a tempónk 80 BPM negyedhangos ütest véve alapértéknek, mennyi idő fog eltérni két tizenhatod között?

Levezetés:

A két negyed között eltelt időt úgy számítjuk ki, hogy elosztjuk a 60 000-et 80-nal (l. 1. példa).

$$60\,000:80 = 750\text{ msec.}$$

a tizenhatod érték a negyedhang negyednyi hosszúságát jelenti (l. 7.8. ábra) jelenti, ezért hosszának kiszámításához el kell osztani az eredményül kapott 750-et négygyel:

$$750:4 = 187.5\text{ msec a tizenhatadok között eltelt idő.}$$

A tempójelzés hagyományosan összefügg a karakterjelzésekkel. A klasszikus zenei lejegyzés hagyományosan olasz kifejezéseket tartalmaz. A tempóra vonatkozó meghatározások egyszerre fejezik ki a zene karakterét és gyorsaságát.

A klasszikus zenei lejegyzés gyakran olasz nyelvű, a zene karakterét és tempóját egyszerre kifejező szavakkal jelöli a tempót. A XVIII. századtól, a Mälzel-féle ingametrónóm feltalálásával párhuzamosan jelentek meg a kottákban a BMP alapú tempómeghatározások. Az olasz nyelvű karakterjelzések megfeleltethetőek BPM meghatározásoknak.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



Interaktív példánkban a BPM-ben megadott tempó és a hangok megszólalása közötti követési időt lehet összehasonlítani. Mindkét oldalon beállítható a hangerő és az adott hangszín, amin meghallgatni kívánjuk a beállított tempót. (A különböző hangszínek segítenek a kétféle beállítás összehasonlításában.) A bal oldalon BPM-ben, a jobb oldalon a hangok közötti időt millisekundumban lehet megadni.

Az előre elkészített beállítások – l. a példa felső sávjában – átlagos (másodpercenként két ütés), nagyon gyors és nagyon lassú tempókat mutatnak meg..

7.2. ábra: Tempó meghatározása

7.1. táblázat: Tempó meghatározása olasz zenei szakszavakkal és BPM-mel

largo	=	szélesen	40–60
lento	=	lassan	45–50
adagio	=	lépésben	66–76
andante	=	lassan, lépéstepóban	73–77
andantino	=	lépegetve	78–83
moderato	=	mérsékeltten	106–120
allegretto	=	kicsit vidáman	98–109
allegro	=	vidáman	120–168
vivace	=	élénken és gyorsan	132–140
presto	=	gyorsan	168–177
prestissimo	=	nagyon gyorsan	178 felett

A mai táncoltató elektronikus zenei stílusoknak meghatározó eleme tempójelzésük. A 7.2. táblázat felsorol néhány példát ezek közül.

7.2. táblázat: Az elektronikus tánczenei stílusokhoz tartozó tempómeghatározások

Trance	125–140
Techno	120–145
Hardtechno	145–170
Drum&Base	170–190
Progressive Trance	130–140
Goatrance	140–145
Hardcore	140–190
Speedcore	200–800+

Ha tempót, azaz lüktetést adunk egy zenéhez, az adott relatív ritmusértékek abszolút értéket kapnak. A lüktetés – vagy egy ritmusképlet – hangjainak sűrűségét (azaz sebességét) változtatva a zene kilép a ritmusból. Túl lassú tempó, azaz túl nagy hangtávolságok mellett a ritmusok elveszítik összefüggéseiket. Túl gyors tempó, azaz túl kis hangtávolságok mellett a ritmusok sűrű hangzásfelületté állnak össze. A lüktetés sűrűségét a 7.2. ábrához tartozó interaktív példán megfigyelhetjük. A 20–25 BPM-nél (azaz kb. 2,5 másodpercnél) lassabb lüktetést már szétesőnek, a kb. 1000 BPM-nél (kb. 60 msec) gyorsabb lüktetést folyamatos hangnak halljuk. Az adatok hangszínfüggőek is.

7.1.2. A metrum

Az ütemérzetet a ritmusok és a lüktetés mellett a hangsúlyok viszonya adja. A visszatérő hangsúlyok közötti legkisebb periodikus egység az ütem. A metrum az alaplüktetések száma a többé-kevésbé egyenletesen megjelenő hangsúlyok között.⁵ Az ütemekbe rendezett, megszámlált lüktetéseket ütéseknek nevezzük, melyek lehetnek hangsúlyosak és hangsúlytalanok. A különböző metrumok tehát súlyviszonyokat jelölnek. Az ütem-, más néven metrikus érzet, alapvetően a lüktetéssel és hangsúlyokkal, nem pedig az ütemben megszólaló ritmuselemekkel függ össze. Ha az ütemérzet stabil, az ütemben lévő ritmusokhoz hozzárendelhetők lesznek további hangsúlyok is, melyek nem feltétlenül módosítják az ütemek hosszát.

Az ütemmutatót úgy lehet megadni, hogy kijelöljük, hogy milyen ritmusérték adja az ütem alapegységét, és hogy ebből az alapidőtartamból hány darab adja ki az ütem teljes hosszát. Például a négynegyedes ütem négy negyedhangból áll, a hatnyolcados ütem pedig hat nyolcadból. Az ütem alapritmusértéke csak szabályos ritmusérték lehet.

7.1.3. A leggyakrabban használt ütemmutatók. Páros és páratlan ütemek

Az európai zenében két fontos ütemfajta létezett, a páros és a páratlan metrum. A kétféle ütemfajta a súlyviszonyok ütembeli elrendeződése szerint lehet megkülönböztetni. Ha egy ütemben páros sorszámú súlyos ütés szerepel, az ütem páros, és fordítva: páratlan sorszámú súlyos ütés mellett az ütem páratlan.

A 7.3. és 7.4. táblázatban a leggyakrabban használt metrumjelzéseket (azaz ütemmutatókat) a bennük szereplő súlyos és súlytalan ütemrészekkel mutatjuk be. (A súlyos ütemrészeket ›, a súlytalant U jellel jelöljük.)

⁵ Grosvenor, W. C. – Meyer, L. B.: The Rhythmic Structure of Music, 4. old.

7.3. táblázat: Páros metrumú ütemek és súlyviszonyaik – Páros ütemek

ütem- mutató (metrum- jelzés)	alaplüktetés; ütemrészek súlyviszonya	ütemrészek súlyviszonya (lüktetés alapján)	ütemrészek súlyviszonya (ütésen belüli elrendeződés alapján)	hangpélda
2 4	Negyed; súlyos-súlytalan			 7.1. Hang
4 4 _{ill.} C	Negyed; súlyos-súlytalan- relatívén súlyos- súlytalan			 7.2. Hang
3 8 _{ill.} C	Félkotta; súlyos-súlytalan			 7.3. Hang
6 8	Pontozott negyed; súlyos-súlytalan			 7.4. Hang
12 8	Pontozott negyed; súlyos-súlytalan- relatívén súlyos- súlytalan			 7.5. Hang

A táblázatból kiolvasható, hogy az ütemmutató nevezőjében az alaplüktetés, illetve annak legkisebb eleme látható. A negyed- és a félkotta-alapú metrumok esetében a lüktetést az adott érték adja meg. A nyolcad nevezőjű metrumok esetében általában nem a nyolcad, hanem három nyolcad összeadódásából létrejövő pontozott negyed adja az alaplüktetést. Az ütemmutató számlálójában látható szám az ütemben szereplő lüktetések számát adja meg, ezzel az ütem páros vagy páratlan jellegét is meghatározva. A 6/8 és 12/8 metrumoknál a pontozott negyedek száma megegyező a 2/4-es és a 4/4-es metrum negyedeinek számával, vagyis a főbb ütések miatt a 2/4-nek és a 4/4-nek felelnek meg, de mindegyik ütésen belül három rövidebb ütés található, melyek súlyos-súlytalan-súlytalan arányban oszlanak el.

A következő (7.19. ábra) táblázatban az előző ábrának megfelelően mutatjuk be a legjellemzőbb páratlan metrumokat. A 3/4-es metrum legfontosabb eltérése a 2/4-hez képest az, hogy a súlyos ütemrészt nem egy, hanem két súlytalan

ütemrész követi. Ettől alakul ki a páratlan ütem, annak ellenére, hogy az ütemben lévő három negyedek további, párokba elrendeződő nyolcadokra lehet bontani. A 9/8 metrumnál a pontozott negyedek száma megegyező a 3/4-es metrum negyedeinek számával, vagyis a főbb ütések miatt a 3/4-nek felel meg, de mindegyik ütésen belül három rövidebb ütés található, melyek súlyos-súlytalan-súlytalan arányban oszlanak el.

7.4. táblázat: Páratlan metrumú ütemek és súlyviszonyaik – Páratlan ütemek

ütem- mutató (metrum- jelzés)	alaplüktetés; ütemrészek súlyviszonya	ütemrészek súlyviszonya (lüktetés alapján)	ütemrészek súlyviszonya (ütésen belüli elrendeződés alapján)	hangpélda
3 4	Negyed; súlyos-súlytalan-súlytalan			 7.6. Hang
9 8	Pontozott negyed; súlyos-súlytalan-súlytalan			 7.7. Hang

7.1.4. Aszimmetrikus metrumok

The diagram displays ten examples of asymmetric meters, each with a rhythmic notation and a speaker icon below it:

- 7.8. Hang**: 7/8 time signature, 4 eighth notes.
- 7.9. Hang**: 7/8 time signature, 4 eighth notes.
- 7.10. Hang**: 7/8 time signature, 5 eighth notes.
- 7.11. Hang**: 7/8 time signature, 5 eighth notes.
- 7.12. Hang**: 7/8 time signature, 5 eighth notes.
- 7.13. Hang**: 7/8 time signature, 6 eighth notes.
- 7.14. Hang**: 7/8 time signature, 6 eighth notes.
- 7.15. Hang**: 7/8 time signature, 6 eighth notes.
- 7.16. Hang**: 7/8 time signature, 6 eighth notes.
- 7.17. Hang**: 7/8 time signature, 6 eighth notes.

7.3. ábra: Aszimmetrikus metrumok

Az eddig bemutatott metrumok mellett a XX. századtól kezdve, illetve egyes tradicionális népzeneekben jellemzőek az aszimmetrikus csoportosításra épülő ütemek. Ezen ütemfajták általában páratlan metrumúak vagy az ütésekben belüli felosztás száma változó.

A rövidebb ritmusértékek könnyebb olvasása miatt a zászlókat több hangon átfutó gerendákkal helyettesítik. A gerendák a hangokat két-, három- és többhangos csoportokba rendezik. Az ütemek belső súlyviszonyát tehát a gerendák csoportosításával lehet jelezni. A súlyok nem feltétlenül jelentenek tényleges hangsúlyt, azaz nagyobb hangerőt, de jelzik a metrum tagolását.

A 7.4. ábrán látható, hogy a felsorolt ütemfajták esetében nem pulzáló hangok száma adja az aszimmetrikus metrumot, hanem a rövid értékek csoportosulása. A csoportok kezdőhangjai relatíve súlyosak, melyek együttes időtartama hozzá létre a metrum aszimmetrikus lüktetését. Ebben a formában a csoportokat így kell leírni:

7.18. Hang

7.19. Hang

7.20. Hang

7.21. Hang

7.22. Hang

7.23. Hang

7.24. Hang

7.25. Hang

7.26. Hang

7.27. Hang

7.4. ábra: Aszimmetrikus metrumok hangcsoportok szerint

7.1.5. Változó metrumok

Egy zenemű metrumai bármikor megváltozhatnak. A változó metrumokból álló zene lüktetése lehet egységes vagy változó, az ütemek hossza viszont nem egyforma. A 7.5. ábrán látható, és a hozzá tartozó hangpéldában (7.28. Hang) hallható zenei folyamatban minden ütemben hat hang szerepel. Az ütemmutató szinte minden ütemben változik, rövidebb-hosszabb ütemek jönnek létre. A 7.2-3. táblázatban és 7.20-21. ábrán bemutatott ütemszílyokat a hangmagasságok viszonyaival szemléltetjük. (A hangok sorában a magasabbra lépő hang mindig fő vagy relatív ütemszílyként jelenik meg.) Az ütemmutató váltásával az egyes hangok hossza is módosul.



7.5. ábra: Változó metrumú (és ritmusú) zenei anyag



7.28. Hang

7.1.6. A metrum belső változásai

Még klasszikus, metrikailag nem bonyolult darabokban is jellemző a metrum alkalmankénti megtörése. Gyakori jelenség a „hemiola”, amely a hármas osztású ütem két részre, ill. fordítva: kettes ütemek három részre történő átalakítását jelenti. A kétféle osztás notációja a 3/4-es és a 6/8-os ütem találkozásának felel meg. A XV. századi komponista, Dufay művében (l. 7.6. ábra) szinte ütemről ütemre változik a kétféle metrum. Helyenként még egyszerre is megszólalnak; ilyenkor a három szólamból kettő azonos, a harmadik ettől eltérő metrumban szól. A kétféle metrum megkülönböztetéséhez a gerendák tördelése mellett színekkel és kapcsokkal is megjelöltük a kérdéses helyeket. Zöld szín mutatja a 3/4-es, rózsaszín a 6/8-os metrumokat. Példánk harmadik sorában a felső szólam az ütem két részre bontása mellett hat nyolcadnyi zenei anyagot további két részre bontja a szerző – ezt szaggatott vonallal, valamint a gerendák további tagolásával emeltük ki.



7.6. ábra: Hemiola – Guillaume Dufay: Vergine Bella című művének két részlete

A következő ábrán látható kottapéldán a menüettekre jellemző hemiolát lehet látni. A Haydn-tétel e részletében a 3/4-es ütemek sorát 2/4-es egységek váltják fel. A 2x3 így 3x2-es tagolásba fordul át, melyet a szerző a basszusban hallható harmóniai váltással mutat meg. (A hemiola jellemző helye a 3/4-es menüett zárlat előtti ütemei.)



7.7. ábra: Hemiola – Joseph Haydn F-dúr szonáta (Hob. XVI/9), III. Menuet



<https://www.youtube.com/watch?v=63gMHTdEls> – 1:34-1:43-ig



7.29. Hang

(Ha a szünetek időtartamát is figyelembe vesszük, a ritmus a következő arányokat mutatja: 2:1:1, 2:1:1, 1:1:2, 2:1:1).

A klasszikus zenében ennél bonyolultabb ritmusképletek általában nem a zenei struktúra elsődleges részeként, hanem díszítésként jelennek meg. Nem befolyásolják a zenei történet mélyebb rétegét, hiszen a fő hangok, amelyeket körülírnak, egyszerű ritmusarányra épülnek.



7.9. ábra: Wolfgang Amadeus Mozart G-dúr variációk (KV 455), IX. Variáció – díszített felső szólammal

A 7.9. ábrán látható kottapéldáról leolvasható, hogy az alsó sorba írt mély regiszter 1–2. ütemének hangjai szinkronban szólalnak meg a felső, bonyolult ritmusú szólam hangjaival. Ez adja az idézett példa fő hangjait, míg a többi gyors hang díszítésként jelenik meg.



<https://www.youtube.com/watch?v=iuoOeoMXmGY> – 7:32- 8:00-ig

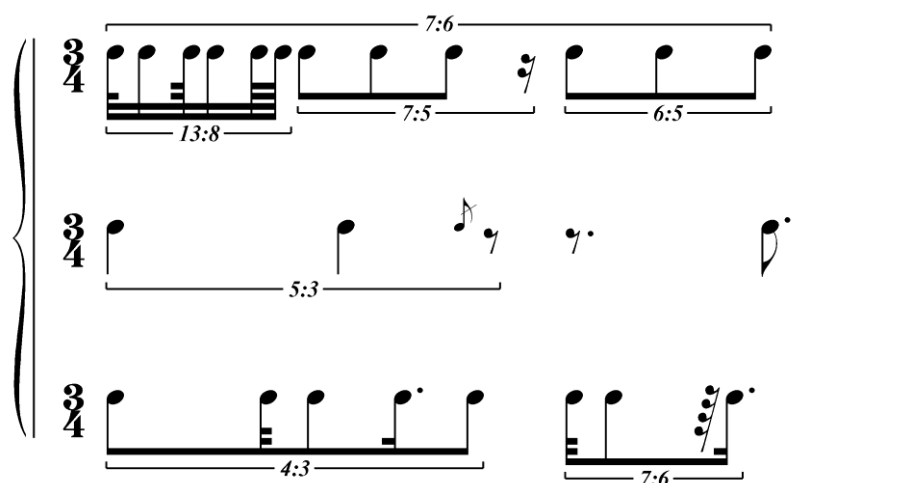
7.2.2. Kortárs zenei ritmustechnikák

A kortárszene ritmusképletei általában jóval komplexebbek, mint a klasszikus zene képletei. A korábbi évszázadok zenéjére jellemző metrikus és ritmikus tulajdonságokkal szemben a kortárs zenei technikákban gyakori jelenség a lüktetés megszűnése, mely a metrikus érzet megszűnéséhez is vezet. Ha nincs állandó lüktetés, a hosszú hangokból álló ritmusok elveszítik arányaikat. A lüktetés irreálisan gyors jelenléte, folyamatos felületté történő elmosódása is kizárja a metrum jelenlétét (l. a 6.1. ábrán látható interaktív példát). Az ametrikus struktúrák önmagukban is lehetségesek, amennyiben a zeneszerző nem metrikus súlyokban, hanem ritmikai arányokban építi fel ritmusképleteit.



7.10. ábra: Metrikus súly nélküli ritmusok Olivier Messiaen *Turangalîla* – *Symphonie* című művéből (I. Introduction, 12. Ciffer)

Jellemző az is, hogy a XX. század előtti zenék ritmuselemeiből olyan képleteket alakítanak ki, amelyek az 1:2:4 vagy 1:3 aránynál komplexebb összefüggésekre épülnek. Az összefüggések szukcesszívan és együtthangzásban is jellemzőek. Izgalmas együtthangzás például két ütés alatt három, öt vagy több hang megszólalása, mely a régebbi zenékben 1:2 vagy legfőljebb 2:3 arányban volt megszokott. A 7.11. ábrához hasonló bonyolultságú ritmuskombinációk jellemzik például Brian Ferneyhough kompozícióit.



7.11. ábra: Bonyolult ritmuskombinációk



7.30. Hang

A komplex ritmusképletek szukcesszív vagy szimultán elhelyezése a metrum és a világos ritmikai kontúr elvesztésével jár. Ennek oka részben a lüktetés

megszűnése. Az alaptempó érzetének megszűnéséhez vezethet a szimultán ritmusképletek nagyfokú sűrűsége is. A különböző időtartamú hangok egymásutánisága olyan bonyolult, élő zenész által szinte megszólaltathatatlan ritmikai alakzatokhoz vezethet, melyeket a hallgató mintegy véletlenszerű hangsorozatként vagy szabadon, deklamálva, rubato (jelentése: szabadon, a hangok idejéből ellopva) játszott hangsorozatként érzékeli.

A rubato érzet nem csak végtelenül bonyolult ritmusképletek, de hosszabb hangok ametrikus folyamatából is származhat. Többek között Kurtág György zenéjében gyakori a szabad, metrum nélküli hangzás jelenléte.



https://www.youtube.com/watch?v=Yur82MHe_Lk – Kurtág: Szálkák 2.
(Sostenuto) (1:04-2.59)

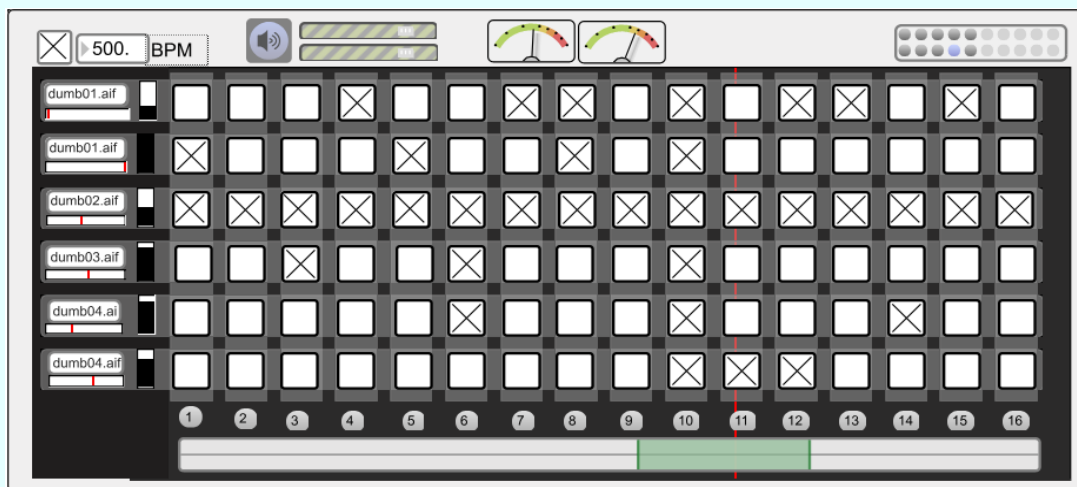
<https://www.youtube.com/watch?v=KHN58vAf3Y8> – Kurtág: Sirató (2) –
Játékok III, (8.41-9.15)

A különböző tempójú illetve különböző metrumú ritmusképletek több szólamban történő együtthangzásából jön létre a **poliritmia**, illetve a **polimetrika**. Miközben a polimetrikus szólamok magukban általában nem túl bonyolultak, együtthangzásukkor komplex ritmust vagy metrumot eredményeznek, mely struktúrájában többrétegű. A poliritmikus vagy -metrikus anyag egybecsengését a hangszín és a hangmagasság is segítheti vagy gátolhatja. A poliritmia és -metrika jellemzően a XX. századi és későbbi szerzők kedvelt eljárása.

Ha különböző ritmusképleteket játszunk le egyszerre, a ritmusok összeadódnak. Az azonos hangszínnel, hangerővel és hangmagasságon megszólaltatott szólamok összeadódása hangzásilag egy szólamot eredményez. Ha azonban az egyes szólamok valamely zenei paraméterben eltérnek egymástól, összeadódásukat legfőljebb ritmikai hasonlóságuk okozhatja. A szólamokból összeadódó ritmust nevezzük **kompozit ritmusnak**. (A kompozit ritmus működését a 7.14. ábrán látható interaktív példával lehet gyakorolni.)

Az azonos alaptempójú, komplex ritmusú kompozit ritmus eredménye hasonló ahhoz a ritmushoz, melynek kiinduló szólamai egyenletes ritmusúak (azaz folyamatosan pulzálnak), míg tempójuk különböző.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



A program általános beállításai a felület felső részén található: ki-be kapcsoló gomb, a BPM-ben megadott változtatható tempó, hangerő potméter, valamint a jobb felső sarokban az előre elmentett példák.

Hat szólamban és hangszínnel lehet kompozit ritmusokat gyártani. A szólamok egymás fölött helyezkednek el. Több hangszín közül lehet választani. A ritmus létrehozásához azonos hangzint is lehet választani. Ennek jelentősége akkor van, ha az egyik szólam hangereje eltér a másiktól. A hangerőt a hangszer neve alatt lehet változtatni. A hangszernevek mellett található négyzetek ki-be kapcsolásával lehet beállítani, hogy az adott helyen álló hang megszólaljon vagy ne (üresen marad). Az alaptempó beállítása határozza meg az egymást követő négyzeteken való „végigszaladás” sebességét. Vagyis az adott program egy tizenhat hanghelyből álló loop-szekvencer, melyben hanghelyek találhatóak. Bizonyos tempóban már egy szólamban is izgalmas ritmikus alakzatokat lehet felépíteni. A különböző hangszerekkel létrehozott kompozit ritmus előnye azonban az, hogy hangszínekeveredés jön létre. A tempó módosításával hangszíndallam (lassabb tempó) és folyamatos kompozit ritmus között mozoghatunk. „Lukacsos” felületet használva (sok üres hanghely minden szólamban) pedig komplikált ritmusokat lehet létrehozni.

A felület alsó sávján be lehet állítani, hogy a tizenhat hangból álló sorozat mely szakaszát játssza le a program. A zöld csík kezdő és végpontjának változtatásával az ismételt szakasz hosszának módosításával befolyásolható az ismétlés ideje.

Az előre elkészített példák közül a felső sorban lassabb, az alsóban gyorsabb alaplétketésű kompozit ritmusokat lehet meghallgatni.

7.12. ábra: Kompozit ritmusok

(A 7.12. ábra interaktív példájával modellezni lehet többek között Messiaen ütőhangszeres ellenpontjait – l. *Turangalîla – Symphonie* – vagy Ligeti György kései műveinek ritmikai összetevőit – l. *Etudes for piano*.)

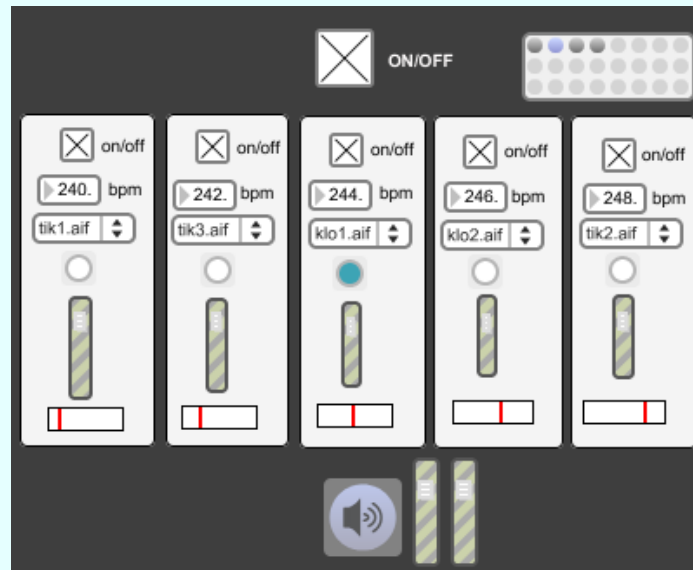
Ha az egyenletes lüktetésű, de eltérő tempójú szólamok tempóaránya egész számú többszöröse egymásnak, az eredmény egy olyan ritmusképlet lesz, mely önmagában is csak egész számú ritmusarányokat fog tartalmazni. (Feltéve, hogy a legrövidebb elem az alapritmus.) Ennél bonyolultabb, sűrűbb hangzású ritmikai hálót lehet kialakítani nem egész számú tempóarányok segítségével.

A 7.13. példa példa egyik lehetséges akusztikus realizációja Ligeti György 100 metronómra írott *Poème Symphonique* című kompozíciója. E darabban Ligeti egyenletes ritmusú, különböző alaptempójú ritmusokat használ. A tempók relációja sokféle, ezért a végeredmény

- sok metronóm együtthangzása esetén folyamatos, sűrű zaj,
- kevés metronóm együtthangzása esetén granulált textúra,
- néhány metronóm együtthangzása esetén furcsa, bonyolult, állandóan változó gyors ritmusképlet,
- két-három metronóm együtthangzása esetén botladozó, lassú, rendezetlen ritmusképlet.

<https://www.youtube.com/watch?v=QCp7bL-AWvw> – Ligeti György: *Poème Symphonique* pour 100 metronomes

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



Egyenletes, de különböző tempók együtthangzását lehet gyakorolni ebben az interaktív példában. Az általános ki- és bekapcsológomb, az előre elkészített példák és a hangerő potméter használata mellett öt szólam külön beállítására (az egyes szólamok a felület közepén), külön ki- és bekapcsolására, tempó, hangszín, hangerő és panoráma (sztereó) beállítására van lehetőség.

A legfontosabb paraméter a különböző hangszínek és tempók kiválasztása, megfigyelése. Ha a tempók aránya egymás egész számú többszöröse, a kialakuló kompozit ritmus ciklusa aránylag rövid, az ismételtetésnek könnyen felismerhető közös tempója lesz. Érdekes azonban olyan tempóarányokkal is próbálkozni, melyek aránya inkább irracionális: ekkor a hangzó eredmény ametrikus lesz (l. az interaktív feladat 4. példájában).

Egymáshoz közeli tempók beállítása esetén eleinte „kiterülő, elmosódó” hang hallható a finom eltolódás következtében, majd folyamatos fáziseltolódásos hangzást lehet hallani. (Erre mutat példát a 3. beállítás.) Az egymáshoz közeli tempókat érdemes azonos hangszínnel is meghallgatni.

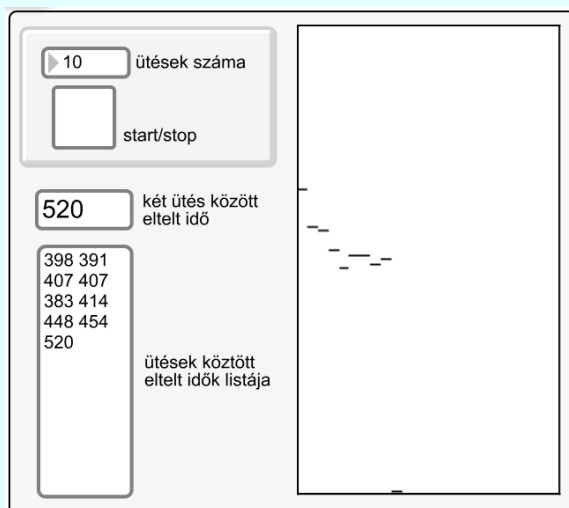
7.13. ábra: Különböző tempójú egyenletes pulzációk összeadódása

7.3. A számítógép és a ritmus

Számítógép segítségével mind a tempó változtatása, mind a különböző tempók szimultán lejátszása, ill. azokban komplex ritmusok keverése lehetséges. A kvantálással (azaz pontosítással) ellátott programok előnye, hogy bonyolult ritmikai összefüggések teljesen pontos megszólaltatására is mód van, így a komplex ritmusok hangzását, azok extrém ritka vagy sűrű megjelenését is meg lehet hallgatni. A tökéletesen pontos ritmusokból hiányzik az akusztikus zenére jellemző rugalmasság, amitől gyakran rigidnek, embertelennek érezzük a számítógéppel létrehozott ritmusokat. Megfelelő programozással, véletlenszerű

szétzilálással „humanizálni” lehet az egyébként mindig egyformán pontos értékeket. Hogy az emberi ütések mennyire pontatlanok (vagy pontosak), azt a 7.14. ábra interaktív példáján lehet kipróbálni.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



Ebben az interaktív példában tesztelhetjük, mennyire vagyunk képesek egyenletesen kopogni. A példa felső részén beállítható, hogy hány ütésből álló sorozatot kívánunk vizsgálni. Alatta a start/stop gomb megnyomása után az első leütéstől számítva indul a teszt. A leütésekhez a „space” (szóköz) billentyűt kell használni. A kiválasztott ütésszám realizálása után a számláló leáll.

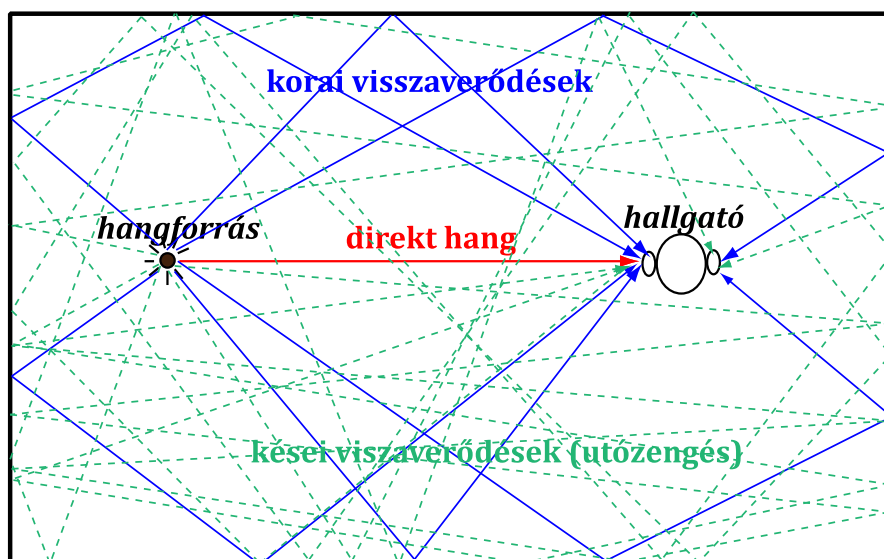
Ekkor grafikusán (a felület jobb oldalán) láthatjuk, milyen széles skálán mozgott a tempónk, azaz mekkora eltérések adódtak leütéseink ideje között. (A grafikon függőleges tengelyén láthatóak a különbségek, a vízszintes tengelyen az egymást követő leütések balról jobbra.) Az ábra bal oldalán a legutóbbi leütések között eltelt időt lehet látni. A sorozat végeztével a bal alsó sarokban lévő táblázatban a program felsorolja az összes időközt, melyből parametrikusan is kiolvasható az értékek közötti eltérés

7.14. ábra: Teszt az egyenletes ütések megvalósítására

8. Az akusztikus tér

8.1. Az akusztikus tér érzetét meghatározó tulajdonságok

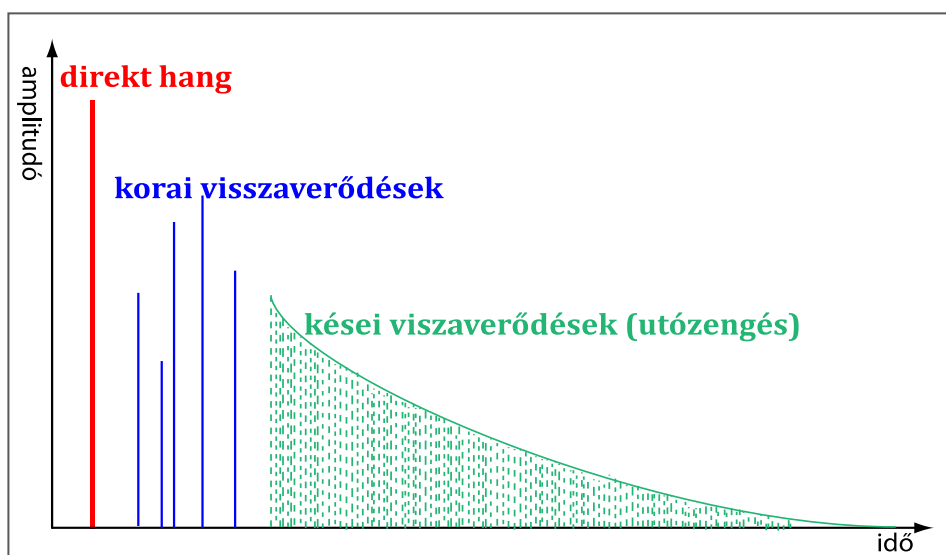
Akusztikus térérzékelésünk abból adódik, hogy a hang nemcsak vonalban, hanem hullámszerűen, minden irányba terjed, és eloszlik a körülöttünk lévő térben, amit – köszönhetően annak, hogy két fülünk van – képesek vagyunk érzékelni. Az egyes hangforrások által kibocsátott hangok közvetlenül (direkt) és visszaverődéseken keresztül (indirekt) módon érkeznek el a hallgatóhoz.



8.1. ábra: Hang visszaverődései zárt térben

8.1.1. A direkt hang és a visszaverődések

A zárt térben elhelyezkedő hangok megszólalását három szakasz jellemzi: a direkt vagy közvetlen hang, a korai visszaverődések és a diffúz mező (kései visszaverődések). A különböző fázisokat a terem impulzusválaszának (másképp: echogram) ábrázolásával lehet reprezentálni (l. 8.2. ábra). Az impulzusválasz méréséhez a terem nagy teljesítményű impulzussal (pl. riasztópisztoly hangja) gerjesztik, és a keletkező hangot elemzik.



8.2. ábra: Impulzusválasz (echogram)

8.1.1.1. A direkt hang

A **direkt hang** az a hullám, amely egyenesen, a lehető legrövidebb úton és idő alatt ér el a forrástól a befogadóhoz, míg az indirekt hangok „kerülő úton”, az útjukba eső felületekről akár többszörösen is visszaverődve, tehát hosszabb idő alatt és módosulva teszik ezt. Szabad téren a hangok mindig direkt terjednek, feltéve, hogy nem kerül az útjukba semmilyen tereptárgy. A szabadtéri hangok áramlása megegyezik a direkt hangokéval. A direkt hang megszólalásának időpontját ismerve kiszámolhatjuk, mikor éri el hallgatóját, hiszen ismerjük a hang terjedési sebességét, valamint a forrás és a befogadó távolságát. A direkt hang nem csak azért fontos, mert ez érkezik el először a befogadóhoz, hanem azért is, mert ez hordozza a megszólaló hangban lévő legtöbb módosítatlan információt. A direkt hang a távolság hatására módosul, a távolság növekedésével négyzetesen csökken intenzitása.

8.1.1.2. A korai visszaverődések

A zárt terekben számos olyan felület (elsősorban a terem falai) található, mely megváltoztatja a hang útját. A terem oldalfalairól, padlójáról és mennyezetéről leggyorsabban visszaverődő néhány hangot **korai visszaverődésnek** nevezzük. A visszaverődő hangok időben és térben is elválnak a direkt hangtól, és közvetlen összefüggésben vannak a helyiség méretével, alakjával és a visszaverő felületet borító anyag tulajdonságaival. A korai visszaverődéseket használja fel hallásunk arra, hogy megállapítsa, mekkora a terem, milyen távolságra és irányban található a hangforrás, illetve észlelje annak pozícióbeli módosulását.

Ha a korai visszaverődési idő hosszabb, mint 30 msec, a fülünkben különvlik a direkt hang a visszavert hangtól, aminek eredménye, hogy visszhangot vagy ekhót hallunk. Ez akkor következik be, ha a visszaverő felület 10 méternél nagyobb távolságra van. A jó **késleltetési idő** kellemes érzéssel, a meghittség

érzetével tölti el a hallgatót. A korai visszaverődések interferenciát is okozhatnak, mely a hang színezetének jelentős megváltozását idézi elő.

8.1.1.3. A kései visszaverődések vagy diffúz mező

A direkt hang és a korai visszaverődések utáni fázis a diffúz visszaverődés. A többszörösen visszaverődő hang több irányból érkezik a hallgatóhoz. A visszaverődések időben közel vannak egymáshoz, ezért olyan sűrűséget érnek el, melyet már csak statisztikai módszerekkel lehet jellemezni.

Mivel a diffúz visszaverődésnek köszönhető, hogy a hang egyenletesen tölti meg a teret, a hallgatót körülvevő hang élményét és a hang zenei minőségét is e jelenségnek köszönhetjük. A diffúz visszaverődések okozzák egy térben a különböző hangzások összekeveredését is, ezért zenehallgatáshoz a hosszabb diffúz szakaszt létrehozó terek alkalmasabbak, mint beszélt szöveg megértéséhez.

8.1.1.4. Az utózengés

Az utózengés az a jelenség, amikor a hang a hangforrás lekapcsolása után is érzékelhető egy ideig. Gyakorlatilag a direkt hangtól a kései visszaverődések megszűnéséig tart. Az utózengési idő definíció szerint az az időtartam, amely alatt a teremben létrehozott hangteljesítmény a hang megszűnése után 60 dB-t csökken. Az utózengési időből lehet következtetni a terem méretére és típusára: koncerttermekben 1,5–2,2, színházakban 1,0–1,5, stúdiókban 0,2–0,6, süketszobákban pedig kisebb mint 0,05 másodperc hosszú.

8.1.2. A hang visszaverődései és a felület tulajdonságai

A visszaverő felület távolságán kívül formája és anyaga is befolyásolja a hang módosulását.

8.1.2.1. A visszaverő felület formájának hatása a visszaverődésekre

A hanghullámok visszaverődéseinek viselkedése nagyban a függ a felület formájától.

Az egyenes felületek a beérkező hanghullámokat a beérkezési szögnek megfelelően verik vissza. Ha a hanghullám egy egyenes felületre merőlegesen érkezik, merőlegesen is távozik. Ennek következménye a **csörgővisszhang** jelensége, mely olyan terekben alakul ki, ahol a falak egyenesek és egymásra merőlegesek, illetve egymással szemben (oldalt vagy alul-fölül) párhuzamosak és rossz csillapítással rendelkeznek. Az ide-oda verődő, egymást gyorsan követő és fokozatosan gyengülő hang csörgővisszhangot hoz létre (8.1 hangpélda).



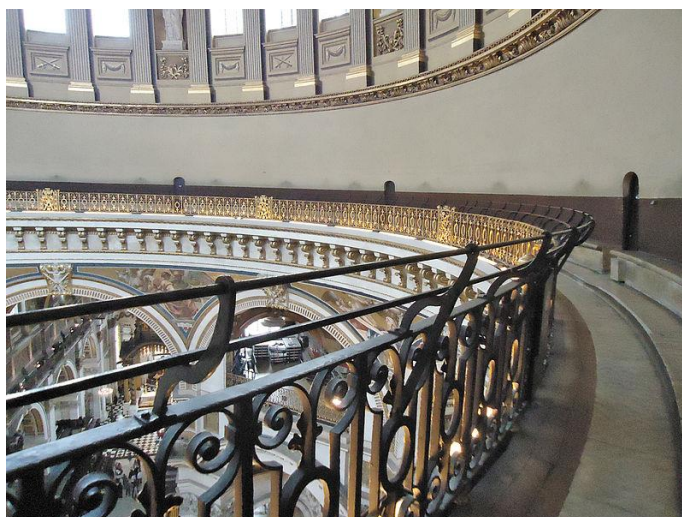
8.1. Hang: csörgővisszhang

A görbült felületek a hanghullámokat képesek összegyűjteni vagy szétszórni. A domború felületek szétszórják, a homorúak pedig összegyűjtik a visszaverődő hullámokat. A visszaverő felület ezáltal képes erősíteni vagy gyöngíteni a hang energiáját, és különböző irányokba képes a hangot „terelni”, alakjától függően.

Tipikus felerősítő felület például a fókuszáló tulajdonsággal rendelkező íves felszín. Jól ismerjük a jelenséget, amikor egy kör alakú, mi több, kupolás tetejű teremben mindenhol visszaverődnek a hangok, és az ott tartózkodó emberek beszélgetését, suttogását ki lehet hallgatni. Ezen az elven működik pl. a hangtükör is, a hanghullámok fókuszálására és felerősítésére használt berendezés, melyet a hadviselésben az ellenséges repülőgépek előrejelzésére használtak.



8.3. ábra: Homorú felület – első világháborús hangtükör (Kilnsea, GB)

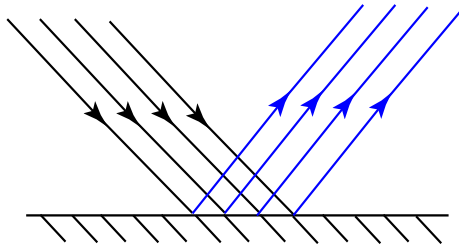


8.4. ábra: Homorú felület – Szent Pál-székesegyház, suttogó galéria

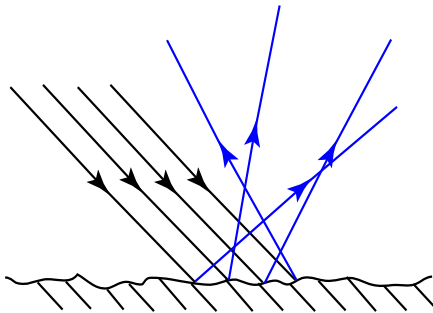
Különleges jelenség az ún. suttogó galéria, melynek működését először a londoni Szent Pál-székesegyház kupolájának erkélyén figyeltek meg. Itt a hang körben terjed, azaz körbefut az erkélyen, az oldalfal mellett állva még az

egymástól távol állók is világosan értik egymás suttogását, míg a kupola átmérőjének irányában kiabált szöveg érthetetlen.

Diffúz visszaverődés elsősorban ún. diffúzor, azaz szétszóró felületekről jön létre. A töredezett, többféle alakú felületek kifejezetten diffúzak, ezért a beérkező direkt hullámokat részekre bontva szórják szét (l. 8.6. ábra). A szétszóródó hanghullámoknak köszönhetően nem jönnek létre olyan direkt visszaverődések, csörgővisszhangok, állóhullámok, amelyek zavaróan változtatják meg a hang jellegét, hanem a hangzás körbe tudja ölelni hallgatóját, visszaverődésekkel betérítve a teret.



8.5. ábra: Visszaverődések egyenes felületről



8.6. ábra: Visszaverődések diffúz felületről

8.1.2.2. A visszaverő felület anyagának hatása a visszaverődésekre

A visszaverődést a visszaverő felület alakja mellett annak anyaga is meghatározza. A visszaverődés ellenpólusa az **elnyelés**. Az egyes tárgyak elnyelési együtthatója mutatja meg, hogy a tárgyba beleütköző hang energiájának mekkora része alakul át. Az elnyelési együttható jele: α .

A kemény anyagú, sima felületű tárgyak általában visszaverik, míg a puha, porózus felszínűek elnyelik a beérkező energia nagy részét. Gyakorlatilag nincs olyan felület, amely teljes mértékben visszaverné a hanghullámokat, azaz minimális elnyelés minden anyagra jellemző. A tökéletes elnyelést az ún. süketszobában lehet meg tapasztalni (8.7. ábra). A süketszobát úgy tervezik, hogy minden fala elnyelő anyagból készül, és sima felület egyáltalán nem található benne (8.8. ábra).

Az elnyelés mértéke frekvenciafüggő. A 8.1. táblázatban egyes felületek elnyelési együtthatóit láthatjuk. Az adatokból kiolvasható, hogy a magasabb frekvenciákon általában nagyobb az elnyelés mértéke. (A nagyobb együttható nagyobb mértékű elnyelést jelent az adott frekvencia mellett.) A porózus

anyaggal fedett szilárd falak elnyelik a magas hangokat, de visszaverik a mélyeket; e felületeket szoprán elnyelőnek nevezzük. A falambéria ezzel szemben basszuselnyelő, tehát a mély regisztereket tünteti el. A legmélyebb összetevők elnyeléséhez üreg elé rakott masszív panelekre van szükség. A középfrekvenciák elnyelésére legjobban a perforált lambéria és a szellőzőblokk szolgál.



8.7. ábra: A berlini Technische Universität süketszobája



8.8. ábra: Süketszoba falának anyaga, alakja közelről

8.1. táblázat: Különböző anyagok elnyelési együtthatója

felület	Frekvenciák					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Függöny	0,14	0,36	0,57	0,72	0,7	0,62
Fapadló	0,14	0,12	0,09	0,08	0,06	0,07
Faemelvény levegőréteggel	0,39	0,29	0,22	0,17	0,16	0,2
Csempe	0,08	0,25	0,55	0,68	0,72	0,7
Ablaküveg	0,34	0,25	0,18	0,12	0,08	0,04
Márványcsempe	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Üveggyapot perforált farostlemez mögött	0,1	0,35	0,85	0,85	0,35	0,09

8.1.3. A hang irányának érzékelése

A hangok irányát fejünk, fülünk, orrunk alakja és elhelyezkedése segítségével tudjuk megállapítani. A hang háromdimenziós betájolása szempontjából fontos, hogy két füllel hallunk, mivel a hangforrás(ok) helyét két pont viszonyával lehet bemérni. A két fülbe a hangok eltérő hangerővel és különböző időpontokban érkeznek. Ezt az információt az oldalirányok megkülönböztetésére használja fel hallásunk. Az elöl, hátul, alul, felül megszólaló hangok pozícióját a fej, az orr, a fülek és a haj árnyékoló hatásának köszönhetően a szűrt hang színezete alapján azonosítjuk. Léo Kupper térérzékelési képességeinket vizsgáló kutatása azt mutatja, hogy fülünkkel, e nem túl bonyolult és magában nem mozgatható szervvel is képesek vagyunk a térben nagyon pontosan érzékelni az irányokat. „Térérzékelés a komputervilág idejében” című cikkében Kupper leírja, hogy kísérletei során egy hangkupolában a hallgatók 3151 pontot tudtak megkülönböztetni.

Mivel az agy pontosan tudja, hogy a fülkagyló pozíciójához képest merre helyezkednek el a hangforrások, könnyen becsapható ún. műfülkagyló segítségével. A fülhöz kapcsolt műfülkagylót hátrafelé fordítva vagy a két kagyló helyét felcserélve lokalizációs képességünk a kagyló helyének megfelelően átalakul. Tarnóczy Tamás Zenei akusztika című könyvében a saját kísérletére hivatkozva írja le, hogy „ha a két fülbe kis rézcsövet dugunk, s annak külső végére plasztilból készített műfülkagylót húzunk, továbbá ezeket a kagylókat hátrafelé irányítjuk, az elöl-hátul érzékelésünk felcserélődik.”⁷

8.2. A teremakusztika tudományának kezdeti fázisa

Az épített terek hangzásképeinek kialakításában az 1900-as évek óta az akusztikusok nyújtanak segítséget. A teremakusztika viszonylag friss tudományág, fejlődésének kezdeteit Wallace Clement Sabine (1868–1919) nevéhez kötjük. Sabine fizikusként dolgozott, többek között a Harvard Egyetemen, Bostonban. 1895-ben az egyetem Fogg Art Museumának előadótermét tanulmányozva jutott el oda, hogy kijelenthesse, egy terem jellegét annak mérete mellett visszaverődései és elnyelési tulajdonságai határozzák meg. Munkája elismerésül róla neveztek el **sabinnak** a hangelnyelés mértékegységét.

Sabint kísérletei és az előadóterem akusztikájának módosítása érdekében végzett munkája alapján felkérték, hogy legyen a bostoni Symphony Hall akusztikai szaktanácsadója. Az 1900. október 15-én felavatott koncertterem volt az első, melynek terét akusztikai előszámítások segítségével tervezték, és máig a legjobb akusztikájú termek között tartják számon.

⁷ Tarnóczy Tamás: *Zenei akusztika*. Zeneműkiadó, Bp. 1982. 230–231. oldal (Eredeti forrás: TamásTarnóczy, *Über den "Vorwärts-Rückwärts" – Eindruck*. *Acustica* 8, 343 (1958))



8.9. ábra: Wallace Clement Sabine

A hangversenyertermek akusztikáját csak a XX. század óta tervezik tudományos módszerekkel. Az ennél korábban épített terek hangzását tapasztalati úton alakították. (Bővebben l. 9.1.1. szakasz.) Manapság a speciális célokra (pl. hangverseny, konferencia) használt épületeket kizárólag akusztikusok bevonásával tervezik, és a terem funkciója szerint alakítják ki az akusztikai körülményeket. A beszéd megértéséhez a száraz, visszhangmentes terek ideálisak (max. 1 sec utózungés), ahol az elnyelés nem túl nagy. Koncerttermekben inkább a közepesen hosszú utózungéssel (kb. 1,5-2 sec.) rendelkező, puha visszaverődések előnyösek. A mai stúdiótechnika lehetővé teszi az utólagos digitális térélmény megteremtését, ezért a stúdiókat inkább a száraz, visszaverődés-mentes hang jellemzi.

A „jó akusztikájúnak” nevezett koncerttermek feltételei:

- a hangerő a tér minden pontján legyen megfelelő (kiegyenlített),
- a hang eloszlása egyenletes legyen mind a hallgatók, mind az előadók közelében (közönség és színpad viszonya),
- a visszaverődés az előadott zeneműnek megfelelő legyen (szubjektív érzet és stílus),
- a korai visszaverődés ne érkezzen túl későn.

9. A hangzáster modellezése

„Először mi alakítjuk a lakhelyünket, később a lakhelyünk alakít minket.”
(Winston Churchill beszéde a Brit Parlament Alsóházában 1943. október 28-án)

A zene megszólaltatását befolyásolja akusztikai környezete. Ennek megfelelően az akusztikus terek építése összefügg azzal, milyen zenét játszanak bennük. A zene történetében nagyon sokáig a zene idomult a környezethez. (A szabad téren és a zárt terekben játszott zenének más-más jellege volt. Előbbit általában hangszeleken, többen, egyszerűbb zenei összefüggésekkel, utóbbit kevesebben, halkabban és komplexebb zenei struktúrában komponálták és adták elő.) Az akusztika térhódításával (l. 8.2. fejezet) olyan zenei terek építése kezdődött meg, melyeket általános zenei szempontok figyelembevételével terveztek. A XX. századi zene műfaji és térhasználati sokfélesége kapcsán felmerült olyan terek építésének szükségessége, melyek akusztikus jellege változtatható.

9.1. Terek akusztikus építése, módosítása

9.1.1. Görög színházak

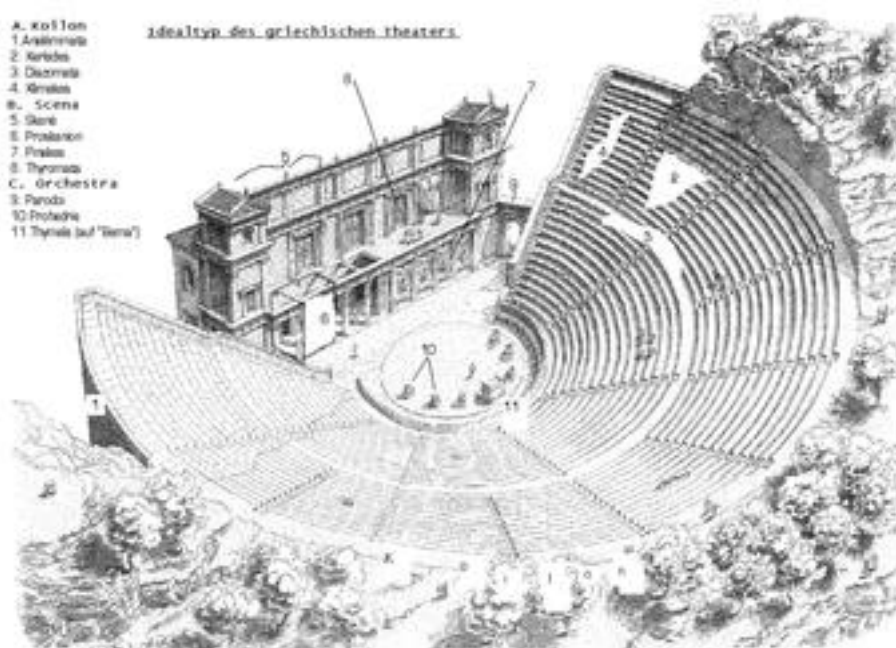
Az antik görög tudósok közül többen foglalkoztak a hang akusztikájával (pl. Pütagorasz), a színházak építésével kapcsolatos akusztikai feljegyzések nem maradtak fent.

A görög színházak építésekor nagy szükség volt matematikai számításokra mind a színpad, mind a nézőtér méretei miatt. Előbbi kb. 25 m átmérőjű, utóbbi pedig akár 14 000 fő befogadására is alkalmas volt. Az antik színház közepén kör alakú rész szolgált színpadként, melyet félkörívben domboldalba vájt „teatron”, azaz nézőtér vett körül. A nézőtér távolságától függően, különböző anyagokat felhasználva segítették a hang terjedését: az első sorokban faülések voltak, a távolabbi helyekre kőköveket helyeztek a hangvisszaverődés érdekében. A nagy távolság ellenére jól lehetett hallani a hangszerek és énekesek hangját, és pontosan lehetett érteni a színészek beszédét.

I. e. 425-től kezdve kőfalat építettek a színpad hátuljára, mely dramaturgiai szerepe mellett hangvetőként is funkcionált. (Ezt vették át a reneszánsz itáliai színházak.)



9.1. ábra: Antik görög színház



9.2. ábra: Antik görög színház szkénével

9.1.2. Velencei iskola

Míg a görög színházak az előadott darabok igényeihez alkalmazkodva épültek, addig a keresztény templomokban az akusztikához idomult az egyházi zene. Az egyház hatalmának erősödésével párhuzamosan egyre nagyobb méretű templomok épültek, melyek építészeti körülményei befolyással voltak a zene kompozíciós eszközeire.

A zene és annak térbeli megszólalását szemlélteti a velencei Szt. Márk-székesegyház és a „velencei iskola” komponistáinak kapcsolata. E térnek köszönhető a polifón többkórusosság, azaz az időben és térben válaszoló zenei kompozíció megjelenése. A bazilika erkélyeinek elhelyezkedése, távolsága, a hang visszaverődési ideje a térnek megfelelő kompozíciók írására serkentette a templom zeneszerzőit. A visszhang és a távolságok miatt ugyanis nem lehetett szinkronban

tartani a zenészeket, ezért a megoldást a responzoriális (válaszolgatásra épülő) komponálás jelentette. A műfaj kiemelkedő zeneszerzőjének a XVI. század végén élt velencei komponistát, Giovanni Gabrielit (1554/57–1612) tekintik. Gabrieli nagyszabású és sűrű hangzású térbeli kompozícióinak némelyike négy-öt hangszercsoportra íródott.

Hangpélda:

[G. Gabrieli Magnificat 14 szólamra, 4 hangszercsoportra](#)
[Monteverdi: Vespers](#)

Úgy tudjuk, J. S. Bach Lipcsében írott kantátáinak, passióinak előadását is meghatározta a Tamás-templom belső tere. A falakat fával burkolták, ezért a megszokotthoz képest rövidebb volt az utózengés, melynek következtében lényegesen gyorsabb tempókban is érthető maradt a zene.

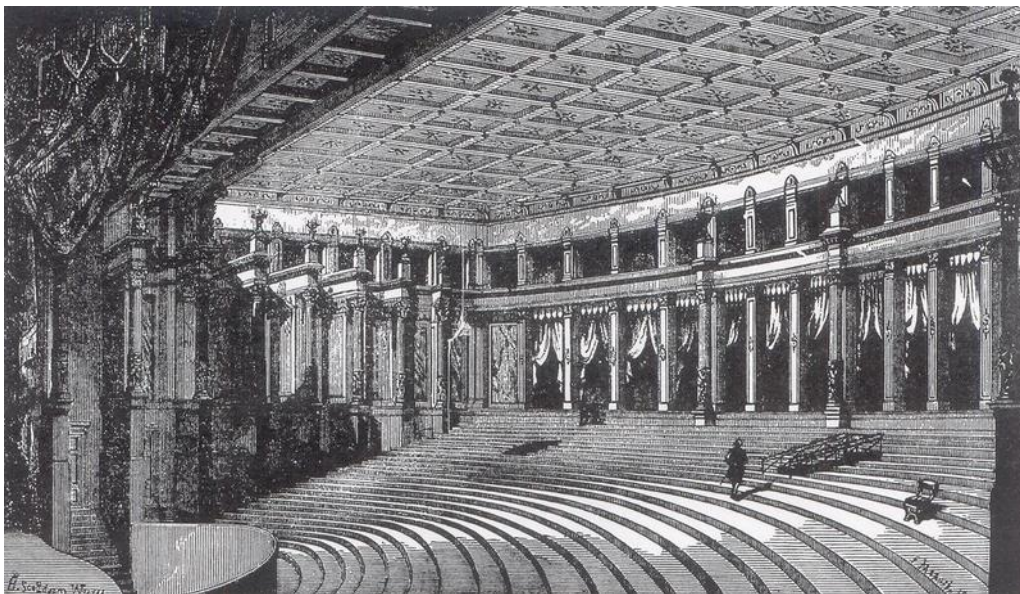


9.3. ábra: A velencei Szt. Márk-székesegyház orgonakarzatai

9.1.3. Opera – zenekari árok

Az opera mint speciális színházi műfaj olyan akusztikai teret igényel, melyben – a görög színházhoz hasonlóan – a nézőtér minden pontjának vizuális és akusztikus kapcsolata van a színpaddal. Az opera műfajának sajátossága a prózai színházhoz képest az, hogy a színpadon énekelnek, és az énekeseket hangszerek, többnyire zenekar kíséri. Az énekeseket látni és hallani is kell, ezért a zenekart a színpad előtti zenekari árokban helyezik el. Az énekesnek azonban arra is szüksége van, hogy a zenekart hallja, és azzal pontosan együtt tudjon énekelni. E

speciális problémát egyedülálló módon közelítette meg Richard Wagner, amikor úgy döntött, operái előadásához speciális térre van szüksége, melyben zenei és akusztikai szempontjai találkoznak. A Wagner által Bayreuth városába megálmodott, majd felépített operaház máig is kizárólag a Wagner-operák előadására specializálódik. Míg a görög színházakat a drámákhoz építették, a velencei kompozíciók pedig egy adott térhez készültek, addig a bayreuth-i operaház és Wagner operái az akusztikai és a zenei problémák együttes megoldásának ritka (ha nem az egyetlen) példája.



9.4. ábra: A bayreuth-i Festspielhaus patkó alakú nézőtere

Az 1876-ra felépült operaház belül elsősorban faanyagot használ, mely jelentősen segíti az akusztikát. Több mint 1900 főt befogadó nézőtere patkó alakú, ennyiben a görög színházakra emlékeztet, nem a hagyományos operaházakra. Süllyesztett zenekari árka a XIX. században újdonságnak számított. Bár Wagner esztétikai szempontok miatt is fontosnak tartotta az árkot, akusztikailag remekül működik.

A zenekari árkot a színpad alá süllyesztve, hangárnyékoló csuklyával elfedve építették meg. Ezáltal a zenekar egyrészt nem látható, másrészt épp annyira takarja el a zenekar hangját, hogy az énekesekkel dinamikai egyensúlyba tud kerülni. Miközben az énekesek felől direkt hang érkezik a közönséghez a zenekar felett, az árokból jövő zenekari hangzást visszaverik és megszűrik az árok felületei. A wagneri nagyzenekar nem „takarja” az énekesek hangját, hiszen a süllyesztett árokban a hangosabb, intenzívebben sugárzó hangszerek (réz- és fafúvósok) hátrébb és lejjebb ülnek. A szűrt, de színeiben továbbra is összetett zenekari hangzás a színpad előtti hangvetőről a színpadra irányul, ahonnan az énekesek hangjával keveredve már mint diffúz, visszaverődő hang jut ki a nézőtérre. (A zenei szinkron megteremtése emiatt komoly nehézséget jelent az előadók számára.).

9.1.4. Koncerttermek

A XIX. század során kialakultak a máig használatos koncerttermek átlagos méretei és jellemző alaktípusai. A színpad méretét a szimfonikus zenekarokhoz, a nézőtér méretét pedig ehhez mérten határozták meg. A „cipősdoboz” modellnek nevezett, téglalap alakú termekben a közönség nagy része a színpaddal szemben, attól látványosan elválasztva foglal helyet. E termek befogadóképessége eléri akár az 1800-2000 főt. Mind akusztikai, mind praktikus okokból azonban a koncerttermek tervezői kisebb-nagyobb mértékben eltérnek az egyszerű, téglalap alapú termék építésétől.

Kedvelt típus a „szőlőskertnek” becézett koncertterem, amelyben a közönség teraszosan emelkedve, a színpadot körbevéve foglal helyet. E koncertterem első példája az 1963-ban épült, 2200 férőhelyes berlini Filharmónia. A vizuálisan is különleges élményt a hangvisszaverődések gazdagsága jellemzi, ami a konvex falszakaszoknak és a sátorszerű alakzatnak köszönhető.

9.1.5. Moduláris termék, ahol az akusztika és/vagy az ültetés szabadon változtatható

A XX. századi zenék speciális térbeli megoldásai szinte kikövetelték maguknak, hogy olyan koncerttermek épüljenek, melyeket komoly akusztikai tervezések előznek meg, és amelyek vagy többféle térbeli formáció előadására is alkalmasak, vagy egyedi jelleggel bírnak. A technológiai fejlődés lehetővé tette a mozgatható falakkal, hangvetőkkel ellátott hangversenytermek kialakítását.

Az első változtatható akusztikájú termet a párizsi IRCAM-ban építették 1978-ban. A terem mérete (alapterülete legnagyobb formájában 24x15,5 m), alakja, és a falak elnyelési együtthatója módosítható, ezért koncertre, stúdiófelvételekre és akusztikai kísérletekre is alkalmas. A terem plafonját három különálló panel segítségével lehet mozgatni, így a belmagasság 1,5–10,5 m között változtatható. A kisebb-nagyobb tereket görgős függönnyel lehet egymástól elválasztani. A falak és a plafon háromszög alapú hasábokból áll, melyek tengelyük körül forgathatók. A hasábok egyes oldalait elnyelő, visszaverő és diffúz felületekkel látták el. A független vezérléssel ellátott rendszer 171 elemből áll. A forgatható hasábok segítségével a korai és a kései visszaverődések mintázata, valamint visszaverődési idő mértéke is változtatható. A beállítások segítségével a visszaverődési idő 0,4–4 másodperc közötti lehet. A terem akusztikai körülményei számítógépes vezérléssel gyorsan, akár koncert közben is változtathatóak, így a tér paraméterei a kompozíció részévé válhatnak.

9.2. Az elektroakusztikus hangosítás tervezése

Az elektroakusztikus rendszerek elterjedése alapjaiban változtatta meg a hangzások térképzéseinek lehetőségeit. A hangosfilm kialakulásával párhuzamosan az

1930-as években megszületnek a „publikus hangosítórendszerek” (public amplification = P.A.), melyek saját téralkotó módszereket igényelnek.

9.2.1. Monó-sztere, quadro, surround

A sztereofónia a sztereoszkópia szó mintájára jött létre, ami összefoglalja azokat a képalkotási módszereket, amelyek segítségével a térlátás illúziója kelthető. Kezdetben a sztereó hang kifejezés minden olyan módszert magába foglalt, ahol egy hangcsatornánál többet használtak annak érdekében, hogy térhatású hangzást hozzanak létre. A kétcsatornás rendszerek elterjedésével a sztereó kifejezés kizárólag a két független csatornát alkalmazó lejátszókra vonatkozik.

A sztereó technika a bal és jobb oldal közötti teret képes tagolni.



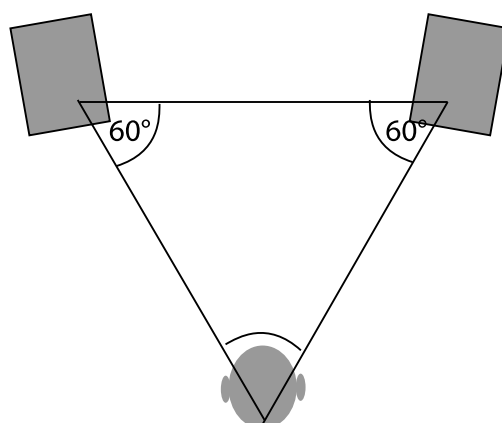
9.1. Hang

A tárgy mozgatásával a mikrofon előtt vagy különböző mikrofonozási és hangátalakító technikákkal a hangzás mélységét is lehet formálni, így frontálisan kettőnél több dimenzió is kialakítható segítségével.



9.2. Hang

A sztereó hangzást egy pontból (sweet spot) lehet tökéletesen élvezni, ami a két hangszóró fókuszpontja, azaz a két hangszóró távolsága által kijelölt egyenlő oldalú háromszög csúcspontján helyezkedik el (9.5. ábra).



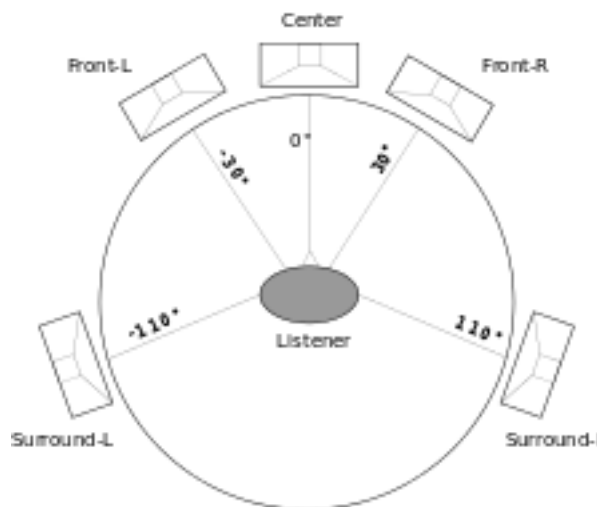
9.5. ábra: Ideális sztereó hallgatási pont

A hallgatói tér kitágítása a 3 dimenzió minden irányába a quadrofón technikával kezdődött, mely 4 független csatorna segítségével, a bal és jobb oldalon

túl az elöl és hátul érzetét is megteremti. Az első kvadrofón technikával készült elektroakusztikus zenei mű Karlheinz Stockhausen 1956-ban írt *Gesang der Jünglinge* című darabja.

A kvadrofón hangosítás ideális hallgatási pontja a négy hangszóró által kijelölt négyzet középpontja.

A kvadrofón, azaz a hagyományos 4.0 elnevezésű rendszert a mára leginkább elterjedt 5.1-es rendszer váltotta fel. A hallgatót körbevevő öt csatornáról lejátszott hang mellett egy mélynyomó hangfal és sáv szükségeltetik (l. 9.6. ábra). Bár e szisztéma mára a mozikban és házimozirendszerekénél is elterjedt, sőt 7.1-es és még többcsatornás rendszerként is létezik, kreatív rendszerekhez nem alkalmas.



9.6. ábra: Az 5.1 hangszerndszer ideális hallgatási pontja

9.2.2. Sokcsatornás rendszerek

9.2.2.1. Korai rendszerek – világkiállítások

Brüsszel – Philips Pavilon

Az első „hangszórózenekart” 1958-ban a Brüsszeli Világkiállításon a Philips Pavilonban lehetett meghallgatni. A pavilon egy összművészeti alkotás volt, melyet építészekből, képzőművészekből és zeneszerzőkből álló nemzetközi team tervezett, hogy a művészetek és a kultúra szolgálatába állított elektronikus technológia lehetőségeit a lehető legváltozatosabb formákban bemutassa.

A multimédia előadásnak otthont adó, kilenc hiperbolikus parabolából szerkesztett pavilont a világhírű építész, Le Corbusier és Iannis Xenakis építész/zeneszerző tervezte.

Le Corbusier Elektronikus Költeménynek nevezte az építményt, ahol a fény, a szín, a ritmus és a hang találkoznak egymással. A különböző állóképekből és színes fényekből álló vetítésekhez Edgar Varése ugyancsak Elektronikus Költemény (*Poème Electronique*) című, nyolcperces zeneműve kapcsolódott, mely a térhatású hangot hivatott demonstrálni. Annak érdekében, hogy a hang térmozgásokat

végezhessen a nézőtér körül, 350 hangszórót és 20 erősítőt telepítettek a pavilonba. A hangszórók elhelyezése hangútvonalakat jelölt ki, a hangszórók sokszor Xenakis hiperbólaíát követve eljutottak egészen az épület csúcsáig. A hangszórókon 3 egymástól független szólamot lehetett „reptetni” különböző irányokban és formákban. A hang útvonalát speciális kapcsolórendszer vezérelte, melynek segítségével egy-egy erősítőhöz öt, folyamatosan változó sorszámú hangszórót lehetett rendelni. Így pl. a hang az egyik pillanatban a 121–125., majd a 122–126., később a 123–127. hangszórókból érkezhett.



9.7. ábra: Philips Pavilon, Brüsszeli Világkiállítás, 1958.

A Philips Pavilon hangszóróegyüttesét kizárólag a *Poème Electronique* bemutatására használták. Valószínűleg ez volt a világ leggondosabban kidolgozott helyspecifikus műve, ahol a zeneművet az adott térre komponálták és vice versa, az épületet az adott zenemű szempontjai szerint tervezték. Fél év alatt kétféle millió néző látogatott el a helyszínre. Valószínűleg még sok zeneszerző kipróbálta volna, hogyan tudja kitölteni a Philips Pavilon terét hangjaival, de a világkiállítás végeztével az épületet sajnálatos módon lebontották.

Varése a világkiállítás után sztereó változatban hozzáférhetővé tette *Poème Electronics* című művét. A szerző jegyzetei, kottái alapján 2005-ben rekonstruálták, és virtuálisan modellezték a mű térmozgásait. A projekt leírása a http://www.edu.vrmmp.it/vep/VEP_documentary.html weboldalon érhető el.

Oszaka – gömbauditórium

Tizenkét évvel később, 1970-ben egy másik zeneszerző, Karlheinz Stockhausen is részt vehetett egy sokhangszórós tér tervezésében, kialakítva a maga számára egy olyan építészeti-elektroakusztikus konstrukciót, amelyben a hang térmozgásait vizsgálhatta fél éven keresztül.

Ezúttal az oszakai világkiállításon a nyugatnémet pavilon vált speciális hangversenyteremmé.

A Stockhausen által megálmodott koncertterem Oszakában gömb alakú volt.

„Az új termeket, amik zenehallgatásra készülnek, úgy kell megépíteni, hogy alkalmasak legyenek térbeni zene előadására. Az én elképzelésem egy gömb alakú teremben függő pódium, ami a hang és a fény számára is átlátszó, átjárható. A hallgatók az ilyen teremhez adaptált zenét felülről, alulról és minden irányból hallhatnák.”⁸

A gömbauditóriumban a közönség egy hangáteresztő rácson ült, amit kb. a gömb alsó negyedénél helyeztek el. A gömb felületén 49 hangszórót helyeztek el 7 körön, 7x7 sorban. 4 kör a közönség felett, 3 pedig alatta helyezkedett el. Az élőben játszott hangot egy joystick segítségével lehetett a hangfalrendszeren mozgatni, egyszerre három „szólamban”, maximum öt forgást létrehozva.⁹ A hangfalakkal létrehozott virtuális hangmozgás a reális mozgás érzetét tudta kelteni a nézőtérben, az alsó hangfalsor síkjában ülő hallgatókban.

„Ahogy a hangzásban ülünk, körbeölel minket a hang, képesek vagyunk követni és megtapasztalni a hangok mozgásának sebességét és formáját; mindez tökéletesen új szituáció korábbi zenei tapasztalatainkkal szemben. Az auditórium lehetőséget ad, hogy korábbi darabjaimmal szemben, melyekben a hangfalak gyűrűként vették körül a hallgatót, most végre létrehozhattam egy háromdimenziós »utazást a zenei térben«.”¹⁰

A hang mozgását egy gömb alakú vezérlővel és egy 10 csatornás keverővel lehetett irányítani.

Az oszakai hangszórórendszeren fél éven keresztül sokféle darabot adtak elő, a rendszert nem egy mű követelményeihez igazították. A hangosítás azon túl, hogy kitágította teret, nem rendelkezett saját karakterrel, lényegesen semlegebb volt, mint a Philips Pavilon, így prototípusként szolgálhatott új koncerttermek kialakításához.

⁸ Stockhausen, Karlheinz, Musik im Raum. 1959/61. In: *Die Reihe* no. 5. 1959

⁹ Stockhausen, Karlheinz, *Texte zur Musik*, Band 3 1963–1970. Köln: Verlag M.DuMont Schauberg, 1971

¹⁰ Ibid.

9.2.2.2. Hangszórózenekarok

A brüsszeli és az oszakai expókon a sokhangszórós rendszereket célirányosan tervezett épületekben helyezték el, melyeket a kiállítások után lebontottak. Megfelelő hely hiányában ezek a projektek ezen a ponton be is fejeződtek.

Gyakorlatiasabb módszernek tűnnek az úgynevezett hangszórózenekarok, melyek elvileg bármilyen teremben felszerelhetők.

Acousmonium

Az Acousmonium elnevezésű hangszórózenekart Francois Bayle zeneszerző tervezte 1974-ben. Elsősorban a GRM koncertjein használták a Francia Rádió épületében, de gyakran turnéztak is vele. Az Acousmonium különlegessége, hogy különböző méretű, alakú és hangszínű hangfalakból áll, melyek a zenekari hangszerekhez hasonlóan önálló karakterrel rendelkeznek.

Az Acousmonium hangfalait az előadói tér és az előadott mű követelményeinek megfelelően helyezik el. A középponti helyen általában a referencia-hangfalak helyezkednek el, melyek hangszíne kiegyenlített, semleges. Ezeket egészítik ki a különböző karakterisztikájú hangszórók, melyek a tér különböző helyein más és más szereppel bírnak, és egyéni színezettel jelölik ki a tér pontjait, síkjait. Van, amelyiknek az a funkciója, hogy a magas frekvenciák kiemelésével a jelenlétet (presence) hangsúlyozza, másnak a basszus lekerekítése vagy üreges hangszín segítségével a távolság hangsúlyozása stb. a szerepe.



9.8. ábra: Pierre Schaeffer bemutatja az Acousmoniumot

Gmebaphone – Cybernephone

A Gmebaphone a bourges-i GMEB (Groupe de Musique Experimentale de Bourges) fejlesztése, az első rendszert Christian Clozier koncepciója alapján Jean-Claude Leduc építette. A rendszert a 3. Nemzetközi Experimentális Zenei Fesztiválon mutatták be először 1973-ban, majd folyamatos újítások során különböző sorszámú változatok készültek. A fejlesztés irányát jelzi, hogy a 6.

verziót cybernephone-nak nevezték el, utalva arra, hogy ettől kezdve digitálisan vezérelték a zene térmozgásait.

A digitális keverőasztal és a vezérlőszoftver 8 független bemenetet kezel, és 50 hangszórón keresztül vetíti a hangot.

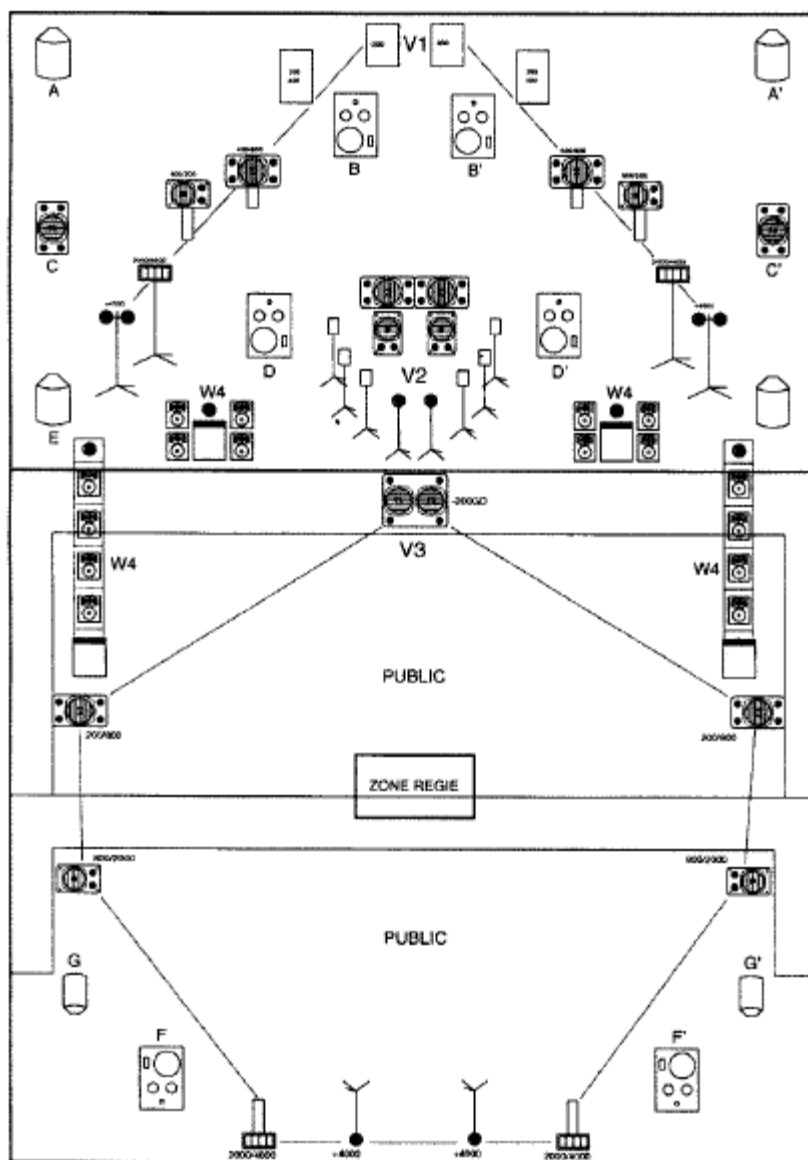


9.9. ábra: Gmebaphone

A hangszórórendszer elhelyezése pozíció és színezet szerint nagyon részletes és átgondolt szerkezetet alkot. A hangszórókat 6 külön csoportba (hálózatba) osztották. A hat csoport közül 4 az ún. „V” típusú, 2 pedig a „referencia” típusú rendszerbe tartozik. A két rendszert hangszórótípusaik és funkcióik különböztetik meg egymástól.

A „V” rendszerek csak hangosítanak, azaz a hang átalakítás, effektezés nélkül kerül lejátszásra. A rendszert mégis phonoszintetizátornak hívják, mert a tér különböző pontjain elhelyezett hangszórói különböző regiszterekben (magas, közép, basszus) játsszák le a hangot. A hangszórók közötti fizikai távolság és a fázisviszonyok határozzák meg a térbeni érzetet.

A két, széles sávú hangfalakból álló, „referencia” típusú rendszer (REF1, REF2) funkciója, hogy színezzé és térben kiterjessze a „V” rendszeren lejátszott hangzásokat. A REF1 – „közvetlen referencia” – feladata, hogy pályákat, tengelyeket és mélységkorrekciókat generáljon. A REF2 – „zengetett referencia” – multidimenzionális perspektívákat, többszörös hallgatói szögeket és téralakzatokat hivatott létrehozni.



9.10. ábra: Cyberphone szerkezete

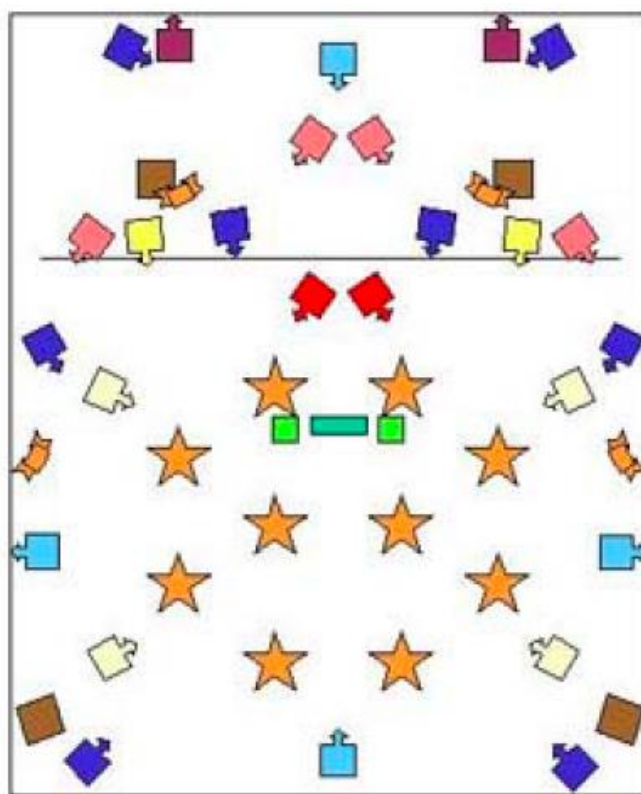
BEAST (Birmingham Electroacoustic Sound Theatre)

A BEAST a Birminghami Egyetem Elektroakusztikus Zenei Stúdiójának hangszórózenekara, mely 1982-ben jött létre Jonty Harrison vezetésével.

A hangosítórendszer akár 100 hangszórót is magába foglalhat, melyek különböző hangszíntartományokat erősítenek. Vannak köztük „ultramély” hangszórók, magas frekvenciás hangszórócsoporthok (csipogók, angolul: tweeter) is, melyeket a közönség fölé szoktak függeszteni, és különböző márkájú, teljes sávú hangfalak. Az előadó célorientált keverőasztal vagy számítógépes szoftver segítségével változatos hangzásoképeket tud létrehozni, és szabadon alakíthatja a dinamikai és térbeni változásokat az adott térben interpretálva a zeneszerző szándékait.

A BEAST sztereó hangosításhoz is legalább 8 hangszórót használ, melyet Jonty Harrison a „Fő Nyolcas”-nak nevez. Ez 4 pár hangszórót jelent, melyek elnevezései: Fő, Széles, Távoli és Hátsó pár. A Fő és a Széles hangszórók sugározzák a

frontális hangképet, a Fő párhoz képest a Széles pár a közönséghez közelebb, egymástól messzebb helyezkedik el, ezáltal kiszélesíti a hangképet. A Hátsó pár a közönség mögött van, és segíti, hogy a hangkép körbevegye a hallgatókat, és támogatja a közönség körüli hangmozgásokat. A Távoli hangszórópár a Fő pár mögött foglal helyet, és az a feladata, hogy a perspektívát generálja. A Fő Nyolcshoz adott hangszórók további hangmozgásokat és plánokat tesznek lehetővé, és az előadótérrel függ, hányan és hova kerülnek. Hosszú termekben pl. oldalkitöltésre lehet szükség, ami biztosítja a fokozatos átmenetet a frontális és a hátsó hangszórók között. A széles termekben a közép érzetét elöl és hátul középre helyezett hangszórókkal erősítik. A függesztett hangszórók lehetővé teszik, hogy a fent-lent tengelyen is lehessen mozgatni a hangokat.



9.11. ábra: A BEAST hangszóróinak hipotetikus elhelyezkedése (sötétkék négyzetek jelzik a Fő Nyolcas pozícióját, a világoskékek az oldal- és középkitöltést, a sárga csillagok a függesztett, magas frekvenciás csipogókat)

A BEAST hordozható rendszer, amit minden előadás előtt fel kell szerelni. Hogy a zeneszerzők már a komponálás során is részben meg tudják hallgatni, hogyan működnek a térrel kapcsolatos elképzeléseik, a Birminghami Egyetem Zenei Tanszékén a legnagyobb próbateremben felszerelték a MiniBEAST nevű, 30 csatornás rendszert, ahol azonkívül, hogy zeneszerzőknek biztosítja az egyéni munkát, hetente tartanak közös informális lehallgatásokat.

9.2.2.3. Koncerttermek beépített sokcsatornás hangosítással

A világkiállítások és a hordozható hangszórózenekarok tapasztalatai azt mutatják, hogy azok számára (legyenek zeneszerzők, előadók vagy hallgatók), akik arra vágnak, hogy teljes mélységig kiaknázzák az elektroakusztikus médium kreatív lehetőségeit, nélkülözhetetlen a sokcsatornás rendszerekkel kitágított zenei tér használata. A hordozható rendszereken dolgozó szerzők és előadók két komoly gyakorlati problémával szembesültek: 1. nem tudtak kielégítő mennyiségű ideig dolgozni, gyakorolni a berendezésekkel, hiszen azokat többnyire csak pár órával, jó esetben pár nappal a koncertek előtt szerelték össze; 2. stabil akusztikai helyszín hiányában az egyik helyen megszerzett tapasztalatok csak részben maradtak relevánsok a helyről helyre változó akusztikai környezetekben. A XXI. század vívmánya, hogy megkezdődött olyan koncerthelyszínek építése, ahol gondosan kialakított teremakusztikájú termekbe terveznek sokcsatornás rendszereket.

ZKM, Klangdome (2006)

A Karlsruhe-ben található ZKM (Zentrum für Kunst und Medientechnologie) kortárs művészeti multimédia-központ, ahol 2006-ban a Zene és Akusztika Intézet koncerttermében, a Kék Kockában (Blaue Kubus) készült el a világ egyik legszébb, beépített sokcsatornás hangosító rendszere, a Klangdome (Hangtemplom).



9.12. ábra: ZKM, Blaue Kubus kívülről

A kifogástalan akusztikájú teremben félgömb (kupola) alakban helyeztek el 43 MeyerSound hangszórót három, felfelé csökkenő méretű elliptikus tartószerkezeten és még négy mélynyomót a földön.



9.13. ábra: ZKM, Blaue Kubus belülről

Az egyforma minőségű hangszórókból felépített rendszer önmagában semleges, a hangszórók sávszélessége nem befolyásolja a térérzetet. Az ilyen típusú hangosítás ideális szoftveresen megvalósított térszimuláció előadására. A Klangdome-hoz saját vezérlőszoftver, a Zirkonium tartozik, de bármilyen más, sok csatornát generáló program is képes vezérelni a hang térbeni elhelyezkedését.

Az előkészítő munkákat a ZKM stúdióiban lehet elvégezni, ahol a minimális felállítás a körben elhelyezett 8 csatorna, de van olyan stúdió is, ahol 24, félgömb alakban felrakott hangszóró imitálja a Klangdome lehetőségeit.

Hanglaboratórium (Sonic Laboratory) Belfast SARC

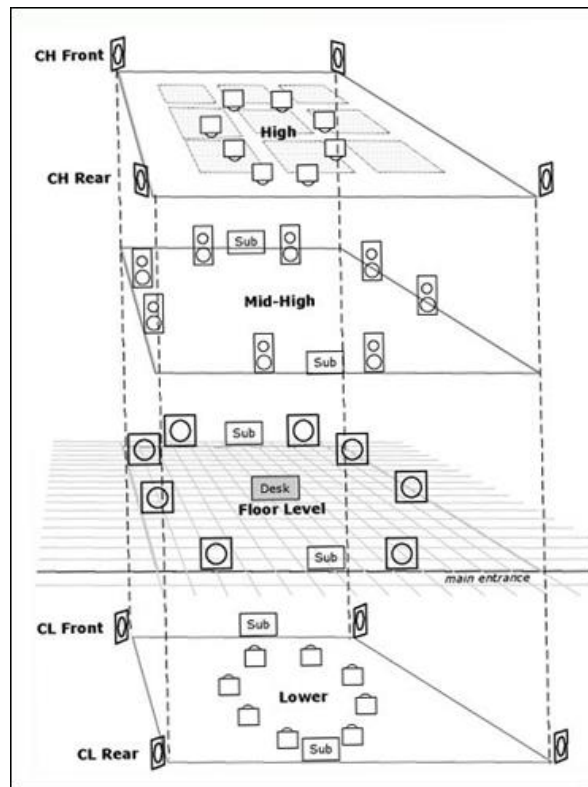
Nem véletlen, hogy a Belfasti Queen's Egyetem Hangművészeti Kutatóközpontjának (SARC: Sonic Arts Research Center) „hanglaboratóriumát” maga Karlheinz Stockhausen nyitotta meg 2004-ben.



9.14. ábra: Belfast SARC, hanglaboratórium

A terem Stockhausen oszakai körülményeit idézi, hiszen a hangszórók teljes gömb alakban helyezkednek el a hallgatók körül. A 17 m hosszú, 13 m széles és 14 m magas teremben 4 méteres magasságon elhelyezett, akusztikusan átjárható rácson foglal helyet a közönség. A hallgatók feje felett elhelyezett keretre és a plafonra is függeszthetőek hangszórók, melyek pozíciója nem állandó.

A hanglaboratóriumban a teremakusztika is változtatható. A falakon akusztikus elnyelő felületek vannak, melyek felemelhetők, hogy részben vagy teljes egészében felfedjék az alattuk lévő falfelületet. Ily módon pl. a zengetési idő 1 kHz-en 0,4 és 2,3 másodperc között változtatható.

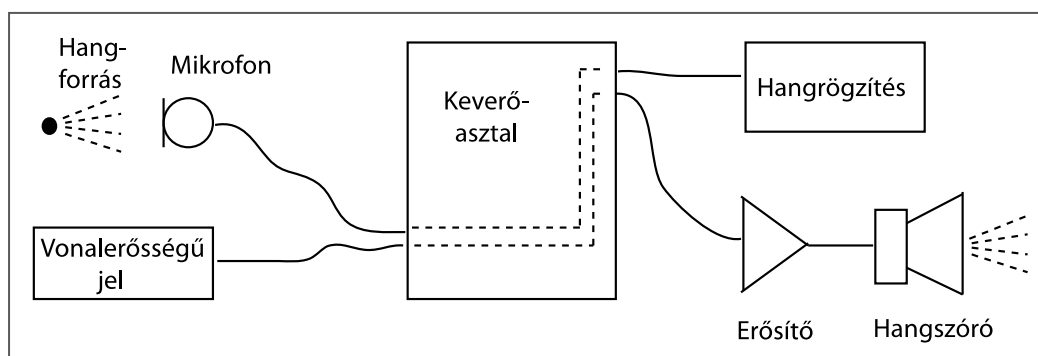


9.15. ábra: Belfast, hanglaboratórium, hangszórók elhelyezése (4 szint ábrázolása)

10. Az audiojel útja: az elektroakusztikus átviteli lánc. A mikrofon és a keverőasztal

Hangfelvételkor és hangosításkor a jel több eszközön halad keresztül. Az elektroakusztikus átviteli lánc a főbb berendezéseket és az audiojel útját jelenti, melyet az eredeti hangforrástól a rendszer kimenetéig megtesz. A 10.1. ábra ismerteti a lánc legfontosabb alkotórészeit. Az első elem a bemeneti jel. Ez lehet akusztikus hangforrás mikrofonnal átalakított alacsony erősségű feszültségváltozása vagy erőteljesebb, vonalerősségű – pl. CD-játszók, hangkártyák kimenetén megjelenő – jel. A mikrofon és a vonalerősségű jelet szolgáltató berendezések kábel segítségével csatlakoznak a keverőasztal mikrofon- vagy vonalbemenetére. Az audiojel keresztülhalad a keverőn annak megfelelően, ahogyan az adott típust megtervezték. A különböző kimeneteken megjelenő jelet kábelen keresztül tovább lehet küldeni az erősítő-hangszóró egységhez vagy a hangrögzítő berendezéshez.

Ebben a fejezetben két egységgel, a mikrofonokkal és a keverőasztallal foglalkozunk részletesebben, mivel ezek használatához elengedhetetlen főbb tulajdonságaik ismerete.



10.1. ábra: Elektroakusztikus átviteli lánc

10.1. A mikrofon

A mikrofon az elektroakusztikus lánc első eleme, segítségével alakul át elektromos feszültségváltozássá a hangrezgés által kiváltott légnyomásváltozás.

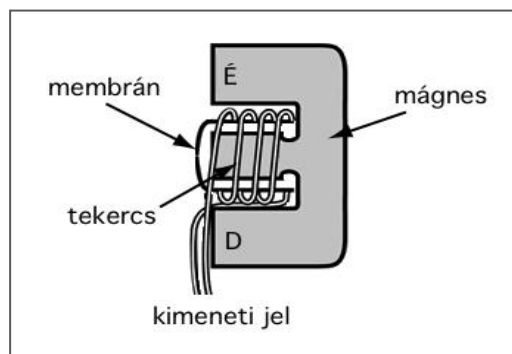
A mikrofonokat két alapvető tulajdonságuk – működési technológiájuk és iránykarakterisztikájuk – alapján különböztetjük meg. Minőségüket frekvencia-karakterisztikájuk és zajszintjük alapján lehet megítélni.

10.1.1. A mikrofon működési elve

A mikrofon olyan átalakító, ami az akusztikus energiát elektromos energiává változtatja. Az akusztikus rezgéseket a mikrofon membránja fogja fel és adja tovább. Az átalakítás fő módszerei a mágneses indukció (dinamikus mikrofonok) és a változó kapacitás (kondenzátormikrofonok). Léteznek más működési elven alapuló mikrofonok is, mint például a szén- vagy a kristálmikrofon, de ezeket manapság egyre kevesebb helyen alkalmazzák.

10.1.1.1. Dinamikus mikrofon

A mágneses indukció során rögzített mágnes terében mozog egy membránhoz erősített tekercs. Amikor a tekercs mozog, feszültség keletkezik. (A szalagmikrofonok esetében a tekercset pár mikron vastagságú fémszalag helyettesíti.)



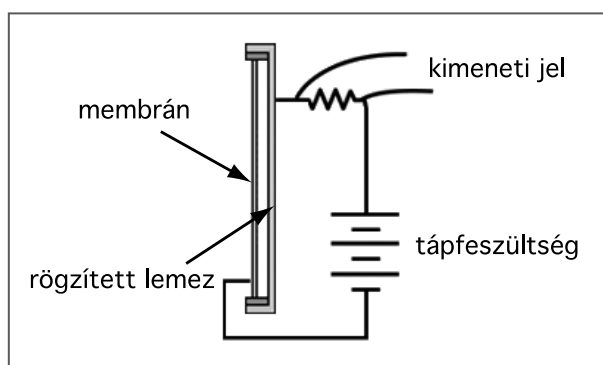
10.2. ábra: Dinamikus mikrofon szerkezete

A mozgótekercses mikrofonok nem igényelnek külön áramellátást és nagyon strapabíróak. Jellemző rájuk, hogy a mágneses indukció tehetetlensége miatt érzékenységük kicsi, ezért elsősorban közeli mikrofonozást igénylő alkalmazásoknál (pl. hangosítás) használják őket.

10.1.1.2. Kondenzátormikrofon

A kondenzátormikrofonok esetén két elektrosztatikusan feltöltött lemez – a membrán és a rögzített hátlap – képezi az átalakítóegységet. A lemezek egy kondenzátor elektródáiként működve képesek megőrizni az elektromos töltést. Ahogy a hangnyomásváltozás mozgásba hozza a membránt, a kapacitás változása feszültségváltozást okoz.

Mivel a kondenzátor polarizálásához külső feszültség kell, a kondenzátormikrofonoknak áramellátásra van szükségük, amit a mikrofon belsejében elhelyezett elem vagy külső, úgynevezett fantomtáp szolgáltat.



10.3. ábra: Kondenzátormikrofon szerkezete

A legtöbb kondenzátormikrofon nagyon érzékeny, alkalmas finom, részletgazdag hangzások felfogására széles frekvenciatartományban. Gyakran használják természetes terekben akusztikus hangszerek hangjának rögzítésére.

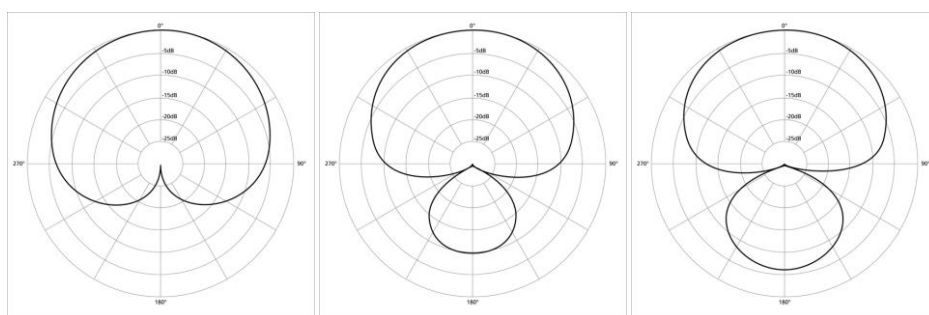
10.1.2. Mikrofonok iránykarakterisztikái

A jó mikrofonozási technika alapvető követelménye, hogy a hangforrás a mikrofontól ideális távolságban és megfelelő irányban helyezkedjen el. Az iránykarakterisztika azokra az irányokra vonatkozik, ahonnan a mikrofon a legerősebben „hallja” a hangokat. Irányérzet szempontjából három nagy típust lehet megkülönböztetni: az egy irányból (unidirekcionális), a két irányból (bidirekcionális) és a minden irányból (omnidirekcionális vagy térmikrofon) érkező hangokra érzékeny mikrofont.

Az iránykarakterisztikákat körkörös vagy gömbszerű grafikon segítségével szokták ábrázolni.

10.1.2.1. Egyirányú mikrofonok

A vese alakú, kardiod, szuperkardiod és hiperkardiod karakterisztikával rendelkező mikrofonok közös tulajdonsága, hogy legerősebben előlről vesznek fel. A kardiod karakterisztikájú mikrofon két oldalról kicsit gyengébben, hátulról egyáltalán nem érzékeli a hangokat. A szuperkardiod mikrofonok oldalirányban kissé szűkebb hallásszöggel rendelkeznek, de felvesznek egy kevés hangot hátulról is. A hiperkardiod mikrofonok oldalirányú szöge még kisebb, hátsó szöge pedig szélesebb.

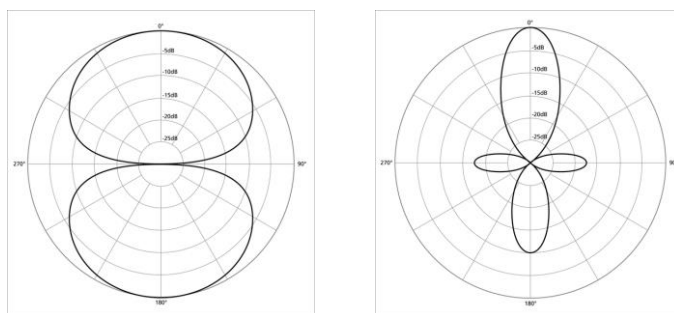


10.4. ábra: Kardiod, szuperkardiod és hiperkardiod karakterisztikák

10.1.2.2. Kétirányú mikrofonok

A 8-asnak is nevezett karakterisztikával rendelkező mikrofonok csak előlről és hátulról érzékelik a hangokat. Általában rádió és tv-stúdiókban alkalmazzák párbeszéd felvételére.

A 8-as karakterisztika nagyon élesen irányított formája a puskamikrofonokban található. Ezeknek a mikrofonoknak hosszabb házuk van, oldalán résekkel, melyek az oldalirányú hangok kiszűrését biztosító interferenciákat keltik. A puskamikrofonokat filmfelvételeknél és természeti hangok rögzítésekor használják leggyakrabban.



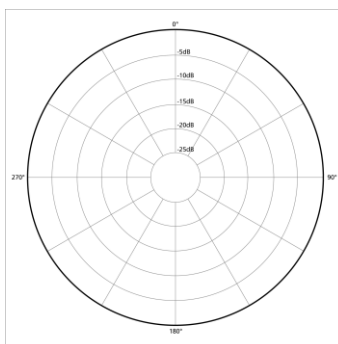
10.5. ábra: Nyolcas és „puska” karakterisztikák



10.6. ábra: Puskamikrofon

10.1.2.3. Térmikrofonok

A térmikrofonok gömbkarakterisztikával rendelkeznek, azaz minden irányból közel egyformán veszik a hangot.



10.7. ábra: Gömbkarakterisztika

10.1.2.4. Az iránykarakterisztika frekvenciafüggése

A mikrofonok érzékelési szöge a frekvencia növekedésével csökken. Ezért a mikrofonok több, különböző frekvenciákon mért karakterisztikával jellemezhetők.

Az íránymikrofonok működéséhez tartozik, hogy amikor a hangforrás 30 cm-nél közelebbre kerül, megnövekszik a basszustartomány. Ezt közelséghatásnak nevezik, ami esetenként a mikrofon hangjának torzulását is okozhatja.

10.2. A keverőasztal

A keverőasztal az elektroakusztikus lánc központi egysége. Funkciója, hogy a bemeneteire küldött jelforrások hangerőarányait szabályozza, a kapott jeleket átalakítsa, és különböző kimenetekre irányítsa kihangosítás, hangfelvétel vagy további átalakítás céljából.

Több évtizede már, hogy a hagyományos analóg modellek mellett digitális változatban is fejlesztenek keverőasztalokat. A kétféle rendszer működési alapelve között nagy különbség van, kezelőfelületeik azonban sok hasonlóságot mutatnak. Jellemző, hogy a számítógépeszoftver-keverők interfészei is a régi analóg keverőasztalok potmétereit, tekerőgombjait másolják. A fejezetben egyszerű analóg keverőasztal felépítését mutatjuk be, mivel ennek alapján könnyebb megérteni a digitális keverők működését is.

10.2.1. A keverőasztal szerkezete

A keverőasztalok többféle méretben, egyszerűbb és komplexebb kivitelben kaphatóak. A fejezetben egy egyszerű modell alapján mutatjuk a keverőasztal legfőbb egységeit. A különböző funkciók mennyisége, a csatlakozók és a szabályzók elhelyezkedése márkánként és modellenként változik.



10.8. ábra: Kisméretű keverőasztal

A keverőasztal nagyságrendjéről sokat elárul bemeneti csatornáinak és kimeneteinek száma. A 10.8. ábrán látható mixer tizenkettő (teljesen egyforma) mono csatornával és két, az előző tizenkettőhöz hasonló sztereó csatornával rendelkezik.

Amint az a 10.8. ábráról látszik, a keverőasztal moduláris szerkezetű, alap-egysége a csatorna. A kisebb keverők 1-8, a nagyobbak akár 72 csatornásak is lehetnek (lásd 10.9. ábra).

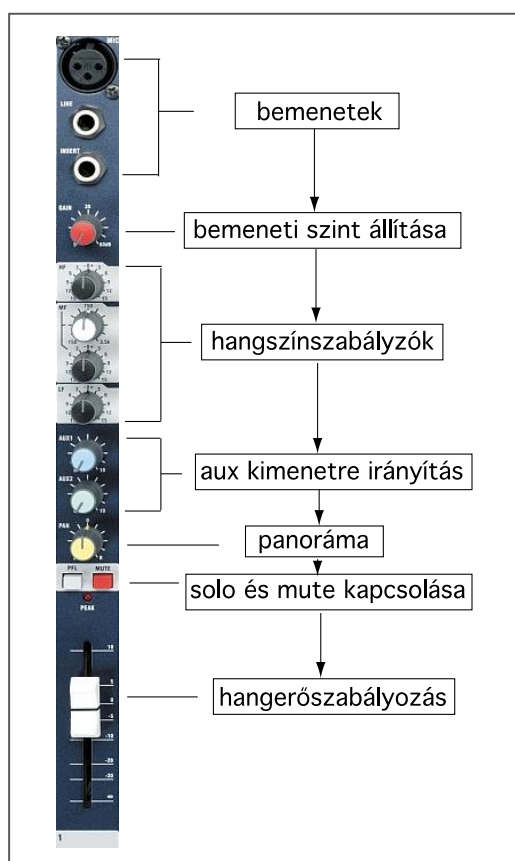


10.9. ábra: 1+2 és 72 csatornás keverőasztal

A csatornákon keresztülhalad a bemenetre küldött jel, és útközben különböző elektroakusztikus egységeken keresztül módosulva jut el valamelyik kimenetre. Kövessük végig a jelfolyamot és az átalakító egységek hatását a 10.10. ábra segítségével:

- bemenetek: a csatornák általában háromféle – mikrofon, vonal és insert – bemenettel rendelkeznek. A mikrofon és a vonalbemenet között szerkezeti és hangosság-szint-különbség van. A vonalbemeneten 6.3 jack csatlakozó segítségével lehet behozni erősebb jelszintű (pl. CD-játszóból, számítógép hangkártyakimenetéről származó) hangokat. A kis szintű (általában jobb minőségű) mikrofonok jeleit az XRL szimmetrikus bemenet fogadja. Az insertbemenet külső eszközök beszúrását teszi lehetővé.
- bemeneti szint állítása: az általában tekerőgombbal (forgópotméter) állítható szintállítás nagyon fontos ezen a ponton, mivel a jelet még átalakítatlan formájában lehet segítségével az ideális hangosságra állítani. Amennyiben itt torzul a túl erős hang, a későbbi hangerő-szabályozás nem segít a torzulás megszüntetésében. Ha azonban a jel túl kicsi, későbbi felerősítése maga után vonja a keverőben összeszedett zajok felerősítését is.
- hangszínszabályozók: keverőasztalonként változó, hogy milyen mennyiségű és minőségű szűrést tesznek lehetővé. Egyszerűbb modellek esetén csak a *mély-magas-közép* frekvenciaregisztereket lehet állítani.

- aux kimeneti szabályozó: a gomb segítségével a csatorna jelét elágaztathatjuk, és a főkimeneteken kívül a keverőn található aux kimenetekre is elküldhetjük. A gomb az elküldött jel amplitúdóját szabályozza.
- panoráma: a gombbal azt lehet szabályozni, hogy a csatornán bejövő hang a sztereó hangkép bal-jobb tengelyének melyik pontján szóljon.
- solo: a kapcsoló benyomásával csak az adott csatorna hangja fog szólani
- mute: a kapcsoló benyomásával elnémítható a csatorna hangja.
- hangerő-szabályozás: fader vagy potméter segítségével lehet beállítani a jel erősítését, a többi csatornához viszonyított arányát.

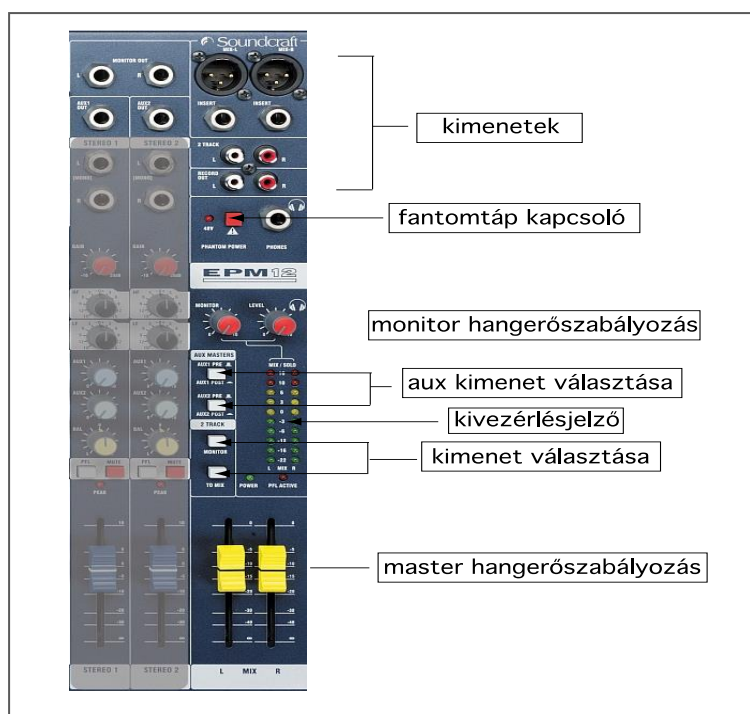


10.10. ábra: Keverőasztal bemeneti csatornája

A kimeneti vagy master-szekcióba az összekevert jel érkezik. Ennek legfontosabb, leggyakrabban használt egysége a főpotenciométer vagy master-szabályzó, amivel szabályozhatjuk, hogy mekkora jel menjen a végfokok felé. A 10.11. ábrán részletesen látható, milyen csatlakozók, kijelzők és szabályzók találhatóak ezen a helyen:

- kimenetek: itt található a főkimenet két szimmetrikus XLR-csatlakozója és a különböző mellékkimenetek (AUX, monitor). A több kimenet biztosítja, hogy különböző hangzásokat különböző csatornákon lehessen kiküldeni (pl. hangosításkor zenészek monitorjába)

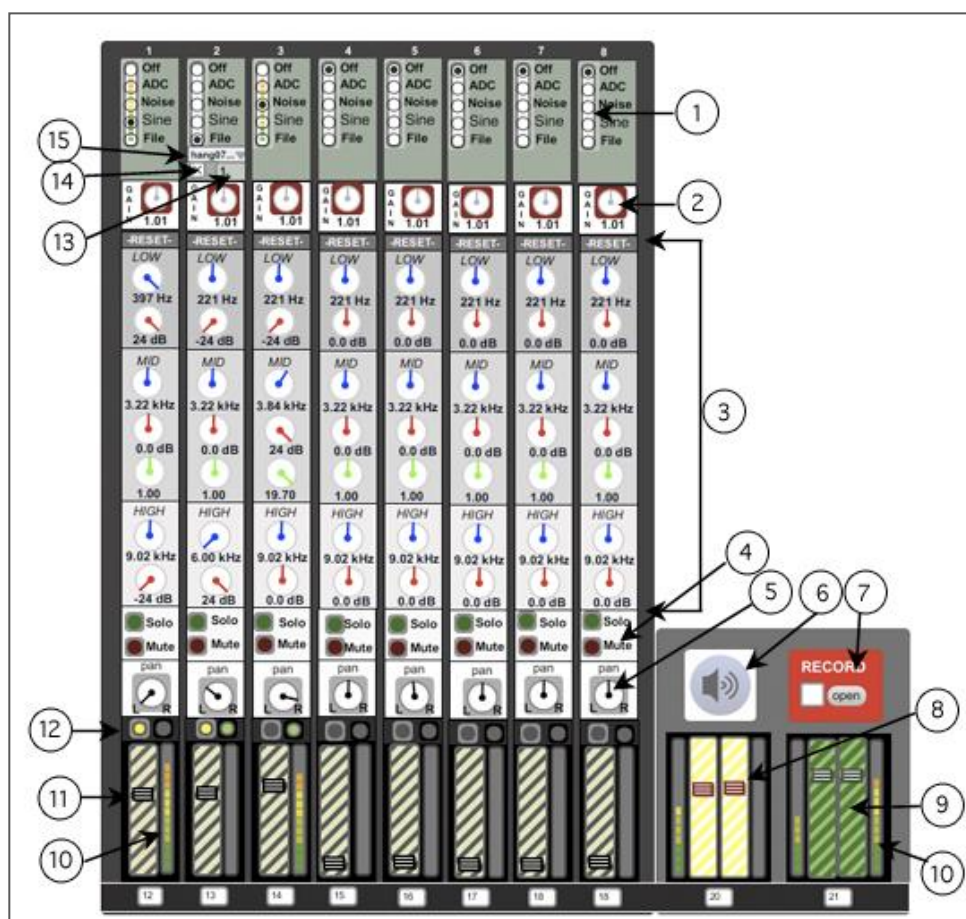
- fantomtáp kapcsoló: a keverőasztalra kötött kondenzátormikrofonok áramellátását biztosítja
- monitor hangerő-szabályozás: a monitorkimenetre küldött jelek hangerejét változtatja
- AUX kimenet választása: az AUX kimenetek között választókapcsoló
- kivezérlésjelző: ledes kijelző a kimeneti jel hangerejének ellenőrzésére
- főkimenet választása: a kapcsolókkal azt lehet kiválasztani, hogy a master hangerő-szabályozás által változtatott jelet a keverőasztal melyik kimenetén szeretnénk kiküldeni.
- master hangerő-szabályozás: a végső, összekevert jel hangerejének változtatása



10.11. ábra: Keverőasztal kimeneti szabályozása

10.2.2. Keverőasztal virtuális modellje

A 10.12. ábrán látható felület letölthető (MixingDesk.maxpat) virtuális mixer kezelőfelületét ábrázolja. Segítségével gyakorolni lehet, milyen alapegységei vannak a keverőasztalnak, azokat hogyan kell beállítani különböző feladatok elvégzése érdekében.



10.12. ábra: Virtuális keverőasztal

- 1 – Hangforrás kiválasztása: a keverőasztal bemeneti csatlakozói helyett ki lehet választani, milyen hangot szeretnénk a csatornabemenetre választani. Zaj, szinuszhullám és különböző loopolt hangfájlok állnak rendelkezésre. Amennyiben hangfájllejátszást választunk, ki lehet választani, melyik hangot akarjuk betölteni (15), hogy ki- vagy bekapcsoljuk a lejátszást (14), és azt is, hogy milyen transzpozícióval szeretnénk lejátszani a hangot (13).
- 2 – Bementi érzékenység állítása
- 3 – Hangszínszabályozók
- 4 – Solo és Mute gombok
- 5 – Panoráma
- 6 – DAC bekapcsolása
- 7 – Felvétel készítése: az open megnyomásával el tudjuk nevezni a hangfájlt, amibe a felvételt készítjük. A kapcsoló aktivizálásakor kezdődik, kikapcsolásakor végződik a felvétel
- 8 – Master hangerő-szabályozás
- 9 – Mellék-kimenet hangerő-szabályozás: ez a kimenet leágazás, ami nem jelenik meg a hangfalon (nem halljuk), hanem a felvevőhöz kapcsolódik. Csak akkor tudunk felvételt készíteni, ha a csatorna jelét erre a kimenetre is kiválasztjuk.

10 – Hangerőkijelzők

11 – Csatornák hangerő-szabályozása

12 – Kimeneti választógombok: a két gomb a két kimenetre választja rá a csatorna jelét. A bal oldali (aktivizáláskor sárga színkódot viselő) gomb a főkimenetre, a jobb oldali (zöld színkódolású) pedig a mellékkimenetre irányítja a csatorna jelét.

A keverő potenciométereit egér segítségével lehet beállítani a megfelelő szintre, de vezérelhetők MIDI kontrollerek segítségével is. A MIDI-vezérlés működéséhez a potenciométerek alatti számdobozokba be kell írni, hogy az alkalmazott kontrollerek milyen sorszámúak.

Feladat:

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).

A fentebb bemutatott virtuális keverőasztalon a megfelelő hangforrások kiválasztásával és összekeverésével próbáld előállítani a következő három hangzást!



10.1. Hang



10.2. Hang



10.3. Hang

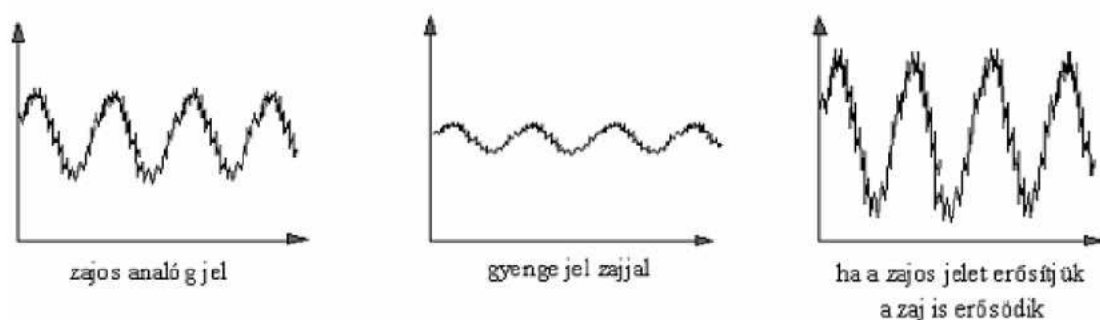
11. A hang digitalizálása

11.1. Analóg-digitális hang

Analóg hangrögzítésről akkor beszélünk, ha a hangforrás által keltett folyamatos nyomásváltozást hasonló (analóg) feszültségváltozássá alakítjuk, majd folyamatos, végtelenül kicsi értékekből álló változások formájában tároljuk. Analóg hordozó például a bakelitlemezt, ahol a barázda mintázata folyamatos vonal formájában, pontosan visszaadja a hang keltette nyomásváltozást.

Analóg, folyamatos hangreprezentáció esetében a jel minden időpillanatban értelmezett, és két tetszőleges jelérték között mindig lehet találni a kettő közé eső harmadik értéket, azaz végtelenül kicsi szakaszokból áll.

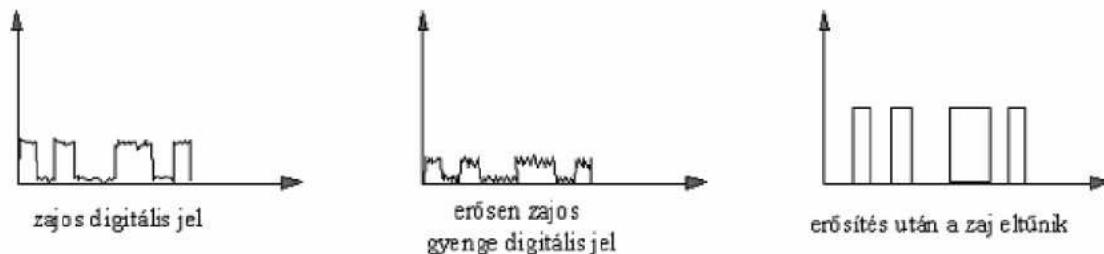
Az analóg jelek nagyon sérülékenyek. A folyamatos állapotváltozások sérülése (mint pl. a bakelitlemezt barázdájába esett porszem, vagy a mágneses szalag apró gyűrődése) azonnal zavaró zörejt, hangminőségromlás formájában jelentkezik. Az analóg jeleket analóg csatornán továbbítva számolni kell a jelhez hozzáadódó csatornazajjal is. A jelet analóg erősítőn keresztül továbbítjuk, ami a jelhez hozzáadódó zajt ugyanúgy erősíti, mint magát a jelet.



11.1. ábra: Analóg jel erősítése

A digitális audio esetén az audiojel reprezentációja nem közvetlenül analóg a hangnyomáshullámmal, mivel megszámlálható, véges számú, ún. diszkrét értékkel írja le a hanghullámot. Az analóg jeleket analóg-digitál átalakítók (A/D konverter) segítségével lehet számjegyekké konvertálni. A számsor digitálisan – a kettes számrendszerben – reprezentálja az analóg jelet. A bináris számsort rögzíthetjük különböző hordozókon (pl. DAT magnó, CD, számítógépes fájl), illetve közvetíthetjük valamely hálózaton.

A jel bináris értékekkel történő tárolása nagyban csökkenti a jel sérülékenységet, hiszen két érték (a kettes számrendszer nulláit és egységeit) sérüléseit lényegesen könnyebb regenerálni, mint az analóg technikában használatos végtelen értékek sorozatát. A két szint regenerálása a zajt nem erősíti, hanem tökéletesen helyreállítja az eredeti digitális jelet.

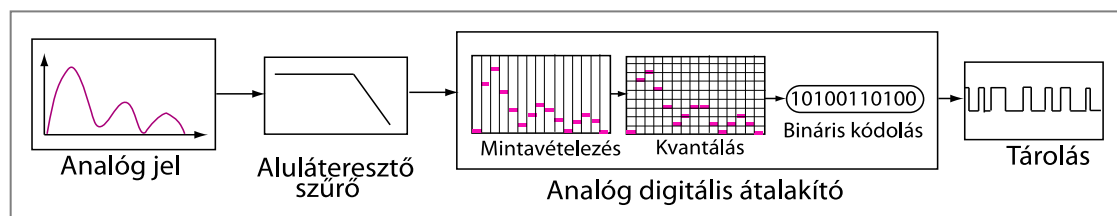


11.2. ábra: Digitális jel erősítése

Annak érdekében, hogy a digitális jelet hallhatóvá tegyük, vissza kell konvertálni analóg jellé digitális-analóg átalakító (D/A konverter) segítségével. A legtöbb otthoni hangrendszerben a D/A konverzió a lejátszókon (CD, DVD, iPod stb.) belül megy végbe. A számítógépes hangkártyák, a MiniDisc-ek, és a DAT-magnók rendelkeznek mindkét konverterrel (A/D felvételhez, D/A a lejátszás-hoz). Jelenleg a legtöbb lejátszórendszer digitális és analóg komponensek kombinációjából tevődik össze, de az összes lejátszórendszer végén analóg jel jön létre, amely a fejhallgatókba, ill. az erősítőbe és a hangszórókba érkezik.

11.2. A digitalizálás folyamata

Digitalizáláskor az aluláteresztő szűrőn átengedett analóg jel az A/D konverterbe kerül, ami először egyenletes időközönként megméri a jel feszültségét (*mintavételezés*), ezután a mért adatokat kerekíti (*kvantálás*), az így kapott értékeket bináris számokká alakítja, majd különböző hordozókra írható alakra hozza (*kódolás*).



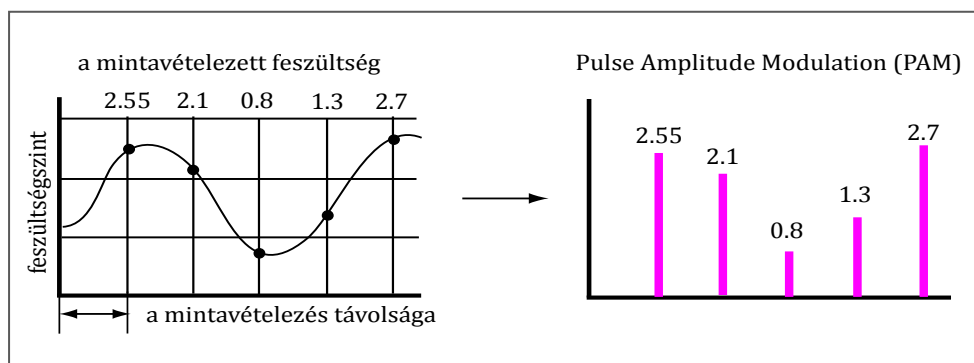
11.3. ábra: Hang digitalizálásának folyamata

11.2.1. Mintavételezés

A mintavételezés során a jelet az időben pontosan ismétlődve megmérjük. Minél többször veszünk mintát, annál jobb lesz a hangminta minősége. A mintavétel sebességét abból számoljuk ki, hogy 1 másodperc alatt hány alkalommal mérjük

meg a jelet. Audio-CD minőség esetén például 44 100-szor veszünk mintát, ami 44 100 Hz (vagy 44,1 kHz) mintavételi sebességnek felel meg. A hullámforma reprezentáción a vízszintes tengely már nem folyamatos, diszkrét időközönként mérjük a feszültségváltozás értékét.

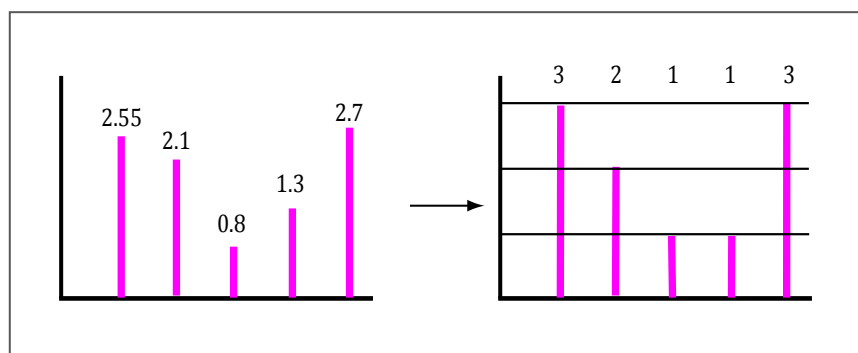
A mintavételezett jel lehetséges feszültség értékei a függőleges tengelyen még végtelenül sok pontból tevődnek össze, hiszen a mérés eredménye a folyamatos analóg feszültségváltozás maximuma és minimuma között bármilyen értéket felvehet. A jelnek ezt a reprezentációját az angol nyelvű szakirodalom pulse amplitude modulation-nek (PAM) nevezi.



11.4. ábra: Mintavételezés, a hanghullám PAM (Pulse Amplitude Modulation) formátummá alakítása

11.2.2. Kvantálás

A kvantálás az a művelet, melynek során a függőleges tengely végtelen sok mérési értékéből véges fokozatú skála jön létre. Ehhez a mérés maximuma és minimuma között jelszintek kerülnek megállapításra, és az analóg jelből nyert mérési eredményeket a rendszer a legközelebbi jelszint értékére kerekíti. A jelszintek mennyisége attól függ, hogy hány bites a rendszer.

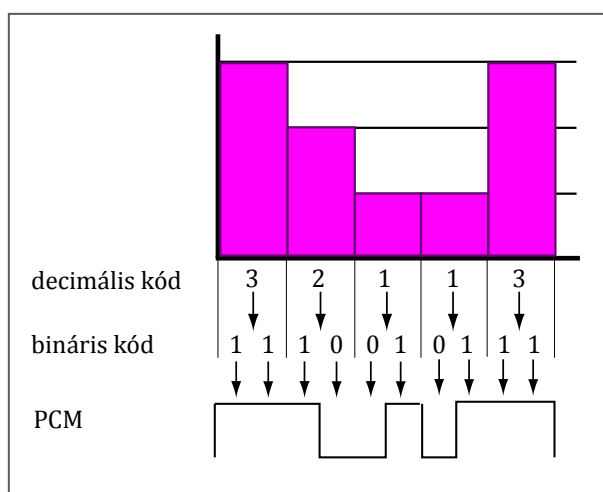


11.5. ábra: PAM (Pulse Amplitude Modulation) formátum kvantálása

11.2.3. A kódolás

A kódolás feladata a véges mennyiségű kvantálási szinthez bináris kódokat rendelni. A digitális jel tárolása szempontjából a legkézenfekvőbb a kettes

számrendszer alkalmazása, hiszen ebben az esetben elég két állapotot – a nullát és az egyet – megkülönböztetni, és tárolni. A decimális értékek bináris átalakítása után létrejön a digitális jel kódja, a PCM (pulse code modulation).



11.6. ábra: A kódolás folyamata

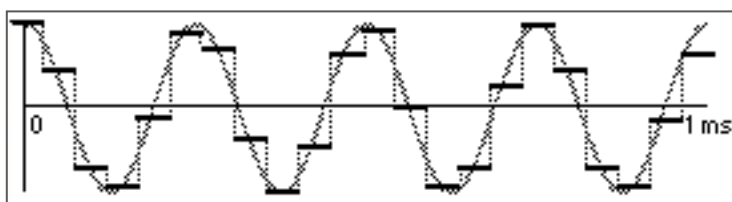
11.3. A digitalizált hang minőségét meghatározó tényezők

Az átalakítás minőségére mind a mintavételi frekvencia, mind pedig a kvantálás felbontásának finomsága komoly hatással van.

11.3.1. A mintavételezési frekvencia

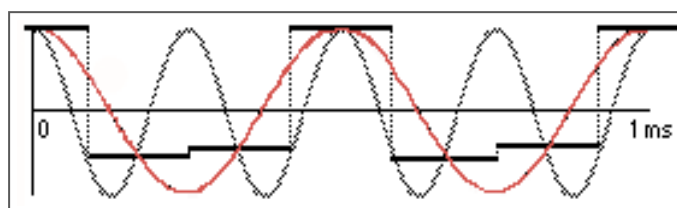
A mintavételezési frekvencia meghatározza, másodpercenként hány alkalommal mérjük meg az analóg jel feszültségét. A Shannon–Nyquist-törvény szerint a mintavételezési frekvenciának legalább kétszer akkorának kell lennie, mint amekkora a reprodukálni kívánt legmagasabb frekvencia. Ellenkező esetben fellép az „aliasing” jelensége, magyarul álfrekvenciák jelennek meg a jelben. Az „aliasing”, álfrekvenciák jelensége: ha a Nyquist-frekvenciánál magasabb jeleket mintavételezünk, akkor a diszkrét jelsorozatban ezek a frekvenciák átalakulnak alacsonyabb frekvenciákká, ami nem kívánatos, hiszen ezek az alacsonyabb frekvencia-összetevők nem voltak meg az eredeti folytonos jelben, tehát torzítás-ként, idegen jelként jelennek meg.

Az 11.7. ábra egy 4000 Hz frekvenciájú, 22 500 Hz frekvenciával mintavételezett koszinusz hullámot ábrázol. A mintavétel ebben az esetben megfelelő, mivel a maximális digitalizált frekvencia jóval a Nyquist-frekvencia alatt van.



11.7. ábra: 22 500 Hz frekvenciával mintavételezett, 4000 Hz frekvenciájú szinuszhang

A következő, 11.8. ábrán a 4000 Hz-es koszinusz hullámot 6000 Hz-zel mintavételezzük. A mintavétel eredménye 2000 Hz-es hullám.

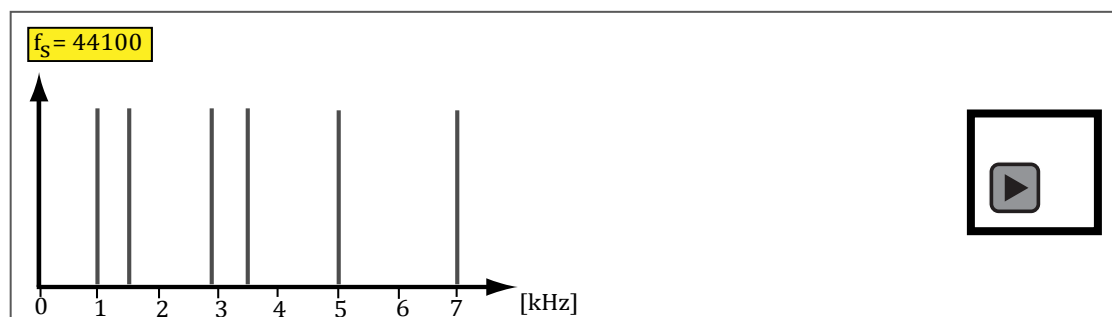


11.8. ábra: 6000 Hz frekvenciával mintavételezett, 4000 Hz frekvenciájú szinuszhang

Az álfrekvenciák hangmagassága kiszámítható, ha ismert a mintavétel gyakorisága és a mintavételezett összetevő frekvenciája:

$$\text{új frekvencia} = \text{mintavételezési frekvencia} - \text{szinuszjel eredeti frekvenciája}$$

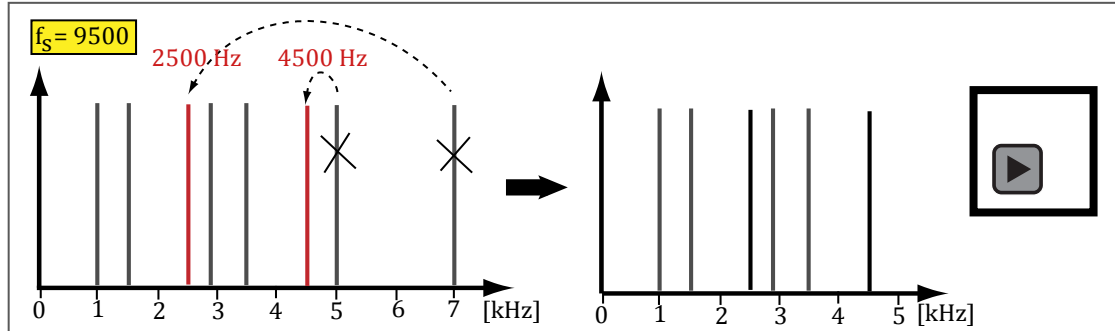
Összetett jelek egészen különböző módon alakulhatnak át, ha különböző, a Nyquist-frekvenciánál alacsonyabb gyakorisággal mintavételezzük őket. Az 11.9. ábrán látható egyszerű kiindulási hang hat szinuszosztetevőt tartalmaz, melyek frekvenciái: 1000 Hz, 1500 Hz, 2930 Hz, 3500 Hz, 5000 Hz, 7000 Hz. Ha 44 100 Hz frekvenciával mintavételezzük a hangot, minden összetevő változás nélkül fog megszólalni, mivel a legmagasabb, 7000 Hz-es szinuszhang frekvenciája jóval alatta van a $44\,100/2 = 22\,050$ Hz-nek.



11.9. ábra: 44,1 Hz frekvenciával mintavételezett összetett jel / 11_01_Hang

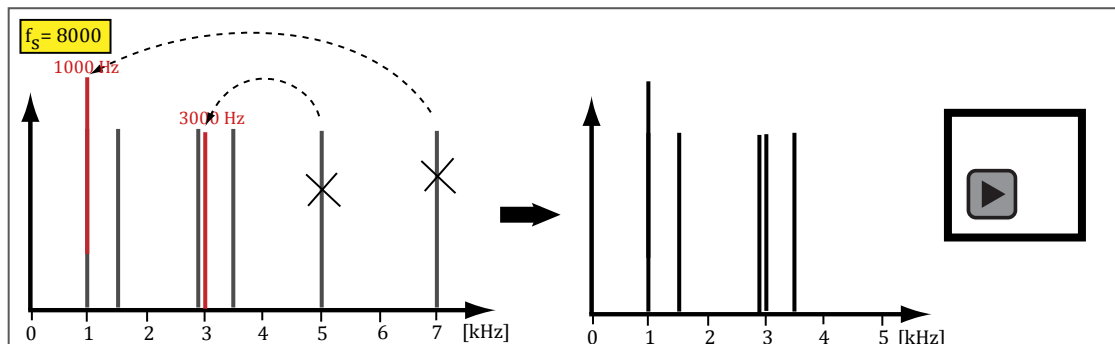
Az alábbi példákön látható és hallható, hogyan változik meg a spektrum, ha a jelet 9500, 8000, és 44,1 kHz mintavételi frekvenciával digitalizáljuk. Ha 9500 Hz

a mintavételi frekvencia, a hangban az összes 4750 Hz feletti összetevő, jelen esetben az 5000 és a 7000 Hz más frekvencián fog megszólalni. A 7000 Hz $9500 - 7000 = 2500$ Hz-re az 5000 Hz $9500 - 5000 = 4500$ Hz-re toódik (lásd 11.10. ábra). A keletkező hang veszít fényességéből, a 2500 Hz és 4500 Hz-en megszólaló új harmonikusok az 500 Hz alaphangérzetet erősítik.



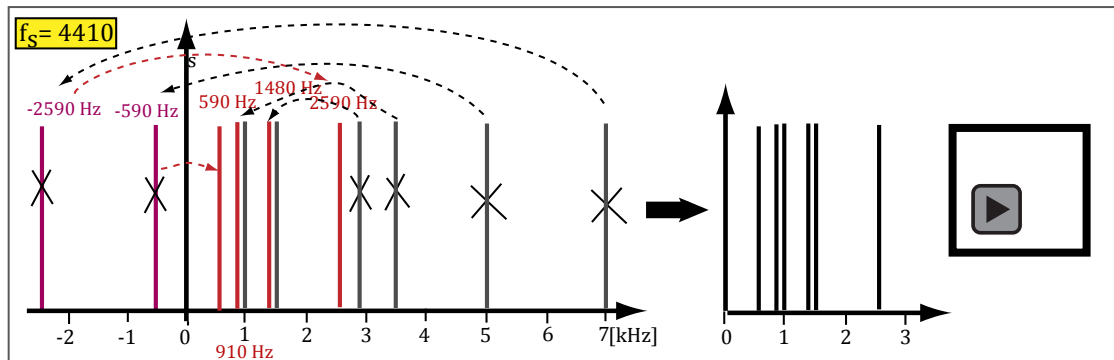
11.10. ábra: 9500 Hz frekvenciával mintavételezett összetett jel / 11_02_Hang

8000 Hz mintavételi frekvencia esetén (lásd 11.11. ábra) is ugyanaz a két összetevő (5000 Hz, 7000 Hz) módosul, a kapott frekvenciaértékek (1000 Hz és 3000 Hz) ebben az esetben azonban az 1000 Hz-es alaphang érzetét erősítik. Az eredeti 2930 Hz és a 3000 Hz közeli helyzete disszonánsabbá teszi az új hangzást.



11.11. ábra: 8000 Hz frekvenciával mintavételezett összetett jel / 11_03_Hang

A hang akkor a legsötétebb és legdisszonánsabb, ha 4410 Hz a mintavételi frekvencia (l. 11.12. ábra) Ekkor már négy összetevő változtatja helyzetét, a domináns 1000 Hz-hez képest mind inharmonikus arányt vesz fel, így az eredeti hanghoz képest sötét, inharmonikus hangzás keletkezik.



11.12. ábra: 4410 Hz frekvenciával mintavételezett összetett jel / 11_04_Hang

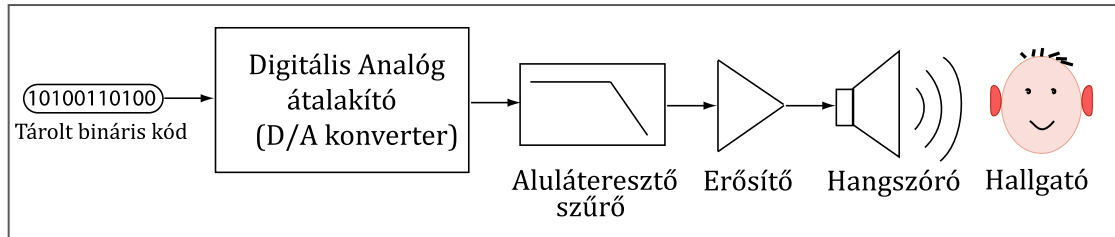
Az emberi hallástartomány körülbelül 20 Hz-től 20 kHz-ig terjed, így a mintavételezési frekvenciának legalább 40 kHz-nek kell lennie, hogy reprodukálni tudja a teljes hallási tartományt.

Az analóg jelek gyakran tartalmaznak a reprodukálni kívánt magasságok feletti frekvenciákat is. Például a CD-minőségű, 44,1 kHz-cel mintavételezett digitális hangok esetén előfordulhat hogy az analóg alapanyag tartalmaz 22,05 kHz-nél magasabb összetevőket is. Ezeket a hangokat már nem halljuk, a digitalizálás következtében azonban hallhatóvá válhatnak mélyebb frekvenciákon. Egy 30 kHz-es összetevő például 14 100 Hz-en szólna meg. Hogy ezt elkerüljük, ki kell szűrni a jelből azokat a frekvenciákat, amelyek a digitalizálандó hangban túllépik a mintavételi frekvencia felét a mintavételezés előtt. Ezt egy aluláteresztő szűrő segítségével lehet megoldani, amely eltávolítja az összetevőket egy megadott határ fölött. Ezért van szükség az 11.3. ábrán látható aluláteresztő szűrőre.

A CD audiojelét másodpercenként 44100-szor, azaz 44100 Hz, ill. 44,1 kHz frekvenciával mintavételezzük. A CD-szabvány is a 20 kHz-es maximális hangmagasságból indul ki, de a 4100 Hz-cel megnövelt frekvenciaterjedeleme lehetővé teszi olyan szűrők használatát, amely folyamatosabb jel elérését, és amelyek segítségével ki lehet küszöbölni a fáziseltolást, amely befolyásolhatja a sztereó képet a magasabb frekvenciákon.

A CD-szabványon kívül léteznek más, kitüntetett mintavételi értékek, mint például a DAT magnó mintavételi frekvenciái, amelyek lehetnek 32, 44,1, ill. 48 kHz. A legújabban gyártott rendszerek már alkalmazzák a 96 kHz-es mintavételezést is.

A digitális formában rögzített hangot vissza kell alakítani analóg jellé, hogy hallhatóvá váljon. Ilyenkor a mintavételezés fordított folyamata megy végbe, amikor a digitális jel a digitál-analóg (D/A) konverterbe kerül. A D/A átalakítóból kilépő jel hamis magas frekvenciákat tartalmaz, melyeket a kvantizációs „lépcsők” állítanak elő. Így ezt a jelet is szűrni kell megfelelő beállítású aluláteresztő szűrő segítségével. Ennek megfelelően a digitális felvételi és lejátszási folyamat az 11.13. ábrán felvázolt módon megy végbe.



11.13. ábra: Digitalizált hang visszajátzása

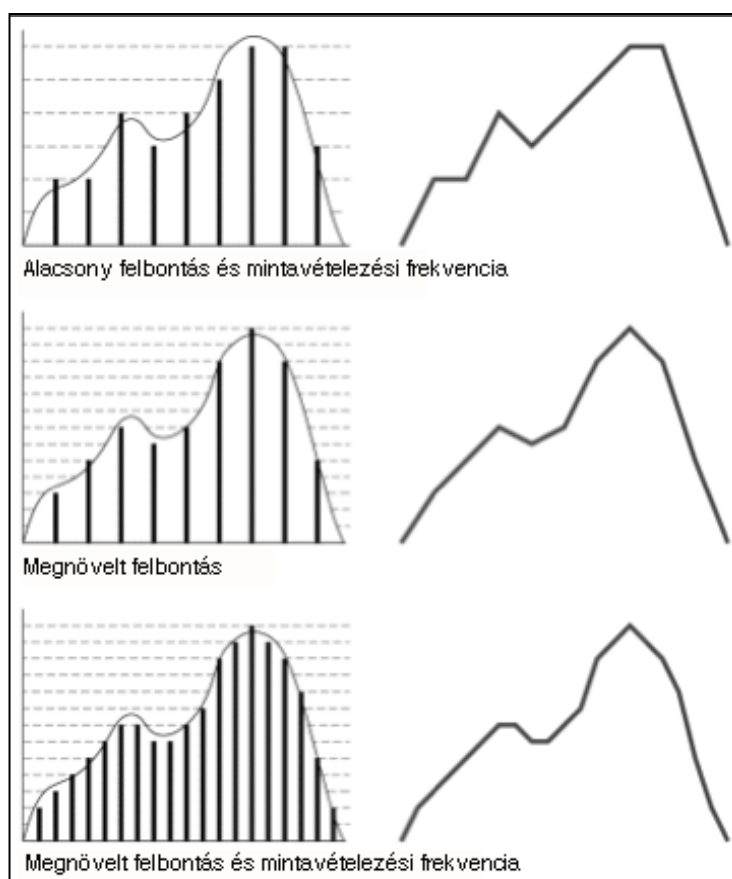
Mintavételi tétel: a Shannon–Nyquist-tétel matematikai eszközökkel bizonyítja, hogy amennyiben egy időben változó jelből állandó frekvenciával mintát veszünk, és a mintavételezés frekvenciája legalább kétszerese a mintavételezett jel legnagyobb frekvenciájának, akkor az így kapott diszkrét jelekből egy aluláteresztő szűrő segítségével az eredeti jelalak rekonstruálható. Matematikailag az is bebizonyítható, hogy a minimálisan szükséges mintavételi frekvencia növelésével nem javítható számottevően az eredeti analóg jel visszaállításának minősége. A mintavételi frekvenciát nem célszerű a sávhatár kétszeresére kijelölni, mert így az aluláteresztő szűrőnek végtelen meredekségű átmenetre lenne szüksége. Mivel nem létezik ideális aluláteresztő szűrő, a gyakorlatban egy picit megnövelik az elméletileg elegendő mintavételezési frekvenciát.

11.3.2. A kvantálás finomsága

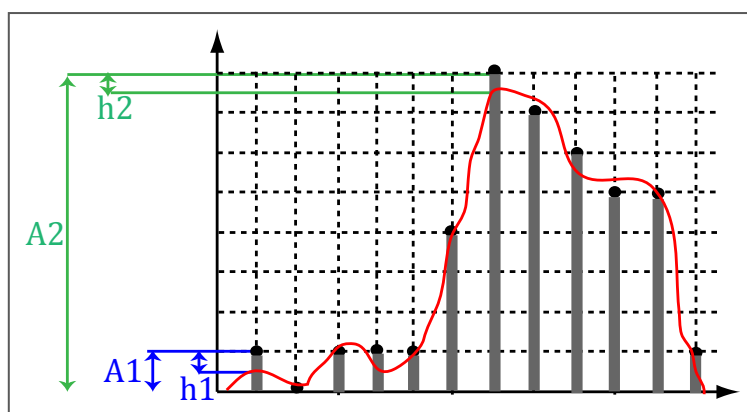
A kvantálás finomsága a digitális jelfeldolgozás másik fontos paramétere. Minél finomabb a kvantálás (minél több kvantumlépcső van), annál pontosabban lehet visszaállítani az eredeti analóg jelet. A 11.14. ábrán látható, hogyan finomodnak a kvantumlépcsők a jobb felbontású kvantálás és mintavétel hatására.

CD-minőségű hangfrekvenciás jelek digitalizálásánál a kvantálás 16 biten történik, ami azt jelenti, hogy a jel amplitúdójának méréséhez 2^{16} , azaz 65 536 érték áll rendelkezésünkre. A 0 000 000 000 000 000 (zero) bináris szám a -32 768 (lehető legalacsonyabb) értéknek, az 1 111 111 111 111 111 (65535) bináris szám a 32 767 (lehető legmagasabb) értéknek felel meg. A finomabb felbontás növeli a dinamikai tartományt és csökkenti a kvantizációs torzítást és alapzajt. A felbontás növekedése egy bittel 6 dB-es jel-zaj arány növekedésnek felel. Az audio-CD-k jel-zaj aránya kb. 96 dB.

A kvantálás során egész számokat kell kiválasztanunk, hogy az egyes minták értékét megjelenítsük. Az A/D konverter a legközelebbi egész számhoz kerekít. Ez kis kerekítési hibákat hoz létre a digitalizált jelben, amelyek torzítást okoznak. A kvantálásból eredő torzítás alacsony szintek esetén nagyobb mértékű, mivel a jel a rendelkezésre álló dinamikai tartomány kisebb részére esik, így a hiba százalékos aránya magasabb, mint az erősebb dinamikai tartományokban. Az 11.15. ábrán látható, hogy amikor a jel halk, a kvantizációs hiba (h_1) a jel amplitúdójának (A_1) közel 50%-a. Hangos szakaszok esetén a kvantizációs hiba közel ugyanakkora (h_2), de aránya a jelszinthez (A_2) képest lényegesen kisebb.



11.14. ábra: Kvantálás és mintavételezés felbontásának finomítása



11.15. ábra: Kvantizációs zaj és dinamika összehasonlítása

A jelenséget a következő két hangpélda illusztrálja. Az első esetben a kórust 16 bites, másodszor 8 bites felbontással kvantálták. A 16 bites felvétel tiszta, zajtalan hangzásához képest a 8 bites felbontás zajos, torz érzetet kelt. Jól megfigyelhető, hogy a halk, piano szakasz a felvétel elején lényegesen torzabb, szinte kivehetetlen, mint a későbbi, hangosabb belépések.



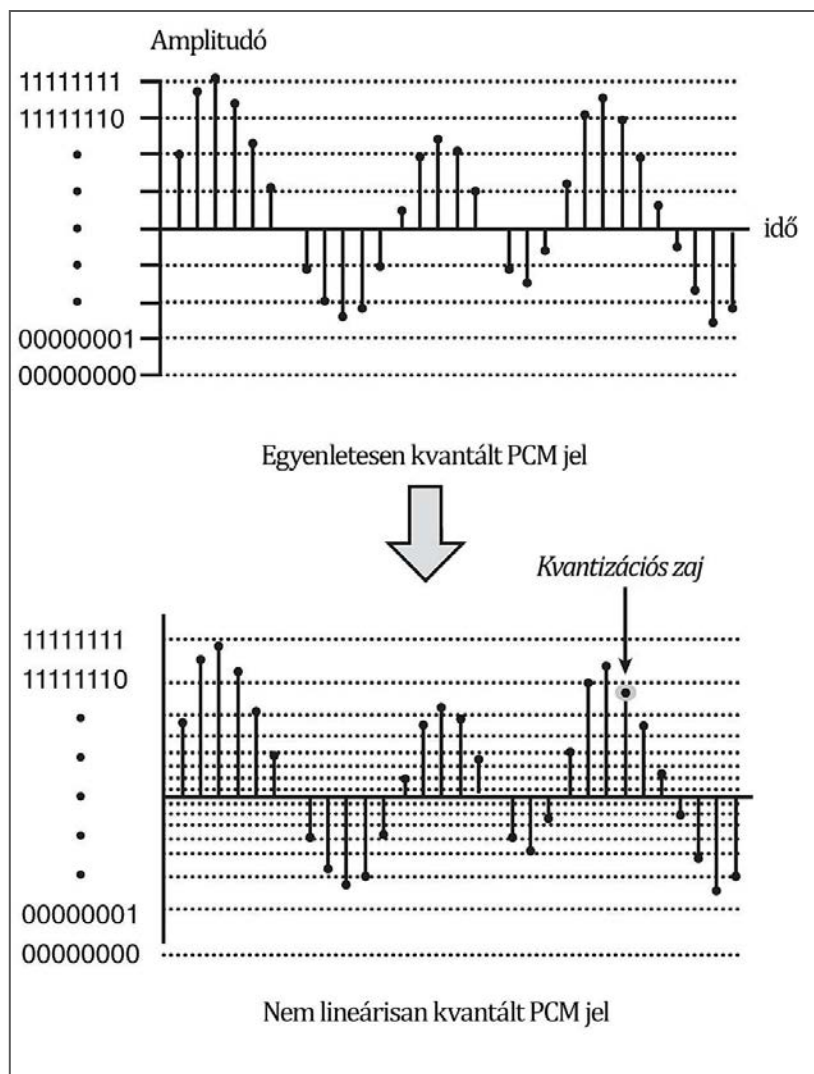
11.5. Hang



11.6. Hang

A kvantálási zaj csökkentésére több módszert létezik. Ilyen az a) nem lineáris skálázás és a b) „dithering” is.

- a) a nem lineáris skálázáskor a nagy amplitúdójú jelek esetében nagyobbak, a kis amplitúdójúaknál pedig kisebbek a kvantálási szintek.



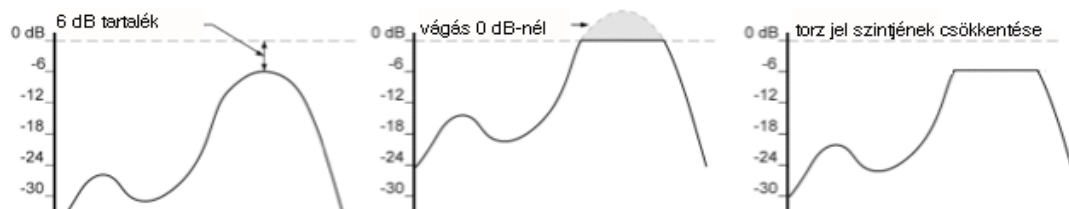
11.16. ábra: Nem lineáris kvantálás

- b) A „dither” szó egy olyan módszert jelent, amikor kis mennyiségű zajt adnak a jelhez, hogy a kvantálásból eredő hibát magasabb dinamikai tartományba tolják el elfedve így a durva kvantálási lépcsők miatti egyenetlenséget. Bár kismértékű zajszintnövekedés tapasztalható, a spektrálisan jól kialakított dither minimalizálni tudja a zajnövekedés érzetét. A zaj kevésbé zavaró, mint a torzítás, és lehetővé teszi, hogy az alacsony szintű jelek is tisztán hallhatóak legyenek.

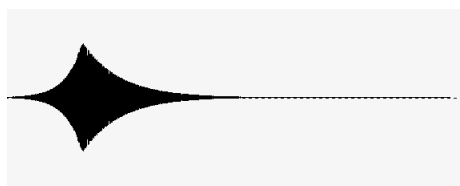
11.3.3. A digitális túlvezérlés (clipping)

A digitális audio jelek szintjét általában dB-ben fejezzük ki. A legmagasabb szintnek a 0 dB-es értéket vesszük, az összes többi szint ehhez viszonyított érték.

A digitális audio egyik legfontosabb szabálya, hogy a jelnek soha nem szabad túllépnie a 0 dB szintet. Ha jelszint túl magas, a csúcsokat a rendszer kiegyenlíti (levágja) 0 dB-nél. Ez szélsőséges torzítást okoz, amelyet későbbi hangerőcsökkentéssel nem lehet megszüntetni (lásd 11.17. ábra).



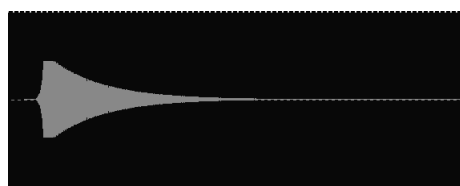
11.17. ábra: Digitális túlvezérlés



11.18. ábra: Digitális túlvezérlés: 0 minta



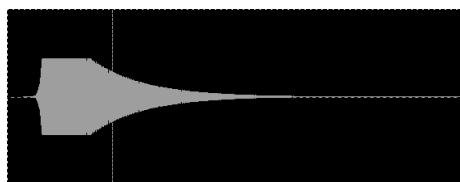
11.1. Hang



11.19. ábra: Digitális túlvezérlés: 86 minta



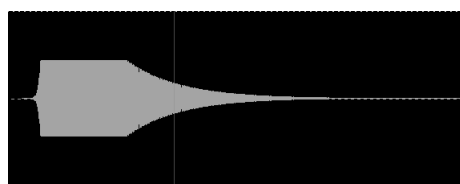
11.7. Hang



11.20. ábra: Digitális túlvezérlés: 2990 minta



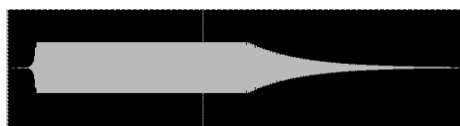
11.8. Hang



11.21. ábra: Digitális túlvezérlés: 34 434 minta



11.9. Hang



11.22. ábra: Digitális túlvezérlés: 89 000 minta



11.10. Hang

A digitális túlvezérlés mértékét számos szoftver a torzított minták mennyiségével határozza meg. A következő példák a 11.9. ábrán bemutatott szintetikus hang különböző mértékű torzításait mutatják be.

11.4. A digitalizált hang minőségét meghatározó tényezők

- szélesebb dinamikatartomány
- kisebb zajtartalom
- jobb másolhatóság
- hibakorrekción
- tartósság

12. Digitális audio tömörítése, hangfájlformátumok

12.1. Digitális hangfájlok mérete, bitsebessége

A digitális hangállományok tárolásához sok helyre van szükség, mivel a gyakori mérés és kvantáláshoz felhasznált bitek száma sok információt jelent. Egy 44,1 kHz mintavételezési frekvenciával felvett hangállomány hossza csatornánként és percenként: A hifi (CD-minőség) digitális audio mintavételi frekvenciájával (44 100 minta/sec.), 16 bit kvantálási hosszal felvett, 1 perc hosszú, digitális sztereó hang tárolásához szükséges adatmennyiséget úgy lehet kiszámítani, ha a 44 100 minta/s-t összeszorozzuk a 16 bittel, majd a sztereó hang két csatornájával, végül az 1 percnél megfelelő 60 másodperccel. Az eredmény 84 672 000 bit. Ahhoz, hogy a fájl méret leírására szabványosított [Byte] mértékegységben kapjuk meg a végeredményt, a bitben kapott értéket el kell osztanunk 8-cal, hiszen 1 byte=8 bit. Az átváltás után megkapjuk, hogy 1 perc hang tárolásához 10 584 000 Byte =10.5 MByte-nyi tárolóhelyre van szükség.

12.1. táblázat: A hangfájl méret kiszámításának módja

Mintavételi sebesség	x	Felbontás	x	Csatornák száma	x	Idő (sec.)	/	Bit / Byte	=	Fájl méret (Byte)
44 100	x	16	x	2	x	60	/	8	=	10 584 000

A digitális audio méretének csökkentésére van lehetőség a fenti adatok változtatásával, de ez mindig a fájl méret és a hangminőség közötti választást jelenti. Amennyiben a mintavételi sebességet csökkentjük, kisebb lesz a fájl, de alacsonyabb lesz az elérhető legmagasabb frekvencia. A felbontás csökkentésével is kisebb lesz a fájl méret, de a kvantizációs hibák miatt csökken a mintavételezés pontossága, ami egyre több zajban és torzításban, valamint a dinamikatartomány beszűkülésében nyilvánul meg. Ha sztereó helyett monó jelet használunk, a fájl méret a felére csökken, ekkor azonban komoly veszteséget szenved a térérzet.

Az egy másodpercre eső adatmennyiséget bitsebességnek vagy bitrátának (bit-rate) nevezzük, melynek mértékegysége bit/sec (bps) vagy kbit/sec (kbps).

12.2. táblázat: A bitsebesség kiszámításának módja

Mintavételi sebesség	x	Felbontás	x	Csatornák száma	x	=	Bitsebesség
44 100	x	16	x	2	x	=	10 584 000

A bitsebesség közvetlen összefüggésben van a fájl méretével és a hangminőséggel. Alacsonyabb bitsebességek kisebb fájlokat jelentenek, a hangminősége gyengébb. Magasabb bitsebességek jobb hangminőséget jeleznek, de nagyobb fájlok formájában.

Hálózatokban a digitális audiojel sávszélességigénye ugyanakkora, mint bitsebessége, amiből logikusan következik, hogy jó minőségű, nagy méretű fájlok problémamentes továbbításához nagyobb sávszélességű, azaz gyorsabb hálózatokra van szükség.

12.3. táblázat: Digitális hangfájlok méretének és bitrátájának változásai alapparamétereik függvényében

Mintavételi sebesség	Felbontás	Csatornák száma	Fájl méret - 1 perc [Byte]	Bitsebesség [bps]
44,100	16	2	10,584,000	1,411,200
44,100	16	1	5,292,000	705,600
22,050	16	1	2,646,000	352,800
12,025	16	1	1,323,000	176,400
12,025	8	1	616,000	88,200

12.2. Digitális audio tömörítése

A korlátozott hálózati sávszélesség és a merevlemezek kapacitásigénye a fő hajtóereje a tömörített audioformátumok kifejlesztésére szolgáló kutatásoknak. Audio- és elektromérnökök azóta próbálják megoldani a hálózati szűk keresztmetszet (bottle-neck) problémáját, amióta a hálózatok léteznek. A problémát két oldalról közelítik meg: növelik a sávszélességet (modem, ISDN, ADSL, kábel, T1 Line) és adattömörítést végeznek (pl. JPEG- vagy MPEG-formátum). A digitális hangok esetében az MP3-formátum például nagy előrelépést jelent a területen, hiszen a fájlokat 1:10 arányban is képes tömöríteni jelentős minőségromlás nélkül. Négyperces, CD-minőségű audio körülbelül 40 MB tárolóhelyet igényel, és letöltése egy 28.8 kbps modemmel tovább tart, mint 3 és fél óra. Ilyen bitsebesség mellett egy 1 GB flash-memória körülbelül 25 négyperces számot tud tárolni. A 128 kbps-ű MP3-kódolással egy négyperces szám 4 MB helyet foglal, és kevesebb mint 20 perc alatt letölthető a 28.8 kbps modemmel. Az 1 GB-os flash-memória ebben az esetben körülbelül 250 számot tud tárolni.

12.2.1. Veszteséges és veszteség nélküli tömörítés

A tömörítésnek két fő típusa van: a veszteséges és a veszteség nélküli. A veszteség nélküli tömörítés az információ ismétlődő elemeit szimbólumok és algoritmusok formájában kódolja. Ezeknek kisebb a helyigényük, és biztosítják mindazt az információt, amire szükség van az eredeti pontos másolatának rekonstruálásához. A veszteség nélküli tömörítés esetén nincs minőségcsökkenés. A veszteségmentes audio tömörítésének aránya 2:1, de a minőség mindig megegyezik az eredeti hang minőségével.

A veszteséges tömörítés során eltávolítják a jelből a fölösleges és redundáns információt (pl. a hangzás olyan összetevőit, amelyet a legtöbb ember nem hall), majd veszteségmentes tömörítést alkalmaznak további méretcsökkentés céljából.

A veszteséges tömörítéskor mindig keletkezik valamilyen mértékű minőségromlás, amely jobban észrevehetővé válik, ahogyan a tömörítésarány növekszik. A cél ilyenkor, hogy olyan tömörített hangzást keletkezzen, melyben a veszteségek nem észrevehetőek, illetve nem zavaróak.

A veszteséges tömörítéskor a minőség a bitsebesség, a zene komplexitása és a tömörítő szofver minőségének függvényében változik. A veszteséges tömörítés bizonyos módszerei, mint például az MPEG AAC, 11:1 tömörítésarányt tudnak elérni úgy, hogy az eredményt nem lehet megkülönböztetni az eredeti hangzástól. Ezt számos kontrollált, zeneileg képzett hallgatón végzett pszichoakusztikai teszt igazolja.

12.2.2. A pszichoakusztikai modell, azaz a percepció szerinti kódolás

Az audio adattömörítés hatékonyságát a PCM modelltől való eltérése okozza. A PCM rendszer célja, hogy a jel hullámformáját olyan pontosan reprodukálja, amennyire csak lehetséges. Számos forrás nagyfokú egyszerűsítésnek tartja ezt a megközelítést, amely az emberi percepció működésének félreértésén alapul.

Hallásunk – mind a fülünk mind pedig az elménk – „tökéletlen”, torzításokra hajlamos mérőeszköz, mely a külső jelenségeket saját módszerei szerint interpretálja, melyet számos faktor (pl. a hang frekvenciatartalma, a háttérzaj mértéke stb.) befolyásol. Az emberi érzékelés nem pontosan tükrözi a külső világ eseményeit, bizonyos tulajdonságokra reflektálva kihangsúlyoz egyes minőségeket.

Ennek megfelelően belátható, hogy amennyiben az emberi hallgató számára kívánjuk reprodukálni a hangot, nem szükséges pontosan újrakreálni a hang hullámformájának minden részletét. Ehelyett annak meghatározására kell törekedni, hogy a hullám mely tulajdonságai a legfontosabbak a hallgatónak, és ezek felvételét kell előnyben részesíteni. Egyszerűsítve azt lehet mondani, hogy a PCM úgy próbálja rögzíteni a hullámformát, ahogyan az létezik, míg a tömörített hangformátumok oly módon, ahogyan szól.

Döntések sorozatát kell meghozni, melyek meghatározzák, hogy milyen hangzástulajdonságok bírnak jelentőséggel a hallás szempontjából. Ennek a döntéssorozatnak az eredményét nevezzük „pszichakusztikai modell”-nek.

A pszichoakusztikai modell megértéséhez két fontos koncepciót, a felesleges (redundáns) és a jelentéktelen (irreleváns) információt kell figyelembe venni. Mindkét kifejezés azt az alapot határozza meg, aminek alapján az audio-információ egy részét feleslegesnek ítéljük, és elfogadhatatlan minőségromlás nélkül eltávolítjuk a jelből. Felesleges (redundáns) információ pl. a 20 000 Hz feletti tartomány. Az „irreleváns” kifejezés radikálisabb és nehezebben meghatározható tulajdonságokra utal. A pszichoakusztikai kódolás elmélete szerint az emberi percepció sajátosságai miatt egy adott hullám bizonyos tulajdonságai nem hordoznak jelentést az emberi hallgató számára, és így nem érzékelhetőek.

12.2.3. Az elfedés jelensége és alkalmazása a tömörítés során

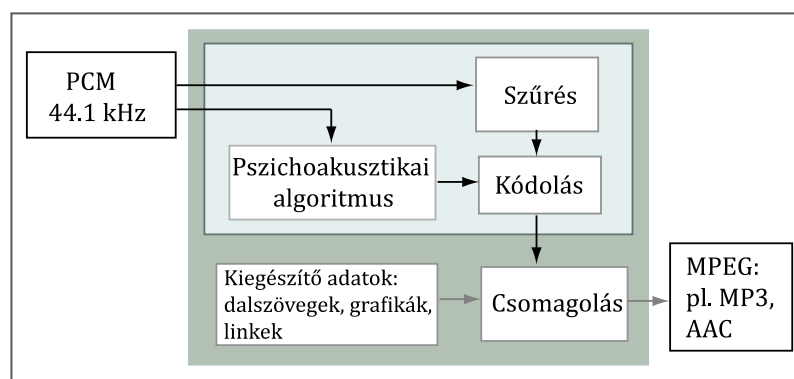
Ha két, egymástól nem túl távoli frekvenciájú, de különböző erősségű hangot hallunk, akkor az erősebb elnyomja a gyengébbet, ez az elfedés jelensége.

A pszichoakusztikai modell elsősorban az elfedés jelenségén alapul. Az elfedés jelenségének ismerete teszi lehetővé, hogy nagy mennyiségű adatot távolítsunk el a konvencionális, PCM-módszerrel kódolt hullámformából. Ez nem jelenti az elfedett hangelemek teljes megszüntetését, ez valószínűleg nagyon mesterséges hangzást okozna. A perceptuális alapú kódolás során az elfedett területekhez kevesebb bitet rendel a módszer, mint a releváns részekhez. Emiatt a kevesebb bittel kódolt sávok torzítást tartalmaznak, ez azonban (remélhetően) nem érzékelhető az elfedés miatt. Az elfedett tartományok kisebb bitszámmal történő kódolása miatt összességében kevesebb bitszámmal van szükség, így éri el például az Mpeg-kódolás az audiófájlok nagyságának akár 1/10-re való redukálását jelentősebb minőségromlás nélkül.

12.3. Az MPEG-kódolás

Az MPEG audió az ún. perceptuális kódolást alkalmazza, amely veszteséges kódolási technika. Az audio tömörítéséhez az MPEG-tömörítő program először egy pszicho-akusztikai modellt alkalmaz, hogy azonosítsa a jel azon részeit, amelyeket a legtöbb ember nem képes meghallani. Ezeket eltávolítja a jelből, és ezután veszteség nélküli adattömörítést végez.

A módszer nem tökéletes, hiszen a hallás érzékenysége személyenként változik. Ez az érzékenység – a fejlesztők szerint – azonban egy véges terjedelmen belül található, így behatárolható az a nagyságrend, amely az emberek nagy többségére vonatkozhat.



12.1. ábra: MPEG-kódolás

12.3.1. MPEG-rétegek (Layers)

Számos egymással kapcsolatban álló kódolómódszer tartozik az MPEG-családba. Ezeket rétegeknek, Layer I, II és III, nevezik, melyek az MPEG-1 és MPEG-2 alatt is léteznek. Az MPEG-2 része az MPEG AAC, ami nem kompatibilis az I–III réteggel.

Minden réteg ugyanazt az alapstruktúrát használja, és minden réteg magában foglalja az alatta található rétegek kínálta lehetőségeket. A magasabb sorszámú rétegek jobb hangminőséget kínálnak hasonló mértékű bitsebességen és összetettebb kódolószoftvert igényelnek. Ennek megfelelően nagyobbak kell lennie a kódolásra és visszaalakításra szánt feldolgozási kapacitásnak.

12.3.2. Az MP3

Az MP3 jelenleg az egyik legelterjedtebb és legnépszerűbb veszteséges audiotömörítő módszer. Három különböző, de nagyon hasonló formátum, az MPEG-1 Audio Layer3 és az MPEG Audio Layer és a nem hivatalos MPEG-2.5 Audio Layer3 közös elnevezése, melyek a bitsebesség és a mintavételezési frekvencia megengedett értékeiben különböznek egymástól.

Az MPEG-1/2 Layer 2-es kódolás fejlesztése a Fraunhofer Intézet Digitális hangátviteli projektjének (DAB) keretében indult. A kutatások már 1987-ben elkezdődtek, a végeredményt 1995-ben publikálták. Az MP3-at azzal a céllal hozták létre, hogy elérjék azt a minőséget 128 kbps bitsebességen, amire az MP2 volt képes 192 kbps-on. Az MP3 tömörítési eljárásának alapját szabadalmak védik, és az ilyen formátum előállítására képes programok után alkotóiknak jogdíjat kell fizetniük a Fraunhofer Intézet részére.

Mivel az MP3-szabványok csak a fájl formátumát és kitömörítőt határozzák meg, a tömörítő algoritmust azonban nem definiálják, az MP3-nak a használt tömörítő (kodek) szerint számos különböző változata lehet. Ez azt jelenti, hogy magában az MP3-szabvány nem jelent állandó minőséget, a különböző gyártók által alkalmazott verziók egymástól eltérő hangzást eredményezhetnek.

12.3.3. A tömörített hangok minősége és mérete közötti összefüggések

A tömörített hangzás minőségének mérésére az MPEG nemzetközi teszteket szervezett. A tesztek eredményeit az ITU-R (International Telecommunication Union) összehasonlító skálája szerinti értékekkel adták meg, ami a következő fokozatokat tartalmazza:

- 5.0 – érzékelhetetlen (megkülönböztethetetlen az eredetitől)
- 4.0 – érzékelhető (érzékelhető különbség, de nem zavaró)
- 3.0 – kissé zavaró
- 2.0 – zavaró
- 1.0 – nagyon zavaró

Ennek alapján a Fraunhofer Intézet hivatalos honlapja a következő tömörítési arányokat és adatsűrűségeket javasolja az MPEG-1 Layer 1, 2 és 3-hoz:

- Layer 1: 384 kbps, 4:1 arány,
- Layer 2: 192–256 kbps, 6:18:1 arány,
- Layer 3: 112–128 kbps, 10:112:1 arány.

A következő táblázat azt mutatja, hogy az egyes módszerekkel különböző bitsebességeken milyen mértékű tömörítés érhető el.

12.4. táblázat: Bitsebesség és tömörítés aránya

Formátum	Bitsebesség	Tömörítés
Red Book (CD)	1.4 Mbps	None
MPEG Layer-I	384 kbps	3.6=1
MPEG Layer-II	256 kbps	5.5=1
MPEG Layer-III (MP3)	192 kbps	7.3=1
MPEG Layer-III (MP3)	VBR Normal/High	7=1 to 10=1
MPEG AAC	128 kbps	11=1

Összehasonlításként vizsgáljuk meg, az egyes tömörítések segítségével mekkora fájl méreteket lehet elérni, és az így kapott értékek segítségével milyen gyorsan lehet a fájlokat továbbítani.

Számos tudós vizsgálta már a kérdést, **hogy vajon az MP3-as zeneszámok hallgatása komolyan károsíthatja-e a hallást.** Jonathan Berger, a Stanford Egyetem munkatársa több különböző minőségű MP3-as fájlt játszott le a hallgatóinak, akiknek egyre inkább a rosszabb minőségű felvételek tetszettek.

Hasonló eredményre jutott Emil Lubej professzor, a Bécsi Egyetem Zenetudományi Intézetének szakértője is. „Az elmúlt esztendő folyamán azt állapítottam meg, hogy fokozatosan romlik az emberek megkülönböztető képessége. Az ok egyszerű: egyre többen hallgatnak rossz minőségű MP3-as

zeneszámokat a világhálón, és a fülük ezekhez szokik hozzá. Ennek köszönhető, hogy később már nem érzik a különbségeket egy rossz minőségű MP3-as dal és az eredeti nóta között. Ha a felhasználóknak örömet okoznak a rosszabb minőségű felvételek, lelkük rajta, de én úgy gondolom, hogy legalább 128 kilobites vagy annál magasabb bitrátájú felvételeket kellene hallgatniuk. Mindenkinek kellene egy próbát tenni” – szögezte le Lubej¹¹.

12.5. táblázat: Tömörítés aránya az átviteli sebességgel

Fájlméret – bitsebesség					
Bitsebesség	Fájlméret (4 perc)	MB / perc	Tömörítés	Óra/GB	4 perces dal / GB
1,411 kbps (CD Audio)	41,3 MB	10.3	None	1.7	25
80 kbps	2,3 MB	0.6	7.6 = 1	29.1	437
128 kbps	3,8 MB	0.9	12.0 = 1	18.2	273
160 kbps	4,7 MB	1.2	8.8 = 1	14.6	218
192 kbps	5,6 MB	1.4	7.3 = 1	12.1	182
256 kbps	7,5 MB	1.9	5.5 = 1	9.1	137
320 kbps	9,4 MB	2.3	4.4 = 1	7.3	109

12.4. Digitális hangformátumok

A digitális hang különböző formátumokban jut el a felhasználóhoz. A formátumokat fejlesztő csoportok némelyike védett, mások (mint pl. az MPEG) szabadon felhasználható szabványokat fejlesztett ki. A szabadon fejlesztett szabványokat alkalmazó formátumok esetében is előfordulhat, hogy nem kompatibilisek egymással, mert tartalmazhatnak védett elemeket. Szerencsére a berendezések és a szoftverek többsége többfajta formátumot támogat.

12.4.1. Digitális hangfájlok szerkezete

A digitális hangfájl két fő részből áll: a fejléc (header) és az audioadatsor. A fejléc a fájlt leíró információkat – a mintavételi sebességet, a felbontás mértékét, a tömörítés típusát – tartalmazza. Gyakran alkalmaznak ún. „borítást” (angolul: wrapper) is egyéb tulajdonságok közlésére (pl. licence-menedzsment, streaming lehetőségek).



12.2. ábra: Digitális hangfájl szerkezete

¹¹ <http://ingyenmp3letoltes.hu/category/mp3-formatum/>

A digitális audiofájl formátuma (angolul: codec) a fájlban belüli audioadatokra utal. A fájl típusa a fájlban belüli adatok struktúráját írja le. Gyakori, hogy ugyanazt a formátumot több fájl típus használja. Pl. a PCM-formátumot alkalmazzák a WAV és az AIFF fájlok is.

12.4.2. Általánosan elterjedt audioformátumok és -típusok

12.6. táblázat: Audioformátumok és -típusok

Típus	Kiterjesztés	Codec
AIFF (Mac)	.aif, .aiff	*PCM
AU (Sun/Next)	.au	*u-law
CD audio (CDDA)	N/A	PCM
MP3	.mp3	MPEG Audio Layer-III
Windows Media Audio	.wma	Védett (Microsoft)
QuickTime	.qt	Védett (Apple Computer)
RealAudio	.ra, .ram	Védett (Real Networks)
WAV	.wav	*PCM

* Más kodekkel is használható.

WAV

A WAV az alapértelmezett digitális audioformátum a Windows operációs rendszereken. A WAV fájlokat általában PCM-formátumban kódolják, ami azt jelenti, tömörítetlenek, és sok helyet foglalnak.

AIFF és AU

Az AIFF az alapértelmezett audiofájl a Macintosh számítógépeken, az AU pedig a SUN rendszereken. Mindkét formátumot támogatják más platformok is, és a legtöbb audioprogram. Tömöríthetőek, bár tömörítésük néha kompatibilitási problémákat okozhat más platformokkal.

Streaming Audio

A Streaming Audio sok problémáját megoldja a nagy audiofájloknak. Mielőtt teljesen letöltődik az audiofájl, hallgatni lehet a hangot, amint az adatok a számítógépbe érkeznek. A Streaming Audio lejátszók néhány másodpercnyi anyagot tárolnak a pufferben, mielőtt elkezdik a lejátszást. A puffer feldolgozza az interneten beérkező adatcsomagokat, és állandó sebességgel engedi őket tovább az egyenletes lejátszás érdekében. Többféle digitális audioformátumot lehet áramoltatni, ha borításuk („wrapping”) Stream Audio.

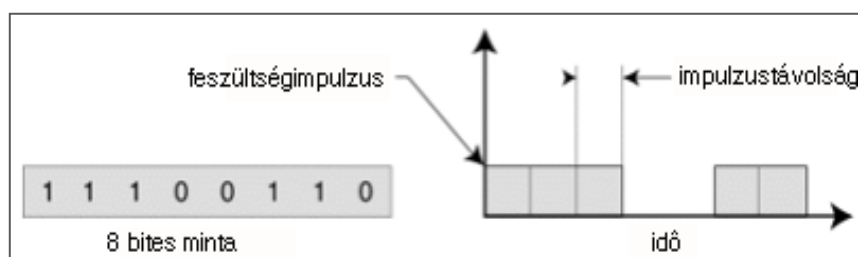
Szabványosított formátumok

A szabványosított formátumok megkönnyítik a szoftverfejlesztők és hardvergyártók számára, hogy kevésbé költséges és egymással kompatibilis termékeket gyártsanak. A szabványosított formátumok biztosítják a felhasználót, hogy tárolt zenéik és berendezéseik nem avulnak el (technikai értelemben).

PCM

PCM (Pulse Code Modulation) vagy impulzuskód-moduláció a tömörítetlen digitális audio tárolásának és továbbításának általános módszere. Mivel ez általános formátum, a legtöbb audiofelhasználás olvassa. PCM-et alkalmaznak a CD- és DAT-tárolókon, és PCM a formátuma az AIFF és WAV fájloknak.

A PCM közvetlen megjelenítése a mintaértékek bináris számjegyeinek (1-k és 0-k). Amikor PCM audiót továbbítunk, minden 1-es számjegynek pozitív feszültségimpulzus, minden 0 számjegynek pedig a feszültségimpulzus hiánya felel meg.



12.3. ábra: PCM-kód

DPCM (Differential Pulse Code Modulation)

A különbségi impulzuskód moduláció egyszerű formája a veszteséggel járó tömörítésnek, amely csak az egymást követő minták közötti különbségeket tárolja. A DPCM 4 bitet használ a különbség tárolására függetlenül az eredeti minta felbontásától. A DCPM módszerrel a 8 bites fájl 2:1, a 16 bites fájl 4:1 tömörítésarányú lesz.

ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation)

Hasonló módszer, mint a DPCM, azzal a különbséggel, hogy a különbségek tárolására fenntartott bitek száma a jel komplexitásától függően változik. Az ADPCM úgy működik, hogy mintasorok analíziséből következtet a következő minta értékére. Ezután tárolja a különbséget a kalkulált érték és a valós érték között. Lejátszás előtt egy ADPCM-dekóder segítségével ismét vissza kell alakítani a tömörített adatokat az eredeti PCM-adatokká.

u-low tömörítés

Elterjedt tömörítési eljárás, az ADPCM-hez hasonlóan működik. AU, AIFF és WAV fájlok tömörítéséhez használható.

MPEG Audio

MPEG (Motion Picture Experts Group) video- és hangtömörítési mód, a név a Motion Picture Group rövidítése. Az MPEG-képtömörítés első képe referencia-ként szolgál, a további képek csak az előzőhöz képesti különbségeket tartalmaznak. Veszteséges tömörítés, azaz nem minden információ állítható vissza.

Az MPEG Audio szabad felhasználású szabványcsalád, amely tartalmazza az MP2-t, az MP3-at és az AAC-t.

MPEG-alapú védett formátumok

Számos védett formátum van, ami az MPEG Audióra épül. Némelyiket speciális felhasználásokban alkalmazzák, mint pl. a hangüzenet, szatellitrádió high definition tv stb. Egyes felhasználások az MP3-mal versenyeznek. Némelyik védett formátum hangminősége nagyon jó, de védettségük miatt nem kompatibilisek sok programmal és hordozható lejátszóval.

- a2b: az AT&T zenei disztribúciós rendszere, amely a jogvédelem és a jogdíjak követését is lehetővé teszi. Vízjelet, titkosítást biztosít. Az a2b-vel kódolt zenék tartalmazhatnak képeket, dalszövegeket és linket a művész weboldalára.
- MP4: Global Music Outlet által kifejlesztett, az MPEG és az ACC továbbfejlesztett változata. Tartalmaz egy belső lejátszót (minden song egy .exe fájl). Tárolhat lemezborító grafikákat és linket a művész weboldalára.
- Liquid Audio: kifinomult zenei terjesztői rendszer, amely a Dolby Digital és az MPEG AAC-n alapul. Letölthető és streamelhető audiót is támogat. Vízjelet és jogvédelmi titkosítást tartalmazhat. Képek, dalszövegek, jegyzetek, ár, linkek.
- Apple QuickTime: széles körben használt multimédia-formátum, melyet az Apple Computer fejlesztett ki. Audio és video streamelést is támogat. A legtöbb MPEG-4 szabvány a QuickTime-on alapul.

13. Hanganalízis, hangszintézis

Az elektroakusztikus zenében a hangszín egyenrangú partnerként, formateremtő elemként jelent meg a hagyományosan elsőrendűnek számító hangmagasság és ritmus paraméterek mellett. Az új hangszínek a kompozíció részévé váltak, az elektronikus zeneszerzés folyamatában meghatározó szerep jut a hangzások kidolgozásának. Mivel a hangszín sokdimenziós, összetett konstrukció, megismeréséhez nem elegendő kizárólag a hallásra támaszkodni. A hanganalízis és a hangszintézis így egymást kiegészítő, sokszor a gyakorlatban (pl. analízis-reszintézis technikák esetében) is együttműködő műveletek.

13.1. Hanganalízis

13.1.1. Kezdeti hangelemzési módszerek

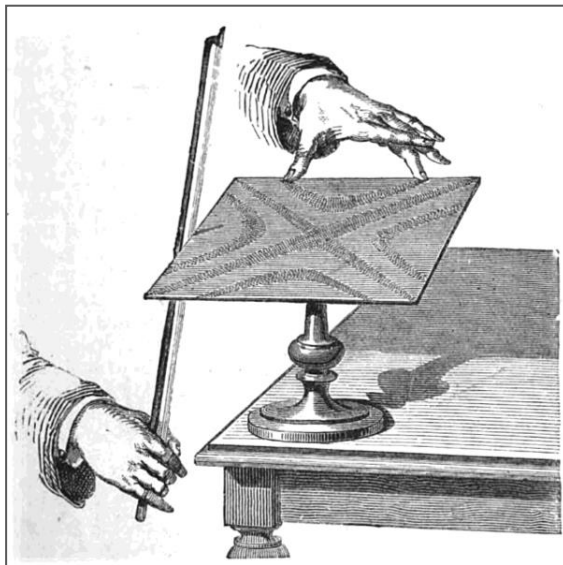
A hang fizikai tulajdonságainak vizsgálatát célzó akusztikai kutatások a XIX. században váltak általánossá. Az elektroakusztikus berendezések elterjedése előtt a hanganalízis területén Ernst Chladni (1756–1827), német fizikus és Hermann von Helmholtz (1821–1894), német orvos és fizikus munkássága jelentette az első legfontosabb lépéseket.



13.1. ábra: Ernst Chladni

Chladni rezonáns síklemezek rezgéseivel foglalkozott, melyek alkalmasak voltak hangrezgések vizualizálására is. A homokkal vagy parafaliszttal beszórt lemezeket megszólaltatva láthatóvá tette a rezgési csomóvonalakat, ahol az

amplitúdó a legkisebb, és az így kapott képeken (Chladni-féle ábrák) jól látszik a lemezek saját rezonanciája (13.02. ábra).



13.2. ábra: Chladni-féle ábra

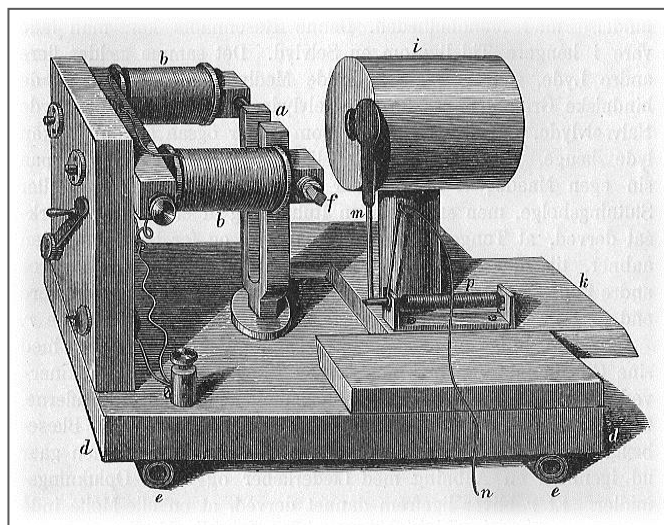
Helmholtz volt az első, aki kimutatta a felharmonikusok jelenlétét az összetett hangzásokban.



13.3. ábra: Hermann von Helmholtz

Ő még csak áttételesen, a hanghullám és a hangspektrum megjelenítése nélkül tudott információt szerezni a hangszínekről. A 13.04. és a 13.05. ábrán Helmholtz eszközei láthatóak, melyeket saját maga épített, hogy vizsgálni tudja a hangok összetevőit. A 13.04. ábrán látható szerkezet arra szolgált, hogy egyszerű szinuszhangot tudjon létrehozni hangvilla hangjának erősítésével. A 13.05. ábrán rezonátor segítségével ki tudta szűrni, hogy a rezonátorra jellemző frekvencia jelen van-e az összetett hangokban. A gömb alakú, rézből készült üregrezonátor

saját frekvenciája a gömb méretétől függ. Az üres gömb kisebbik nyílását fülbe illesztve, egy olyan összetett hangból, amely a rezonátor saját frekvenciáját is tartalmazza, a hang hangosabban hallatszik.



13.4. ábra: Helmholtz-hangvilla



13.5. ábra: Helmholtz-rezonátor

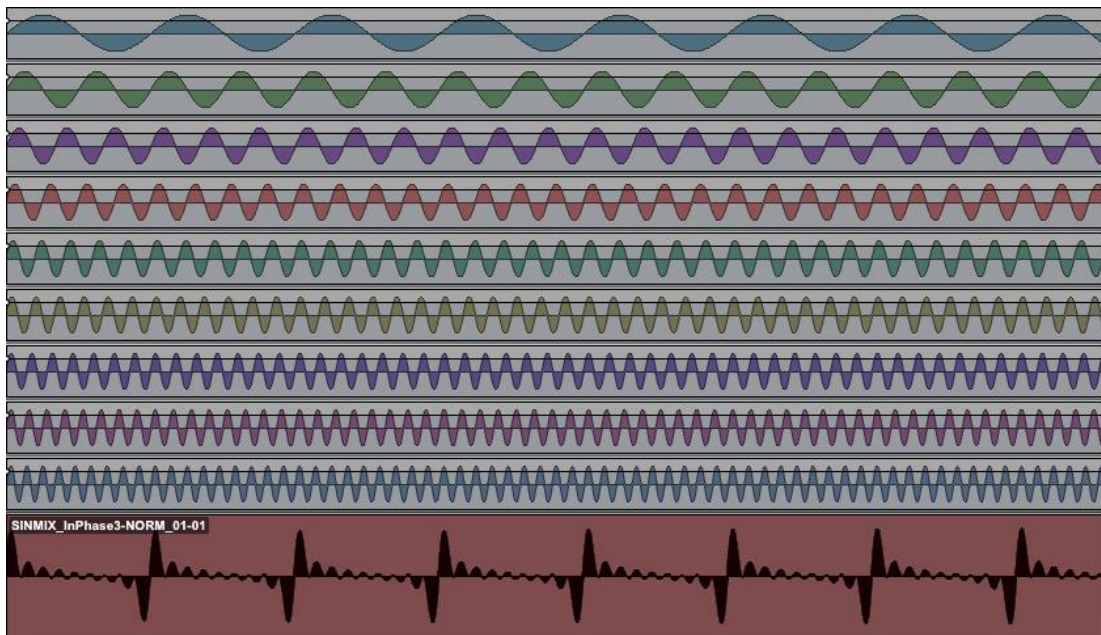
A hangelemzés területén nagy előrelépést jelentett a hangrögzítés, majd -digitalizálás feltalálása. Segítségükkel a hang tárolhatóvá, adatok formájában rögzíthetővé, elemezhetővé és vizualizálhatóvá vált.

Az elektroakusztika és a számítógépes zene fejlődése során olyan eszközök birtokába kerültünk, melyek segítségével lényegesen hatékonyabban lehet vizsgálni a hang szerkezetét. A különböző analízáló és vizualizáló szoftverek lehetővé teszik, hogy a halláson kívül a látást is a vizsgálatok szolgálatába állítsuk. Az egyes ábrázolásmódok más-más információt nyújtanak a hang szerkezetéről, hangzástulajdonságairól.

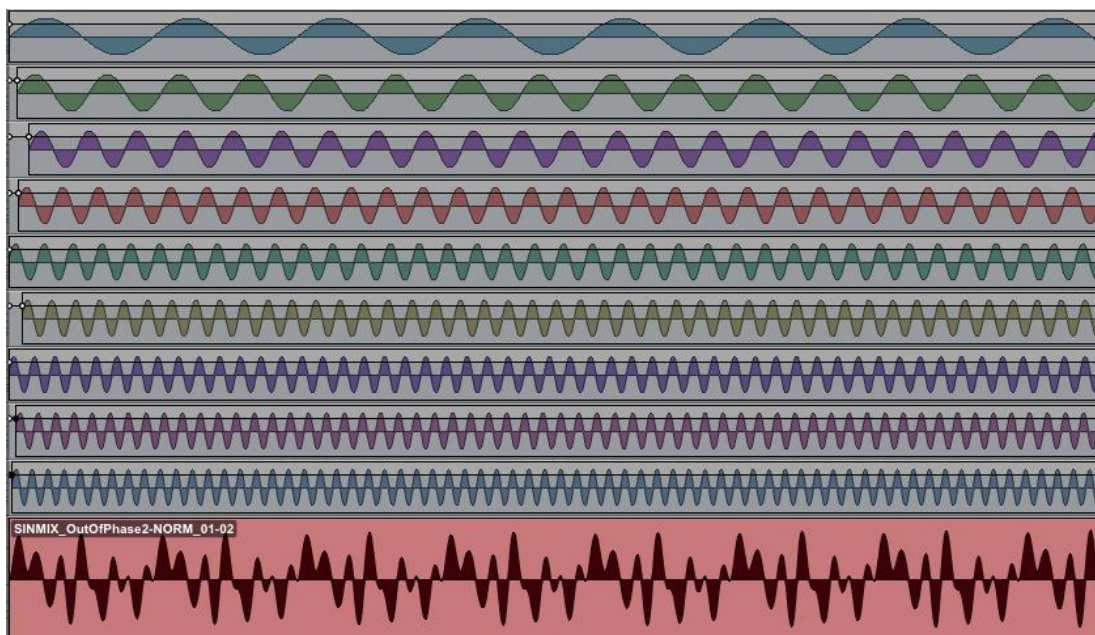
13.1.2. A hullámforma reprezentáció

A hullámforma ábrázolás ma már széles körben elterjedt eszköz a hangeditálás területén. A hullámformákból sok információt tudunk kiolvasni, ami nagy segítséget nyújt a hang időbeni vágásához, editálásához, keveréséhez. Ki tudjuk olvasni, melyik hang harmonikus, melyik zajos, melyik részen milyen a hangmagasság. Korlátozottan arról is kapunk információt, mennyire tér el a hang színezete a szinuszhullámtól. A nevezetes hullámformákat (pl. négyszög, háromszög) is könnyű felismerni.

A finomabb hangszínekülönbségek felismerésére nem alkalmas a hullámforma reprezentáció. Nem csak azért, mert nehéz memorizálni a különböző, nagyon bonyolult alakzatokat, hanem mert sok hullámformához ugyanaz a hangszínérzet tartozik. A 13.06. és 13.07. ábrán kilenc harmonikus szinuszosztetevő összeadása látható. A két ábra utolsó soraiban a szinuszok összegzéséből kapott hullámformákat látjuk. Az 13.06. példában a szinuszok azonos fázisban kezdődnek, míg a 13.07. ábrán egymástól eltolódva indulnak. Az eredmény két teljesen eltérő alakzat, ami ugyanolyan hangszínérzetet kelt.



13.6. ábra: Szinuszhullámok összeadása fázisban



13.07. ábra: Szinuszhullámok összeadása eltolt fázissal

13.1.3. A spektrum ábrázolása

13.1.3.1. Spektrumanalízis – Fourier transzformáció

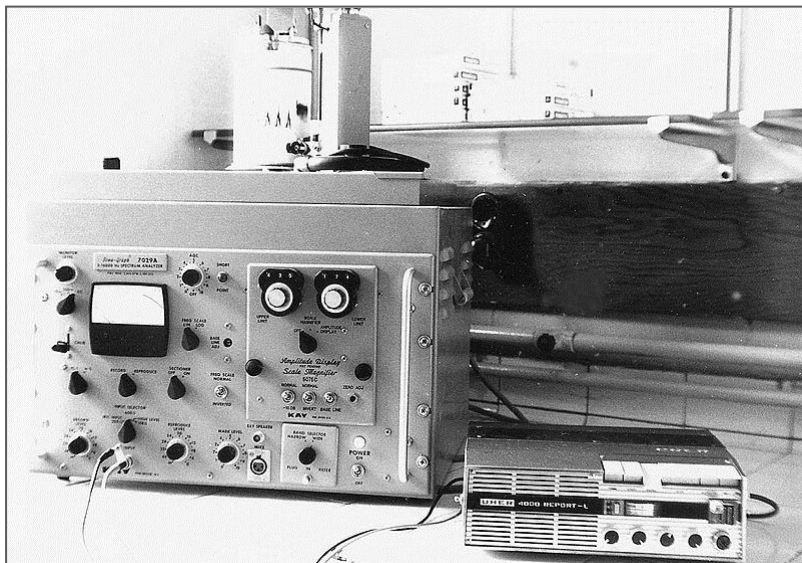
Ahhoz, hogy belelássunk a hanghullámokba, Joseph Fourier matematikus és fizikus (13.08. ábra) felfedezésének alkalmazására volt szükség, aki kimutatta, hogy a hangok leírhatóak trigonometrikus függvények (szinusz- és koszinusz-hullámok) összegeként. Ezzel a módszerrel minden hangot fel lehet bontani a legegyszerűbb, tovább már nem elemezhető atomjaira, a szinuszoszszetevőkre.



13.8. ábra: Joseph Fourier (1768–1830)

Az analízisadatokból különböző nézetek készíthetők, melyek magukban foglalják az összetevők frekvenciaértékeit, amplitúdóit és a spektrogramok esetén az időbeni változásokat is.

Ahhoz, hogy Fourier elemzését a gyakorlatban is alkalmazni lehessen, további matematikai felfedezésekre volt szükség. A gyors Fourier-transzformáció (FFT – Fast Fourier Transformation) feltalálása után különböző gyakorlati eszközök jelentek meg, melyek segítségével egyre pontosabban lehetett mérni a spektrumösszetevőket. A 13.09. ábrán látható Sonagraph pl. 1970-ből származik.



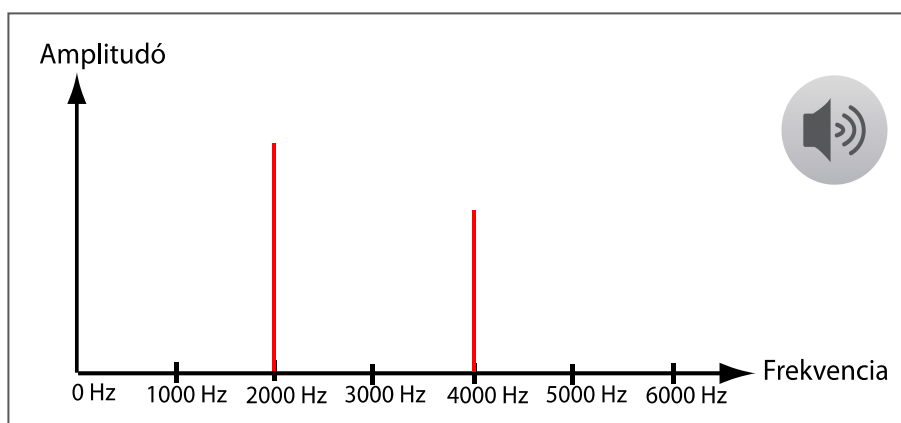
13.9. ábra: Sonagraph (1970)

A hangspektrum elemzése a számítógépek megjelenése után vált mindennapos gyakorlattá az elektroakusztikus zene területén.

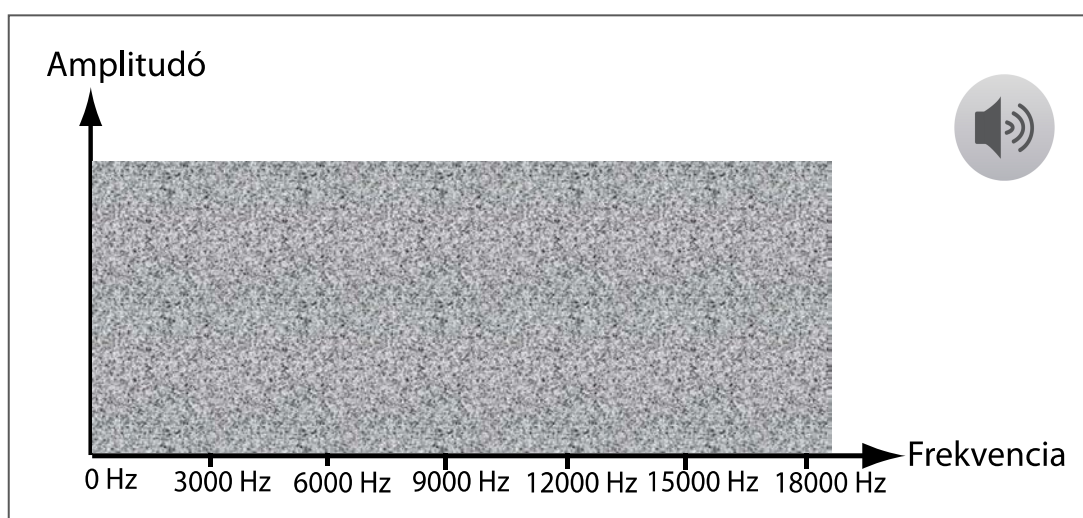
13.1.3.2. Kétdimenziós spektrumkép

A spektrumábrázolás egyik legátláthatóbb módja a kétdimenziós spektrumkép, mely a hullámforma ábrázolástól eltérően nem mutat ki időbeli változást. Ez az ábrázolás ezért vagy időben nem változó hangok esetében hasznos – mely a valóságban nincs –, vagy akkor, ha a pillanatnyi hangképre vagyunk kíváncsiak. A spektrumképen a vízszintes tengelyen helyezkedik el a frekvencia, tehát a komplex hangot alkotó szinuszoszttevőket itt tudjuk ábrázolni. A függőleges tengely az amplitúdóé, mely az egyes összetevők saját hangerejét mutatja.

A 13.10. ábrán egy olyan hang spektrumképe látható, mely mindössze két szinuszhangból áll. Az alacsonyabb összetevő frekvenciája 2000, a magasabbé 4000 Hz. Az ábráról az is leolvasható, hogy a magasabb összetevő hangereje kisebb, amplitúdója alacsonyabb.



13.10. ábra: 2D-spektrumábrázolás, vonalas spektrum / 13.1. Hang



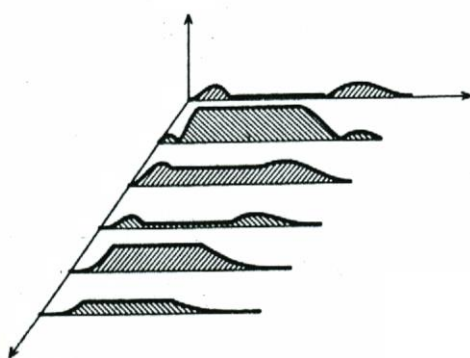
13.11. ábra: Spektrumábrázolás, folyamatos spektrum / 13.2. Hang

A 13.11. ábrán szereplő hang fehérzaj. Ezért mind amplitúdóban, mind frekvenciatartományát tekintve teljesen kiegyenlített, semmilyen összetevője nem emelkedik ki a hangzásból.

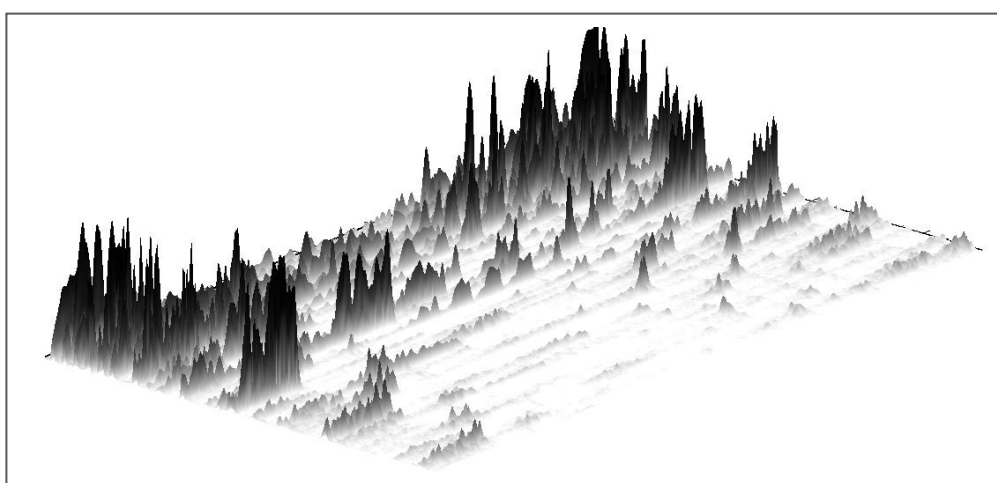
A két spektrumképhez tartozó hangok meghallgatásakor nyilvánvaló a kettő közötti különbség (4.04_Hang, 4.05_Hang).

13.1.3.3. Időben változó, háromdimenziós spektrumkép

Ha az egyes összetevők időbeli változását szeretnénk vizsgálni, háromdimenziós spektrumképre van szükség. A 13.12. és 13.13. ábrán a függőleges tengely továbbra is az amplitúdóé, a vízszintes tengelyre kerül az idő. A frekvenciát, illetve az egyes szinuszosztetevőket a harmadik tengelyen helyezhetjük el. Ez az ábrázolásmód megmutatja egy spektrum minden fontos összetevőjét, illetve leolvasható belőle, hogy a zenei paraméterek mindegyike (vagyis a frekvencia, az idő és az amplitúdó) befolyásolja a hangszínt, illetve a spektrumot.



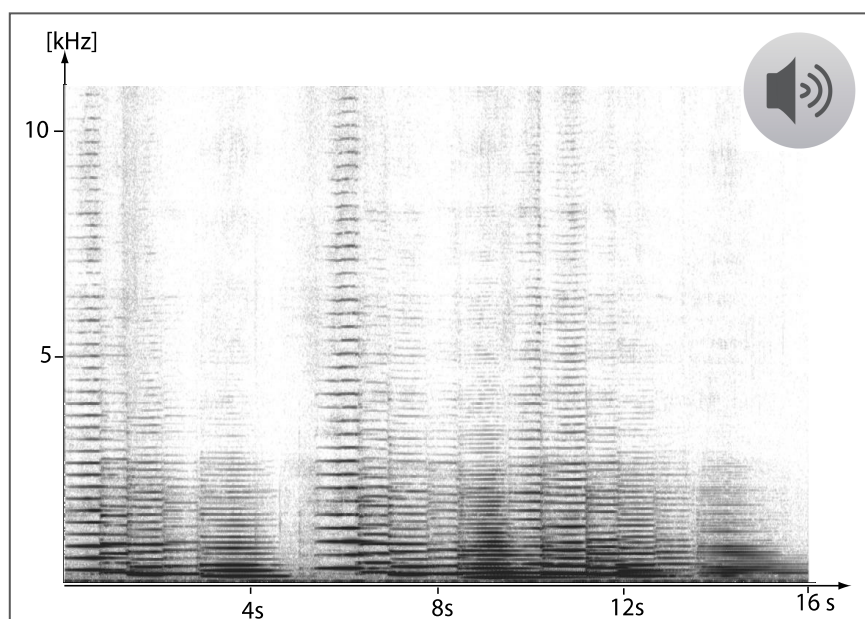
13.12. ábra: Spektrumábrázolás, 3D



13.13. ábra: Spektrumábrázolás, 3D

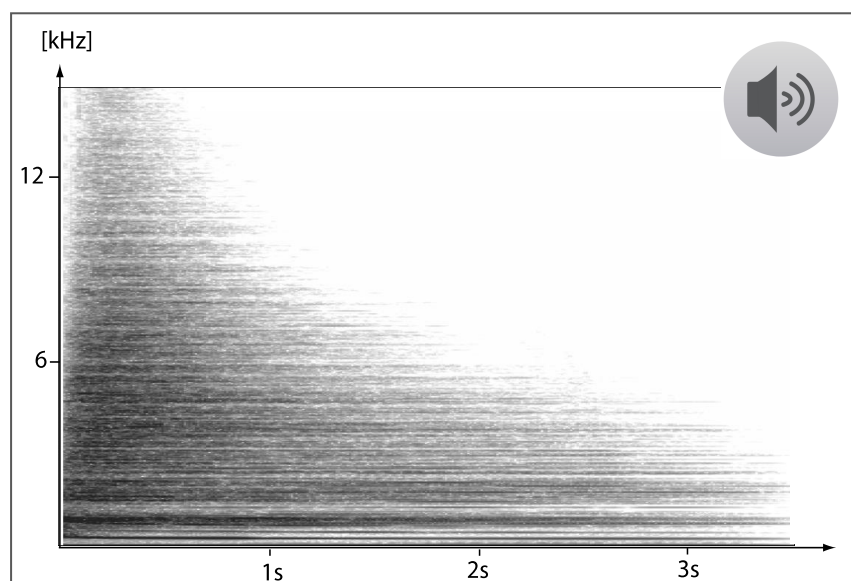
13.1.3.4. A szonogram

A spektrum ábrázolásának legvilágosabb módja a szonogram. Ez a reprezentáció áll talán a legközelebb a zenészek gondolkodásához, hiszen a tengelyek felosztása hasonlít a hagyományos kotta képéhez. A függőleges koordináta a frekvenciák helye, a vízszintes pedig az idő. A szonogram „harmadik” dimenzióját a színerősség vagy színek képzik, melyek az amplitúdót ábrázolják. Általában mennél sötétebb színe van egy összetevőnek, annál hangosabb, és fordítva, de vannak már olyan felhasználások is, ahol a felhasználó maga állítja be, milyen paramétert milyen szín képviseljen.



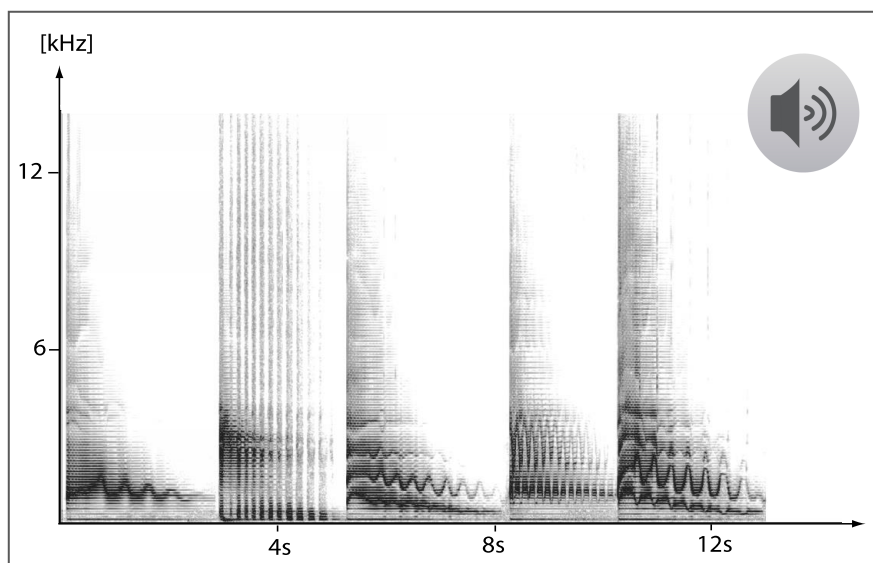
13.14. ábra: szonogram01: Cselló /13.3. Hang

A 13.14. ábra spektrogramján látható, hogy hol vált hangmagasságot a felvételen játszó csellista, vagyis az időt reprezentáló vízszintes tengelyen a ritmus jelenik meg. Az idézett Bach-tétel 5-6-5 hangra tagolódik, melyből mindegyik csoport első hangja relatíve magas, a csoportok 5. hangjai pedig mélyek. Az ábrán a magas hangoknak megfelelő pillanatok a ritkábban bordázott hangoknak felelnek meg. Ezeknél nem csak az alaphang magasabb, de az összetevők is messzebb vannak egymástól, és magasabb frekvenciatartományba hatolnak be. A magasabb tartomány megjelenését okozza az is, hogy az előadó a hangcsoportok kezdetének kiemeléséhez hangosabb, dúsabb hangszínű hangot játszik.



13.15. ábra: Szonogram02: gong / 13.4. Hang

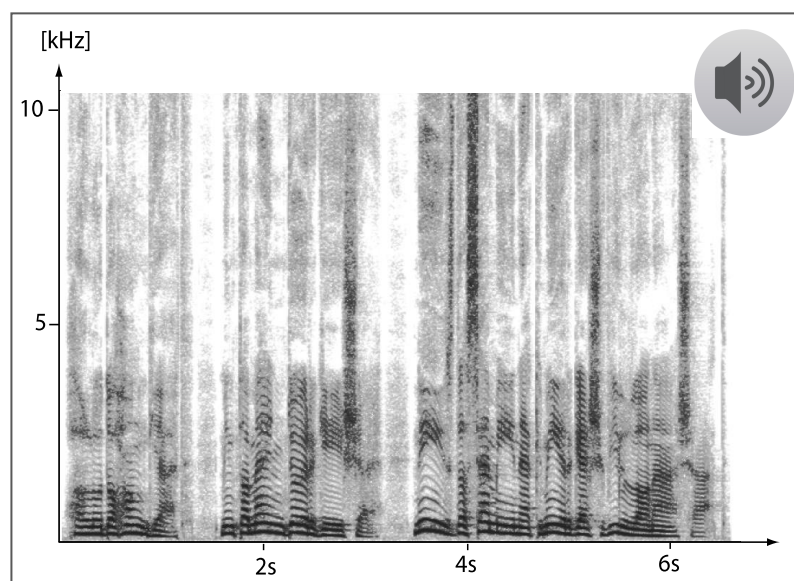
A 13.15. ábra és az előző példa összehasonlításakor azonnal látszik, hogy utóbbin a bordázottság helyett szinte folyamatosan sötét a kép, és a cselló-hanghoz képest itt nincs olyan erős vonal, amelyhez képest a többi összetevő egyenletesen oszlana el felfelé. Jól látható még az is, hogy a nagyobb frekvenciájú összetevők a hang vége felé fokozatosan eltűnnek. A bordázottság hiánya mutatja azt, hogy nincs világos alaphang, és emiatt nem hallunk egyértelmű hangmagasságot sem. Az eltűnő összetevőknek köszönhetően mégis azt hallani a felvételen, hogy a hang fokozatosan mélyül, még ha pontosan nem is tudjuk visszaadni, milyen hangmagasságot követve.



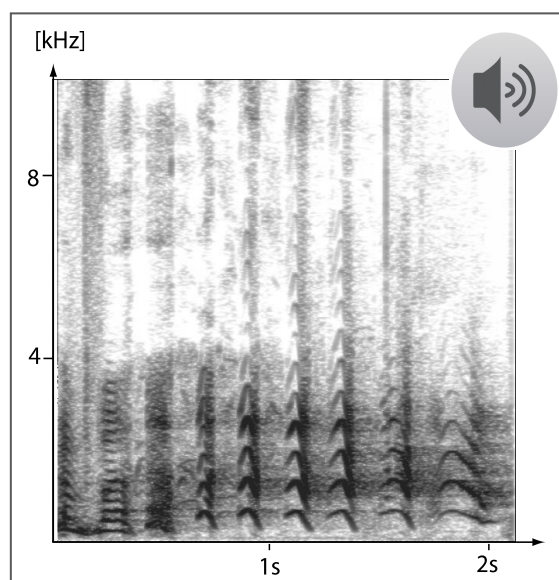
13.16. ábra: Szonogram03: doromb / 13.5. Hang

A 13.16. ábra öt világosan megkülönböztethető hangból áll. A hangokat reprezentáló alakzatok nagyon hasonlítanak egymásra, aminek az az oka, hogy a dorombon, melyen megszólalnak, csak egy alaphangmagasságot lehet játszani. Mivel a hangszer a szájban tartva szólal meg, a különbségek az előadó száj-üregének változtatásából fakadnak. A hullámvonalak azt jelzik, hogy miként erősödött vagy halkult valamely összetevő, miközben a többi összetevő (az ábrán a vonalak) a helyén maradt.

Feladat: hallgasd meg a 13.17. és a 13.18. ábrán látható szonogramokhoz tartozó hangokat, és próbáld megtalálni a szonogramokon jellegzetességeiket!



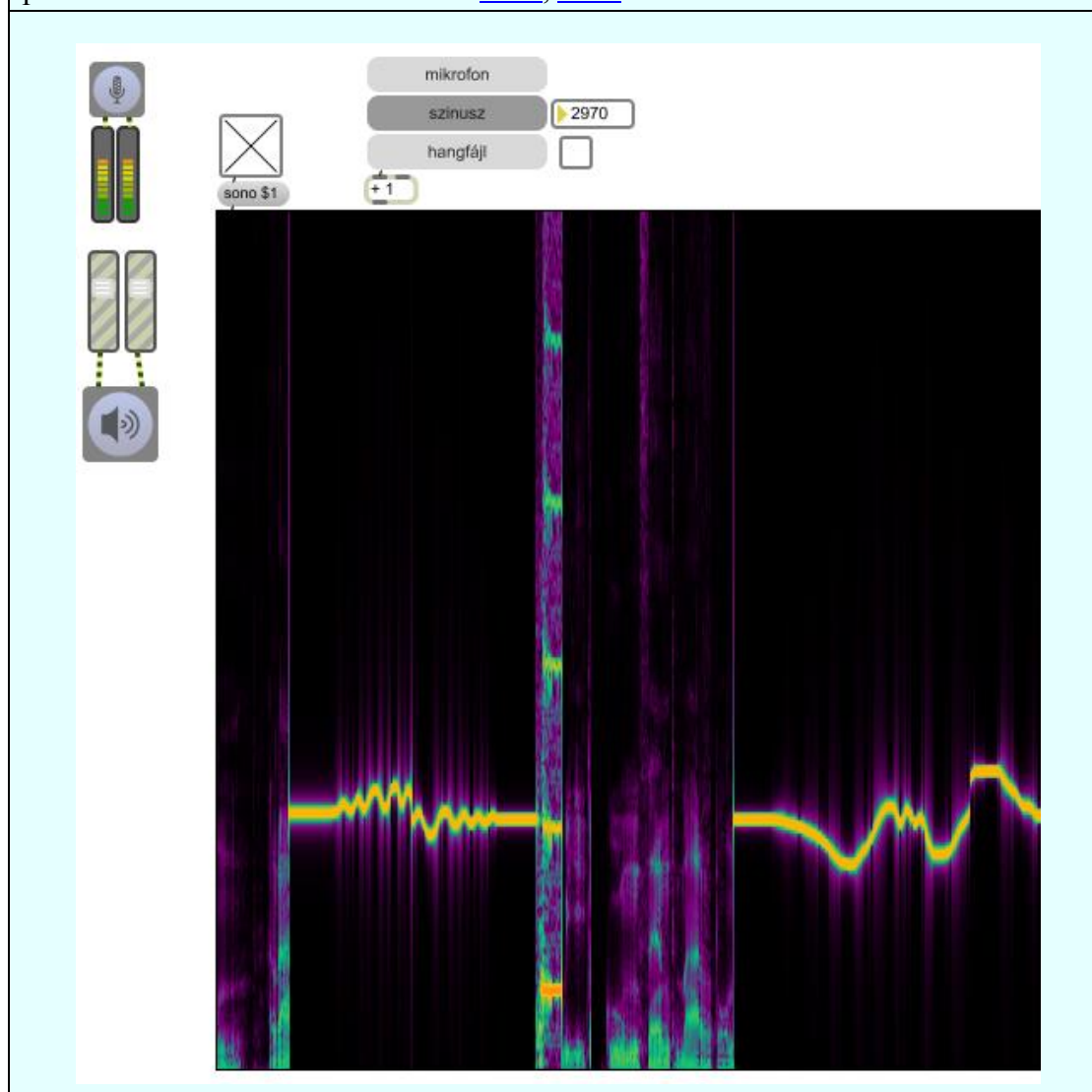
13.17. ábra: Szonogram04: férfihang, beszéd / 13.6. Hang



13.18. ábra: Szonogram05: férfihang, nevetés / 13.7. Hang

A 13.19. ábrán jelen idejű szonogram interfésze látható. Bejövő mikrofonjel adatai, változtatható szinuszhullám és hangfájl spektrumát lehet a segítségével tanulmányozni.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).



13.19. ábra: Élő szonogram

13.2. Hangszintézis

Hangszintézisnek nevezzük a hang elektronikus eszközökkel történő létrehozását akusztikus forrás alkalmazása nélkül. Elvileg a semmiből, illetve a jelek fizikai, matematikai leírásából indulunk ki, amikor valamilyen hanghullámnak megfelelő elektronikus jelet képzünk, melynek feszültségváltozásai megfelelnek a hang nyomásváltozás-mintázatának.

13.2.1. Szintézistechnikák

A hang teljes reprezentációját természetesen maga a hullámforma jelenti, mely önmagában azonban csak ritkán hordoz információt az érzékelt hangszínről. Ezért a hullámforma kialakításához valamilyen szintézismódszerre vagy szinté-

zistechikára van szükség. A szintézistechnika hangok generálásához kialakított stratégia, digitális szintézis esetén számítási folyamat vagy képlet, amely valamilyen modell formájában kapaszkodókat nyújt az elképzelt hangszíntulajdonságok reprezentálásához. Egyes módszerek a hang spektrumát, mások a hang előállításának módját vagy időbeni változásait mintázzák.

A szintézistechnikák száma az első szintetizátor megjelenése óta folyamatosan bővül, a módszerek felhasználása egyre komplexebbé és kifinomultabbá válik. Jelenleg a következő technikák képezik hangszintézis alapjait:¹²

- hullámforma-ismétlés
- additív szintézis
- szubtraktív szintézis
- modulációs technikák (AM, FM)
- hullámforma átalakítás
- formáns-szintézis
- torzítás
- analízis-reszintézis
- granuláris szintézis
- fizikai modellezés

13.2.2. Szintetizátorok

Szintetizátornak azokat az elektronikus hangszereket nevezzük, amelyek elektronikus módon generálnak hangokat. A köztudatban az él, hogy a szintetizátorokon az akusztikus zongorához hasonló billentyűzet segítségével lehet játszani, azonban szintetizátoroknak nevezzük azokat a kontroller nélküli „agyaikat” is, amelyek akár hardver, akár szoftver formájában képesek bizonyos módszerek, algoritmusok alapján különböző hangzásokat előállítani.

13.2.2.1. Hardware-szintetizátorok

Az egyik legelső szintetizátor Taddheus Cahill Telharmoniuma volt, melyet 1906-ban, New York-ban építettek meg. A hatalmas, több tonnát nyomó hangszerrel együtt feltalálója meghatározta az első szintézistechnikát is, ugyanis a hangszer szinuszhullámok összeadásával, azaz additív szintézissel működött.

A '20-as évektől számos elektronikus hangszert fejlesztettek, amelyek már szintetizátornak nevezhetőek (pl. theremin, onde Martenot, trautionum stb.), de széles körben csak a '60-as évek második felétől, Robert Moog moduláris szintetizátorainak megjelenése óta váltak népszerűvé a hangszerek. Ezek a szintetizátorok már alkalmasak voltak különböző szintézistechnikák megvalósítására.

¹² A hangszintézis-technikákat Szigetvári Andrea–Siska Ádám „Hangdizájn, hangszintézis és hangátalakítás” c. tananyaga tárgyalja részletesen.



13.20. ábra: Moog szintetizátor

A digitális szintetizátorok a '80-as években terjedtek el. Ezek a hangszerek tulajdonképpen speciális hangelőállító szoftverrel ellátott célszámítógépek. Az egyik leghíresebb korai digitális szintetizátor a Yamaha DX7 volt, amely programozható FM szintézissel rendelkezett. A DX7 volt az első szintetizátor, amelyre programozó cégek épültek, hogy ellássák újabb és újabb hangokkal a zenészeket.



13.21. ábra: Yamaha DX7 szintetizátor

13.2.2.2. Szoftver-szintetizátorok

A személyi számítógépek elterjedésével egyre gyakrabban jelentek meg szintetizátorok szoftverek formájában. A processzorok gyorsulása lehetővé tette, hogy a szoftverszintetizátorok ugyanolyan bonyolultságú műveleteket tudjanak megvalósítani, mint a hangszintézisre szakosodott célhangszerek. Napjainkban általában a szoftverszintetizátorok olcsóbbak, és természetesen jóval könnyebbek, hiszen elférnek a zenész laptopjában, valamint egyszerűbben kapcsolhatóak össze más elektronikus hangszerekkel (mint pl. a szekvencer). Egyes zenészek

szerint a hardverszintetizátorok előnye, hogy gondosan megtervezett interfészük (a billentyűzet mellett speciálisan kialakított gombok, potenciométerek felülete) alkalmasabbá teszi őket élő játéokra.

A szoftverszintetizátoroknak két nagy csoportját lehet megkülönböztetni: a nagy népszerűségnek örvendő, régi analóg és digitális hardverszintetizátorok virtuális modelljeit és az új, kizárólag szoftver formájában megvalósított hangszereket. Az első csoportra példa a 13.22. ábrán látható, híres analóg mini MOOG szintetizátor és iPad-re programozott szoftveres változata.



13.22. ábra: Minimoog analóg szintetizátor és iPad-ra programozott szoftverszintetizátor

Egy kizárólag szoftver formájában létező szintetizátor például a 13.23. ábrán bemutatott, többféle platformon (az ábrán szereplő modell a Reason szoftver része) elérhető Thor szintetizátor a Propellerhead-től.



13.23. ábra: Thor szoftverszintetizátor (Propellerhead-Reason)

13.2.2.3. Szintézis programnyelvek

Mind a hardver, mind pedig a szoftverszintetizátorok korlátozott számú szintézisteknikával és vezérlőparaméterekkel működnek. Ez komoly korlátot jelent azoknak a zeneszerzőknek, hangdizájnereknek, akik sok hangszíndimenziót szeretnek sok irányba „mozgatni”, akik nem a hangszintézisteknika paramétereit, hanem a létrehozni kívánt hangszín tulajdonságai szerint szervezik hangzásait. Valószínűleg ezért terjedtek el széles körben azok a magas szintű zenei programnyelvek, amelyek segítségével szinte minden szintézisteknika megvalósítható, és elvileg végtelenül sok hangzás létrehozható.

A szintézis programnyelvek két fő típusa van, az egyik szöveges, a másik a grafikus programozói környezettel operál. A szöveges programnyelv alkalmazásakor a felhasználónak szöveges kódok és számsorok formájában kell meghatározni a szintézisprogram logikai felépítését. A 12.24. ábrán a CSound, a 12.25. ábrán a SuperCollider programnyelven írt hangszintézis kód látható.

```
play{SinOsc.ar(OnePole.ar(Mix(
LFSaw.ar([1,0.99],[0,0.6],2000,2000).trunc([400,600])
*[1,-1]),0.98)).dup*0.1}
```

13.24. ábra: Supercollider programnyelven írt program (szinuszgenerátor hangmagasságának modulálása)

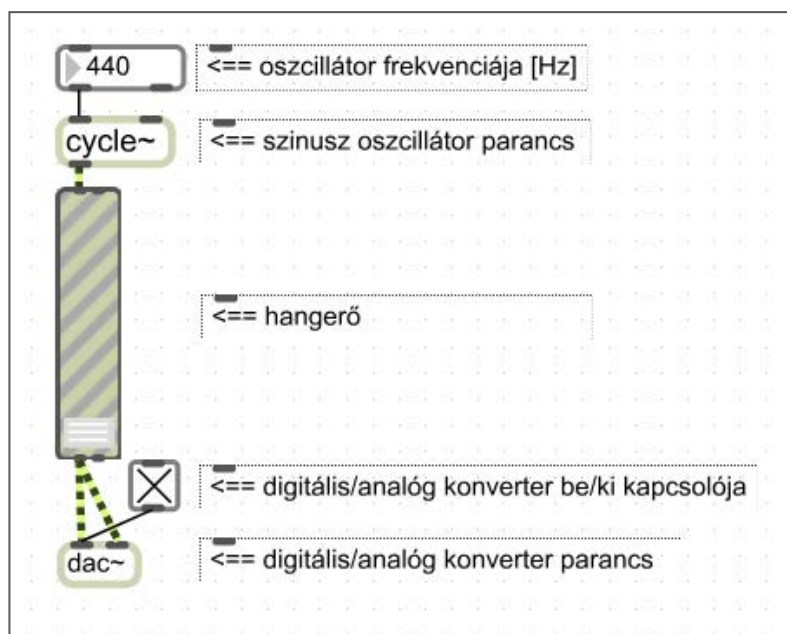
```

sr = 44100
kr = 4410
ksmps = 10
nchnls = 1
instr 1
kburkolo oscil1 0, 1, p3, p7
asig oscili p4*kburkolo,p5,p6
out asig
endin
</CsInstruments>
<CsScore>
f1 0 2048 10 1
;p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7 p8
i1 0 0.2 20000 300 2 10

```

13.25. ábra: CSound programnyelven írt program (szinuszgenerátor)

Grafikus, hangszintézisre is alkalmas zenei programnyelv például a MAX/MSP, melynek egy szinuszhullámot generáló fájlját a 13.26. ábra mutatja be.

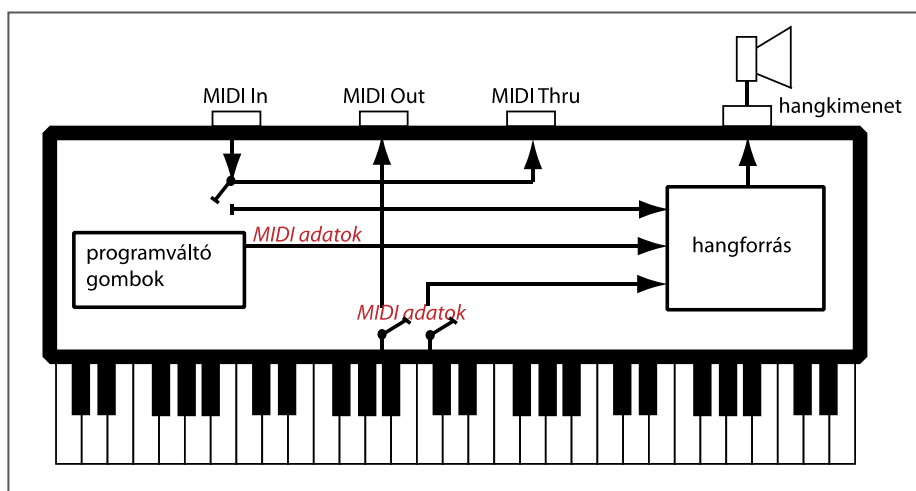


13.26. ábra: MAX/MSP programmal grafikus környezetben szerkesztett szinuszgenerátor

14. A MIDI- és az OSC-protokoll

A számítógépes zenei vezérlés egyik alapfeltétele volt, hogy legyen olyan szabvány, melyek segítségével minden gyártó terméke tud egymással kommunikálni. Az első ilyen szabványt, a MIDI-t elsősorban digitális szintetizátorok közötti adatcserére hozták létre, ami forradalmasította az elektronikus zenei ipart. Bár a MIDI-szabvány azóta is piacvezető, számos hiányossága van, melyek kiküszöbölésére jött létre és vált hivatalossá az OSC.

MIDI vagy OSC vezérléskor nem audioadatok közlekednek a rendszerben, hanem olyan triggererek és paraméterek, amelyek egy-egy hangelőállító agyhoz csatlakozva szólaltatnak meg szintetizátorokat, aktiválnak effektberendezéseket vagy tárolásra, esetleg további feldolgozásra kerülnek a számítógépeben. A 14.1. ábrán jól látszik, hogy a hangforrás és a MIDI-adatok (billentyűk, programváltó gombok) külön egységet alkotnak a MIDI-szintetizátorban, és nincs köztük mechanikus kapcsolat.



14.1. ábra: MIDI-szintetizátor szerkezete

14.1. MIDI

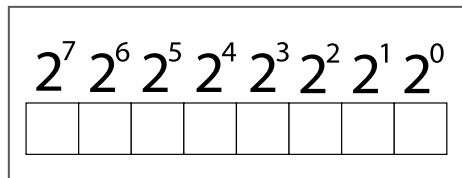
A MIDI- (a Musical Instrument Digital Interface rövidítése) szintetizátorok, audio effektberendezések és számítógépek összekötésére kifejlesztett szabvány. A MIDI alapjául szolgáló univerzális szintetizátorinterfészt Dave Smith és Chet Wood fejlesztette ki 1980-ban, melyet különböző szintetizátorgyártók ajánlásai alapján dolgoztak át. Végleges formájában 1983 augusztusában publikálták.

A MIDI elsősorban a populáris zenében használatos – mindenekelőtt billentyűs – hangszerek vezérlésére készült, szemléletében és szerkezetében elsősorban a billentyűs szintetizátorok lehetőségeire épít. Ez sok tekintetben komoly korlátot jelent, ami miatt a MIDI az elektronikus hangszerek lehetőségeit csak részben aknázza ki.

14.1.1. A MIDI adatsor szerkezete

Egy MIDI kapcsolat 16 csatornán képes információkat szállítani, melyeket különböző berendezésekhez lehet irányítani.

A MIDI üzeneteket 8 bites byte-ok alkotják. A byte bitek egybefüggő, rögzített hosszúságú sorozata. A bit az információ alapegysége, lehetséges értékei 0 vagy 1, segítségével kettes számrendszerben lehet meghatározni a MIDI-adatokat (14.2. ábra).

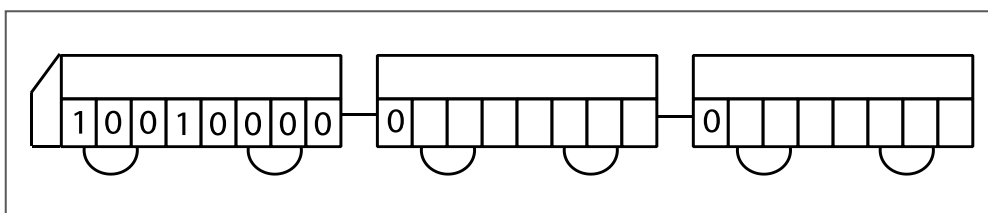


14.2. ábra: MIDI byte szerkezete

Valamennyi MIDI üzenet két féle byte-ot tartalmaz:

1. Státusz byte (status-byte): ez a byte közli a berendezéssel, hogy a következő üzenet milyen funkciót kíván vezérelni.
2. Adat-byte (data-byte): a státusz byte-ot követő, az adott funkcióhoz kapcsolódó paramétereket szolgáltató adat(ok). Mivel egy adatsor mindig egy státusz byte-hoz kapcsolódik, a következő státusz-byte megjelenéséig küldött adatok mindig a megelőző státusz byte-hoz tartoznak.

A két lehetséges státusz megkülönböztetéséhez egy bit is elegendő, a fennmaradó 7 bit pedig alkalmas a státuszhoz kötődő paraméterérték(ek) közvetítésére. A státusz-byte-ok első bitje mindig 1, az adat byte-oké pedig 0. Ez azt is jelenti, hogy a státuszokhoz kapcsolódó paramétereket 7 biten lehet közölni, ami miatt ezek értéke 0–127 között lehet. A 14.3. ábrán vonattal szimbolizáltuk a MIDI-adatsort. Az első (a mozdony) mindig a státusz-byte, ami meghatározza, hogy például hang leütése, kontrollüzenet küldése vagy programváltás következik. Minden státusz-byte adott mennyiségű paraméter-byte-tal rendelkezik (a vonat kocsijai).



14.3. ábra: Státusz byte és paraméter-byte szerkezete

14.1.2. A MIDI-üzenetek

A MIDI-rendszer lényege, hogy egyetlen vezérlőeszköztől több sorba kötött eszközt lehet közvetlenül vezérelni. A vezérléshez használt üzenetek típusait az alábbi csoportokra bonthatjuk:

14.1.2.1. Rendszerutasítások

Ezek az utasítások az egész rendszerre egyformán érvényesek. Legtöbbjük a rendszer zavartalan működtetéséhez (szinkronizálás, start- és stopjelek, üzenetvárás stb.) szükséges, a mindennapi zenei gyakorlatban viszonylag ritkán találkozunk közvetlenül velük.

Rendszerutasítások típusai:

- közös rendszerüzenetek (System Common Messages): A MIDI-rendszer egységeinek az összehangolására, szinkronizálására szolgálnak.
- valós idejű rendszerüzenetek (System Real Time Messages): a MIDI-rendszer szinkronizálására szolgáló, az egyes eszközök közötti folyamatos kapcsolattartást biztosító üzenetek
- exkluzív rendszerüzenetek (System Exclusive Messages): az egyes gyártók által meghatározott tulajdonságok szabályozói, melyekre azért van szükség, mert a különböző gyártók MIDI-hangszerei különböző elvek alapján épültek.

14.1.2.2. Csatornautasítások

Az utasítások egy-egy csatornára vonatkoznak. A MIDI 16 különböző csatornán képes üzeneteket küldeni. A mindennapi zenei gyakorlatban általában a csatornaüzenetekkel dolgozunk.

Csatornautasítások típusai:

- hang jellegű üzenetek (Channel Voice Messages): jelen idejű előadói utasítások, melyeket egy csatornán továbbít a rendszer. Ilyen pl. a „note-on” üzenet, ami tartalmazza a hang magasságát jelölő MIDI-hangjegy sorszámát, a hangosságot meghatározót „velocity”-t és a csatornaszámot, a „note-off” üzenet, ami a hang végét jelzi, a programváltás üzenetek, melyek a berendezés hangelőállító rendszerének hangszínprogramjai között váltanak és a kontrollüzenetek, melyek a hangszer különböző paramétereit állítják.

Interaktív példa! Az interaktív példaprogram letölthető Windows és Mac OS X platformokra a következő linkeken: [WIN](#), [OSX](#).

IAC Driver IAC ... <=== a szintetizátor fogadó portjára kell állítani !

A) Hangmagasság és hangszínprogram változtatása státuszbyte és paramétereinek segítségével

note on státuszbyte: 1 0 0 1 n n n n = 144+csatorna sorszáma (0-15)

leütés **144 50 100** felengedés **144 50 0**

<=== a 2. (hangmagasság) és a 3. (hangerő) érték változtatható 0 és 127 között. Mindkét dobozban ugyanannak az értéknek kell szerepelni! Változtatáshoz a számot ki kell választani, és úgy átírn!

program change: 1 1 0 0 n n n n = 192+csatorna sorszáma (0-15)

192 20

B) Hangmagasság és hangszínprogram változtatása MIDI számokkal

0 0 <=== mindkét érték egéssel változtatható

noteout pgmout

Az interaktív program bemutatja, hogyan változtathatóak a MIDI paraméterek különböző mélységű kódok segítségével. Az A) példában a státusz-byte-ok és adat-byte-ok segítségével, a B) példában csak az adat-byte-ok értékeivel lehet meghatározni hangmagasságot, hangerőt, hangszínprogramot.

14.4. ábra: MIDI-adatsorok

- üzemmód jellegű üzenetek (Channel Mode Messages): ezen üzenetek közé tartozik az omni/mono/poly módok ki-be kapcsolása, a kontrollereket alapállásba hozó utasítások vagy az összes hangot kikapcsoló, közös „note-off” utasítás.

14.1.3. A MIDI korlátai, hátrányai

Amellett, hogy a MIDI forradalmasította az elektronikus zenei ipart, hamar kiderültek hiányosságai. Ezek némelyike egyszerű kényelmi kérdés, de vannak olyanok korlátozások, amelyek nagyban befolyásolják az előállítható zene minőségét, lehetséges komplexitását.

- a felbontás finomsága: a MIDI-terjedelem (0–127) 128 különböző értéket enged meg, ami egyes paraméterek esetében nagyon kevésnek bizonyul.
 - a) hangmagasság: a módszer egyértelműen a 12 fokú egyenletes temperálást preferálja, más hangolások bonyolult módon, a

„pitchband” kontroller párhuzamos felhasználásával programozhatóak.

- b) kontrollerek: a piacon forgalmazott kontrollerek potenciométerei, tekerőgombjai stb. is 128 értékkel rendelkeznek. Az elektronikus zenében egyre több az olyan, élő játékra alkalmas generáló szoftver, melyek paraméterei lényegesen finomabb felbontást követelnek. A 0–127 skála természetesen áttérképezhető a vezérlendő dimenzió különböző tartományaira, és a tartományok váltogathatóak játék közben, ez azonban nehézkessé teszi az előadást felesleges (nem zenei) műveletekkel terhelve az előadót.
- lassú átviteli sebesség: a soros kábelben a jelek 31 kBaud (másodpercenként 31 250 bit) sebességgel futnak. Az adatsűrűség ugyan elegendő ahhoz, hogy akár több hangszerre szóló üzeneteket egymás után ugyanazon a kábelben elküldjünk, de a nem-hagyományos zenei felhasználások esetén ez igen nagy korlátozást jelent.
 - a billentyűs kontrollerek filozófiájának (modell, séma, minta, módszer, szerkezet) preferálása. A hang leütés-felengedés módszer a MIDI elválaszthatatlan része, ezért nehézkes más gesztusokat alkalmazó hangszerekre implementálni.
 - a MIDI-protokoll használatához speciális hardver szükséges

14.2 OSC

Az OSC-t (Open Sound Control) a MIDI alternatívájaként hozták létre a berkeley-i CNMAT munkatársai, Adrian Freed és Matt Wright. A protokoll nagyobb felbontású, és több paramétert kezel, mint a MIDI, így összetettebb zenék előadására is alkalmas.

Az OSC számítógépek, szintetizátorok, kontrollerek és más multimédia-eszközök közötti kommunikációt biztosító, rugalmas, a hálózati kommunikációra építő szabvány.

14.2.1. Az OSC szerkezete: a kliens-szerver architektúra

Az OSC adatok közvetítésére szolgáló adategységeket csomagoknak (packets) nevezik. Kliens minden olyan forrás (pl. program, fizikai eszköz, alprogram stb.), ami OSC-csomagot küld, szerver pedig az OSC-csomagot kapó célpont.

Az OSC nem specifikálja, milyen alacsony szintű hálózati mechanizmust kell használni az OSC-csomagok mozgatásához a kientől a szerverig.

14.2.2. OSC-üzenet

Az OSC adatok alapegysége az *üzenet*, amely három részből áll: címezés, adat típusának meghatározására szolgáló „tag”, „string” paraméterek.

A paraméterek száma mindig az üzenet fajtájától függ. Vannak olyan üzenetek, melyekhez nem tartozik külön paraméter, és vannak olyanok is, amelyek több paraméterrel működnek.

Az OSC-szerver minden vezérlési pontja fastruktúrájú, és címtér elnevezésű hierarchia alapján működik. A címtér minden szimbolikus névvel ellátott csomópontja lehetséges célállomása az OSC-üzeneteknek. Minden OSC-szerver saját maga definiálja a címtérét annak alapján, milyen felhasználási lehetőségeket biztosít, és hogy a felhasználó ezeket hogyan kívánja strukturálni. Ez a tulajdonság lényegesen rugalmasabbá teszi az OSC-t a MIDI-szabványhoz képest, amely előre definiálta, milyen a felépítése egy szintetizátornak.

Az OSC-címzés egyszerűen a teljes elérési útvonal a címtér fa gyökerétől a megcélzott csomópontig perjelekkkel elválasztott formátum alakjában, mint az URL vagy egy fájl elérési útvonala. Pl. a „Szintezis/FM/frekvencia” címzés a Szintezis könyvtáron belüli FM könyvtár frekvenciaparaméterére utal.

14.2.3. OSC felhasználása

Az OSC nyílt forráskódú, szabadon letölthető környezet, így mind a hivatalos (CNMAT), mind pedig külső fejlesztők készítenek alkalmazásokat, melyek lehetővé teszik applikálását, ezért felhasználási területe rendkívül széles, szerteágazó, dinamikusan növekvő. Egyre több hardver és szoftver tartalmazza a lehetőséget, hogy OSC segítségével szabadon tudjon kommunikálni más eszközökkel.

Az OSC hivatalos oldala (www.opensoundcontrol.org), a következő területeket sorolja fel:

- érzékelő-, gesztusalapú elektronikus zenei hangszerek
- nem zenei adatok áttérképezése hangra
- több felhasználó által megosztott zenei vezérlés
- lokális hálózati (LAN) zenei előadás
- távoli helyszíneket bevonó hálózati (WAN) zenei előadás
- virtuális realitás

15. Számítógépes zenei szerkesztők

A szerszámok és a gépek nagymértékben megsokszorozzák az ember teljesítményét, munkájának hatásfokát. Az autó például a láb, az emelőcsiga a kézi erő, a telefon a hanghatótávolság kiterjesztésének is tekinthető. A számítógép – korunk folyamatos fejlődésben lévő gépe – azokat a tevékenységeket alakította át forradalmi módon, ahol nagy mennyiségű adatot kell feldolgozni és tárolni. Az adatfeldolgozás sebességének felgyorsulása, a tárolásra szolgáló hordozók megváltozása, a tárolási kapacitás növekedése radikálisan átalakította a zene komponálásának, lejegyzésének, realizációjának, tárolásának és terjesztésének módját.

Az előző fejezetekben láthattuk, hogy a zenéhez milyen adatok kapcsolódnak, és hogy azokat milyen sokféle módon lehet reprezentálni különböző számok, grafikus szimbólumok vagy változó feszültség formájában. A számítógép megjelenése előtt a különböző reprezentációk „kezeléséhez” különböző tárgyak, mozdulatok kapcsolódtak. Fizikai szempontból még 10-20 éve is egészen más tevékenységet jelentett például a kottaírás, mint a hangkeverés. A kopisták a kézzel írt kottákhoz finom, óvatos mozdulatokat igénylő csőtollat és tust használtak, a hangmérnökök nagy keverőasztallal, nehéz magnetofonokkal, kábelrengeteggel operáltak. Ebben a korszakban nehéz volt elképzelni, hogy a kottát író személy fel is veszi, meg is vágja és kiadáskészre masztereli a zenét.

A számítógépek korában a zene készítésének összes mozzanata megvalósulhat ugyanazon a felületen. A fejezetben bemutatjuk a különböző zenei adatok szerkesztésére szolgáló alkalmazásokat.

15.1. Kottaszerkesztő programok

A zeneszerzőknek még pár évtizede is kézzel kellett kottázniauk műveiket. Jóval rosszabb helyzetben voltak író társaiknál, hiszen a kottázáshoz sokáig még az ötvonalas papírt is saját maguknak kellett megszerkeszteniük. A darabok sokszorosítását és a zenekari szólamok kivonatolását speciálisan képzett kopisták végezték, a foglalkozás a zenei képzettségen kívül kézügyességet, gyorsaságot, pontosságot és nagy türelmet igényelt. A zenei írógépek sem terjedtek oly mértékben, mint a szövegek írására feltalált írógépek. A 15.1. ábrán látható zenei írógépet 1953-ban gyártották nagyon kevés példányban (nem tudni pontosan, 6–12-re becsülik a számukat.)

Sokak számára ez a – szinte – tökéletes kottakép túl hideg, ami nem hordoz elég személyes információt a mű szerzőjéről. A 15.3. ábrán Bach, a 15.4. ábrán Beethoven kézírását látni. Ezek az autográf kéziratok páratlan mennyiségű információval szolgálnak a komponálás folyamatáról és a szerzőkről, ezért nélkülözhetetlen forrásai a zenetudománynak. A különbség a szerzők egyénisége, írásmódja között még a kottaolvasásban járatlanok számára is nyilvánvaló. Manapság sokszor a vázlatokat is számítógépbe írják a szerzők, megfosztva a zenetudományt azoktól az adatoktól, amit a papírra vetett vázlatok, a hibák és a javítások tartalmaztak az első ötlet megjelenése és a végső mű közötti folyamatról.



15.3. ábra: Bach Francia szvit, Gavotte kézirat



15.4. ábra: Beethoven Szellem-trió Op. 70 Nr 1. kézirat

A jó minőségű kottaszerkesztők képesek arra is, hogy a sokszólamú, sok hangszerre írt partitúra alapján elkészítsék a zenekari szólamokat. A legtöbb kottaszerkesztő képes visszajátszani a beírt kottát. Az általában egyszerű szintetizátor-hangokon megszólaló zenei anyag elsősorban a beírás ellenőrzésére szolgál.

Bár a kottaszerkesztők száma egyre több (léteznek ingyenes, szabadon felhasználható szoftverek is), jelenleg a két piacvezető program – a Finale és a Sibelius – a legalkalmasabb a kottakiadók által megkövetelt minőségben, összetett szerkezetű, komplex grafikus jeleket is tartalmazó kották létrehozására.

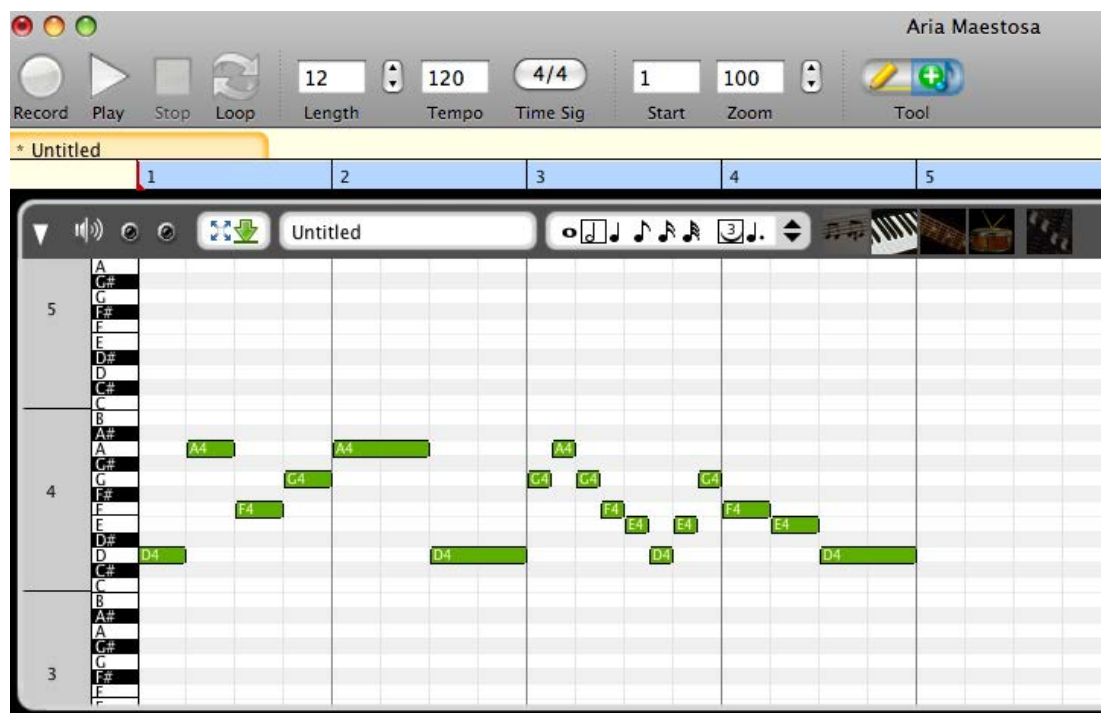
15.2. A szekvencer

A manapság már elsősorban szoftver formájában használt berendezés zenei adatok felvételére, editálására és lejátszására szolgál. A zenei adatok a szekvencer esetében MIDI-formátumban megadott hangmagasságokat, hangerőket és egyéb vezérlőüzeneteket jelentenek. A szekvencerrel sohasem hangot szerkesztünk, hanem kizárólag kódokat, utasításokat adunk meg, amelyeket olyan hangelőállító berendezéseken (szintetizátorokon, mintavevőkön, MIDI-jeleket értő akusztikus hangszeren) lehet lejátszani, amelyek képesek fogadni a MIDI vezérlőjeleit. Egy-egy szekvencia teljesen eltérő hangszíneken, különböző hangszerelésekben is lejátszható a szintetizátor/mintavevő típusától és hangszín-programjától függően. A szekvencer képes DAW-ok és plugin-ok vezérlőadatait is rögzíteni, szerkeszteni, visszajátszani.

A szekvencerek interfésze különböző nézetekkel rendelkezik. A soksávos magnetofon sávjai és a keverőasztal csatornái itt is megjelennek, ebben a nézetben át lehet tekinteni a csatornák szerkezetét, és az adatakhoz hasonlóan keverni lehet a MIDI-paramétereket.

Az egyes sávokon leggyakrabban a zenei hangokat megjelenítő adatsorozatok lehet szerkeszteni három különböző reprezentáció segítségével:

1. zongoratekercs (piano roll): a régi gépzongorákban található tekercsek mintájára készült lyukkártyaszerű felület (15.5. ábra). A vízszintes tengelyen az idő, a függőlegesen a bal oldalon látható zongorabillentyűknek megfelelő hangmagasságok helyezkednek el.



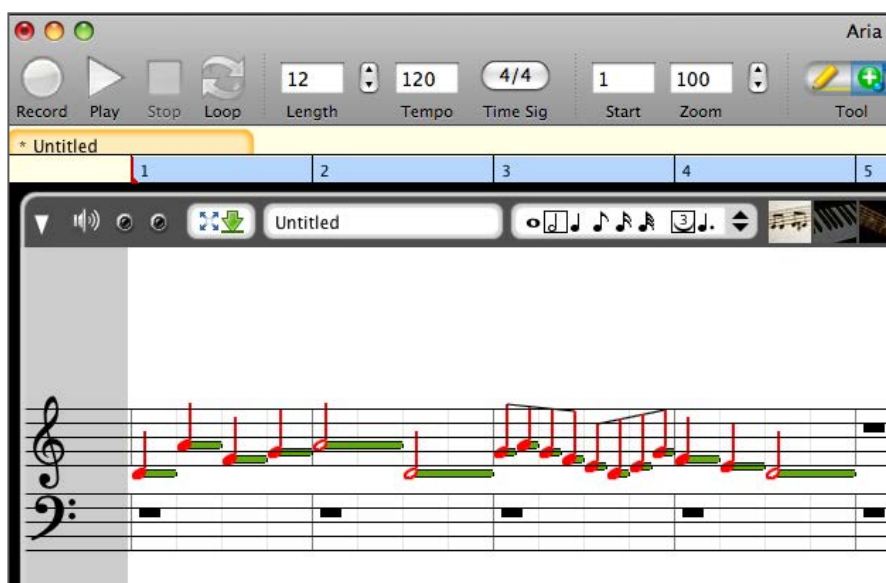
15.5. ábra: Aria Maestosa – zenei motívum szerkesztése zongoratekercs reprezentáció formájában

2. eseménylista (event list): számok és betűk alakjában jeleníti meg az egyes hangok magasságát, hangosságát, belépésének idejét és időtartamát (15.6. ábra).

Position	Status	Ch	Num	Val	Length/Info
1 1 1 1	Note	1	D2	80	. 1 3 232
1 1 1 1	Note	1	D3	80	. 1 0 100
1 2 1 1	Note	1	A3	80	. 1 0 100
1 3 1 1	Note	1	G2	80	. 1 3 232
1 3 1 1	Note	1	A#3	80	. 1 0 100
1 4 1 1	Note	1	G3	80	. 1 0 100
2 1 1 1	Note	1	A2	80	. 1 3 232
2 1 1 1	Note	1	F3	80	. 1 3 232
2 3 1 1	Note	1	A1	80	. 1 3 232
2 3 1 1	Note	1	E3	80	. 1 3 232
3 1 1 1	Note	1	D2	80	. 3 3 232
3 1 1 1	Note	1	D3	80	. 3 3 232

15.6. ábra: Zenei motívum szerkesztése eseménylista segítségével

3. hagyományos kottakép (score): kottaszerkesztő, melyben öt vonalon lehet bevinni és szerkeszteni a hangokat (15.7. ábra). A professzionális kottaszerkesztőkhöz képest a szekvenszerek csak nagyon egyszerű kották megjelenítésére képesek.



15.7. ábra: Aria Maestosa – zenei motívum szerkesztése hagyományos kottakép segítségével

Bármilyen adatmegjelenítést is választunk, beviteli eszközként használható az egér, a MIDI-billentyű és a különböző MIDI-kontrollerek.

15.3. DAW

A DAW (Digital Audio Workstation – digitális audio munkaállomás) kizárólag hangfelvételt, -szerkesztést és -lejátszást végez. A munkaállomás alapegységei: számítógép, hangkártya, digitális hangszerkesztő szoftver és valamilyen bemeneti eszköz (legegyszerűbb formájában egér vagy valamilyen MIDI-kontroller). Bevezetése nagymértékben leegyszerűsítette a hangfelvétel és -montírozás folyamatát. A nagyméretű magnetofonok, a két- vagy többsávós hangszalagok, ollók, ragasztószalagok világa ma már elfér egy kisméretű, hangkártyával kiegészített laptopban. A DAW interfésze általában a régi, sokcsatornás magnetofon és keverőasztal együttesét idézi. Megtalálhatóak benne az anakronisztikusnak ható lejátszó, felvevő, előre- és visszatekerő gombok, a hangsávok együttese hangszalagszerű és keverőasztalszerű nézetben (15.8. ábra). A hagyományos stúdióban használt effektberendezések digitális változatai a DAW-okban plugin-ek formájában inzertálhatóak az egyes csatornák megfelelő bemeneteire.



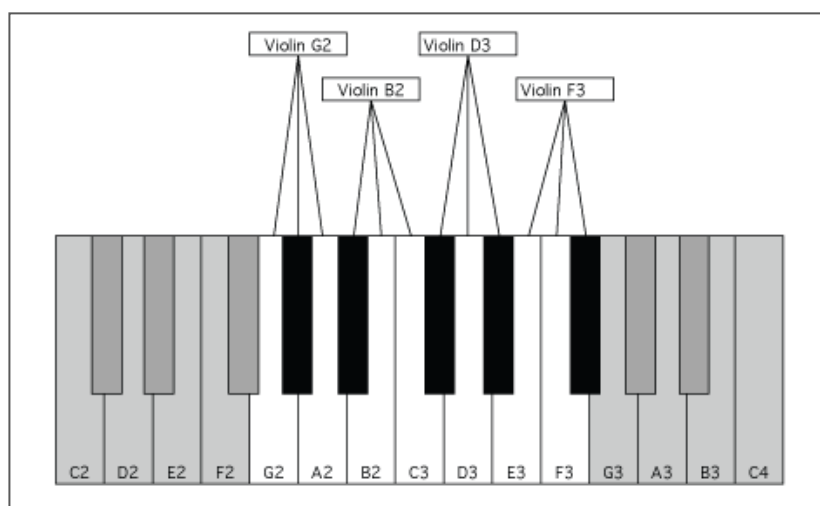
15.8. ábra: Ardour – szerkesztőablak nézet, keverőasztal nézet, lejátszó kezelőfelület

15.4. Mintavevők

A mintavevő (vagy szampler) a hangszerkesztő és a szintetizátor speciális ötvöze. A gépbe vagy szoftverbe töltött, felvett hangokat a szampler elraktározza, és megadott kódokhoz társítva, gombnyomásra elérhetővé teszi. Eközben a hangokat úgy transzponálja, hogy azok MIDI-billentyűzet (vagy más MIDI-vezérlő) segítségével hangmagasságskálákba rendezve szólaltathatóak meg.

A hangok kivágásával, beillesztésével végzett szerkesztéshez hasonlítva, a mintavevő nagyon gyorsan képes elérni a memóriájában tárolt, ismétlésre előkészített hangokat, így a szintetizátorhoz hasonlóan, több szólamban lehet a felvett hangokon játszani.

A mintavevőket leggyakrabban akusztikus hangszerek modellezésére használják. Mivel az akusztikus hangok transzpozíció hatására megváltoztatják a hangszínüket, a mintavételezett hangszer elkészítésekor fontos szempont, hogy hány hangot töltünk be egy adott skálára, illetve hogy egy betöltött hangot hány hangmagasságra transzponálunk. A 15.9. ábra hegedűminták transzpozícióját illusztrálja. Látható, hogy G2-től F3-ig tartó regisztert 4 betöltött hang tölti ki, és hogy egy-egy mintát három hangmagasságon (egy kisszekunddal mélyebben és egy kisszekunddal magasabban) lehet lejátszani.



15.9. ábra: Mintavevő billentyűzónáinak kijelölése

Mivel a tárhely növekedésével nagyon nagyszámú hang fér el a mintavevő memóriájában, ma már a komolyabb hangbankok a skála minden hangjához több mintát is rendelnek különböző hanghosszakkal, hangerőkkel és játékmódokkal. A 15.10. ábrán, a Reason NN-XT mintavevőjének szerkesztőfelületén jól látható, hogy a zongorabillentyűzet hangjaihoz E-3 felett két-két minta tartozik, melyek különböző hangerejű megütés hatására szólalnak meg.



15.10. ábra: NN-XT mintavevőjének szerkesztőfelülete

Hangszerhangok modellezéséhez hangmintakönyvtárakra van szükség, melyek zeneszerzők, producerek, hangszerelők számára készített, skálákba programozott hangmintagyűjtemények. Jó minőségű hangmintakönyvtárat készíteni hosszú, nehéz munka, a felhasználók nagy része a piacról szerzi be hangmintáit. A hangmintakönyvtárak CD-k, DVD-k és letölthető állományok formájában érhetőek el.

15.5. Integrált rendszerek

Amióta a számítógépes zenei szerkesztők elkezdtek kiváltani hardveres elődeiket, egyre inkább jellemző, hogy a fentebb tárgyalt szoftvertípusok integrált rendszerek formájában jelennek meg. Mivel feltételezhető, hogy azok a felhasználók, akik például DAW-ot használnak, szamplerrel és szekvenszerrel is szeretnének dolgozni, a szoftvergyártók arra törekednek, hogy egy-egy szoftverben minél több funkció legyen elérhető, és hogy a különböző szerkesztők egy felületen jelenjenek meg. Így anélkül, hogy több alkalmazás között kellene váltogatni, egy szoftverben lehet hangfelvételt készíteni, hangokat és MIDI-adatokat szerkeszteni, rögzíteni, visszajátszani, mintavételezni, hangokat szintetizálni, effektberendezéseket futtatni stb. Az új rendszerek általában moduláris szerkezetűek, így a felhasználó az adott feladatnak és egyéni preferenciáinak megfelelő interfészt tud kialakítani.

Sokféle integrált rendszer áll a rendelkezésre, melyek között lehetnek egészen kicsi, de egészen nagy eltérések is. A film- és reklámmuzikális ipar a DAW-mintavevő-szintetizátor-szekvencer-effektberendezések együttest (pl. ProTools, Logic Pro, Cubase VST, Nuendo stb.) preferálja. Az elektronikus tánczenét készítő és az élőben játszó DJ-k között népszerűek a loop-szekvencereket is integráló szoftverek (pl. Reason, Ableton Live). Egyes szoftverek lehetővé tesznek videolejátszást is (pl. ProTools), ami nagyban segíti a mozgókép alá tervezett hangsáv pontos kialakítását.

A 13. fejezetben tárgyalt grafikus zenei programnyelvek (pl. MAX/MSP/Jitter) is tekinthetők integrált programnyelveknek, hiszen csak a felhasználó programozási kedvétől és tudásától függ, milyen funkciókat valósít meg szoftvere.