



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR
ELEKTRONIKAI ÉS KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZEREK INTÉZET
MŰSZERTÉCHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK



SZAKDOLGOZAT



OE-KVK
2023.

Vasas Dávid Sándor
T006036/F112904/K



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Műszertechnikai és Automatizálási Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Vasas Dávid Sándor
Szakdolgozat száma: SZD21032408231537
Törzskönyvi száma: T006036/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven) (Budapest)
Specializáció: Felügyeleti informatika és elektronikus vagyonvédelem modul
Felügyeleti informatika és elektronikus vagyonvédelem modul
Műszer-automatika specializáció
Automatizált gyártórendszerek modul

A dolgozat címe: Akusztikai mérések és hangtompítás

A dolgozat címe angolul: Acoustic measurements and sound attenuation

A feladat részletezése: Elemesse a hang létrehozásának és a terjedésének a tulajdonságait, és támassza alá akusztikai mérésekkel ezeket a jellemzőket. Adjon javaslatot kültéri rendezvények hangtompítási lehetőségeire.

Intézményi konzulens neve: Sándor Tamás

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 05. 15.

Beadási határidő: 2023. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2023. 12. 06.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR
ELEKTRONIKAI ÉS KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZEREK INTÉZETI
MŰSZERTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2023.12.15.


.....
hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1	Hangtompítás nyitott térben.....	6
1.1	Az első ötlet, ami mentén el tudok indulni	6
2	A hang	8
2.1	Hanggal kapcsolatos érdekességek.....	8
2.1.1	Rezonancia és lecsengés	8
2.1.2	Hangterjedés és hangtompítás	9
2.2	A hang fizikai paraméterei.....	9
2.2.1	Különböző fizikai közegek	10
2.3	A hallószerv (A fül)	11
2.3.1	A külsőfül.....	11
2.3.2	A középfül.....	12
2.3.3	A belsőfül	13
2.4	Additív szintézis	13
2.4.1	Az Additív szintézis rövid történelme	14
2.5	Hangszórók.....	15
2.5.1	A hangszórók felépítése	16
2.5.2	Hangszóró fajták	17
2.6	Mikrofonok.....	19
2.6.1	Történelmi érdekességek	20
2.6.2	Mikrofonok működési elve	21
2.6.3	Mérőmikrofonok bevezetés	22
2.6.4	Mérőmikrofonok specifikációi	23
3	Mérések.....	24
3.1	A mérésekhez felhasznált hardverek	24
3.1.1	Behringer ECM8000 mérőmikrofon.....	24
3.1.2	HK Lucas Audio 600 hangfal	27
3.1.3	Focusrite Saffire 6 USB hangkártya	28

3.2	A mérésekhez felhasznált szoftverek.....	32
3.2.1	REW (Room EQ Wizard)	32
3.2.2	Sound Meter.....	35
3.3	Mérések	37
3.3.1	Első próbálkozások és teszt mérés	37
3.3.2	Mérés elmélet.....	37
3.3.3	Beltéri mérések	39
3.3.4	Kültéri mérések.....	43
3.3.5	Kültéri és beltéri mérések összehasonlítása.....	47
4	Hangtompítás	49
4.1	A hangtompítás alapjai inverz hanggal.....	49
4.1.1	Az inverz hang implementálása valós időben.....	51
4.2	A hang kioltása inverz hanggal.....	52
4.3	Egy lehetséges szabadtéri rendezvény megkonstruálása.....	55
5	Fejlesztési lehetőségek.....	57
5.1	A fázis lekövetése	57
5.2	Nyitott tér, több tompítás	57
5.3	Zajszennyezés és az állatvilág	58
6	Összefoglalás	59
7	Abstract	60
8	Irodalomjegyzék	61

1 Hangtompítás nyitott térben

Az elmúlt időszakban egyre jobban elkezdett foglalkoztatni az a témakör, hogy vajon nyitott térben képesek lehetünk-e elérni olyan mértékű hangtompítást, hogy a környezetünk számára kevesebb zajszennyezéssel járjon egy szabadtéri rendezvény.

A koncepció a következő: hogyan tehetjük meg azt, hogy olyan magas hangerőn hallgatunk zenét a saját kialakított környezetünkbe, ami a rajtunk kívülálló környezetünket nem zavarja?

Természetesen, ha mindezt beltéren tesszük, akkor megfelelő hangtompítást végző anyagokkal elég effektív módon van lehetőségünk lecsillapítani, esetenként teljes mértékbe megszüntetni a hang rezgéshullámait. Erre a stúdió technikában megannyi módszer létezik, különböző paraméterű szilárd anyagok megfelelő elhelyezésével, használatával.

De mi a helyzet akkor, ha mi ezt a jelentős hangtompítást a kertünkben, a mezőn, az erdőben, „egyszóval” a szabad ég alatt szeretnénk elérni? A szakdolgozatomban erre a kérdésre keresem a választ.

1.1 Az első ötlet, ami mentén el tudok indulni

Mivel nyitott térben nagyon kompromisszumos megoldás mentén tudnánk csak különböző akusztikai paneleket elhelyezni, ezért ez nem nyújt egy teljes körű megoldást. Természetesen az hozzáad a végeredményhez, ha a hangszórókat rezgéscsillapító panelekre helyezzük el, így a föld máris sokkal kevesebb rezgéshullámot vesz át, és ezáltal az nem viszi el a hangot a közvetlen környezetünkön kívül. Ha az adott nyitott terület rendelkezik kerítéssel vagy bokrokkal, fákkal, akkor azokra is el tudunk helyezni olyan akusztikai paneleket, amik segítenek a rezgéscsillapításban.

Ezekkel a megoldásokkal már biztosan rengeteget segítettünk a helyzeten, de hogyan tudnánk még többet?

Vertikális síkon felfelé, egyelőre semmi sem áll útjában a hangnak, és ez okozza a legnagyobb zajszennyezést. Ezért azon kezdtem el gondolkodni, hogy hogyan lehetne elérni azt, hogy ezeket a hanghullámokat valamivel kioltssuk? A következő a feltevésem: mi lenne akkor, ha ezeket a hanghullámokat magával hanghullámokkal oltanánk ki? Elsőnek abszurdnak tűnhet a gondolat, de fizikai síkon

teljesen elképzelhetővé válik. Gondoljunk bele abba, hogy a hanghullámok azok csak lökéshullámok, ahol a levegőmolekulák alkalmanként össze vannak sűrítve, alkalmanként pedig ritkítva. Ha ennek a hullámzásnak a tökéletes inverzét előtudjuk állítani egy másik hangforrásból, akkor az egymással szembeállított hullámok tökéletes mód kitudják oltani egymást, és nem hallatszik más a rajtuk kívül álló térbe, csak a csend.

2 A hang

Bár már jó ideje a zenével foglalkozok, és mérnöki tanulmányaimnak köszönhetően volt már némi fogalmam a hullámokról és a rezgésekről, de egészen addig, ameddig nem kezdtem el jobban beleásni magam, hogy mégis mi is a hang, a hallás, addig teljesen máshogyan láttam a világot. Nem láttam benne azt a varázslatot, amit most, hogy egyre jobban elmélyítem a tudásomat, egyre jobban meglátok. Milyen érdekes, hogy elsőre azt gondolná az ember, hogy akkor látja meg jobban a varázslatot, ha csak a misztikus ismeretlen van a dolgok mögött. Ám az én tapasztalataim nem ezt mutatják, legalábbis, ha természettudományokról beszélünk, akkor biztosan nem. Minél jobban tanulmányoz az ember egy bizonyos jelenséget, és minél jobban elsajátítja azt, annál jobban képes lesz felfogni azt, hogy ez az érzékelés síkja mellett a fizikai síkon hogyan működhet. Ebbe az érzésbe kezdek egyre jobban elveszni, és belefeledkezni. Nagyon nagy hatással van rám mindemellett az a könyv, amiből több részletet is feldolgoztam ebben a szakdolgozatban. Annyira zseniálisan informatív, és megsem túl száraz, viszont vannak benne olyan témák, amihez nagy odafigyelés szükséges, hogy sikeresen megértsük a benne leírt dolgokat.

Nos igen, így kezdek én is ebbe az érzésbe egyre jobban elveszni, és van, amikor csak kifekszem a függőágyamba a kertbe, és csak figyelem, hogy milyen hangok vesznek körül, és egy idő után olyan érzés, mintha a hangok entrópiikus kavalkádja egy ambiens tengerré válna, ahol kényemre-kedvemre fürdőzhetek.

2.1 Hanggal kapcsolatos érdekességek

2.1.1 Rezonancia és lecsengés

„A hangok forrásául szolgáló rezgések természetüknél fogva lecsillapodnak. A csillapítás mértékét a hangforrás belső és külső energiaveszteségei határozzák meg. Jellemzésére a csillapítási állandót (jelölése α vagy δ), illetve az ennek reciprokával kifejezett csillapítási együtthatót – lecsengési időt – (jelölése: τ) használjuk. A csillapítási együttható azt az időtartamot jelzi, ami alatt a rezgés amplitúdója $1/e$ -ed ($e=2,71\dots$) vagy ezredrészére csökken.” [1]

Az emberi hang, az emberi beszéd, illetve minden olyan hang, amit a szájunkkal adunk ki csak addig szól, ameddig levegőmozgás van, ebből arra tudunk következtetni, hogy nagy a csillapítási állandója. [1]

Ez a helyzet fent áll akkor, ha közvetlenül a levegőt hozzuk rezgésbe a hangunkkal. De teljesen más a helyzet akkor, ha egy rezgő szilárd anyag van mozgásba hozva, hiszen ezeket a rezgéseket egészen addig átfogja adni a levegőnek, ameddig maga az anyag is rezeg. Így a fémhúroknak, és lemezeknek kicsi a csillapítási állandója. Hangszereknél pont emiatt a tulajdonsága miatt alkalmazzák őket. [1]

2.1.2 Hangterjedés és hangtompítás

A hang ahogyan terjed a levegőben egyre nagyobb gömbfelületen oszlik el, ezért fordítottan arányos a nyomásamplitúdója a távolság négyzetével. Minden egyes alkalommal, amikor megduplázódik a távolság a hangforrástól 6 dB-el csökken a hangnyomásszint. Azokban a terekben, ahol nincs mesterséges hangerősítés, mindig figyelembe veszik ezt az állandót, és ennek függvényében méretezik az akusztikai teret megfelelő méretűre például egy ókori görög színháznál. [1]

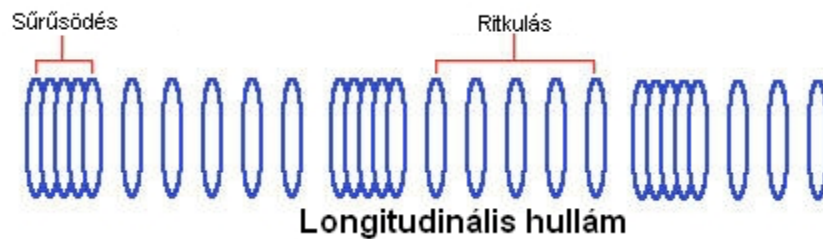
A hangok terjedésénél nem csak a gömbfelület eloszlása miatt zajlik végbe a csillapítás, hanem magától a közegtől is függ, hogy milyen elnyelési képességekkel bír az adott közeg. Az *elnyelési együttható* (α) kifejezi, hogy hány decibellel csökken a hang hangnyomásszintje. Ezt az együtthatót elsősorban a közeg anyagi tulajdonságai határozzák meg. Mindemelett a hangelnyelés függ a hangmagasságtól is: levegőben 2 kHz fölött négyzetesen arányos a frekvenciával, 1 kHz alatt pedig egyenesen arányos. Emiatt a jelenség miatt hallható távolról az elektronikus zenének csak a stabil 4/4-es lábdob leütése, és a laikus hallgatónak ezért tűnhet monotonnak. [1]

Szilárd anyagoknál mindenképpen egyenesen arányos a hangelnyelés, így az elnyelési tényezőjét könnyebb is kalkulálni. Az *elnyelési tényező* a szilárd anyagok egyik fő paramétere, a felületek elnyelési tulajdonságát jellemzi. Amikor hangszigetelő anyagokról, vagy akusztikai panelekről beszélünk, akkor ezzel a paraméterrel biztosan szembe találjuk magunkat. [1]

2.2 A hang fizikai paraméterei

A fizika tudománya szerint a hangok kis amplitúdójú mechanikai rezgések. A levegőben keletkező nyomásingadozást érzékeljük a hallószervünkkel, az érzékszervi rendszerünk halláshoz köthető része pedig segít feldolgozni az információt és hanggá alakítani azt. A hang terjedéséhez elengedhetetlen, hogy egy rugalmas közeg vegye körül a hangforrást, hiszen enélkül a közeg nélkül a hullámok nem tudnak terjedni. [1]

A hang longitudinális hullámként terjed a különböző rugalmas közegekben. A longitudinális hullám a haladási irányával megegyező irányban kelt rezgéseket, más néven kompressziós hullámként is nevezzük őket, hiszen sűrűsödést, és ritkulást hoz létre terjedése közben. [1]



2.2. 1. ábra: A Longitudinális hullám [2]

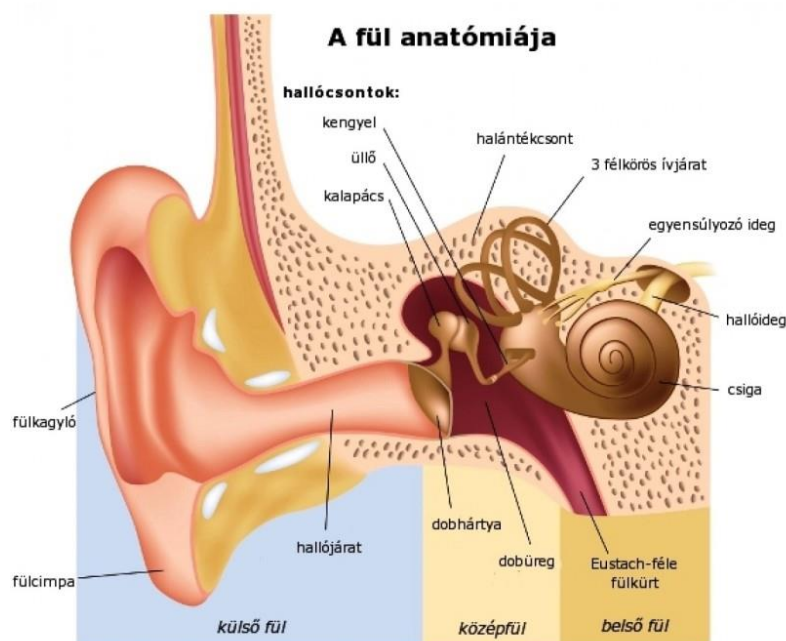
2.2.1 Különböző fizikai közegek

A hang különbözőféle képen terjed eltérő halmazállapotú közegekben, hiszen a különféle közegeknek más fizikai paraméterei vannak. Egy anyag minél szilárdabb, annál sűrűbben helyezkednek el benne a molekulák. A hang által gerjesztett rezgéshullámok energiaátadása egyenesen arányos az anyag molekuláris szerkezetének sűrűségével. Ebből arra következtethetünk, hogy az adott közegnek minél sűrűbb a molekuláris szerkezete, a rezgéshullám, mint információ, gyorsabban kerül átadásra molekuláról-molekulára, mint a kevésbé sűrű molekuláris szerkezetű közegekben. Nézzük meg a közegek paramétereit:

- *Szilárd anyagok:* A szilárd anyagokban a legsűrűbb a molekuláris szerkezet, emiatt ebben a közegben képes a hang a leggyorsabban terjedni. A hang nagy távokat képes megtenni a szilárd anyagokban szinte energiavesztés nélkül, ez is a sűrűn rendezett molekuláris szerkezetnek köszönhető.
- *Folyékony anyagok:* A folyékony anyagokban lassabban terjednek a hangok, mint a szilárd anyagokban, de gyorsabban terjed, mint a gázokban. A sebessége a folyékony anyag hőmérsékletétől, nyomásától és sűrűségétől függ.
- *Gázok:* A Gázokban terjed leglassabban a hang, mert a molekuláris struktúra a leggyengébb, és legkevésbé sűrű a molekuláris szerkezet. A

sebessége a gáz moláris tömegétől és hőmérsékletétől függ. Nagyon gyorsan csillapodik a hangnyomás és hangerő a gázokban.

2.3 A hallószerv (A fül)



2.3. 1. ábra: A fül szerkezete [3]

A fülünk három fő részből áll, a külsőfül a középfül és a belső fül. A legfőbb funkciója a hangforrástól érkező hangok begyűjtése, kódolása, felerősítése és irányuk meghatározása. [1]

2.3.1 A külsőfül

A külső fület a fülkagyló és a hallójárat alkotja, a középfültől a dobhártya választja el. A külsőfül rezonanciafrekvenciáinak szabályozásában a *concha* és a *hallójárat* ürege tölt be fontos szerepet. A külsőfül beesési szögtől függetlenül, a vízszintes síkból érkező hangok közül különösen a 2,6 kHz körülieket emeli ki, nem véletlenül, hiszen ez az érték megegyezik egy átlagos fülmodell első rezonanciafrekvenciájával. A *concha* 5 kHz-ig erősít rezonanciásan. [1]

Az oldalirányú hallásnál nagy előnyt jelent, hogy két fülünk van. A hangforráshoz közelebbi fülünk erősebben hallja a hangot, különösen 3 kHz fölött, ez a jelenség a fejük hangárnyékoló hatása miatt jön létre. A mélyebb frekvenciájú

hangoknál időeltolódással érkeznek be a jelek az egyik, illetve a másik fülünkbe. Habár ez a jelenség számunkra közvetlenül nem is megfigyelhető (nem fogunk a való életben hangeltolódást detektálni a két fülünk között, hiszen abba hosszútávon beleörülnénk) az érzékszervi rendszerünk képes kihasználni ezt az időeltolódást arra, hogy a mély hangok forrását jobban be tudja azonosítani. Ez az eltolódás a ms-os tartomány tört részét képezi, körülbelül 0,5 ms-ot. [1]

2.3.2 A középfül

A középfül a doböregben helyezkedik el, és a hallócsontokból (kalapács, üllő, kengyel) illetve a hozzátartozó izmokból áll. Ezenfelül hozzátartozik a fülkürt is (Eustach-kürt), ami a dobüreget összeköti a garattal. [1]

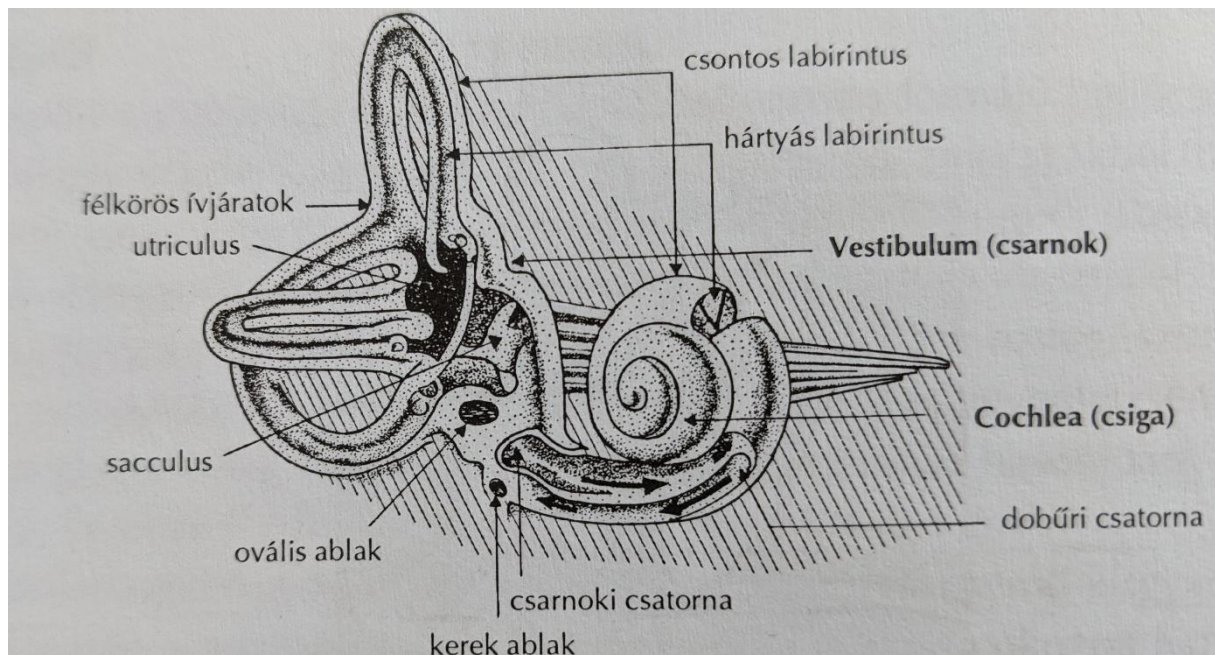
A dobhártya pókháló szerűen rostos rezgéskövető membrán, membránja a hangszóró tölcseréhez hasonlóan ívelt felületű. A dobhártya a levegőnek a rezgéseit átalakítja membránrezgéssé. Ha nem rendelkeznenk dobhártyával, és a levegő rezgései nem lennének átalakítva mechanikus rezgéssé a dobhártyánk által, akkor csupán a 0,1-1%-át hallanánk annak, amit dobhártyánk segítségével hallunk, ugyanis a levegőnek, és a folyadéknak (ami a belső fülünkben található) jelentősen eltér az ellenállása. A dobhártya tehát rezgésátalakító szerepet tölt be, a feladatát bizonyos frekvenciatartományban kiválóan végzi el, hiszen az impedanciája alig tér el a levegőtől. Mélyebb tartományokban vezeti jól a hangot, minél magasabb frekvenciatartományba érünk, annál jobban kezdi elveszíteni ezt a képességét. Sajátrezgésének legelső modusa 1400 Hz körül van. [1]

Ez a jelenség azért nem előnyös, hiszen a dobhártya feladata a külső világból érkező rezgések közvetítése, nem pedig a rezgéskeltés. Nem előnyös a hallásunk szempontjából, ha a membrán saját rezgései hozzáadódnak a külső hangjelekhez, ezért magasabb tartományokban, ahol a dobhártya viselkedése már zavaró a hallásunk számára, a koponyacsont veszi át a rezgésközvetítés feladatát. Eszerint alakulnak a következő tartományok: [1]

- 1400 Hz alatti tartományban *légvezetési hallásról* beszélünk
- 3 kHz fölött *csontvezetési hallásról*
- 1400 Hz és 3000 Hz közötti tartományban pedig a kettőnek a kombinációjáról beszélünk [1]

2.3.3 A belsőfül

A belsőfül két fontos mozgásérzékelő feladatot ellátó rendszert is magába foglal: Az egyensúlyozó szervet (vesztibuláris rendszer) illetve a hallószervet. Mi jelen esetben az utóbbival foglalkozunk, a csigával (*cochlea*). A *cochlea* a hallás szempontjából a fül legfontosabb része. Szintén a levegő mozgását érzékeli, és a mozgás által szerzett információkat továbbítja az agynak. [1]



2.3.3. 1. ábra: A csiga felépítése [1]

Az 1.2-es ábrán látható a csiga felépítése. A csontos labirintusban, illetve a hártyás labirintusban különböző konzisztenciájú agyfolyadék található. A csontos labirintusban hígabb folyadék, a hártyás labirintusban sűrűbb folyadék található. A két folyadék között körülbelül 150 mV-os potenciálkülönbség biztosítja a jelfeldolgozás energiáit. [1]

2.4 Additív szintézis

Az Additív szintézis egy hangszintézis technika, amit hangok előállítására használunk elektronikus és digitális eszközökkel. A célja az, hogy elektronikus úton tudjunk előállítani zenei hangokat. Zenei hangok előállításához különböző paraméterű szinuszhullámok sokaságára van szükségünk, és erre van segítségünk az Additív szintézis.

2.4.1 Az Additív szintézis rövid történelme

Az Additív szintézis történelmi háttere a 19. század elejéig húzódik vissza, és az alapjai Joseph Fourier nevéhez fűződnek. [4]

Hermann von Helmholtz (1821-1894) Német fizikus és orvos nagyban hozzájárult az akusztikai dinamikai paraméterek, és hangszintézis közötti párhuzam megértéséhez. Az 1863-ban kiadott „*Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*” című könyvében (Magyarul: A hangérzetekről, mint a zeneelmélet fiziológiai alapjáról) a harmonikus sorozatokról ír, illetve azok párhuzamáról a harmonikus hangokkal, és hogy ezen hangokat hogyan lehetne különböző frekvenciájú és amplitúdójú szinuszhullámokból összeilleszteni, és megkapni azt a zenei harmonikus hangot, amit szeretnénk. Ezek az elméleti alapok nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy a gyakorlatba is áttudják ültetni az additív szintézist. [4]

A következő fontos pontunk Thaddeus Cahill (1867-1934) nevéhez fűződik, aki a találmányával elsőnek tudta implementálni az additív szintézist fizikai síkra, a Telharmóniummal, ami az első elektromechanikus hangszer volt. A koncepciója az volt, hogy ha képes az elektronokat olyan mozgásra bírni, hogy azok szinuszhullámként viselkedjenek, akkor képes az elektronok mozgatásával a hangok előállítására. Ehhez kitalált egy hatalmas komplexitású műszert, amivel minden egyes hanghoz egy megfelelő fogaskereket méretezett és ezen fogaskerek együttes mozgatásával bármilyen hangszínt kitudott keverni. A Telharmónium megszületésével tehát létrejött az első olyan hangszer és elektromechanikus műszer, ami sikeresen tudta implementálni az additív szintézist. [4]

A 20. század második felében a szintetizátorok megjelenése egyre szélesebb felhasználási területet tett lehetővé az additív szintézis különféle implementálásra. Illetve, máshogyan megfogalmazva, az additív szintézis elengedhetetlen része a szintetizátorok működéséhez, hiszen ez teszi lehetővé, hogy zenei hangokat, és harmóniát érjen el az ember egy teljesen elektronikus eszközön. A zenei hangok elérése mellett a még nagyobb érdekessége ezen elektronikus hangszereknek, hogy az additív szintézissel nem csak a meglévő hangszerek hangját lehet vele „leutánozni” hanem a különféle experimentális hangok végeláthatatlan módon paraméterezhetők, és permutálhatók. Az első világszinten is sikeres fejlesztést a Yamaha érte el az 1980-as évek elején, amikor a Yamaha DX7-es nevezetű ikonikus hangszer megalkották.

Ennek az ikonikus hangszernek akkora sikere lett, hogy a mai napig használják azt, a zene iparban és a filmiparban egyaránt. [4]

A modern érában a számítástechnika és a hangkártyák rapid fejlődése végett még több módon lehetőségünk van felhasználni az additív szintézis által nyújtott lehetőségeket. A szoftveres szintetizátorok megjelenésével már nincs is szükségünk szintetizátorra, hogy különféle hangokat állítsunk elő, hanem elég, ha egy megfelelő teljesítményű számítógéppel rendelkezünk, és megannyi szoftver áll a szolgálatunkra, amivel kísérletezhetünk. [4]

2.5 Hangszórók

Ha a mai világunkban egy napon úgy ébrednénk, hogy a hangszórók létezése megszűnne, nem is tudom, hogy túlélne-e egy napot is akár az emberiség. A modern technológia által nyújtott könnyebbségek, és kézen fekvő megoldások mindannyiunk életét annyi módon megkönnyíti, és befolyásolja, hogy el is felejtettük már azt a scenáriót, hogy milyen lenne egy átlagos napunk ezen technikai vívmányok nélkül.

Nézzük meg, hogy mégis hogyan nézne ki egy napunk hangszórók nélkül: Az első problémában ott ütköznénk bele, hogy szinte garantáltan elkésznénk a munkánkból, vagy az iskolából, hiszen nem lenne az ébresztőóránkban, vagy okostelefonunkban hangszóró, ami a kellemes lágy dallamaival felkeltene minket. (Itt hatalmas előnyt élveznek azok, akiknek sikerült már a biológiai órájukat megtanítania arra, hogy önmaguktól feltudjanak kelni, ők egy ilyen világban hatalmas előnnyel indulnának. Persze azért belehet szerezni egy klasszikus „vekker” órát, de ki szeretne annak az örült csilingelésére ébredni minden nap?)

A kocsinkba, vagy a buszra felülve rögtön a második problémába ütköznénk, hiszen a kedvenc rádióinkat, vagy lejátszási listánkat, amitől könnyebben indulnak a reggelek szintén elfelejthetnénk, és csak unottan bámulnánk ki az ablakon.

Napközben ismét számos kellemetlen szituációban találnák magunkat, amikor is a külföldön dolgozó kollégáinkkal a webkamerás meetingek során immáron jelbeszéddel kellene megértetnünk egymást, hiszen se az okostelefonunkban, se a számítógépünkbe nem található meg a hangszóró.

Az oktatóknak sem lenne könnyű dolgok, hiszen minden egyes előadáson a bevált mikrofon helyett egy megafont kellene használniuk, de úgy az óra inkább

emlékeztetné a diákokat valami nagyon elbénázott próbariadóra, és valós tudást nem vinne haza senki.

Végre, amikor eljön a délután, és az este, és csak arra vágyunk, hogy kikapcsolódjunk a hosszú és nehéz nap után, ismét kellemetlen helyzetek tömkelegébe ütköznénk, hiszen nem lenne lehetőségünk átélni a moziban azt a hangélményt, amit nyújtani tud a tökéletes terem akusztika és a Dolby Atmos csodás összjátéke. Nem lenne lehetőségünk elmenni kitáncolni magunkból azokat a felgyülemlett energiákat, vagy meghallgatni kedvenc együttesünket. Azt azért hozzá kell tennem, hogy természetesen a zene által nyújtott szépséget a hangszórók feltalálása előtt is megtudták élni az emberek, hiszen a teljesen akusztikus hangszerek, és az énekhang egy kis teret meg tud tölteni, de az elmúlt 100 évben annyira átalakultak ezek a szokások, hogy nem lenne kényelmes ilyen kompromisszumokat kötni a zene terén sem.

Egy szó, mint száz, ha végig gondoljuk azt, hogy mennyi mindent veszítenénk a hangszórók nélkül, lehet, hogy jobban megtanuljuk értékelni, hogy mi az, amit kapunk a hétköznapi életben a technológiai vívmányok által.

2.5.1 A hangszórók felépítése

A hangszórók komplex elektromechanikai eszközök, amik az elektromos jelet alakítják át hallható hanghullámokká, a bennük található komponensek szoros együttműködése által. Nézzük meg, mik ezek a komponensek:

- **Membrán:** A membrán teszi lehetővé, hogy a hangszóró megszólaljon, hiszen ahogyan mozog előre, és hátra, úgy kelti a levegőben a rezgéshullámokat, és mi ezeket a rezgéshullámokat detektáljuk a fülünkkel.
- **Mágnes:** A mágnes egy permanens mágneses teret hoz létre a hangszóró házán belül, ez a mágneses tér képes interaktálni a tekercsen indukálódott árammal, ezáltal megmozgatni azt.
- **Tekercs:** A tekercs a membrán hátuljára van erősítve, és ahogyan indukálódik rajta az áram, úgy mozog, és mozgatja a membránt, előre-hátra.

- **Gumiperem, és felfüggesztés:** A gumiperem flexibilis gumiból készül, és a membrán peremét köti össze a hangszóróházzal. A felfüggesztés szintén a hangszóróházzal kapcsolja össze a membránt, annyi különbséggel, hogy belülről, a tekercs felől van összekötve a hangszóró és a ház.
- **A hangszóróház:** Mindamellet, hogy a hangszóró összes komponensét a helyén tartja, sokkal magasztosabb célt lát el azáltal, hogy a hangszóró akusztikai tulajdonságait olyan szépen kiegészíti. A ház nélkül sokkal tompábban, és kevésbé gazdagon szólnának a hangszórók.
- **Keresztváltó:** A keresztváltó áramkör egy elengedhetetlen komponense a több utas hangfalaknak. A több utas hangfalakban nem csak egy hangszóró van, hanem 2-3 vagy akár még több. A keresztváltónak az a feladata, hogy 20 Hz-től 20 KHz-ig terjedő tartomány frekvenciáit több részegységre bontsa, és a megfelelő tartományt, a megfelelő hangszóróra irányítsa.

2.5.2 Hangszóró fajták

Nézzük meg elsőnek azt, hogy a különböző méretű hangszórók milyen frekvencia tartományokat hivatottak megszólaltatni, és utána pedig azt, hogy miért is fontosak az olyan hangszóró rendszerek, amikben ezeknek a kombinációját használjuk egy rendszeren belül.

- **Mélynyomó (subwoofer):** A mélynyomó a frekvenciaspektrum legalacsonyabb tartományai hivatott megszólaltatni, 20 Hz – 200 Hz közötti tartományt. A mélynyomó egy külön komponens, amit egy egy- vagy több utas hangfal rendszerhez csatolva, a hang alacsony tartományait egészíti ki, és gazdagítja a hangzás élményét. Akusztikailag a mélysugárzót a földre érdemes helyezni, mert az alacsony tartományok így szólalnak meg a legtisztábban és így lehet vele legkönnyebben elérni, hogy érződjön a „testhang” hatása. Ha zárt térben használjuk, érdemes lehet a tér valamelyik sarkában elhelyezni a mélysugárzót. A kisebb stúdió mélynyomók körülbelül 6” és 10” között

helyezkednek el, de előzenés eseményekhez, nagy koncertekhez 18"-os vagy még nagyobb hangszórókat is használhatnak.

- **Mély-és közép sugárzó (Woofers):** A mélynyomóval ellentétben, ezt a hangszóró fajtát általában egy több utas hangfal egyik komponenseként alkalmazzuk. Ez a hangszóró szintén hivatott arra, hogy alacsony frekvencia tartományokat szólaltasson meg, de mindemellett képes közép-alacsony, és közép-magas frekvenciák megszólaltatására is. A frekvenciatartománya nagyjából 40 Hz és 2 kHz között helyezkedik el. Két utas hangszórók kihasználják ezt a széles tartományt, és a „woofer” mellé már csak egy „csipogót” használnak. A három utas hangszórók viszont általában a mély tartománya miatt használják ezt a hangszórót, és külön alkalmaznak egy közepsugárzót.
- **Közepsugárzó:** A közepsugárzók a frekvencia tartomány középső részét fedik le, alkalmazástól függően körülbelül 200 Hz és 5 kHz között. Ez az érték nagyban függ attól, hogy különböző hangfalakban hogyan alkalmazzák a közepsugárzót. Általában a közepsugárzót egy három utas hangfalban szokták alkalmazni, hogy ne a mélysugárzó(woofers) feladata legyen a közép frekvenciák megszólaltatása, hanem az csak a mély tartományt fedje le, és a középfrekvenciákat pedig a közepsugárzó szólaltassa meg. Körülbelül 3" és 8" között alakul a fizikai átmérőjük
- **Magassugárzó (Csipogó, Tweeter):** A magassugárzók a fizikai méretükből adódóan kizárólag magas frekvenciákat képesek megszólaltatni, körülbelül 5 kHz-től 20 kHz-ig. A csipogók fizikai átmérője csupán néhány centiméterre korlátozódik, még a high-end professzionális hangfalakban is. Több megoldás van így a fizikai méretüket kompenzálva, hogy hangosabbak legyenek, a legnépszerűbb ilyen módszer egy tölcse alkalmazása, ami egy akusztikai erősítőként szolgál.
- **Egy utas hangszórók:** Az egy utas hangszórók az egész hallható frekvencia tartományt egy darab hangszóróval próbálják meg reprodukálni, természetesen csak kompromisszumosan tudják, hiszen se az alacsony, se a magas frekvenciákat nem tudják tisztán visszaadni.

- **Két utas hangszórók:** A két utas hangszórók jellemzően egy mély-és közép sugárzóból állnak, amik az alacsony, és a közép tartományokat fedik le, és egy csipogóból, ami pedig a magas tartományokat fedi le.
- **Három, -és több utas hangszórók:** A Három utas hangszórók külön-külön hangszórókkal képesek lefedni a mély, közép, és magas tartományokat, ezért legkönnyebben az ilyen típusú hangszórókkal lehet elérni egy teljes frekvenciahű torzítás mentes végeredményt. Az ennél több utas hangszórók leginkább a high-end Hi-Fi-k világában elterjedtek.

2.6 Mikrofonok

A mikrofon egy jelátalakító eszköz, ami a hanghullámokat alakítja át elektromágneses jellé. Az elektromágneses jeleket továbbítja egy erősítőnek, ami ezeket a jeleket felerősíti, és egy hangszóró segítségével visszaalakítja hanghullámokká. Ez természetesen csak egy példa a sok féle alkalmazására a mikrofonnak, de szerintem elsőre fontos, hogy a legegyszerűbb példával szemléltessünk egy eszközt, hogy könnyebb legyen belemélyülni az adott témakörbe. Rengeteg alkalmazási területe van a mikrofonnak, nézzünk meg egy párat: [5]

- **Hangfelvétel:** A mikrofon nélkülözhetetlen technológia a hangfelvételek modern alkalmazásába. Amióta a modern technológia lehetővé teszi, hogy elektro-mágnesesen, vagy digitálisan hangot rögzítsünk, azóta ezt a mikrofonnal tesszük. Számtalan módon használjuk a területen belül a mikrofont hangfelvételre, például stúdiókban ének és hangszerek hangjának a rögzítésére, rádió vagy tv műsorban a bemondó, illetve műsorvezető hangjának a felvételére, diktafonnal terepfelvételek rögzítésére stb.
- **Hangosítási rendszerek (PA rendszerek):** A komplett hangosítási rendszerek több komponensből állnak, amik magukba foglalják a mikrofonok mellett a hangszórókat és az erősítőket. Az emberi hangokat, illetve a hangszerek hangjait felerősítik a mikrofonok segítségével, és a rendszerben található hangszórókon megszólaltatják azokat valós időben. Leginkább nagy méretű koncerteken, publikus

eseményeken használják a PA rendszereket, ahol erősítés nélkül nem lehetne elérni a kívánt hangerősséget. A hangosítási rendszerek ennél sokkal hétköznapi tevékenységeket is lefednek, mint például az iskolai hangosbemondót, vagy a közösségi közlekedésben használatos bemondók a megállóknban, illetve járműveken.

- Nézzünk meg érintőlegesen még egy pár területet, ami érdekes lehet, és talán bele sem gondolunk, hogy mennyire a hétköznapi élet részeit képezik az adott területek: Telefonok, Hallássegítő eszközök, valós idejű és felvett hangmérnöki tevékenységek, televízió és rádióközvetítés.
- A modern világban a mikrofonoknak egy teljesen új és jelenleg is fejlesztés alatt álló területei magában foglalják a számítógépünk, vagy mobil eszközünk mikrofonja által használt hangfelismerő alkalmazási területeit. Illetve ezekkel a mikrofonokkal való hangfelvételt.
- A szenzoros technológiában is nagy szerepet kapnak a mikrofonok, hiszen vannak olyan alkalmazási területek, ahol a szenzorokkal nem a mozgást, vagy a fényváltozást érzékelik, hanem a hanghullámokat.

2.6.1 Történelmi érdekességek

Amikor felmerült az az igény az emberekbe, hogy nagy tömegeknek tudjanak beszélni, akkor kezdtek el kísérletezni különböző akusztikai megoldásokkal. Az első ilyen megoldások akusztikai megafonok voltak, és számításunk előtt az 5. században is találunk példát az alkalmazására Görögországban, ugyanis az amfiteátrumokban játszó színészek olyan maszkokat hordtak, aminek a szájánál kürt alakú nyílást alakítottak ki, ezzel felerősítve a színész hangját.

1665-ben Robert Hooke volt az első, aki azzal kísérletezett, hogy a hanghullámokat átvitte egy másik közegbe, és abból a közegből visszaalakította azt hallható hanggá. Így született meg az a megoldása, amikor két üres konzervdobozt összekötött egy vezetékkel, és a fémvezeték a hangot, mint információt képes volt hordozni az egyik konzervdoboztól a másikig, ahol az ismét hallható hang formájában jelent meg.

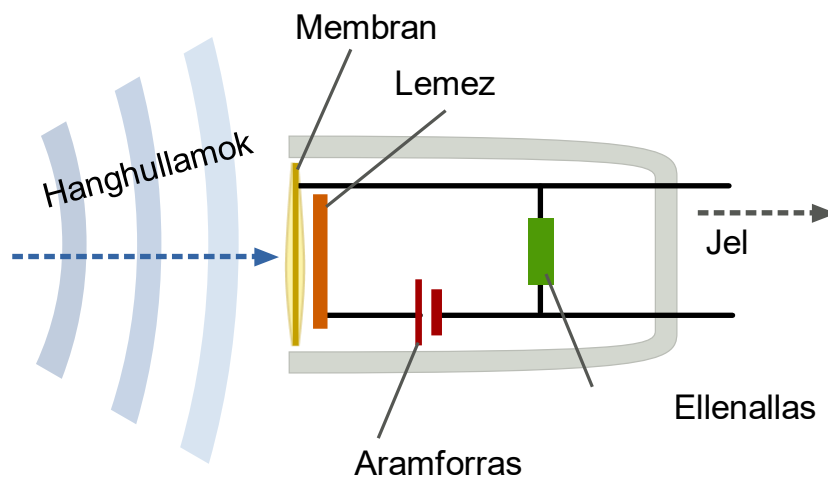
A mikrofon alapjait a 19. század második felében fejlesztették ki, több előremutató találmányt találtak fel ebben az időszakban, az összes találmány

valamilyen mód megalapozta a 20. század elején kifejlesztett, ma is használatban levő mikrofonokat.

2.6.2 Mikrofonok működési elve

A mikrofonokat a működési elvük alapján két főcsoportban tudjuk megvizsgálni. (Létezik több fajta működésű elvű mikrofon is a világban, de mi most arra a kétfajtára koncentrálunk, ami a leginkább elterjedt):

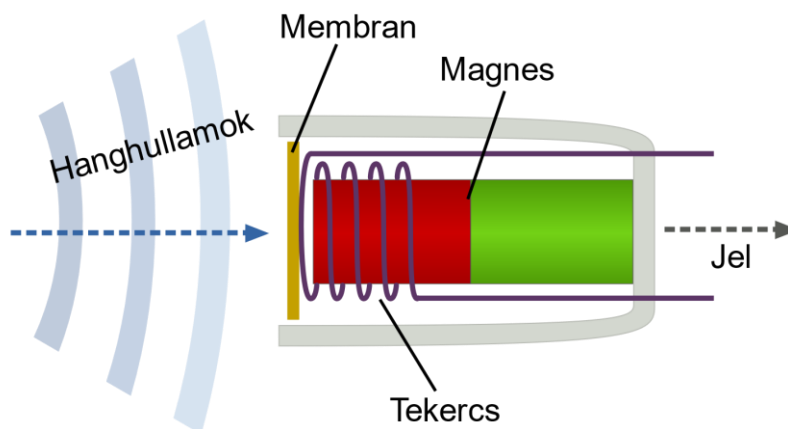
1. **Kondenzátoros Mikrofon:** A kifeszített membrán úgy viselkedik mintha a kondenzátornak az egyik fegyverzete lenne. A membrán mögött el van helyezve egy elektromosan feltöltött lemez, ami pedig a kondenzátor másik fegyverzeteként funkcionál. Ahogyan a hanghullámok mozgatják a membránt, úgy a membrán és a hátsó lemez közötti tér változik. Mivel a lemezek kapacitása fordítottan arányos a közöttük levő távolsággal, a membránon megjelenő rezgések a két tér között megváltoztatják a kapacitást. Ez a kapacitásváltozás mérhető, és visszaalakítható hangjellé. [5]



2.6.2 1. ábra: A kondenzátoros mikrofon blokkvázlata [5]

2. **Dinamikus Mikrofon:** A dinamikus mikrofonok működési elve megegyezik a hangszórók működési elvével, annyi különbséggel, hogy az egész folyamat fordítottan zajlik. Egy permanens mágneses tér van kialakítva a mikrofonon belül egy mágnes, és egy indukciós tekercs segítségével. Ez az indukciós tekercs direkt módon össze van kötve a

membránnal, így amikor a membrán mozog, a tekercs is mozog a mágneses térben belül. Ez a mozgás elektromos áramot indukál a tekercsben, és ezt a jelet hangjelként tudjuk feldolgozni a mikrofon kimenetén. [5]



2.6.2 2. ábra: A dinamikus mikrofon blokkvázlata [5]

2.6.3 Mérőmikrofonok bevezetés

A mikrofonoknak alkalmazástól függően megannyi fajtája van, de én jelen szakdolgozatban a mérőmikrofonokkal fogok foglalkozni, hiszen a hangtechnikai mérésekhez ezeket fogom használni.

A mérőmikrofonokat különböző akusztikai mérésekhez, hangszórók és terek, illetve termek akusztikai „hitelesítéséhez” használjuk. Ezek a mikrofonok az akusztikai terek zajszintjét mérik, és annak érdekében, hogy hiteles értéket adjanak vissza, a gyártás során frekvenciahű kalibrációval látják el őket. Amelyiket nem kalibrálják a gyártás során, vásárlás után szoftveresen mi magunk tehetjük meg a kalibrációt, hiszen a gyártó oldalán találhatunk olyan kalibrációs szoftvert vagy fájlt, amit letölthetünk, és a mikrofont a számítógépünkhöz csatlakoztatva rátölthetünk. A mérőmikrofonok kalibrációja rendkívül fontos, hiszen enélkül nem kapunk hiteles visszajelzést. Az is nagyon fontos, hogy egy bizonyos eltelt idő vagy használat után újra kalibráljuk a mikrofonunkat, hiszen ahogyan használódnak az elektronikus komponensei az eszközünknek, az előre definiált határértékek eltolódhatnak, illetve,

ha túl nagy fizikai hanghatás érte a mikrofont az is egy indikáló tényező lehet, ami megváltoztatja ezen határértékeket.

A mérőmikrofonok rendszerint skaláris nyomásérzékelők, és minden irányból érzékelik a hanghullámokat, csak a saját fizikai dimenzióik által limitált az érzékelésük. A hang intenzitás mérésekhez szükséges nyomás-gradiens méréseket, egymástól függő legalább két mérőmikrofonnal végzik el.

2.6.4 Mérőmikrofonok specifikációi

Az egyik legfontosabb paraméterei a mikrofonoknak, és a mérőmikrofonoknak az, hogy milyen irányban terjed a hatósugaruk, ahonnan képesek érzékelni a hangot. Különböző alkalmazásokhoz előnyös lehet az, ha irányítottan fedik le a teret, más alkalmazásokhoz pedig, ha minden irányból érzékenyek a hangokra. Nézzük meg, hogy milyen jellemzők alapján kategorizáljuk a mérőmikrofonok iránykarakterisztikáját: [5]

1. **Omnidirekcionális Mikrofonok (Gömb karakterisztika):** Ezek a mikrofonok minden irányból egységesen képesek érzékelni a hangot, így egy teljes 360 fokos kört lefedve. Ezek a paraméterek ideálissá teszik ezt a mikrofonfajtát szoba vagy terem akusztika analizálására, hang nyomás mérésekre, vagy arra, hogy egy térben egyenlően tudjunk különböző paramétereket egyszerre vizsgálni.
2. **Kardioid (szívgörbe) Mikrofonok:** A kardioid mikrofonok egy specifikus irányból érzékenyek, általánosságban a mikrofon front oldalán. Oldalról minimális, hátulról szinte semennyire nem érzékeny a hangokra. Akkor célszerű alkalmazni őket, amikor egy specifikus irányt, vagy egy specifikus hangforrást szeretnénk mérni, izolálva ezt a hangforrást a környezetünk többi hangjától.
3. **Kétirányú mikrofon (8-as formájú):** A Kétirányú mikrofon egyszerre előre, és hátrafele is érzékeny, viszont oldalirányban nem az. Ezeket a mikrofonokat leginkább csak tesztelésre, vagy kísérletekhez használják, valós akusztikai mérésekhez maximum nagyon specifikus alkalmazásnál kell használni.

4. **Változtatható paraméterű mérőmikrofonok:** Léteznek olyan high-end mikrofonok, amik képesek többféle paraméter alapján is mérni, ezeket a paramétereket a mérés alapján ki tudjuk választani, és éppen az adott paraméter szerint mérni.

Összességében, ami a legfontosabb, és legelterjedtebb mérőmikrofon fajta az az omnidirekcionális mikrofon, és a kardioid mikrofon. Ezen kívül létezik többféle iránykarakterisztikájú mikrofon is, de azokat mérőmikrofonként nagyon specifikus körülmények között alkalmazzák, általánosságban ezzel a kettővel dolgoznak, és én is egy omnidirekcionális mérőmikrofont fogok használni a méréseimhez.

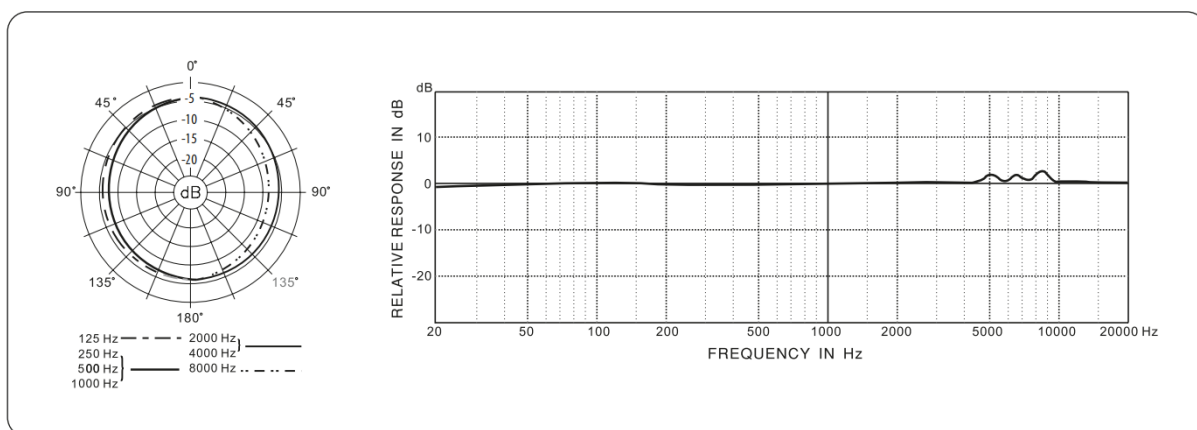
3 Mérések

3.1 A mérésekhez felhasznált hardverek

3.1.1 Behringer ECM8000 mérőmikrofon

Ez a mérőmikrofon leginkább végfelhasználóknak készült, de rendkívül jó tulajdonságainak köszönhetően, a szakdolgozatban kívánt mérések elvégzéséhez kiváló lesz. Nézzük meg a specifikációját részletesen: [6]

1. Ultra-lineáris mikrofon méréshez, és felvételhez
2. Rendkívül jó szoba, és terem akusztika beméréshez, magas-felbontású stúdió felvételekhez, és élő zenei alkalmazásokhoz.
3. Kiváló valós frekvenciaválasz és nagyon magas hangfelbontás
4. Egyenlő súlyelosztás, és valós omnidirekcionális minta
5. Fantomtáppal működik +15V és +48V között
6. Alacsony zajú transzformátor nélküli FET bemenete megszünteti az alacsony frekvenciájú zajt
7. Arany bevonatú XLR csatlakozó a teljes, magasszintű jel érdekében
8. A mikrofon kiegészítőihez tartozik egy forgatható állványtartó és egy hordozótáska



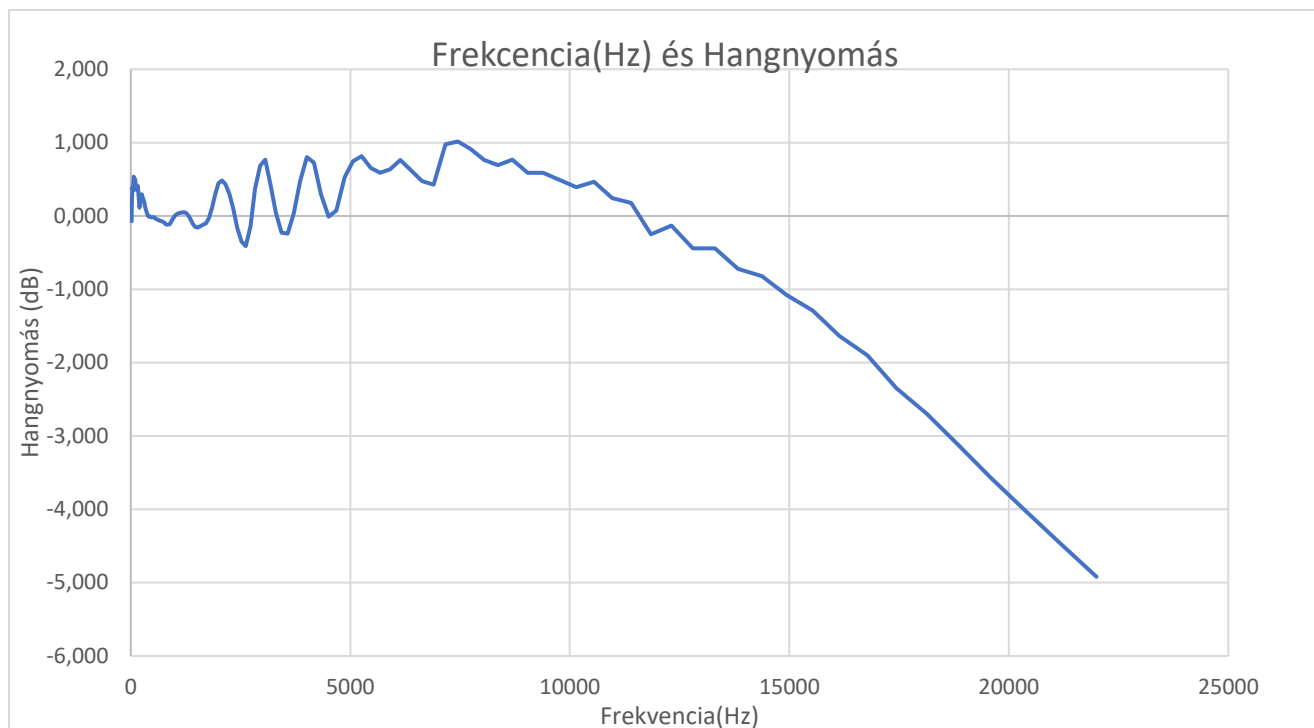
3.1.1. 1. ábra: A Behringer ECM8000 mikrofon frekvenciaátvitel karakterisztikája és az omnidirekcionális karakterisztikája. [6]

A Mikrofon specifikációja: [6]

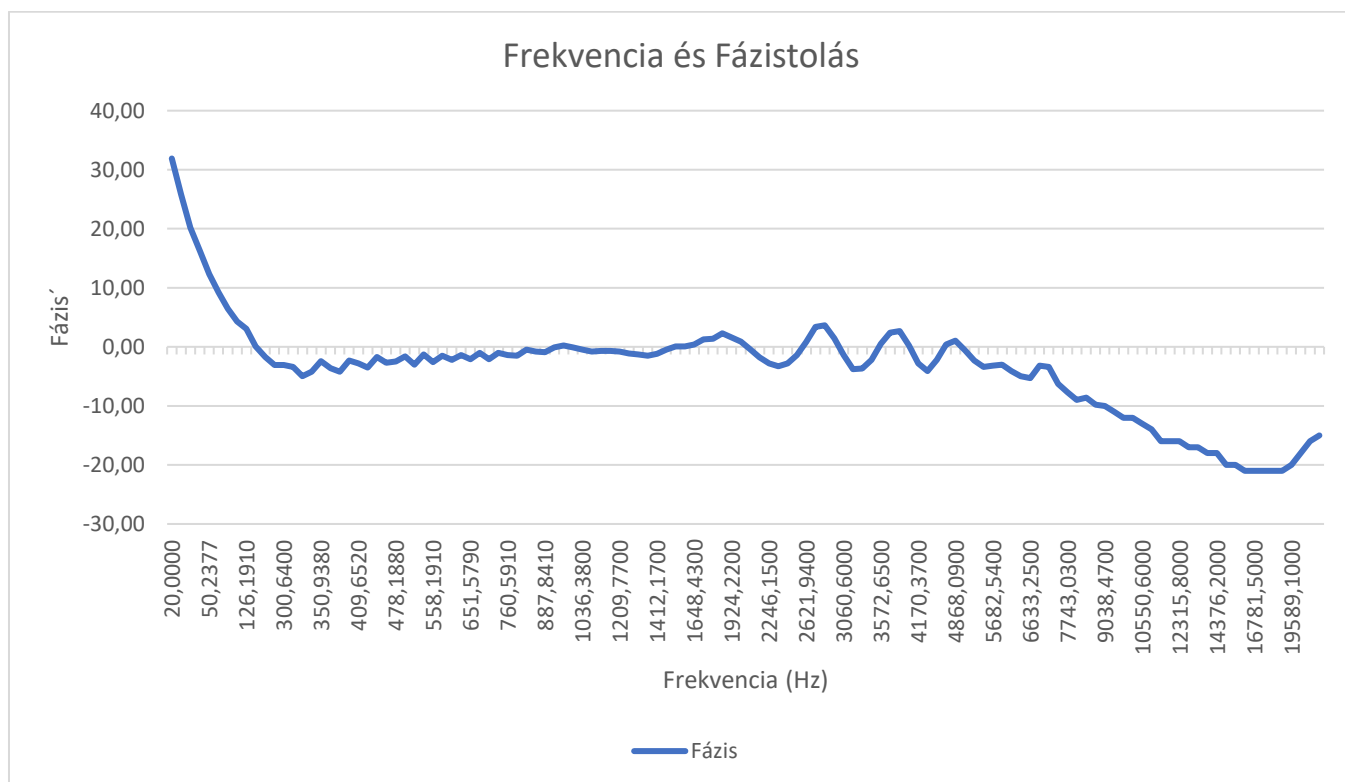
Típus	Kondenzátoros Mikrofon
Iránykarakterisztika	Omnidirekcionális (Minden irányú)
Ellenállás	200 Ohm
Érzékenység	70 dB
Frekvenciatartomány	20-20.000 Hz
Csatlakozó	Arany XLR
Fantomtáp	+15 - +48 V
Súly	136 g

Kalibrációs fájl:

A Mikrofonhoz tartozik továbbá egy gyártó által javasolt kalibrációs fájl, amit a gyártó hivatalos oldaláról lehet letölteni. Ezt a fájl azért érdemes használni, mert a hallható frekvencia tartományban kalibrálja be a mikrofonunkat hangnyomás (dB) és fázis szerint, ezáltal sokkal valósághűbb eredményeket kapunk a méréseink során. A következő két grafikon szemlélteti, a kalibrációs fájl által javasolt értékeket.



3.1.1. 2. ábra: Frekvenciamenet a hangnyomás korrigálásával.



3.1.1. 3. ábra: Frekvencia menet és a fázistolás viszonya

3.1.2 HK Lucas Audio 600 hangfal

A HK Lucas Audio PA rendszer az első professzionális hangfalam. Ezt a típusát nagyjából 20 éve nem gyártják, de nekem pár éve szerencsém volt kifogni egy nagyon szép állapotban levő darabot. Rendszeres karbantartás, és tisztítás esetén a mai napig pont úgy működik, mint azt ahogyan egykoron megálmodták. Természetes és kitöltött hangzását a fadobozolásnak, és a német precizitásnak egyaránt köszönheti, hisz ezt a darabot a szülőországában nem csak megtervezték, de ott is készítették el, szerelték össze, és tesztelték. Kompakt mérete ellenére meglepően nagy tereket be tud zengeni. Én személy szerint ezt használom a saját kisebb, pár száz fős rendezvényeinken is, ahol még épphogy, de megállja a helyét, viszont alacsony teljesítményen a saját szobámban is olyan szép akusztikai hatást el lehet vele érni, hogy az úgy szint meglepő. Ez a tulajdonsága azért érdekes, mert nagyon sok nagyobb teljesítményű hangfalat ahhoz, hogy egy kitöltött tartományban tudja megszólaltatni a zenét, legalább 20-30%-os hangerőre érdemes csavarni, mert egyszerűen azalatt nem tudja átadni a zene rétegeit, sokszínűségét, és erejét. Viszont akkora hangerőn meg már könnyedén állóhullámokat tud generálni kis térben. Ezzel szemben a HK Lucas itt is szépen vizsgálódik, hiszen 10-20%-os hangerőn is kellően organikusán tudja megszólaltatni a hangokat, és a zenét. Éppen ezért is van lehetőségem az első méréseket a szobámban elvégezni.

Nézzük meg a hangszóró részletes specifikációját: [7]

1. A 2-utas passzív szatellit hangfalak:

Teljesítmény:	150 W RMS
Frekvencia tartomány:	130 Hz – 18 kHz +/- 3dB
Maximum hangnyomás:	120 dB
Axiális érzékenység:	101 dB
Ellenállás:	4 Ohm
Mély/Közép-sugárzó:	8” HK Audio Custom
Magas-sugárzó:	1” HK Audio Custom
Keresztváltás frekvencia:	4,5 kHz 12 dB oktávonként
Csatlakozó:	Speakon® Neutrik NL 4
Súly:	8 kg
Mérete:	27 cm x 42,5 cm x 23 cm

--	--

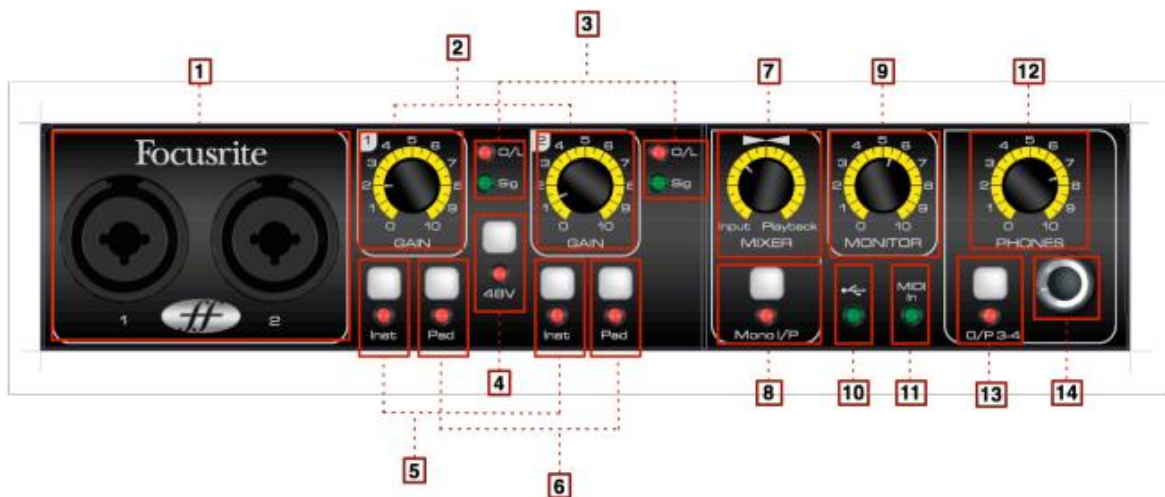
2. A 15"-os aktív mélynyomó

Teljesítmény:	300 W RMS
Frekvencia tartomány:	50 – 130 Hz +/- 3 dB
Maximum hangnyomás:	123 dB @ 10% THD
Axiális érzékenység:	104 dB
Ellenállás:	8 Ohm
Mélysugárzó:	15" HK Audio Custom
Mélysugárzó előerősítő teljesítménye:	300 W RMS
Szatellit előerősítő teljesítménye:	2x 150 W RMS
Csatlakozók:	2x XLR Line in 2x XLR Through 2x Speakon® satellite out
Súly:	37 kg
Mérete:	55,5 cm x 44 cm x 76 cm

3.1.3 Focusrite Saffire 6 USB hangkártya

A mérésekhez használnom kell egy hangkártyát is, hiszen a mérőmikrofonom egy passzív analóg mikrofon, aminek szüksége van egy hangkártyára, ami kezeli azt, illetve ellátja energiával fantomtápon keresztül. A választásom a Focusrite egy régebbi modelljére esett, amit egy kedves profi zenei producer barátomtól kaptam, aki azóta csak high-end kategóriájú hangkártyákkal dolgozik, de egykoron ez a készülék őt is tökéletesen kiszolgálta, és meleg szívvel ajánlotta fel nekem, hogy elvégezzem vele a szakdolgozatomhoz szükséges méréseket. A következő szekcióban nézzük meg a hangkártyának az I/O egységeit és specifikációit.

A Hardver tulajdonságai:



3.1.3. 1. ábra: A hangkártya előlapja. [8]

1. 1-es és 2-es XLR bemenet Mikrofonnak, Vonalbemenetnek, vagy Hangszernek.
2. Az 1-es, 2-es bemenet erősítésének a szabályozása
3. Az 1-es, 2-es bemenet visszajelző LEDek. A zöld „jel” LED -18 dBFS-nél kezd el világítani, a piros „vágás” LED -1 dBFS (dBFS=decibels relative to Full Scale avagy a teljes skálához viszonyított decibel érték)
4. A két bemenet között megosztott fantom táp engedélyezése LED visszajelzéssel.
5. Váltás hangszer és vonaljel között mind két bemeneten
6. Az 1-es és 2-es bemenet szintkapcsoló gombja – A gomb megnyomása 10 dB-es jelszintcsökkenést eredményez
7. Bemenet/Kimenet állítása – A bemenet és a lejátszás közötti egyensúlybeállítás
8. Mono bemenet kapcsoló – Sztereó bemenet, vagy fejhallgató monitorozása mono üzemmódban
9. A kimeneti jel erősítésének a szabályozása
10. USB visszajelző LED – A világításával jelzi, hogy USB-n keresztül kap tápellátást a számítógépből.
11. MIDI visszajelző LED – A világításával jelzi, hogy a csatlakoztatott MIDI adatot küld a hangkártya bemenetére
12. A fejhallgató hangerőszabályzója
13. Fejhallgató monitor kapcsoló – Az 1-es, 2-es, és 3-as, 4-es kimenet között lehet vele váltani

14. TRS 6,3-as fejhallgató Jack kimenet [8]

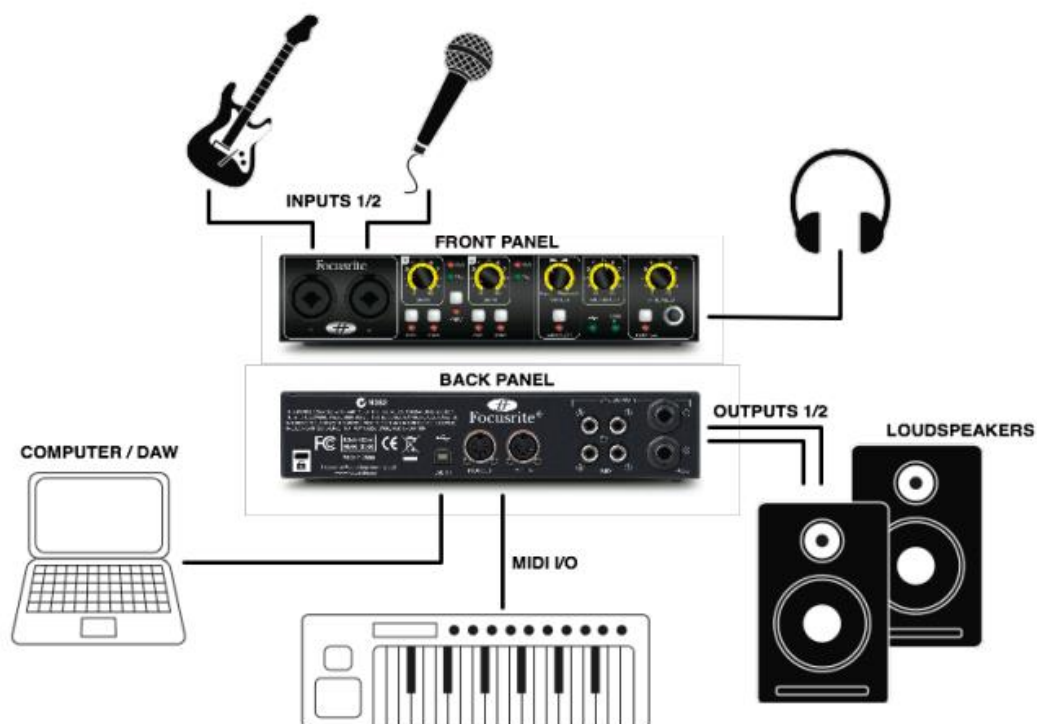


3.1.3. 2. ábra: A hangkártya hátlapja, és kimenetei: [8]

1. Kensington zár
2. USB 2.0-ás konnektor
3. 2xDin5 MIDI bemenet/kimenet
4. 4xRCA phono jack csatlakozó (Kimenet 1-4) – Kimeneti jelszint: -10 dBV
5. 2xTRS jack csatlakozó (Kimenet 1-2) – Kimeneti jelszint +4 dBV [8]

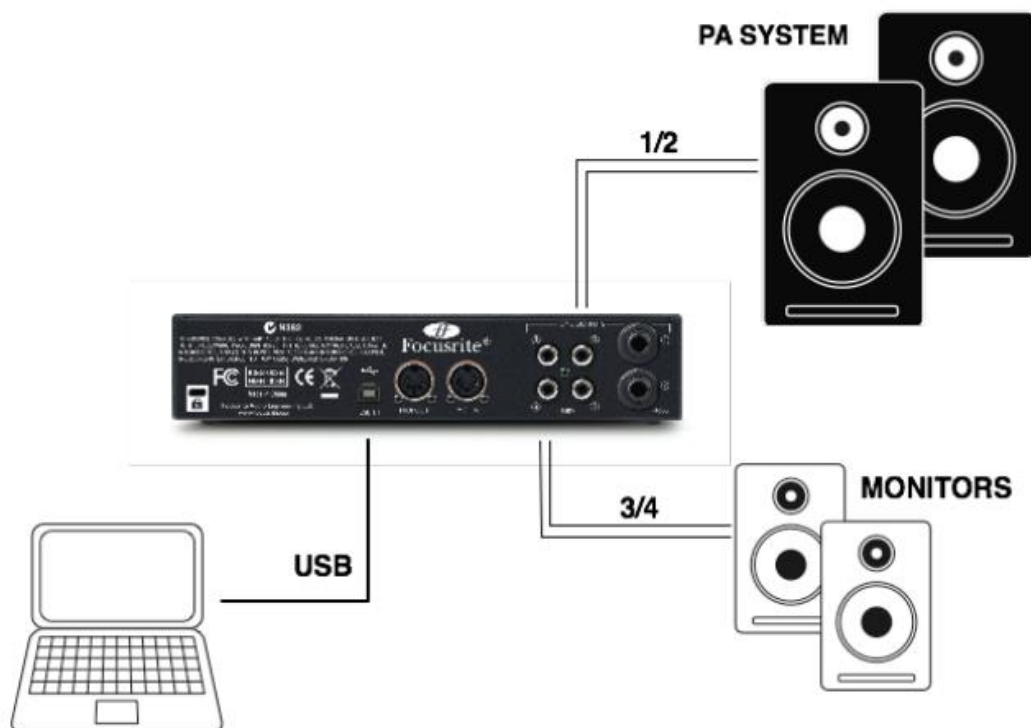
Miután megvizsgáltuk a hardvernek a tulajdonságait, nézzük meg, hogy milyen módokon alkalmazhatjuk azt. A különböző alkalmazási módokhoz a gyártó csatol ábrákat, hogy hogyan kell csatlakoztatnunk az eszközeinket a hangkártyához.

Hangfelvétel esetén:



3.1.3. 3. ábra: I/O egységek csatlakoztatása a hangkártyához [8]

Csatlakozás Hangrendszerhez, Monitorhoz:



3.1.3. 4. ábra: Kimenetek csatlakoztatás hangrendszerekhez, monitor hangfalhoz [8]

3.2 A mérésekhez felhasznált szoftverek

3.2.1 REW (Room EQ Wizard)

A REW egy ingyenesen letölthető szoftver, pontosabban egy Java alkalmazás szobaakusztikai mérésekre lett kifejlesztve, és rengeteg eszköz áll rendelkezésünkre a szoftveren belül a mérések elvégzéséhez.

Egy pár eszköz a sok közül, amit a mérésim során használni fogok:

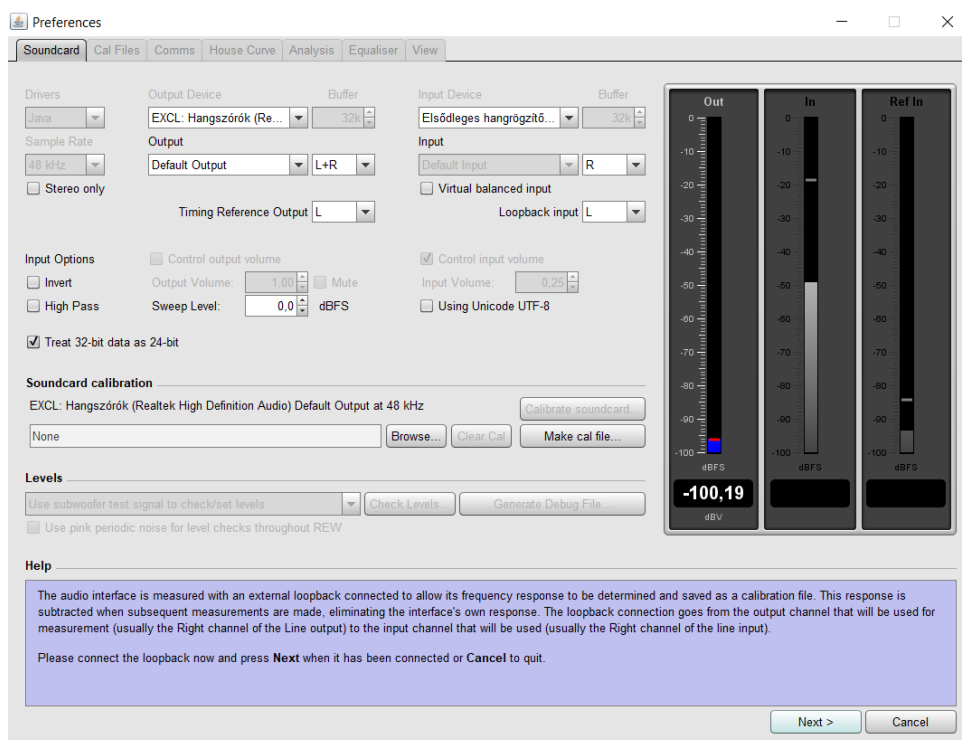
- *SPL Meter*: A szoftverbe beépített hangnyomásszint mérő, ami a hangkártya I/O egységére csatlakoztatott mérőmikrofon által képes hangnyomásszint mérésére.
- *Generátor*: Beépített jelgenerátor, aminek a működése egy digitális oszcilloszkóp működésével egyezik meg, illetve további funkciókkal egészíti azt ki, mint például a felharmonikusok implementálása, és különböző zajokat is képes legenerálni (pl.: Fehér zaj, rózsaszín zaj)
- *Mérések*: A méréseink elvégzésére egy frekvenciamenet lesz a szolgálatunkra. Ez a frekvenciamenet periódusában, és időben, illetve felbontásban paraméterezhető.

A méréseink megkezdése előtt a REW-be beilleszthető a mérőmikrofonunk kalibrációs fájlja, illetve a hangkártyának a kalibrációs fájlja, annak érdekében, hogy a hardverünknek megfelelően minél akkurátusabb méréseket tudjunk végezni. A mérőmikrofon kalibrációs fájlját az általunk választott mérőmikrofonunkhoz kapjuk specifikusan, a hangkártya kalibrációja pedig egy belső méréssel történik, amit a következő képen tudunk kalibrálni:

A hangkártya kalibrálása:

A REW javasolja, hogy használjunk kalibrációs fájlt mind a mérőmikrofonhoz, mind pedig a hangkártyához. A mérőmikrofonhoz a gyártó által felkínált kalibrációs értékeket érdemes használnunk, de a hangkártyához nem tartozik általában a gyártó által javasolt kalibrációs fájl. Szerencsére a REW egy nagyon sokrétű szoftver, és található benne egy olyan alkalmazás, amivel segít nekünk készíteni egy kalibrációs fájlt. A következő lépésekben részletesen leírom, hogy hogyan kell ezt a kalibrációs fájlt létrehozni.

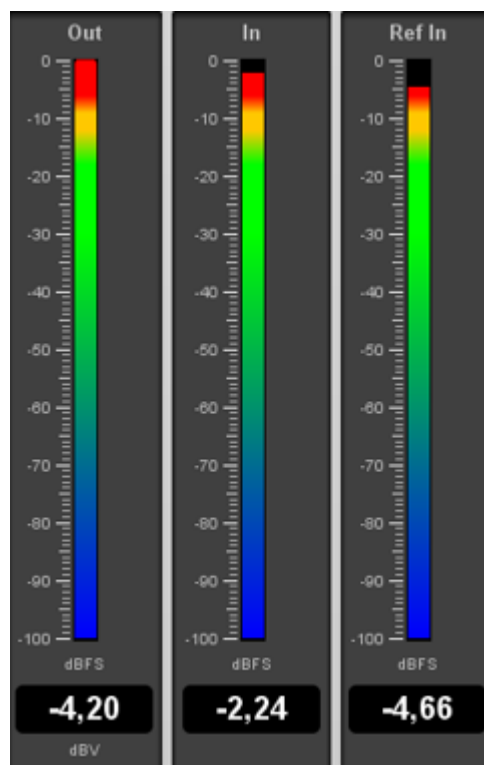
1. **A hurok:** Első lépésként létre kell hoznunk egy külső hurok kapcsolást a hangkártyánkon, annak érdekében, hogy egy kalibrációs fájlt tudjunk generálni, és lementeni a frekvenciaválasz értékekkel, amit a későbbi mérések során is tudunk használni. A kapott frekvencia válasz értékeket a méréseink során kivonja a szoftver, ezzel eliminálva az interfész saját válaszát. A hurkot úgy hozom létre, hogy összekötöm a kimenetet a bemenettel (a 2-es TRS-es Jack kimenetet a 2-es XLR bemenettel).



3.2.1. 1. ábra: A kalibrációs ablak, és a paraméterezés

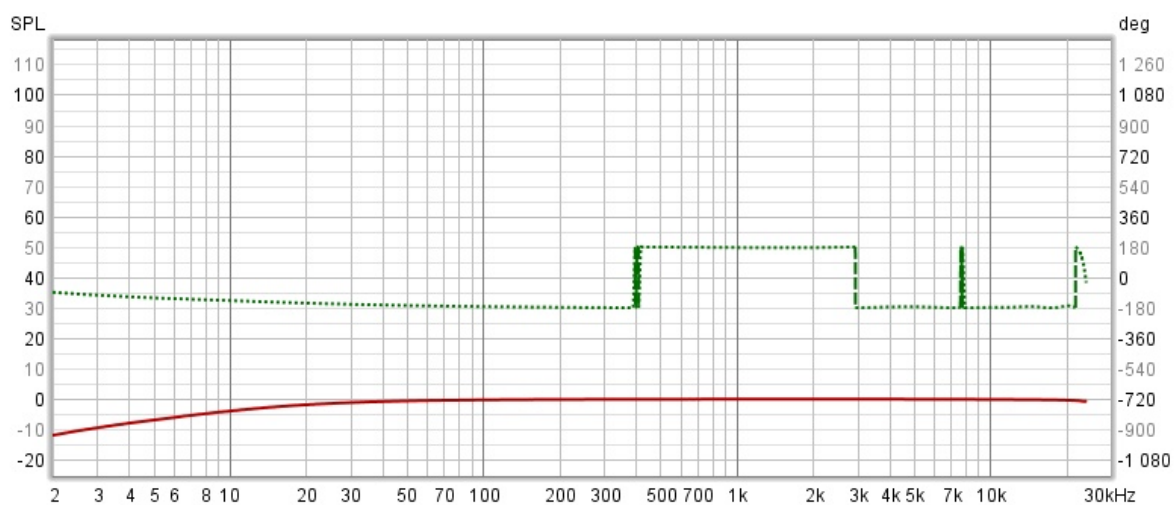
2. **A jel generálása:** Miután kész a hurok, a szoftver generál egy 1 kHz-es jelet, aminek a segítségével betudjuk állítani a méréshez szükséges jelszinteket. A hang az aktuális átfutási jelszint alapján generálódik, érdemes egy relatíve magas értékre beállítani, -12 és -6 dBFS közzé. Az értéket a „Sweep Level” beállítási lehetőséggel tudjuk szabályozni. Továbbá a REW hangerő szabályozónál érdemes 0,5-ös értékre beállítani a kimeneti hangerőt. Ha nem tudjuk állítani a hangerőt szoftveresen, akkor a hangkártyán tudjuk beállítani ezt az értéket, vagy az operációs rendszerünkben.
3. **A jel lejátszása:** Az 1 kHz-es jel miután lejátszásra kerül, a hangkártyán úgy szabályozzuk a hangerőt, hogy a szoftveres visszajelző mutatón a bemeneti jel

és a kimeneti jel közötti érték hozzávetőleg megegyezzen, de maximum 6 dB-el térjen el, és a csúcsérték ne haladja meg a -1dB-t.



3.2.1 2. ábra: A Kalibrációhoz használt ki- és bemeneti értékek

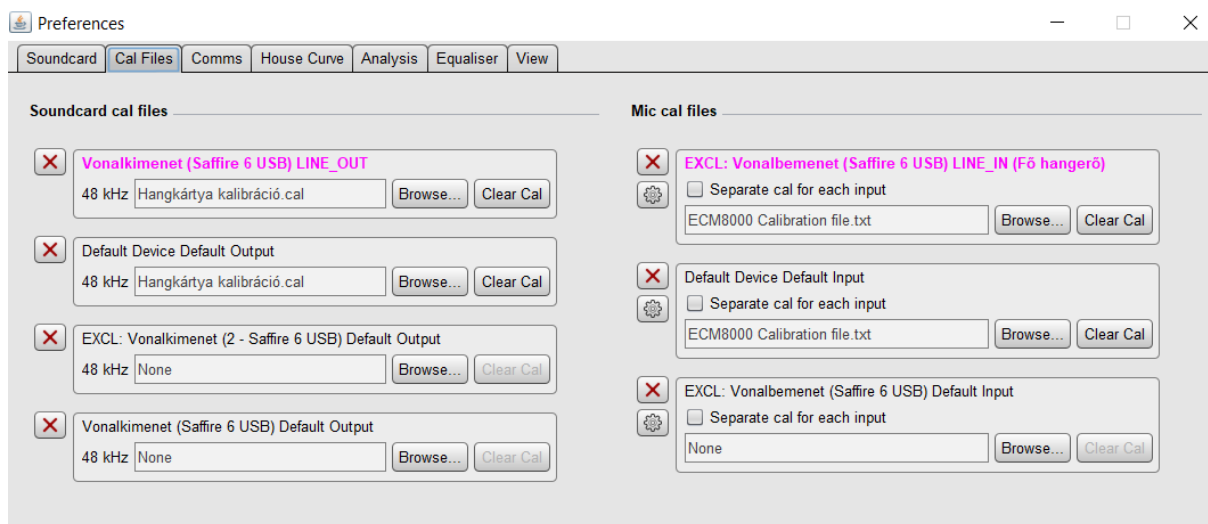
4. **A kész fájl:** Miután beállítottuk az értékeinket, a szoftver végig futtat egy frekvencia menetet, és azalapján elkészít nekünk egy kalibrációs fájlt, amit lementhetünk egy „.cal” kiterjesztésű fájlként, és be is tudjuk illeszteni a szoftverünkbe a Focusrite hangkártyához.



3.2.1. 3. ábra: A kalibrációs fájl frekvenciamenete

A kalibrációs fájl frekvenciamenete kellően kielégítő, hiszen egy lineáris, egyenes visszajelzést kaptunk, pont, mint a mérőmikrofonunk esetében, és ezáltal a méréseinkben is lineáris eredményeket fogunk kapni.

A kalibrációsfájlokat a beállításokon belül egy dedikált fülön tudjuk beállítani, és az esetben, ha megváltozik a ki/vagy a bemeneti illesztőfelületünk, betudjuk az új illesztőfelületre is illeszteni a fájlt.



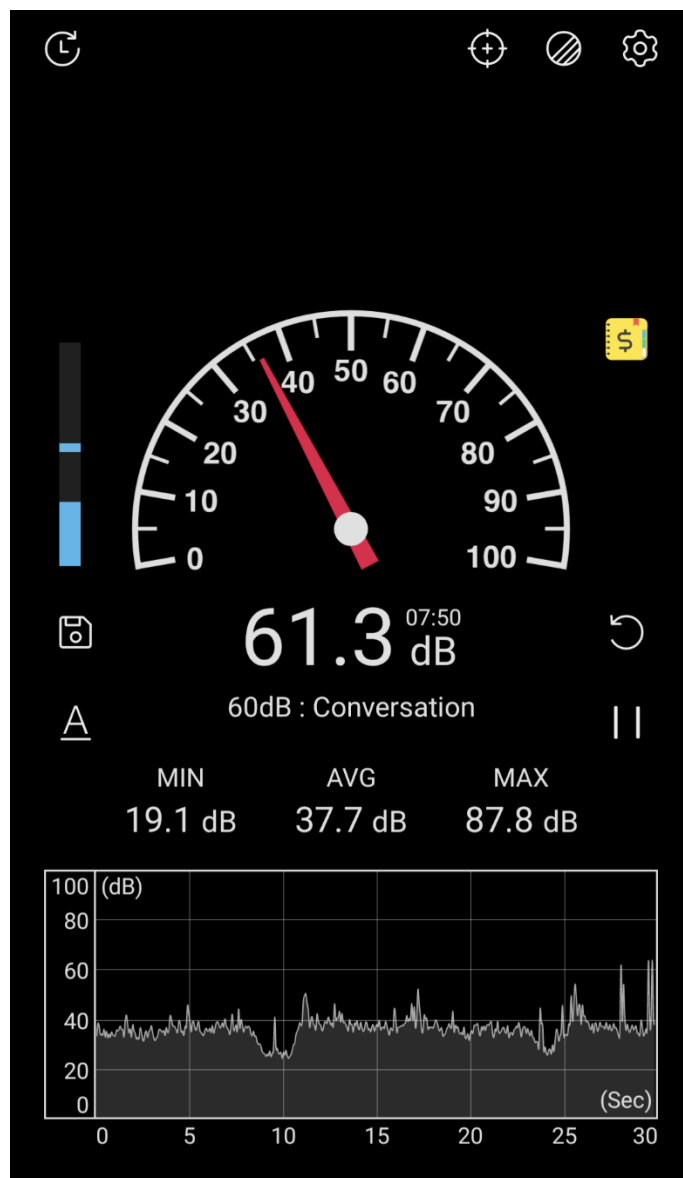
3.2.1. 4. ábra: Ki- és bemenetek, és kalibrációfájl beillesztése

3.2.2 Sound Meter

A REW indításánál/újraindításánál szükséges a programot elsőnek kalibrálni, hogy hiteles mérés eredményeket kapjunk. Ezt a kalibrálást olyan módon tudjuk megtenni, hogy a szoftver belső SPL meter-ét használva elindítunk egy hangnyomás mérést, a szoftver generál egy kalibráló hangot vagy a hangszórókra, vagy a mélynyomóra, és olyan szintre kell beállítanunk a hangerősséget, hogy 75 dB körüli értéket mutasson a szoftver belső SPL meter-e.

De mindeközben a szoftver megkér arra, hogy a hiteles méréshez használjuk egy külső hangnyomás mérőt is. Mivel saját hangnyomás mérő eszköz nem áll a rendelkezésemre, ezért a Sound Meter nevű alkalmazást használom az okostelefonomon. Ez a szoftver megfelelő telefonnal használva elég pontos eredményekre képes, hiszen amikor 75 dB-t mutatott a REW SPL meter-e akkor alig tapasztaltam eltérést a Sound Meter alkalmazásban.

Az alkalmazás egyébként nagyon letisztult, ahogyan megnyitjuk, egyből megjelenik a hangnyomás mérő, és a megjelenő értékeknél ad az életből egy kiragadott példán keresztül, hogy milyen környezetben fordul elő ilyen decibel tartomány. A hangnyomás mérő-óra alatt pedig egy valós időben kirajzolódó grafikon látható, amin az elmúlt fél percben lefutott értékek láthatók.



3.2.2. 1. ábra: A Sound Meter felhasználói felülete

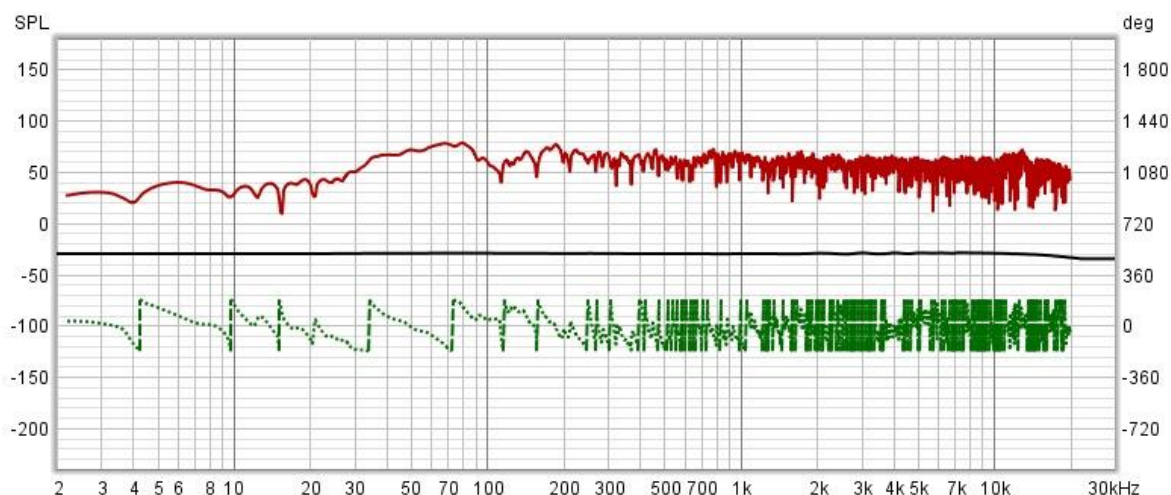
3.3 Mérések

3.3.1 Első próbálkozások és teszt mérés

Az első mérésekhez generáltam egy felharmonikus mentes szinuszos hullámot, 80 Hz-en és az SPL tool segítségével úgy állítottam be a hangerőt, illetve a dBV erősségét, hogy a kalibráló jel 75 dB-en álljon pontosan.

Fontos megjegyezni, hogy a Hangkártyát nem tudtam kalibrálni, hiszen egy hurkot kellene létrehozni a bemenetén, és a kimenten, de ehhez nem voltak megfelelő kábeleim, így csak a mérőmikrofonom volt bekalibrálva.

A dBV -4,20 V-nál volt 75 dB, és ezután tudtam elindítani a tesztméréseket. A teszt méréshez a szoftver automatikusan lefuttat egy frekvenciamenetet 0-20.000 Hz között a kalibrált értékekkel, és hangnyomás, illetve fázis késés grafikonokkal értékelte ki azt a következő képen:



3.3.1. 1. ábra: Tesztmérés.

3.3.2 Mérés elmélet

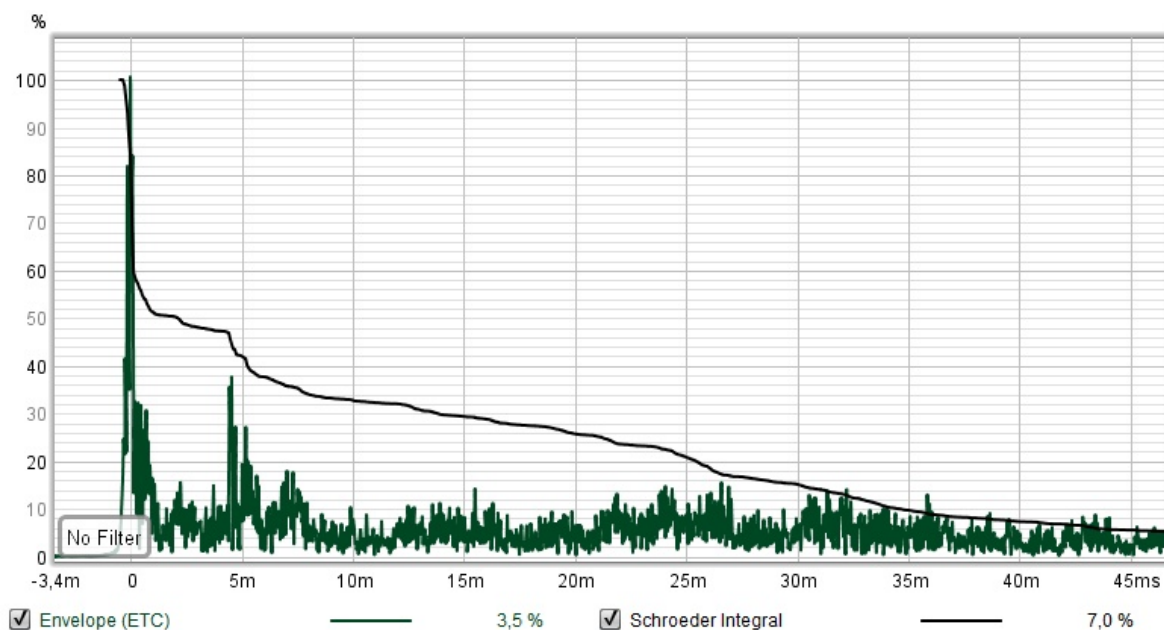
Ebben a fejezetben a különböző méréseket fogom ismertetni, amiket a beltéri, és kültéri méréseimhez használtam fel. Az összes mérésértéket, és különböző grafikonokat mind a REW szoftverrel végeztem el.

- *Hangnyomás függvény:* A hangnyomás mérés egy frekvenciamenet segítségével képes megmutatni, hogy a beállított frekvenciatartományban mekkora a hangnyomás eltérés. Ezt az eltérést egy folytonos grafikonnal rajzolja ki, és egy beépített eszköz segítségével a grafikon bármelyik részéből tudunk további információkat kinyerni:



3.3.2 1. ábra: Mérés során tapasztalt hangnyomásingadozás frekvencia függvényében

- *Impulzus válasz függvény:* A következő fontos függvény, amit a méréseimhez használok az az impulzusválasznak a függvénye. Ez a függvény a frekvenciaválaszt adja meg százalékos arányban, az idő függvényében. Az első kilengés a legnagyobb, 100%-os értéket láthatunk a grafikonjainkon, ez a hangszórókból kibocsájtott hang, az ezután bekövetkező értékek pedig a térből bekövetkező visszaverődéseknek az értékei.



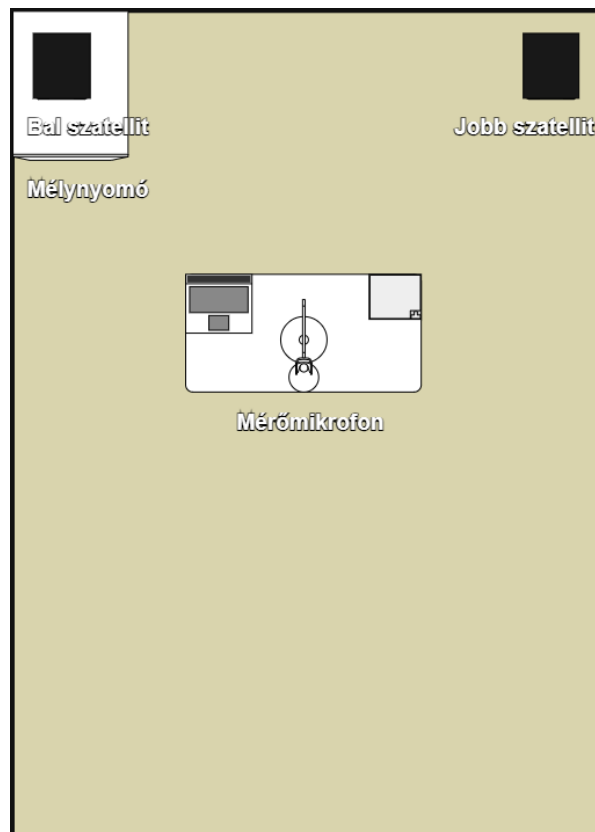
3.3.2. 2. ábra: Impulzusválasz függvény

3.3.3 Beltéri mérések

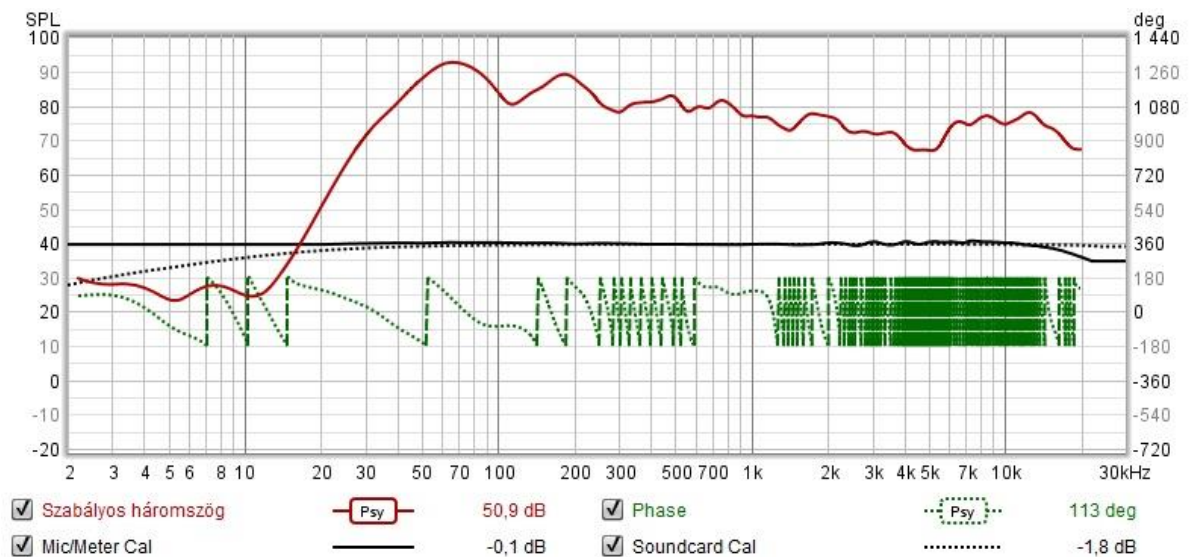
Az első valós méréseimet sikeresen elvégeztem miután mindent bekalibráltam, és beállítottam a helyes paramétereket. A szobában három féle mérést végeztem el, a hangerőt középértékre állítva mind a három mérés esetében.

Az Első mérés:

Az első mérésnél a mérőmikrofont a hangszórókhoz képest a szoba közepén helyeztem el, a szatellit hangszórókkal egyvonalban, úgy, hogy a hangszórók, és a mérőmikrofon egy háromszöget adjon ki. Egyébként az optimális zenehallgatáshoz is ezt az elrendezést javasolják, hogy az ember feje a hangszórókkal egyvonalban egy szabályos háromszöget adjon ki.



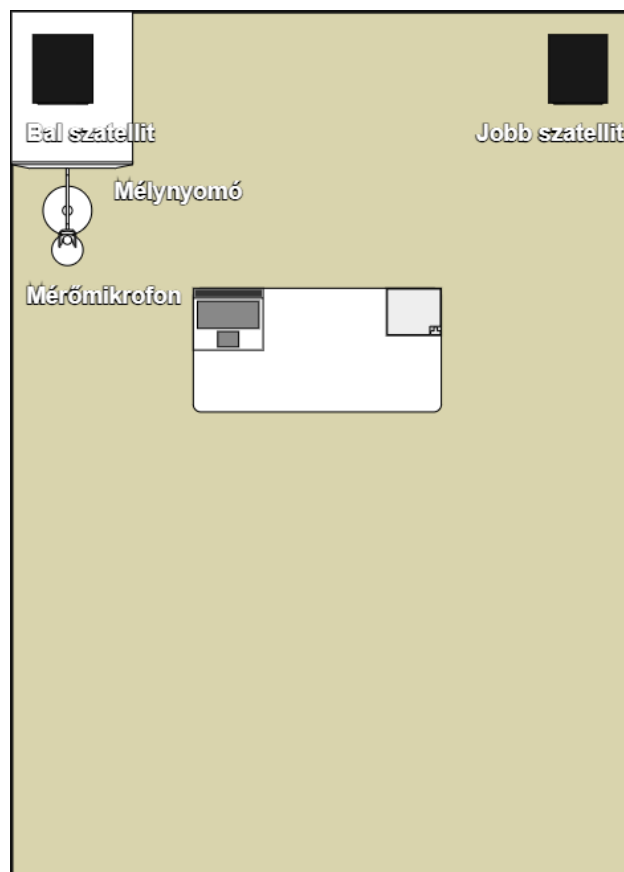
3.3.3. 1. ábra: Méréselrendezés [9]



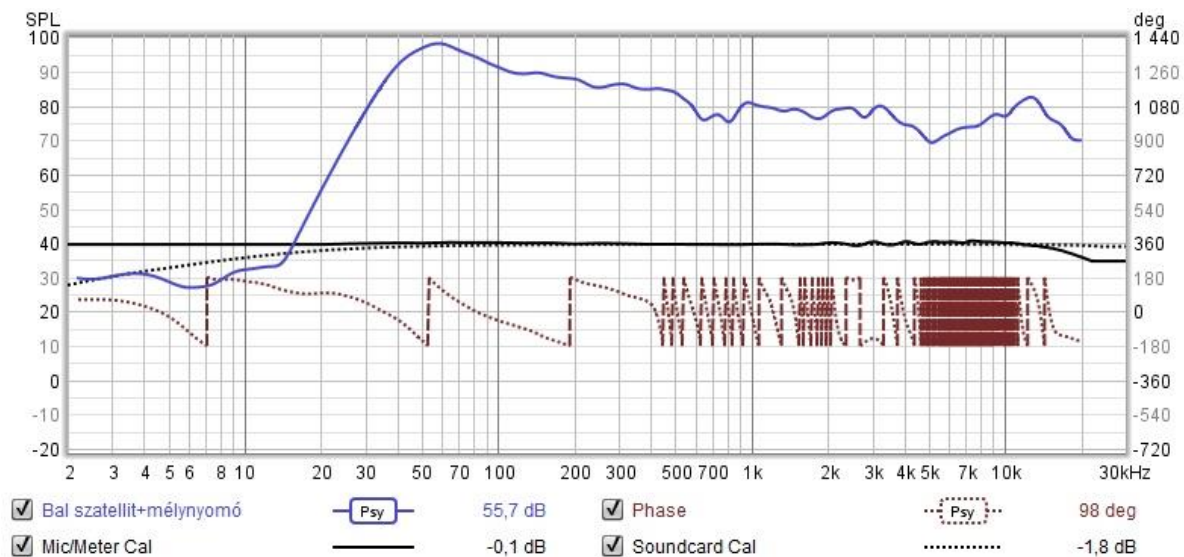
3.3.3. 2. ábra: „A szabályos háromszög mérés”

Második mérés:

A második mérésnél a mérőmikrofont a bal szatellit hangszóró, és aktív mélynyomó elé helyeztem el. Mivel ennél a mérésnél két hangszóró is jelen volt, ezért a mérőmikrofont a két hangszóró közé helyeztem el, olyan módon, hogy a mélynyomótól 10 cm-es távolságra volt a mikrofon, és a mélynyomó tetejével volt egy szintben, a bal szatellit hangszórótól pedig fél méteres távolságban volt a mérőmikrofon, és hangszóró aljával volt egy szintben.



3.3.3. 3. ábra: Méréselrendezés [9]

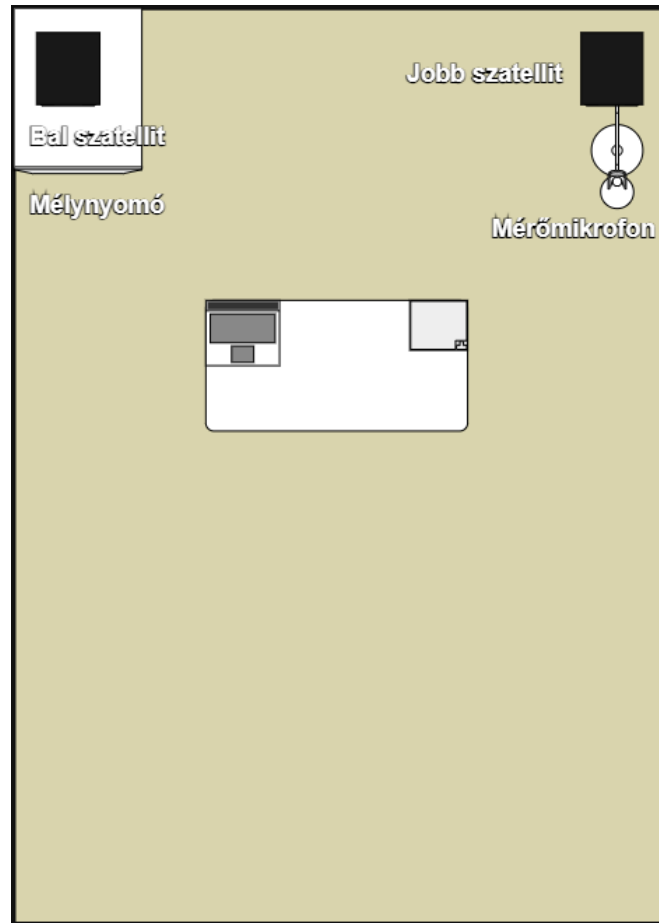


3.3.3. 4. ábra: Bal oldali méréseredmények

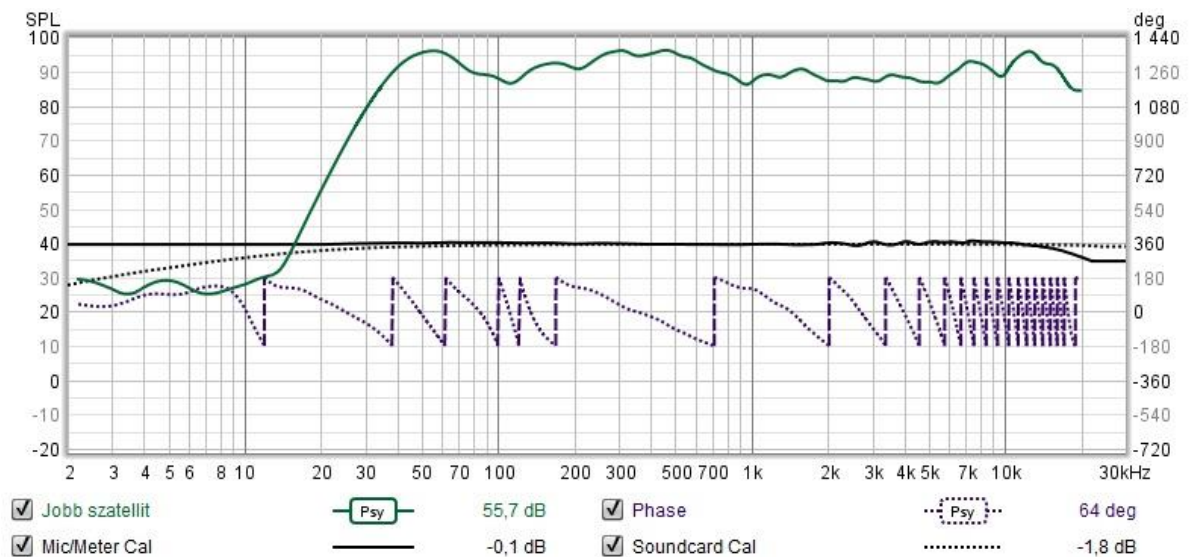
Harmadik mérés:

A harmadik mérésnél a szoba jobbsarkában mértem a jobb szatellit hangszóró elé helyezve a mérőmikrofont. Mivel ebben az esetben csak egy hangszóró volt jelen, ezért a mikrofont a hangszóró két-utas vezérlése elé helyeztem el 5 cm-es távolságra.

A mérési eredményen jól látható, hogy sokkal kevesebb beesést detektált a mérőmikrofon, hiszen ilyen közelségben a hangszóróhoz nem nagyon volt lehetősége a mikrofonnak a visszaverődött hangokat is detektálni, hanem leginkbb csak a jobb hangszóró által kibocsájtott hangokat tudta bemérni.



3.3.3. 5. ábra: Méréselrendezés [9]



3.3.3. 6. ábra: Jobb oldali mérés eredmények

3.3.4 Kültéri mérések

A kültéri méréseket a kert azon részén végeztem el, ahol a hangfalakat úgy tudtam elrendezni, hogy a lehető legjobban elimináljam azt, hogy a visszavert hangok beleszóljanak a mérési eredményekbe. A kert legmagasabb pontjára tettem a hangfalakat, így a hangfalakkal szemben jóformán csak levegő helyezkedett el, természetesen fák, kerítés, és házfal volt a hangfalakkal párhuzamosan, amikről a visszaverődött hangok okoztak fázistolásokat, de amennyire a kert fizikai adottságai engedték, annyira optimalizáltam a méréseket.

A szatellit hangfalakat egyenlő távolságra helyeztem el egymástól, és a mélynyomót a két hangfal közé tettem. Összesen öt mérést végeztem, mind az ötnél máshová helyeztem a mérőmikrofonom, nézzük meg részletesen az öt mérést.



3.3.4. 1. ábra: Méréselrendezés

Első mérés:

Az első mérést azonos elv alapján végeztem el, mint az első beltéri mérést, a szabályos háromszög elvet követve, a hangszórók közé pontosan, és egymagasságba a szatellit hangszórókkal.



3.3.4. 2. ábra: „Szabályos háromszög” mérés

Relatíve szép és egyenletes hangnyomásgörbét kaptam, kevés fázistolással, és néhány meglepő beeséssel.

Mélynyomóhoz közel:

Míg a szobában a mélynyomó az egyik sarokban volt elhelyezve amiatt, mert akusztikailag oda érdekes, ezért nem tudtam külön olyan mérést elvégezni, ahol csak a mélynyomó volt a fókuszban, hiszen fölötte helyezkedett el az egyik szatellit hangszóró is. Ennél a beállításnál volt lehetőségem elvégezni egy ilyen mérést, hiszen a mélynyomó a hangszórók között, a földön helyezkedett el, a mérőmikrofont pedig 5 cm-re helyeztem el tőle.



3.3.4 3. ábra: Mélynyomóhoz közeli mérés

Természetesen ahogyan az várható volt, a hangnyomás az alacsony frekvenciákon a legmagasabb alig detektálható benne fázistolás, és magas frekvenciákon beesik, és rengeteg a fázistolás, mert a szatellitok által kibocsájtott magas hangok jobbról is, és balról is visszaverődnek, és cikáznak.

Harmadik mérés:

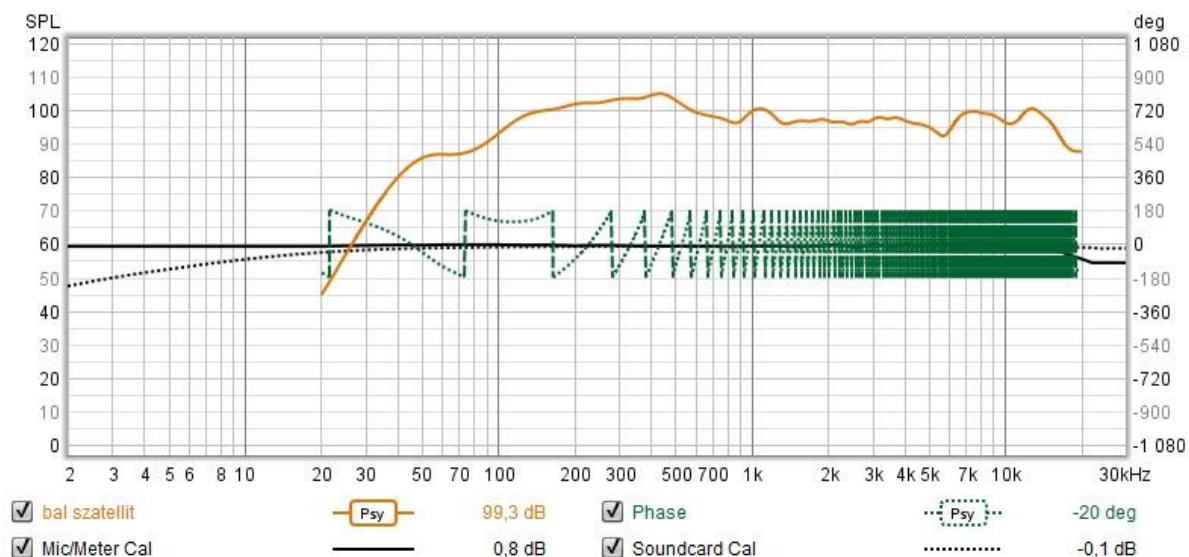
A harmadik mérésnél a mérőmikrofont 5 cm távolságra helyeztem el a jobb szatellit hangfaltól.



3.3.4. 4. ábra: Jobb szatellit mérése

Negyedik mérés:

A negyedik mérésnél a bal szatellit elé helyeztem el a mérőmikrofont szintén 5 cm-es távolságra.

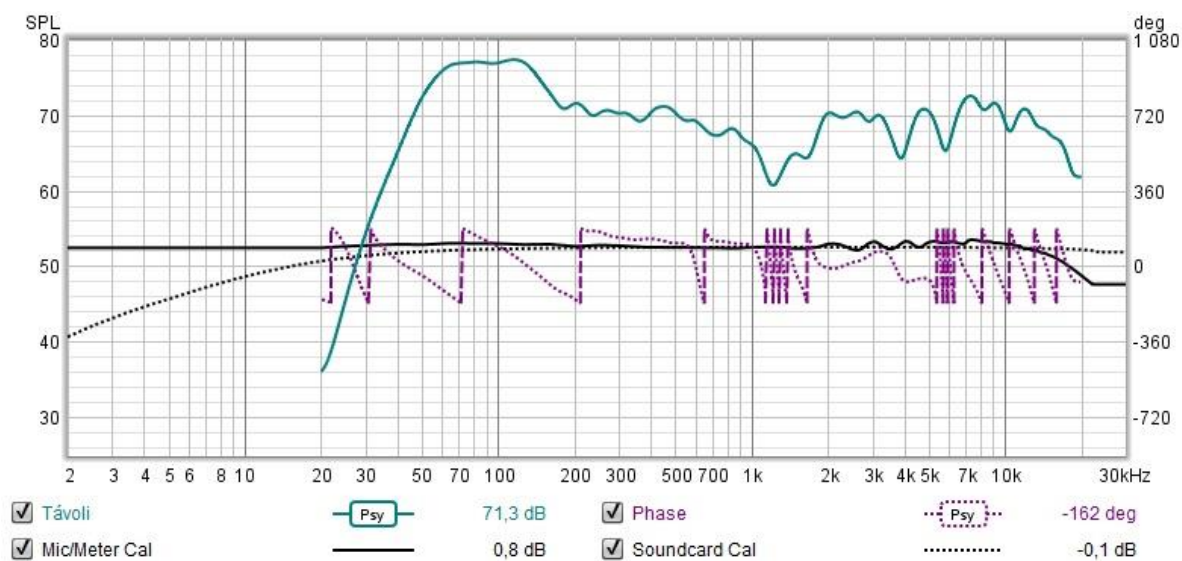


3.3.4. 5. ábra: Bal szatellit mérése

Egy meglepően kiegyenlített hangnyomást kapunk azoktól a frekvenciáktól, ahol a szatellithangszóró szól, viszont szinte egyből olyan mértékben besűrűsödik a fázistolás, hogy arra egy logikus magyarázat van, a közel levő fa, és kerítés nagyon intenzíven verte vissza a hangokat, és a mérőmikrofon legalább ilyen intenzíven detektálta azokat.

Ötödik mérés:

Az ötödik mérésnél a domb tetőtől lesétáltam öt métert, így a hangszóróktól 8 méter távolságra helyezkedtem el a mérőmikrofont, viszont a vertikális különbség miatt a mélynyomóval voltam nagyjából egy magasságban.



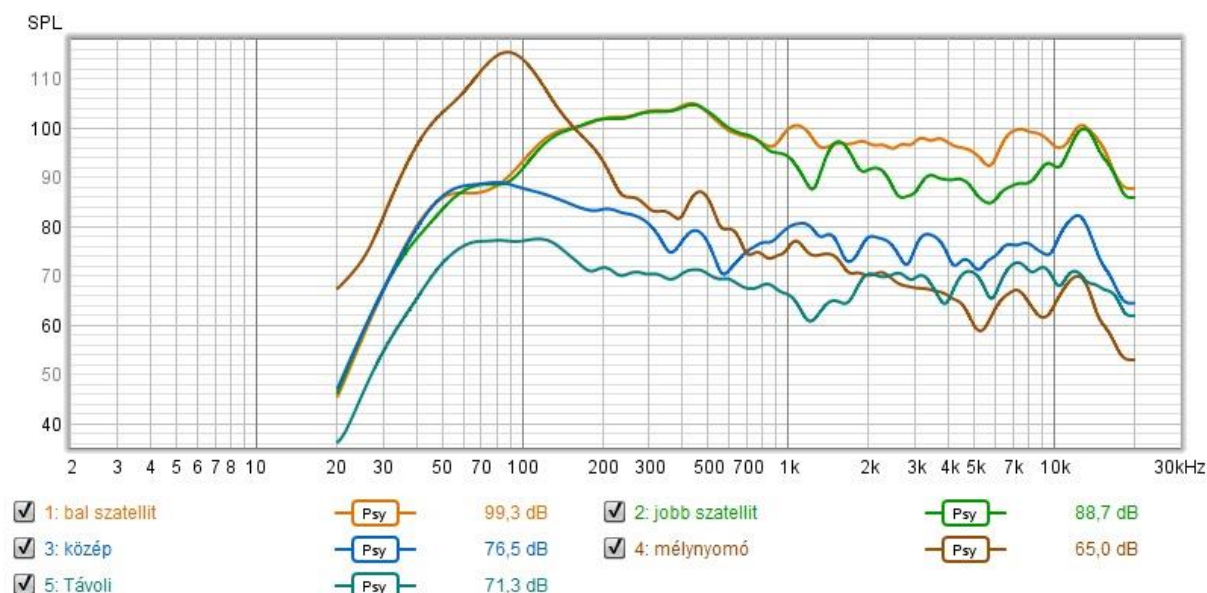
3.3.4. 6. ábra: Távoli mérés

3.3.5 Kültéri és beltéri mérések összehasonlítása



3.3.5 1. ábra: A beltéri mérések hangnyomása

A beltéri mérésekre nagyjából kiegyenlített eredményeket kaptam, a jobb szatellit mérésénél a közép, és magas tartományoknál kicsit magasabb lett a hangnyomás, hiszen itt tartottam a hangszóróhoz legközelebb a mérőmikrofont. De mivel ugyanabban a helyiségben végeztem el az összes mérést, ezért nincs számottevő különbség a végeredmény között.



3.3.5 2. ábra: A kültéri mérések hangnyomása

Ahogy azt a grafikon is mutatja, itt már sokkal markánsabb eltéréseket lehet tapasztalni a különböző mérésbeállítások között, ennek az a fő oka, hogy a visszavert hangok hiánya végett, nem állandó a hangnyomás, mint egy kis térben, hanem a mérés

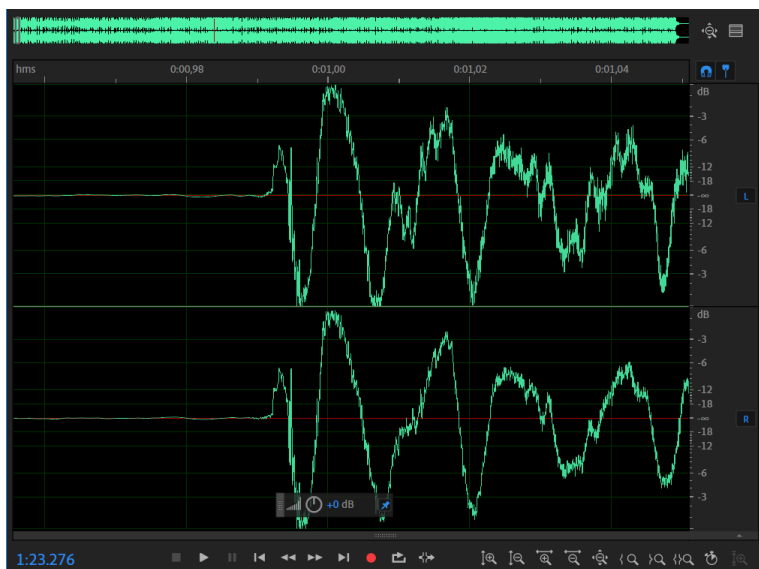
beállításának megfelelő hangnyomás kerül felvételre. Ezért magas a hangnyomás alacsony tartományban amikor a mélynyomó elé helyeztem a mikrofont, viszont 200 Hz környékén jelentősen beesik. A bal és a jobb szatellit mérései relatíve megegyeznek, a távoli mérésnél a legalacsonyabb a hangnyomás, a szabályos háromszög mérésnél pedig a legkiegyenlítettebb.

4 Hangtompítás

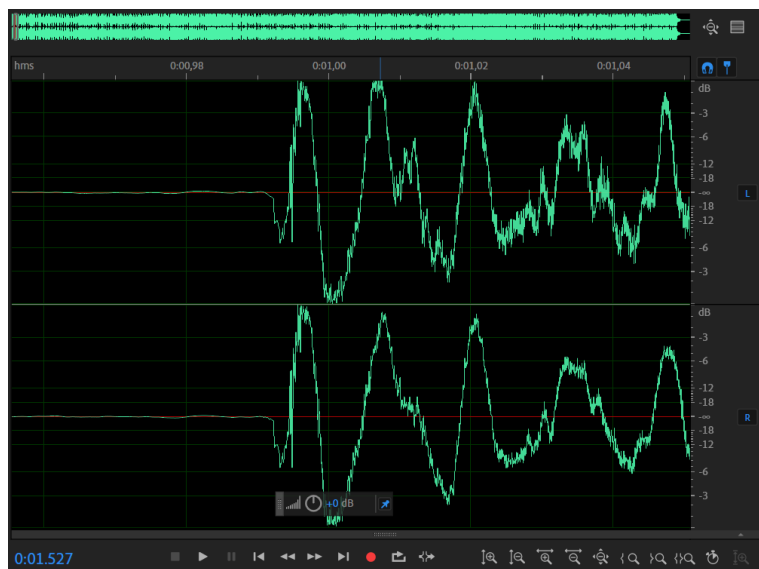
Az eddigiekben elvégzett kültéri méréseim végre megalapozták azt, hogy ne csak egy távoli elméleti síkon tudjak rálátni a hangtompítás mivoltára, hanem közelebbinek tudjam érezni magamhoz, hogy egy napon megtudjak építeni egy olyan rendszert, ami valóban effektíven képes arra a fajta hangtompításra, amiről jelenleg álmodozom. Ebben a fejezetben taglalni fogom, hogy milyen szoftvert használtam a hangtompítás valóságának a bizonyítására, és megmutatok egy teoretikus alkalmazást szabadtéri hangtompításra.

4.1 A hangtompítás alapjai inverz hanggal

A szakdolgozat elején már felvettem a hanghullámok kioltási lehetőségét másik hangforrásból érkező inverz hanggal. Most létrehoztam egy tesztet meglévő hangfájlokból, hogy hogyan is néz ki az, ha egyidejűleg ugyanazon hanghullámok kerülnek lejátszásra. Ehhez a teszthez az Adobe Audition 2022-es szoftvert használtam, amit hang vágásra fejlesztettek, és rengeteg eszköz áll rendelkezésre a hang modulálására. Az egyik ilyen eszköz a hang invertálása, ami pont annyit csinál amennyit az eszköz elnevezése sejtet: Megfordítja a hanghullámokat, így az eredeti hangforrás tökéletes inverzét kapjuk meg, a következő képen:



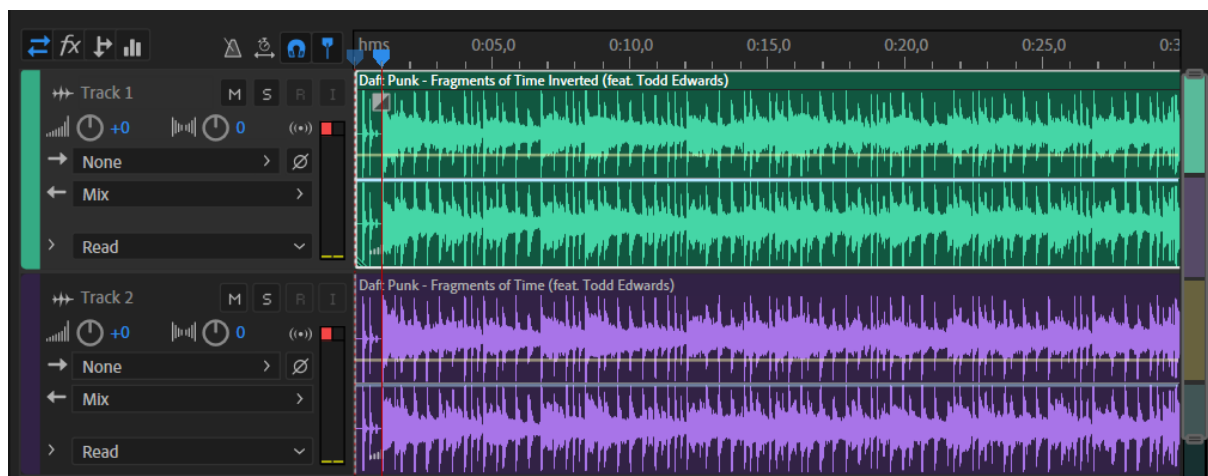
4.1 2. ábra: Részlet az eredeti audio hullámformájából



4.1. 2. ábra: Részlet az inverz audio hullámformából

Az ábrákon jól látható, hogy az eredeti hanghullámmal semmi más nem történik, csak egy 180 fokos fázistolás, ami azt eredményezi, hogy lejátszva az inverz hangfájlt, ugyanúgy fog önmagában szólni mintha az eredeti lenne, mert a fülünk nem tudja önmagában detektálni azt, ha a hullám nulla fázisból indul, vagy egy fél fázissal hamarabb vagy később.

Viszont sokkal érdekesebb, és izgalmasabb dolog történik abban az esetben, amikor az eredeti, és az inverz hanghullámot egyidejűleg játszom le. Szerencsére erre is van mód az Adobe Audition-ben, hiszen bevan építve egy olyan funkció, ahol egyidejűleg több sáv lejátszására van lehetőségem, ez a funkció „Multitrack” funkciónak van elnevezve:



4.1. 3. ábra: A „Multitrack” funkció használata

A kapott hanganyagot szoftveren belül is le lehet játszani, de ki is lehet exportálni. Miután kiexportáltam, és lejátszottam a kapott hanganyagot, a várt eredményt kaptam: nem volt semmilyen hallható hangja a hangfájlnak, hiszen összeadva a fájl eredeti hangját az inverz audiofájl hangjával, a hullámok tökéletes módon kioltották egymást.



Daft Punk Fragment
of Time Kioltott 2.0.m4

4.1. 1. fájl: A „kioltott” hangfájl

4.1.1 Az inverz hang implementálása valós időben

Az előző pontban ugyan teljes mértékben betudtam bizonyítani a feltevésém, ám ahhoz, hogy ezt egy szabadtéri rendezvényen valóban használni lehessen, a hangok invertálása, és kioltása valós időben kell, hogy történjen.

Ehhez még egy nagyon fontos hardver kell, hogy a rendelkezésünkre álljon, hogy valóban megtudjuk oldani a hangok kioltását valós időben. Erről a hardverről eddig nem esett szó a szakdolgozatomban, mert a méréseket enélkül is el tudtam végezni, viszont zenei rendezvényeknek egy elengedhetetlen kelléke egyébként is. Ez a hardver a keverőpult. Külön nem térnék ki arra, hogy egy specifikus keverőpultot bemutassak, mert ami itthon a rendelkezésemre áll, az egy klasszikus Allen&Heath Xone 62-es teljesen analóg keverőpult, ami zenélésre tökéletes, viszont egy nagy szabású rendezvény lebonyolítására nem az. Erre a célra olyan keverőpultokat használnak, aminél legalább 8/16 digitális-és/vagy analóg be-és kimenet áll a rendelkezésünkre, és megannyi féle vezérlési és egyedileg paraméterezhető beállítás, hogy az adott rendezvényre specifikusan összeleghessen hangolni a PA rendszerünket a kívánt hangkép elérés érdekében.

Az ilyen professzionális keverőpultokban elérhető az a két funkció, ami nélkül a hangkioltásunkat valós időben nem tudnánk végrehajtani, kivéve, ha az összes hardvert mi magunk tervezzük, és építjük meg:

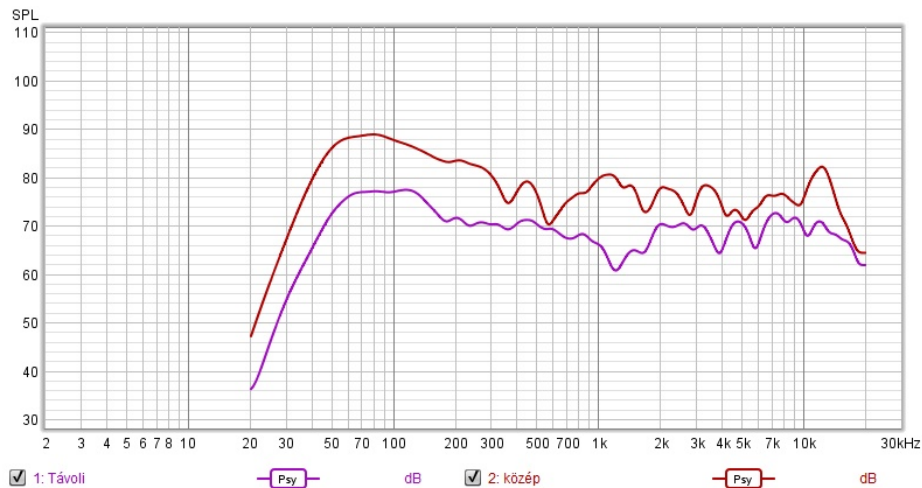
- *Fázis inverter*: Nincs más dolgunk, minthogy azon csatornán, amelyre a tompítóhangfal van csatlakoztatva kiküldjük a főhangszórónak a hangjelét, majd beállítsuk rajta a fázis inverter opciót, annak érdekében, hogy a tompítóhangszórón a fázisfordított hangjel jelenjen meg.
- *Hang késleltetés*: Ezután már csak a késleltetés mértékét kell beállítanunk annak függvényében, hogy a tompítóhangszórónk milyen messze van elhelyezve a fő hangszórótól. Erre

segítségünkre tud szolgálni a hangsebesség számítása, illetve az impulzusválasz függvény, amit a méréseim során már bemutattam, és nagyobb részletességgel a következő pontban mutatom be, ahol a hang kioltást lépésről lépésre ismertetem.

4.2 A hang kioltása inverz hanggal

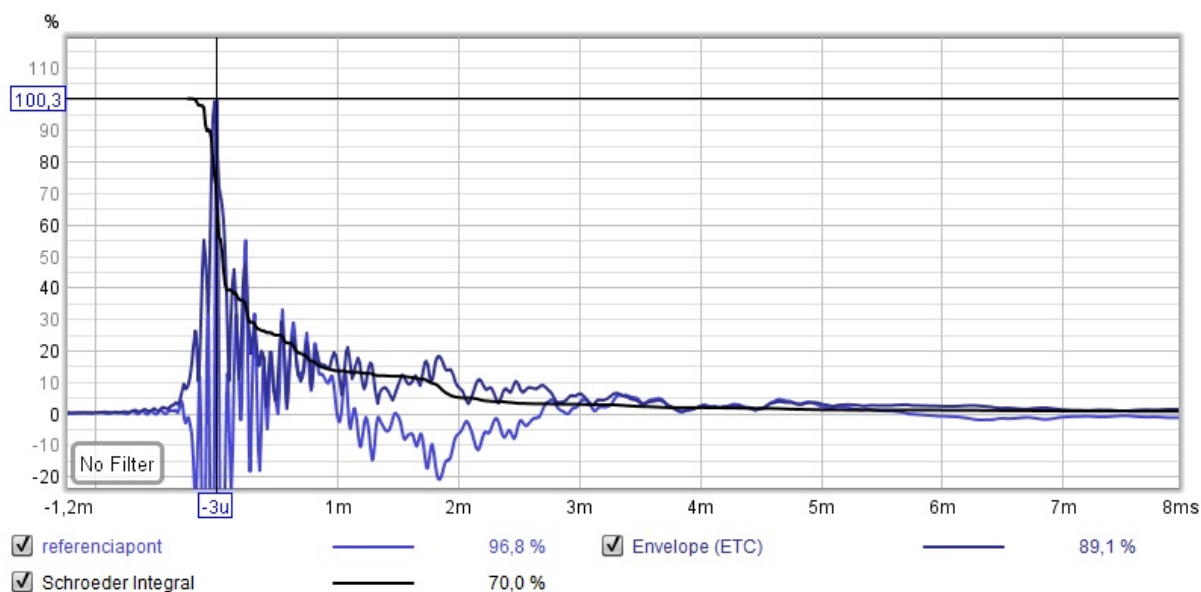
Mostanra eljutottam oda, hogy minden adott ahhoz, hogy hanghullámot hanghullámmal képes legyek kioltani. Nézzük meg, hogy a felállított tézisem alapján hogyan is lehetne ezt a valóságba átültetni:

1. *Az első lépés, az elsődleges hangszóró beállítása:* A szabadtéren kívánt módon elhelyeztem egy hangszóró rendszert. A hangszóró rendszer jobb és bal hangszóróját kimértem külön-külön, hogy meglegyenek a referencia értékeim a hangnyomásukról, és az impulzusválaszokról. Az impulzusválaszuk 0 ms-nál kell, hogy alakuljanak, hogy a későbbi méréseinkhez ezek legyenek a referencia értékek, mert úgy könnyebb kalkulálni.
2. *Második lépés, a tompítóhangszóró beállítása, hangnyomásmérés:* Válasszunk ki azt a térbeli pontot, ahonnan szeretnénk, hogy a hangtompítás megkezdődjön. Ezen a ponton elkell végeznünk egy hangnyomás mérést, úgy, hogy továbbra is az eredeti hangforrásunkat mérjük. A kültéri méréseim jól megmutatták, hogy a hangszórótól minél távolabbi méréseket végeztem, a hangnyomás annál jobban csökkent, a hangnyomás mértékének a csökkenésével megfelelően szükséges beállítani a hangerejét a tompítóhangszórónak. A következő ábrán jól megkülönböztethetőek a méréseredmény különbségek, ez egy jó kiindulópont, hogy mennyivel alacsonyabb hangerőre kell paraméterezni a tompítóhangszórót. Illetve itt hozzátenném azt a fontos tényezőt is, amit a szakdolgozat második fejezetében taglaltam a hangtompítással kapcsolatban, ami segítségünkre lehet a helyes paraméterezésben, miszerint „minden egyes alkalommal, amikor megduplázódik a távolság a hangforrástól 6 dB-el csökken a hangnyomásszint”.

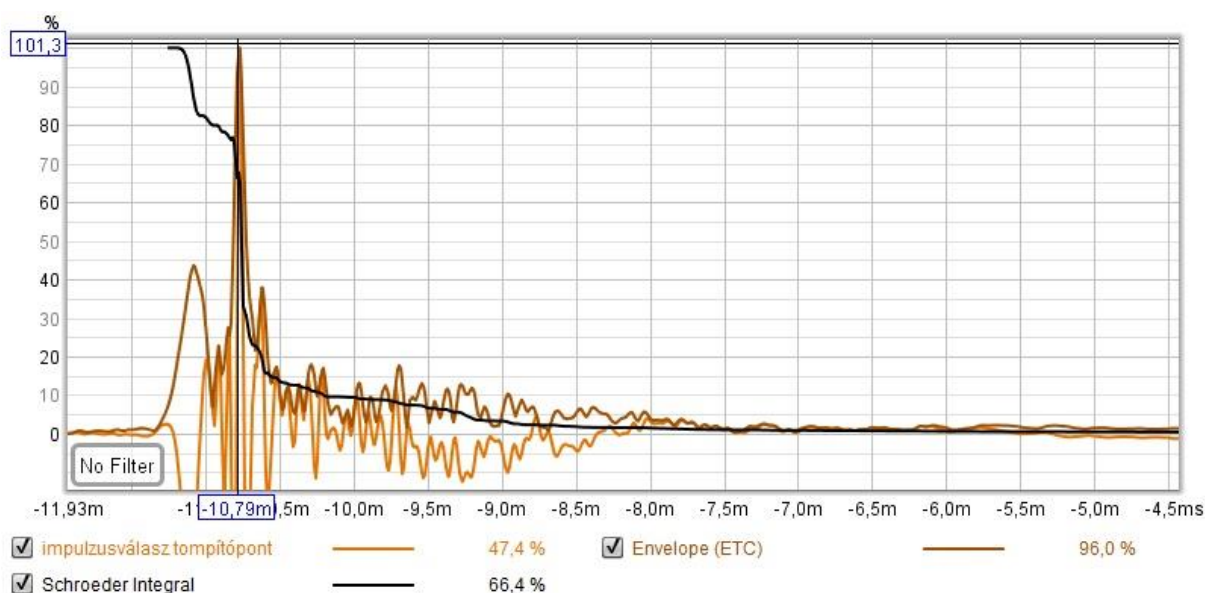


4.2. 1. ábra: Hangnyomás összehasonlítás

3. *A tompító hangszóró beállításának folytatása, impulzusválasz mérés:* Miután megfelelő hangerőre beállítottuk a tompítóhangszórót, még egy fontos mérést kell elvégeznünk: Az impulzus válasz mérést. Az impulzus válasz méréseink segítségével tudjuk azt megállapítani, hogy mennyi idő alatt ér oda a hang az eredeti hangforrásból, azaz, hogy mennyi idővel később kell, hogy elinduljon az inverzhang a tompítóhangszóróból. Nyilván ennek a hangtompításnak csak akkor van értelme, ha az eredeti szinuszhanghullámok egyidejűleg szólalnak meg a 180 fokkal fázistolt hanghullámokkal, máskülönben a hangok kioltása helyett egy kellemetlen zajösszetételt fog eredményezni az eredeti hangforrásunk, és a tompító hangforrás. Az impulzusválasz méréseinket úgy tudjuk elvégezni, hogy a jobb, és a bal hangszórónál elvégzett 0 ms-os impulzusválasz méréseinket beállítjuk referenciaértéknek, majd a kijelölt ponton is elvégezzük egy impulzusválasz mérést úgy, hogy továbbra is a fő hangszórónk bocsájtja ki a hangokat. A méréseredményünk megtudja mutatni, hogy mennyi idővel eltolódva érkezett meg a hang arra a pontra, ahová a tompítóhangszórónkat kívánjuk elhelyezni.



4.2. 2. ábra: Impulzusreferenciamérés

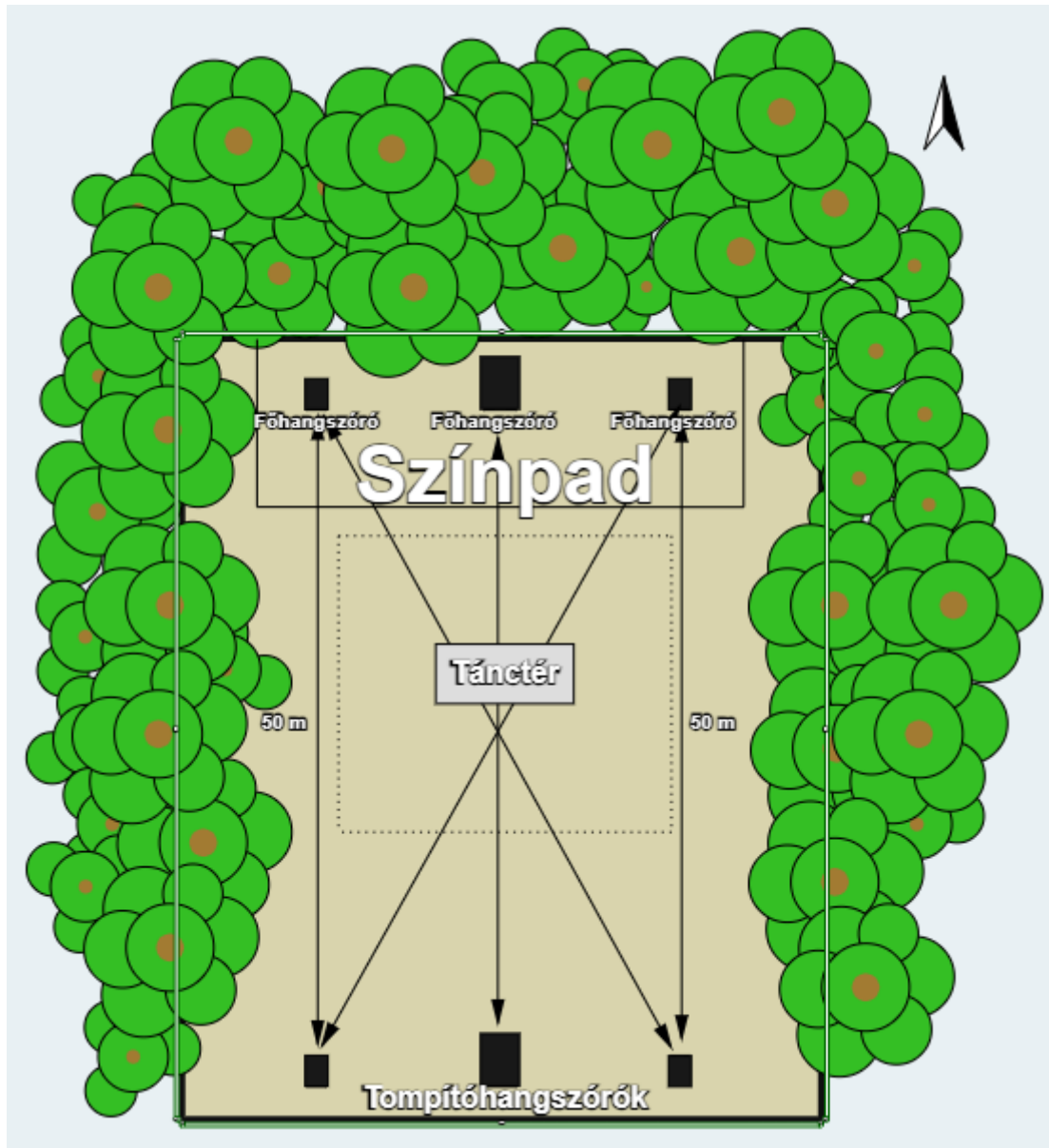


4.2. 3. ábra: Impulzusmérés a tompítópontban

4. **Konklúzió:** A referencia mérésünk a nulla időpillanatban van, a tompítóponthoz pedig 10,8 ms-al később érkezett meg a hang. Ha ezzel a késéssel paraméterezzük fel a tompítóhangszórót, akkor elméleti síkon, ha a tompító pont után megállunk, és elkezdünk hallgatózni, akkor biztosan redukált hangerőt fogunk érzékelni ahhoz képest, hogy mit hallanánk, ha nem lenne ott a hangszóró. Sajnos ezt a mérést még nem volt alkalmam letesztelni, ezért a következő pontban fogok beszélni még kicsit részletesebben arról, hogy hogyan lehetne megvalósítani egy ilyen elrendezést.

4.3 Egy lehetséges szabadtéri rendezvény megkonstruálása

Adott a következő elrendezés egy elméleti szabadtéri rendezvényre:



4.3 1. ábra: Konceptcionális elrendezés egy szabadtéri rendezvényhez [9]

Képzeljünk el egy völgszorost, aminek a hegy falához érve egy szép fákkal benőtt oázisban találjuk magunkat. A fák, és a hegyek falai szépen lefognak a hangot az északi, nyugati, és keleti irányokba, de a völgy tovaterjed a déli irányba, és a „tölcsérelrendezés” végett nagyon erőteljesen viszi tova a hangot. Ennek érdekében tompítóhangszórókat helyeztem el a táncterttől megfelelő távolságra, és az ellentétes irányba irányítva őket, hogy ne zavarjon be oda, ahol csak a zenét szeretnénk hallani, viszont azon irányba, amelyik irányba már nem kívánatos a hang terjedése, rögtön képes legyen a hangkioltásra.

Az előző fejezetekben mivel a technikai háttérét teljes mértékben ismertettem a hangkioltásnak, ezért most itt részleteiben már nem térnék ki rá, csak amennyiben szükségeltetik. A tompítóhangszórókat 50 méterre helyeztem el a főhangszóróktól. Természetesen az impulzusválasz mérés fogja megadni a pontos választ, de az egyszerűség kedvéért számoljunk a hangsebesség alapértékével, ami 343 m/s. Az így kapott értékünk 145 ms-nak felel meg, így a keverőpulton a tompítóhangszórókat ezzel az értékkel paraméterezzük fel. A finomhangolás úgy is egy valós alkalmazásnál fog kiderülni, mert hiába kalkulálunk ki mindent, mérünk meg túlpontosan, a természetes közegekben úgylis mindig van valami féle változó, amit se a szoftveres mérések, se a matematikai képletek nem tudják meghatározni 100%-os pontossággal, ezért fontos, hogy addig kell kísérleteznünk, ameddig meg nem kapjuk a kívánt hatást, ami ebben az esetben az, hogy ha beállunk a tompított hangszórók után, akkor a már összeadódott, kioltott hanghullámokat „halljuk”.

5 Fejlesztési lehetőségek

5.1 A fázis lekövetése

Az első fejlesztési lehetőség, ami az eszembe jutott a fázistolással kapcsolatos. A REW szoftverrel elvégzett hangnyomás méréseimen jól látható volt, hogy egy szimpla frekvenciamenet leképezése is rengeteg fázistolással, és fázisváltással járt. Ahhoz, hogy egy nagyon effektív hangkioltó rendszert létre tudjunk hozni, elengedhetetlen az, hogy a fázistolásokat is valós időben tudjuk monitorozni, hogy a tompítóhangszórók is ugyanakkor következzen be az esetlegesen létrejövő fázistolás, vagy fázisfordítás, amikor a főhangszórónknál is bekövetkezik.

Ez a megoldás első hangzatra az amúgy is elég komplex problémát még zavarosabbá teszi, de megfelelő fejlesztési módszereket implementálva a jövőben egyáltalán nem elképzelhetetlen, hogy létrehozható legyen egy olyan rendszer, ami erre is képes.

5.2 Nyitott tér, több tompítás

A szabadtéri rendezvény, amit felvázoltam az előző fejezet végén, egy relatíve nézve egyszerű rendszer volt, hiszen a fák, és a hegyoldal végett a tompítást csak a déli irányba kellett elvégeznem. De mi van akkor, ha egy olyan rendezvényhelyszín áll a rendelkezésünkre, ahol több, vagy esetlegesen minden irányba szeretnénk kioltani a hangot?

Nem elképzelhetetlen egy olyan összehangolt rendszer, ahol megfelelően paraméterezve létre tudunk hozni egy olyan installációt, ahol több irányba is aktívan működnek tompítóhangszórók. Viszont egy ilyen rendszer ismételten exponenciális módon növeli meg az alapszisztem komplexitását. Hogyan lehet felparaméterezni a sok tompítóhangszóróból álló rendszert, hogy az ne hozzon a tánctéren és a színpadon létre hang zúr-zavart? Hogyan hangoljuk össze a tompítóhangszóró rendszert, hogy a rajtunk kívül álló térbe ne a tompítóhangszórókból szóló hangzavar okozza a káoszt, hanem finoman összelegyen hangolva a rendszer mind a többi tompítóhangszóróhoz, mind pedig a főhangszóróhoz?

Ez a terület is egy nagyon izgalmas fejlesztési lehetőséget kínál a fennálló problémára, remélem egy nap lehetőségem nyílik egy ilyen rendszer megépítésére, és tesztelésére.

5.3 Zajszennyezés és az állatvilág

Az utolsó fejlesztési lehetőség, ami az eszembe jutott az nem az embereket érinti első sorban, akik ugye képesek kifejezni a nemtetszésüket, ha valami zavarja őket, hanem az állatvilág, ami az emberi cselekedeteknek néma elszenvedője.

Bizony, tetszik vagy sem az állatvilág nagyon megsínyli a fesztiválszezont. Amikor az emberek a legönfeledtebben vonulnak ki a természetbe mindenféle zenei fesztiválokra, az őket körülölelő állatvilág hirtelen sokkal kevésbé lesz önfeledt, és sokkal kevésbé tud odafigyelni az erdő neszeire, ami elengedhetetlen az állatvilágban, hogy egyáltalán lehetősége legyen betájolnia önmagát.

Ezért egy nagyon érdekes fejlesztési lehetőséget kínál egy olyan rendszer implementálására, ahol valahogyan azokat a rezgéshullámokat is sikerül eliminálnunk, ami nem hagyja a hangot tovaterjedni a földben. Ahogyan a szakdolgozatom elején már említettem, ez lehetséges olyan módon, hogy a hangfalainkat rezgéscsillapító panelekre helyezzük el, így a földön nem, -vagy csak redukáltan tud a hang terjedni. De jelenleg ezt a problémát próbáljuk meg szemlélni az állatvilág szemszögéből. Gondoljunk bele mennyi bogarat, és rovar zavar össze, amik mindennapjaikat a közvetlen föld felszíne alatt töltönek, és hogy ezen rezgéscsillapítás mennyivel tudná redukálni az ilyesfajta élőlények mindennapjait egy zenei fesztiválon.

Még egy fejlesztési lehetőség jutott az eszembe, az pedig egy olyan rendszer implementálása, ahol azokat a rezgéshullámokat próbáljuk meg eliminálni, amik leginkább vertikális síkon terjednek szét a környezetünkbe. Egy ilyen rendszer a madarak védelme érdekében nyújtana kézenfekvő megoldást. Gondoljunk bele azokba a zenei rendezvényekbe, amik hatalmas stadionokba vannak kialakítva. A stadionok oldalfalai viszonylag képesek lefogni a hatalmas és összetett hangrendszer rezgéshullámait, mégis nagyon messzire képesek a hanghullámok tovaterjedni, mert vertikális síkon semmi nem áll az útjukba. Ha a tompítóhangszórókat megfelelő módon el tudnánk helyezni a stadion tetején levő állványzatra, akkor elég nagy hangtompítást tudnánk elérni a légtérben.

Ezek a fejlesztési lehetőségek ma még csak távoli álmok, de egy napon, ha már a technológia vívmányokról alkotott képünket nem korlátozzák a jelen körülményei, elképzelhető, hogy sokkal nagyobb teret nyerhetnek.

6 Összefoglalás

Azt kell, hogy mondjam, hogy bármennyire is összeszedettnek érzem a szakdolgozatomat, és a szakdolgozatomban felvonultatott tematikát, úgy érzem, hogy ez a szakdolgozat maximum egy hosszú kutatómunkának az alappillére. Ez mondjuk inkább egy pozitívum, mint egy negatívum, de amikor nekiálltam a tézisem megírásának, akkor az lebegett előttem, hogy ha a végére érek akkor mindenre kapok választ, amire keresek. Ehelyett még több kérdést találtam a végére, de végül is pont ez a szépsége a természettudományoknak, nem? A végeláthatatlanságig lehet folytatni a kutatását a legapróbb dolgoknak is.

Mindenesetre szépen felépítettem a tematikát, a hangkioltás elméleti felvetésétől kezdve, a hang fizikai és anatómiai ismertetésén keresztül áttértem a hangszórók és mikrofonok ismertetésére, majd ismertettem a mérésekhez felhasznált hardvereket, szoftvereket, végeztem megfelelő mennyiségű beltéri, és kültéri mérést, bizonyítottam a hangkioltást inverz hanggal, és megkonstruáltam egy lehetséges szabadtéri rendezvényt, aktívan működő tompítóhangszórós rendszerrel.

Nos így már nem is hangzik olyan rosszul, úgyhogy nem maradt hátra (egyelőre) más, mint hogy megköszönjem Sándor Tamásnak ezt a lehetőséget, hiszen a közös ötletelés nélkül nem tudtam volna elindulni magamtól egy olyan irányba, hogy ilyen szépen kitudjam kerekíteni a szakdolgozatom.

7 Abstract

To summarize my project and my thesis, I have to say, I came much closer to understand how sound attenuation works. In the beginning, I just had a far idea, that theoretically you could cease sound by sound, by phase shift one of the sound sources 180 degrees. At first, I discussed the physics aspects of sound, and the anatomy behind hearing. Then I went on to go-in-depth how sound propagates, and how do speakers, and microphones work. After that I presented my hardware that I was going to do the measurements with, and ofcourse the software that I was using to make those measurements. At last I had enough data to prove that sound attenuation can work this way, and I laid out a theoretic outdoor music event with one main speaker system, and one attenuate sound system.

I had a lot of great insigthful moments throughout this project, and I hope I will have the opportunity to work out a real-life application where I can test out my setup, so I could further improve it.

8 Irodalomjegyzék

- [1] *Pap János Hang-Ember-Hang: Rendhagyó hangantropológia című könyve*
- [2] <https://quizlet.com/356008653/fizika-5-temakor-hullamok-flash-cards/>
- [3] <https://tankorterem.wordpress.com/2020/10/08/a-ful-anatomiaja-elettana/>
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_synthesis
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>
- [6] https://mediadl.musictribe.com/media/PLM/data/docs/P0118/S_BE_P0118_ECM8000_A4_WW.pdf
- [7] <http://warehousesound.com/r/hkaudioLUCAS.pdf>
- [8] <https://fael-downloads-prod.focusrite.com/customer/prod/s3fs-public/downloads/Saffire%206%20USB%20user-guide%20EN%20V1.1.pdf>
- [9] <https://floorplancreator.net/>
- [10] <https://www.roomeqwizard.com/REWhelp.pdf>
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker>