

I. gimnazija v Celju
Kajuhova 2
CELJE

Ogenj proti Zvoku

Raziskovalna naloga
Področje: fizika

Avtor: Jaka Kumer, 3.Č

mentor: Žan Jerman, prof.

Mestna občina Celje, Mladi za Celje
Celje, marec 2026

Kazalo vsebine

Povzetek	3
Abstract	3
1. Uvod	4
2. Hipoteze	4
3. Teoretični del	4
3.1. Zvok	4
3.2. Fizikalne lastnosti zvoka	5
3.3. Odbijanje zvoka	8
3.4. Valovanje	10
3.5. Delovanje zvočnika in ojačevalca	12
3.6. Ogenj	13
3.7. Plazma	13
3.8. Raziskovalna metoda	15
4. Raziskovanje	15
5. Rezultati	<i>Napaka! Zaznamek ni definiran.</i>
6. Diskusija	17
7. Viri	18

Kazalo slik

Slika 1: Graf pritiska v odvisnosti od razdalje	6
Slika 2: Fletcher-Munsonove krivulje	7
Slika 3: Prikaz geometričnega odboja zvoka	9
Slika 4: Eksperiment samo z wooferjem	16
Slika 5: Eksperiment z wooferjem in konusom	16

Povzetek

V raziskovalni nalogi sem meril pri kolikšni razdalji in kako učinkovito lahko ogenj ugasnemo s pomočjo zvoka. Uspešnost pojava sem meril kot uspešno in neuspešno torej le ali je ogenj ugasnil ali pa ni, brez vmesnih rezultatov. Meril sem frekvenco pri kateri je plamen ugasnil, razdaljo plamena od vira zvoka in obnašanje plamena, ko je bil izpostavljen zvoku vendar ni ugasnil. Opazil sem, da so bile nižje frekvence veliko bolj učinkovite pri ugašanju plamena kot višje, zato sem jih uporabljal skozi celoten eksperiment. Uspešno sem potrdil vse zastavljene hipoteze z eksperimenti, ki sem jih zasnoval. Prvo hipotezo sem potrdil z poskušanjem tonov različnih frekvenc, drugo pri spreminjanju glasnosti in tretjo tako, da sem dal konus pred vir zvoka in poskusil ugasniti plamen.

Abstract

In my research paper, I measured the distance and how effectively a fire can be extinguished using sound. I measured the success of the phenomenon as successful and unsuccessful, i.e. whether the fire was extinguished or not, without intermediate results. I measured the frequency at which the flame was extinguished, the distance of the flame from the sound source, and the behavior of the flame when it was exposed to sound but did not go out. I noticed that lower frequencies were much more effective at extinguishing the flame than higher ones, so I used them throughout the experiment. I successfully confirmed all of the hypotheses I set up with the experiments I designed. I confirmed the first hypothesis by trying tones of different frequencies, the second by changing the volume, and the third by placing a cone in front of the sound source and trying to extinguish the flame.

1. Uvod

V tej nalogi bom raziskoval fenomen, ki je ugašanje ognja s pomočjo zvoka. Zvok, ki je longitudinalno valovanje, lahko s sabo odnese zgoščine molekul kisika, ki so potrebne, da ogenj gori. Na začetku sem prišel do te hipoteze preko naloge, ki mi je bil zastavljena na tekmovanju IYPT. Odločil sem se, da bom ta pojav raziskal podrobneje. Najprej bom podrobneje razložil, kaj je zvok, kaj je ogenj in zakaj ga zvok sploh lahko pogasi. V nadaljevanju bom predstavil postopek znanstvene metode, s katero sem raziskoval in potek eksperimentov, s katerimi sem testiral svoje hipoteze. Na koncu bom predstavil rezultate, ter dodal nekaj iztočnic za izboljšanje in nadaljnje raziskovanje.

2. Hipoteze

Dobil sem hipotezo. Ali je možno ugasniti ogenj s pomočjo zvoka? To vprašanje me je zamaknilo in sem takoj začel z raziskovanjem. Najprej sem si zastavil nekaj hipotez. Vedel sem, da je možno ogenj ugasniti vendar nisem bil prepričan kako to prav zvočni valovi naredijo. Zastavil sem si tri hipoteze. Prva je bila, da bodo basovski toni torej toni z nižjo frekvenco bolje ugašali ogenj kot ostale frekvence zaradi razlike v valovanju. Druga hipoteza je bila, da je glasnost pomembna. Glasnejši kot bodo toni, hitreje bo ogenj ugasnil ter zvok bo pri isti frekvenci in večji glasnosti bolje ugasnil ogenj kot pa pri nižji glasnosti. Tretja hipoteza je bila, da bo zvočnik, ki bo lahko koncentriral zvok na manjšo površino bolj učinkovito ugasnil plamene. To vključuje tudi plamene na večji razdalji.

3. Teoretični del

V tem poglavju bom najprej razložil, kaj je zvok, kako ga lahko merimo in na kakšne težave lahko pri tem naletimo. Bežno bom razložil tudi, kaj je ogenj in kaj je potrebno za njegov obstoj ter kako ga lahko v pogasimo z znanjem iz zvoka. Razložil bom tudi, kako deluje zvočnik, ki sem ga uporabljal pri poskusih ter natančneje predstavil, kaj je znanstvena metoda in kako sem jo implementiral pri svojem raziskovanju.

3.1. Zvok

Valovanje (od nihanja vira naprej, kaj niha, kaj je motnja, kako potuje, kaj je longitudinalno/transverzalno valovanje, količine, s katerimi valovanje opisujemo

$$y(x, t) = A \cdot \cos \left(2\pi \left(\frac{t}{t_0} - \frac{x}{\lambda} \right) \right)$$

A-amplituda, t_0 -nihajni čas vira, frekvenca = $1/t_0$, lambda-valovna dolžina

Zvok je longitudinalno valovanje, vendar se to lahko tudi spremeni. Zvok je longitudinalno valovanje le v plinih in kapljevinah, a ko pa potuje v trdninah pa potuje kot transversalno valovanje. Zvok ima tudi svojo frekvenco, ki se meri v hertzih [Hz] in svojo jakost, ki se meri v decibelih [dB]. Kot sam, zvok potuje po zraku preko trdih snovi vendar se od njih lahko tudi odbije. Zvok je mehansko valovanje, ki nastane kot posledica nihanja delcev v elastičnem mediju, kot so plini, tekočine ali trdne snovi. To nihanje povzroči spremembe tlaka, ki se širijo skozi medij v obliki vzdolžnih valov. Zvok se prenaša z energijo, vendar ne povzroča trajnega premika snovi. Za boljše razumevanje zvoka, ga lahko analiziramo z vidika njegove fizikalne narave, matematične obravnave in vpliva na človeka.

3.2. Fizikalne lastnosti zvoka

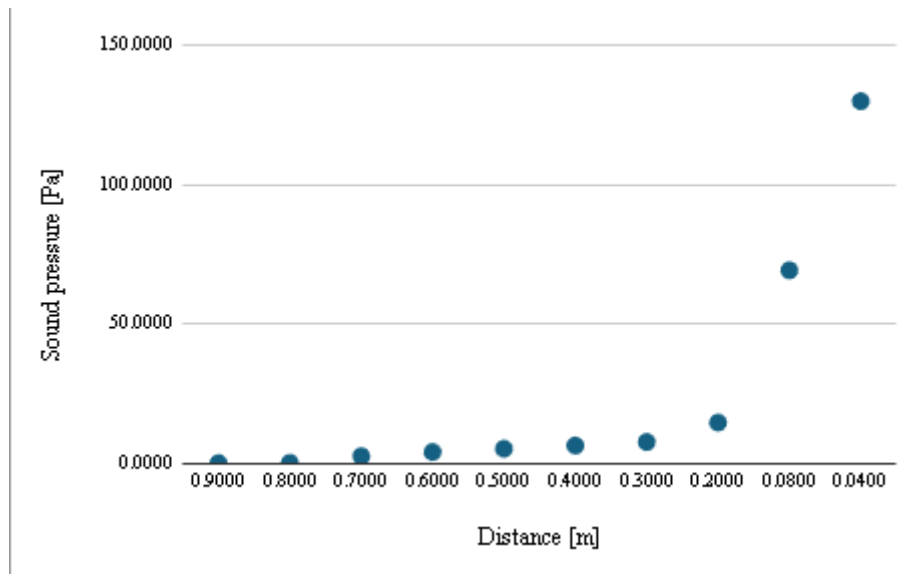
Zvok nastane ko nek vir povzroči nihanje delcev v mediju. Na primer, vibracije strun na kitari ali vibracije glasilk ustvarijo območja visokega in nizkega tlaka, ki se izmenjujoče širijo v mediju. Te spremembe tlaka so osnovni nosilec zvočnih informacij. Zvok največkrat interpretiramo kot longitudinalno ali vzdolžno valovanje, kar pomeni, da delci nihajo vzporedno s smerjo širjenja vala. Hitrost zvoka je odvisna od lastnosti medija, kot so gostota in modul elastičnosti. Recimo, hitrost zvoka v zraku pri 20 °C znaša približno 343 m/s, v vodi okoli 1480 m/s v jeklu pa okoli 5960 m/s. Zvok kot pojav lahko ločimo na tri različne dele. Prvi je infrazvok, ki deluje s frekvenco pod 20 Hz. Pogosto ga ustvarjajo naravni pojavi kot so vulkani in potresi ter ga človeško uho ne zazna. Slišni zvok je ves zvok, ki je med frekvencama 20 Hz in okoli 20000 Hz. Ta zvok lahko ljudje zaznamo z golim ušesom glede na staorst. Raziskave so pokazale, da je najvišja frekvenca, ki jo slišimo odvisna od naše starosti. Ultrazvok je ves zvok s frekvenco nad okoli 20000 Hz. Teh frekvenc ne slišimo, vendar imajo široko uporabo v medicini in industriji. Osnovni matematični model za opis zvoka se zapiše z enačbo

$$y(x, t) = A \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{t}{t_0} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

Ta enačba nam opisuje harmonično širjenje zvoka v prostoru vendar ni edini način s katerim lahko zvok opišemo matematično. Kot že prej navedeno, je hitrost zvoka po zraku približno 343 m/s. Ta podatek smo izračunali s pomočjo naslednje enačbe

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

Kjer je c hitrost zvoka, γ adiabatni koeficient, p tlak plina in ρ gostota plina. Iz te enačbe lahko dobimo hitrost zvoka v vsakem plinu. Zvok se lahko v fiziki opiše tudi z zvočnim tlakom. Ker se tlak zraka zaradi zvočnega vala lahko spremeni, je tu glavni razlog zakaj lahko sploh ugasnemo plamen le s pomočjo zvoka. Ker je energijska gostota mehanskih vibracij zvoka sorazmerna kvadratu zvočnega tlaka, lahko poskusimo napovedati kdaj bo nek val imel dovolj energije, da ugasne ogenj. Večji zvočni tlak tudi pomeni glasnejši zvok, zato to direktno povežemo z glasnostjo zvoka. Za moj glavni zvočnik, ki sem ga uporabil pri eksperimentu sem tako dobil graf pritiska v odvisnosti od razdalje.



Slika 1: Graf pritiska v odvisnosti od razdalje

Od tu lahko opazimo, da bližje kot smo viru zvoka, višji pritisk bo ta oddal. Opazimo tudi, da smo izmerili pritisk okoli 130000 Pa. Ta podatek bomo zavrgli, saj je atmosferski tlak 101325 Pa in tako visoke pritiske opazimo le pri npr. eksplozijah, soničnih boomih ali pa udarnih valovih in ne iz navadnega zvočnika. Za ostale zanesljive podatke pa lahko poskusimo izračunati energijo, ki jo zvok oddaja pri tisti razdalji. Najprej uporabimo enačbo

$$w = \frac{p^2}{2\rho c^2}$$

Kjer je:

w - energijska gostota [J/m^3]

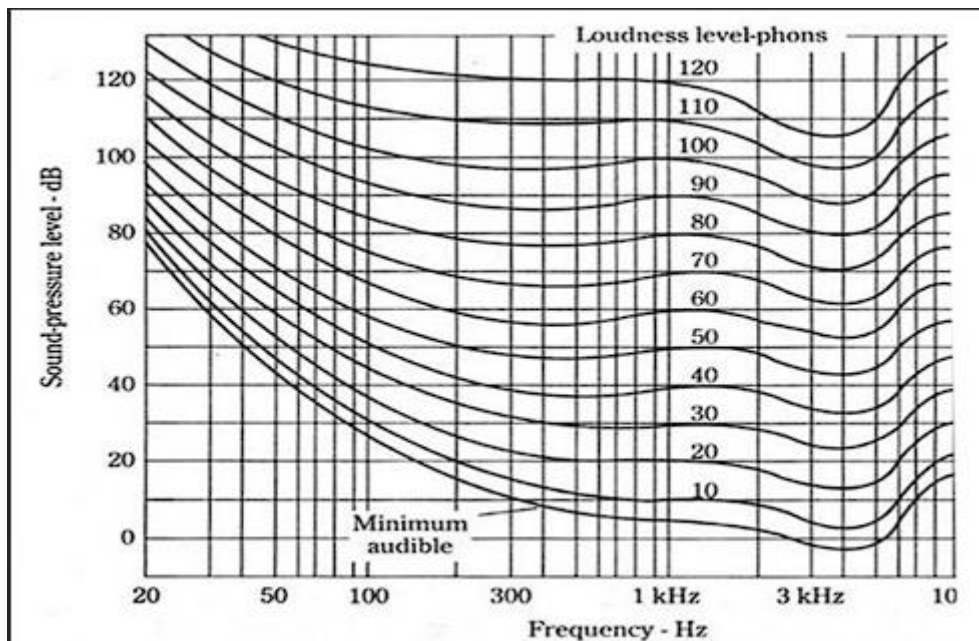
p - zvočni tlak [Pa]

ρ - gostota medija

c - hitrost zvoka.

Da bi od tu dobili energijo v joulih, moramo še poznati enačbo $E = w \cdot V$, kjer je V volumen prostora. Prej izračunan w vstavimo sem in vzamemo nek volumen okoli zvočnika, kjer je zvok nastal in dobimo energijo, ki jo to valovanje ima.

Zvok opišemo z glasnostjo ter frekvenco. Glasnost se meri v decibelih. Glasnost zvoka ni le odvisna od njegove fizikalne jakosti, temveč tudi od frekvence kar prikazujejo Fletcher-Munsonove krivulje.



Slika 2: Fletcher-Munsonove krivulje

Te krivulje predstavljajo povezavo med zvočnim tlakom (v decibelih) in frekvenco, pri kateri človek zazna zvok kot enako glasen. Fizikalno glasnost pogosto merimo z zvočnim tlakom ali intenziteto zvoka, vendar človeško uho ne zaznava vseh frekvenc enako učinkovito. Fletcher-Munsonove krivulje zato prikazujejo linije enake zaznane glasnosti. Vsaka krivulja predstavlja kombinacije frekvence in zvočnega tlaka, ki jih človek zazna kot enako glasne. Največjo občutljivost ima človeško uho približno med 2000 Hz in 5000 Hz. V tem območju je za zaznavanje zvoka potrebna najmanjša amplituda oziroma najnižji zvočni tlak. Pri zelo nizkih frekvencah (npr. 20–100 Hz) ali zelo visokih frekvencah pa mora biti zvočni tlak precej večji, da zvok zaznamo kot enako glasen. Zaradi tega je uvedena posebna enota zaznane glasnosti – phon, ki temelji na Fletcher-Munsonovih krivuljah. Ena vrednost v phonih pomeni, da zvok pri določeni frekvenci zveni enako glasno kot referenčni ton 1000 Hz pri enakem številu decibelov.

Frekvenca zvoka se preprosto opiše kot število nihajev v eni sekundi. Pove nam, kolikokrat se zračni tlak pri širjenju zvočnega vala v eni sekundi poveča in zmanjša. Frekvenca določa višino tona, ki ga slišimo. Če je ta majhna, zaznamo nizek ton, če je pa velika, zaznamo visok ton. Nizki toni - basi imajo frekvence od 20 Hz do 100 Hz, visoki toni nekaterih glasbil pa presežejo več tisoč Hz. Človeško uho običajno zazna frekvence od 20 Hz do 20000 Hz. Vse frekvence pod 20 Hz so infrazvok, vse nad 20000 Hz pa ultrazvok. Frekvenca je povezana tudi s hitrostjo zvoka po enačbi

$$v = \lambda f$$

Pojav, ki je tesno povezan s spreminjanjem frekvence se imenuje Dopplerjev pojav. Dopplerjev pojav, je fizikalni pojav, pri katerem opazovalec zazna spremembo frekvence oz. valovne dolžine vala, kadar se vir valovanja in opazovalec gibljeta glede na drug drugega. Pojav je značilen za vse vrste valov: zvočne valove, svetlobo in elektromagnetno sevanje. Najbolj znan primer Dopplerjevega pojava je sprememba višine tona sirene reševalnega vozila ali vlaka, ko se vozilo približuje opazovalcu in nato oddaljuje. Ko se vir zvoka približuje poslušalcu, zvočni valovi pred virom

postajajo bolj stisnjeni, kar pomeni, da ima opazovani val večjo frekvenco in krajšo valovno dolžino. Poslušalec zato zazna višji ton. Ko se vir oddaljuje, se valovi raztegnejo, frekvenca se zmanjša, valovna dolžina se poveča in zaznani ton postane nižji. Fizikalno lahko Dopplerjev pojav razložimo z lastnostmi širjenja valov. Če vir oddaja valove s frekvenco f in se ti širijo s hitrostjo v , se pri gibanju vira ali opazovalca spremeni razdalja med zaporednimi valovnimi frontami, ki dosežejo opazovalca. Ta sprememba razdalje povzroči drugačno frekvenco, ki jo opazovalec zazna. Za zvočne valove v zraku lahko opazovano frekvenco približno izračunamo z enačbo:

$$f' = f \frac{v + v_0}{v - v_s}$$

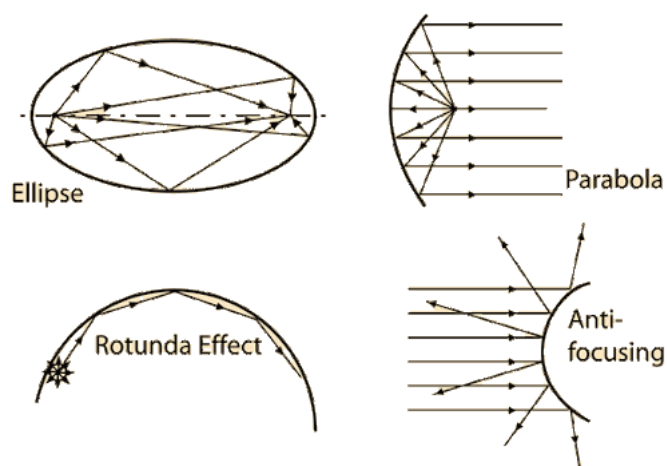
Če se vir približuje opazovalcu, je v_s pozitiven in frekvenca, ki jo zaznamo, se poveča. Če se vir oddaljuje, je frekvenca manjša od izvirne. Dopplerjev pojav ima zelo pomembne praktične uporabe. V astronomiji se uporablja za merjenje hitrosti oddaljevanja ali približevanja zvezd in galaksij. Ko se oddaljeni nebesni objekti oddaljujejo od Zemlje, se njihovo svetlobno sevanje premakne proti daljšim valovnim dolžinam, kar imenujemo Redshift. Ta pojav je bil ključen dokaz, da se vesolje širi. Nasprotno pa približevanje povzroči premik proti krajšim valovnim dolžinam oziroma Blueshift. Dopplerjev pojav se uporablja tudi v tehnologiji. Policijski radarji merijo hitrost vozil na podlagi spremembe frekvence odbitega radijskega vala. V medicini se uporablja Doppler ultrazvok, kjer se s pomočjo ultrazvočnih valov meri hitrost pretoka krvi v žilah. Sprememba frekvence odbitega ultrazvoka omogoča zdravnikom, da ocenijo delovanje srca in krvnega obtoka. Dopplerjev efekt bi lahko poskusil uporabiti v eksperimentu, vendar ga zaradi pogojev pod katerim se pojavi nisem.

3.3. Odbijanje zvoka

Zvok ko pride do neke površine se lahko odbije ali pa ga površina vpije. Odboj zvoka določi koeficient odbojnosti, ki zvok odbije od 0% do 100%. Tudi zvočni valovi se odbijajo po zakonu odboja, ki pravi, da je odbojni kot enak vpadnemu kotu. Hitrost zvoka je odvisna tudi od snovi od katere se zvok odbije. To lahko izračunamo po enačbi $c = \lambda * f$. Od tu lahko vidimo, da je hitrost večja, pri manjši stisljivosti in gostoti snovi od katere se odbija. Namesto stisljivosti, ki je označena z X , lahko tudi uporabimo modul elastičnosti. Na odbijanje zvoka pa dejansko vpliva več dejavnikov kot so lastnosti površine od katere se zvok odbija, gostote in sestave medija, kota vpadnega vala in frekvenca zvoka. Pri lastnosti površine gre lahko ali za gladkost ali pa za hrapavost nje. Pri gladkih površinah se zvok odbije enakomerno in v isti smeri, pri bolj hrapavih površinah pa pride do razpršenega odbijanja zvočnih valov. Pri gostoti in sestavi medija gre za dejansko mejo med dvema različnima gostotama. Na primer, če imata vir in medij zelo različne gostote to tudi povzroči močnejše odbijanje kot pa če bi imela podobne gostote. Kot vpadnega vala je tudi pomemben, saj pri majhnih vpadnih kotih se več zvoka odbije v isti smeri nazaj kot pa pri večjih kotih kjer se zvok pogosto širi bolj stransko in se lahko kombinira z lomom. Odboj je tudi odvisen od frekvence saj se visokofrekvenčni zvoki odbijajo bolj zrcalno, medtem ko se nizkofrekvenčni zvoki bolj razpršijo. Odbijanje zvoka lahko v praktičnih primerih predstavimo kot odmev, akustiko, sonar. V osnovi, ko se zvočni val odbije, se zgodijo

tri stvari. Najprej se del energije odbije nazaj v prvotni medij, del se prenese v drugi medij, del se pa absorbira v material. Zvok sledi istemu principu odboja kot svetloba, torej da je položaj in kot vpadnega "žarka" zvoka enak položaju in vpadnemu kotu odbojnega. Energija zvočnega vala se razporedi v energijo, ki se odbije, energijo ki preide skozi material ter energijo, ki jo material absorbira. Največkrat opazimo odboj zvoka kot odmev ali pa reverberacija. Odmev nastane, ko se zvok odbije od oddaljene površine in se do opazovalca vrne z zamikom, reverberacijo pa opazimo, ko se zvok večkrat odbija in tako postopno izgublja energijo. Poseben primer odboja zvoka je na meji med vodo in zrakom. Ker je razlika v gostoti in akustični impedanci med medijama tako velika je zelo težko slišati podvodne zvoke nad površino.

Matematični model odbijanja zvoka temelji na valovni naravi zvoka in temu, da se zvočno polje lahko opiše s funkcijo zvočnega tlaka $p(x, t)$. Ko zvočni val doseže trdno površino, se del energije absorbira, ostalo pa se odbije nazaj v prostor. Da natančno opišemo, kako se zvok porazdeli v prostoru uporabimo matematične modele, ki temeljijo na zakonih širjenja valov. Najpreprostejše to opišemo z modelom sferičnega vala, ki nastane pri točkovnem viru zvoka. Pri obravnavi odboja zvoka od ukrivljenih površin kot so kupole ali ukrivljene stene, se pogosto uporabi geometrijski pristop. Tak pristop pokaže, da se lahko odbiti zvočni žarki zberejo v določeni točki prostora, kar povzroči povečanje zvočnega tlaka.



Slika 3: Prikaz geometričnega odboja zvoka

Ta model pa ima vendar eno pomanjkljivost, saj napoveduje neskončno velik tlak v fokusu, saj model ne upošteva valovne narave zvoka, zlasti interferenčnih pojavov. Zato je za natančnejši opis potrebno uporabiti valovni model. Ta temelji na Huygensovem principu, ki pravi, da vsaka točka valovne fronte deluje kot sekundarni izvor novih valov. Zvočno polje po odboju od površine lahko zato dobimo kot superpozicijo vseh teh sekundarnih valov. Matematično je ta ideja zapisana v Kirchhoffovem integralu, ki omogoča izračun zvočnega tlaka v poljubni točki prostora na podlagi tlaka in hitrosti delcev na površini reflektorja. Integralna oblika rešitve povezuje tlak na površini s prispevkom vseh majhnih elementov površine. Ko se ta pristop uporabi pri okroglih ali pa delno ukrivljenih površinah, dobimo integralni izraz za zvočni tlak, katerega je mogoče rešiti. Edina izjema je, ko je vir zvoka na sredini krogle. Takrat se tlak poveča le v točki izvora, saj se vsi valovi odbijejo nazaj v to točko. Pomemben rezultat modela je tudi ocena velikosti fokusnega območja. Analiza pokaže, da je značilna širina območja največjega tlaka približno polovica valovne

dolžine. To pomeni, da imajo visoke frekvence zelo majhno fokusno območje z velikim ojačanjem, medtem ko imajo nizke frekvence širše območje, vendar manjše povečanje tlaka. Matematični model odbijanja zvoka tako pokaže, da je za pravilno razumevanje akustičnih pojavov v prostorih z ukrivljenimi površinami nujno upoštevati valovno naravo zvoka. Geometrijski pristopi lahko sicer približno napovedo splošno smer širjenja zvoka, vendar ne morejo pravilno opisati amplitud in interferenčnih pojavov v bližini fokusa.

3.4. Valovanje

Valovanje je širjenje motnje iz nekega vira, kot je npr. zvočnik ali padec kamna v vodo. V fiziki se ponavadi delijo na mehanske in elektromagnetne valove. Mehanske valove lahko nekako opišemo kot verižno reakcijo večih molekul iz vira distresa, ki povzroči njihovo premikanje. V bolj splošnem pomenu je valovanje le prenos energije skozi prostor in snov, ki se odvija brez prenosa snovi kot celote. Valovanje lahko ločimo na tri osnovne vrste. To so mehansko valovanje, ki zahteva medij za širjenje kot so npr. zrak, voda, trdna snov. Mehansko valovanje najpogosteje opisujemo kot zvok, valovanje na vodi in potresne valove. Drugo osnovno valovanje imenujemo elektromagnetno valovanje, ki ne potrebuje medija za širjenje, saj se lahko širi skozi vakuum. Primeri elektromagnetnega valovanja so svetloba, radijski valovi in rentgenski žarki. Tretje osnovno valovanje imenujemo kvantno valovanje. To opisuje lastnosti delcev, kot so elektroni in fotoni v okviru kvantnih mehanik. Ključne značilnosti valovanja lahko opišemo z njegovimi osnovnimi značilnostmi, ki so:

1. Valovna dolžina – označimo jo z grško črko lambda (λ) in označuje razdaljo med dvema zaporednima vrhoma ali dolinama vala.
2. Frekvenca – označimo jo z f in pomeni število valovnih ciklov, ki jih val opravi v eni sekundi. Enota za frekvenco so herci (Hz).
3. Amplituda – označimo jo s črko A in pomeni največjo oddaljenost delcev od ravnovesnega položaja. Od amplitude je odvisna energija vala.
4. Hitrost valovanja – označimo jo s črko v in označuje hitrost prenosa energije oziroma motnje skozi medij. Hitrost izračunamo saj je povezana s frekvenco in valovno dolžino.
5. Faza – z fazo opisujemo položaj določenega dela vala v ciklu valovanja
6. Energija valovanja: energija je odvisna od amplitude in frekvence valovanja. Pri mehanskih valovih je energija pogosto povezana s kvadratom amplitude.

Mehansko valovanje nastane zaradi nihanja delcev v mediju. Primer, ki ga tudi tu raziskujem je zvok, ki se širi kot vzdolžno valovanje. Mehansko valovanje pa lahko interpretiramo tudi kot prečno valovanje, vendar o tem ne bomo govorili. Za mehansko valovanje je značilno, da energija in impulz prehajata skozi medij, medtem ko posamezni delci nihajo okoli svojih ravnovesnih položajev. Energija valovanja je sorazmerna kvadratu amplitude in je pri mehanskih valovih ta energija povezana z delom, ki ga opravi nihajoči del. Tu se med drugim tudi mehansko valovanje razlikuje od elektromagnetnega, saj pri elektromagnetnih valovih vključimo v energijo tudi prispevke električnega in magnetnega polja. Moč valovanja, ki se prenaša skozi določeno površino je pa definirana kot energija na časovno enoto. Med drugim ima valovanje tudi lastnost superpozicije, torej se lahko seštevajo ali izničujejo. Interferenca je rezultat superpozicije dveh ali več valov. Pri konstruktivni interferenci se valovi ojačajo kadar so v fazi, pri destruktivni interferenci pa se valovi izničijo kadar so v nasprotni

fazi. Elektromagnetno valovanje pa nastane zaradi nihanja električnega ali magnetnega polja. Valovanje je osnova tega, kako se zvok obnaša.

3.5. Delovanje zvočnika in ojačevalca

Woofler je elektroakustični pretvornik, ki pretvarja električni signal v mehanske vibracije in s tem ustvarja zvočne valove v zraku. Namenjen je reprodukciji nizkih frekvenc zvoka, običajno približno od 20 Hz do približno 200 ali 300 Hz. Ker sem med opravljanjem eksperimenta ugotovil, da se ogenj najboljše gasi z nizkimi frekvencami sem uporabil woofer. Osnovna zgradba wooferja vključuje več pomembnih komponent: membrano (tudi stožec), glasovno tuljavo, magnetni sistem, vzmetenje in okvir zvočnika. Membrana je običajno stožčaste oblike in je izdelana iz lahkih, vendar dovolj togih materialov, kot so papirnata vlakna, plastika ali prožni materiali. Njena naloga je premikanje zraka. Ko se membrana premika naprej in nazaj, povzroča izmenično stiskanje in raztezanje zraka pred zvočnikom, kar ustvarja longitudinalne zvočne valove. Ključni element pogona membrane je glasovna tuljava. To je navita bakrena žica, ki je pritrjena na zadnji del membrane. Tuljava se nahaja v ozki zračni reži magnetnega sistema, kjer deluje močno magnetno polje. Magnetni sistem običajno sestavljajo trajni magnet, kovinsko jedro in magnetni obroč, ki usmerjajo magnetni tok v ozko režo. Ko skozi glasovno tuljavo teče električni tok iz ojačevalnika, nastane okoli tuljave magnetno polje. Po zakonu elektromagnetizma (Lorentzova sila) na vodnik, po katerem teče tok v magnetnem polju, deluje sila. Velikost te sile je opisana z enačbo:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

kjer je B gostota magnetnega polja, I električni tok, ki teče po tuljavi in L dolžina vodnika v magnetnem polju.

Ker je tuljava trdno pritrjena na membrano, se ta sila prenese na membrano, ki se začne gibati naprej in nazaj. Električni signal iz ojačevalnika je izmeničen, zato se smer toka v tuljavi neprestano spreminja. Posledično se spreminja tudi smer sile, zaradi česar membrana vibrira z enako frekvenco kot električni signal. Premikanje membrane povzroča spremembe zračnega tlaka. Ko se membrana premakne naprej, stisne zrak pred seboj in ustvari območje višjega tlaka. Ko se premakne nazaj, nastane območje nižjega tlaka. Ta zaporedna območja stiskanja in raztezanja zraka se širijo skozi prostor kot zvočni val. Woofler je posebej zasnovan za učinkovito reprodukcijo nizkih frekvenc. Nizke frekvence imajo veliko valovno dolžino, zato je za njihovo učinkovito ustvarjanje potrebno premakniti relativno veliko količino zraka. Zato imajo wooferji običajno večjo membrano in večji hod membrane kot visokotonski zvočniki. Večja površina membrane omogoča večji volumen premaknjenega zraka, kar poveča učinkovitost pri nizkih frekvencah. Pomemben del konstrukcije wooferja je tudi vzmetenje membrane. To vključuje dva elementa: obrobo in centrino vzmet (spider). Obroba je elastični obroč na robu membrane, ki omogoča gibanje membrane in jo hkrati zatesni proti okvirju. Spider pa je valovita tekstilna ali polimerna struktura, ki drži tuljavo centrirano v magnetni reži in zagotavlja povratno silo, ki membrano vrača v ravnotežni položaj. Mehansko gibanje membrane lahko opišemo tudi z modelom mase, vzmeti in dušenja. Membrana in tuljava predstavljata maso sistema, vzmetenje predstavlja elastično vzmet, zračni upor in notranje izgube materiala pa predstavljajo dušenje.

Pri wooferjih ima pomembno vlogo tudi resonančna frekvenca sistema. To je frekvenca, pri kateri sistem naravno niha z največjo amplitudo. Resonanca je odvisna

od mase membrane in togosti vzmetenja. Pri nizkofrekvenčnih zvočnikih je resonančna frekvenca običajno relativno nizka, kar omogoča učinkovito reprodukcijo basov. Poleg samega zvočnika ima velik vpliv na delovanje wooferja tudi ohišje zvočnika. Ohišje preprečuje, da bi se zvočni valovi, ki nastajajo na zadnji strani membrane, izničili z valovi na sprednji strani. Pri odprtem zvočniku bi namreč valovi nasprotne faze povzročili destruktivno interferenco in zmanjšali jakost nizkih frekvenc. Zato so wooferji običajno nameščeni v zaprtih ali bas-refleks ohišjih, ki izboljšajo reprodukcijo nizkih tonov.

3.6. Ogenj

Ogenj je fizikalno-kemijski pojav, ki nastane kot posledica samovzdrževalne eksotermne oksidacijske reakcije med gorivom in oksidantom, najpogosteje kisikom iz zraka. Gorenje se začne, ko snov doseže temperaturo vžiga, pri kateri se reakcija oksidacije lahko začne in nadaljuje brez dodatnega zunanega vira toplote. Pri gorenju pride do razgradnje gorljive snovi na manjše molekule ali radikale, ki reagirajo s kisikom. Ta proces imenujemo oksidacija. Ker je reakcija eksotermna, se sprošča toplota, ki dodatno segreva okoliški material in omogoča nadaljevanje reakcije. Posledično nastane verižna reakcija, pri kateri se proces gorenja širi na novo gorivo. Plamen, ki ga opazujemo pri ognju, je v bistvu območje, kjer poteka intenzivna kemijska reakcija med gorivom in oksidantom. Z vidika fizike je plamen sestavljen predvsem iz vročih plinov, vodne pare, ogljikovega dioksida in majhnih delcev ogljika. Pri zelo visokih temperaturah se del teh delcev ionizira, kar pomeni, da nastanejo nabiti delci, kot so ioni in prosti elektroni. Zaradi prisotnosti ioniziranih delcev lahko plamen v določenih pogojih obravnavamo kot delno ionizirano plazmo. Plazma je četrto agregatno stanje snovi, v katerem so delci električno nabiti in lahko prevajajo električni tok. Vendar je stopnja ionizacije v običajnem ognju razmeroma nizka, zato govorimo o šibko ionizirani plazmi. Za nastanek ognja morajo biti izpolnjeni trije osnovni pogoji, ki jih opisuje koncept ognjenega trikotnika. Ti pogoji so gorivo, oksidant in zadostna temperatura. Gorivo predstavlja katerokoli snov, ki lahko reagira s kisikom, na primer les, papir, premog, plini ali različne vnetljive tekočine. Oksidant je najpogosteje kisik iz zraka, ki omogoča oksidacijsko reakcijo. Tretji element je toplota, ki sproži proces gorenja in omogoča nadaljnje reakcije. Če eden od teh treh elementov manjka, ogenj ne more nastati ali pa ugasne. Ogenj lahko ugasnemo s tem, da odstranimo enega od treh elementov, ki so potrebni za reakcijo. Z zvokom lahko odstranimo kisik tako, da spremenimo zračni tlak in tako spodbijemo molekule kisika stran od vira plamena. To lahko naredi zvočno valovanje saj verižno premika molekule kisika in ko se te odmaknejo od vira ognja ta ugasne.

3.7. Plazma

V fiziki se plazma obravnava kot posebno agregatno stanje snovi, ki nastane, ko je plin dovolj ioniziran, da začnejo električno nabiti delci kolektivno reagirati na elektromagnetna polja. V knjigi *Introduction to Plasma Dynamics* avtorja A. I. Morozov je plazma opisana kot kompleksen fizikalni sistem, sestavljen iz prostih elektronov, ionov in nevtralnih delcev, pri katerem elektromagnetne interakcije igrajo ključno vlogo pri določanju njegovega dinamičnega obnašanja. Za razliko od navadnega plina, kjer so glavne interakcije med delci kratkega dosega in predvsem trčne narave, v plazmi prevladujejo dolgodosežne Coulombove sile, zaradi česar se

sistem obnaša kolektivno. Osnovna značilnost plazme je prisotnost velikega števila prostih nosilcev naboja. Ti nastanejo z ionizacijo, procesom, pri katerem atom ali molekula izgubi enega ali več elektronov. Ionizacijo lahko povzročijo visoke temperature. Ko stopnja ionizacije preseže določeno mejo, začnejo elektroni in ioni vplivati drug na drugega preko električnih in magnetnih polj, kar povzroči pojav kolektivnih procesov, ki jih v običajnih plinih ne opazimo. Morozov poudarja, da plazma ni zgolj ioniziran plin, temveč sistem, v katerem imajo elektromagnetna polja enakovredno vlogo kot delci sami. Gibanje nabitih delcev namreč ustvarja električne tokove, ti pa generirajo magnetna polja. Nastala polja nato vplivajo na gibanje drugih delcev, kar vodi do kompleksne medsebojne povezave med dinamiko delcev in polj. Ta lastnost pomeni, da je za opis plazme potrebno uporabiti tako enačbe gibanja delcev kot tudi Maxwellove enačbe elektromagnetnega polja. Pomemben koncept pri razumevanju plazme je kvazinevtralnost. Čeprav plazma vsebuje veliko število nabitih delcev, je v večini primerov skupni električni naboj v makroskopskem volumnu skoraj enak nič. To pomeni, da je število pozitivnih ionov približno enako številu elektronov. Zaradi tega se električni potenciali na velikih razdaljah večinoma izničijo, vendar pa lahko na majhnih prostorskih skalah nastajajo lokalne električne strukture.

Druga ključna značilnost plazme je tako imenovana Debyejeva zaslonitev. Če v plazmo uvedemo nabit delec ali električno motnjo, se okoli njega prerazporedijo elektroni in ioni. Elektroni, ki so mnogo lažji od ionov, se premikajo hitreje in ustvarijo oblak naboja, ki delno nevtralizira vpliv začetnega naboja. Posledica tega je, da električni potencial hitro pada z razdaljo in ima značilno dolžinsko skalo, imenovano Debyejeva dolžina. Ta parameter določa območje, znotraj katerega lahko električni naboj vpliva na druge delce v plazmi. Plazma se od običajnih plinov razlikuje tudi po sposobnosti vzbujanja kolektivnih valovnih pojavov. Med najpomembnejše sodijo plazemska nihanja, ki nastanejo zaradi nihanja elektronov glede na skoraj nepremične ione. Če elektrone rahlo premaknemo iz ravnotežnega položaja, jih električno polje ionov poskuša vrniti nazaj, kar povzroči harmonično nihanje. Frekvenca teh nihanj je odvisna predvsem od koncentracije elektronov in predstavlja eno od temeljnih lastnosti plazme. Poleg električnih pojavov ima v mnogih plazemskih sistemih pomembno vlogo tudi magnetno polje. Gibanje nabitega delca v magnetnem polju je ukrivljeno zaradi Lorentzove sile, kar povzroči spiralno gibanje okoli magnetnih silnic. Ta pojav vodi do številnih zanimivih procesov, kot so magnetno zadrževanje plazme, tokovne nestabilnosti in različni magnetohidrodinamični pojavi. V številnih primerih se obnašanje plazme lahko približno opiše z magnetohidrodinamičnim modelom, ki obravnava plazmo kot prevodno tekočino, na katero delujejo elektromagnetne sile. Na podlagi teh lastnosti lahko plazmo opredelimo kot ioniziran plin, v katerem elektromagnetne sile in kolektivni procesi določajo makroskopsko obnašanje sistema.

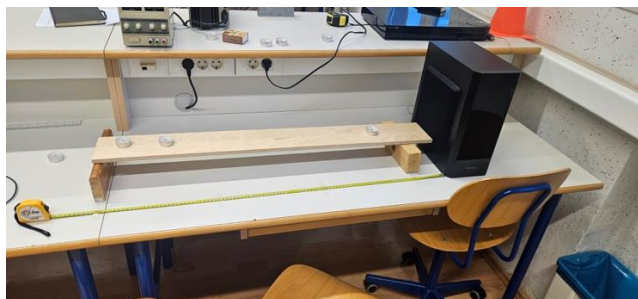
3.8. Raziskovalna metoda

Za dokazovanje mojih hipotez sem ustvaril več opazovalnih poskusov. Opazil sem, da so različni zvočniki bili zelo slabi pri ugašanju plamena. Opazil sem, da so se plameni le tresli, kot da bi v njih pihal veter vendar niso ugasnili. To je bilo zaradi spremembe v tlaku, ki ga je povzročilo zvočno valovanje. Poskus sem postavil tako, da sem imel zvočnik ali woofer na fiksni razdalji in sem postavil sveče na različnih razdaljah in opazoval kdaj plamen ugasne. Napovedal sem, da bodo nizke frekvence boljše od visokih pri ugašanju plamena, da bo glasnost velik faktor pri učinkovitosti ugašanja ter če bo zvok koncentriran na manjši površini bo plamen ugasnil hitreje in na večji razdalji. Postavil sem jih po sklepu, da ima višja glasnost več energije in večjo zmožnost spremembe tlaka, nižja frekvenca lahko tlak spreminja v intenzivnejših močnejših intervalih kot pa visoke, ter če zvok pride do plamena na manjši površini bo sprememba v pritisku mnogo večja kot na večji površini. Prvi testni poskus sem opravil s preprostim 50W ojačevalcem ko sem poskusil ugasniti plamen vžigalnika. Poskusil sem vžigalnik približevati in oddaljevati od membrane ojačevalca in sem opazil, da se pri večji razdalji plamen veliko manj trese kot pa ravno pred membrano kjer je celo ugasnil. To sem poskušal tudi z različnimi frekvencami in sem opazil, da je bila najboljša frekvenca za to okoli 60Hz. To je bilo verjetno zaradi tega, ker ojačevalec ni specializiran za zelo nizke in zelo visoke tone in jih zato predvaja z manjšo glasnostjo kot bi jih nek specializiran zvočnik kot woofer. Okoli 60Hz je bila zlata točka med glasnostjo in frekvenco, da je plamen ugasnil. Izid se je skladal z mojo napovedjo. Želel sem še naprej razviti moje hipoteze in opaziti kako daleč lahko ta pojav pripeljem. Nov opazovalni poskus je bil ta, da sem poskusil ugasniti plamen z močnejši vendar starejšim ojačevalcem. Ta ojačevalec je imel moč 75W in sem na enak način želel simulirati pojav, kjer je zvok ugasnil ogenj. Temu ojačevalcu pa ni uspelo ugasniti vžigalnika, kar je bilo potislovno z ostalimi rezultati. Nizke frekvence tako niso bile bolj učinkovite pri ugašanju, hkrati pa ni nobena frekvenca uspela ugasniti plamena. Nato sem še naprej razvil poskus in poskušal ustvariti ta pojav z zvočnikom specializiranim za nizke frekvence – woofer. Enako kot pri ostalih sem najprej poskusil ugasniti le plamen vžigalnika in to se je zgodilo takoj. Nato sem na woofer dal konus in ta je še bolj izboljšal rezultate eksperimenta. S tem, sem potrdil še zadnjo hipotezo.

4. Raziskovanje

Najprej je moj eksperiment vseboval le 50W ojačevalec s katerim sem poskusil ugasniti plamen vžigalnika. Hitro sem ugotovil, da zaradi ojačevalcevega širokega spektra frekvenc, ki jih lahko predvaja, ni mogel nobene predvajati s tako visoko glasnostjo, da bi plamen ugasnil. Plamen sem premikal naprej in nazaj po različnih razdaljah od membrane in prišel do ugotovitve, da je plamen ugasnil le tik pred membrano. Poskušal sem tudi različne frekvence od 30Hz do 400Hz in plamen je ugasnil le ob frekvenci okoli 60Hz. Plamen se je tudi obnašal kot da bi vanj pihal veter, kar je povzročilo zvočno valovanje. Pri nizkih frekvencah je bilo to plapolanje bolj izrazito kot pa pri visokih. Bilo je tudi bolj izrazito, ko je bil plamen postavljen bližje viru zvoka. Ker sem želel rezultate ustvariti na več načinov sem poskusil uporabiti še močnejši ojačevalec. Uporabil sem starejši šolski ojačevalec z močjo 75W. Enako kot pri prejšnjem, sem začel s preverjanjem ali lahko plamen sploh ugasne. Poskušal sem

različne frekvence in plamen postavil točno pred membrano vendar plamen v nobenem primeru ni ugasnil. Vse kar sem opazil, je bilo značilno plapolanje plamena, ki se je pojavljalo skozi vse eksperimente. Prišel sem do ugotovitve, da je glasnost zvoka pomembnejša od frekvence, saj starejši obrabljen ojačevalec z več moči ni mogel ustvariti istega rezultata kot novejši z manj moči. Nato sem se nagnil proti zvočnikom specializiranim za nizkofrekvenčne tone.



Slika 4: Eksperiment samo z wooferjem

Vzel sem woofer in z njim poskusil ugasniti plamen vžigalnika in nato svečo. Oba sta pred membrano ugasnila takoj. Nato sem začel razdaljo od vira zvoka večati in sem prišel do ugotovitve, da je lahko woofer ugasnil svečo do razdalje okoli 10cm. Zdaj sem prišel do ugotovitve, da sam zvočnik ni dovolj, da plamen ugasne na večji razdalji. Zato sem pred membrano pridržal konus, ki je zvok koncentriral na manjšo površino in bi s tem lahko začel potrjevati še zadnjo hipotezo.



Slika 5: Eksperiment z wooferjem in konusom

Ko sem pridržal konus pred membrano sem takoj opazil izboljšave. Pri 55Hz so sveče ugasnile na maksimalni razdalji 60cm, pri 65Hz na 70cm, pri 35Hz pa pri razdalji do 95cm. Konus je mnogo poboljšal moje rezultate in tudi potrdil zadnjo hipotezo.

5. Rezultati

Od vseh hipotez sem uspel potrditi vsako. S prvim in tretjim poskusom sem uspel potrditi, da so nizke frekvence učinkovitejše pri ugašanju plamena kot pa visoke. To se vidi v rezultatih, saj je pri prvem poskusu plamen ugasnil le pri frekvenci okoli 60Hz, pri tretjem poskusu pa sem uspel pri najnižji frekvenci ugasniti svečo na največji razdalji. Z drugim poskusom sem potrdil drugo hipotezo in ugotovil, da je glasnost tesno povezana s tem, ali bo plamen ugasnil ali ne. To je dokazalo mojo hipotezo tako, da kljub temu, da je imel starejši ojačevalec večjo moč od mlajšega, še vedno ni mogel generirati tako velike glasnosti, da bi sveča ugasnila medtem ko je mlajši ojačevalec to uspešno opravil. Z zadnjim poskusom sem pa dokazal, da če zvok koncentriramo na manjšo površino, bo ta bolj učinkovit pri gašenju plamena kot pa nekoncentriran zvok.

To se je najbokje kazalo pri tem, kako se je povečala razdalja na kateri je sveča ugasnila samo s tem, da sem pred zvočno membrano pridržal konus.

6. Diskusija

V eksperimentu bi lahko definitivno optimiziral določene faktorje, ki so popeljali do tega, da je ogenj ugasnil. Najprej bi lahko uporabil materiale z različnimi akustičnimi lastnostmi kot so boljše odbijanje zvoka in manjša absorbcija njegove energije saj bi tako lahko povečal amplitudo in posledično ugasnil večji plamen ali pa svečo na še večji razdalji. Lahko bi tudi poskusil pridobiti ali pa sam ustvariti večji in boljši zvočnik, ki bi lahko predvajal infrazvok ali pa ostale nizke frekvence z mnogo višjo glasnostjo, saj sem opazil da je bil eden izmed največjih faktorjev kdaj in kako hitro plamen ugasne v glasnosti zvoka. Da bi to raziskal in dokumentiral, žal nisem imel sredstev. Nekaj kar sem še želel testirati je kako velik in intenziven plamen lahko ugasnemo z zvokom. Želel sem poskusiti ali lahko ugasnem požare, ki pogosto nastajajo v gospodinjstvih. To so kuhinjski požari, ko se zažge olje, gorenje alkoholov in pa električni požari. Za takšna testiranja nisem imel ne časa ne sredstev. Od tu sem ugotovil, da ima lahko ta pojav ogromno uporab v realnem življenju saj bi mogoče lahko bil uporabljen v gospodinjstvih za ugašanje manjših do srednje velikih požarov. S pravo raziskavo in razvojem specializirane opreme bi lahko tako ustvarili najbolj okolju prijazen gasilnik ognja kar ga bomo lahko ustvarili.

7. Viri

- Borwick, J. (1988). *Loudspeaker and Headphone Handbook*. London: Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.
- Braginsky, A. (22nd. April 2020). *ResearchGate: (PDF) What is sound?* Pridobljeno iz ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/340850362_What_is_sound
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics* (4th izd.). New York: John Wiley & Sons.
- Morozov, A. I. (2012). *Introduction to Plasma Dynamics*. Boca Raton: CRC Press.
- Vercammen, M. L. (23. August 2010). *Acoustics.org: Reflection of sound by concave surfaces.* Pridobljeno iz Acoustics.org:
https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p707.pdf