



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Nagy Dániel

DINAMIKUS HANGSZÓRÓ REZGÉSVIZSGÁLATA ÉS
MODELLEZÉSE

KONZULENS

Dr. Firtha Gergely

BUDAPEST, 2020



Nagy Dániel

Villamosmérnök hallgató részére

Dinamikus hangszóró rezgésvizsgálata és modellezése

A dinamikus hangszórók frekvenciaátvitelének meghatározása gyakran felmerülő mérés technikai feladat. A mért eredmény többek között lehetővé teszi az átvitel elektronikus kiegyenlítését.

A hangszóró akusztikai tulajdonságainak meghatározása hagyományosan mikrofonnal való hangnyomás-mérés alapján történik, amely során azonban a teremreflexiók hatása tökéletesen nem kerülhető el.

Alternatív megoldásként LDV (Laser Doppler Vibrometer) készülékkel mérhető a hangszóró-membrán egyes pontjainak gyorsulása. A membrán felületének gyorsulásának ismeretében megfelelő matematikai eszközökkel a lesugárzott nyomástér becsülhető, immár a falreflexiók hatásának kiküszöbölésével.

A hallgató feladata egy választott hangszóró membránjának mozgásának feltérképezése LDV mérőműszerrel, és a mért adatok alapján a hangszóró akusztikai tulajdonságainak számítása.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- Ismerje meg a dinamikus hangszóró működésének elméleti alapjait!
- Mérje meg egy választott hangszóró átvitelét megfelelő mérőmikrofon segítségével!
- Mérje meg egy választott hangszóró membránjának felületi gyorsulás-eloszlását LDV mérőműszerrel!

- Határozza meg a felületi gyorsulás-eloszlásból a hangszóró lesugárzott nyomásterét, és hasonlítsa össze a mikrofonnal mért eredményekkel!

Tanszéki konzulens: Dr. Firtha Gergely egy. adjunktus

Budapest, 2020. október 11.

Dr. Imre Sándor
egyetemi tanár
tanszékvezető

Konzulensi vélemények:

Tanszéki konzulens: Beadható, Nem beadható, dátum:

aláírás:

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| Összefoglaló | 7 |
| Abstract..... | 8 |
| 1 Bevezetés | 9 |
| 2 Elméleti bevezető..... | 10 |
| 2.1 A dinamikus hangszóró | 10 |
| 2.1.1 Felépítése és működési elve..... | 10 |
| 2.1.2 Frekvenciaátvitel, érzékenység..... | 12 |
| 2.1.3 Irányítottság | 13 |
| 2.2 Módusok | 14 |
| 2.3 Az akusztikai környezet hatása..... | 16 |
| 2.3.1 Szabad hangtér | 17 |
| 2.3.2 Félszabad hangtér | 17 |
| 2.3.3 Zárt hangtér..... | 19 |
| 2.4 A Rayleigh integrál | 20 |
| 3 A mérés menete | 22 |
| 3.1 A választott hangszóró..... | 22 |
| 3.2 A membrán rezgésmérése | 23 |
| 3.2.1 A mérőjel kiválasztása | 23 |
| 3.2.2 A mérőeszköz | 24 |
| 3.2.3 Mérési elrendezés | 25 |
| 3.2.4 A mérés menete | 26 |
| 3.3 Az átvitel közvetlen mérése mikrofonnal | 27 |
| 3.3.1 A mérés menete | 27 |
| 3.4 A mérési eredmények feldolgozása | 29 |
| 3.4.1 Interpoláció | 29 |
| 4 A mérési eredmények értékelése | 31 |
| 4.1 Harmonikus vizsgálat | 31 |
| 4.2 Az impulzusválasz vizsgálata | 34 |
| 4.2.1 A lesugárzott tér számítása | 35 |
| 4.2.2 A hangszóró becsült érzékenysége | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.3 A Hangszóró iránykarakterisztikája..... | 38 |
| 5 Összegzés..... | 39 |
| Irodalomjegyzék..... | 40 |

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Nagy Dániel**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2020. 12. 19.

.....
Nagy Dániel

Összefoglaló

Egy hangszóró frekvenciaátviteli függvénye leírja egy hangszóró általa lefedett frekvenciatartománybeli viselkedését, így ennek mérésekor igazán fontos, hogy az eredmény torzításoktól mentes legyen. Ezek a torzítások leggyakrabban a terem hatásaiból adódó reflexiókból adódnak, ugyanis a mérést hagyományosan mikrofonnal végzik, ami nem képes teljesen kiküszöbölni azokat. Számos technika létezik a reflexiók csökkentésére (például a teljes süketszoba), melyeket gondosan meg kell tervezni, és drága megvalósítani. Ez bizonyos esetekben kivitelezhetetlen, valamint kis frekvenciák esetében így sem kerülhető el teljesen a reflexiók hatása.

A dolgozat célja a reflexiós problémák kiküszöbölése egy olyan, a klasszikus mérési mórszertől eltérő technikával, amely a membrán sebességének mérésén alapul. A mért eredményekből a megfelelő matematika eszközökkel modellt alkotva vizsgálom a membrán tulajdonságait különböző gerjesztések esetén, és kiszámolom a membrán által keltett hangteret. Az eredmények mikrofonos méréssel való összehasonlításakor kiderül, van-e szakmai relevanciája a probléma ilyen irányú megközelítésének.

Abstract

The frequency response of a loudspeaker defines its behavior on the full frequency range of its operation being one of the most important loudspeaker characteristics. Therefore, its noise- and distortion-free measurement is of crucial importance. Numerous noise-cancelling methods exist (for example measuring the transfer characteristics in a silent room) which are often complex to design and expensive to implement. In some cases these are unaffordable, furthermore, none of them are able to suppress low frequency reflections completely.

In contrary to the traditional, microphone-based measurement method this thesis presents a novel measurement technique based on measuring the velocity distribution of the loudspeaker's membrane. By creating a model from the results applying appropriate mathematical tools I examine the membrane's behaviour on various excitation frequencies. Comparing the results calculated to those measured with a microphone it is revealed that the presented approach has a professional relevance.

1 Bevezetés

Dinamikus hangszórókkal, mint a leggyakrabban használt hangszórótípussal gyakran találkozunk mindennapjainkban, így ezek vizsgálata nem újszerű feladat. Ezek egy fontos tulajdonsága a frekvenciaátvitel, mely szemlélteti, hogy adott frekvenciákon a vizsgált hangszóró milyen mértékben képes a bemenő jelet a kimenetén megszólaltatni. A frekvenciaátvitel mérése jellemzően mérőmikrofonnal, hangnyomásszint méréssel történik, viszont így a teremreflexiók hatása nem kerülhető el tökéletesen. Ez azokban az esetekben jelent problémát, melyekben a torz karakterisztikát vesszük alapul valamely művelet elvégzéséhez, így annak eredménye is torzul (például átvitel kompenzáció esetében). Szakdolgozatom célja egy olyan mérési módszer megvalósítása, amellyel ezek a torzító hatások esetlegesen csökkenthetők, kiküszöbölhetők.

Ez a membrán pontjainak közvetlen sebességmérésén alapul, amelynek eredményéből közvetlenül meghatározható a membrán által keltett hangtér, ezáltal a frekvenciaátvitel is.

A dolgozatom második fejezete elméleti bevezető, melyben a dinamikus hangszóró működését és tulajdonságait, a membránon létrejövő hullámformákat, különböző akusztikai környezetek hatását és a mérés matematikai alapjául szolgáló Rayleigh-integrál formulát mutatom be.

Ezt a választott hangszóró tulajdonságainak leírása követi a harmadik fejezetben, majd a mérések elvégzése, és a mérési adatok feldolgozása. Itt kitérek a választott mérőeszközökre és a mérési elrendezésekre. Két különböző mérést végeztem a mérések összehasonlításának érdekében: egy hagyományos mikrofonos átvitelmértést, és a kevésbé elterjedt, tesztelni kívánt sebességmérést. A mérési adatokat mindvégig MATLAB-ban dolgozom fel. A sebességmérés eredményeiből közelítéseket alkalmazva előállítok egy olyan modellt, melyből jól számolható a membrán viselkedése.

Ezen a modellen a negyedik fejezetben vizsgálom a membrán harmonikus rezgéseken felvett alakjait, impulzusválaszát, végül az általa keltett hangteret és iránykarakterisztikáját. Utolsó lépésként a két mérés és a technikai adatlapban szereplő értékeket hasonlítom össze.

2 Elméleti bevezető

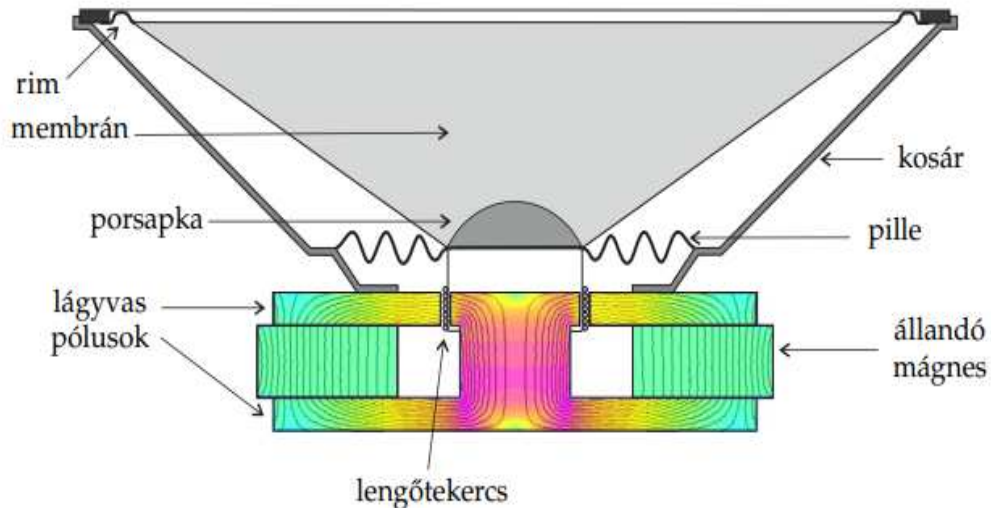
Jelen fejezetben a dinamikus hangszóró működési elvét és legfontosabb tulajdonságait ismertetem. Ezután kitérek a membránon fellépő lehetséges hullámalakokra, és az akusztikai terek hatására mikrofonos mérés esetében. Végül a választott mérési módszer matematikai alapjait mutatom be.

2.1 A dinamikus hangszóró

A dinamikus hangszóró működésének egyszerűségéből adódóan a legszélesebb körben alkalmazott hangszórók közé tartozik. A 2.1.1. és 2.1.2. fejezetekben működéséről és legfontosabb tulajdonságairól lesz szó.

2.1.1 Felépítése és működési elve

A hangszóró általános felépítése a 2.1. ábrán látható. Működési elve a következő: A hangszóró belsejében egy állandó mágnes található, valamint jó mágneses vezető tulajdonsággal rendelkező (nagy relatív permeabilitású) anyagból készült lágyvas pólusok, melyek a köztük levő légrésemben közel homogén mágneses teret hoznak létre (az ábrán megjelenő folytonos vonalak az indukcióvonalakat, színük az indukcióvektorok nagyságát jelzik). A lengőtekercs a légrésemben, tehát a mágneses mezőben, mint áramjárta vezető van jelen, így Lorentz-erő hat rá az áram irányára és a mágneses indukcióvonalakra egyaránt merőlegesen. A lengőtekercs rögzítése lehetővé teszi a rá ható erővel azonos, a kosárra merőleges irányú mozgását, ami ez által a hozzá rögzített membránt is mozgásba hozza (elektrodinamikai átalakítás). A membrán az előtte álló légtömeg mozgásával hozza létre a hanghullámot (mechanikai-akusztikai átalakítás). A rugalmas felfüggesztésért a pille és a rim felelnek. A porsapka a légrést védi a külső szennyeződésektől.



2.1. ábra: Dinamikus hangszóró felépítése [1]

A hangszóró ezen alkatrészek tulajdonságai alapján rendelkezik különböző elektromos és mechanikai paraméterekkel.

Mechanikai tulajdonságok:

- A membrán és a lengőtekerics tömege, vagyis a mozgó mechanikus tömeg (m_{ms}). Ez az érték minél kisebb, annál jobb nagyfrekvenciás átvitelre képes a hangszóró.
- A pille és rim engedékenysége, vagyis a felfüggesztés rugalmassága (c_{ms}). Kisebb értékek merevebb felfüggesztésre utalnak.
- Az ekvivalens térfogat, mely a pille és rim engedékenységgel azonos engedékenységgű levegő térfogata.
- A súrlódásból származó veszteségi ellenállás.

Elektromos paraméterek:

- A lengőtekerics induktivitása
- A lengőtekerics soros ohmos ellenállása

Akusztikai oldalon a membrán hatásos felületének szerepe jelentős a mechanikai-akusztikai átalakításban. Nagyobb hatásos felület nagyobb hangnyomást állít elő ugyan akkoraelmozdulás esetén, hiszen több levegőt képes megmozgatni.

Frekvenciaátviteli vizsgálatoknál megjelenő paraméterek a hangszóró rezonanciafrekvenciája (f_s) és jósági tényezője (Q_{ts}).

A rezonanciafrekvencia az a frekvencia, melyen a hangszóró impedanciájának abszolút értéke maximális. Értékét az érzékenység és a mechanikus tömeg határozzák meg. Az összefüggést az 1. egyenlet írja le.

$$f_s = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi * m_{ms} * c_{ms}}$$

1. egyenlet: Dinamikus hangszóró rezonanciafrekvenciája

A rezonanciafrekvencia a hangszóró működési tartományának alsó határa. Innentől kezd az átvitel egyenletessé válni. Ez minél kisebb frekvencián van, annál jobb egy hangszóró mélyátvittele, kisebb frekvencián képes működésbe lépni.

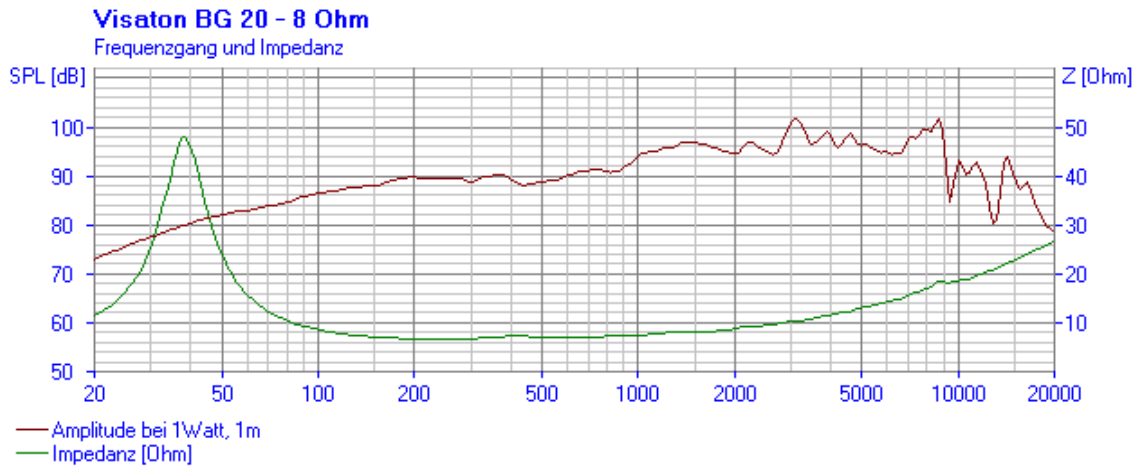
A jósági tényező két tagból áll, az elektromos (Q_{es}) és mechanikai (Q_{ms}) oldali tagokból. Ezek repluszából áll elő a teljes jósági tényező, mely az átviteli függvény törésponti frekvenciában (ami egyben a rezonanciafrekvencia) megjelenő amplitúdóért felel. Ha $Q_{ts} > 0.5$ alulcsillapításról, ellenkező esetben túlcsillapításról beszélünk. A $Q_{ts} = 0.5$ –tel rendelkező rendszert kritikus csillapítású rendszernek nevezzük

Végül a legfontosabb paraméterek egyike a hangszóró transzmissziós tényezője (Bl), mely az elektromos és mechanikai mennyiségek között teremt összefüggést. Mértékegysége $\left[\frac{N}{A}\right]$, és azt az erőt írja le, melyet a hangszóró motorja generál, ha I A erősségű áramot folytatunk a lengőtekercsben. Minél nagyobb ez az érték, a tekercs mozgása annál jobban kontrollálja a membrán viselkedését.

Ezen értékek az úgynevezett *Thiele/Small* paraméterek (A. NevilleThiele és Richard H. Small után elnevezve), melyek segítségével leírható egy hangszóró viselkedése azokon az alacsonyabb frekvenciákon, melyeken még nem jelentős a membrán modális viselkedése, kitérése minden pontján azonos. [2][3]

2.1.2 Frekvenciaátvitel, érzékenység

A frekvencia átvitel megmutatja a hangszóró egységnyi amplitúdójú gerjesztésre adott válaszát egy adott frekvencián. A választ tipikusan a hangszórótól 1 méter távolságban, főtengelyben értelmezzük. A válasz értéke, mivel a bemenő gerjesztéshez van viszonyítva decibelben értelmezendő.



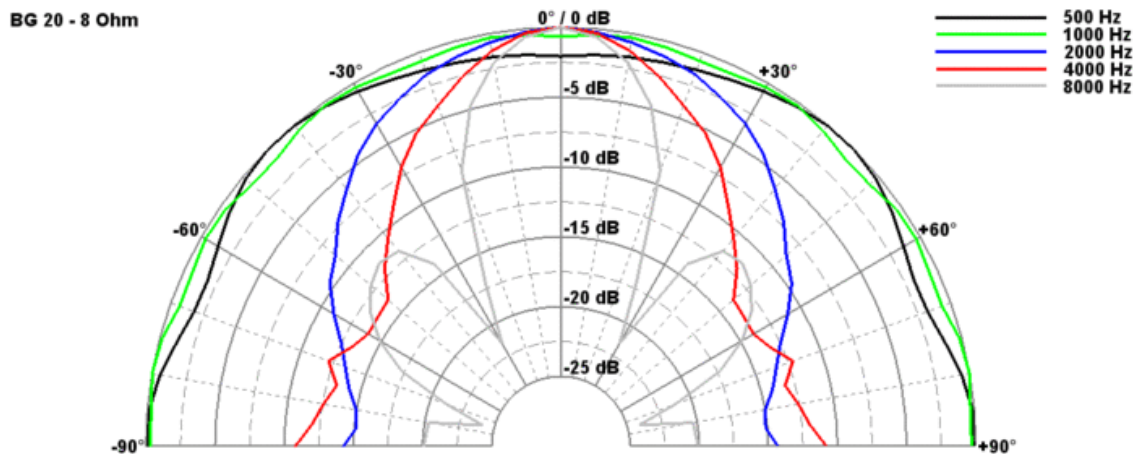
2.2. ábra: Visaton BG 20 hangszóró frekvencia válasza [4]

A 2.2. ábrán egy Visaton BG 20 típusú hangszóró frekvenciaválasza és impedanciadiagramja látható. A válasz ebben az esetben (és ez a jellemző) az egész, általa lefedett frekvenciatartományra van ábrázolva. Leolvasható, hogy törésponti frekvenciája 38 Hz-nél található (a rezonanciafrekvencián, az impedancia abszolút értéke itt maximális) és kb. 18 kHz-től lecseng.

E két frekvenciaérték között értelmezendő a hangszóró érzékenysége. Az érzékenység ebben a tartományban mért átvitel átlaga, decibelben. Tehát egységnyi gerjesztés esetén a membrántól 1 méterre mért átlagos hangnyomásszint. Technikai adatlap szerint a Visaton BG 20 esetében ez 92 dB. Ez az érték definíció szerint távolságfüggő, a megfigyelő a hangszórótól vett távolságának kétszeres növekedésével a megfigyelési pontban érzékelt hangnyomásszint rendre 3 decibellel csökken.[5]

2.1.3 Irányítottság

Az irányítottság a hangszóró főtengelyének síkjában a sugárzótól állandó távolságban, a sugárzás irányának függvényében mért összes, főirányhoz viszonyított intenzitás adott frekvencián.[7]



2.3. ábra: A Visaton BG 20 hangszóró irányítottsága [4]

A 2.3. ábrán a Visaton BG 20 hangszóró irányítottsága öt különböző frekvencián van feltüntetve -90° és 90° között. Főiránya a 0° , ehhez van viszonyítva a mért intenzitás a többi szögben. A frekvencia növekedésével egyre szűkül a karakterisztika, a sugárzásmind irányítottabbá válik. Ez a „szűkülési” jelenség a hullámhossz és a membrán méretének viszonyából adódik: amíg a membrán jóval kisebb, mint az általa sugárzott hang hullámhossza, addig a membrán pontforrásként viselkedik, így-mint pontforrás tere-gömbszimmetrikusan sugároz. Ahogy a membrán összemérhető nagyságú a hullámhosszal, egyre irányítottabbá válik a karakterisztika.[6]

Nagyfrekvencián a membrán felületének egyes pontjait tekinthetjük pontforrásnak, melyek együttesen alkotják a lesugárzott hangot. Ezen pontforrások által egyesével keltett hanghullámok interferálnak, maximalizálva a létrejött hangnyomást, valamint csökkentve vagy kioltva azt. Így jönnek létre a főnyaláb mellett különböző kioltási helyek és mellékharokok.

A 8000 Hz-es ábrán jól látszik, hogy kialakul egy főnyaláb a főiránynál, oldalt pedig $\pm[30^\circ; 60^\circ]$ között megjelennek a mellékharok, valamint kioltási irányok, ahol nullához közelít az intenzitás. [7]

2.2 Módusok

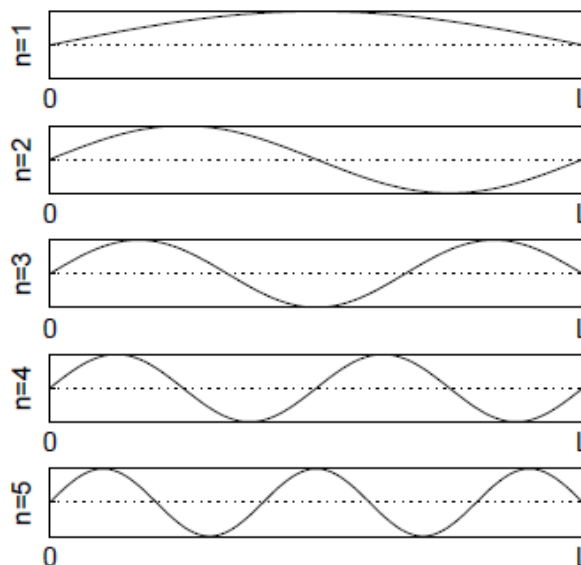
Rezgésvizsgálat során kikerülhetetlen a módusalakok fogalmának bevezetése.

Egy mechanikai rendszer módusalakjai alatt olyan rezgésformákat értünk, melyek csillapítatlan rendszerben gerjesztés jelenléte nélkül is fennmaradnak [8]. Ezek jellemzően különböző állóhullám-alakokban nyilvánulnak meg, ezekre mutat példákat a 2.4.ábra. Az $n=2$ -es esetben a húrnak egy zérushelye van, a többi része félperiódusonként

ellentétes fázisban rezgőmozgást végez. Az ábrán n jelöli az L hosszúságú húron megjelenő félperiódusok számát. Egydimenziós esetben a módusalakok ellentétes fázisban rezgő részeit elválasztó pontokat csomópontoknak nevezzük. Ezen helyeken az elmozdulás zérus.[9]

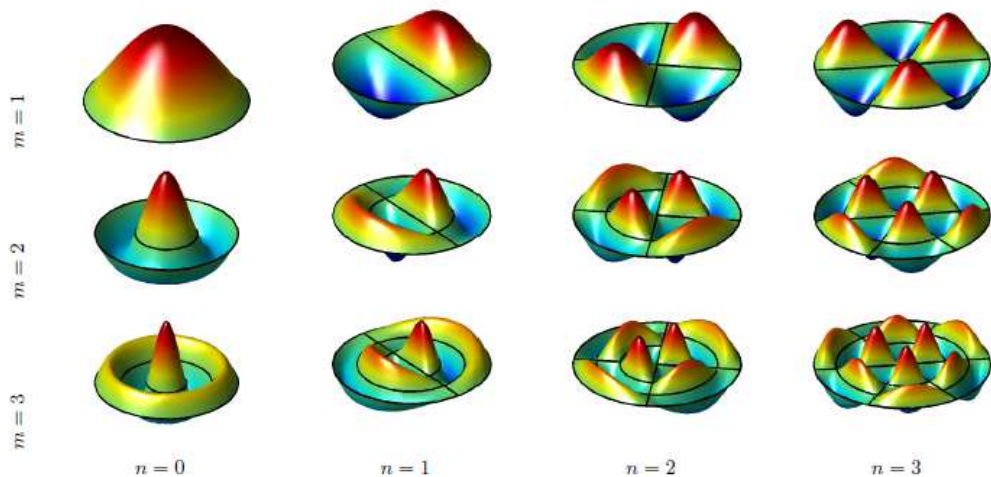
A módusalakok legfontosabb tulajdonságai:

- Lineárisan függetlenek, tehát egyik módusalak sem állítható elő mások szuperpozíciójaként
- A rendszerben bármely kialakulni képes rezgésalak előállítható módusalakok szuperpozíciójaként. Ez az előállítás a függetlenségből adódóan egyértelmű.
- Minden módusalakhhoz tartozik egy ω sajátfrekvencia, melyen a módusalak magára hagyott, csillapítatlan rendszerben harmonikus rezgést végez.



2.4. ábra: Mindkét végén rögzített, L hosszúságú húr módusalakjai [10]

Kétdimenziós esetben csomóvonalakat és csomóköröket figyelhetünk meg, erre példa a 2.5. ábra. Számunkra ez az ábra releváns igazán, ugyanis a vizsgált membránon is hasonló hullámalakok jelenhetnek meg. Ugyanakkor a gerjesztésünk (a lengőtekercs) origó középpontú és körszimmetrikus, így főként az $n=0$ oszlopból számítunk megjelenő módusokra.



2.5. ábra: Kör alakú membrán módusalakjai. n a csomóvonalak, m a csomókörök számait jelzi [10]

2.3 Az akusztikai környezet hatása

Teremakusztikai szempontból reflexiók tulajdonságaik alapján három kategóriába soroljuk a hangtereket: Szabad tér, félszabad tér és zárt tér. Az egyszerűbb bemutatás végett tekintsünk az ezekben elhelyezett hangforrásokra pontforrásként. Pontforrásnak nevezzük azt a forrást, melynek térbeli kiterjedése egy Dirac delta [1]. Pontforrás által keltett hang a forrástól sugárirányban, gömbszimmetrikusan terjed. Ezt a hangteret a 2. egyenlet, az úgynevezett Green függvény írja le a távolság és frekvencia függvényében[11]:

$$G(x, \omega) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-j\frac{\omega}{c}r}}{r}$$

2. egyenlet: Pontforrás lesugárzott hangtere

ahol r a forrástól vett távolságot [m] jelöli, c pedig a hang terjedési sebességét szobahőmérsékleten. Jelentése a következő: Egy szabadtéri hanghullám terjedése esetében, ha a megfigyelő pozíció a forrástól r távolságra helyezkedik el, akkor a hozzá beérkező hanghullám amplitúdója $\frac{1}{r}$ -szeresére változik, fázisában r -rel arányos eltolást tapasztalunk.

Teremakusztikában a hanghullám terjedésére elterjed közelítés a geometriai optika módszereinek használata. Ez alapján a hanghullámok egyenes vonalban terjednek, végtelen merev síkról pedig a visszaverődési szögük megegyezik a beesési szöggel. Így, egy felületről visszaverődő, de a megfigyelési pontba a visszaverődés után

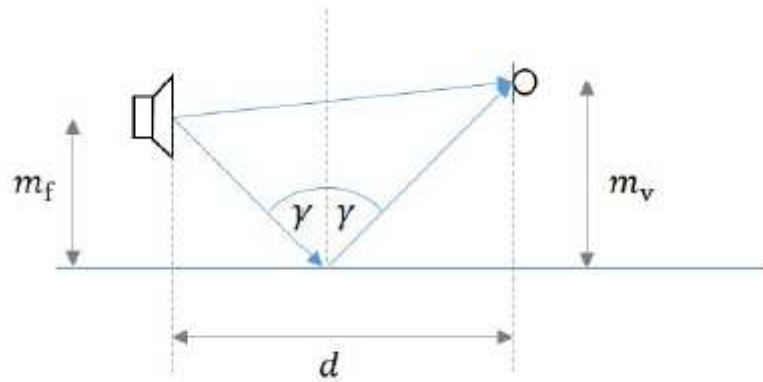
is beérkező hanghullám úthossza geometriai módszerekkel számítható. Az úthossz növekedés a 2. egyenlet alapján az intenzitás csökkenésével is jár.

2.3.1 Szabad hangtér

Ha a pontforrás által kibocsátott hanghullámok minden irányban akadálymentesen terjednek egy adott térben, akkor azt szabad hangtérnek nevezzük. Ebben az esetben nem lép fel reflexió, így a vevő által érzékelt hang leírható a 2. egyenlettel. Természetes környezetben például egy repülőgép hangjának a terjedését tekinthetjük ilyen esetnek. Mesterségesen a tökéletes süketszobát nevezzük szabad hangtérnek, ahol habár a hanghullámok falakba ütköznek, ezek közel tökéletesen elnyelik őket, így nem tapasztalunk reflexiót.

2.3.2 Félzabad hangtér

Abban az esetben nevezünk egy hangteret félszabadnak, amikor azt csak egy oldalról határolja egy sík, más irányokban akadálymentesen terjedhet a hanghullám. Ekkor a megfigyelő pozícióban érzékelt hang egy direkt hangból, és egy visszavert hangból áll, amit egyszeresen visszavert hangnak nevezünk.

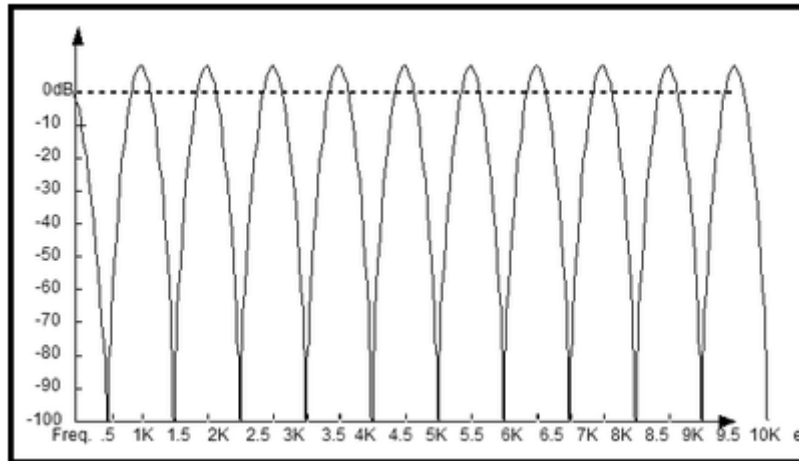


2.6. ábra: Hangterjedés félszabad hangtérben [12]

A 2.6. ábrán látható példában a direkt hanghullám d távolságot tesz meg a megfigyelőig, míg a visszavert hullám ennél többet, így kisebb intenzitással ér célba. A visszaverődés hatása függ a síkelnyelési tulajdonságától, és a beérkezési idők különbségétől (beszédérthetőség, zenei érthetőség).

A vevőhöz beérkező hanghullámok a vevő pontjában interferálódnak egymással, így a frekvencia (hullámhossz), valamint a beérkezési útkülönbség függvényében

kioltások és maximumok jelennek meg. Ekkor a vevő pontban mért jelerősség a frekvencia függvényében ábrázolva fésű alakot vesz fel (2.7. ábra). A kioltások miatt az effektust *fésűszűrésnek* nevezzük. Ez a jelenség mikrofonos mérések során nem kerülhető el tökéletesen.

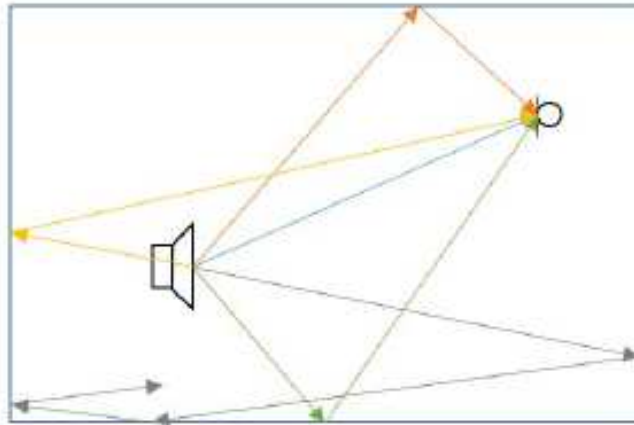


2.7. ábra: A fésűszűrés hatására fellépő kioltások és erősítések [13]

Félszabad teret a gyakorlatban úgynevezett félsüket szobában tapasztalhatunk, ahol a terem egyik oldala (jellemzően a padlózat) nem elnyelő, míg a többi igen. Mivel a mikrofonos mérést is ilyen, félsüket szobában van lehetőségünk elvégezni, így a membrán közvetlen mérésével főként ennek a hatásnak az elkerülése a cél.

2.3.3 Zárt hangtér

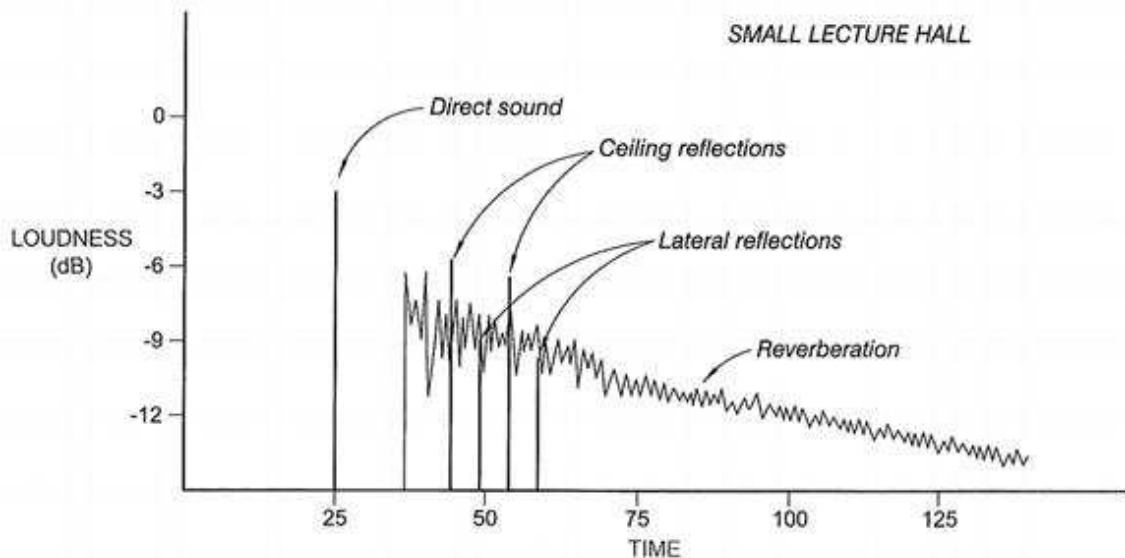
Ha egy térrészt minden irányból visszaverő síkok határolnak, azt zárt hangtérnek nevezzük.



2.8. ábra: Hanghullámok terjedése zárt térben [12]

Ekkor a forrásból a vevőbe a direkt hangon kívül nem csak egyszeresen, de többszörösen visszavert hanghullámok is beérkeznek, így többutas hangterjedésről beszélünk. Ezt a jelenséget szemlélteti a 2.5. ábra, ahol a direkt hang mellett megjelennek egyszeresen és többszörösen visszavert hanghullámok is.

A visszaverődések felhasználástól, helyzettől függően lehetnek előnyösek, de hátrányosak is. A korai, direkt hanghoz képest 50 ms-os, vagy annál kisebb késleltetéssel beérkezett visszaverődéseket az emberi fül nem képes megkülönböztetni, csak növelik az érzékelt intenzitást a direkt hanghoz képest (Haas-hatás) és a hangszínt befolyásolják. A közeli visszaverődések (50 ~ 80 ms) térérzetet keltenek. A kései reflexiók, valamint a nagy utózenngési idő a térérzet növelésén túl bizonyos esetekben az emberi agy által feldolgozhatatlan „zajként” jut el a vevőhöz. A visszaverődések idejét, és intenzitását mutatja a 2.6. ábra, egy kis előadóterem echogramja.



2.9. ábra: Echogram minta [5]

A felsorolt hatások függetlenül attól, hogy bizonyos alkalmazásban előnyösek, az általam választott feladatnál mind kiküszöbölendők, ugyanis a terem akusztikai jellemzői által befolyásoltak, a feladat pedig egy hangszóró jellemzőinek a vizsgálata.

2.4 A Rayleigh integrál

A teremreflexiók kiküszöböléséül a mikrofonos mérés helyett egy, a membrán közvetlen sebességmérésén alapuló módszert választottam. Ennek a módszernek kulcseleme a Rayleigh formula, melyet John William Strutt (III. Rayleigh báró) vezetett be.

A formula megadja egy rezgő síklap által keltett hangnyomást a tér bármely pontjában, ha ismert a síklap minden pontjának normális irányú sebessége. A hangszóró membránja kellő távolságból nézve síklapnak tekinthető, a mélysége nullához közelíthető, így alkalmazható rá a Rayleigh integrál.

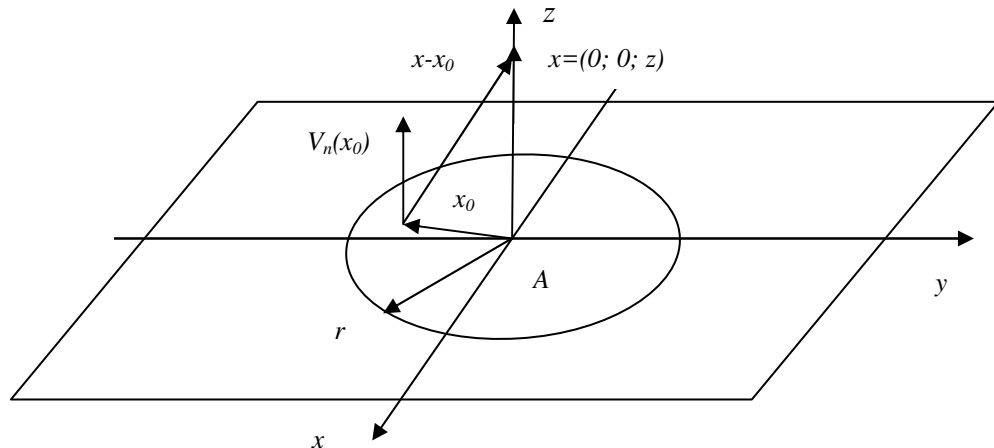
A Rayleigh integrál alakja a frekvenciatartományban és az időtartományban a következő:

$$(a) \quad P(\underline{x}, \omega) = -2\rho_0 j \omega \int_A \overline{V}_n(\underline{x}_0, \omega) * \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-j\frac{\omega}{c}|\underline{x}-\underline{x}_0|}}{|\underline{x}-\underline{x}_0|} d\underline{x}_0$$

$$(b) \quad p(\underline{x}, t) = \frac{\rho_0}{2\pi} \int_A \frac{\partial}{\partial t} * \frac{\overline{v}_n\left(x_0, t - \frac{|\underline{x}-\underline{x}_0|}{c}\right)}{|\underline{x}-\underline{x}_0|} d\underline{x}_0,$$

3. egyenlet Hiba! A hivatkozási forrás nem található.: A Rayleigh integrál frekvencia- és időtartományban

ahol A a vizsgálat tárgyát képező síklap felszíne, V_n a felület normális irányú sebessége x_0 pontban ($x_0 \in A$), x a megfigyelési pont, ρ_0 jelöli a levegő sűrűségét ($1,2 \text{ kg/m}^3$), c pedig a hang terjedési sebességét szobahőmérsékleten ($343,1 \text{ m/s}$).



2.10. ábra: A Rayleigh integrál geometriája

A frekvenciatartománybeli egyenletben észrevehető, hogy megjelenik a Green függvény (2. egyenlet), ami egy pontforrás lesugárzott hangterét határozza meg. Ebből következik, hogy a Rayleigh integrál az A felületet elemi pontforrások összességének tekinti, és az azok által egyesével lesugárzott térből alkotja meg a felület által meghatározott hangteret. Minden pontforrás által létrehozott teret a pontforrás gyorsulásával súlyozva vesz számításba. A gyorsulást időtartományban a sebesség idő szerinti parciális deriváltjaként határozzuk meg, frekvenciatartományban pedig $j\omega$ -val való szorzataként.

Ezek alapján, a membrán pontjainak sebességének ismeretében a membrán által keltett hangtér előállítható a sebességek deriválása, és Green függvénnyel való szorzása után, ezek integráljaként. Ezzel a módszerrel elméletben kiküszöbölhetők a terem reflexiók hatásai, hiszen a mérést közvetlenül a membránon végezzük el.[1]

A tökéletes eredmény eléréséhez a membrán összes pontjának sebességének ismerete szükséges. Ezt nem tudjuk lemérni, viszont a megfelelő közelítési módszerek alkalmazásával elegendő mennyiségű mintára tehetünk szert.

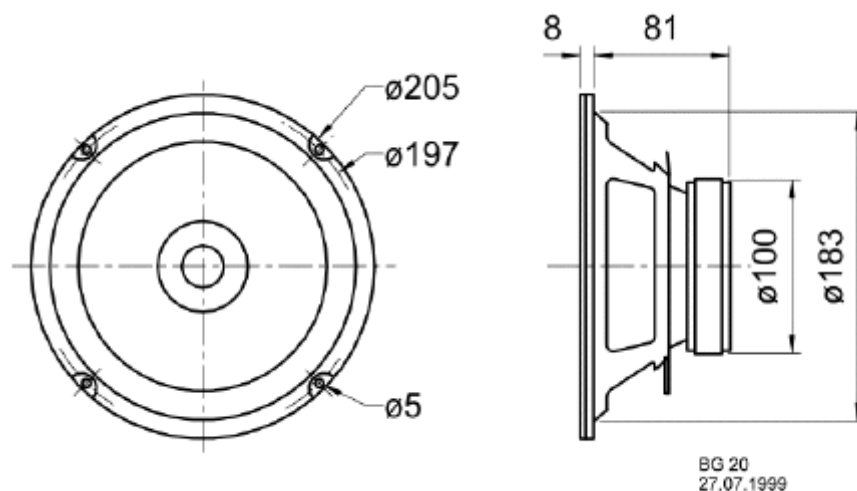
3 A mérés menete

3.1 A választott hangszóró

A vizsgálat tárgyát képező hangszóró egy Visaton BG 20-as modell. A technikai adatlapon feltüntetett értékek a következők:

- Rezonancia frekvencia: 38 Hz
- Átviteli karakterisztika tartománya: 38 Hz – 18 kHz
- Érzékenység: 92 dB
- Jósági tényezők: $Q_{ts}=0.44$; $Q_{es}= 0.51$; $Q_{ms}= 3.47$; Q_{ts} közel áll a kritikus jóságához, enyhén túlcillapít

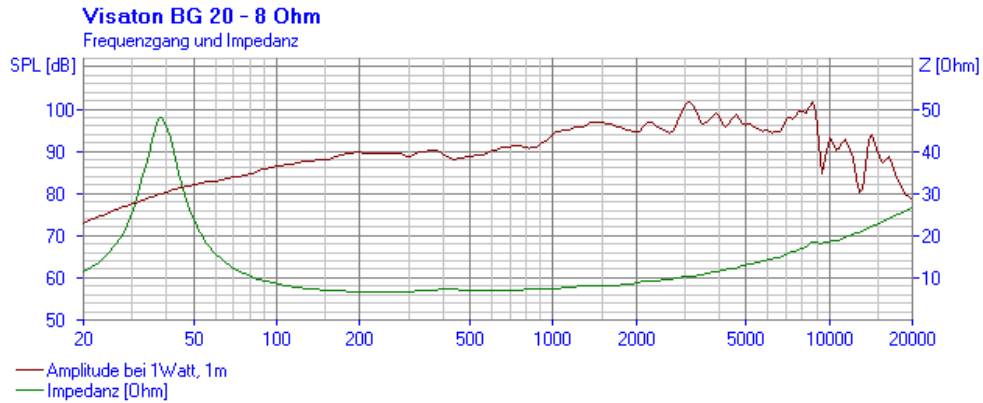
A hangszóró méreteit a 3.1. ábra mutatja. A membrán mélysége kb. 4,5 cm, amit kellő távolságból nullára közelíthetünk.



3.1. ábra: Visaton BG 20 hangszóró méretei mm-ben: főirányú és keresztmetszeti kép [4]

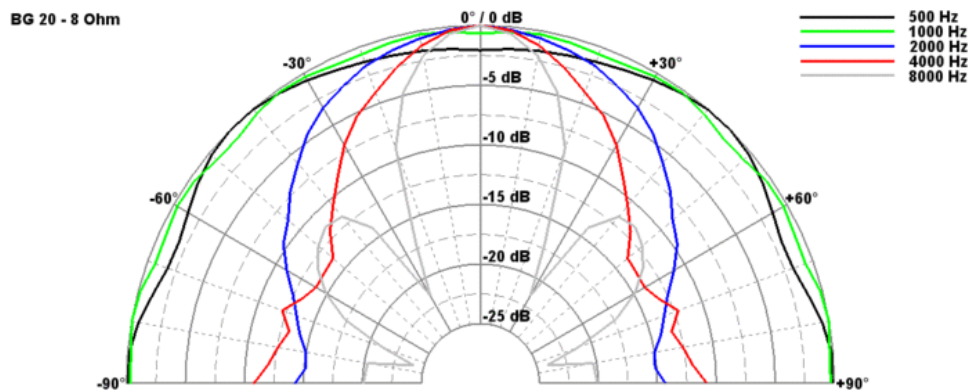
A frekvenciaátvitel és az impedancia abszolút értéke a 3.2. ábrán láthatók. Az átvitel a megadott tartományon belül viszonylag egyenletes, kb. 1 és 10 kHz között egy kiemelt sáv jelenik meg. A hangszóró középfrekvenciás hangok sugárzására a legoptimálisabb.

A hangszóró membránjának átmérője 184 mm.



3.2. ábra: Visaton BG 20 hangszóró frekvenciaátvittele és impedancia értékei [4]

A 3.3. ábrán található az adatlapban feltüntetett iránykarakterisztika. Nagyjából 1 kHz-ig gömbszimmetrikus átvitelt láthatunk, az e feletti frekvenciákon megjelennek a kioltások és a mellékharok.



3.3. ábra: Visaton BG 20 hangszóró iránykarakteristikája öt különböző frekvencia esetén [4]

3.2 A membrán rezgésmérése

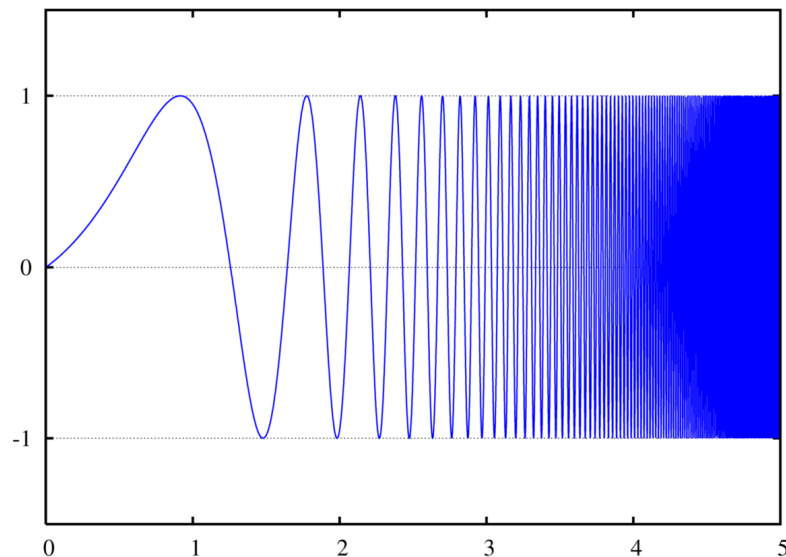
A mérés célja egy olyan mért adathalmaz megszerzése, melyből a Rayleigh-formula segítségével a hangszóró frekvenciaátvittele megfelelően becsülhető.

3.2.1 A mérőjel kiválasztása

Hangszóró tulajdonságainak mérését sokféle mérőjellel van lehetőségünk elvégezni, attól függően, hogy milyen tulajdonságra vagyunk kíváncsiak. Használhatunk harmonikus gerjesztést, melynek előnye, hogy egy frekvencián nagy energiát tudunk közölni a rendszerrel, így jó jel/zaj viszonyt eredményez. Ha ezt különböző frekvenciájú jelekkel megfelelő számban ismétljük, akkor az eredményekből felvehető a rendszer átviteli karakterisztikája.

Esetünkben viszont nagy frekvenciatartományban szeretnénk elvégezni a mérést. Ehhez a szélessávú mérőjelek ideálisak, melyek különböző frekvenciájú harmonikus mérőjelek szuperpozíciójaként értelmezhetők. Elvárás ezen mérőjelekkel szemben, hogy az általunk érdekelt teljes frekvenciatartományban tartalmazzanak harmonikus összetevőket, valamint energia leadásuk lehetőleg egyenletes legyen.[14]

Az exponenciális sweep szinusz jel (3.4. ábra) egy speciális szinusz jel, melynek frekvenciája idővel exponenciálisan növekszik. Előnye, hogy könnyedén lefedheti az általunk vizsgált frekvenciatartományt, és jellegéből adódóan oktávsávonként egyenlő energia leadásra képes. Ezen felül kis csúcstényezővel rendelkezik (4 dB), ami egy mérésnél kívánatos, ugyanis így nagyobb energiát tud leadni az azonos effektív értékű jelekhez képest, ezáltal jobb jel/zaj viszonyt eredményez.[15]



3.4. ábra: A sweep szinusz jel időtartományban [16]

3.2.2 A mérőeszköz

A mérést egy Polytec Portable Digital Vibrometer 100 típusú szenzorral végeztem el (3.5. ábra). A készülék működése a lézeres doppler vibromérés elvein alapszik [17]. Egy mozgó hullámforrás által kibocsájtott hullám frekvenciája arányosan változik a forrás sebességével – ezt a jelenséget nevezzük Doppler-effektusnak. A mérendő felület így hullámforrássá válik, ha visszaveri a vibrométerrel kibocsájtott lézersugarat. A sebesség kinyerhető a bejövő (visszavert) hullám frekvenciaeltolásából, amit a készülék digitálisan dekódol és feszültségjellé alakít át.

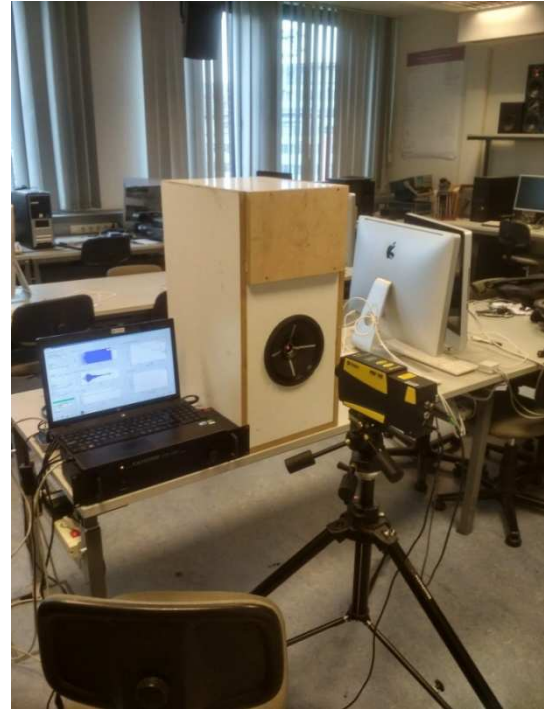


3.5. ábra: A Polytec PVD 100 típusú vibrométer [17]

A módszer egyik előnyös tulajdonsága, hogy a mérési eredményt nem befolyásolja a bejövő hullám intenzitása, így gyengén visszaverő felület mérésekor is pontos eredményt kapunk.

3.2.3 Mérési elrendezés

A mérést a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem I épületében található Akusztikai és Stúdiótechnikai laboratóriumban végeztem. A választott hangszóró egy Visaton BG 20 modell, a mérőeszköz az előző fejezetben ismertetett Polytec PDV-100 készülék. A mérőjel előállításához, valamint a mért adatok feldolgozásához Fiala Péter és Rucz Péter által írt NiHu nevű MATLAB segédprogramot használtam.



3.6. ábra: Mérési elrendezés

Az elrendezésben a NiHu-ban előállított gerjesztő jelet egy mérőkártyán keresztül végfokon erősítve kötöttem a hangfal bemenetére, a vibrométerrel mért eredményeket pedig a mérőkártyán át szintén a számítógépbe vezettem vissza.

A hangszóró dobozát szivacsokkal tömtem ki, hogy csökkentssem a dobozban fellépő reflexiókat, amik befolyásolhatnák a membrán viselkedését.

3.2.4 A mérés menete

A membránra fényvisszaverő fóliát ragasztva bejelöltem a mérési helyeket. A mérési helyekkel megjelölt membrán a 3.7. ábrán látható. Szimmetriai okokból négy szögben [0; 90; 180; 270], valamint szögenként harmincegy helyen [2.5; 5; 7.5; 10; 12.5; 15; 17.5; 20; 22.5; 24; 25; 27.5; 30; 32.5; 35; 37.5; 40; 42.5; 45; 47.5; 50; 52.5; 55; 57.5; 60; 62.5; 65; 67.5; 70; 72.5; 75] kb. 2,5 milliméterenként és nullában végeztem el a mérést.



3.7. ábra: A membránon bejelölt mérési helyek

A gerjesztő jelet 20 Hz és 20 kHz közötti sáv szélességben futtattam le, mérési helyenként háromszor, majd ezek átlaga alkotta a végleges eredményt. A három eredmény egymástól való pontonkénti eltérését a NiHu koherenciafüggvénye jelezte.

3.3 Az átvitel közvetlen mérése mikrofonnal

Habár a hangszóró technikai adatlapjában fel van tüntetve a frekvenciaátvitel, kisebb-nagyobb eltéréseket tapasztalhatunk akár ugyan annál a típusú hangszórónál is, így a két mérési módszer legpontosabb összehasonlítása végett elvégeztem az átvitel közvetlen, mikrofonos mérését is.

3.3.1 A mérés menete

A mérés elvégzéséhez a 3.8. ábrán látható Brüel&Kjaer 4188 típusú közepes érzékenységű mérőmikrofont használtam. Adatlap szerint a mikrofon érzékenysége 8 Hz-től 12.5 kHz-ig terjed, dinamikatartománya pedig 15.8 dB-től 146 dB-ig.[18]



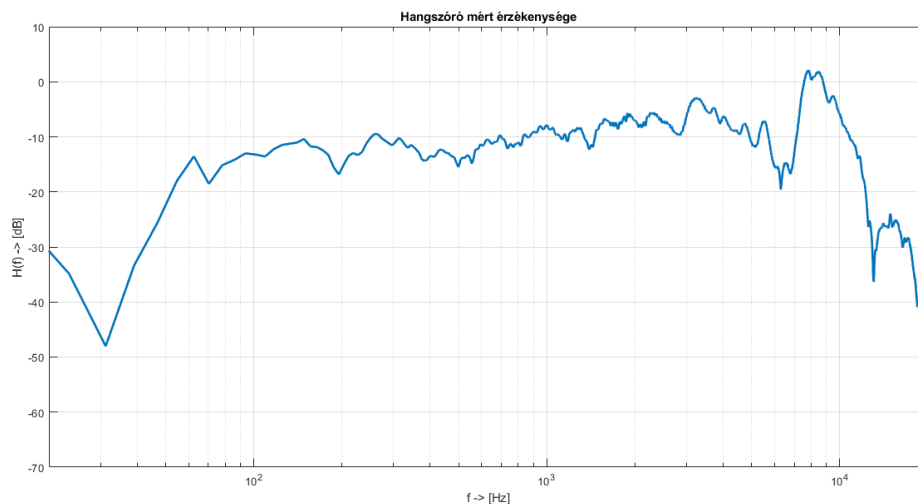
3.8. ábra: Brüel&Kjaer 4188 mérőmikrofon [18]

A mérést szintén sweep szinusz gerjesztéssel végeztem el, ennek előállítása, és a mérési adatok feldolgozása a NiHu-val történt. A hangszórót és a mikrofont a laboratórium süketszobájában helyeztem el egymástól egy méterre, úgy, hogy a mikrofont a hangszóró főirányában a földre raktam. Ezzel, mivel a szoba csak „félküket” (a padlózata nem hangszigetelt) a padlóról beérkező egyszeres visszaverődések késleltetését nullára csökkentettem.



3.9. ábra: A mérési elrendezés illusztrációja: A hangszóró főiránya rá van irányítva a földre helyezett mikrofonra [19]

Az a mérési elrendezés a késleltetést ugyan megszüntette, viszont ezzel kétszeres hangnyomásszintet mért. A mérés eredménye ebben az esetben is egy struktúrában lett tárolva, melynek *FrequencyResponseFunction* mezőjéből egyenesen kiolvasható az eredmény. Ezt felezés, valamint az elemszám huszadolása után a 3.10. ábra mutatja.



3.10. ábra: A mikrofonnal mért frekvenciaátvitel

Az eredmény jellegre nagyszerűen hasonlít a technikai adatlapban közölt karakterisztikához (3.2. ábra). Kb. 500 Hz és 10 kHz között átlagosan jobb átvitelt mutat, mint 500 Hz-nél alacsonyabb frekvenciákon, valamint 5 és 7 kHz között mindkét ábrán megfigyelhetünk egy leszívást, melyet 7-től 10 kHz-ig egy csúcs követ. 10 kHz után elkezdi lecsengeni, 15 kHz környékén pedig egy utolsó csúcs után végleg le is cseng.

Az eredményt a gyártó által megadott értékkel összehasonlítva a mérést sikeresnek lehet tekinteni.

3.4 A mérési eredmények feldolgozása

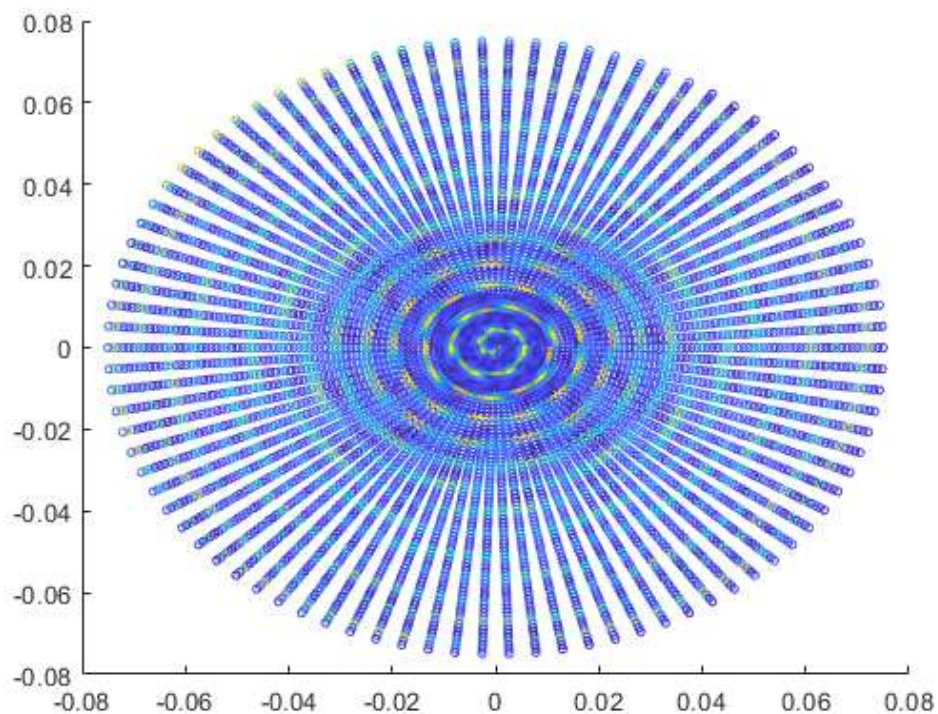
Ahhoz, hogy a Rayleigh-formula használatával jó közelítő eredményt kapjunk a lehető legtöbb pontban kell ismernünk a membrán felületi sebességét. Ezt eddig összesen százhuszonnégy helyen mértem ki. A további értékeket egy közelítő módszerrel, az interpolációval határozom meg.

3.4.1 Interpoláció

Az interpoláció lehetőséget biztosít ismeretlen elemek közelítésére, ha ezek az ismeretlenek két ismert elem között helyezkednek el. A közelítés történhet valamely függvények mentén folytonosan (lineáris, négyzetes), vagy diszkrét módszerekkel (legközelebbi, következő, előző). Mivel a vizsgálat a valóságról hivatott reprezentatív modellt alkotni, a közelítést folytonos módszerekkel végeztem el. Ezen felül célszerű a lehető legtöbb pontban elvégezni a közelítést, aminek határait a számítógép feldolgozó

képessége szabja meg, így első lépésként a mérési eredményeket huszadára csökkentettem (csak minden huszadikat tartottam meg). Ezzel a változtatással még elegendő adatom maradt azokat megfelelően feldolgozni, viszont a feldolgozás sebességén jelentősen javított.

Az r sugárvektort $\sim 2,5$ milliméter helyett 1 milliméteres, a \vec{f}_i vektort pedig 4 fokos egységekre osztottam fel. Ezzel a felosztással azt a hatást értem el, mintha 90 fokban, fokonként 76 helyen mértem volna meg a membrán sebességét. Az így előállított mérési helyeket mutatja a 3.4. ábra. Ezt követően ezekben a helyekben becsültem meg a sebességértékeket a mért értékek közötti interpolációval.



3.11. ábra: Interpolációval előállított mérési helyek

Az interpolációhoz a MATLAB *interp1()* és *interpft()* egydimenziós interpolációt lehetővé tévő függvényeit használtam, előbbit a sugárpontok értékeinek meghatározására, négyzetes függvény mentén a realisztikusabb eredmény végett, utóbbit az anguláris irányba. Az *interpft()* az interpolálandó mátrixot először Fourier transzformálja, majd inverz Fourier transzformálja annyi ponttal, amennyit a bemenetén kapott. Ez a módszer periodikus függvények esetében pontosabb eredményt ad, az általunk mért sebesség pedig 2π -nként az.

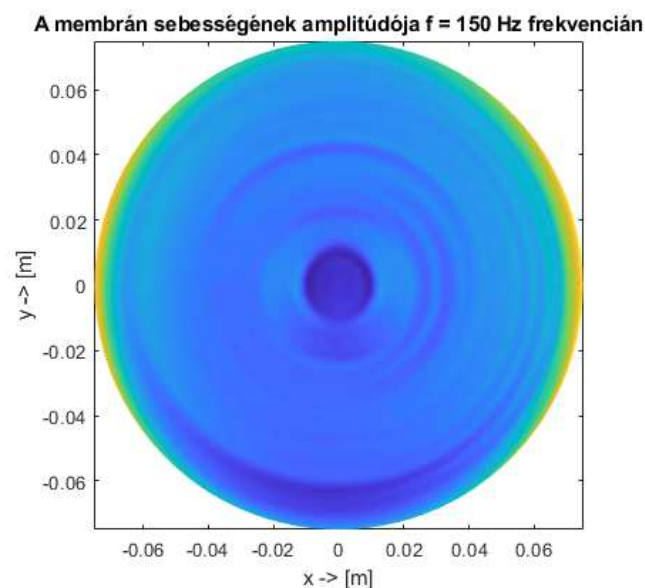
4 A mérési eredmények értékelése

Az előző fejezetben interpolációval előállított adathalmaz lehetőséget biztosít a membrán viselkedésének ábrázolására, vizsgálatára. Ebben a fejezetben az elvégzett vizsgálatokat és az azokhoz készített ábrákat mutatom be, és értékelem.

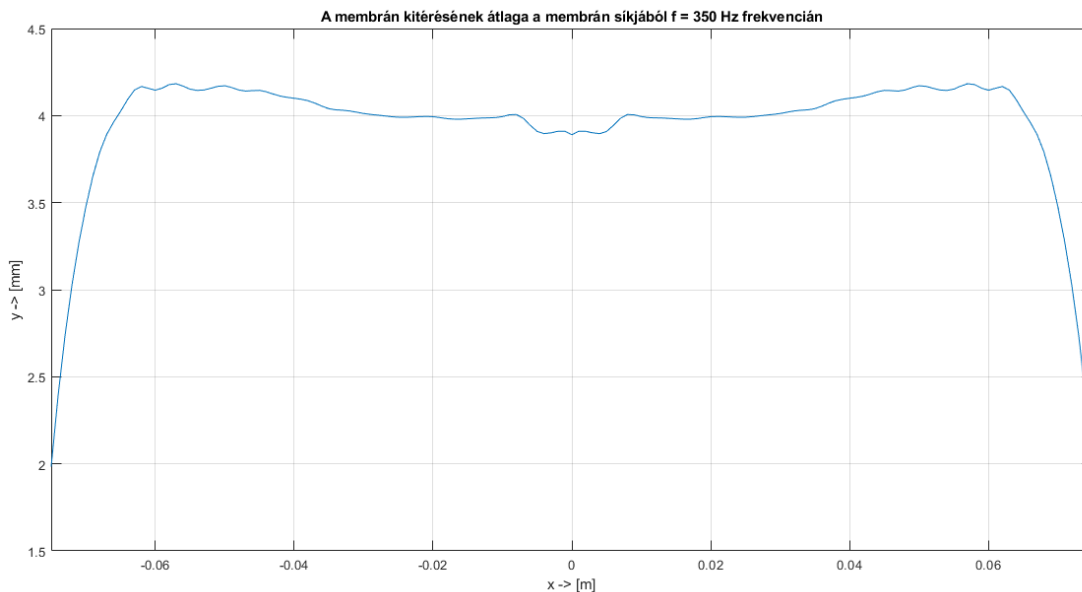
4.1 Harmonikus vizsgálat

Elsőként a membránon megjelenő hullámformákat vizsgáltam. A membrán pontjainak sebességének amplitúdóját három módon ábrázoltam: Két dimenzióban, különböző színnel az amplitúdók nagyságát a *pcolor()* függvény segítségével; Három dimenzióban a *surf()* függvénnyel; Végül a legszemléletesebb módon, a *surf()* függvény által generált ábrák sorozataként, mozgóképként.

A membrán kisfrekvencián úgy viselkedik, mint egy dugattyú, a felületének minden pontja azonos frekvenciával rezeg. Így a membrán egésze előre - hátra mozgást végez. Ez kb. 150 hertzig érvényes az egész membránra (4.1. ábra). Onnantól a membrán szélén megjelennek maximum értékek, melyek 200 Hz környékén még nem jelentenek nagy különbséget a felszín többi pontjához képest, a 300 Hz-es viselkedésnél és a fölött már igen. Ezeken a frekvenciákon a rim hatása megjelenik a membrán szélén, ezt szemlélteti a 4.2. ábra.



4.1. ábra: A membrán sebességének amplitúdója 150 Hz-en



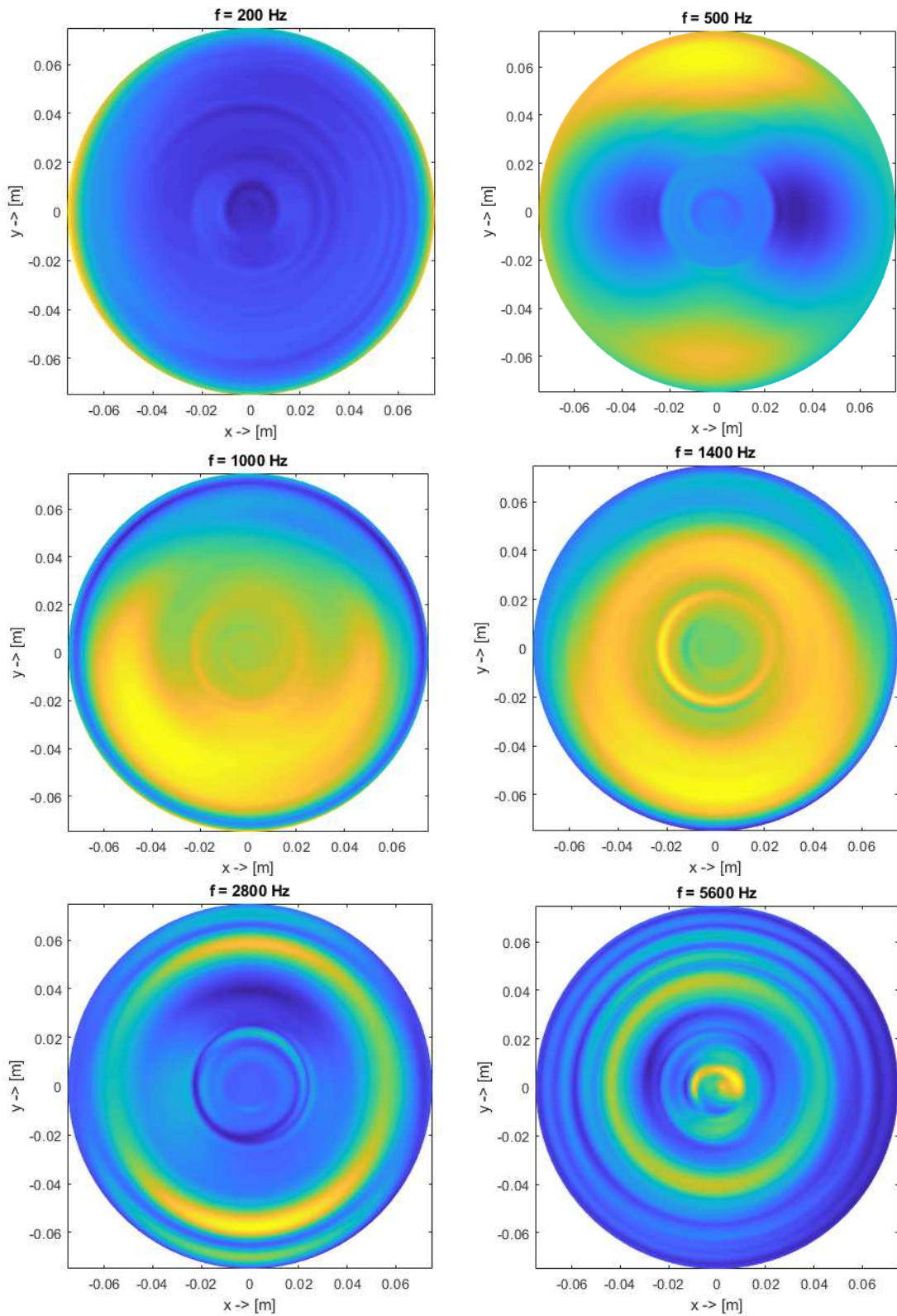
4.2. ábra: A membrán kitérésének átlaga 350 Hz-en

A 4.3. ábra különböző membrán alakokat mutat a frekvencia növekedésével. A 200 Hz-es ábrán a dugattyú-szerű mozgás, valamint a rim hatása látható. 500 Hz-től megjelennek a módusalakok. Habár észrevehetőek csomókörök, melyek a kitérés minimumát jelzik, a megjelenő módusalakok a várt eredménnyel szemben nem teljesen szimmetrikusak. Ezt okozhatja a kifeszítés vagy a gerjesztés aszimmetriája, valamint a membrán anyagának inhomogenitása.

Az 5600 Hz-es ábrán látható továbbá, hogy a középtartományban a kis koax membránon is megjelennek maximumok. A frekvencia növekedésével itt egyre intenzívebb kitérés tapasztalható.

Nagyobb frekvenciás viselkedés vizsgálatok az animációk alatt észrevehető, hogy nem csak állóhullámok, de haladó hullámok is megjelennek a membránon. Ez kb. 6 kHz-től kezdődik. Állóhullámok akkor alakulnak ki, ha két, azonos hullámhosszú hullám egymással szemben halad el egy közegben [20]. Ez a membránon visszaverődéssel valósul meg, tehát a 6 kHz-nél nagyobb frekvenciás viselkedés esetében a membránon haladó hullámok a szélekről nem tökéletesen verődnek vissza.

A nagyfrekvenciás ábrák is jól közelítik a membrán valós viselkedését, viszont a nagy hajlító hullámszám miatt ezeken érdemi információ nem látható.

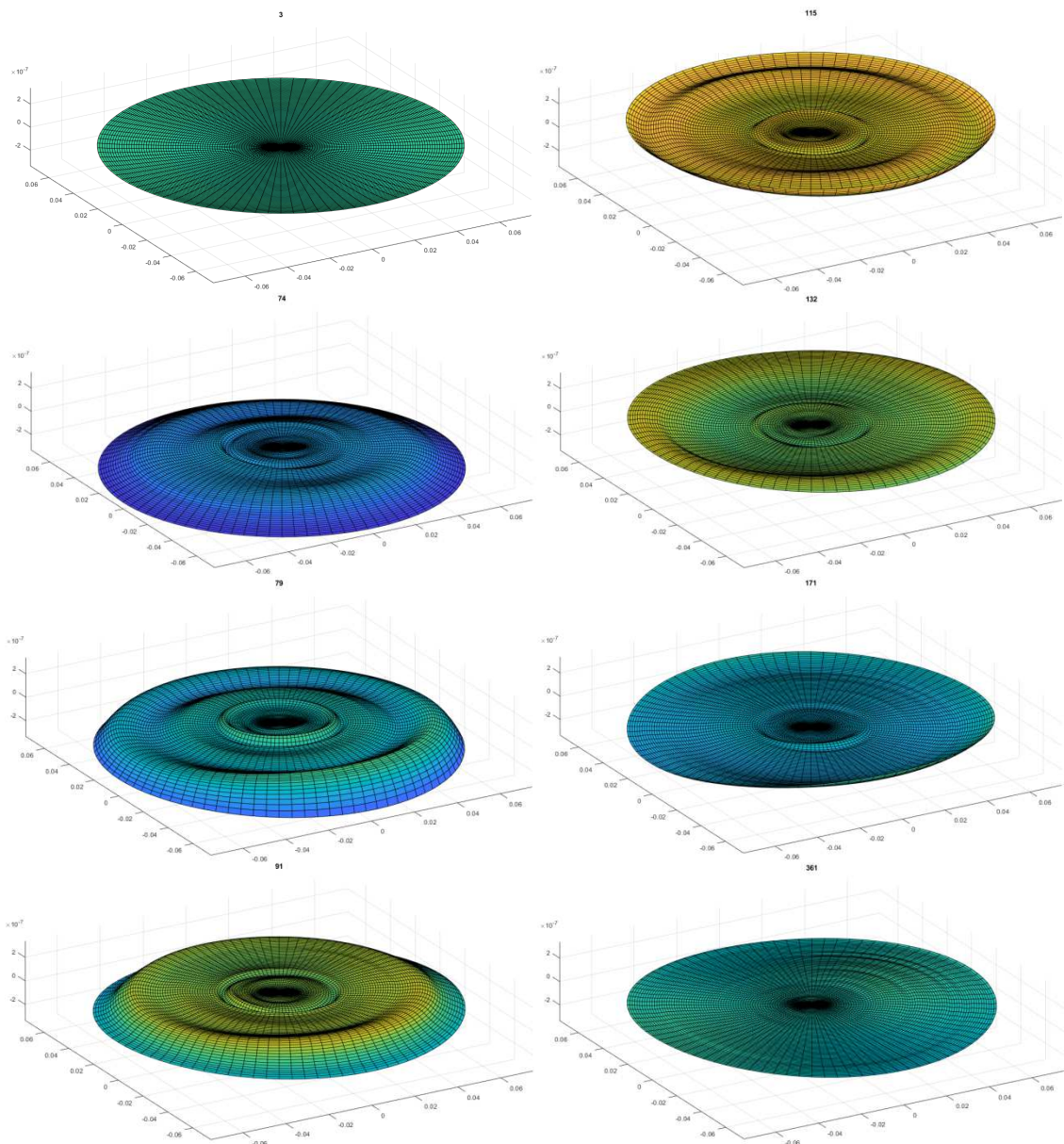


4.3. ábra: A membrán sebességének amplitúdói különböző frekvenciákon. Balról jobbra, fentről lefelé: [200, 500, 1000, 1400, 2800, 5600] Hz-en

4.2 Az impulzusválasz vizsgálata

A membrán harmonikus gerjesztésre adott viselkedése után az impulzusválaszát vizsgáltam. Ehhez elsőként kiszámoltam a membrán kitérését, ami a sebesség integrálja. Ez frekvenciatartományban $\frac{1}{j\omega}$ - val való szorzást jelent. A kitérését ezután egy 0.75 szélességű Tukey-ablakkal simítottam. Az impulzusválasz definíció szerint az átviteli függvény inverz Fourier transzformáltjaként állítható elő, amit a MATLAB *ifft()* függvényével végeztem el, ami a gyorsabb futási idő érdekében részletekben végzi el a transzformációt, majd a részeredmények összességéből állítja elő a végleges eredményt. Ezután a kitérés impulzusválaszának amplitúdóit animáción keresztül ábrázoltam. Ebből láthatók pillanatképek a 4.4. ábrán.

Az első részábrán a membránt nyugalmi állapotban láthatjuk, kitérése minden pontjában nulla. Az impulzusválasz negatív irányú kitéréssel kezdődik, ahol a membránon még nem jelennek meg hullámalakok. Az origó középpontú impulzusgerjesztés hatására haladó hullámok indulnak meg a szélek felé, koncentrikusan (2. részábra). A rimhez érve visszaverődnek, majd a középpontból ismét, egészen lecsengésig. Ez a 3. és 4. részábrán látható. A maximum elérése után a membrán rezonanciafrekvencián rezeg tovább. Globális amplitúdója, valamint a rajta megjelenő hullámalakok amplitúdói is egyaránt csökkennek, ahogy halad az állandósult állapot felé. Az amplitúdó csökkenése a súrlódásból adódó csillapításnak köszönhető. Ez látható az 6. és 7. részábrán. Végül az állandósult állapotban lévő membrán figyelhető meg, mely nincs teljesen nyugalomban. Nulla átlagkitérés mellett az 500 Hz-nél fellépő módusalak formájában lassú periodikus mozgást folytat.



4.4. ábra: Pillanatképek az impulzusválasz animációjából. t fentről lefelé, balról jobbra növekvő. A részabrák feletti egész számok azt jelzik, hogy az animációban hányadik képként jelent meg az adott ábra.

4.2.1 A lesugárzott tér számítása

Első lépésként a hangszóró által lesugárzott hangteret kellett meghatározni, hogy ebből ábrázolhatók legyenek a hangszóró vizsgálni kívánt tulajdonságai.

A Rayleigh integrál implementálása a hangszóró és a megfigyelő térbeli elhelyezésével kezdődik. A hangszórót az x - y síkban helyeztem el, origó középponttal, a megfigyelőt pedig a z tengelyen, 1 méter távolságra a hangszórótól. Ezzel ugyan azt az elrendezést reprodukáltam mint amit a mikrofonos mérés során alkalmaztam.

Mivel a mérést eredetileg polárkoordináta-rendszerben végeztem el, meg kellett határozni a hangszóró pontjainak koordinátáit a Descartes-i x - y síknak megfelelően. Ezt a konverziót a MATLAB $pol2cart()$ függvényével végeztem el. A megfigyelő pozíció hangszóró pontjaitól vett távolságát (r) háromdimenziós Pitagorasz-tétellel számítottam ki.

A Rayleigh formulák közül a frekvenciatartománybeli alakot implementáltam. Az integrálban megjelenő Green függvényt (2. egyenlet) a koordinátarendszerek közötti váltás miatt a Jacobi mátrix determinánsával szoroztam, ami ebben az esetben r . A diszkrét mérési eredményeknek köszönhetően az integrál összeadásnak feleltethető meg, amiben a dr és $d\varphi$ értékek is megjelennek. Természetesen a műveletet a $j\omega$ -val szorzott sebességen, vagyis a gyorsulásvektoron végeztem el.

$$(a) \quad r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

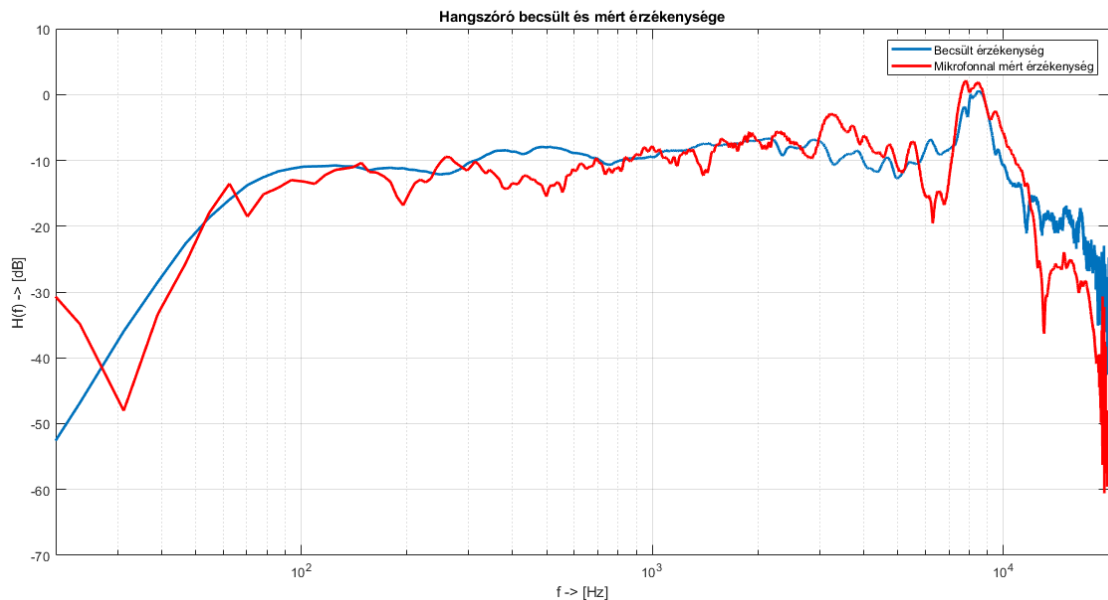
$$(b) \quad G(x, \omega) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-j\omega r/c}}{r_0} * r$$

$$(c) \quad P(x, \omega) = \sum 2\rho * j\omega V_n(x_0, \omega) * G(x, \omega) * dr * d\varphi$$

4. egyenlet: A Rayleigh integrál implementálásának módja

4.2.2 A hangszóró becsült érzékenysége

A Rayleigh integrál implementálásával kapott átviteli karakterisztikát, és a mikrofonnal mért átvitelt a 4.5. ábra mutatja.



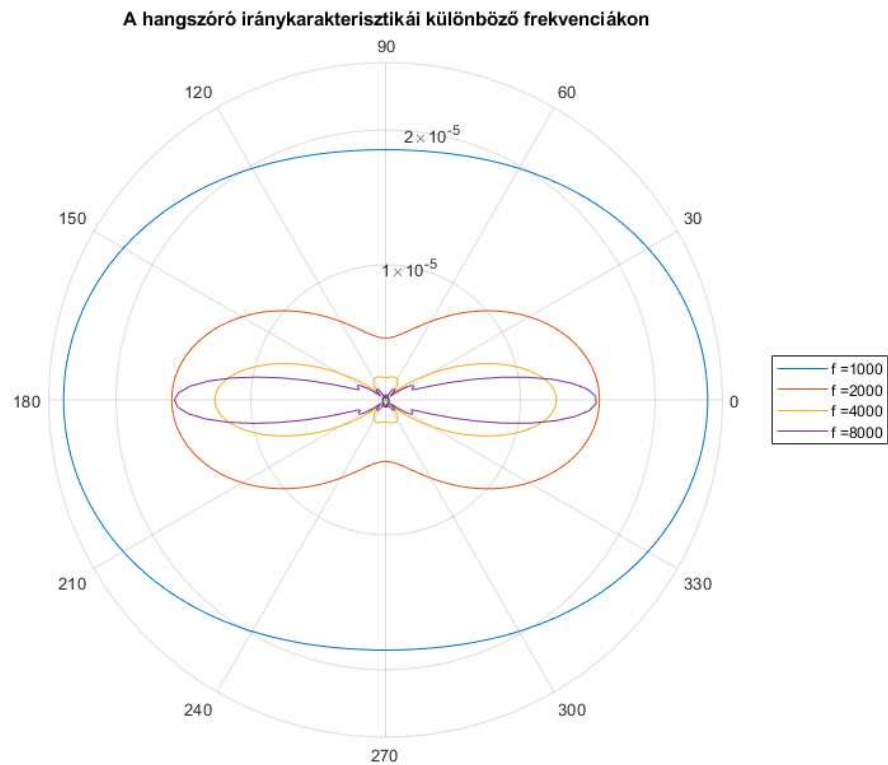
4.5. ábra: A hangszóró becsült, és mikrofonnal mért érzékenysége

A kapott eredmény jellegre szépen illeszkedik a mikrofonos méréssel kapott eredményhez, de kisebb eltéréseket azért tapasztalhatunk. Az 5 kHz környékén található leszívás, ami mind az általam végzett mikrofonos mérésnél mind a technikai adatlapban ábrázolt karakterisztikánál megjelenik itt nem figyelhető meg. Ezen felül a becsült érzékenység nem mutat 500 Hz felett jelentős kiemelést, az átlagos átvitel már 60 Hz-től a magasabb értéken jelentkezik. Általánosan simább átvitelt tapasztalunk. Ez a reflexiók hatások kiküszöbölésének sikerességét jelzi, főleg az alacsonyabb frekvenciatartományokban, ahol a süketszoba elnyelő felületei kisebb hatást váltanak ki, így ott nagyobb súllyal van jelen a fésűszűrés hatása.

Emellett a modellalkotás során a membrán mélységének elhanyagolása is torzíthat az eredményen, főleg a nagyobb frekvenciákon. Ez kb. azoknál a frekvenciáknál kezdődik, melyeknek negyed hullámhosszuk egyenlő a mélységgel. Ez a jelenlegi ~4.5 cm-es maximális mélységnél már 2000-2500 Hz-en is megjelenhet.

4.2.3 A Hangszóró iránykarakterisztikája

Az iránykarakterisztikát szintén a Rayleigh integrál segítségével számítottam ki, viszont ebben az esetben a megfigyelőt nem egy pozícióba helyeztem bele, hanem fokként a hangszóró köré, egy 1 méter sugarú körben. Az ábrázoláshoz a MATLAB *polarplot()* függvényét használtam, és egyszerre négy különböző frekvencián végeztem el. Az eredmény a 4.6. ábrán látható.



4.6. ábra: A hangszóró becsült iránykarakterisztikája négy különböző frekvencián

Természetesen a dobozban elhelyezett hangszóró iránykarakterisztikája csak 180 fokot fed le, a membrán tulajdonképpen mindkét térfélre ugyan az alapján a karakterisztika alapján sugároz. Az ábrán elsősorban szembejön a frekvencia növekedéséből adódó szűkülő irányítottság. Megjelennek a kioltási irányok és mellékharok.

A technikai adatlapon közölt karakterisztika (3.3. ábra) 4000 Hz-en még nem mutat kioltást, viszont a becsült karakterisztikán már ekkor megjelenik, és 0 dB-es átvitelt (legalábbis ahhoz közelít) főirányban is csak 1 kHz-en tapasztalunk. Tehát az iránykarakterisztikák jellegre jól közelítik az adatlapi értékeket, viszont átvitel szempontjából sajnos nem.

5 Összegzés

A dolgozat célja mikrofonos mérés reflexiókból adódó torzításának kiküszöbölése volt, egy, a membrán sebességmérésén alapuló modell segítségével.

Elsőként az ehhez szükséges elméleti alapokat mutattam be, a kiküszöbölendő mérési hibának az okát, a felhasználni kívánt módszert és a membrán viselkedését. Ezután elvégeztem mind a két mérést a pontosabb összehasonlítás érdekében, majd a sebességmérés eredményeiből modellt alkotva megvizsgáltam annak tulajdonságait különböző gerjesztések esetén. Végül kiszámítottam a frekvenciaátvitelét, hogy kiderítsem, sikeresen küszöbölte-e ki a mikrofonos mérés torzítását. A mérés eredményeit és a feldolgozáshoz használt kódot a diplomaterv portálon elérhetővé tettem.

A harmonikus vizsgálat, és az impulzusválasz vizsgálata során már szembetűnt, hogy az alkotott modell jól reprezentálja a membrán valós viselkedését. Megjelentek rajta a különböző módusalakok, az impulzusválasz során pedig a rezonanciafrekvencia is jól látszott.

A frekvenciaátvitel meghatározása után lehetőség nyílt a két mérés egyértelmű összehasonlítására. A modellel előállított karakterisztikában nem tapasztalható olyan mértékű ingadozás, mint a mikrofonos mérés eredményében, ahol a fésűs átvitel megjelenhet, így a feltevés, miszerint a sebességmérés kiszűrheti a reflexiós hatásokat megállja a helyét. Végül meghatároztam az iránykarakterisztikát, ahol sajnos nem értek ekkora sikerek.

Ennek ellenére a dolgozatban kitűzött célt elértem, a membrán sebességmérése a megfelelő matematikai módszerek implementálásával szebb átviteli eredményt ad, mint a mikrofonos mérés, ahol a reflexióból adódó torzítás teljes kiküszöbölése lehetetlen.

Irodalomjegyzék

- [1] *Firtha Gergely, Rucz Péter: Elaktroakusztikai átalakítók vizsgálata, Mérési leírás*
- [2] *Wikipedia: Thiele/Small parameters*
https://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small_parameters#
- [3] *Subvoice: Hangszóróválasztás*
<https://subvoice.hu/hangdobozepites/elmelet/hangszoro1/>
- [4] *Visaton BG 20 technikai adatlap* <https://www.visaton.de/en/products/fullrange-systems/bg-20-8-ohm>
- [5] *Frankó Mátyás Krisztián, Dr. Márki Ferenc: Hangtechnika jegyzet*
- [6] *Acoustic frontiers: speaker directivity*
<http://www.acousticfrontiers.com/20131129controlled-directivity-speakers-open-up-your-acoustic-treatment-options/>
- [7] *Dr. Gránát János, Horváthné Dr. Gembiczky Erzsébet, Dr. Koller István: Műszaki akusztika*
- [8] *Fiala Péter: Móduselemzés, Mérési leírás*
- [9] *Ludmány András: Felkészülési segédlet a Zenei Akusztika c.targy vizsgájához a DE Konzervatoriumában*
- [10] *Fiala Péter: A hangszerek fizikája*
- [11] *Firtha Gergely: A Generalized Wave Field Synthesis Framework with Applications for Moving Virtual Sources*
- [12] *Nagy Attila Balázs, Janai-Kulcsár Dóra: Utözengési idő mérése, Mérési segédlet*
- [13] *Audioholics: Comb Filtering* <https://www.audioholics.com/loudspeaker-design/comb-filtering>
- [14] *Fiala Péter, Rucz Péter: Elektroakusztikai eszközök mérés technikája*
- [15] Ian H. Chan: Swept Sine Chirps for Measuring Impulse Response
- [16] *Wikipedia: Chirp* <https://en.wikipedia.org/wiki/Chirp#Exponential>
- [17] *Polytech PDV 100 Vibrométer kézikönyv*
https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_PB_PDV_100_E_42481.pdf
- [18] *Brüel & Kjaer 4188 mikrofon technikai adatlap*
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4188>

- [19] *Stereophile: Time Dilation* <https://www.stereophile.com/content/time-dilation-part-1-page-3>
- [20] *Wikipédia: Állóhullám (hang)*
[https://hu.wikipedia.org/wiki/%C3%81ll%C3%B3hull%C3%A1m_\(hang\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/%C3%81ll%C3%B3hull%C3%A1m_(hang))