

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR

Útkeresés a zene fizikájának tanításához

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Kardos Gergely

Fizika-matematika osztatlan tanári szak

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Farkas Zsuzsanna

tanszékvezető főiskolai tanár



Szeged

2023. január

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. Hangtan a fizikaoktatásban.....	4
2.1. Hangtan tanítása az általános iskolákban	4
2.2. Hangtan tanítása a négy évfolyamos gimnáziumokban	6
3. Lehetőségek a téma tanításában	9
3.1. Kísérleti és demonstrációs lehetőségek	9
3.1.1. Hullámok terjedésének szemléltetési lehetőségei	9
3.1.2. Állóhullámok kialakulása húron.....	11
3.1.3. Húros hangszerek megismerése	12
3.1.4. Érdekes videók a közösségi médiában	14
3.1.5. Állóhullámok kialakulása felületen.....	17
3.1.6. Kísérletek hangvillákkal.....	21
3.1.7. Szívószálduda	22
3.1.8. Fuvola	23
3.2. Öveges-kísérletek modern köntösben.....	27
3.2.1. Tájékozódás hallás alapján	27
3.2.2. Hangmagasság és a hallás	29
3.2.3. Teremakusztika.....	32
3.3. Számítógéppel támogatott mérések	34
3.3.1. Hangsebesség mérése telefonnal	34
3.3.2. Hangsebesség mérése az érettségi vizsgákon.....	37
3.3.3. Hangsebesség mérése üvegpalackkal	39
3.3.4. Mérés Quincke-féle interferenciacsővel.....	41
3.3.5. Hangmagasság vizsgálata	44
3.3.6. Hangszín vizsgálata	47
3.3.7. Pszichoakusztika.....	53
3.4. Házi készítésű hangszerek	55
3.4.1. Tenyर्सípok	55
3.4.2. PET-palack mint hangszer.....	58
3.4.3. Zenélő borospoharak	60
3.5. A téma további tantárgyi kapcsolódásai	62
3.5.1. Temperált skála mint mértani sorozat	62
3.5.2. Hangerősség vizsgálata a logaritmus egy lehetséges bevezetésére...	64
4. Összefoglalás	66
5. Irodalomjegyzék	67
6. Köszönetnyilvánítás.....	70

1. BEVEZETÉS

A hangok, a zene mindennapjaink fontos része, így valamilyen szinten mindenkihez közel álló témáról beszélünk. Emiatt lehet a zene kiváló motivációs eszköz a diákok fizika iránti érdeklődésének felkeltésében, elmélyítésében.

A hangtan oktatása az utóbbi években újra visszakerült az általános iskolás és középiskolás kerettantervbe a hullámok témakörén belül. A kerettanterveket megvizsgálva úgy láttam, hogy ebben a témában módszertani anyagok készítése hiánypótló tevékenység lenne. Ezért elsődleges célom az volt, hogy az általános és középiskolás hangtan fejezetéhez **tanítási javaslatokat** készítsek.

Dolgozatomban több, egyszerűen, hétköznapi tárgyakat felhasználva elkészíthető, nem csak tanárok, hanem diákok által is könnyen megvalósítható **kísérleti javaslat** szerepel, amelyek alkalmazhatók a téma tanítása során. Ugyanakkor fontosnak tartom felhívni a figyelmet a téma tanítását jelentősen megkönnyítő, a hangok vizsgálatára alkalmas **számítógépes és mobiltelefonos programokra, szimulációkra**, vagy az internetes felületeken megtalálható tartalmakra. Ezeket felhasználva, adaptálva korcsoportra, iskolatípusra stb. a téma tanórán kívüli alkalmazhatósága szinte korlátlan, az órai aktív tanulói eljárások mellett otthoni projektfeladatok és tanulói mérések elvégzésére is lehetőséget kapunk.

További célja a dolgozatnak az, hogy megvizsgálja a téma **más tantárgyakkal való kapcsolódási pontjait**. Ilyen például a biológia, mellyel a hallás fiziológiai és pszichofizikai jelenségei teremtenek kiváló kapcsolatot. Egy másik egyértelmű kapcsolódás az ének-zene tantárgy, amelyben például a hangszerek működésének megismerése ötvözi jól a két tantárgy ismeretanyagát.

Az egyszerű, otthon is elkészíthető hangszerek fizikai magyarázatának megismerése után pedig az ezekkel való közös játék már a diákok közös **zenei élményét** gazdagítja. Ez utóbbira is több lehetőséget bemutatok a dolgozatban.

A témával először 2019-ben kezdtem el foglalkozni, amikor lehetőséget kaptam a Juhász Gyula Pedagógusképző Kar Interaktív Természetismereti Tudástárában iskolás diákok számára kísérletes bemutatót tartani, amiben már néhány hangtani témájú kísérlet is helyet kapott.

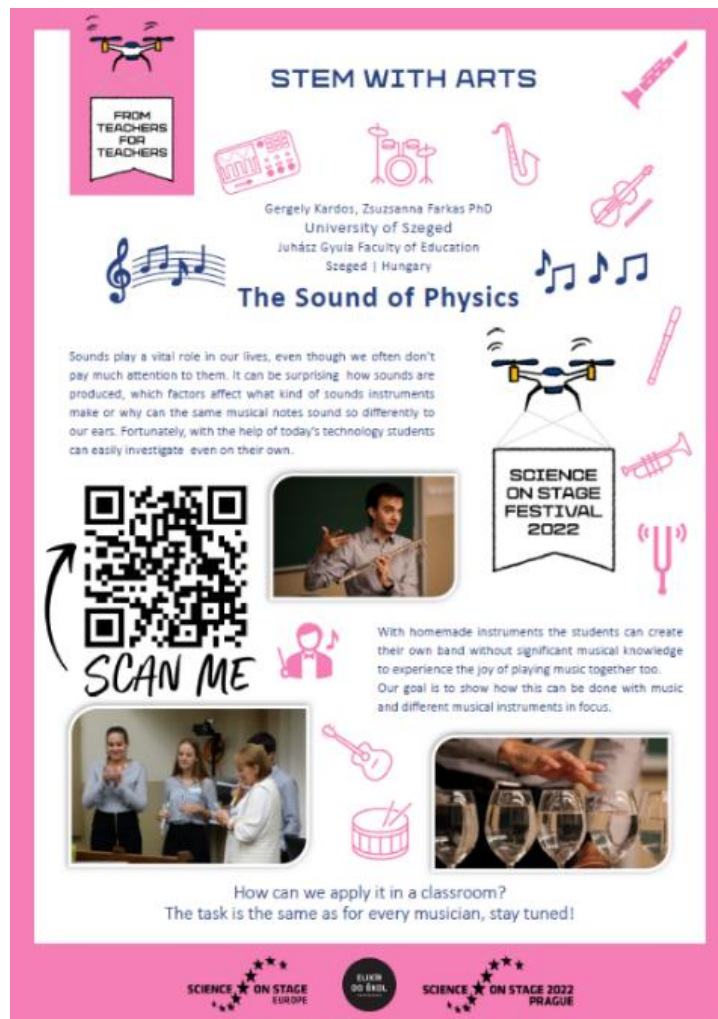
A hangok világa mindig is közel állt hozzám, hiszen családomban nagyon sok a zenetanár. Én kiskoromtól kezdve aktívan zenélek, fuvolán játszom az Orosházi Fúvószenekarban. Témavezetőm, Dr. Farkas Zsuzsanna tanárnő biztatására úgy gondoltam, hogy kiváló lehetőség a téma, hogy ötvözzem a zenei és fizikatanári képességeimet.

Először a 2019-es Kutatók Éjszakáján tartottam kimondottan ilyen témájú ismeretterjesztő előadást a *Hullámok, hangok, és a zene fizikája* címmel. A célom az volt, hogy bemutassam a hangok pár fontos fizikai jellemzőjét, és azt, hogy ezek hogyan jelennek meg a hangszerek kialakítása és a tényleges zenélés során. Az előadás nagy sikere megerősítést adott abban, hogy a hangtan ilyen irányú megközelítése valóban felkelti a diákok érdeklődését, így tovább folytattam a munkát a témában. Azóta több száz diáknak tudtam előadások, tanórai foglalkozások során megmutatni a hangok világát a fizika szemszögéből, folyamatosan bővítve a demonstrációs kísérletek sorát, elmélyítve és színesítve a megértéshez szükséges elméleti hátteret.

A munkám során további motivációt jelentett, hogy a 2020/2021-es tanévtől kezdve az Új Nemzeti Kiválóság Program ösztöndíjasaként is foglalkozhattam a témával.

Eddigi legnagyobb szakmai eredményem az volt, hogy a *The Sound of Physics* című projekttel egy magyarországi válogatóverseny után részt vehettem a magyar csapat tagjaként a Prágában megrendezett 2022-es Science on Stage Europe fesztiválon. A fesztivál lehetőséget adott arra, hogy egyrészt a kiállítási standon, másrészt műhelyfoglalkozást tartva, harmadrészt pedig egy nagyszínpadi bemutatón több száz külföldi tanár megismerhesse a módszereimet. Azt tapasztaltam, hogy még a témában jártas kollégáknak is sikerült néhány új ötletet mutatni, és a fogadtatás is azt jelezte, hogy működőképesek a módszereim.

Azt, hogy az ehhez hasonló témák népszerűek az oktatásban, az is mutatta, hogy szép számmal indultak tanárok velünk együtt a STEM with Arts kategóriában. Ebben a kategóriában a Science, a Technology, az Engineering és a Mathematics tartalmakat egészíti még ki az Arts, tehát a művészetek témaköre. A STEAM oktatási koncepció lényege az, hogy erősítse a tudományterületek mindennapi életéhez kapcsolódó oktatását minél integráltabb szemléletben. A dolgozatomban is ezt a szellemiséget követve próbálok meg segítséget adni a hangtan tanításához.



1. ábra: A Science on Stage fesztiválra készült plakát. Prága, 2022. március 24-27.

Saját eredményeim felsorolásszerű összefoglalása:

- A hangtan témakör tanításának általam képviselt szemléletben való felépítése.
- A klasszikus kísérletek olyan célú értelmezése, hogy hogyan kapcsolódnak azok gyakorlati példákhoz, hangszerekhez vagy éppen a diákok által a közösségi médiában látottakhoz.
- Költséges kísérleti eszközök mindennapi eszközökből való helyettesítése.
- A modern technológia adta lehetőségek felhasználása tanári és tanulói kísérletek vagy fizikai mérések formájában.
- Saját ötletek bemutatása a tananyagban szereplő fogalmak szemléletes bevezetésére.
- Példák, hogy a témakör milyen tantárgyakhoz és azok mely területeihez kapcsolódhat (ének-zene, matematika, biológia).

2. HANGTAN A FIZIKAOKTATÁSBAN

A 2000-es évek elején a hangtan nem, vagy csak kis mértékben jelent meg a magyarországi fizikaoktatásban. Amikor elkezdtem foglalkozni a témával, a 2012-es Nemzeti Alaptanterv és a hozzá tartozó kerettantervek voltak érvényben, ahol az előző időszakhoz képest egy kicsit nagyobb szerepet kapott a hangtan témakör is. Ez a 2020-as NAT érvénybe lépésével sem változott meg. Az alaptantervhez íródott új tankönyvekben több fejezetet is találhatunk a témához.

A következőkben a kerettantervek tartalmát, céljait, követelményeit fogom áttekinteni. Megnézem milyen lehetőségeket nyújtanak ehhez az új tankönyvek, és mi jelenik meg az új érettségi követelményekben.

2.1. Hangtan tanítása az általános iskolákban

A 2012-es Nemzeti Alaptantervben a 7-8. osztályos fizika tantárgy *közműveltségi tartalmai* közt találhatjuk az *ember megismerése és egészsége* címszó alatt a hang, ultrahang szerepét az állatvilágban, a hallás fizikai alapjait, illetve a zajszennyezés környezeti hatásait. A tantárgy hagyományos szerkezetében a *műveltségi tartalmakat* tekintve a *mechanika* témakörön belül a *rezgések és hullámok* résztémán belül láthatjuk, hogy címszavasán az eddig említetteken kívül a rezgések jellemzői, hullámok terjedése, a hang fizikai jellemzői szerepelnek már általános iskolában is mint ismeretanyag. Alkalmazások terén pedig a Föld belső szerkezetével kapcsolatban a földrengések kapcsolódhatnak még a hangtanhoz. (1)

A kerettanterveket tekintve az *A kerettanterv* külön tematikai egységként említi az „A hang; hullámmozgás a természetben” témakört 8 órás órakerettel, míg a *B kerettanterv* a 14 órás „Nyomás” tematikai egység részeként említi. (2)

A jelenleg érvényes 2020-as NAT az előzőhöz képest kevesebb konkrétumot fogalmaz meg a témával kapcsolatban. Általános iskolában a *tanulási eredmények* között szerepel a hallás folyamatának, a hang továbbítása körülményeinek és a halláskárosodáshoz vezető főbb tényezők ismerete. (3)

Az ehhez tartozó kerettanterv a hangtant a 10 órás „Hullámok” témakörön belül kezeli. Az alábbi táblázatban összefoglaltam, hogy az alapvető hullámtani ismereteken túl a hangtan milyen formában jelenik meg.

Tanulási eredmények	A témakör eredményeként a tanuló • megfigyeli az elterjedt hangszereket használat közben, felismeri azok működési elvét, • ismeri a hallás folyamatát, a levegő hullámzásának szerepét a hang továbbításában, meg tudja nevezni a halláskárosodáshoz vezető főbb tényezőket.
Fejlesztési feladatok és ismeretek	• A levegőben terjedő lökéshullám megfigyelése egyszerű kísérleti eszközökkel. A terjedési sebesség becslése. • A hang tulajdonságainak (hangmagasság, hangerő) fizikai magyarázata. • Egyes hangszerek hangképzésének elve, a hangszerek megfigyelése működés közben. • A hallás mechanizmusának fizikai lényege, a hallást károsító tényezők ismerete.
Fogalmak	• Állóhullám, hullámhossz, frekvencia, hullám terjedési sebessége, hangmagasság, hangerő.
Javasolt tevékenységek	• Hangok keltése, elemzése egyszerű esetekben pl. audacity programmal.

1. táblázat: A 2020-as NAT-hoz készült általános iskolás kerettanterv összefoglalása. (4)

A tantervi szabályozások után az ehhez készülő tankönyveket is megvizsgáltam. A „B” jelű tankönyv a „Hullámok” témakörön belül az alapvető hullámtani ismeretek után 2 fejezetben mutatja be a hangtani ismereteket (A hang jellemzése; Hangszerek), amire az ajánlott tanmenet 3 órát szán. A hangmagasság, hangerősség és a hang terjedési sebessége mellett a hallás folyamatáról és a hangszerek által keltett hangokról lehet röviden olvasni a tankönyvben, amihez gyakorlatias feladatokat kínál a munkafüzet. Itt a tananyagot elmélyítő feladatok mellett telefonos hangerősségmérő és hangszínelemző program használata is szükséges a diákoknak. (5, 6)

Az „A” jelű tankönyv 4 fejezetben, ehhez ajánlottan 4 órában tárgyalja a témakört (A hangkeltés; Hallás, a fül; A hang terjedése; A magas és mély hangok). A kicsit más csoportosítás itt több gyakorlati példával is jár. Az ehhez tartozó munkafüzeti feladatok kevésbé igényelnek aktivitásokat, mérések elvégzésére is kevésbé ösztönzi a diákokat. Ezen tematikához viszont az okostankönyv is kiegészítést nyújt további videókkal, feladatokkal. (7, 8, 9)

2.2. Hangtan tanítása a négy évfolyamos gimnáziumokban

A 2012-es alaptanterv a gimnáziumi fizikatanítás esetében az általános iskolás felsoroláshoz képest a hang terjedési mechanizmusa, felharmonikusok, az emberi hangérzékelés fizikai alapjai címszavakat említi meg. (1)

Az ehhez tartozó kerettanterveket tekintve az *A változat* az „A hang és a hangszerek világa” tematikai egység keretében tárgyalja 6 órában a hangtant. A *B változatban* ez a 11 órás „Mechanikai rezgések, hullámok” tematikai egységen belül valósul meg. (2)

A 2020-as alaptanterv az általános iskolaihoz képest gimnáziumban a hangérzékelés fizikai alapjaival, a húros hangszerek és sípok működésével és az ultrahang, zajszennyezés témakörével egészül ki. Emellett a hang kezelésére alkalmas programok ismerete, mérésre való használata is említve van. (3)

Az ehhez tartozó kerettanterv a témát a 14 órás „A hullámok szerepe a kommunikációban” témakörön belül tárgyalja. Az általános iskolás ismeretek részletesebb megismerése mellett a *javasolt tevékenységekben* láthatunk többletet a 7-8. osztályosoknak szóló kerettantervhez képest. A javaslatok leginkább mobilalkalmazással kapcsolatos kísérletezésre, mérésre adnak ötleteket.

Tanulási eredmények	A témakör eredményeként a tanuló - ismeri az emberi hangérzékelés fizikai alapjait, a hang, mint hullám jellemzőit, keltésének eljárásait; - átlátja a húros hangszerek és a sípok működésének elvét, az ultrahang szerepét a gyógyászatban, ismeri a zajszennyezés fogalmát.
Fejlesztési feladatok és ismeretek	- Hangszerek és egyszerű hangkeltő eszközök megfigyelése, a keletkező hanghullámok jellemzése. - Környezetünk hangterhelése, javaslatok a zajszennyezés csökkentésére.
Fogalmak	Hanghullám, a hullám hullámhossza, terjedési sebessége, frekvenciája.
Javasolt tevékenységek	- Környezetünkben előforduló különböző jellegzetes hangok erősségének mérése (suttogás, normál beszéd, kiabálás, utcai zaj stb.) mobilapplikációval vagy más műszerrel, anyaggyűjtés a zajártalomról. - Sípok, húrok hossz és hangmagasság kapcsolatának vizsgálata. (A sípokot helyettesíthetjük “kémcső pánsíppal”, a hangmagasságot mobilalkalmazással vagy gitárhangolóval mérhetjük) - Mi a legmagasabb hang, amit még hallasz? Az egyéni hangmagassági küszöb vizsgálata hanggenerátorral, vagy azt helyettesítő mobilapplikációval. - Különböző hangok “képének” vizsgálata oszcilloszkóppal, vagy megfelelő mobilalkalmazással.

2. táblázat: A 2020-as NAT-hoz készült gimnáziumi kerettanterv összefoglalása. (4)

Ez a legújabb érettségi követelményekben is megjelenik. Középszinten a fogalmi ismeretek és az alapvető hangtani jelenségek ismerete a hangsúlyos. Összefüggések helyett inkább a gyakorlati alkalmazások tudása fontosabb a diákok számára. Emelt szinten ez kiegészül az összefüggések nagyobb ismeretével és feladatmegoldással.

Témakör	Középszint	Emelt szint
Hangforrás, hanghullámok, hangerősség, hangmagasság, hangszín.	Ismerje az emberi hangérzékelés fizikai alapjait, a hang, mint hullám jellemzőit, keltésének eljárásait.	A hangtani alapfogalmakat tudja összekapcsolni a hullámmozgást leíró fizikai mennyiségekkel.
Állóhullám, duzzadóhely, csomópont, húrok, sípok.	- Ismerje az állóhullám kialakulásának feltételeit. - Ismerje a húros hangszerek és a sípok működésének elvét.	Tudjon feladatokat megoldani a húros hangszerekre és a sípokra vonatkozóan.
Ultrahang, infrahang, zajszennyezés.	Ismerje az ultra- és infrahang jellemzőit, néhány gyakorlati alkalmazást, a zajártalom mibenlétét.	- Ismerje a decibel mértékegységet, és annak nagyságrendjét az ember által szokásosan érzékelt hangtartományban. - Ismerje a Doppler-effektust.

3. táblázat: 2024. május-júniusi vizsgaidőszaktól érvényes érettségi vizsgakövetelmények hangtan témában. (10)

Az ehhez készült új gimnáziumi tankönyveket is megvizsgáltam. A 2020-as NAT alapján készült 9-10. osztályos tankönyvek 2. kötetében található a hangtan témaköre. Kétféle tankönyvet is kínál az Oktatási Hivatal. A „B” jelű tankönyv a „Periodikus mozgások” témakörön belül 1 hosszabb fejezetben (A hang) foglalja össze a tudnivalókat. Ez a könyv klasszikusabb módon, sorban végigveszi a tananyagban szükséges fogalmakat, jelenségeket, pár rövidebb olvasmánnyal kiegészítve. A könyvhöz készült tanmenetajánlás erre 2 órát szán. (11)

A másik, „A” jelű tankönyv „A hullámok szerepe a kommunikációban” témakörön belül 4 fejezetben tárgyalja a hangtant (Hogyan hallunk?; Zajszennyezés; A zene fizikája; A hangszerekben kialakuló állóhullámok). Ez a tankönyv jobban követi az alaptantervben megfogalmazott irányelveket, több gyakorlati példát mutat, változatosabb, és sok ellenőrző, vagy további kutakodásra ösztönző kérdést tartalmaz. Az első fejezetben az infra- és ultrahangok előfordulásával, felhasználásával és a hallás alapján való tájékozódással ismerkedhetnek meg a diákok. A második fejezetben a hangerősség fogalmáról, mértékegységéről és ennek hallással kapcsolatos jelenségeiről és a zajszennyezésről olvashatunk. Itt konkrét példák és telefonos mérési javaslat is látható. A harmadik fejezetben a hangmagasság, a hangközök és a hangszín ismerete van a középpontban, majd zárásként a hangszerekben kialakuló állóhullámokat ismerhetjük meg. Ebből is látszik, hogy a tankönyv

változatossága adott, hogy felkeltse a diákok érdeklődését a sok példán keresztül. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez csak akkor sikerülhet igazán, ha ehhez mérten kísérletekkel, tanulói aktivitásokkal közel tudjuk hozni a témát a diákok számára. A könyvhöz készült tanmenetajánlásban szereplő 4 órás órakeretben ezt meg is lehet valósítani. Ebben még segítségünkre lehet a tankönyvhöz tartozó okostankönyv is, amely videókkal és gyakorló feladatokkal egészíti ki a tankönyvi tartalmat. (9, 12)

3. LEHETŐSÉGEK A TÉMA TANÍTÁSÁBAN

3.1. Kísérleti és demonstrációs lehetőségek

3.1.1. Hullámok terjedésének szemléltetési lehetőségei

A legtöbb hullámtani jelenség esetében elengedhetetlen, hogy a diákokban szemléletes kép legyen a hullámokról és a hullámterjedésről. Ennek kialakításához különböző demonstrációk állnak rendelkezésünkre.

A hullámok transzverzális és longitudinális terjedését be tudjuk mutatni egy egyszerű lépcsőjáró rugó, ún. slinky segítségével. A rugót vízszintesen kifeszítve, majd az egyik végét fel-, illetve lefelé megrántva a kitérés irányára merőleges irányban láthatunk hullámterjedést, de, ha egy asztalra lerakva rugóirányú lökést végzünk a rúgón, akkor hosszanti hullámterjedés látható. Ezeket a mozgásokat megfelelő ütemben megismételve akár az állóhullámok fogalmát is bevezethetjük.

Bár egy színes rugó is maradandó emlék lehet a diákoknak, azonban a hullámterjedést tanulói aktivitással szemléltetve nagyobb élményben is részesülhetnek. Ehhez érdemes legalább 6-7 diákot, de akár az egész osztályt bevonni. A tanulókat fel kell sorakoztatni egymás mellé, ők fogják alkotni a közeget, ahol egy keltett zavar továbbterjedhet. A szélső ember, például a tanár lehet a hullámforrás, aki elindítja a mozgást. Mindenkinek az lesz a feladata, hogy a mellette (például balra) álló ember mozgását kövesse le kis késéssel. Fel-le guggolások esetén külső megfigyelőként szépen látszik a transzverzális hullámterjedés, amit az egész osztály bevonása során felvétel készítésével, vagy körbe rendeződve lehet láthatóvá tenni. Egyik irányba elfordulva, kezünket az előttünk álló vállára téve a hosszmenti hullámterjedés is könnyen bemutatható. Ekkor a hullámforrás előre-hátra mozgatja az előtte álló embert, majd ezt a mozgást követik le a diákok. Tapasztalataim szerint ez jó óra eleji aktivizáló feladat, amiben minden korosztály nagy lelkesedéssel vesz részt.



2. ábra: Óra eleji testmozgás a diákokkal a hullámterjedés szemléltetésére. (saját kép)

A hullámterjedés szemléltetését csatolt ingasor vagy Julius-féle hullámgép segítségével is el szokták végezni. Amennyiben ez nem elérhető, készíthetünk a hullámgéphez hasonló házi megvalósítású szemléltető eszközt. Ehhez elég csupán pár szívószál (anyaga nem lényeges) és némi ragasztószalag. Egy hosszú sávban, ragacsos végével felfelé elhelyezünk ragasztószalagot, majd erre merőlegesen, egyenként (3-4 centiméterenként) elhelyezzük a szívószálakat. Másik oldalról is ragasztószalaggal rögzítjük a szívószálakat, így kész is az eszköz. A kísérlet elvégzése igen egyszerű, elég csupán a kifeszített sor utolsó szívószálját hirtelen elforgatni. (13)

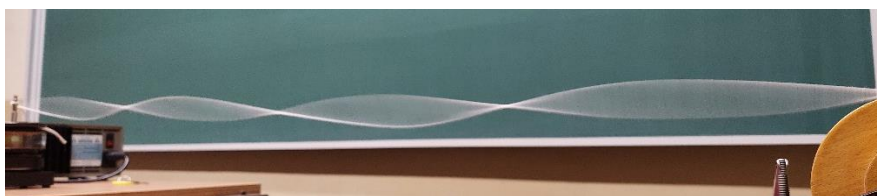


3. ábra: Szívószálból készült hullámgép. (saját kép)

Ezután könnyen felmerülhet a diákokban is a kérdés, hogy konkrét esetekben mitől függhet a terjedés sebessége. Talán már hallhattak, olvashattak is róla, hogy a hang különböző anyagokban különböző sebességgel terjed. De vajon mitől függ ez? Erre egy egyszerű kísérlettel választ kaphatunk. Rögzítsük egy hosszabb (pár méteres) gumiszalag egyik végét! Amennyiben nincs ilyenre lehetőségünk, az előbb használt műanyag lépcsőjáró rugó is ugyanúgy használható. Másik végét kezünkbe fogva kissé feszítsük meg, majd üssünk rá. Ekkor a szalagon végigfut az ütéssel létrejött elmozdulás, majd vissza is verődik a túlsó végről. Szerencsés esetben, azaz jó gumikötél esetén több visszaverődés is érzékelhető egymás után, amihez tartozó idő stopperrel mérhető. A kísérletet nagyobb megfeszítés esetén elvégezve azt tapasztaljuk, hogy ugyanannyi ismételt visszatéréshez kevesebb idő szükséges, tehát gyorsabban terjedt az ütésünk által keltett zavar. Ez természetesen a kötélben fellépő nagyobb összetartó erőnek köszönhető, mely egy szegmens kimozdulása esetén gyorsabban kimozdítja a szomszédos részt. Ebből könnyen megjegyezhető, hogy a szilárd anyagokban általában nagyobb a hang terjedési sebessége, mint folyadékokban vagy gázokban, ahol a csatoló erők a halmazállapot lényegéből adódóan egyre kisebbek. (Öveges, 1999, 335-337. o.)

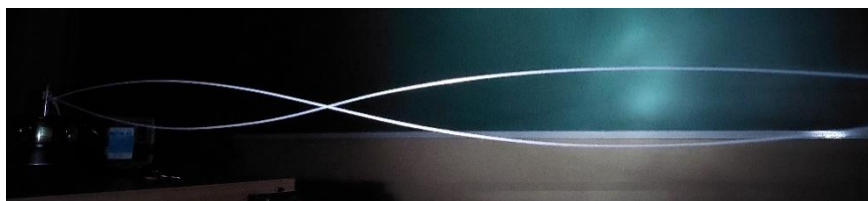
3.1.2. Állóhullámok kialakulása húron

A hangszerekben keltett hangok megismeréséhez elengedhetetlen az állóhullám fogalma. Ez utóbbi egy gumikötél rezgetésével könnyen bemutatható. Frekvenciagenerátorral adott frekvencián egy feszes gumikötél egyik végét fel-le mozgatjuk, míg a kötélmásik vége rögzített. Egy általános frekvencián rezgetve a kötelet, nem tapasztalunk meglepőt, az rezgésbe jön. Amint a gumikötél alapfrekvenciájával gerjesztünk, akkor nagy amplitúdójú állóhullám jön létre középen egy duzzadóhellyel, míg a két rögzített végen csomópontot láthatunk. A frekvenciát kétszeresére, háromszorosára és így tovább változtatva az alapfrekvencia további harmonikusait kapjuk és rendre 2, 3 és így tovább duzzadóhelyet tartalmazó állóhullámok jönnek létre. A rezonancia jelensége már ekkor is érdekes látvány a diákoknak, de az állóhullám elnevezés miatt még nem feltétlen szembetűnő.



4. ábra: Rezonanciahelyzet 4 duzzadóhellyel. (saját kép)

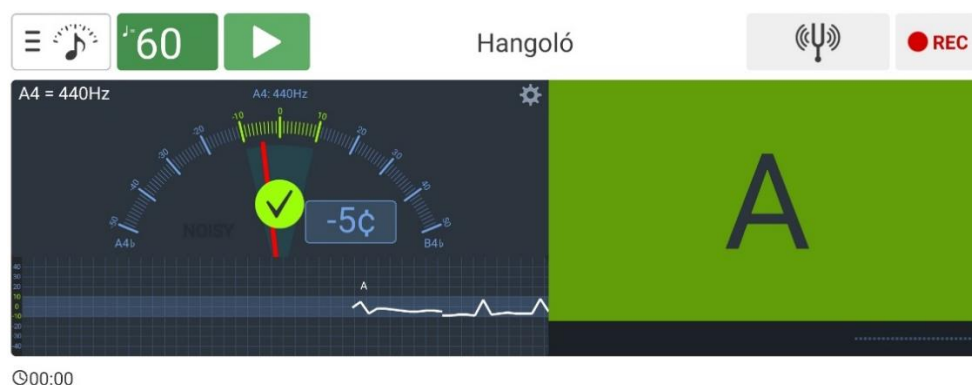
Ha azonban a rezgést stroboszkóppal adott frekvencián megvilágítjuk, a jelenség már világosabbá válik. Amennyiben a gerjesztés, tehát a létrejövő állóhullám frekvenciájával megegyező gyakoriságú fényvillanásokkal világítjuk meg a kötelet, akkor minden egyes felvillanásnál mindig minden pont ugyanabban a fázisában kerül megvilágításra, mivel két villanás között pontosan egy periódusnyi rezgést tesz. Így a kötélből valóban csak egy álló hullámalakot látunk időben állandóan. A villanások gyakoriságát növelve a rugalmas kötélminden pontja villanásonként egy kissé későbbi fázisban lesz megvilágítva, így szemünk a hullámalak lassú változását látja mintha sikerült volna lelassítanunk a mozgást. Ennél a kísérletnél érdemes kihangsúlyozni azt, hogy az általunk észlelt kép azon múlik, hogy milyen gyakran kapunk információt, hiszen például mérési eszközöknél is fontos tényező lehet a mintavételi frekvencia.



5. ábra: Stroboszkópos megvilágítás a rezgetéshez képest kétszeres frekvencia esetén. (saját kép)

3.1.3. Húros hangszerek megismerése

Az állóhullámok fogalmát megismerve áttérhetünk a húros hangszerek világára. Ezek működését egy egyszerű monokord segítségével is megérthetjük, de amennyiben valaki játszik húros hangszeren az osztályban, érdemes behozatni vele. Egy két végén rögzített húr végein, a kifeszített gumikötélhez hasonlóan, csomópontok alakulnak ki. Amennyiben az ujjunkkal lefogjuk a húrt valahol, majd így csak egy rövidebb részét pendítjük meg, azt tapasztalhatjuk, hogy – rövidebb húr, tehát rövidebb alaphullámhossz esetén – nő a hangmagasság. Így akár egy-egy zenei skála hangjait is megszólaltathatjuk csupán egyetlen húr segítségével. Zenekedvelő diákoknak izgalmas feladat kideríteni, hogy ehhez milyen helyeken kell lefogni a húrt. Jó hallásuk vagy akár egy telefonos hangoló program segítheti a munkájukat.



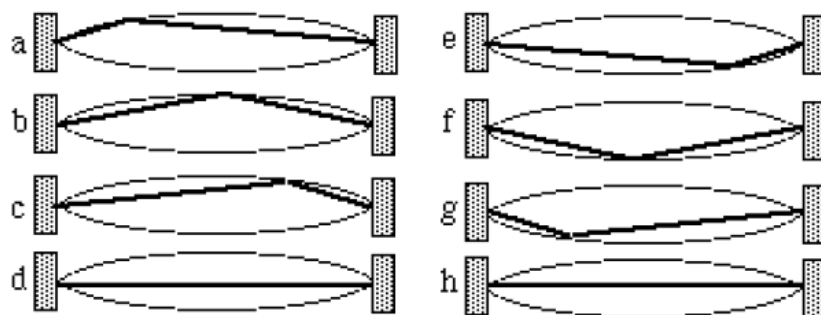
6. ábra: A hangoló program zölden jelzi, amikor kellően tisztán szól egy zenei hang. (Soundcorset hangoló, saját kép)

Mindenképpen érdemes bejelölni a hangokhoz tartozó helyeket, és innentől már csak egy kis zenei készség szükséges ahhoz, hogy egyszerűbb dallamokat akár csupán egy húr segítségével is el tudjunk játszani. Egy zenében jártas osztályban ekkor már nagyobb gyakorlás nélkül is el tudnak játszani a diákok egyszerű dallamokat, és tanárként is érdemes lehet egy-egy dal megtanulásába egy kis energiát fektetni.

Természetesen a létrejövő hang magassága olyan tényezőktől is függ, amit zenélés közben nem, vagy csak ritkán változtatunk. Egy hangszeren több különböző anyagú és vastagságú húr van, amivel jól szemléltethető, hogy a húr anyaga, vastagsága is befolyásolja a hang magasságát. Azonos hosszak esetén az az ökölszabály jól látható, hogy egy sűrűbb anyagból készült, tehát nehezebb húr lomhább rezgésbe tud jönni, hiszen mélyebb hang tartozik hozzá. A húrok rögzítése lehetővé teszi egy másik tényező szemléltetését is. Egyik végükön kulcsokkal vannak rögzítve a húrok, így mint minden húros hangszeren, a kulcsok csavarásával a húr feszességét is lehet változtatni. Minél jobban megfeszítjük a húrokat, annál gyorsabban terjed rajtuk a keltett rezgés, így azok annál magasabb hangot fognak adni.

Természetesen fogalmazódhat meg az a kérdés is, hogy milyen változásokat hoz az, ha más helyen pendítünk meg egy húrt. Erre a kérdésre a hangszín tárgyalása után lehet teljes választ adni, én is így fogok eljárni (lásd 3.3.6. fejezet).

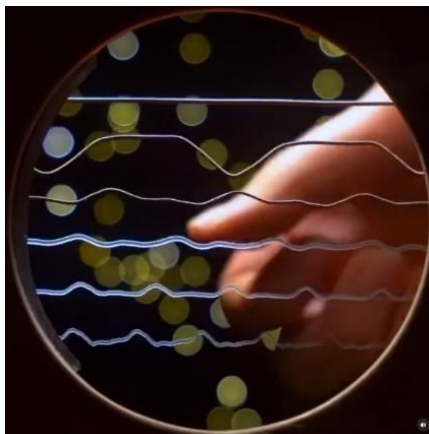
A diákok számára izgalmas feladat lehet a szemmel nehezen követhető rezgés lassított rögzítése telefon segítségével. Amennyiben a húroknak csak egy kis részét vizsgáljuk, nem lepődünk meg az eredményen, a húrnak fel-le mozgását láthatjuk lassítva. Hosszában vizsgálva a húron végbemenő mozgást találhatunk videókat az interneten is, ahol jól látható, hogy a pengetéstől a zavar terjedése egy oda-vissza mozgó maximumot hoz létre az alábbi módon. (14)



7. ábra: Hegedűhúr mozgása. (Ludmány, 2017)

3.1.4. Érdekes videók a közösségi médiában

A diákok a közösségi médiában böngészve is könnyen belefuthatnak húrok mozgását bemutató videókba. Én például az Instagram alkalmazáson találkoztam a következő képkockát tartalmazó videóval.



8. ábra: Érdekesen hullámzó húrok. (15)

Gitárosok körében kedvelt trenddé vált az ilyen videók készítése. De ilyen képeket az Oktatási Hivatal által kiadott 2020-as NAT-hoz igazodó Fizika 9-10. osztályos tankönyvében is láthatunk.



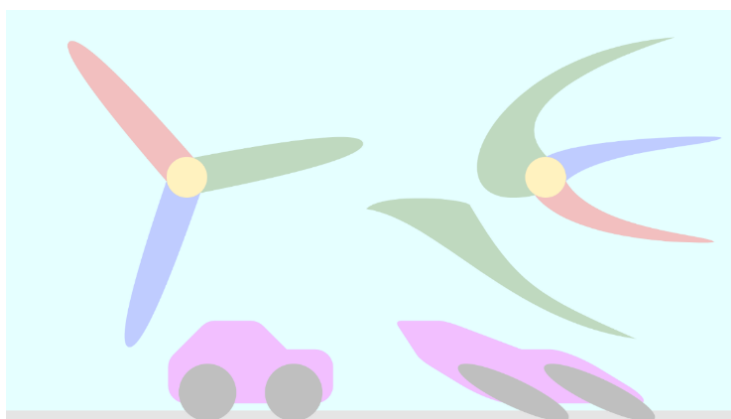
■ A kép egy megrezgetett gitár húrjain kialakuló állóhullámokról készült videófelvétel egy kockája. A videó ezen a címen érhető el: <http://www.sciencealert.com/watch-what-guitar-strings-are-really-doing-up-close>

9. ábra: Tankönyvi ábra a húrok rezgéséről. (Fizika 9-10. II. kötet, 150. o.)

Hívjuk fel a figyelmet, hogy a kép, és a hozzá tartozó leírás megtévesztő lehet, hiszen azt szoktuk tanítani, hogy a húrokon kialakuló állóhullámoknál az ilyen kis hullámhosszhoz tartozó harmonikusok nem jelennek meg jellegzetesen. Még inkább gyanakvóbbak lehetünk, ha az előbb említett lassított kamerás felvételeket megnézzük.

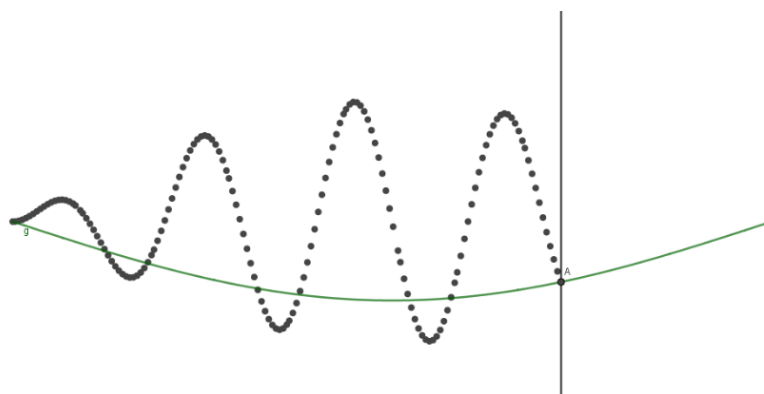
Egy technikai érdeklődésű csoport esetén az, hogy miért láthatók ennek ellenére a húrok a felvételen a képkockáknak megfelelően, akár otthoni kutatómunkának is feladható. Keresés esetén a legjobban célravezető kulcsszó ebben az esetben a „rolling shutter”. Ez egy

képrögzítési mód, mely során a videofelvétel képkockáit nem egyesével, pillanatképszerűen rögzíti a kamera, hanem fentről-lefelé, folyamatában hasonlóan egy scannerhez. Ennek szemléltetésére sok kiváló animációt és videót találhatunk az interneten. Például a következő animációból kiragadott képen látszik, hogy milyen kép készül egy gyorsan forgó propellerről vagy éppen egy gyorsan mozgó autóról.



10. ábra: Rolling shutter effektus szemléltetése animációval. (16)

Ezt ismerve már könnyen megmagyarázható a húrról készült felvétel is. Ehhez egy GeoGebra animációt is készítettem a jobb érthetőségért.



11. ábra: GeoGebra animáció a jelenségről. (képkocka saját animációról)

A scannelő folyamatnál gyorsabban mozog a húr, így egy frame-hez tartozó periódus alatt több rezgési periódus is végbemegy. Ahogy a húr egyes pontjait egyre későbbi fázisban fotózza le a kamera, úgy folyamatában megint csak egy hullámzó képet kaphatunk, viszont sokkal gyakoribb duzzadóhelyekkel, mint azt egy szokványos lassított felvételen látnánk.

A mobiltelefonok többsége ilyen módon készít felvételeket, így akár a diákok is kipróbálhatják otthon ezt a jelenséget. Ehhez a shutter speed értéket érdemes 1/1000-1/2000 közötti értékre állítani. Ezt én is megtettem, a végeredmény pár képkockája alább látható.



12. ábra: Megpendített hűrok a gitáron. (saját felvétel)

Természetesen itt úgy érdemes felvételt készíteni, hogy közben 90 fokkal elforgatjuk a telefonunkat, hiszen ekkor csak az egyik irányban kapunk hullámzó hatást, ami megerősítésként szolgálhat a magyarázatunkhoz. Az otthoni vizsgálódásnak egy gitár hiánya sem szab határt, hiszen a kísérlet elvégezhető például egy kifeszített befőttes gumi megpengetésével is.



13. ábra: A megpendített befőttes gumiról készült felvétel egy képkockája. (saját felvétel)

3.1.5. Állóhullámok kialakulása felületen

A húros hangszerek után a hangszerek egy másik csoportját, az ütős hangszereket tárgyalva megmutathatjuk a jelentős esztétikai élményt is nyújtó hárták, lemezek rezgéseit szemléltető kétdimenziós porábrákat.

Ilyenfajta vizsgálatokkal a korai akusztika összefoglalójaként is ismert Ernst Chladni jelentkezett először a 18. század végén. Különböző alakú fémlemezket hozott rezgésbe hegedűvonó segítségével. Ekkor a lemez egyik sajátfrekvenciáján jön rezgésbe, amit egyrészt fülünkkel is jól hallhatunk, másrészt, ha például sót vagy más apró szemcsés anyagot szórunk a lemezre, akkor az a csomóvonalak, tehát a rezgést nem végző pontok vonalai mentén rendeződik el. Ahol pedig rezgésbe jön a fémlap, ott ledobálja magáról a sószemcséket. A lemezt más-más helyen lefogva, és más helyen végighúzva a vonót, mindig különböző ábrákat, az ún. Chladni-féle porábrákat kapjuk. Ehhez természetesen más hangok is tartoznak, ami nem meglepő, hiszen ahol lefogjuk a lemezt, ott biztosan csomópont lesz, ahol rezgésbe hozzuk, ott biztosan duzzadóhely, amellyel más sajátfrekvencia is jár. Ez látható az alábbi képeken.



14. ábra: Vonóval rezgésbe hozott lemezen létrejövő porábrák. (saját képek)

Megemlíthetjük, hogy ennek a módszernek gyakorlati alkalmazása is volt, mivel alkalmas hegedűtestek rezgéseinek vizsgálatára is.

Erre a kísérletre már többen felfigyeltek, köztük I. Napóleon francia császár is, aki díjat tűzött ki az addig ismeretlen matematikai magyarázatért. Hosszas munka során Sophie Germain francia tudósnő volt az, aki a leghelyesebben tudta megmagyarázni a lemez rezgéseit, ezzel megkapva a díjat, és ami a legfontosabb, nőként is elismerték szaktudását, ami ebben a korban nagyon ritka volt. (17)

A Chladni-féle porábrákat úgy is előállíthatjuk, hogy egy lemezt a rögzítési pontjában rezgetjük. Ehhez egy PASCO gyártmányú, erre a kísérletre tervezett összeállítást használtam. A rezgetés frekvenciáját folyamatosan változtatva viszonylag könnyen találhatunk sajátfrekvenciákat.



15. ábra: Porábrák négyzet- és kör alakú lemezen. (saját képek)

Hasonló ábrákat az interneten böngészve vagy akár streaming sorozatok nézése közben is láthatnak a diákok. Megfelelő kísérleti eszközök birtokában a kísérletező kedvű, videókészítés iránt érdeklődő diákok ezeket megmutató kisfilmeket is készíthetnek. Csapó Zita, Sashalmi Balázs és Vadász Levente másodéves Fizikus BSc szakos hallgatókkal mi is vállalkoztunk arra, hogy megpróbáljuk hasonlóan látványosan bemutatni a jelenséget.



16. ábra: Porábrák A Gyűrűk ura: A hatalom gyűrűi című sorozat bevezető képsoraiban (fent) és a készülő kisfilm két képkockája (lent). ((18), ill. saját képek)

Amennyiben nincsen megfelelő eszközparkunk a kísérlethez, akkor akár otthoni eszközökkel is megpróbálhatjuk a klasszikus kísérletet bemutatni. Ha egy vezeték nélküli hangszórót egy üregbe, pl. műanyag dobozba vagy vázába helyezünk, és arra valamilyen rugalmas hártyát, pl. léggömb anyagát helyezzük, a hártyára sót szórva, majd a hangszóróra telefonos frekvenciagenerátorral hangot kapcsolva láttathatjuk a felületi állóhullám csomóvonalait. A jelenség magyarázata rugalmas hártyán is ugyanaz, mint amit a lemez esetében láthattunk.



17. ábra: Üregbe helyezett hangszóróval megrezgetett hártya és telefon frekvencia generátor applikációval. (saját kép)

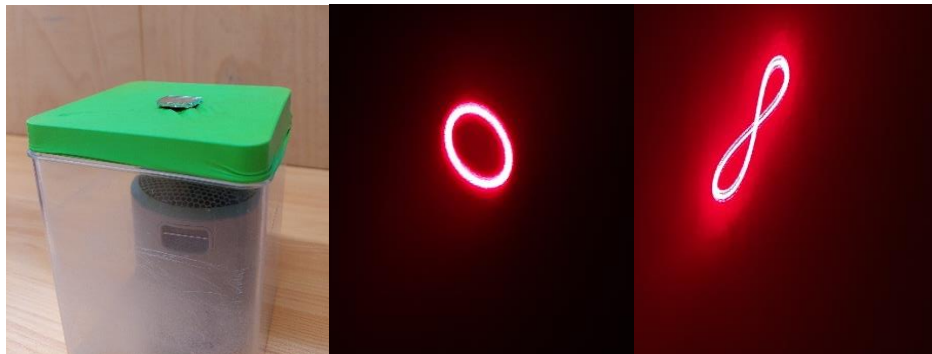
Különösen érdekesek azok a videofelvételek, amelyek lassítva mutatják be egy dobbőr vagy egy cintányér rezgéseit. (19) Ezeknél a felvételeknél, különösképp az utóbbinál, a lassított felvétel elénk tárja a meglepő tényt, hogy a cintányér, akár egy nagy karimájú kalap a szélben, nagy amplitúdójú rezgéseket végez, annak ellenére, hogy szabad szemmel nagy kitérések egyáltalán nem láthatók.

Hártyák rezgése régen még a várvédelemnél is fontos szerepet játszott. Az egri vár alatti járatokban is dobokat hagytak, amikre apró kavicsokat, rizst vagy hasonló apró szemeket raktak. Így, ha a közelben járatásással próbálkoztak a törökök, akkor a rezgések továbbterjedtek a dobig, ami szintén rezgésbe jött. A kavicsok mozgását látva és hallva a védők már kezdhettek is gondolkodni a következő védekező lépésen.



18. ábra: Az Egeri vár alatti járatokban lévő dobok. (saját kép)

Egy hártya rezgését másképpen is láthatóvá tehetjük. Ehhez egy tükröt ragasztottam egy lufiból kivágott gumihártyára, amire lézerrel világítottam. Ekkor a különböző rezgéseknek megfelelően különböző ábrákat tudunk láttatni a falon. A frekvenciát változtatva, esetleg két, vagy több különböző frekvenciájú hang keverékéből különösen szép rajzolatokat kaphatunk.



19. ábra: Üregre kifeszített gumihártya tükörrel (bal) és a falon létrejövő görbék (közép, jobb).
(saját képek)

A diákok kreativitására bízhatjuk az eszköz további alkalmazását. Meg lehet vizsgálni mi történik, ha éppen egy hangszer hangjával gerjesztjük a rezgést, de a beszédhangunkkal is játszódhatunk, amennyiben valamilyen applikáció segítségével a telefonunk mikrofonjának kihangosítójaként használjuk a hangszórót (20).

3.1.6. Kísérletek hangvillákkal

A hangvillával kapcsolatban a diákoknak leginkább az az ének órai emléke lehet, amikor az énektanár a rezgésbe hozott hangvillát a füléhez tartva hallja a zenei A hangot, bár ez az osztály számára egyáltalán nem hallható. Amennyiben az asztallapra vagy a táblához érintjük a hangvillát, akkor hallhatóvá válik a hang, így a rezonátortestek szerepe is jól szemléltethető.

A demonstrációs hangvillák emiatt egy rezonátordobozzal vannak felszerelve, melyekben az üreg hossza éppen olyan, hogy a hozzá tartozó alapfrekvencia megegyezik a hangvilláéval. Ezzel könnyen magyarázatot kapunk arra is, hogy például a vonós hangszereknél miért fontos, hogy egy nagy hangdobozra, a hangszertestre legyenek erősítve a húrok. Egy húr csak kis felületen tudja rezgésbe hozni a levegőt, de egy hangszertest nagy felületű hangsugárzóként erősíti fel a hangot.

Ezzel kapcsolatban énektanárok még azt a jelenséget szokták bemutatni, hogy a könyökhöz érintett hangvilla akkor is hallatszik, ha eközben csuklójukhoz érintik a fülüket. Ez a demonstráció akkor is hasznos lehet, ha éppen a csontvezetési fülhallgatókkal kapcsolatban van kérdésük a diákoknak.

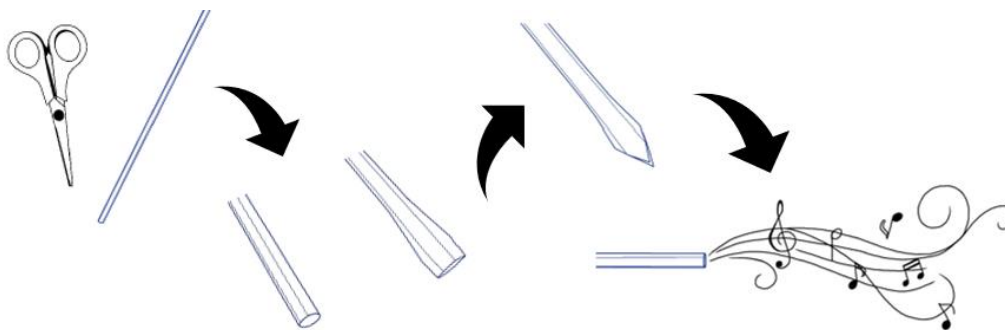
Ha két ugyanolyan hangvilla egyikére nehezéket rakunk, akkor annak kismértékben megváltozik a frekvenciája. Ekkor két hangvilla egyidejű megszólaltatásakor nem egy állandó magasságú hangot hallunk, hanem egy periodikusan változót. Ez a lebegés jelensége, mely hangszerek hangolásánál is észlelhető. Ha ilyet hallunk, akkor tudjuk, hogy a két hangszert még nem sikerült összehangolnunk. Ha nincs ehhez két egyforma hangvillánk, akkor sincsen probléma, hiszen a jelenséget természetesen jelgenerátorral előállított hangokkal is megismételhetjük, de érdemes kézzel fogható módon is bemutatni ezt, hogy nehogy azt gondolják a diákok, hogy ez csak a hangszórók egy sajátossága.

A rezonátordobozokkal ellátott hangvillákkal a rezonancia jelensége is jól bemutatható. Ha egymással szembe fordítjuk a két dobozt, és az egyik hangvillát rezgésbe hozzuk, majd egy kis idővel később elnémítjuk, akkor hallható, hogy a rezonancia miatt a másik hangvilla is rezgésbe jött.

További, ehhez kapcsolódó kísérlet lehet az, amikor egy tanteremben egy hangszórón folyamatosan változtatjuk a frekvenciát. Ebben az esetben azt figyelhetjük meg, hogy bizonyos frekvenciák esetén valami, például egy fűtőtest vagy az ablakok rezgésbe jönnek. Ezt órán bemutatva hangsúlyossá tehető az a tény, hogy minden testnek van sajátfrekvenciája.

3.1.7. Szívószálduda

Nem feltétlenül kell tudni fúvós hangszeren játszani vagy ilyen hangszert birtokolni ahhoz, hogy a fúvós hangszerek fizikájával ismerkedhessünk, mindezt saját élményekből. Ehhez elegendő egy szívószál és egy olló, és már készülhet is saját fúvós hangszerünk. Már az elején érdemes megjegyezni, hogy a kísérlet sokkal könnyebben elvégezhető műanyag szívószálakkal, de a továbbra is megvásárolható papír szívószálak esetén is működik, habár ez utóbbi több gyakorlást igényel. A szívószál egyik végét fogainkkal, vagy egy fogóval el kell vékonyítani, majd ezen 2 vágással háztetőalakú nádat kell kialakítani. Ha láttunk már hangszernádat, például oboa vagy fagott esetében, akkor tudjuk, hogy mindkét esetben két vékony nádlap helyezkedik el egymáshoz nagyon közel, ezért nagyon fontos a megfelelő ellapultság.



20. ábra: A szívószálduda elkészítésének folyamatábrája. (saját ábra)

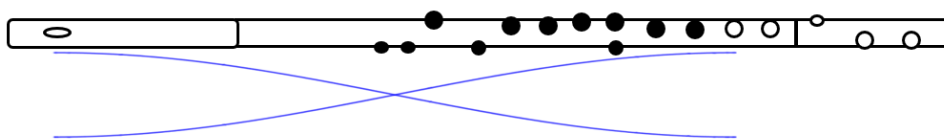
Ekkor megfújva az elkészült sípot, az elnevezésnek megfelelően valóban dudaszerű hangot kapunk. Ez annak köszönhető, hogy amikor elfújunk a vékony lapok között, akkor az áramló levegőben a Bernoulli-törvénynek megfelelően lecsökken a nyomás, így összeérnek a nádrészek, viszont ekkorra a megszűnő áramlás következtében megszűnik a nyomáskülönbség is, így újból szétnyílik a fúvóka, hogy a mozgás megismétlődése ezután a szívószálban lévő levegőoszlop rezgésbe hozatalát eredményezze. Megint természetes a kérdés, hogy hogyan változik a hangmagasság a szívószál hosszával. Ezt a diákok a húrokkal vett analógiából várhatóan gyorsan meg tudják mondani, amit könnyen tesztelhetünk is, ha az ollóval rövidebbre vágjuk a hangszerünket.

Természetesen több szívószálat egybefűzve hosszabb levegőoszlopot is meg tudunk szóltatni, ami már egy mély, hajókurtszerű hangot és vidám diáksereget fog eredményezni.

A hangszer továbbfejlesztésének szinte csak a képzelet szab határt. Lyukakat vágva a szívószálra a hangok változtatására is lehetőség nyílik. Egy konyhai tölcsért illesztve a szívószálhoz azt is meg tudjuk értetni, hogy mire szolgál a rézfúvós hangszereken szembetűnő korpuzos kialakítás. Ilyenkor a tölcsér is rezgésbe jön, ezáltal nagyobb felületen kisugározva a hangot nagyobb hangerősséget eredményez.

3.1.8. Fuvola

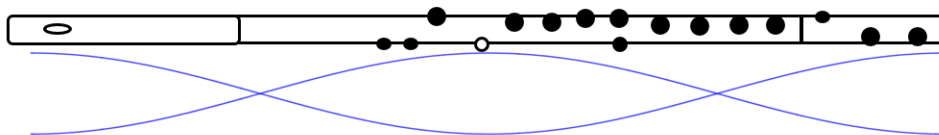
Ezután kicsit könnyebb megérteni már, hogy egy konkrét fúvós hangszeren hogyan tudjuk változtatni a hangmagasságot. Erre talán egy furulya a legalkalmasabb, amin a lyukak könnyebben láthatóak, mivel billentyűk nincsenek a hangszeren. De természetesen egy billentyűs hangszeren is, mint például a fuvalán ugyanúgy magyarázhatjuk a hangmagasság változását a billentyűk letakarása közben. Amennyiben egymás után takarjuk le a billentyűket, egyre mélyebb hangokat kapunk. Ezt leegyszerűsítve úgy kell tekinteni, mintha az utolsó nyílt lyuknál lenne a rezgésbe hozott levegőoszlop vége, ahol már nagy amplitúdójú rezgést tud végezni a levegő, ahogy ezt a szívószál végénél is tette.



21. ábra: A fuvalában kialakuló állóhullám mozgási amplitúdójának ábrázolása. (Microsoft Word, GeoGebra, saját ábra)

Ehhez érdemes a húroknál látott analógiát bemutatni animációkkal (21), azt, hogy mozgási csomópontok, duzzadóhelyek itt is vannak, és azt, hogy ezt hogyan kell elképzelni. Minél távolabb van a fúvókától az ilyen duzzadóhely, annál nagyobb hullámhosszú, tehát kisebb frekvenciájú, azaz mélyebb hang fog keletkezni.

Fontos lehet tudni, hogy a hangmagasság változtatására más lehetőség is van. Erősebb gerjesztéssel egy magasabb felhang fog dominánsabban megszólalni, ezáltal magasabb hangot hallunk a fuvalán. Ezt erősebb fújással, esetleg a száj és fuvalatartás módosításával tehetjük meg. Így bemutatható az is, hogyha lefogunk például egy alsó C hangot a fuvalán, akkor ezzel a fogással megszólaltathatók sorra a C-C'-G'-C''-E'' felhangok. Ezek frekvenciáját megmérve arra lehetünk figyelmesek, hogy az alaphang egészszámú többszöröseit kapjuk. Ez teljesen analóg a húron létrejött állóhullámoknál kapott rezonanciaesetekkel. Itt is hasonló a jelenség, a nagyobb gerjesztés hatására több duzzadóhely tud kialakulni, ami kisebb hullámhosszt és ezáltal magasabb frekvenciát eredményez. Meggyőző erejű lehet, ha a fuvalán minden billentyűt lefogva megszólaltatjuk az alsó C hangot. Ennek az oktávját nem csak erősebb fújás esetén kaphatjuk meg, hanem akkor is, ha a fuvala közepén elhelyezkedő alsó billentyűt mint egy mozgási duzzadóhelyet képezve kinyitjuk. Ez mutatja, hogy az erősebb fújásnál is ugyanilyen geometriájú állóhullámnak kell létrejönnie.



22. ábra: Az alaphang oktávjának megszólaltatása a fuvola közepén való billentyű kinyitásával.
(Microsoft Word, GeoGebra, saját ábra)

Az állóhullámok szemmel is látható bemutatására segítségül hívhatjuk az interneten megtalálható animációkat, illetve használhatunk Kundt-csövet. A Kundt-cső hétköznapi eszközökből való előállítására a következő megoldást találtam.

Egy 600 ml-es bordázatlan műanyag palackba hungarocell darabkákat raktam és az üveg szájához egy hangszórót rögzítettem. A frekvenciát változtatva azt tapasztaltam, hogy rezonanciahelyzetekben az apró fehér darabkák szabályszerű elrendeződést követnek.



23. ábra: Rezonanciahelyzet 920 Hz-es frekvencia esetén. (saját kép)

A fotón jól látható, hogy a palack közepén heves mozgásban vannak a szemcsék. A rezonanciakép egy két végén zárt cső esetéhez hasonlít, ahol közepén van mozgási duzzadóhely, azaz nyomás-csomópont. Fontos felhívni a figyelmet, hogy míg például a Chladni-féle porábráknál a mozgási duzzadóhelyekről eltűntek az apró szemcsék, addig a levegőben létrejövő állóhullámok esetében éppen az ilyen helyeken gyűlnek össze.

Kétszeresére változtatva a frekvenciát már két élénk mozgási hely látszódik, ezzel láttatva azt, amit a fuvolánál is tapasztaltunk, miszerint magasabb gerjesztés esetén gyakrabban lesznek csomópontok és duzzadóhelyek.



24. ábra: Második felharmonikus. (saját kép)

A felharmonikusok megjelenése is azt mutatja, hogy a palackból kialakított Kundt-cső két végén zárt rezonanciacsőként alkalmazható. Mindezt az is alátámasztja, hogy a palack nyakától mért 19 cm-es hossz az alapfrekvenciához (920 Hz) tartozó körülbelül 37 cm-es hullámhossz fele.

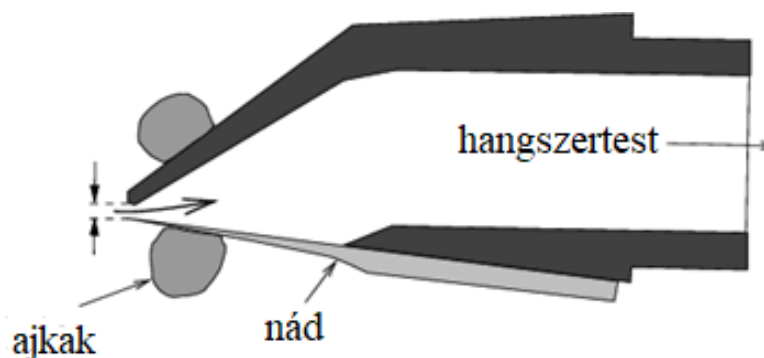
További érdekesség a kísérletben, hogy a hungarocell szemek csíkokban, tarajosan rendeződnek el, ami a 23. ábrán jól látszik. Ennek a vizsgálata túlmutat dolgozatom keretein, további céljaim között szerepel.

Természetesen itt még nem állunk meg a fuvola megismerésében. A hangszer hangolása a fuvolafej helyzetének változtatásával tehető meg, ha kijebb húzzuk, akkor meghosszabbítva a levegőoszlopot mélyebb hangot kapunk. Látjuk, hogy itt máshogy történt a hangolás, mint a húros hangszerek esetén, hiszen ott a feszességgel a terjedési sebességet megváltoztatva tudunk frekvenciát változtatni. A terjedési sebesség megváltoztatására a fuvolánál és más fúvós hangszereknél úgy van lehetőség, hogy a hangszert valamilyen más gázzal, például héliummal töltjük meg. Ezt úgy tudjuk legegyszerűbben demonstrálni, ha úgy játszunk a hangszeren, hogy előtte héliumot lélegeztünk be. Mivel a hang terjedési sebessége függ a közegtől – a héliumban nagyobb, mint a levegőben –, ahogy megtelik a hangszer héliummal, úgy folyamatosan egyre magasabb hangon fog szólni.

A kísérletből következik, hogy további, a hallható hang frekvenciáját, illetve a hangszer hangolását befolyásoló tényező a levegő hőmérséklete. Magasabb hőmérsékleten nő a terjedési sebesség, ezért egy melegedő koncertteremben a fúvós hangszerek feljebb „csúsznak”, míg a húros hangszerek a hőtágulás miatt kissé alacsonyabban szólnak, ami komoly intonációs feladat elé tudja állítani a zenészeket.

Fuvolával érdemes azt is bemutatni, hogy amennyiben csak a fejét fújjuk meg a hangszernek, majd ezt megtesszük úgy is, hogy befogjuk a végét, akkor második esetben egy oktávval mélyebb hangot kapunk. Ezzel beláthatjuk, hogy egyazon csőhossz esetén a zárt síp mindig egy oktávval mélyebb hangon szól, mint a nyitott verziója. Ezek után érdemes feltenni

a tankönyvek által is gyakran emlegetett kérdést, miszerint miért lehet, hogy egy fuvola és egy klarinét közel ugyanolyan hosszú, mégis egy oktávval mélyebb alaphangja van a klarinétnak. Már készen vagyunk a válasszal: míg a klarinét zárt sípként viselkedik, addig a fuvola nyitottként. Az egyértelmű, hogy mindkét hangszer végén könnyen tud nagy rezgéseket végezni a levegő, de a fúvókák esetében ez nincs mindkét esetben így. Míg a fuvola nagy szájnyílása nyitott véget eredményez, addig a klarinét apró nádnyílása nem változtat azon, hogy geometriáját tekintve egy zárt hengervégbe csatlakozik.



25. ábra: Egy klarinétfúvóka keresztmetszete. (22)

3.2. Öveges-kísérletek modern köntösben

Öveges József tanár úr „Az élő fizika” című könyvében több fejezetet szentel a hangtannak. Kiváló, mindennapi, szemléletes példákon keresztül mutatja be az alapvető hangtani jelenségeket. Ez persze önmagában is sok lehetőséget, ötletet adhat nekünk a téma tanításában, de érdemes a ma elérhető eszközök adta lehetőségeket kihasználva modern köntösbe öltöztetni a kísérleteit. A továbbiakban erre mutatok be példákat.

3.2.1. Tájékozódás hallás alapján

Öveges professzor élénken emlékezett vissza azon emlékeire, amikor a természetben sétálva tücsökciripelést hallva próbálták megkeresni a hang forrását. Ez nagyon nehezen sikerült nekik a sokféle visszaverő felület, illetve a kevésbé jól érzékelhető magas frekvencia miatt. A jelenséghez szerencsére nem kell addig várnunk, amíg a szabad ég alatt egy tücsök megtisztel minket a muzsikájával. Tanóra előtt érdemes eldugni egy kis méretű hangszórót a teremben nem látható helyre. Ekkor egy nagyobb frekvenciás, pl. 8000 Hz-es hangot rövid ideig lejátszva kérjük meg a diákokat, hogy mutassanak abba az irányba, ahonnan hallják a hangot. Minden esetben, amikor ezt kipróbáltam, akkor nagy összevisszaság volt a véleményekben. Jól látható általában, hogy vannak olyan részei a teremnek, ahol jól meg tudják határozni a hangszóró helyét, de sok helyen ez nem sikerül. A sikerességi ráta természetesen a terem akusztikai bonyolultságától függően változó. Tapasztalatom szerint ez jó motivációs kísérlet lehet egy tanórához, mert a jelenség megértéséhez a hangoknak több tulajdonságát is meg kell ismerni.

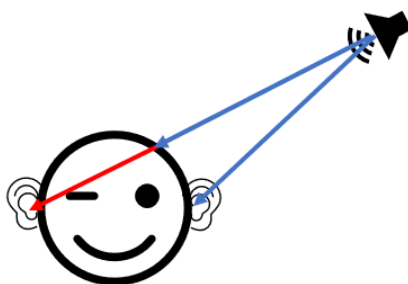
Már az is egy természetes kérdés lehet, hogy egyáltalán mi alapján tudunk tájékozódni a hallásunk segítségével. Ezt megvizsgálhatjuk direktebb módon is. Ehhez egy vezeték nélküli hangszórót erősítettem fel egy rúdra. Egy diák segítségével is szükségünk lesz, aki csukott szemmel mindig abba az irányba mutat, ahonnan éppen egy rövid, például 400 Hz-es hangot hall. A hangforrás helyét a rúd segítségével egyszerűen tudjuk változtatni.



26. ábra: A kísérlethez használt saját készítésű eszköz. (saját kép)

A tapasztalatom az, hogy mindenki jól meg tudja határozni az irányt amikor a hang jobbról vagy balról érkezik, de a másik három – elöl, mögül és felül – irány beazonosítása nehezebben megy. A hátulról és felülről érkező hangok irányát sokszor eltévesztik a tanulók, akár mindig előre mutatnak, főleg, ha nem hangsúlyozzuk ki előtte, hogy tényleg bármilyen irányból jöhet a hang.

Rövid hangok esetén a tájékozódás annak köszönhető, hogy amikor egy hangforrásból elindul egy hang, az általában az egyik fülünket hamarabb éri el, amit nagyon érzékenyen képesek vagyunk érzékelni. Természetesen az is hozzájárul az iránymeghatározásunk sikerességéhez, hogy a fejünk elnyeli a hangok egy részét, ezzel intenzitásbeli különbséget is okozva a füleinkkel érzékelt hangok között.



27. ábra: A hallás alapján való tájékozódás alapjának bemutatása. (Microsoft Word, saját ábra)

Akkor nehezebb a tájékozódás, amikor a két fülünket egyszerre éri el a hang, vagy az eltérés nagyon parányi (kisebb, mint 3 százvezred másodperc). Ennek köszönhetően csak a beérkező hangok időpillanatából nem tudunk különbséget tenni a füleink szimmetriasíkjából érkező hangok esetében. A fülünk kagylós kialakítása kicsit segít az irányérzékelésben ekkor is, de ez nem jelent nagy pontosságot. (Öveges, 1999, 395-398. o.)

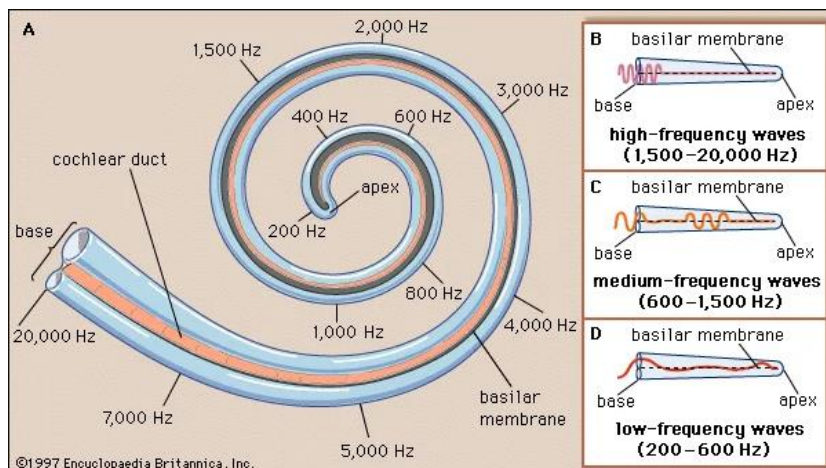
Biológiai vonatkozásait is érdemes említeni a jelenségnek, hiszen az állatvilágban okosabb megoldásokat találhatunk erre a problémára. Például a baglyok fülei különböző magasságban és szögben helyezkednek el. Ez az aszimmetria segíti a pontosabb tájékozódást és az előbb felsorolt problémák elkerülését. Amikor a kutyák, macskák, esetleg nyulak „hegyezik” a fülüket, az szintén hasonló céllal történik. (23)

3.2.2. Hangmagasság és a hallás

Az első kísérletben azt tapasztalhattuk, hogy a magas hangok érzékelése is okozhat problémákat. Ezzel kapcsolatban a hallásunk két tulajdonságát kell megismernie a diákoknak. Egyrészt azt, hogy a hallható hang frekvenciája a tankönyvek által általában 20 és 20000 Hz közöttinek írt intervallumba esik, másrészt azt, hogy a fülünk érzékenyebb bizonyos frekvenciatartományokra.

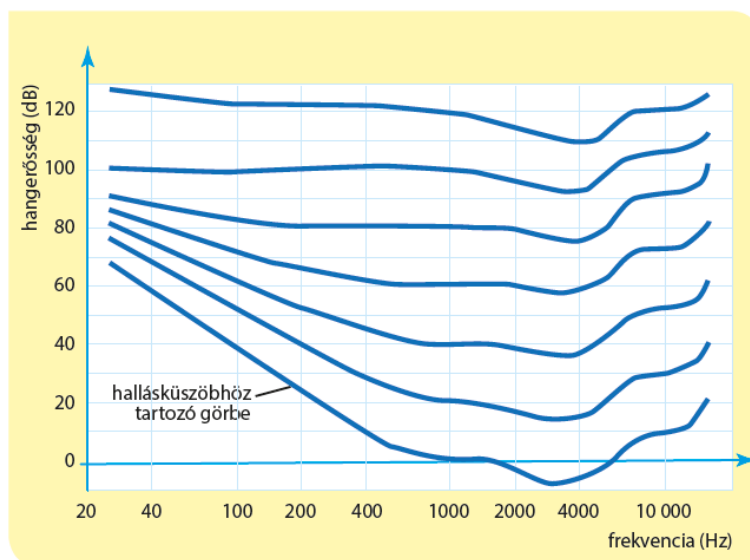
Az előbbi vizsgálatát egy frekvenciagenerátor alkalmazás (24) segítségével tehetjük meg, ami lehetőséget nyújt frekvenciák közötti folytonos átmenet lejátszására. Ha 20000 Hz-ről elindulva mélyebb hangok felé a diákok és a tanár is akkor emelik fel a kezüket, amikor már hallják a hangot, akkor látható, hogy ez a hanghatár személyenként és a korról is változik. Megnyugtató lehet az a tény, hogy a mindennapokban ez nem nagy probléma. Amikor beszélünk, akkor 1000-1500 Hz alatt történik, ami természetesen azt jelenti, hogy a jelentős felhangok is mind ebben tartományban vannak. Egy zenekarban a legmagasabb alaphangja a pikolónak van, de még ez is 5000 Hz alatti, sőt, egy zeneműben is a jelentős felhangok 12000 Hz alattiak. Tehát, ha valaki még jól tudja érzékelni a 12000 Hz-es hangokat, akkor közel teljes zenei élményekben lehet része. (Öveges, 1999, 332-333. o.)

De egyáltalán hogyan tudunk megkülönböztetni különböző rezgésszámú hangokat? És miért csökken hallásunk felső határa a kor előrehaladtával? Ehhez érdemes megemlíteni Békésy György munkásságát, amiért 1961-ben orvosi élettani Nobel-díjat kapott. Elmélete szerint az ún. csigát kitöltő folyadékban a hanghullámok továbbterjednek és rezgésbe hozzák a csiga falán elhelyezkedő hártyszerű membránt. A különböző frekvenciákat annak köszönhetően tudjuk megkülönböztetni, hogy ezek esetén a membránnak mindig más és más része jön rezgésbe. A rezgéseket apró szőrsejtecskék érzékelik, amikből magas hangokra érzékeny sokkal kevesebb van, ráadásul ezek idővel kikopnak, ezért csökken a hallástartományunk. Ezért is kell vigyázni a hosszú ideig tartó, erős intenzitású hangokkal, mert a szőrsejtek elhasználódnak, tönkremennek, ezzel maradandó halláskárosodás lép fel. (25)



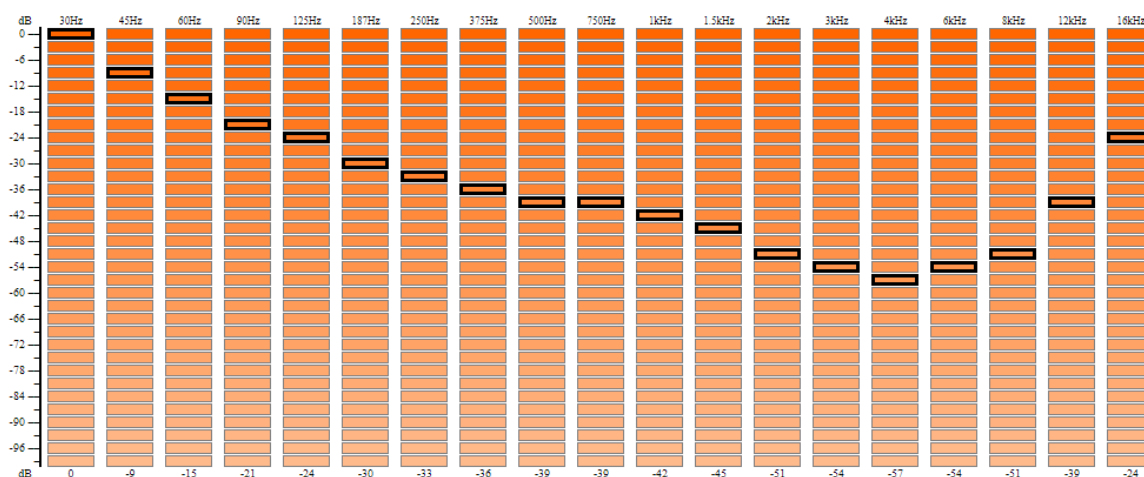
28. ábra: Frekvenciaérzékelés a csiga baziláris membránján. (angol nyelvű ábra) (25)

Békésy mérései azt is kimutatták, hogy a fül rezonanciája 2000-5000 Hz-es tartományban jelentős, emiatt ezen tartomány hangjaira érzékenyebb a fülünk. Ennek köszönhetően akár ugyanolyan intenzitású hangok is más és más erősségű hangérzetet kelthetnek.



29. ábra: Tankönyvi azonos hangosság görbék. (Fizika 9-10. II. kötet, 150. o)

Projektfeladatként kitűzhetjük, hogy a diákok maguk készítsék el az azonos hangosság görbéjüket az alábbi hivatkozás segítségével: <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>. Itt különböző frekvenciák esetén kell az 1000 Hz-es referenciahanggal egyenlő hangosságú érzetet keltő hangok intenzitását bejelölniük. Végeredményként lényegében a tankönyvekben megtalálható görbékkel azonos menetű eredményt kapnak.



30. ábra A weboldalon készített görbe, ahol 0 dB a maximum hangerősség, amit a használt eszköz kibocsájtani tud.

A tankönyvi ábrán látható, hogy nagyobb hangerősségnél ellaposodik a görbe. Emiatt lehet sokszor az az érzésünk, hogy zenehallgatáskor nagy hangerőn jobban szólnak a dallamok.

Természetesen a hallástartományunkon kívüli hangokkal is érdemes foglalkozni, hiszen az infra- és ultrahangok az állatvilág és a technikai alkalmazások területén is szép számban megjelennek. Ez is kiváló téma lehet a diákok tanórán kívüli önálló feladatvégzésére. Rövid kiselőadást tarthatnak, amiben feldolgozzák, hogy hol találkozhatunk ilyen hangokkal. Rájuk bízhatjuk az irodalmi források megkeresését, de javasolhatunk nekik olyan forrásokat is, mint például Mester András Hallhatatlan Hangok című cikke a Fizikai Szemléből.

Természetes kérdés lehet ezután, hogy például a kutyák vagy a macskák hogyan viselkednek egy ultrahangos orvosi készülék közelében. Megnyugtató a válasz: nem érzékelnek nálunk többet, hiszen egy ilyen berendezés sokszor 2-20 MHz-es frekvenciájú hangokkal dolgozik, ami nagyságrendben is jóval felette van az állatok számára hallható hang pár tízezer Hz-es hangtartományának.

3.2.3. Teremakusztika

Öveges professzor is felfigyelt már arra, hogy amikor a karóráját az asztalra rakja, akkor van úgy, hogy jól hallja a kattogását, de van olyan, hogy észre sem veszi. Ez annak köszönhető, hogy a különböző felületekhez érve a hang egy része elnyelődik, másik része visszaverődik. Helyzetétől függően más irányokban verődik vissza a hang jobban, így fordulhat elő a különböző hangélmény. (Öveges, 1999, 387-390. o.)

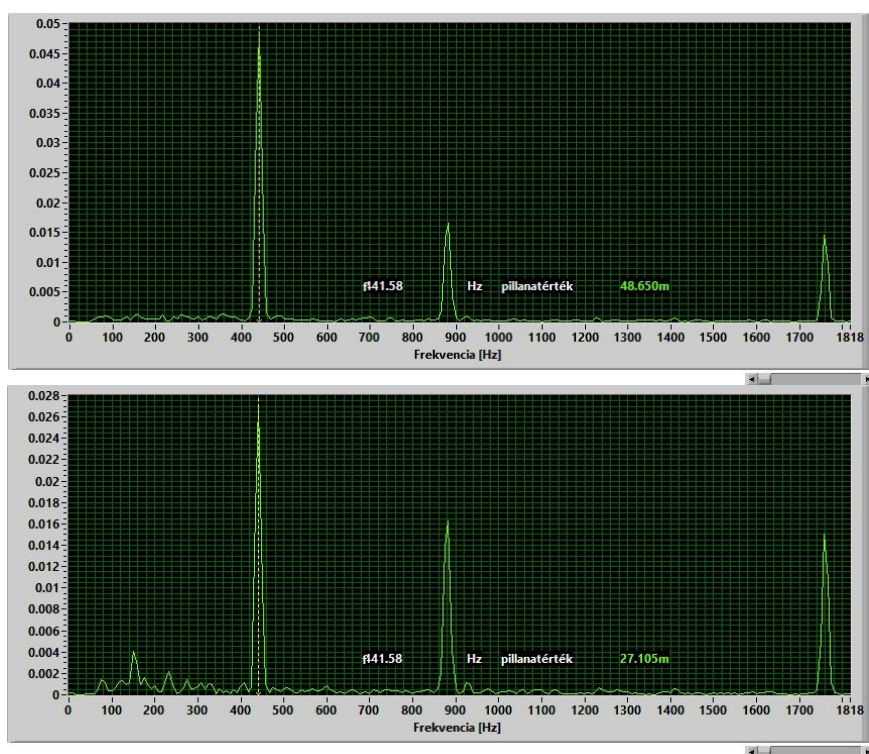
Öveges professzor úr órás kísérletét modellezhetjük egy hangszóró segítségével az alábbi módon. A hangszórót az osztálytól ellenkező irányba fordítva, a tanulók alapvetően a tanár testéről visszaverődő hangot hallják. Ha azonban egy jó visszaverő felületet rakunk a hangszóró elé, például egy edényt, akkor a diákok egyértelműen jól hallják majd a hangerőnövekedést. E kísérlettel kapcsolatban könnyen eszünkbe juthat az az analógia is, hogy miért van a zseblámpákban egy hátsó tükrös rész, ezáltal is láttatva a visszaverődési, elnyelési hasonlóságokat a fény és a hang között.

Ezután a kísérletek után a diákok számára is világosabbá válhat, hogy miért olyan fontos feladat egy nagyobb koncertterem megtervezésénél az akusztikai paraméterekre is gondolni. Kényes feladat ez, hiszen a visszaverő és elnyelő felületek megfelelő egyensúlyát kell megtalálni. Ha túl sok a visszaverődés, akkor a sok visszhang zavaró, elmosódott utózengést okoz, viszont akkor, ha a hang nagy részét elnyeli a környezet, akkor az tompa hangzást eredményez. Sőt, a kísérleteink alapján azt is láthatjuk, hogy a felületek irányítása is fontos szerepet tölt be abban, hogy a nézőtér mely pontjaiban lesz a legjobb a koncertélményünk.

Azt is megvizsgálhatjuk egy hangerősségmérő applikáció (26) segítségével, hogy különböző anyagok milyen mértékben nyelik el vagy verik vissza a hangot. Akár olyan projektfeladatot is adhatunk a diákoknak, hogy egy cipősdobozt belülről hangszigeteljenek le minél jobban. A legjobban az teljesít, akinek a doboza egy behelyezett hangszóró esetén a legkisebb hangerősséget enged ki a doboztól megadott távolságban.

Érdemes megvizsgálni azt is, hogy a hangok elnyelődése hogyan függ a frekvenciától. Öveges tanár úr bevezető kísérlete a jelenségre igen egyszerű. A fülünk mellett dörzsöljük össze az ujjainkat! Folyamatosan távolítva a kezünket, a magas sístergés egyre eltompul és gyorsan elnémul. Ez alapján is érezhetjük, hogy a magas hangok hamarabb fakulnak el. (Öveges, 1999, 346-347. o.)

Ezt mi is megvizsgálhatjuk, ha egy összetett hangot lejátszunk telefonunkkal, majd rögzítjük a hangszínt egy könyvvel kitakarva és nem kitakarva hangszórót.



31. ábra: Hangszín általános esetben (fent) és a hangszóró eltakarásával (lent). (27, saját kép)

A 31. ábrán jól látható, hogy míg a 440 Hz-es hang intenzitása jelentősen csökkent, addig a 880 és 1760 Hz-es hangoknál nem történt nagy változás, ahogy azt a bevezető kísérlet alapján várhattuk.

3.3. Számítógéppel támogatott mérések

Eddig is láthattunk pár számítógépes, telefonos alkalmazási lehetőséget. Ebben a fejezetben további mérési lehetőségeket szeretnék bemutatni, amelyek egy része órán is elvégezhető, bemutatható demonstrációs céllal, másik része pedig mérési alkalmak, szakkörök alkalmával használható inkább. A közös ezekben, hogy a könnyű elérhetőségük miatt a diákok otthon is elvégezhetik akár ezeket az aktivitásokat.

3.3.1. Hangsebesség mérése telefonnal

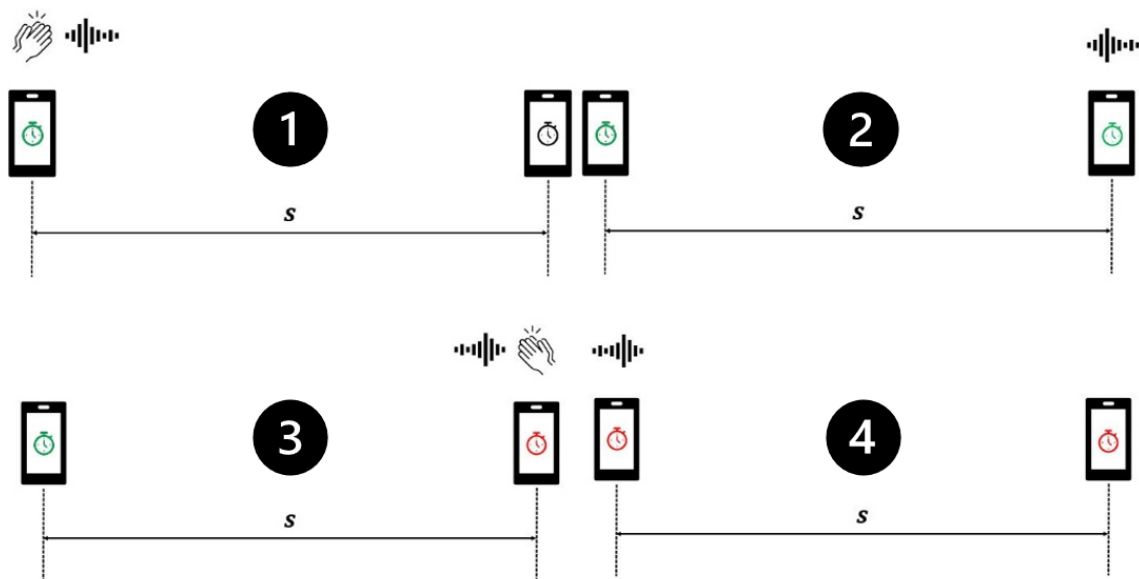
A 17. században a fénysebesség mellett a levegőbeli hangsebesség meghatározása is foglalkoztatta a tudósokat. Az első jelentős kísérleteket erre vonatkozóan Pierre Gassendi francia tudós, filozófus végezte a század első felében. A mérése egy távolban elsütött fegyver fény- és hanghatásának érzékelése közti időkülönbségének mérésén alapult. A hang terjedési sebességét nagy hibával, 478 m/s-nak mérte a körülbelül 340 m/s helyett. Ötletének helyességét viszont jól mutatja, hogy az 1650-es években Borelli és Viviani ugyanezen ötlet alapján már jóval pontosabb, 350 m/s-os eredményt kaptak. Ez is jól példázza, hogy egyszerű ötletek mentén is igen jó közelítéssel meg lehet határozni a hang terjedési sebességét levegőben. (28)

További 370 évet ugorva az időben a hangsebesség meghatározására kísérletet tehetünk az osztályteremben és annak környezetében is, sőt, szerencsére a mai technológia ehhez tálcán kínál lehetőségeket.

A hang levegőbeli terjedését tekinthetjük egyenes vonalú egyenes mozgásnak a forrástól az érzékelés helyéig. Ennek megfelelően távolság- és időmérés a feladatunk. Az időmérés manapság már nagy pontossággal megoldható. Ehhez a Phyphox alkalmazás (29) Acoustic Stopwatch funkcióját használtam. A kísérletben a telefonunk hanghatásra elindítható és leállítható stopperként működik.

Feladatunk az, hogy két telefont helyezünk el egymástól előre lemerít, 3-10 méteres távolságban. Mindkét telefonon érdemes a tűrészhatár (threshold) és a két érzékelés közti minimum időtartam (minimum delay) megfelelő értékét óra előtt beállítani.

Ezután a két telefont helyezük le a kimért távolságok végére, majd indítsa el az egyik telefon mellől valaki egy tapssal a stoppereket, majd a másik személy a másik telefonnál egy tapssal állítsa le azokat.



32. ábra: A mérés folyamatábrája. (Microsoft Word, saját kép)

A második telefon kicsit később indul el, hiszen kell idő a hangnak, hogy odaérjen hozzá. Az első telefon pedig később hagyja abba a stopperozást, hiszen a záróhangnak is kell idő, míg elér hozzá. Ebből azt kaphatjuk, hogy az első stopper pontosan annyi idővel mért tovább, amennyi idő kell a hangnak, hogy megtegye oda-vissza a kimért távolságot (s).

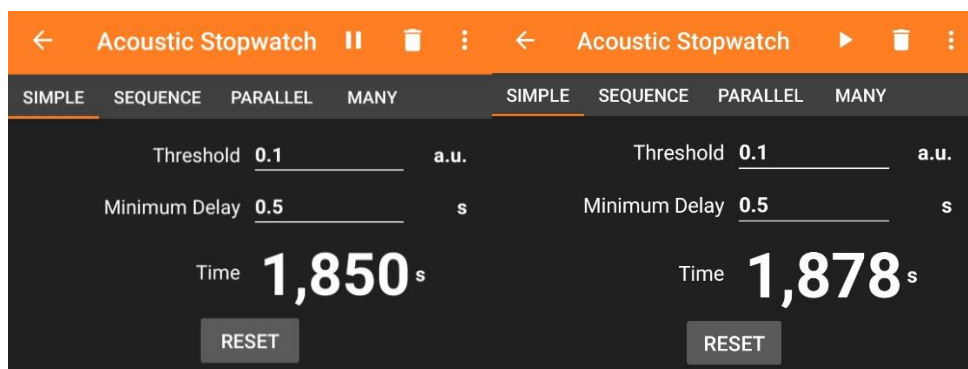
Tehát az időkülönbség

$$\Delta t = 2 \cdot \frac{s}{v_{hang}},$$

így a hangsebesség

$$v_{hang} = \frac{2s}{\Delta t}.$$

A mérést elvégeztük két, egymástól 5 méterre elhelyezett telefontal.



33. ábra: A mérésben szereplő telefonok képernyőképei. (saját kép)

Így a mérési adataink alapján:

$$v_{hang} = \frac{2s}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 5 \text{ m}}{0,028 \text{ s}} \approx 357 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Ezt a mérést kültéren végeztük el, 15 °C-os hőmérsékletnél. A mérés megbízható, mert egymás után megismételve többször is pontosan ezt az időkülönbséget kaptuk. Tanteremben elvégzett mérések során sajnos sokszor nagyobb hibákat tapasztaltam, ami a teremben való visszaverődések, visszhangok miatt lehet. Mivel ezt többféle telefonnal próbálva is így tapasztaltam, ezért a mérést leginkább az udvaron, esetleg a folyosón javaslom elvégezni, ahol hosszabb távolságokat kimérve javítható a pontosság is. Kis gyakorlatot szerezve nagyon gyorsan elvégezhető a mérés, így a diákok is kedvet kaphatnak későbbi kipróbálására, és a feladat akár páronkénti házi feladatként is kiadható. (30)

3.3.2. Hangsebesség mérése az érettségi vizsgákon

A fizika emelt szintű érettségi szóbeli vizsgarészében is találkozhatunk a hangsebesség meghatározásával. Az erre való felkészülés része lehet az ismert mérőkísérlet otthoni körülmények közötti elvégzése. Szükségünk van egy műanyag csőre és egy megcsonkított műanyag palackra, valamint mobiltelefonra. A kísérlet iskolai bemutatásának nehézsége abban rejlik, hogy egy rövidebb cső esetén problémát okozhat a szertárban található hangvillák túl alacsony frekvenciája. Szerencsére erre a problémára is van megoldás, mert telefonunk segítségével bármilyen frekvenciájú hangot elő tudunk állítani, annak megfelelően, hogy milyen hosszúságú cső áll rendelkezésünkre. További előny, hogy a hangsebesség meghatározását több frekvencia esetén is meg tudjuk tenni.



34. ábra: A kísérlethez használt eszközök.
(saját kép)

A kísérlet során a műanyag csövet belelógatjuk a vízbe, majd a szájához odatartjuk a telefonunkat a hangszóró felőli részével. Ha a csövet folyamatosan kifelé húzzuk a vízből, akkor egyszer csak erősebben halljuk a hangot. Itt is a már korábban tapasztalt rezonanciajelenség lép fel. Az egyik végén zárt csőnek megfelelően az alapharmonikus szóval meg először, ami azt jelenti, hogy egy negyedhullámhossznyi állóhullám tud kialakulni a víz felett, ennek hosszát a csőre ragasztott mérőszalagról olvastam le.

Meg kell jegyezni, ha ebből a hosszából számoljuk a hangsebességet, akkor az irodalmi értéknél mindig kisebb eredményt fogunk kapni. Érdekes ezért mindig még egy rezonanciahelyzetet megkeresni. A következő rezonanciahelyzet akkor állhat elő, ha a zárt síp második harmonikusa a gerjesztő frekvencia, ekkor háromnegyed hullámhossz tartozik a csőhöz. A két rezonancia helyzet különbsége pedig már nagy pontossággal a hullámhossz fele. Ha ez utóbbiból számolunk hangsebességet, akkor érdemben az irodalmi értéket kapjuk.

f (Hz)	$\lambda/4$ (cm)	$3\lambda/4$ (cm)	λ (cm)	c (m/s)	
900	8,3	27,4	38,2	343,8	$c_{\text{átl}} = 345 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $\sigma_{n-1} = 1,19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
950	7,8	25,9	36,2	343,9	
1000	7,4	24,6	34,4	344,0	
1050	7,0	23,5	33,0	346,5	
1100	6,6	22,3	31,4	345,4	

4. táblázat: A rezonanciahelyzetekhez tartozó hosszak és a belőlük számolt adatok.

A hullámhosszt (λ) a 3. és 2. oszlop eredményeiből számoltam, a hangsebességet (c) pedig a

$$c = \lambda \cdot f$$

összefüggés alapján. A hangsebességeket átlagolva 345 m/s-os értéket kapunk, ami a terem 25 °C-os hőmérsékletén vett irodalmi, 346 m/s-os értékhez (31) képest is 1%-os relatív hibán belül van.

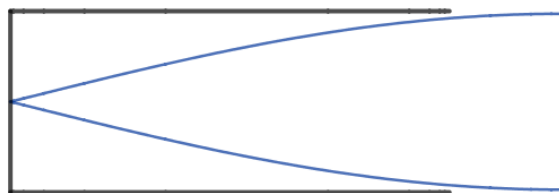
Felvetődhet a kérdés, hogy miért hibás a csak első rezonanciahelyzetből való hangsebesség-meghatározás. Ehhez elemezzük a mérés eredményét! Ha csak az első rezonanciahelyzet alapján számolunk, akkor a hangsebesség értéke valamivel 300 m/s alatt van.

Hogy jobban megértsük mi történik, adjuk meg a rezonanciahelyzetek különbségéből számolt hullámhosszak negyedét (2. oszlop)!

$\lambda/4_{mért}$ (cm)	$\lambda/4_{számolt}$ (cm)	eltérés (cm)
8,3	9,55	1,25
7,8	9,05	1,25
7,4	8,60	1,20
7,0	8,25	1,25
6,6	7,85	1,25

5. táblázat: Végkorrekciós értékek vizsgálata.

Azt vehetjük észre, hogy frekvenciától függetlenül a mért és számolt értékek közti eltérés közel állandó. Ez annak köszönhető, hogy a cső végén lévő mozgási duzzadóhely nem pontosan a nyílásnál, hanem annál távolabb helyezkedik el.



35. ábra: Cső végén kialakuló duzzadóhely. (GeoGebra, saját kép)

Az eltérés mértéke a cső átmérőjétől függ. Az irodalomban találhatunk végkorrekciós arányokat a pontosabb számoláshoz. A méréseink alapján a végkorrekció értéke 2,8 cm-es átmérő esetén annak hozzávetőlegesen 44%-a, ami a szakirodalmakban elfogadott 30-40% közötti értékekhez (32) közelít. A pontos méréshez fontos a telefon helyes tartása is, az, hogy ne takarjuk el a cső nyílását, mert ez is befolyásolhatja a korrekciós tényezőt.

3.3.3. Hangsebesség mérése üvegpalackkal

A levegőbeli hangsebességet akár egy vacsoratársaság italkitöltése előtt is megmérhetjük. A titok nyitja a dugó kihúzásakor hallható jellegzetes pukkanó hang mögött rejlik. Egy megtöltött palack nyitott nyakában a levegő egy egyik végén zárt gázoszlopnak felel meg. Ha rezgésbe hozzuk a levegőoszlopot, akkor állóhullámok alakulnak ki benne. Egy általános gerjesztésnél ekkor a létrejövő hangban az alapfrekvenciához tartozó komponens lesz a legerősebb. Amikor egy ilyen palackból kihúzzuk a dugót, akkor egy pukkanás hallatszik, melyben a legnagyobb intenzitással az említett levegőoszlop sajátfrekvenciájához tartozó harmonikus bír. Az ehhez tartozó frekvencia általánosan

$$f_0 = \frac{c}{4l},$$

ahol c a hang terjedési sebessége az adott közegben (levegő), l pedig a palackban lévő levegőoszlop magassága. A palack nyakának átmérője miatti korrekciók elvégzése után a hangsebesség az alábbi formula alapján határozható meg:

$$c = 4f_0(l + 0,61r),$$

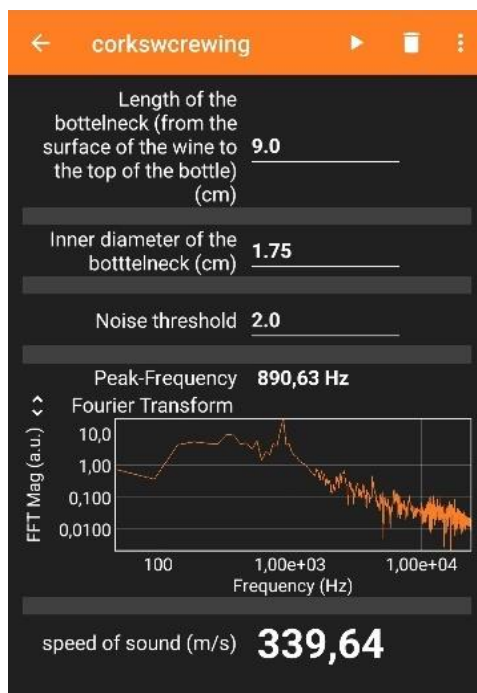
ahol r a palack nyakának belső sugara. (Kasper, Vogt, 2020)

A tapasztalatból, hogy egy dugó kihúzásakor jellegzetes hangot hallunk, mérési feladat is készíthető. Elvégzéséhez érdemes beszerezni egy hosszú nyakú dugós üveget, amelybe könnyen visszahelyezhető a dugó a mérés megismétlésére. Emellett a Phyphox alkalmazás fórumáról le tudunk tölteni egy, a méréshez elkészített mérőfelületet (33).

Az üveget megtöltjük vízzel úgy, hogy csak az egyenes nyakában maradjon levegő. Megmérjük mekkora a levegőoszlop magassága a vízszinttől a palack szájáig, illetve a nyak belső átmérőjét. Ezután bedugjuk a palack száját. A mért adatokat bevisszük a Phyphox alkalmazás „corkswcrewing” mérésébe. A zajszintet a környezeti zajokhoz képest értelmesen beállítjuk. Ezután elindítjuk a mérést és kihúzzuk a dugót a palackból. Ekkor a legerősebb hanghatás frekvenciaértékét meg tudja határozni a program, majd ebből ki tudja számolni a hangsebességet az ismertetett módon.



36. ábra: Üvegpalack dugóval. (saját kép)



37. ábra: A Phyphox alkalmazás képernyőképe. (saját kép)

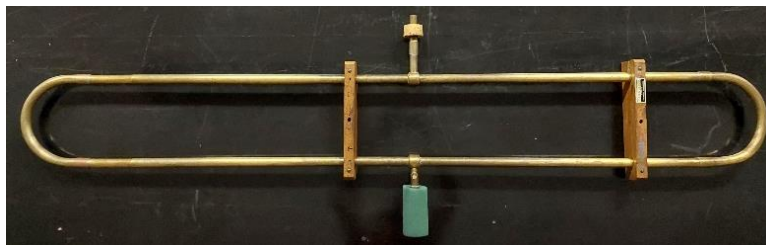
h (cm)	c (m/s)
4,0	323
5,1	328
6,2	328
7,1	329
8,2	328
9,0	340
9,7	343
10,7	337

6. táblázat: A hangsebesség értéke különböző palackhosszok esetén.

A mérés elvégzésekor a hőmérő szerint 23 °C volt a hőmérséklet. Az irodalmi érték ezen a hőmérsékleten 345 m/s (Wikipédia). Ezt az utolsó sorok mérései jól lekövetik, a többinél akár 5-6%-os a relatív eltérés. Ez annak is lehet köszönhető, hogy a végkorrekciós számolások kis palackhossz esetén nem biztos, hogy teljesen helytállóak. Ettől függetlenül az összes mérésünk nagyságában helyesen megadja a hang terjedési sebességét levegőben, így egy ilyen hétköznapi jelenség segítségével is meg tudtuk határozni azt.

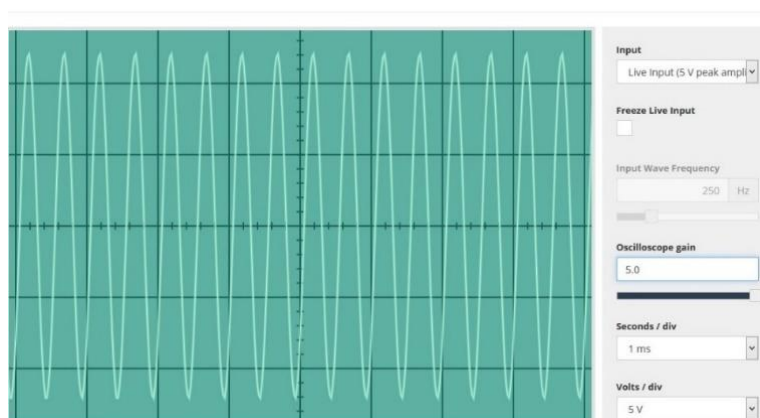
3.3.4. Mérés Quincke-féle interferenciacsővel

Georg Hermann Quincke német tudós 1866-ban alkotta meg a róla elnevezett Quincke-féle interferenciacsövet. A kísérleti eszköz interferenciajelenség vizsgálatával teszi lehetővé a hang terjedési sebességének mérését közvetett módon. (Budó, 1997, 342. o.)

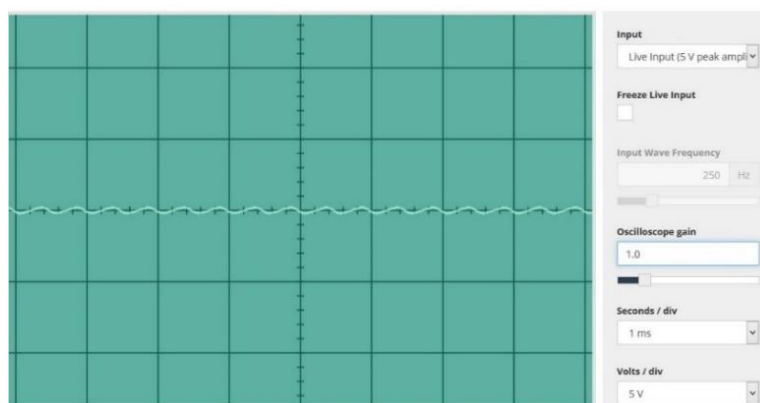


38. ábra: A Quincke-féle interferenciacső. (saját kép)

A kettős U alakú cső egyik bemenetéhez ismert frekvenciájú hangforrást helyezünk. Erre egy frekvenciagenerátorhoz kapcsolt hangszórót használtam, mely ráerősíthető az egyik bemenetre. A hang a másik oldali kimeneten hagyja el a csövet, ahol detektálhatjuk ennek intenzitását. A kimenetnél egy számítógéphez kötött mikrofont helyeztem el. A mikrofons jelét egy ingyenes online oszcilloszkóp program segítségével vizsgáltam, ami könnyen láthatóvá tette az intenzitások nagyságát.



39. ábra: Maximumhely 5-szörös jelerősítéssel 2000 Hz frekvencián. (34)



40. ábra: Minimumhely 2000 Hz frekvencián. (34)

A Quincke-cső alaphelyzetében – kialakításából adódóan – az útkülönbség 0, így maximális erősítés tapasztalható. Az egyik oldalon az U alakú cső széthúzásával először intenzitáscsökkenés hallható, halkabb lesz a hang. Amikor a két oldal közti útkülönbség a hullámhossz felével egyezik meg, tehát a hanghullámok ellentétes fázisban találkoznak, akkor teljes kioltást tapasztalunk, nem hallunk semmit, vagy a gyakorlatban sokszor inkább csak nagyon kis, minimális intenzitást tapasztalunk. Ha az útkülönbség újabb félhullámhossznyival nő, tehát a hullámok ismét azonos fázisban találkoznak, akkor ismét maximális erősítést kapunk, megint félhullámhossznyival növelve az útkülönbséget újból kioltást tapasztalunk és így tovább.

A hang hullámhosszát kettő vagy több szomszédos maximumhely meghatározásával kaphatjuk meg. Míg egy alacsonyabb frekvencián (1000 Hz) a cső méreteiből adódóan csak két szomszédos maximum hely „fér rá” a kihúzható részre, addig egy magasabb frekvencián (Pl. 5000 Hz) jóval több. A záró végen találkozó hanghullámok útkülönbsége szimmetria okokból duplája lesz annak, amennyivel az egyik U szárat kihúztuk (s).

A mérés során k szomszédos maximum meghatározása esetén a $2s$ útkülönbség $k \cdot \lambda$ nagyságú, tehát a hullámhossz:

$$\lambda = \frac{2s}{k}.$$

Így meghatározható az előbbieket figyelembevételével a hang hullámhossza. A hangszóró által kiadott hang frekvenciáját ismerjük és szabadon változtathatjuk. Ezáltal a hangsebesség (c), a frekvencia (f) és a hullámhossz (λ) alapján számolható:

$$c = \lambda \cdot f.$$

1000 és 5000 Hz között 9 különböző frekvencián végeztem el a mérést. Az eredményeimet a következő táblázat tartalmazza:

f (Hz)	k	s (cm)	λ (cm)	c (m/s)	
1000	1	17,4	34,8	348,0	$c_{\text{átl}} = 349 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $\sigma_{n-1} = 1,38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
1500	2	23,3	23,3	349,5	
2000	3	26,3	17,5	350,7	
2500	4	27,9	14,0	348,8	
3000	6	34,8	11,6	348,0	
3500	7	34,8	9,94	348,0	
4000	8	35,0	8,75	350,0	
4500	9	35,1	7,80	351,0	
5000	10	34,7	6,94	347,0	

7. táblázat: Mérés Quincke-csővel.

Az eredmények átlagából azt kaptuk, hogy

$$c = 349 \text{ m/s.}$$

A terem közel állandó 28 °C-os hőmérsékletén az irodalmi érték 348 m/s (31). A kísérleti eszköz és a mérés pontosságát mutatja, hogy a relatív eltérés csupán 0,3%.

A kísérleti eszközt akár mi magunk is megpróbálhatjuk elkészíteni.



41. ábra: Interferenciacső 32 és 40 mm-es PVC elemekből. (saját kép)

Ezzel az eszközzel is a Quincke-csőnél leírtaknak megfelelően végeztem el a mérést. A hangforrás a telefonomhoz kapcsolt hangszóró volt, a jeleket a laptopomhoz kapcsolt mikrofonnal vizsgáltam. Négy szomszédos maximumhely közötti kihúzást mértem, ami így a félhullámhossz ($\lambda/2$) háromszorosa.

f (Hz)	$3\lambda/2$ (cm)	λ (cm)	c (m/s)	
1500	34,8	23,2	348,0	$c_{\text{átl}} = 344 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $\sigma_{n-1} = 2,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
1600	32,1	21,4	342,4	
1700	30,4	20,3	344,5	
1800	28,7	19,1	344,4	
1900	26,9	17,9	340,7	

8. táblázat: A beállított frekvenciák, a mért hosszak és a belőlük számolt adatok.

Eredményül a hangsebességre átlagosan 344 m/s értéket kaptam, ami a szoba 24°C-os hőmérsékletén a hangsebesség 346 m/s-os irodalmi értékéhez képest (31) csak 0,6%-os relatív eltérést jelent, ami rendkívül jónak mondható.

3.3.5. Hangmagasság vizsgálata

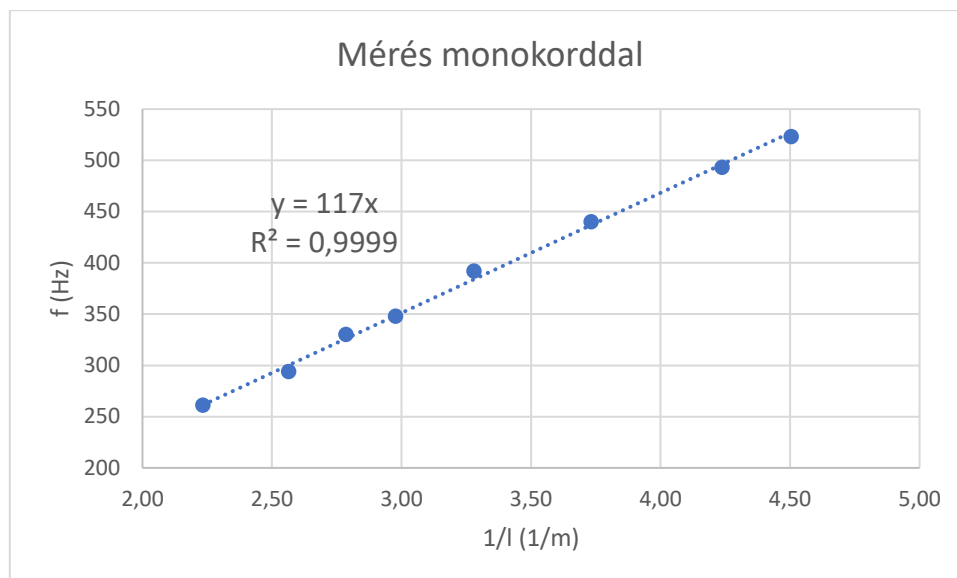
Sokszor hangszerek esetén is elég a hangmagasság kvalitatív vizsgálatához a fülünk. Viszont amennyiben már törvényszerűségeket is szeretnénk belátni, akkor elkerülhetetlenné válik a hangmagasság, tehát a frekvencia pontos meghatározása. Ehhez egyszerű frekvenciamérő alkalmazásokat már telefonra is le tudunk tölteni, ami már mérések elvégzésére is alkalmas lesz. Ezt akár a Phyphox applikáció audio mérési lehetőségeivel is meg tudjuk tenni, de én zenei hangok esetén hangolóprogrammal, más esetekben pedig hangszínelemzéssel együtt szoktam elvégezni.

A tananyagban is előkerül a húrokon létrejövő hangok frekvenciáinak húrhosszfüggése. Az ezek közötti összefüggésre a diákok is rájöhetnek, amennyiben különböző húrhossz és hozzá tartozó frekvencia értékeket megmérünk. Konkrét zenei hangok közti frekvenciaarányokra is kitérek a mérésben, ezért olyan húrhosszakat szólaltattam meg egy monokordon, amelyek egy-egy zenei hanghoz tartoznak. Ehhez a Soundcorset hangoló applikációt (35) használtam. Megkerestem hol kell lefogni az egyes hangokat, és amikor ezeket megtaláltam, akkor lejegyeztem a húrhosszakat és a program által kiírt frekvenciákat.

Hang	Frekvencia (Hz)	Hossz (cm)
C	262	44,8
D	294	39,0
E	330	35,9
F	349	33,6
G	392	30,5
A	440	26,8
H	494	23,6
C	523	22,2

9. táblázat: Mérési eredmények.

Már a táblázat értékeiből is sejthetjük, hogy a frekvencia fordítottan arányos a húr hosszával (látszik, hogy az összetartozó értékek szorzata közel állandó). Amennyiben a frekvenciaértékeket a húrhosszak reciprokainak függvényében ábrázoljuk, akkor ezen sejtésünket a kapott pontok is igazolják, hiszen ezek közel egy egyenesre illeszkednek.



42. ábra: A frekvencia ábrázolása a húr hossz reciprokának függvényében.

Amennyiben a diákok már ismerik, érdemes összehangolni ezt azzal az előzetes tudással, miszerint egy mechanikai hullám esetén igaz a

$$f_0 = \frac{c}{\lambda}$$

összefüggés. Kihasználva, hogy az alaphang esetén a húr hossza (l) megegyezik a hullámhossz (λ) felével, megkapjuk a frekvencia és húr hossz kapcsolatát jellemző összefüggést:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l} = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{l}.$$

Így azt is láthatjuk, hogy a grafikonunk meredeksége a hullám terjedési sebességének a felét adja meg. A mérésünk segítségével így ezt ki is tudjuk számolni.

$$m \approx 117 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m = \frac{c}{2} \Rightarrow c = 2m = 2 \cdot 117 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 234 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Fontos kihangsúlyozni, hogy ez nem a hang terjedési sebessége, hanem egy transzverzális hullám terjedési sebessége a húrban.

Érdekes lehet még megvizsgálni pár hangköz frekvenciaarányát is.

Hangok	Hangköz	Arány	Közelítőleg
D-F	kis terc	1,18	6:5
C-E	nagy terc	1,26	5:4
C-F	tiszta kvart	1,33	4:3
C-G	tiszta kvint	1,50	3:2
C-C	tiszta oktáv	2,00	2:1

10. táblázat: Hangközök frekvenciaaránya.

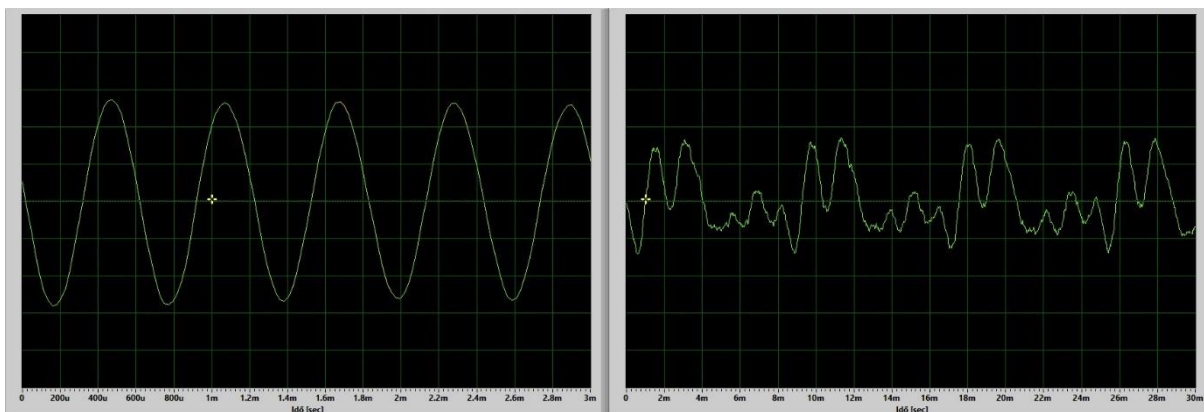
A frekvenciák arányánál mindig a nagyobb értéket osztottam el a kisebbel. A táblázatra ránézve látható, hogy az arányoknál vannak olyan értékek, ahol a diákok könnyen fel tudnak írni maguktól két olyan egész számot, amelyek aránya közelítőleg megegyezik azzal (2,00; 1,50; 1,33). Ezt látva talán a másik két sor arányai is kitalálhatók.

Ezeket a méréseket zárt sípok esetén is hasonlóan elvégezhetjük. Ezt különböző telítettségű kémcsövekkel a legkönnyebb megtenni. Hangot ugyanúgy tudunk kapni, ahogy ezt egy vizes palack megszólaltatásánál is tennénk.

3.3.6. Hangszín vizsgálata

Az iskolai tananyagban szintén szerepel a hangok egy másik fontos tulajdonsága, a hangszín. A hangszínt az alaphang és a mellette megszólaló felhangok összessége határozza meg. Ennek vizsgálatára több telefonos és számítógépes lehetőség adott, ilyen a Smartscope applikáció, vagy számítógép esetén a Soundcard scope, illetve az Audacity programok. Ezek segítségével tanári demonstrációs kísérleteket és önálló kutatási feladatokat is összeállíthatunk.

Oszcilloszkópos kísérletek során meglepő jelenségeket tapasztalhatnak a diákok. Amikor arra kérjük őket, hogy fűtyüljenek a mikrofonba, akkor nem igazán lepődnek meg az előzetes ismereteik alapján kirajzolódó, majdnem szabályos szinuszgörbén. Onnantól viszont, amint már ének-, vagy valamilyen hangszerhang jelét vizsgálják, értetlenül fogadják a nem szinuszos képet, azt hiszik, hogy valamit elrontottak, például nem tudnak szépen énekelni, de mindenképpen felmerül bennük néhány kérdés.

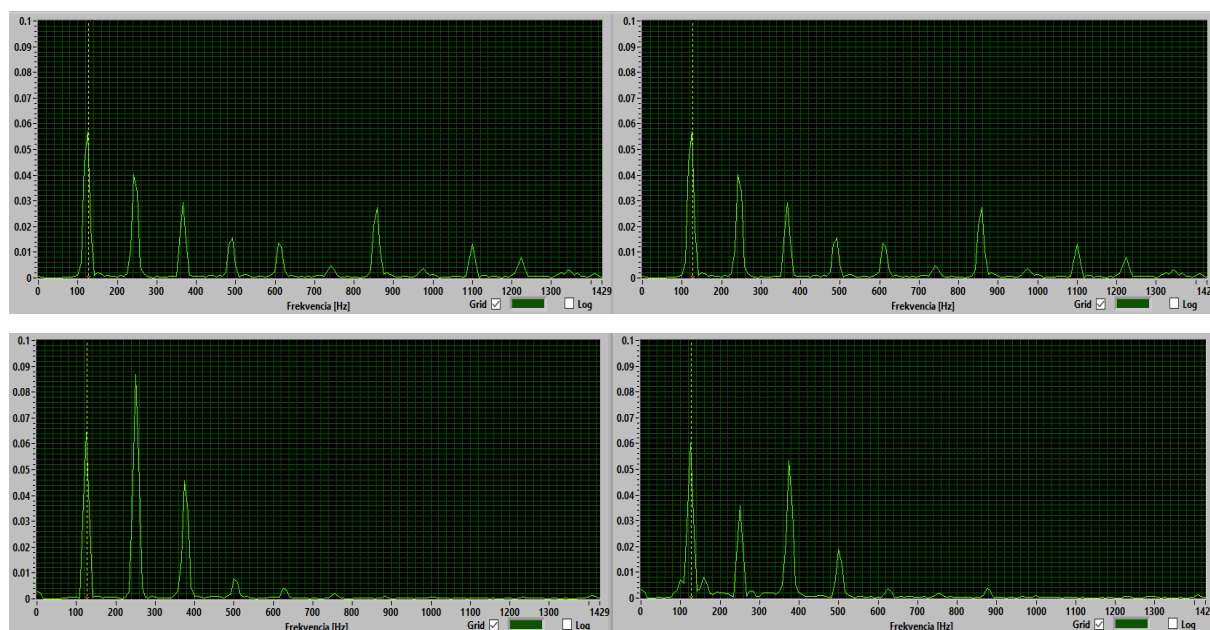


43. ábra: Fűtyülés (bal) és énekhang (jobb) oszcilloszkópos vizsgálata. (27, saját kép)

A jelenség megértéséhez a tanulók akár saját vizsgálódással is eljuthatnak, amennyiben megfelelő eszközökkel, kérdésekkel látjuk el őket. Amíg csak saját maguk vagy hangszerek által keltett hangokat vizsgálnak, addig nehéz rájönni, hogy mi lehet a teljes magyarázat. Amennyiben megkérjük őket, hogy okostelefonjuk frekvenciagenerátor alkalmazásával is próbálkozzanak, amivel tiszta hang, illetve 2-3 különböző frekvenciából álló összetett hangok is kelthetők, akkor már maguktól is rájöhetnek, hogy a nagy különbséget az okozza, hogy éppen csak egy vagy több tiszta hang szól egyszerre. Ezt követően a hangok színeképét vizsgálva a hipotézisükről meg is tudnak bizonyosodni.

Az előző vizsgálódás helyett a hangszín megismerését a következő kísérlettel is bevezethetjük. Kérdezzük meg a diákokat, hogy szerintük hogyan állíthatók hangmagasság szerint sorrendbe az á, é, í, ú magánhangzók. A válaszuk ellenőrizhető egy hangoló applikációval. Meglepő az eredmény, hiszen mind a négy magánhangzó esetén szinte pontosan ugyanazt a hangot jelzi a program.

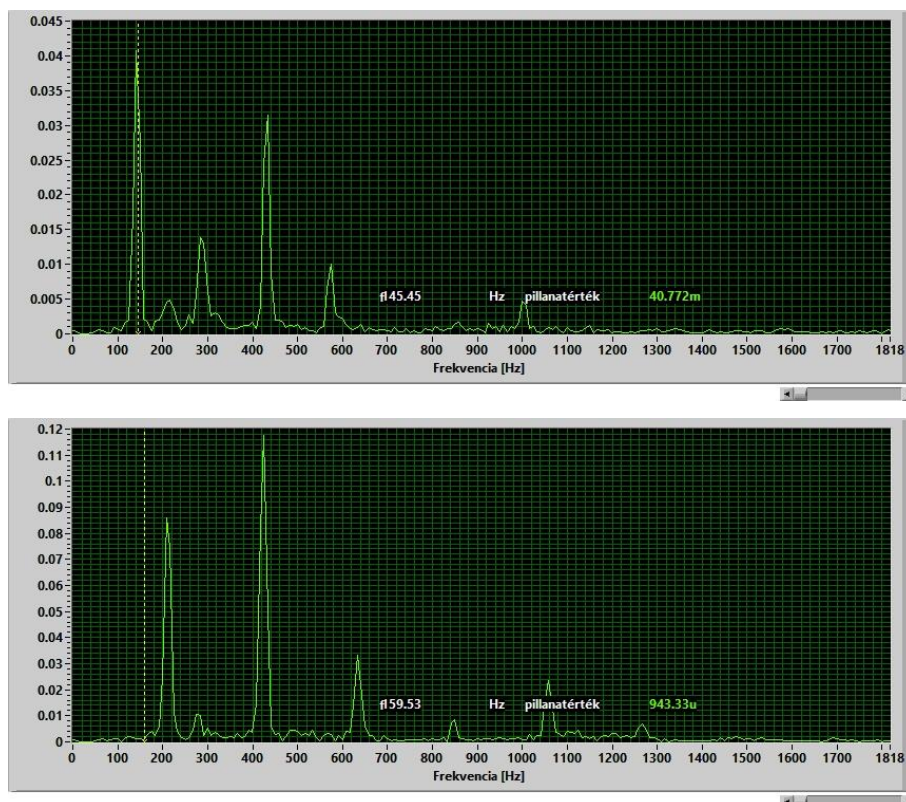
A kérdés a hangszín fogalmi ismerete után is megfogalmazódhat, hogy az előbbi tapasztalatok ellenére miért tudjuk megkülönböztetni ezeket a hangokat. Amint megvizsgáljuk az előbbi magánhangzók hangszínképét, világossá válik, hogy a hangszínükben van különbség. A 44. ábrán jól látható mindegyik esetben a körülbelül 120 Hz-es alaphang jelenléte.



44. ábra: Magánhangzók színekpei: Á (bal fent), É (jobb fent), Í (bal lent), Ű (jobb lent) (27, saját kép)

A tapasztalt hangszínbeli különbségek megértéséhez az emberi hangképzést kell jobban megismerni. Tudnunk kell, hogy a hang a hangszálunk rezgéséből keletkezik, amit egy rezonátorüreg, a szájüregünk felerősít. A rezonátorüreg az alaphangot nem módosítja, csak azt, hogy utána milyen felhangok és milyen mértékben lesznek felerősítve. Amint változtatom a rezonátorüreget, onnantól más lesz a hang színekpe. Ezt jól példázza az is, ha megpróbáljuk egy szájtartással kimondani a többi magánhangzót, ami természetesen nem fog sikerülni.

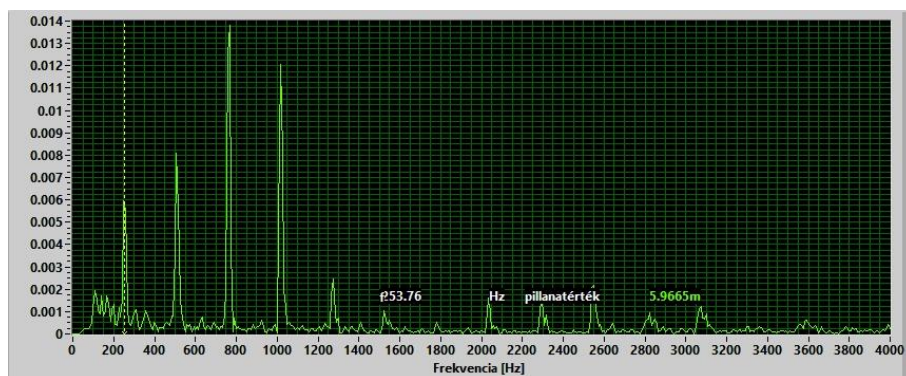
Megmosolyogtató és tanulságos kísérlet az, ha héliumot belélegezve szólalunk meg. Ekkor az első gondolat az, hogy „magasabb” lett a hangunk. A pontos magyarázatért viszont érdemes megvizsgálni, hogy mi történik a hang hangszínekével.



45. ábra: Hangszín normál levegővel (fent) és héliummal telített szájüreg esetén (lent). (27, saját kép)

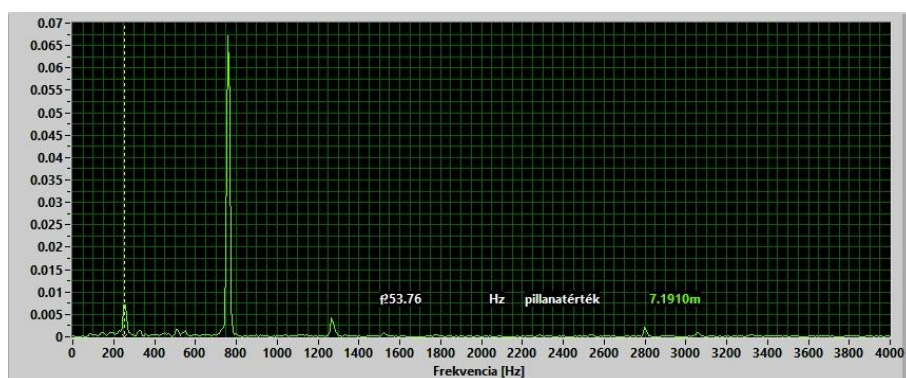
Azt láthatjuk, hogy az alaphang frekvenciája csak kis mértékben változott, viszont a többi felhang jelentősen magasabb lett. Ez továbbra is annak köszönhető, hogy az alaphang a hangszálunk rezgéséből adódik, amire nincs jelentős hatással, hogy héliumot vagy levegőt lélegeztünk be. A felhangok viszont már mind a szájüreg által vannak felerősítve, aminek az összetétele megváltozott. A héliumban gyorsabban tud terjedni a hang, így a rezonátorüregben is magasabb frekvenciájú állóhullámok tudnak kialakulni. Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a tapasztalt magasabb hangérzet hátterében az áll, hogy az alaphang ugyan nem változott, de magasabb frekvenciák „színezik” a hangot.

Hangszerekkel is érdemes ezután vizsgálódásokat tenni, hiszen sokszor választ tudnak adni gyakran felmerülő kérdésekre. Ilyen kérdés például, hogy mi változik attól, ha más helyen pendíték meg egy húrt. Gyakran felteszik ezt a kérdést már akkor is a diákok, amikor arról beszélünk, hogy mitől függ egy húr által kiadott hang magassága. A húrt különböző helyeken megpendítve azt tapasztaljuk, hogy nem változik a hangmagasság, viszont érdemes megvizsgálni, hogy okoz-e hangszínbeli változást a pengetés helyének változtatása.



46. ábra: Hetedénél megpengetett húr hangszíne. (27, saját kép)

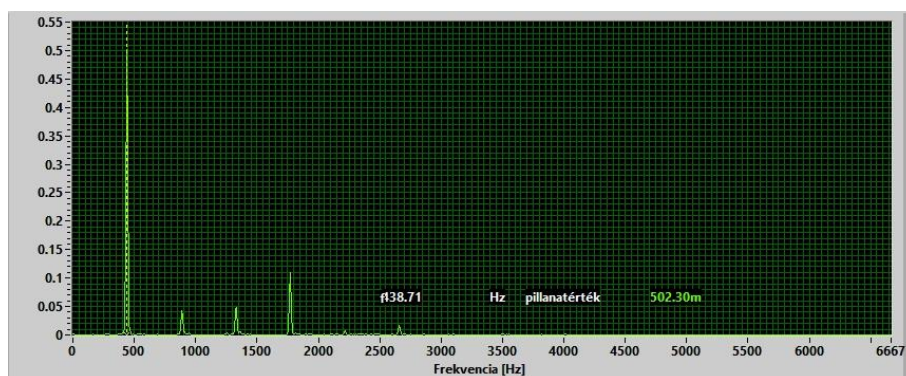
A diákok is könnyen megállapíthatják a spektrum alapján, hogy általános esetben (46. ábra) az alaphang frekvenciájának egész számú többszörösei szerepelnek a felharmonikusok között. Leglátványosabb különbséget akkor fogunk kapni, ha a hűrt a felénél pengetjük meg.



47. ábra: Felénél megpengetett húr hangszíne. (27, saját kép)

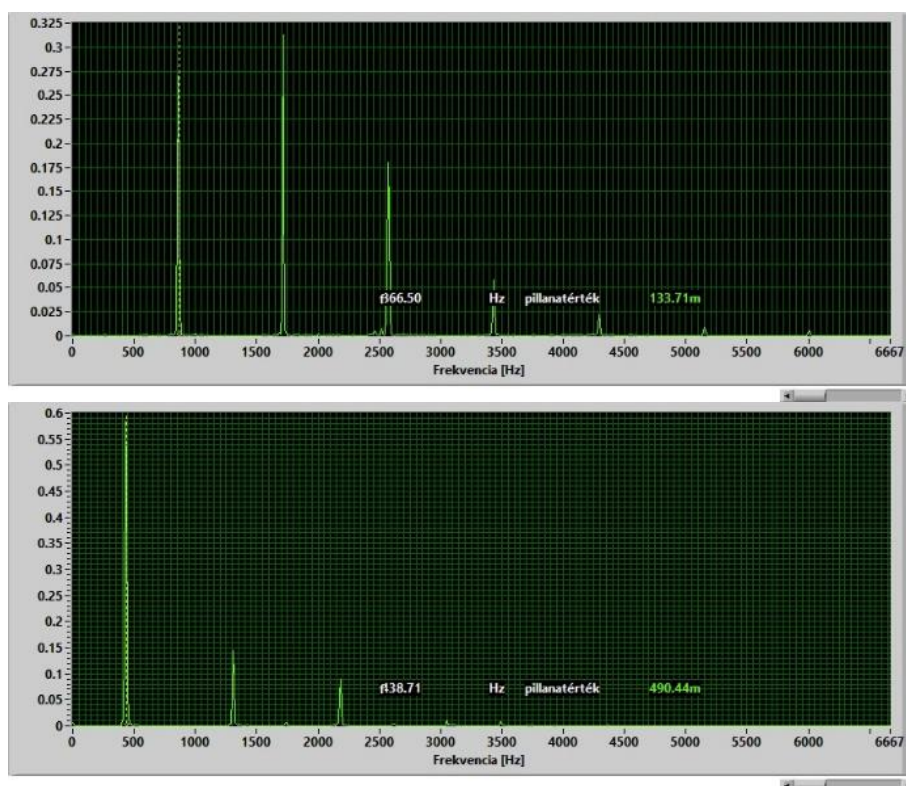
Ekkor nagyban megváltozik a hangszín. A második, negyedik és hatodik harmonikusok lényegében eltűntek, tehát a páros felharmonikusok nincsenek jelen. Ez nem véletlen, ha belegondolunk abba, hogy az ezekhez tartozó hullámalakoknál a húr közepén mindig csomópont van.

Zárt és nyitott sípok esetén is érdemes megvizsgálni a hangszínt. A hangspektrumok elemzéséből látható, hogy milyen szabályosságot követnek a felharmonikusok.



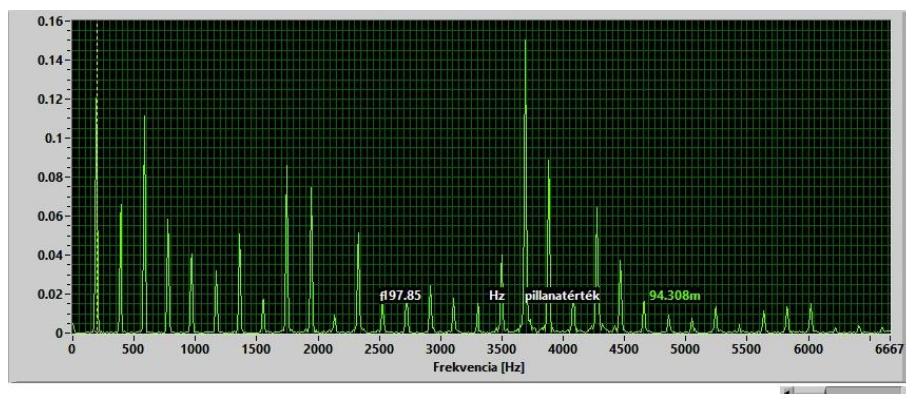
48. ábra: A fuvola mint nyitott síp hangszíne 440 Hz-es A hang esetén. (27, saját kép)

Míg nyitott síp esetén az alaphang frekvenciájának minden egész számú többszöröse megjelenik a felharmonikusok között, addig zárt sípok esetén csak a páratlan számú többszörösök jelennek meg.



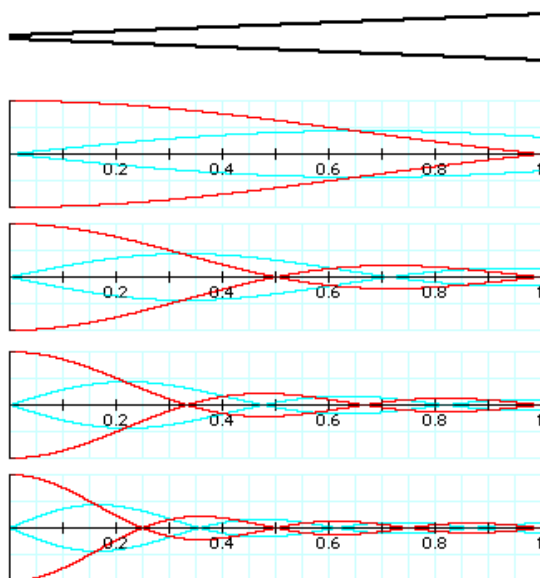
49. ábra: Fuvolafej megfújásával kapott hangszín nyitott (fent) és zárt (lent) esetben. (27, saját kép)

Nagyon fontos megjegyezni, hogy egy fúvós hangszer hangszínének jellegét nem csak az befolyásolja, hogy a fúvóka zárt vagy nyitott végként viselkedik. Az eddigi vizsgálódásunkkal szemben ezért lehet meglepő egy szaxofon, oboa, fagott, vagy, hogy egyszerűbben elérhető „hangszert” is említsek, egy szívószálduda hangspektruma. Bár a nádas fúvókájuknak köszönhetően továbbra is zárt sípokról beszélhetünk velük kapcsolatban, a hangszínüket megvizsgálva viszont azt láthatjuk, hogy ennek ellenére az alaphang minden egész számú többszöröse megjelenik a felhangok közt, ahogy ezt a nyitott sípoknál láttuk.



50. ábra: Szívószálduda hangszíne. (27, saját kép)

Ennek oka a hangszerest kónikus kialakítása, ez okozza a páros felharmonikusok megjelenését (lásd 51. ábra). Ezen okból fontos megjegyezni, hogy a fizika órán használt terminológia – zárt és nyitott sípok – a hengeres sípokra vonatkozik.



51. ábra: Harmonikusok kónikus kialakítás esetén nyomás- (piros) és mozgási (kék) görbékkel. (36)

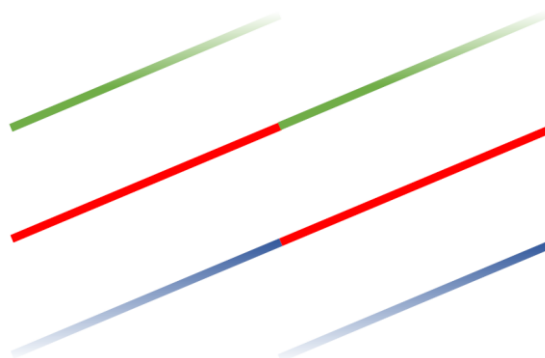
Láthatjuk, hogy a hangspektrumok vizsgálata segíthet egyes hangszerek jobb megismerésében, ugyanakkor motiváció is lehet egy-egy zenei ismeretekkel rendelkező diák számára a saját hangszerrel való kísérletezésre is.

További érdekesség lehet az intonációs technikák használata közbeni hangszín vizsgálata, főleg azt is tudva, hogy egy kezdő és egy tapasztalt hangszerjátékost sokszor az általuk keltett hangok színezete is megkülönbözteti.

3.3.7. Pszichoakusztika

A témakör vége felé érdemes lehet néhány érdekes hangérzeti jelenséget bemutatni. Ahogy az optikai csalódások is népszerűek a diákok körében, egy-egy hangtani csalódás is felkeltheti az érdeklődésüket.

A közösségi médiában keresgélve úgy láttam, hogy a leginkább népszerű hangtani megtévesztés az ún. Shepard tone hangsor. Ez egy olyan diszkrét skála, amely hangjait hallgatva úgy érezzük, hogy folyamatosan emelkedik a hangmagasság. A jelenség népszerűségét leginkább a folytonos verziójának, a Shepard-Risset glissando filmzenékben való felhasználása okozza (37). Először érdemes lejátszani a diákoknak egy ilyen hangfájlt (38), majd megkérdezni, hogy mit tapasztalnak. Ezután nézzük meg, hogy mi történik, ha beletekerünk kicsit a hangfájlba, majd utána vissza! Ekkor már érezhetik a diákok, hogy mégsem végtelenségig emelkedő skáláról van szó, ugyanis lényegében egy rövid szakasz folyamatos ismétlődését halljuk. Amíg arra gondolunk, hogy egy önálló, növekvő skálát hallunk, addig megmagyarázhatatlannak tűnik a jelenség, de értelmezhetővé válik, amint rájövünk, hogy több skála együttes szólása eredményezi a folyamatos emelkedő hatást.

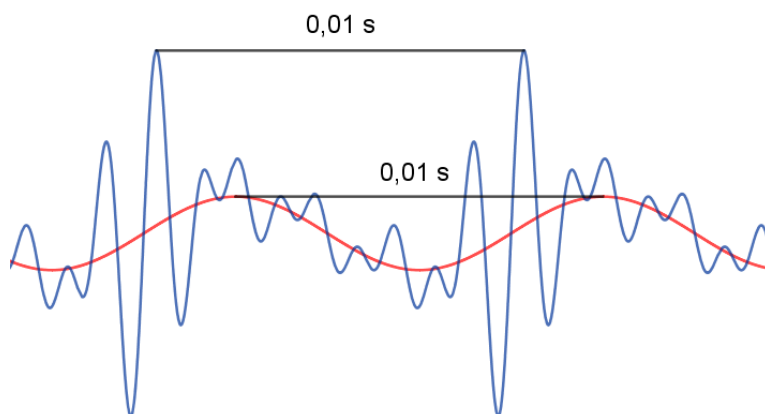


52. ábra: Rajz a jelenség magyarázatához. (saját ábra)

Egyszerű modellként képzeljük el, hogy háromféle, együttesen növekvő frekvenciájú skálából áll a hangfájl. A legmélyebb skála halkan indul és felerősödik, a középső hangsor végig erősen szól, míg a legmagasabb futam folyamatosan elhalkul. Amennyiben ez úgy történik, hogy a ciklus újraindításával éppen az eddig intenzíven szóló skálák folytatódjanak az átmenetnél, akkor valóban azt az érzetet keltheti bennünk, hogy akárhogy is hallgatózunk, mindig emelkedést tapasztalunk. Ez utóbbi miatt használják előszeretettel a filmiparban is, hiszen a folyamatosan növekvő hangmagasság a feszültség ugyanilyen irányú növekedését tudja biztosítani.

További meglepő tapasztalatot szerezhethetünk, ha lejátszunk egy például 440 Hz-es tiszta hangot, majd ezután egy olyan összetett hangot, ami 500, 600, 700, 800, 900 Hz-es hangokból áll. A kérdés adott, melyik hang a mélyebb? Nagy meglepetésre a második hangot halljuk mélyebbnek, melynek az összetételét csak ezután fedjük fel. A kísérletet elvégezhetjük akár kettő telefon segítségével is, hiszen az eddig használt frekvenciagenerátor alkalmazás egyszerre három tiszta hang kibocsátását is lehetővé teszi, illetve tanulmányozhatjuk a jelenséget youtube videók (39) meghallgatásával is.

A pontos fizikai magyarázathoz érdemes megvizsgálni az összetett hang időbeli nyomáswingadozását. Az összetett hang alkotói egy 100 Hz-es alaphangú harmonikus felhangrendszer részei. Emiatt talán nem is olyan meglepő, hogy vizsgálódáskor az alaphanggal (100 Hz) megegyező periódusidejű (0,01 s) periodikus változást látunk. Ezzel kapcsolatban tanulságos és szemléletes GeoGebrában együtt ábrázolni egy 100 hertzes szinuszhullámot és az 500-600-700-800-900 hertzes szinuszhullámok összegét is. Az alábbi ábrán jól látható a periódusidők megegyezése.



53. ábra: Az 5 db szinuszfüggvény összege (kék) és a 100 hertzes frekvenciájú szinuszfüggvény (piros). (GeoGebra, saját kép)

Megjegyezhetjük, hogy ezt a hatást például hangszórók esetén ki is használják. Mély hangok esetén a hangokat több felharmonikusukkal együtt szólaltatják meg, így teltebb basszust tudnak elérni olyan hangmagasságok esetén is, amelyeket önmagukban a fülünkkel már nem tudunk jól érzékelni.

3.4. Házi készítésű hangszerek

Aktív tanulási folyamatokra a témában az egyszerűen, házilag elkészíthető hangszerek nyújtják a legtöbb lehetőséget. Érdeemes megtapasztaltatni a diákokkal a közös zenélés örömét, és azt, hogyha esetleg nincs is nagy zenei jártasságuk, akkor is képesek egyszerűbb dallamok lejátszására. A következőkben pár hangszert és az alkalmazási módjaikat mutatom be. Kiváló alkalom lehet ez tantárgyi koncentrációra és az énektanárral való együttműködésre is. Miután a hangszereket fizika órán megismerték a diákok, az énekórákat is változatosabbá, érdekesebbé tehetjük a használatukkal. Az elmúlt években az ezen témában tartott előadásaim során énektanárok többször is látták tőlem bemutatni ezen eszközöket, s többen meg is kerestek elkészítési, használati tippekért, de gyógyypedagógus kollégának is segítettem már a színes tenyérsípok elkészítésében, aki csoportjaiban a diákok együttműködését fejleszti az eszköz segítségével.

3.4.1. Tenyérsípok

A közös zenélést talán a tenyérsípok segítségével valósíthatjuk meg legkönnyebben és leglátványosabban. Interneten keresgélve a „palm pipes” kifejezéssel találhatunk elkészítési tippeket és ajánlásokat a csövek hosszára. Ezek a hangszerek egyszerű, valójában üres műanyag csövek.



54. ábra: Tenyérsípok. (saját kép)

Tenyerünkhöz ütve a cső egyik végét az így keletkezett zárt végen mozgási csomópont, a nyitott végen pedig mozgási duzzadóhely keletkezik. Kialakításából adódóan a kialakult zárt síp alapfrekvenciája

$$f_0 = \frac{c}{4l},$$

ahol c a hangsebesség levegőben, l pedig a síp hossza.

Mivel a hosszánál korrekciós faktorként számításba kell – vagy lehet – venni a cső vastagságából (d) adódó

$$\Delta l = 0,3d$$

értéket, így a pontosabb alaphfrekvencia az alábbi összefüggéssel számolható:

$$f_0 = \frac{c}{4(l + 0,3d)}.$$

Megjegyezzük, hogy az elkészített tenyérsípok várt és frekvenciamérő programmal ellenőrzött frekvenciájában néhány hertz eltérés lehet, viszont ez nem befolyásolja lényegesen a zenei élményt.

Az ütésnek köszönhetően a kialakult hangban természetesen az alaphfrekvencia páratlan számú többszörösei is megjelennek, ezzel színezve az alaphfrekvencia intenzívebb hangját.

Az általam 13 mm belső átmérőjű, PPR vízvezetékcsövekből elkészített tenyérsípoknál 345 m/s hangsebességgel számolva a zenei hangokat, a frekvenciákat és a korrigált csőhosszakat az alábbi táblázat tartalmazza.

Hang	frekvencia (Hz)	hossz (cm)
C	261,5	32,6
Cisz	277,0	30,7
D	293,5	29,0
Disz	311,0	27,3
E	329,5	25,8
F	349,0	24,3
Fisz	370,0	22,9
G	392,0	21,6
Gisz	415,5	20,4
A	440,0	19,2
Bé	466,0	18,1
H	494,0	17,1
C	523,0	16,1

11. táblázat: A tenyérsípok adatai.

Javaslom, hogy a megfelelő hosszak levágása után csiszolópapírral tegyük simává a csövek végét az esetleges tenyérsérülések elkerülése végett! Ha 1-3 cm átmérőjű csöveket használunk, akkor a korrekció nélkül is megfelelő hangzást kapunk.

Ha elkészítettünk néhány hanghoz tartozó csövet, egy megfelelő dal választása után már kezdődhet is a zenélés. Szerencsére nagyon könnyű megszólaltatni a hangszert, még elsős diákoknak sem okoz problémát. Az adott hangokhoz tartozó tenyérsípokot különböző színekkel ellátva, és ehhez színes hangokból álló kottát készítve a dalok könnyen játszhatóvá válnak, és az együtt zenélés öröme a diákok számára is tapasztalható lesz. Én egy állandó színekészletet

hoztam létre a teljes csőkészletre, amihez a MuseScore (40) kottaszerkesztő programmal gyártottam le a színes kottákat. Kottaolvasásban kevésbé jártas csoport esetén javasolt a kottát színes téglalapokkal írni, ahol a téglalapok szélessége jelzi a hangok hosszát.

F# F# G A A G F# E D D E F#		
F# E E F# F# G A A G F# E		
D D E F# E D D		

55. ábra: Az Örömöda általam készített kottája.

3.4.2. PET-palack mint hangszer

Kiváló kísérleti hangszer lehet a diákok vizespalackja is. A palack száját megfújva a palackban lévő levegőoszlop sajátfrekvenciájának megfelelő hangokat lehet megszólaltatni. Minél hosszabb a levegőoszlop a palackban, tehát minél kevesebb vizet tartalmaz, annál mélyebb hangot kapunk. A vízmennyiség változtatásával a palackokat is be lehet hangolni különböző zenei hangokra, és készen van a hangszer. Érdekes vizsgálódási feladat lehet a diákoknak az is, hogy ezeknél az eszközöknél, a tenyर्सíppokkal ellentétben, nem a levegőoszlop magasságától, hanem a térfogatától függ a megszólaló frekvencia. Ez utóbbit úgy lehet bizonyítani, hogy különböző méretű műanyag palackokból fél-fél liternyi üres térfogatot hagyva közel azonos magasságú hangot kapunk. Ennek elméleti háttere az, hogy a palackok kialakítása egy Helmholtz-rezonátorhoz hasonlít, ezért alapfrekvenciájuk az üreg térfogatának négyzetgyökével fordítottan arányos (41).

Érdekes feladat lehet akár mérési eredményekből is kideríteni, hogy milyen összefüggés van a térfogat és a frekvencia között. A probléma feltárásának iskolai körülmények közötti megvalósítása természetesen normál óraszámban nem, de szakköri keretek között megvalósítható. Miután az előbb említett szemléletes kísérletből láttuk, hogy a frekvencia (f) a palack üregében lévő térfogattal (V) arányos, ezért feltételezhetjük azt, hogy a frekvencia a térfogat valamely hatványával arányos, tehát létezik olyan a és b valós szám, amely mellett igaz az alábbi összefüggés:

$$f = a \cdot V^b.$$

Az egyenlet mindkét oldalának természetes logaritmusát véve, a

$$\ln f = b \cdot \ln V + \ln a$$

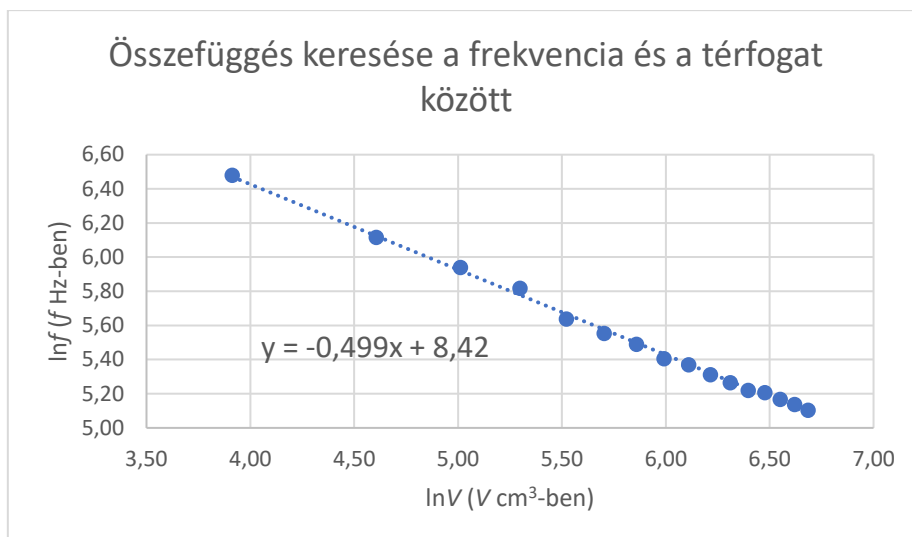
egyenletet kapjuk.

Egy 1,5 literes műanyag palack esetén végeztem el a mérést. Kezdetben csak a palack nyaka volt üres, ezután 50 cm³-enként kiöntöttem vizet az üvegből és megmértem a megszólaltatáskor kapott frekvenciát. Ehhez hangszínelemző programot használtam, és lejegyeztem a maximumokhoz tartozó rezgésszámokat.

V (cm ³)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
f (Hz)	652	453	379	336	281	258	242	222	215	203	193	185	182	175	170	164

12. táblázat: Mért frekvenciák különböző térfogatok esetén.

Ezután ábrázoltam a frekvencia természetes logaritmusát a térfogat természetes logaritmusának függvényében.



56. ábra: A frekvencia természetes logaritmusának a térfogat természetes logaritmusának függvényében.

A meredekség értékéből látható, hogy valóban a térfogat mínusz egyköttes hatványával arányos a frekvencia. A mérést egy másik palackkal is megismételtém, és hasonlóan pontos eredményt kaptam. Ilyen mérésekről számolt be Tóthné Juhász Tünde is a Fizikai Szemlében megjelent cikkében (Tóthné, 2021). Azt fontos megjegyezni, hogy a fújáskor kapott hangmagasság mérésekor néhány hertzes ingadozást tapasztalhatunk a fújástól függően, ahogy ezt fúvós hangszerek intonációjakor is megfigyelhetjük. Ez viszont többnyire 1%-os hibahatáron belül mozog, így a görbénk jellegét érdemben nem befolyásolja.

Vizespalackból harsonaszerű hangszert is készíthetünk. Ehhez egy palacknak az alját, egy másiknak pedig a tetejét vágjuk le. A palackaljba vizet töltve, a másik palackot beletartva készen is van a palackharsonánk. A felső palackot megfújva, és emelve, illetve süllyesztve változtatható a rezgésbe hozott levegő mennyisége és ezzel együtt a hangmagasság. Az egyetlen hátrány, hogy bár jelöléseket elhelyezhetünk a felső palackon, de azt nem látjuk, így leginkább a fülünk után kell játszani.



57. ábra: Palackharsona. (saját kép)

3.4.3. Zenélő borospoharak

Jól ismert tény, hogyha vékony falú üvegpoharak száján végighúzzuk az ujjunkat, akkor szépen csengő hangot hallatnak. De miért van ez így? Azt már a témakör elején megtanulják a diákok, hogy ahhoz, hogy hangot keltsünk, mindig valamilyen rezgésnek kell történnie. Ennek most az oka az, hogy a pohár szája nem teljesen sima, kissé bordázott, melyben az ujjunk néha megakad, majd megcsúszik, ezáltal a pohár gerjesztve lesz. Ebből a gerjesztésből a pohár-víz rendszer sajátfrekvenciájának megfelelő hang kerül felerősítésre. A diákok számára ez a hangszer is tartogathat meglepetést hangmagasság tekintetében. A kísérleti bemutatókon szerzett tapasztalatom az, hogy a diákok az előző palackos kísérletek miatt azt gondolják, hogy megint a kevesebb víz (több levegő) esetén kapunk mélyebb hangot. De, amint két azonos, ellenben különböző mennyiségű vizet tartalmazó poharat szólaltatunk meg, rájönnek, hogy a változás itt éppen fordítva történik.

Az előbbi kísérleteket elemezve nagyon fontos felhívni a figyelmet arra, hogy a kialakuló frekvenciát mindig az határozza meg, hogy éppen mi a rezgő közeg, amiben állóhullám tud kialakulni. Jelen esetben a pohár és a benne lévő víz jön rezgésbe, így a több vízzel nagyobb tömeget hozunk rezgésbe, ami persze egy lomhább, lassabb rezgést fog eredményezni.

A vízszint magasságával a poharak könnyen hangolhatók. Zenei hangokra is beállíthatjuk a poharak hangmagasságát, amihez ismét segítségünkre lehet a telefonunk hangoló applikációja. A hangoló egy hang megszólaltatása után jelzi, hogy a zenei hanghoz képest mélyebb-e vagy magasabb-e a poharunk hangja, így tudjuk, hogy éppen elvenni vagy hozzáadni kell vizet a pohárhoz. Miután a hangolás elkészült, már csak a poharak hangterjedelmére kell szabni kedvelt dallamainkat. Egyforma pohárkészlet esetén általában 6 szomszédos egész hang megszólaltatható, így például a „Tavaszi szél” kezdetű népdal eljátszható. Ha nagyobb hangterjedelmű dalokat akarunk játszani, akkor többféle pohár is szükséges lesz. Fontos megjegyezni, hogy a sikerességünk a poháron is múlik, szerencsésebb, ha vékony falú poharak állnak rendelkezésünkre.



58. ábra: Behangolt borospoharak. (saját kép)

A borospoharakkal kapcsolatban további érdekes jelenség az, amikor valaki akár az énekhangja segítségével össze tud törni egy ilyen poharat. Ennek a jelenségnek a hátterében a rezonancia jelensége áll, mert ha a sajátfrekvenciáján gerjesztjük a poharat, akkor az nagy amplitúdójú rezgésbe jön, ami akár ahhoz is vezethet, hogy az anyaga nem bírja tovább a kialakuló feszültséget, és eltörik.

Mi is megvizsgálhatjuk, hogy mennyire tudunk csupán hanggal rezgésbe hozni egy poharat. Ehhez tudni kell, hogy milyen frekvenciát használjunk. Ha az üres poharat rezgésbe hozzuk a már ismert módon, és megmérjük a rezgés frekvenciáját, akkor megkapjuk a pohár sajátfrekvenciáját. Ezután például egy vezeték nélküli hangszórón ezt a frekvenciát lejátszva el tudjuk végezni a kísérletet. A hangszóró hangerejét érdemes maximumra állítani és közel tartani a pohárhoz, helyzetét többször változtatni, keresve a rezgés felerősödését. Ha nem látunk változást, akkor érdemes egy szívószálat rakni a pohárba, hogy a szívószál ugrálása láthatóvá tegye a pohár rezgését.



59. ábra: A kísérlethez használt eszközök. (saját kép)

3.5. A téma további tantárgyi kapcsolódásai

Az, hogy mennyire részei az életünknek a hangok, az abban is megmutatkozik, hogy több tantárgy keretében is tárgyalható a hangok világának témaköre. A dolgozatomban láthattunk több kapcsolódási pontot például a biológiával. A téma tanításakor mindenképpen érdemes egyeztetni a biológia szakos kollégákkal, hogy eredményesebb lehessen a fizikai órákon tanultak összekapcsolása a biológiával, legyen az a hallás, a hangképzés embereknél és állatoknál egyaránt, vagy éppen az orvosi alkalmazások. A másik már említett kapcsolódás az ének-zene tantárgy anyaga. A közös zenélés, a hangszerek megismerése az énektanár szakmai segítségével tud hatékonyan megtanult anyaggá válni. Az előbbiektől mellett egy másik tantárgy lehetséges hangtani megközelítéseit szeretném bemutatni, ez a tantárgy a matematika.

3.5.1. Temperált skála mint mértani sorozat

Érdekessé a zenei skálákról is beszélni a diákokkal. Ezt akár matematika óra keretében is megtehetjük a hangtan fejezet ideje alatt vagy amikor a mértani sorozatokat tanulják a diákok.

Bár ez időigényes, de beszélhetünk a felharmonikusok frekvenciaarányaira épülő skálák hibáiról. Csak felvetni is érdemes lehet, hogy próbáljunk meg alkotni egy ilyen hibáktól minél mentesebb skálát. A megvalósításhoz próbáljunk meg a legkisebb hangközökre állandó, egyenletes frekvenciaarányokat bevezetni! Tekintsük egy oktávnyi hangtávolságot, ami 12 félhangnyi távolságból áll.



60. ábra: A-A' skála félhangonként. (MuseScore, saját kép)

Ekkor minden szomszédos hang kis szekund távolságban van. Legyen a frekvenciák aránya minden kis szekund esetében q . Így igaz például, hogy

$$f_{A\#} = f_A \cdot q.$$

Ekkor a B hang frekvenciája

$$f_B = f_{A\#} \cdot q = f_A \cdot q \cdot q = f_A \cdot q^2.$$

Ezen gondolatmenet alapján láthatjuk, hogy

$$f_{A'} = f_A \cdot q^{12}.$$

De, mint legfontosabb arány, ragaszkodjunk ahhoz, hogy egy oktávnyi különbség kétszeres frekvenciát jelent. Így

$$f_{A'} = 2f_A.$$

Minden eddigit kihasználva, felírhatjuk, hogy

$$f_A \cdot q^{12} = 2f_A.$$

Ebből

$$q^{12} = 2.$$

Így az általunk használt állandó arány $q = \sqrt[12]{2}$. Próbáljuk ki, hogy működik-e az általunk eddig megismert hangközarányokra! Természetesen ragaszkodjunk ahhoz is, hogy a normál zenei A hang 440 Hz. A számolásaink alapján ezért

$$f_A = 440 \text{ Hz},$$

így például

$$f_D = f_A \cdot q^5 = 440 \text{ Hz} \cdot (\sqrt[12]{2})^5 \approx 587,33 \text{ Hz}.$$

A két hang frekvenciaaránya

$$\frac{f_D}{f_A} = (\sqrt[12]{2})^5 \approx 1,3348.$$

Ez a tiszta kvartról tanult 4:3 arányhoz képest kevesebb, mint 2 ezreddel tér el. Bármilyen hangközre is alkalmazzuk, ez egy jó megoldás, a tiszta arányoktól az eltérések kisebbek, mint 1 százalék. Ez a skála így oktávok közötti váltásokra is „jól” reagál már, nem okoz problémát a transzponálás sem. Emiatt is ez lett az elterjedt hangskála, amit kiegyensúlyozott, vagy egyenlően temperált skálának is szokás nevezni.

3.5.2. Hangerősség vizsgálata a logaritmus egy lehetséges bevezetésére

A kerettantervekben megfogalmazott irányt követve ajánlott a hangerősség mérésével is foglalkozni. A javaslatoknak megfelelően mindennapi hanghatások erősségét telefonos hangerősségmérővel könnyen meg tudjuk vizsgálni. Ez egyszerűen hangzik, de csak akkor igazán hasznos és előremutató, ha megelőzi a decibelskála megértése.

Amennyiben néhány konkrét hanghatás intenzitásának értékét megmutatjuk a diákoknak, akkor kétféle igény is felmerülhet. Egyrészt jó lenne, ha le tudnánk a sokféle prefixum nélkül is fedni az értékeket, másrészt az értékek kényelmes ábrázolására is szeretnénk találni megoldást. Ehhez tekintsünk pár konkrét értéket!

Hanghatás	Intenzitás (W/m^2)
Sugárhajtómű 30 méterről	10^3
Láncfűrész közelről	1
Kamion 1 méterről	10^{-3}
Vendéglő alapzaja	10^{-6}
Színházi csend	10^{-9}
Hallásküszöb	10^{-12}

13. táblázat: Intenzitásértékek a jelenleg érvényes tankönyv értékei alapján (Fizika 9-10., 2020., 140. oldal)

Látjuk, hogy több nagyságrendet ölelnek át az értékek. A könnyebb összehasonlításhoz érdemes kijelölni egy viszonyítási alapot. Erre természetes választás lehet az 1000 Hz-es frekvenciához tartozó hallásküszöb. Ezentúl az értékeket az új számításunkban adjuk meg annak megfelelően, hogy hányszorosai az alappont intenzitásának! Ekkor a diákokat, ha megkérdezzük, hogy 10 különböző hatványai helyett mit lenne kényelmesebb használni, akkor ésszerű választás lehet, hogy csak a hatványkitevőket nevezzük meg, az alapján mindenki tudni fogja a szabályunk ismeretében a pontos értéket is.

Hanghatás	Relatív intenzitás	Helyette használt érték
Sugárhajtómű 30 méterről	10^{15}	15
Láncfűrész közelről	10^{12}	12
Kamion 1 méterről	10^9	9
Vendéglő alapzaja	10^6	6
Színházi csend	10^3	3
Hallásküszöb	$1 = 10^0$	0

14. táblázat: Az újonnan kialakított szabályunk szerinti értékek.

Eddig ez nagyon jól működik, de milyen értéket tudunk hozzárendelni például a $8 \cdot 10^{-6}$ W/m^2 intenzitáshoz? Első lépésünk ugyanúgy a relatív intenzitás kiszámolása, ez $8 \cdot 10^6$. Ahhoz, hogy megmaradjon a nyilván elvárt monotonitás, az egyértelmű, hogy 6 és 7 közötti

értéket kell adnunk az új szabályunk szerint. A szabály azt mondja meg, hogy az adott szám 10-nek hányadik hatványa. Kövessük ezt, számológéppel próbálgatva keressünk olyan kitevőt, amire megkapjuk a nyolcmilliót! Ügyes próbálgatással gyorsan láthatjuk, hogy

$$10^{6,903} \approx 7998343 \approx 8 \cdot 10^6.$$

Így láthatjuk, hogy bármely pozitív számhoz ki tudjuk számolni, hogy a szabályunk milyen számot rendel hozzá, jelen esetben hozzávetőlegesen 6,903-at.

Erre vezessünk be egy új jelölést! Azt, hogy egy számhoz azt a számot rendeljük, ahányadik hatványa 10-nek, a következőképpen jelölhetjük:

$$\lg 10^6 = 6.$$

Ekkor a szabályunk azt mondja, hogy osszuk el az intenzitás (I) értékét a hallásküszöb intenzitásával (I_0), majd adjuk meg, hogy a kapott szám 10-nek hányadik hatványa, tehát:

$$\lg \frac{I}{I_0}.$$

Ezzel tudjuk átlátható intervallumon belül jellemezni számértékileg a hangintenzitást. Nézzük meg, hogy a gyakorlatban is hasonló módszert használnak-e! A telefonos hangerősségmérő programnál (26) láthatjuk, hogy az egy csendes osztályteremben 30-35 dB jelzést ad. Egy kisebb alapzaj esetén 60 dB körüli értékeket tapasztalhatunk. Ezt összehasonlítva a mi szabályunkkal, látható, hogy a decibel értékekre használt szabály hasonló a miénkhez, csak a mi értékeink mindig meg vannak szorozva még 10-zel. Innen már könnyen megérthető, hogy a „Hangmagasság és a hallás” fejezetben is használt azonos hangosság görbéken a 10 decibelnyi különbség mindig egy 10-es, a 30 decibelnyi különbség mindig 1000-es nagyságrendi különbséget jelentett.

Gyakorló tanításom és korrepetálások alatt is azt tapasztaltam, hogy a diákok ugyan be tudják gyakorolni a logaritmussal való számolást, de a tényleges megértés csak kevés diáknál valósul meg. Úgy gondolom, hogy a logaritmus ilyen irányú bevezetése a megértést és a tudás maradandóságát is elősegíti.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom elején a 2012-es és 2020-as Nemzeti alaptanterv rendelkezéseit foglaltam össze a hangtanra vonatkozóan, röviden áttekintettem a kerettanterveket és a hozzájuk íródo tankönyvek adta lehetőségeket.

Ezt követően bemutattam az általam is használt demonstrációs kísérleteket, mérési feladatokat, mindezt könnyen elérhető eszközigénnyel. A dolgozatban sok példát mutattam arra, hogy a megismerés egyik legfontosabb eszköze az okostelefonunk vagy számítógépünk lehet a könnyen használható hangtani mérési lehetőségeivel.

Bemutattam a téma több tantárgyhoz való kapcsolódási lehetőségét, azt, hogy az ének-zene, a matematika- és a biológiaórákon tanultakat hogyan tudják kiegészíteni a fizika hangtan fejezeteiben tanult tartalmak.

Fontos elmondanom, hogy mind a dolgozatkészítést megelőzően, mind a dolgozatkészítés folyamatában számos lehetőségem volt arra – Kutatók Éjszakája, JGYPK Természetismereti Tudástár, Science on Stage Festival, SZTE Egyetemi Tavasz, JGYPK Ének-zene Tanszék, Általános Iskolai osztályok Szegeden és Orosházán, JGYPK ÚNKP kari konferencia –, hogy a dolgozatban ismertetett ötleteimet kipróbálhassam, és a szerzett tapasztalatokat beépíthessem tanítási módszereimbe.

A számos ismeretterjesztő előadásnak köszönhetően úgy érzem, hogy tapasztalatot szereztem abban is, hogy hogyan lehet különböző korosztályoknak és érdeklődési köröknek megfelelően érthetően előadni a témát. A témával való foglalkozás alatt én is nagyon sok hangtani ismerettel gazdagodtam, és ennek révén a saját hangszeremet is sokkal jobban megismertem. Mint fizikatanár is sokat fejlődtem, gyakorlottabb lettem új ötletek kitalálásában és megvalósításában is.

Fontosnak tartom azt az üzenetet, amit Marianne Fillenz romániai születésű brit idegtudós is megfogalmazott (42):

„A zene mindenkinek a közös nyelve, annak is, aki sosem tanulta.”.

Úgy gondolom, hogy az ismeretterjesztő előadásaimmal sikerült azt is megmutatni diákoknak és felnőtteknek egyaránt, hogy annak ellenére, hogy valaki nem tanult zenélni, megtapasztalhatja a közös zenélés élményét.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- Budó Ágoston (1997): *Kísérleti fizika I.*, Nemzeti Tankönykiadó, Budapest, 331-362.
- Mester András (2007): Hallhatatlan Hangok. *Fizikai Szemle* **57.** 8. sz. 288-290.
- Ludmány András (2017): Felkészülési segédlet a Zenei Akusztika c. tárgy vizsgájához a Debreceni Egyetem Konzeratóriumában.
https://music.unideb.hu/sites/default/files/upload_documents/akusztika_2018.pdf
(2022.11.13.)
- Kasper, Lutz; Vogt, Patrik (2020): Corkscrewing and speed of sound: A surprisingly simple experiment, *The Physics Teacher*, **58.**, 278.
- Nagy Anett, Papp Katalin (2009): Hangszerek a semmiből. *Fizikai Szemle* **59.** 2. sz. 65-72.
- Öveges József (1999): *Az élő fizika*, Aranyhal Könyvkiadó, Budapest, 332-418.
- Tóthné Juhász Tünde (2021): Üveg megfűjásával keltett hang frekvenciájának vizsgálata Audacity programmal. *Fizikai Szemle* **71.** 7-8. sz. 280-283.
- (1) *Magyar Közlöny* **2012.** évi 66. szám
- (2) A 2012-es NAT-hoz illeszkedő kerettantervek
https://www.oktatas.hu/kozneveles/kerettantervek/2012_nat (2022.11.13.)
- (3) *Magyar Közlöny* **2020.** évi 17. szám
- (4) A 2020-as NAT-hoz illeszkedő tartalmi szabályozók
https://www.oktatas.hu/kozneveles/kerettantervek/2020_nat (2022.11.13.)
- (5) Dégen Csaba, Medgyes Sándorné, Sztanó Péterné (2022): *Fizika Tankönyv 7-8.*, Oktatási Hivatal, Budapest
<https://www.tankonyvkatalogus.hu/site/kiadvany/OH-FIZ78TA> (2022.11.13.)
- (6) Dégen Csaba, Medgyes Sándorné, Sztanó Péterné (2022): *Fizika Munkafüzet 7-8.*, Oktatási Hivatal, Budapest
<https://www.tankonyvkatalogus.hu/site/kiadvany/OH-FIZ78MA> (2022.11.13.)
- (7) Dégen Csaba, Major Balázs (2022): *Fizika Tankönyv 7-8.*, Oktatási Hivatal, Budapest
<https://www.tankonyvkatalogus.hu/site/kiadvany/OH-FIZ78TB> (2022.11.13.)
- (8) Dégen Csaba, Major Balázs (2022): *Fizika Munkafüzet 7-8.*, Oktatási Hivatal, Budapest
<https://www.tankonyvkatalogus.hu/site/kiadvany/OH-FIZ78MB> (2022.11.13.)
- (9) <https://www.nkp.hu/>

- (10) Közismereti érettségi vizsgatárgyak 2024. május-júniusi vizsgaidőszaktól érvényes vizsgakövetelményei
https://www.oktatas.hu/koznevelas/erettsegi/kozismereti_vizsgatargyak_2024tol
(2022.11.13.)
- (11) Csajági Sándor, Elblinger Ferenc, dr. Fülöp Ferenc, Póda László, Simon Péter, Urbán János (2021): Fizika 9-10. a középiskolák számára II. kötet, Oktatási Hivatal, Budapest
https://www.tankonyvkatalogus.hu/site/kiadvany/OH-FIZ910TB_II (2022.11.13.)
- (12) dr. Ádám Péter, dr. Egri Sándor, Elblinger Ferenc, Horányi Gábor, Simon Péter (2020): Fizika 9-10. II. kötet, Oktatási Hivatal, Budapest
https://www.tankonyvkatalogus.hu/site/kiadvany/OH-FIZ910TA_II (2022.11.13.)
- (13) Straw Waves <https://youtu.be/kyRzJ0lYUn8> (2022.11.13.)
- (14) Bowed violin strin in slow motion <https://youtu.be/6JeyiM0YNo4> (2022.11.13.)
- (15) Acoustictrench, *Instagram* <https://www.instagram.com/p/B-NKDpcH8em/> (2022.11.13.)
- (16) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Rolling_shutter_SMIL.svg
(2022.11.13.)
- (17) Sophie Germain, *Britannica* <https://www.britannica.com/biography/Sophie-Germain>
(2022.11.13.)
- (18) The Rings of Power – Opening Intro <https://youtu.be/IqW3rw5UNUo> (2022.11.13.)
- (19) Vibration. See the unseen: Cymbal at 1,000 frames per second.
<https://youtu.be/kpoanOlb3-w> (2022.11.13.)
- (20) Mikrofon és hangszóró
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.eonsoft.micspeaker> (2022.11.13.)
- (21) Daniel A. Russell: Acoustics and Vibration Animations
<https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/standingwaves/standingwaves.html> (2022.11.13.)
- (22) https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-the-mouthpiece-of-a-clarinet_fig1_268185248 (2022.11.13.)
- (23) https://www.birdwatchingdaily.com/news/science/owl-behavior-hunting/barn-owl-ears_660x550/ (2022.11.13.)
- (24) Frequency Sound Generator
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.boedec.hoel.frequencygenerator&hl=hu&gl=US&pili=1> (2022.11.13.)
- (25) Inner ear, *Britannica* <https://www.britannica.com/science/inner-ear> (2022.11.13.)

- (26) Hangmérő
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.binghuo.soundmeter&hl=hu&gl=US>
(2022.11.13.)
- (27) Soundcard Oscilloscope https://www.zeitnitz.eu/Scope_en (2022.11.13.)
- (28) Measuring the speed of sound, *Britannica*
<https://www.britannica.com/science/acoustics/Measuring-the-speed-of-sound> (2022.11.13.)
- (29) Phyphox <https://phyphox.org/> (2022.11.13.)
- (30) Smartphone-Experiment: Speed of Sound (en) <https://youtu.be/uoUm34CnHdE>
(2022.11.13.)
- (31) Hangsebesség, *Wikipédia* <https://hu.wikipedia.org/wiki/Hangsebesség>
(2022.11.13.)
- (32) Sound, *Britannica* <https://www.britannica.com/science/sound-physics/Open-tubes#ref527283> (2022.11.13.)
- (33) Phyphox fórum: corkscrew and speed of sound.
<https://phyphox.org/forums/showthread.php?tid=776> (2022.11.13.)
- (34) Virtual Oscilloscope <https://academo.org/demos/virtual-oscilloscope/> (2022.11.13.)
- (35) Soundcorset hangoló <https://soundcorset.com/> (2022.11.13.)
- (36) Pipes and Harmonics, *UNSW Sydney* <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/pipes.html>
(2022.11.13.)
- (37) The sound illusion that makes Dunkirk so intense <https://youtu.be/LVWTQcZbLgY>
(2022.11.13.)
- (38) Shepard Tone <https://youtu.be/BzNzgsAE4F0> (2022.11.13.)
- (39) The Phenomenon of the Missing Fundamental <https://youtu.be/AZ8qZCGg4Bk>
(2022.11.13.)
- (40) MuseScore <https://musescore.org/en> (2022.11.13.)
- (41) The Helmholtz resonator, *Britannica* <https://www.britannica.com/science/sound-physics/The-Helmholtz-resonator> (2022.11.13.)
- (42) https://www.citatum.hu/idezet/128104_ (2022.11.13.)

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Farkas Zsuzsanna tanárnőnek a több éve tartó közös munkáért. Bátorítása, folyamatos segítése és töretlen bizalma elengedhetetlen volt ezen dolgozat elkészültéhez.

Szeretném megköszönni Horváth Zsolt technikusnak a sok segítséget, amit a kísérletek, előadások előkészítésében adott, és Dr. Sós Katalin tanárnőnek az ötleteit, amivel teljesebb lett a dolgozatom.

Két évfolyamtársam, Kovács Eszter és Spitzner Dóra nélkül sem lehetett volna teljes a munkám, akikkel mindig meg tudtam beszélni ötleteimet.

Végezetül hálás köszönettel tartozom családomnak a tőlük kapott rengeteg támogatásért, és azért, hogy kiskoromtól kezdve láthattam, hogy mennyit ad a zene hozzá egy ember életéhez.

„A dolgozat a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”

