

Zvučna rezonancija

Predrevac, Valentina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:514092>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU



VALENTINA PREDREVAC

ZVUČNA REZONANCIJA

Diplomski rad

Osijek, 2018.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU



VALENTINA PREDREVEC

ZVUČNA REZONANCIJA

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja akademskog naziva magistre edukacije fizike i informatike

Osijek, 2018.

"Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc.dr.sc. Denisa Stanića i komentora Igora Miklavčića, pred. u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. ZVUK.....	2
2.1. Postanak i rasprostiranje zvuka.....	2
2.2. Frekvencija zvuka.....	3
2.3. Jakost zvuka.....	4
2.3.1. Prag čujnosti.....	6
2.3.2. Razina jakosti zvuka i decibel.....	6
2.4. Brzina zvuka.....	8
2.4.1. Brzina zvuka u zraku.....	9
2.4.2. Brzina zvuka u tvarima i plinovima.....	9
2.5. Vrste zvuka.....	10
2.5.1. Ton.....	11
2.5.2. Šum.....	13
2.6. Kako mi zapravo čujemo?.....	13
3. INFRAZVUK.....	15
4. ULTRAZVUK.....	15
5. REZONANCIJA.....	17
5.1. Izvori zvuka.....	18
5.1.1. Glazbena viljuška.....	18
5.2. Mehanička rezonancija na njihalu.....	19
5.3. Pokusi demonstracije akustične rezonancije.....	20
5.3.1. Demonstracija akustične rezonancije pomoću dvije glazbene vilice.....	20
5.3.2. Monokord.....	22
5.3.3. Određivanje brzine širenja zvuka u stupcu zraka iznad površine vode.....	23
5.4. Ispitivanje pojave rezonancije i uvjeta njezinog nastanka matematičkim putem.....	25

6. ODREĐIVANJE OSNOVNE FREKVENCije REZONATORA	32
7. MJERENJE FREKVENCije GLAZBENE VILICE POMOĆU OSCIOSKOPA	34
8. NAJDRAMATIČNIJI DEMONSTRACIJSKI POKUS ZVUČNE REZONANCije	36
8.1. Karakteristike zvučnika.....	37
8.2. Vrste vinskih čaša	39
8.3. Opis izvođenja demonstracijskog pokusa	41
8.4. Zašto smo u pokusu koristili stroboskop?.....	42
9. METODIČKA OBRADA.....	43
10. ZAKLJUČAK.....	57
11. ŽIVOTOPIS.....	58
12. LITERATURA	59

Odjel za fiziku

ZVUČNA REZONANCIJA

VALENTINA PREDREVAC

Sažetak

Ponekad se možemo zapitati: „Što je uopće zvuk? Kako bismo definirali zvuk i je li zvuk sve ono što ljudsko uho čuje?“. Zvuk definiramo kao longitudinalni mehanički val (za širenje mu je potrebno sredstvo) u rasponu frekvencija od 20 Hz do 20 000 Hz. Ukoliko pomoću zvuka možemo postići da neki objekt titra, na njegovoj osnovnoj frekvenciji, titraji se preklapaju i pribrajaju te mogu postići veću amplitudu. Ovu pojavu nazivamo rezonancijom, a može čak razbiti predmet, u ovom slučaju staklenu čašu. Diplomski rad ima za cilj, uz glavne karakteristike zvuka, objasniti pojavu zvučne rezonancije, opisati demonstracijske pokuse zvučne rezonancije među kojima je najdramatičniji pokus razbijanja staklene čaše. Također su dani rezultati vezani uz određivanje osnovne frekvencije rezonatora te određivanje frekvencije glazbene vilice pomoću osciloskopa i mikrofona. Na kraju rada iznesena je metodička obrada nastavne jedinice „Zvuk i ultrazvuk“ koja je dio gimnazijskog programa u trećem razredu srednje škole.

(62 stranice, 36 slika, 4 tablice, 37 literaturnih navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: frekvencija/izvor/rezonancija/titranje/zvuk

Mentor: doc.dr.sc. Denis Stanić

Komentor: Igor Miklavčić, predavač

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen:

ACOUSTIC RESONANCE

VALENTINA PREDREVAC

Abstract

We can ask ourselves “What is sound really? How can we define it and is sound everything that human ear can hear?”. We define sound as longitudinal mechanical wave (sound needs medium to propagate) in frequency range from 20 Hz to 20 000 Hz. If sound can force an object to vibrate in its natural frequency, those vibrations will overlap, add up and make larger amplitude. We call this phenomenon resonance. It can make object to brake, and in this case it broke a glass. Besides the main characteristics of sound, this thesis will explained how and why resonance occurs and will describe experiments that show sound resonance that causes breaking of glass. Also, this thesis will represent the results connected to defining fundamental frequency of resonator and will explain how we can measure tuning fork frequency using oscilloscope and microphone. At the end of thesis there is a chapter that represents methodical elaboration of training unit called “Sound and ultrasound” that is a part of Croatian high school curriculum of physics of the third year.

(62 pages, 36 pictures, 4 tables, 37 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: frequency/source/resonance/vibration/sound

Supervisor: doc.dr.sc. Denis Stanić

Co- Supervisor: Igor Miklavčić, lecturer

Reviewers:

Thesis accepted:

1. UVOD

Ponekad se možemo zapitati: „Što je uopće zvuk? Kako bismo definirali zvuk i je li zvuk sve ono što ljudsko uho čuje?“. U školi smo učili da zdrav čovjek posjeduje različita osjetila. Osjetila nam omogućuju primanje informacija iz okoline. Svi osjeti koje primamo važni su za preživljavanje, ali i kvalitetu življenja te komunikaciju. Neki od nas su tijekom svog školovanja učili da čovjek posjeduje pet osjetila: osjetilo vida, sluha, ravnoteže, njuha i okusa. Danas učenici u osmom razredu osnovne škole na satima biologije uče da osim osjetila za vid, sluh i ravnotežu, postoje i osjetila za okus, miris, dodir, temperaturu i bol. Osjetila su početak našeg saznanja o objektivnom svijetu i bez njih bi bili osuđeni za nesnalaženje u prostoru i vremenu. Sluh je vrlo važan za naš razvoj, preživljavanje, život i shvaćanje prirode oko nas. [2]

Tijekom obrazovanja susrećemo se s osnovnim pojmovima i pojavama vezanim uz zvuk, a naše znanje o toj temi možemo proširiti različitim tiskanim ili elektroničkim medijima koje se bave znanstvenim pitanjima, a među kojima je danas najpristupačniji internet. Stoga smo u ovom radu dodali i metodičku obradu nastavne jedinice iz fizike za srednju školu pod nazivom Zvuk i ultrazvuk.

U ovom diplomskom radu opisane su samo neke karakteristike zvuka kao što su: frekvencija, intenzitet (jakost) zvuka, razina jakosti zvuka i brzina zvuka (u zraku, plinovima i različitim materijalima). Pojašnjeno je kako mi zapravo čujemo, koje vrste zvuka razlikujemo te je opisan infrazvuk i ultrazvuk. Rad opisuje i pojavu zvučne rezonancije, koja je i naslov ovog diplomskog rada, te su navedeni i opisani pokusi za razumijevanje ove pojave: određivanje osnovne frekvencije rezonatora, mjerenje frekvencije izvora zvuka pomoću osciloskopa i demonstracija akustične rezonancije na više načina (među kojima je najdramatičniji pokus onaj kada staklena čaša pukne uz pomoć zvučnika).

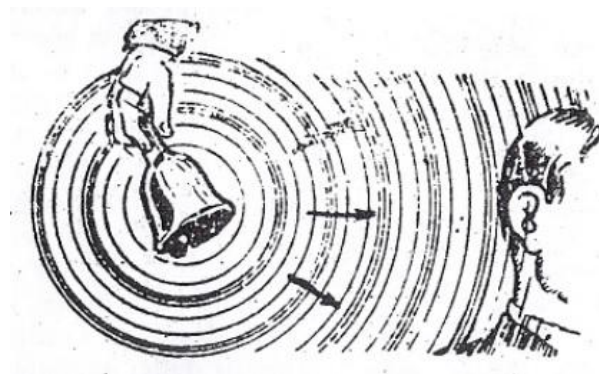
2. ZVUK

2.1. Postanak i rasprostiranje zvuka

Pomoću osjetila sluha primamo različite osjete koje nazivamo zvukom. Iz vlastitog iskustva možemo zaključiti kako je posljedica udara ruke o stol primanje osjećaja pomoću osjetila sluha. Također neke osjećaje primamo preko osjetila sluha u različitim situacijama iz svakodnevnog života (sviranje žičanog ili nekog drugog instrumenta, topot konja, listanje knjige, kovanja, prilikom pranja posuđa, i sl.), a nazivamo ih zvukom. Možemo reći da sve što čujemo nazivamo zvukom te da on nastaje titranjem pojedinog izvora zvuka. Izvor zvuka može biti bilo koje tijelo čije molekule vrše određeno titranje. Mi nužno ne moramo vidjeti „golim okom“ titranje izvora zvuka, ali ga možemo utvrditi pomoću različitih demonstracijskih pokusa od kojih ću neke opisati u ovom radu. Osjećaj zvuka u našem uhu ovisi o tome kako titra izvor zvuka te stoga razlikujemo dvije vrste zvuka (ton i šum) koje ću opisati u nastavku rada.

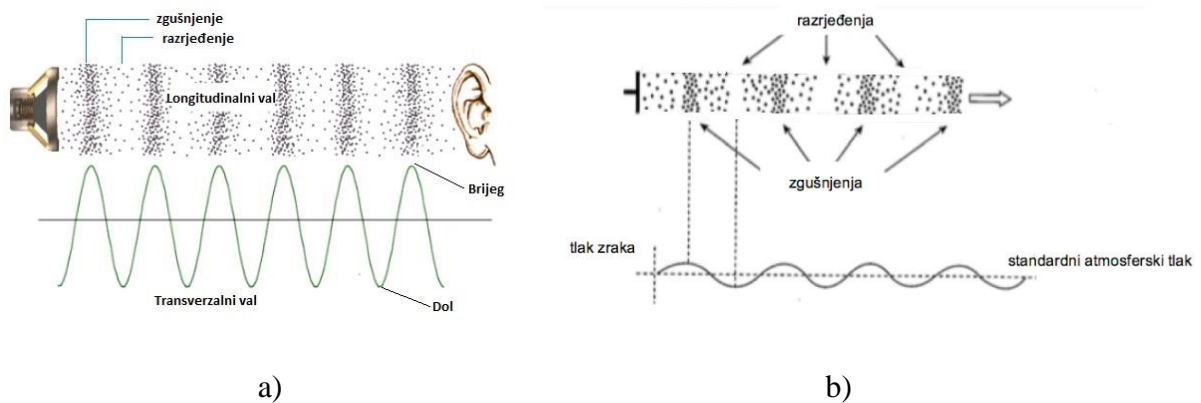
Kako bismo čuli zvuk, između našeg uha te izvora zvuka mora postojati neki medij koji će prenijeti titranje i mi ćemo na taj način čuti zvuk. Medij koji prenosi titranje može biti u bilo kojem agregatnom stanju. Iz toga proizlazi da prazan prostor (vakuum) ne može prenijeti titranje izvora zvuka te prema tome mi nećemo čuti određeni zvuk, a što se može demonstrirati pomoću pokusa (ako stavimo zvonce pod stakleno zvono iz kojeg izvučemo zrak). Najčešći medij je zrak, ali može biti i pojedino čvrsto tijelo (npr. željezne tračnice - ukoliko se vlak kreće po tračnicama na nekoj udaljenosti od nas, mi ga ne vidimo i ne čujemo, no prislonimo li uho na tračnice možemo ga čuti jer je brzina zvuka u čvrstim tijelima veća od one u zraku).

Zvuk možemo definirati kao longitudinalan val, odnosno zvuk nastaje kad se titranje tijela prenosi zrakom ili nekim drugim sredstvom u obliku zgušnjavanja i razrjeđenja. Zvuk se oko izvora širi na sve strane jednako te kažemo da se širi u obliku koncentričnih kružnica (Slika 1.)



Slika 1. Rasprostiranje zvuka [3]

Membrana zvučnika koja vibrira stvara zvučni val te nastaju zgušnjena i razrjeđenja zraka. Na mjestima zgušnjena imamo velik broj molekula zraka prikazanih točkicama što možemo vidjeti na slikama 2 a) i b). Ukoliko usporedimo longitudinalni zvučni val s transverzalnim valom, zaključujemo da brijeg vala predstavlja zgušnjena čestica zraka te dol transverzalnog vala razrjeđenja čestica zraka što možemo vidjeti na slikama 2 a) i b). Iz slike 2 b) zaključujemo da je tlak zraka povećan gdje je zgušnjena čestica zraka, a smanjen na mjestu razrjeđenja čestica zraka.



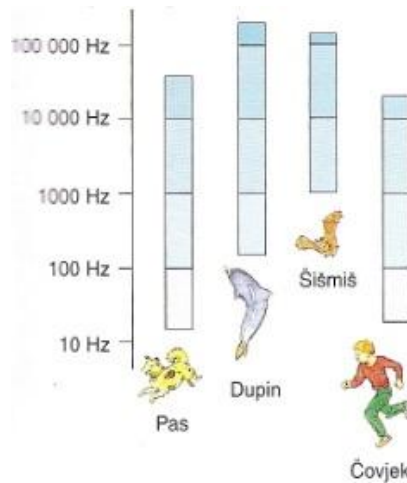
Slika 2. Usporedba zvučnog (longitudinalnog) i transverzalnog vala [14, 24]

2.2. Frekvencija zvuka

Frekvencija zvuka je jedna od glavnih osobina zvuka. Frekvencija je fizikalna veličina koja predstavlja broj ponavljanja neke periodične pojave u jedinici vremena i mjeri se u hertzima (Hz). Sada možemo proširiti definiciju zvuka od ranije te definirati zvuk kao longitudinalni mehanički val (za širenje mu je potrebno sredstvo) u rasponu frekvencija od 20 Hz do 20 000 Hz jer je to raspon čujnosti prosječnog ljudskog uha (iako je raspon čujnosti za svaku osobu individualno različit).

Što je frekvencija veća, opaženi zvuk je viši i obrnuto. Kažemo da je ton viši ukoliko je veći broj treptaja izvora zvuka u sekundi. Osjećaj u našem uhu koji ovisi o broju cijelih treptaja izvora zvuka zapravo se zove visina tona te zaključujemo da je neki ton viši od drugog tona ukoliko ima veći broj treptaja (oscilacija) u sekundi. Tako npr. u glazbi, ton koji ima dva puta veći broj treptaja od nekog drugog tona naziva se oktava.

Zvukovi bubnja imaju niže frekvencije od zvukova zviždaljke čije frekvencije su više. Čovjek može, u prosjeku, čuti frekvencije zvuka od 20 Hz do 20 000 Hz. Na slici 3 vidimo raspon frekvencija čujnosti čovjeka i nekih životinja.



Slika 3. Raspon frekvencija čujnosti čovjeka i nekih životinja [6]

2.3. Jakost zvuka

Iz iskustva možemo zaključiti da ponekad čujemo neki zvuk glasnije, a nekada slabije. To možemo iskusiti ukoliko udarimo nekim predmetom npr. žlicom o površinu stola jače ili slabije, odnosno upotrijebimo li veću ili manju silu udarca. Ukoliko udaramo predmetom o različite površine npr. čekićem o manji ili veći nakovanj, ali istom silom tada ne možemo direktno zaključiti da će jačina zvuka biti veća što je veća masa izvora. Ovu pojavu možemo pojasniti pomoću izraza za kinetičku energiju. Znamo da kinetička energija izvora koji titra ovisi o masi što nam govori da izvori zvuka većih masa pri jednakim uvjetima daju zvuk veće jakosti od izvora zvuka manjih masa.

Možemo zapisati relaciju za jakost (intenzitet) zvuka koja prema gore navedenom glasi

$$J = \sigma \frac{ma^2}{d^2} \quad [3]$$

gdje su oznake:

J - jakost zvuka

m - masa izvora zvuka

a - amplituda djelića materije izvora zvuka

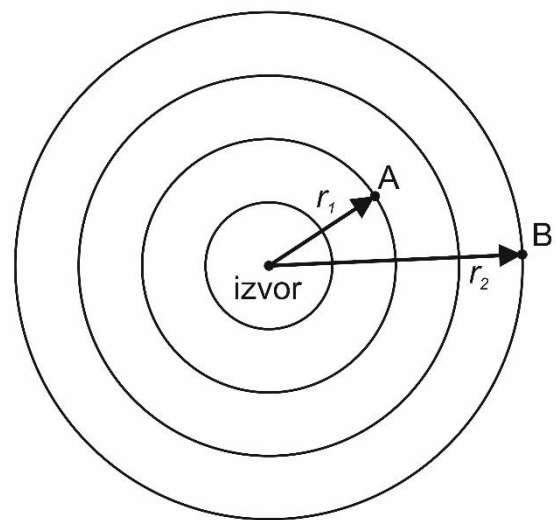
d - udaljenost od izvora zvuka

σ - koeficijent čija vrijednost ovisi o prirodi i gustoći sredstva (medija) koji prenosi zvuk.

Iz prethodne relacije vidimo da je jakost zvuka proporcionalna masi izvora zvuka i kvadratu amplitude titranja njegovih djelića te obrnuto proporcionalna s kvadratom udaljenosti od izvora zvuka. Isto tako zaključujemo da se jakost zvuka povećava s gustoćom medija koja ga prenosi.

U srednjoškolskom obrazovanju kad se obrađuje nastavna jedinica pod nazivom zvuk, radi jednostavnosti promatra se točkasti izvor zvuka (Slika 4.).

Kao što sam i ranije spomenula, zvuk se širi jednako na sve strane te zbog toga slušatelji koji su jednako udaljeni od izvora čuju zvuk iste jakosti. Slušatelj koji je na slici 4. označen slovom B, čuje slabiji zvuk od slušatelja A zbog toga što se u slučaju B ista snaga rasporedila na veću površinu te zbog opadanja jakosti zvuka (atenuacija ili prigušenje).



Slika 4. Točkasti izvor zvuka [10]

Za točkasti izvor u prostoru jakost zvuka na udaljenosti r jednaka je omjeru snage izvora P i površine kugle polumjera r :

$$J_0 = \frac{P}{4r^2\pi} \quad [10]$$

Ukoliko u obzir uzmemo atenuaciju tada relacija za jakost zvuka glasi:

$$J = \frac{P}{4r^2\pi} e^{-kr}$$

gdje je k koeficijent prigušenja.

Možemo zaključiti da intenzitet (jakost) zvuka opada s kvadratom udaljenosti od izvora zvuka.

2.3.1. Prag čujnosti

Prag čujnosti je najslabiji zvuk koji može čuti tek malen broj ljudi osjetljiva sluha te je definiran kao $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Mjerna jedinica za jakost zvuka je vat po metru kvadratnom (W/m^2). Navedena vrijednost definirana je za frekvenciju od 1 000 Hz te prema tome možemo zaključiti da prag čujnosti ovisi o frekvenciji.

2.3.2. Razina jakosti zvuka i decibel

Kako postoji veliki raspon jakosti zvukova tako je uvedena još jedna jedinica, tj. razina jakosti zvuka. Razinu jakosti zvuka označavamo s L i razmjerna je logaritmu jakosti zvuka. Razina jakosti zvuka mjeri se u belima (B). Jedinica je nazvana po američkom fizičaru Alexandru Graham Bellu. Kažemo da se dva zvučna signala razlikuju u intenzitetu za 1 B ukoliko je omjer njihovih intenziteta 10.

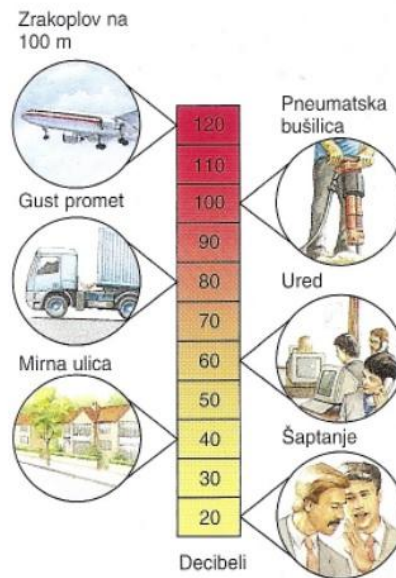
$$L = \log \frac{I}{I_0}$$

U praksi se najčešće upotrebljava deset puta manja jedinica koju nazivamo decibel (dB).

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

gdje je $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ prag čujnosti.

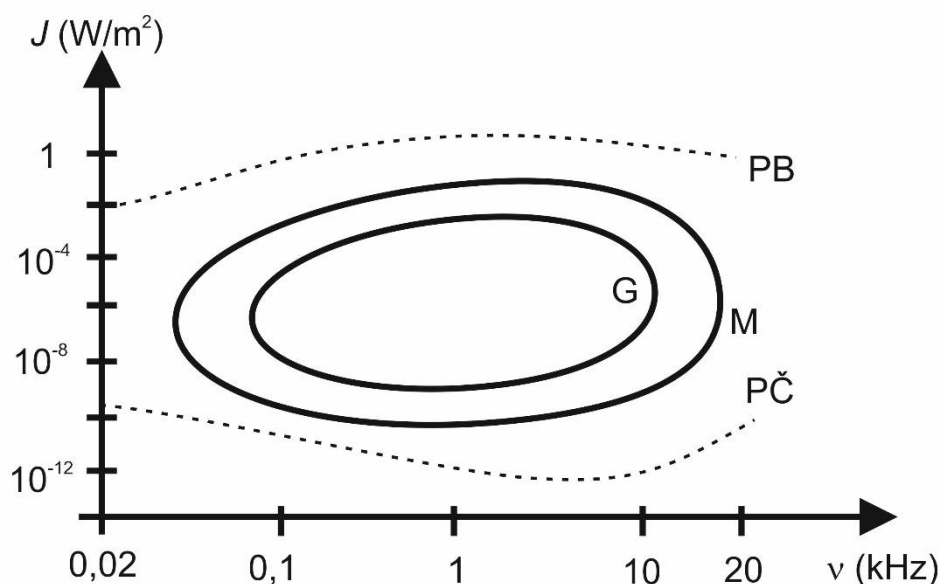
Buku možemo definirati kao pojačani šum u ljudskom okolišu. Jakost zvuka se može mjeriti tzv. detektorom buke. Detektor buke sadrži mikrofoni, filter za određene frekvencije, električno pojačalo i mjerni galvanometar. Zvuci čija glasnoća prelazi 90 dB izazivaju bol u ljudskim ušima. Kratkotrajna buka jakosti preko 120 dB može dovesti do oštećenja uha, ali i uzrokovati gluhoću dok buka u ljudskom okolišu izaziva psihološki stres. Više razine jakosti buke mogu uzrokovati kardiovaskularne smetnje i mentalne poremećaje. Na slici 5 mogu se vidjeti razine buke nekih ljudskih aktivnosti.



Slika 5. Prikaz nekih razina buke [6]

Ispitivanje osjetljivosti uha se provodi na način da se intenzitet sinusnog vala, tona određene frekvencije povećava. Povećava se do vrijednosti kod koje motritelj uhom zamjećuje ton i tada je dosegnut prag čujnosti ljudskoga (motriteljevog) uha. Ukoliko se jakost zvuka i dalje povećava, osoba više ne osjeća zvuk već bol u ušima što nazivamo prag bolnog osjeta ili prag bola. Ponavljajući pokus za različite frekvencije dobiju se dvije krivulje koje nazivamo krivulja praga čujnosti i krivulja (praga) boli. U slučaju više ispitanika, određuju se prosječne krivulje osjetljivosti.

Krivulju praga čujnosti i krivulju (praga) boli te uobičajena područja jakosti za govor i glazbu možemo vidjeti na slici 6.



Slika 6. Krivulje praga čujnosti (PČ) i boli (PB) te uobičajena područja jakosti za govor (G) i glazbu (M) [18]

Prosječno uho čuje zvuk frekvencija od 30 Hz do 15 000 Hz. Smatra se da ljudski glas i glazbeni instrumenti pokrivaju područje od 80 Hz do 10 000 Hz. Iz slike iznad možemo očitati da za zvuk frekvencije 1 000 Hz prag čujnosti ima jakost od oko 10^{-12} W/m^2 te da je taj prag još niži za frekvencije od 2 000 Hz do 5 000 Hz što nam govori da je ljudsko uho vrlo osjetljiv detektor zvuka. [23]

2.4. Brzina zvuka

Iz iskustva znamo da kad u prirodi vidimo munju ne čujemo u istom trenutku i grmljavinu nego da grmljavina dolazi nešto kasnije od munje. Također postoje i drugi primjeri pomoću kojih shvaćamo da se zvuk kroz prostor širi određenom brzinom. Brzina zvuka u homogenom sredstvu je jednaka u svim smjerovima te zbog toga možemo smatrati da se zvuk u takvoj sredini širi jednoliko. Ukoliko odredimo vrijeme (t) za koje je zvuk prešao određeni put (s), brzinu zvuka (v) moći ćemo odrediti pomoću relacije $v = \frac{s}{t}$.

2.4.1. Brzina zvuka u zraku

Prvo uspješno mjerenje brzine zvuka u zraku je odredila francuska akademija znanosti 1738. godine na način opisan u nastavku teksta.

U noći sa dva brijega pored Pariza, na udaljenosti od 18 613 metara ispaljen je po jedan top u prethodno dogovorenim trenucima. Na jednom brijegu ispaljen je topovski hitac dok je na drugom brijegu mjereno vrijeme između pojave bljeska i dolaska zvučnog praska. Kako se nastojao izbjeći utjecaj vjetra, hici su ispaljivani naizmjenično s jednog i drugog brijega te je uzeta srednja vrijednost vremena. Kada se udaljenost podijelila s određenim vremenom, dobivena je brzina zvuka od 340 m/s na temperaturi od 16 °C.

Kako danas znamo da brzina zvuka ovisi o temperaturi prema relaciji $v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$, dobiveni iznos za brzinu zvuka preračunat na 0 °C iznosi 333 m/s. [23, 3]

2.4.2. Brzina zvuka u tvarima i plinovima

Brzinu zvuka možemo izračunati pomoću poznatih izraza za brzinu longitudinalnog vala.

Brzinu zvuka u tvarima (čvrstim tijelima) određuje izraz: $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

gdje su oznake:

E - (Joungov) modul elastičnosti tijela

ρ - gustoća tijela.

Iz navedene relacije možemo vidjeti da zvuk ne ovisi samo o temperaturi sredstva kojim se širi već i o gustoći sredstva. Što je viša temperatura sredstva ili veća gustoća to je brzina zvuka veća.

Brzinu zvuka u plinovima možemo izračunati prema relaciji: $v = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}}$

gdje su oznake:

κ - adijabatski koeficijent

$R = 8,314472$ J/molK - plinska konstanta

T - apsolutna temperatura

M - molarna masa plina.

U tablici 1 i 2 možemo vidjeti iznose brzina zvuka za različite materijale i plinove na različitim temperaturama.

Tablica 1. Brzina zvuka kroz različite materijale/sredstva [6, 25]

Materijal	Brzina zvuka (m/s)
Guma	54
Aluminij	5104
Bakar	3560
Voda	1284
Morska voda	1500
Živa	1452
Dryvo (hrast)	3850
Željezo	5000
Staklo	5000
Olovo	1322

Tablica 2. Brzina zvuka u plinovima i brzina zraka na različitim temperaturama [25]

Sredstvo (plin)	t ° C	v/ms⁻¹
Zrak	0	331
Zrak	20	344
Zrak	100	366
Zrak	1000	700
Vodik	0	1263
Vodena para	0	401
Ugljični dioksid	0	258
Neon	0	437
Kisik	0	317
Helij	0	971

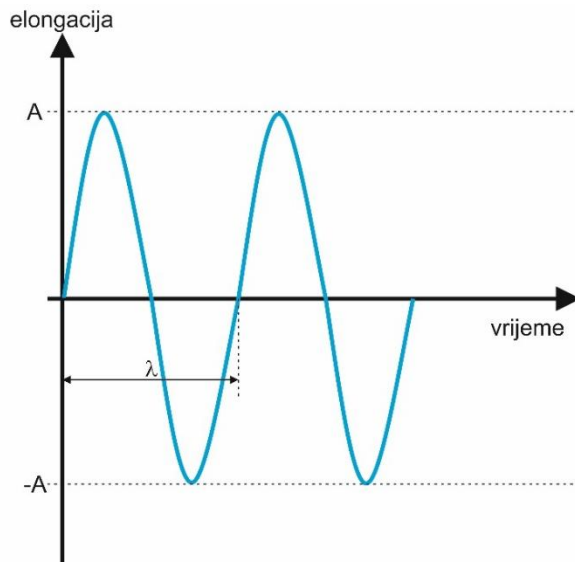
2.5. Vrste zvuka

Osjećaj zvuka u našem uhu ovisi o tome kako titra izvor zvuka te prema tome razlikujemo dvije vrste zvuka. Samim time zvukove možemo podijeliti u dvije skupine: tonove i šumove.

2.5.1. Ton

Ton nastaje kad se titraji izvora zvuka pravilno ponavljaju jedan za drugim. Takav primjer imamo kod glazbene vilice te različitih glazbenih instrumenata. Nakon laganog udarca batićem po glazbenoj vilici nastaju složena titranja kod kojih se nakon sekundu-dvije više frekvencije prigušuju, a ostaje osnovna frekvencija. [23]

Kod tona imamo slučaj kada se titranje periodično ponavlja istim frekvencijama, odnosno kažemo da izvor zvuka pravilno titra stalnom frekvencijom u nekom duljem intervalu vremena, kao na slici 7. Tonovi također imaju svoje osobine prema kojima ih naše uho razlikuje, a to su: visina tona, jačina tona i boja tona. Glasnoća zvuka ovisi o njegovoj amplitudi A (razlika između najvećeg i najmanjeg tlaka u zvučnom valu).



Slika 7. Prikaz tona [19]

Jednadžba vala koji putuje u pozitivnom smjeru x-osi u vremenu t glasi:

$$y(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad \text{ili} \quad y(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$$

gdje su oznake:

$y(x,t)$ - elongacija (udaljenost čestice sredstva od ravnotežnog položaja u nekom trenutku)

A – amplituda vala

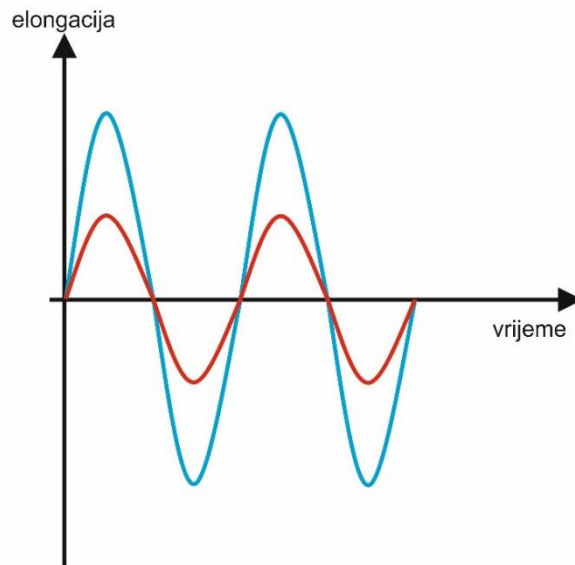
k – valni broj

x – udaljenost čestice sredstva od izvora vala

t – vrijeme proteklo od početka širenja vala

ω - kružna frekvencija.

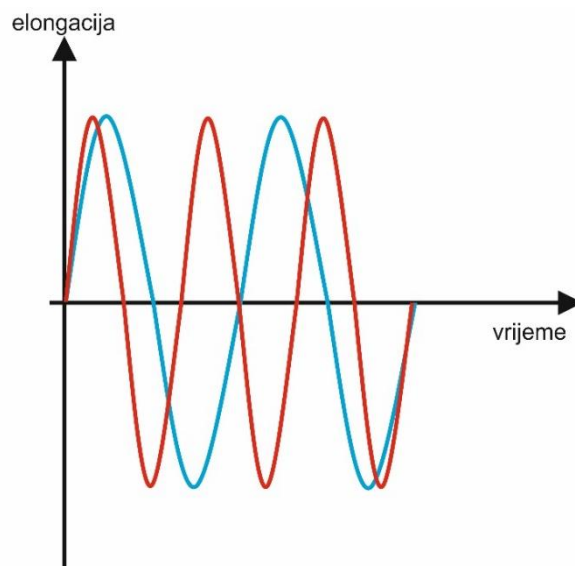
Slika 8 prikazuje tihi i glasni zvuk. Kod tihog zvuka razlika između najvišeg i najmanjeg tlaka je malena.



Slika 8. Tihi (crvena boja) i glasni (plava boja) zvuk [19]

Što je zvuk glasniji, veća je razlika tlakova između područja niskog i visokog tlaka. Iz slike 8 možemo zaključiti da tihi i glasni zvuk imaju različite amplitude, a jednake frekvencije.

Karakteristika dubokog zvuka je mala frekvencija što ujedno znači manje valova u sekundi. Slika 9 prikazuje duboki i visoki zvuk.

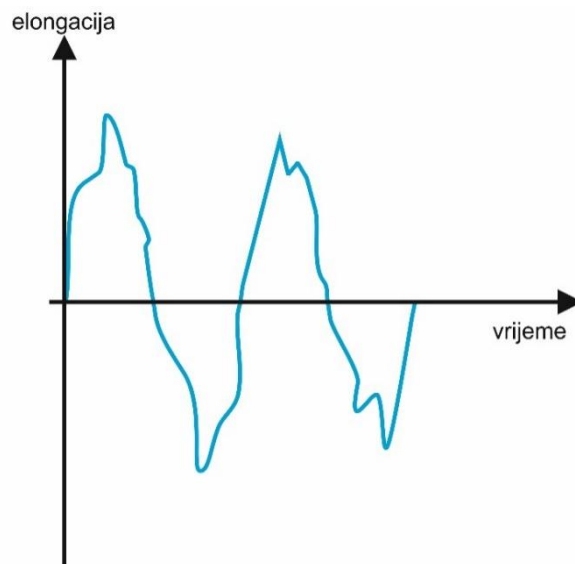


Slika 9. Duboki (plava boja) i visoki (crvena boja) zvuk [19]

Izgore navedene slike možemo zaključiti da duboki i visoki zvuk imaju jednake amplitude, a različite frekvencije. Kod visokog zvuka zvučni valovi su bliži, ima ih više u svakoj sekundi.

2.5.2. Šum

Šum je zvuk koji nastaje nepravilnim titranjem izvora zvuka. To je zvuk koji ne potječe od periodičnog titraja i kojemu se frekvencija i amplitude brzo mijenjaju. Slikoviti prikaz šuma vidimo na slici 10.



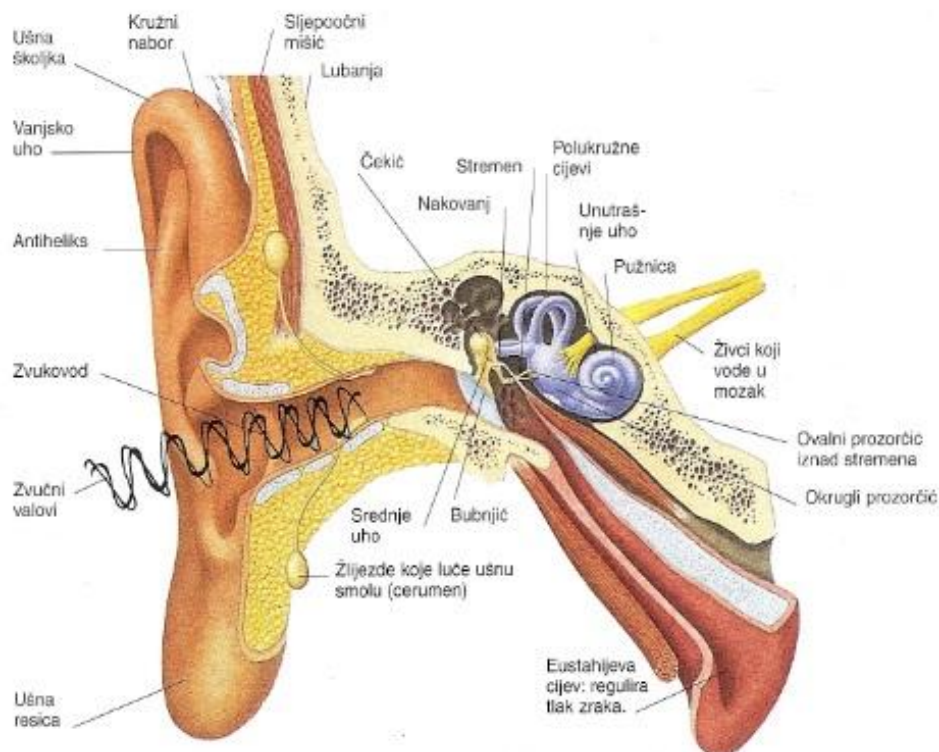
Slika 10. Prikaz šuma [17]

2.6. Kako mi zapravo čujemo?

Uši su organi sluha, ali i ravnoteže. Obavljaju svoju zadaću u paru tako što prikupljaju zvučne vibracije i pretvaraju ih u signale. Signali se zatim prenose u mozak te nam omogućuju da čujemo. Uho je organ za primanje zvučnih valova koji se sastoji od tri osnovna dijela: vanjskog, srednjeg i unutarnjeg uha. Svaki dio uha ima odgovarajuću ulogu u opažanju i interpretaciji zvuka. [13, 12, 15]

Longitudinalni valovi zvuka dolaze u uho kroz ušni kanal u bubnjić. Nakon toga preko tri ušne kosti gdje se zvuk pojačava tridesetak puta, zvuk dopijeva do fiziološke tekućine (unutarnje uho), kao što se može vidjeti na slici 11. [23]

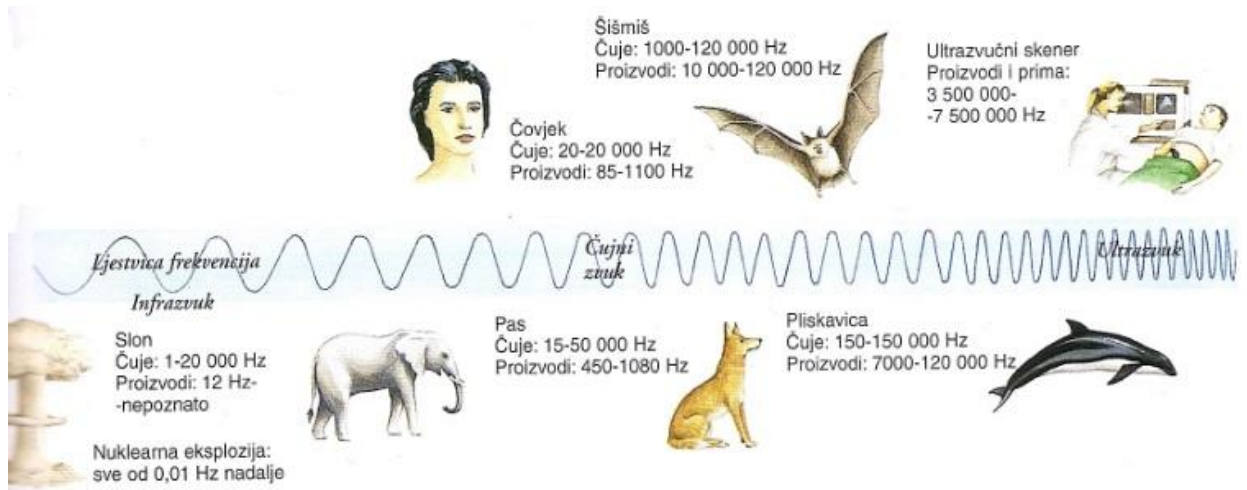
Ukoliko udarimo batićem po membrani bubnja, membrana se periodički udubljuje, odnosno ispupčuje. Zrak koji se nalazi ispred membrane periodički se zgušnjava i razrjeđuje te se ta zgušnjenja i razrjeđenja zraka prenose na okolni zrak. Ona dolaze na bubnjić našeg uha i pobuđuju titranje opne (bubnjića). Zatim se preko sitnih koščica (čekić, nakovanj i stremen) koje zajedno sa bubnjićem čine srednje uho, titranje prenosi na limfnu tekućinu (unutarnje uho) gdje se nalaze i fine slušne niti (živčane stanice nalik dlačicama). Tri koščice srednjeg uha zapravo pojačavaju vibracije zvučnog vala. Kompresijski val koji udara u veliku površinu bubnjića koncentriran je na malu površinu stremena. Zbog toga je snaga vibrirajućeg stremena petnaest puta veća od snage vibrirajućeg bubnjića što omogućava sposobnost da detektiramo i najslabije zvukove iz naše okoline. Nailaskom zvučnog vala na fine slušne niti dolazi do rezonancije dlačica čija je vlastita frekvencija jednaka frekvenciji vala i dlačica počinje vibrirati većom amplitudom. Nakon toga otpušta se električni impuls koji slušnim živcem putuje do mozga koji je sposoban interpretirati značajke zvuka. [13, 12, 15, 23, 28]



Slika 11. Građa uha [6]

3. INFRAZVUK

Do sada smo govorili i pisali o zvuku određenih frekvencija, ali možemo se zapitati što je s nižim frekvencijama te samim time dolazimo do pojma infrazvuk. Longitudinalni mehanički val frekvencije manje od 20 Hz naziva se infrazvuk. Ljudsko uho nije osjetljivo na infrazvuk. Infrazvuk emitiraju mnogi geofizički procesi. Potresni valovi su valovi niskih frekvencija te neke životinje mogu predosjetiti potres. One čuju infrazvuk potresa koji dođe kroz Zemljinu unutrašnjost prije nego površinski valovi potresa. Na slici 12 se mogu vidjeti životinje koje osjete infrazvuk.

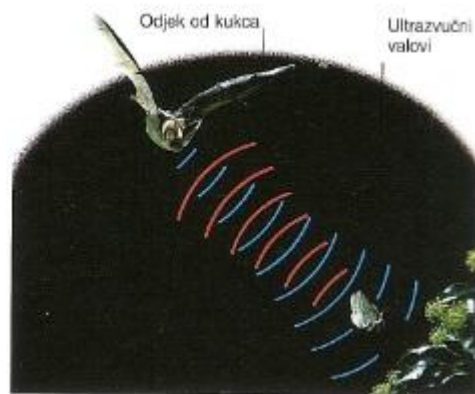


Slika 12. Ljestvica frekvencija [6]

4. ULTRAZVUK

Definirali smo infrazvuk kao longitudinalni mehanički val frekvencije manje od 20 Hz te zvuk kao longitudinalni mehanički val u rasponu frekvencija od 20 Hz do 20 000 Hz. Sada se možemo zapitati što je s frekvencijama višim od 20 000 Hz. Longitudinalni mehanički val frekvencije iznad 20 000 Hz naziva se ultrazvuk. Naše uho nije osjetljivo na ultrazvuk. Međutim, neke životinje imaju uho osjetljivo na ultrazvuk. Primjena ultrazvuka je raznovrsna, a na slici 12 se mogu vidjeti životinje koje osjete ultrazvuk i jedna njegova primjena u medicini.

Šišmiši mogu letjeti i loviti u mraku uz pomoć ultrazvuka. Ultrazvuk se odbija od kukaca u letu te ih tako šišmiš otkriva i hvata, kao što je prikazano na slici 13. Osim šišmiša, ultrazvuk čuju psi, mačke, miševi, ribe, dupini, kitovi, itd.



Slika 13. Šišmiši i ultrazvuk [6]

Mali prijenosni sonar (engl. Sound Navigation and Ranging) koji emitira ultrazvuk te ga detektira kad se odbije od objekta mogu koristiti ribolovci za traženje ribe.

Valovi ultrazvuka mogu se usmjeriti prema ljudskom tijelu npr. nerođenom djetetu. Ultrazvuk se odbija od ploda, a ultrazvučni detektori hvataju odjek i pretvaraju ga u ultrazvučne impulse koji na ekranu stvaraju slike fetusa, kao što je prikazano na slici 14. [6]



Slika 14. Ultrazvučna slika fetusa u maternici

Tkiva se razlikuju gustoćom, a prema tome i brzinom širenja ultrazvučnih valova u njima. Na granici dvaju tkiva različitih gustoća val se djelomično odbija, a dijelom prelazi iz jednog tkiva u drugo. Mjesta na kojima je došlo do refleksije registrira ultrazvučno osjetilo koje šalje podatke u računalo koje obrađuje i vizualizira podatke. Ta su mjesta granice organa ili njihovih dijelova pa na ekranu računala vidimo sliku organa, odnosno njegovih dijelova. Ultrazvuk se osim za dijagnostiku upotrebljava i u liječenju (razbijanje bubrežnih kamenaca). [15]

5. REZONANCIJA

Ukoliko zvuk pobudi neki predmet na titranje prirodnom frekvencijom, titraji će se preklapati i pribrojavati te će stvoriti veću amplitudu. Ovu pojavu nazivamo rezonancijom, a može čak razbiti predmet, kao što se vidi na slici 15, a o čemu ću pisati u nastavku rada.



Slika 15. Razbijanje čaše zvukom [22]

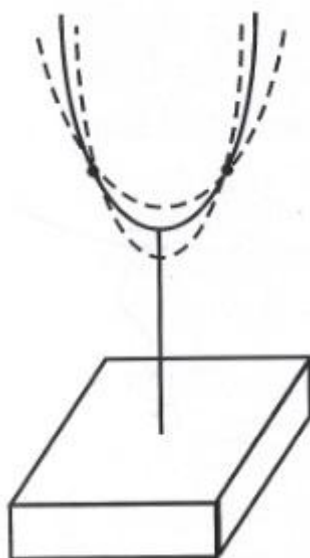
Rezonancija u akustici (područje fizike koje se bavi načinima dobivanja i zakonima širenja zvuka) nastaje kada val zvuka dođe na neki sustav koji može titrati frekvencijom upadnog vala. Sustav se pobuđuje, preuzima zvučnu energiju upadnog vala te emitira dalje.

5.1. Izvori zvuka

Izvor zvuka je elastični sustav koji uzbuđen na neki način (mehanički, električki, fiziološki) titra određenom frekvencijom te u dodiru s atmosferom daje ton. Izvori glazbenog zvuka su glazbeni instrumenti koji proizvode stojne valove. Kao primjer možemo navesti gitaru koja je žičani instrument kod kojega položajem prsta na žici i pragu gitare izaberemo duljinu žice, koja određuje pripadnu osnovnu frekvenciju te trzanjem pobuđujemo žicu na titranje. Puhački instrumenti proizvode stojne valove u stupu zraka u nekoj cijevi. Otvorena cijev ima trbuhe stojnog vala na oba kraja, a zatvorena cijev ima zapravo zatvoren jedan kraj cijevi gdje se nalazi čvor stojnog vala.

5.1.1. Glazbena viljuška

Glazbena viljuška (vilica) je plosnata šipka svinuta u obliku slova U što možemo vidjeti na slici 16. Ona nakon kratkotrajne deformacije krajeva šipke titra s dva čvora i tri trbuha pri osnovnoj frekvenciji.

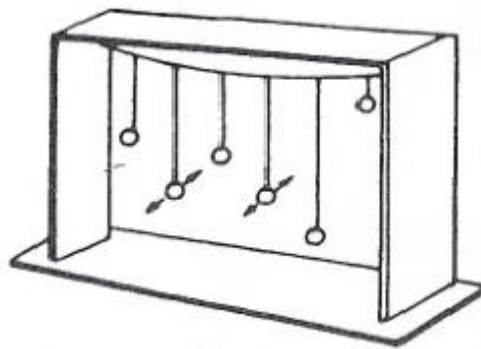


Slika 16. Glazbena viljuška [23]

Glazbena viljuška ima u svinutom dijelu držak preko kojega se titranje može prenositi na neko drugo tijelo (rezonator). Ukoliko batićem lagano udarimo po glazbenoj vilici nastaju složena titranja kod kojih se nakon sekundu do dvije više frekvencije prigušuju. Ostaje osnovna frekvencija što je sinusni val koji se može vidjeti na osciloskopu uz pomoć mikrofona. Mikrofon je elektroakustički uređaj koji prevodi mehanička titranja u električne impulse što je suprotan proces od procesa rada zvučnika. Možemo reći da male glazbene viljuške daju visoke tonove.

5.2. Mehanička rezonancija na njihalu

Pošto se cjelina o zvuku uči kasnije od mehanike u srednjoj školi, također i pojava rezonancije, dobro je ponoviti pokus mehaničke rezonancije kako bi se moglo lakše shvatiti rezonancija zvuka. Za izvođenje pokusa mehaničke rezonancije na njihalu možemo i samostalno izraditi potrebnu aparaturu. Pričvrstimo nekoliko njihala različitih duljina, s time da barem dva njihala trebaju biti jednakih duljina. Njihala pričvrstimo na zajedničku nit te učvrstimo na stalak. Konačan izgled njihala prikazan je na slici 17.



Slika 17. Njihala [27]

Ukoliko zanjišemo jedno od njihala, možemo primijetiti da se energija vrlo slabo i nejednoliko prenosi na ostala njihala. Zanjišemo li jedno od njihala jednakih duljina uočiti ćemo da se i drugo njihalo njiše gotovo jednakim amplitudama. Za to vrijeme će ostala njihala primati neznatne energije te će se njihati nepravilno.

Izraz za period matematičkog njihala je $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

gdje su oznake:

T - period titranja matematičkog njihala

l - duljina niti

g - ubrzanje sile teže.

Zaključujemo da period matematičkog njihala, za male kutove odklona, ovisi o duljini niti te o akceleraciji sile teže. Kako vidimo i na slici 17. u našem slučaju period ovisi samo o duljini niti njihala jer je ubrzanje sile teže g zajedničko za sva njihala.

Samim time iz izraza za frekvenciju $f = \frac{1}{T}$

gdje su:

f - frekvencija njihala

T - period njihala.

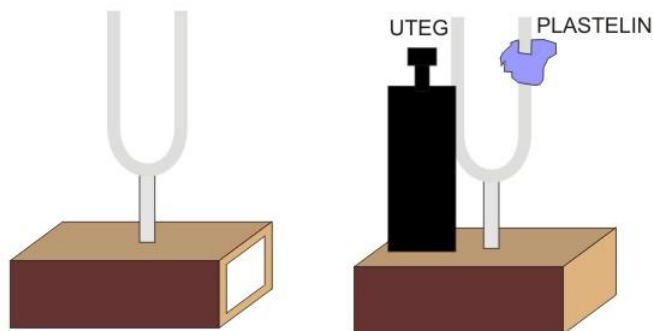
Zaključujemo da frekvenciju njihala određuje samo njegova duljina jer je ubrzanje sile teže g kao što je ranije rečeno zajedničko za sva njihala.

5.3. Pokusi demonstracije akustične rezonancije

5.3.1. Demonstracija akustične rezonancije pomoću dvije glazbene vilice

Akustičnu rezonanciju možemo najjednostavnije demonstrirati pomoću dvije glazbene vilice (viljuške).

Za izvođenje pokusa potreban nam je navedeni pribor: plastelin, uteg od 2 kg, batić, dvije glazbene viljuške istih tonova na rezonantnoj kutiji. Slika 18 pokazuje postav pokusa.



Slika 18. Skica pokusa demonstracije akustične rezonancije pomoću dvije glazbene vilice [20]

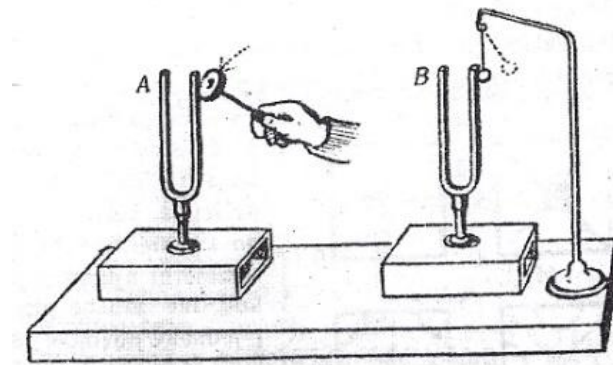
Već smo ranije definirali akustičnu rezonanciju kao prijenos zvučnog titranja s jednog tijela na drugo tijelo koje ima istu frekvenciju vlastitog titranja.

Pokus se sastoji od tri dijela. U prvom dijelu pokusa jednu glazbenu vilicu ćemo okrenuti prema drugoj tako da su rupe na rezonantnim kutijama okrenute jedna prema drugoj. Zatim batićem udarimo jednu glazbenu vilicu te ju nakon nekoliko sekundi prigušimo i slušamo što se događa s drugom glazbenom vilicom. U drugom dijelu pokusa na jednu glazbenu vilicu postavimo plastelin, a u trećem dijelu vježbe postavimo uteg na rezonantnu kutiju i ponovimo postupak promatranja. Iz opisanog pokusa i rezultata koji se dobiju donosimo zaključak pokusa. Kada se batićem udari glazbena vilica ona zatitra, ali zatitra i druga glazbena vilica koja ima istu frekvenciju. Stavljanjem utega na rezonantnu kutiju smanjuje se mogućnost vibracije rezonantne kutije pa se zvuk čuje slabije.

Ukoliko se stavi plastelin na jednu glazbenu vilicu ne dolazi do stvaranja zvuka na drugoj glazbenoj vilici jer se tim činom promijenila vlastita frekvencija prve glazbene vilice i zbog toga nije moglo doći do rezonancije.

Rezonantne kutije služe za pojačanje zvuka. Isto tako kod glazbenih instrumenata žice se pričvršćuju za drveno kućište te se titraji žice prenose po površini i stvaraju se zgušnjenja i razrjeđenja koja stvaraju jači zvuk od onoga kada nema rezonatora. Što se tiče samog titranja može se izvesti pokus pomoću kojega možemo zaključiti prigušuje li se titranje prije s rezonatorom ili ne. Uzmemo li glazbenu vilicu bez rezonatora (rezonantne kutije) i udarimo batićem čujemo da je intenzitet zvuka slabiji te da duže traje. Zatim uzmemo glazbenu vilicu iste frekvencije s rezonatorom i ponovimo pokus. Zaključujemo da je intenzitet zvuka jači, ali da traje kraće, odnosno da se on prije prigušuje s rezonatorom.

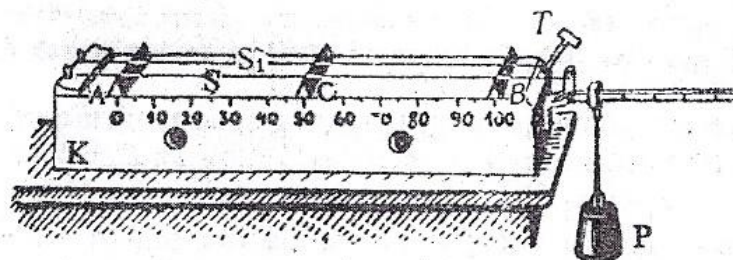
Rezonanciju zvuka pomoću dvije glazbene vilice možemo prikazati i na sljedeći način. Ukoliko glazbenu vilicu zatitramo, titranje se prenosi na zrak u rezonantnoj kutiji i zatim na zrak u rezonantnoj kutiji druge glazbene vilice. Jednaku situaciju smo imali i u prvom dijelu prošlog pokusa, samo što ćemo u ovaj pokus još dodati kuglicu obješenu na niti, kao na slici 19. Titranje pobuđuje drugu glazbenu vilicu na titranje i kuglica koja je obješena na nit te prislonjena uz glazbenu vilicu biti će pomaknuta iz položaja ravnoteže upravo zbog rezonantnog titranja glazbene vilice. Pobuđeno titranje druge glazbene vilice bit će maksimalno ukoliko obje glazbene vilice imaju jednake frekvencije titranja.



Slika 19. Rezonancija zvuka pomoću dvije glazbene vilice i kuglice obješene na nit [3]

5.3.2. Monokord

Za drugi pokus pomoću kojega možemo demonstrirati zvučnu rezonanciju potreban nam je monokord, glazbalo (uređaj) prikazano na slici 20, a kojeg posjeduje i Odjel za fiziku Osijek, prikazanog na slici 21 (fotografiji).



Slika 20. Monokord [3]



Slika 21. Monokord na Odjelu za fiziku

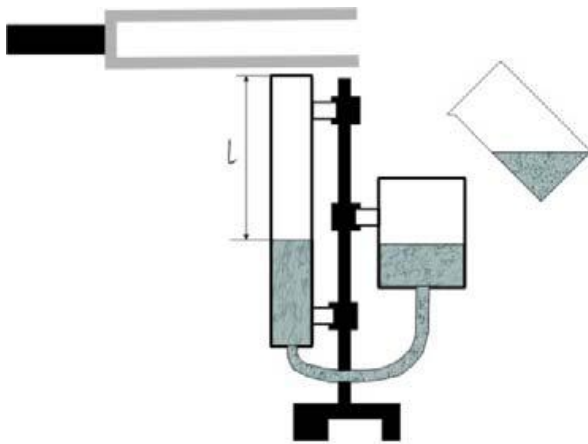
Monokord se sastoji od rezonantne kutije (letvice) sa skalom i dvije čelične žice od kojih je jedna žica fiksirana utegom i na njoj se nalazi papirić kao indikator titranja, a druga se žica zatezanjem može dovesti u rezonanciju sa fiksiranom žicom. Dok tu drugu žicu zatežemo, stalno ju pobuđujemo na titranje. U jednom trenutku ćemo zapaziti da titra papirić koji se nalazi na fiksiranoj žici i tada su žice u rezonanciji. Ukoliko nastavimo zatezati žicu, frekvencija se povećava i titranje papirića tada prestaje. Jednaku pojavu imati ćemo i ukoliko otpuštamo žicu i smanjujemo frekvenciju.

Osim akustične rezonancije i mehaničke rezonancije na njihalu, postoji i električna rezonancija (serijski LC titrajni krug) koja se također može demonstrirati pokusom koji nećemo opisivati u sklopu ovog rada, a izvodi se na praktikumu fizike, Odjela za fiziku Osijek.

5.3.3. Određivanje brzine širenja zvuka u stupcu zraka iznad površine vode

U ovom pokusu također je prisutna pojava rezonancije. Već sam spomenula da se zvuk širi u sredstvu u obliku zvučnih valova koji su zapravo longitudinalni valovi. Kod takvih valova čestice sredstva titraju u smjeru širenja vala.

Za izvođenje pokusa potrebna je navedena aparatura: glazbena vilica poznate frekvencije, šuplja prozirna cijev, posuda, stalak, gumeni batić, čaša, gumeno crijevo, voda. Sklop pokusa je prikazan na slikama 22 a) i b).



a)



b)

Slika 22. Aparatura za izvođenje pokusa [20]

Glazbena vilica, poznate frekvencije dovede se u titranje pomoću udarca gumenim batićem i drži se što bliže cijevi. Cijev se postepeno izvlači iz vode dok se prvi put ne čuje pojačanje zvuka. Kada se ustanovi valna duljina, izračuna se brzina širenja zvuka u zraku. Ukoliko je cijev dovoljno duga pri daljnjem izvlačenju čut će se i drugi put pojačanje zvuka. Zatim se odredi valna duljina stojnog vala i izračuna brzina širenja vala u sredstvu.

Relacije potrebne za izračun su:

$$v = 4 \cdot l \cdot f$$

$$\lambda = 4 \cdot l$$

gdje je:

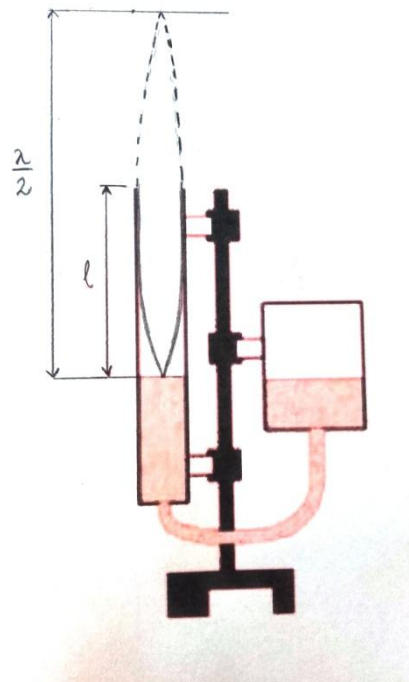
v - brzina širenja zvuka

l - duljina stupca zraka u cijevi

f - frekvencija glazbene vilice

λ - valna duljina stojnog vala.

Zbog čega je $l = \frac{\lambda}{4}$, prikazuje slika 23.



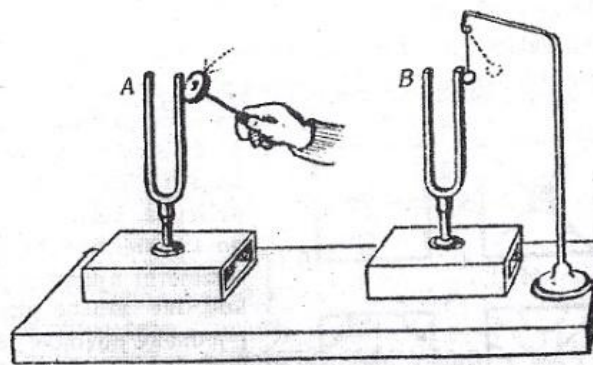
Slika 23. Prikaz: $l = \frac{\lambda}{4}$

Pokus možemo izvesti i sa dvije ili više glazbenih vilica.

Nakon izvršenog pokusa i provedenih mjerenja izračunata je brzina zvuka u zraku pomoću glazbene vilice u stupcu zraka iznad površine vode. Kada se batićem udari glazbenu vilicu ona zatitra osnovnom frekvencijom, zvuk dođe do površine vode, reflektira se nazad i tako nastane stojni val. Pojačanje zvuka daje superpozicija tih valova zvuka u stupcu zraka iznad površine vode. Reflektirani valovi titraju istom frekvencijom kao i glazbena vilica, tj. u rezonanciji su. Koristeći činjenicu da je u stupcu zraka samo četvrtina valne duljine izračunavamo brzinu zvuka. Dobiveni stojni val ima čvor na površini vode, a trbuh na kraju šuplje cijevi.

5.4. Ispitivanje pojave rezonancije i uvjeta njezinog nastanka matematičkim putem

Ranije smo opisali pojavu rezonancije te određene demonstracijske pokuse. Možemo se zapitati postoji li mogućnost ispitati pojavu rezonancije i matematičkim putem? Odgovor dajemo u ovom odlomku diplomskog rada.



Slika 24. Rezonancija zvuka pomoću dvije glazbene vilice i kuglice obješene na nit [3]

Prisjetimo se ranijeg pokusa preko slike 24. i ranije spomenute jednadžbe vala. Prigušene oscilacije glazbene vilice B dane su diferencijalnom jednadžbom:

$$my'' + fy' + m\omega_0^2 y = 0 \quad [3]$$

Gornja jednadžba se može zapisati i na slijedeći način:

$$my'' = -fy' - m\omega_0^2 y$$

Ukoliko amplitudu harmonijskih oscilacija glazbene vilice A označimo sa A_1 , kružnu frekvenciju njenog titranja sa $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}$, tada će elongacija ovih oscilacija koju ćemo označiti s

y_1 biti:

$$y_1 = A_1 \sin \omega_1 t$$

Prilikom rezonancije dolazi do superpozicije harmonijskih oscilacija glazbene vilice A i prigušenih oscilacija glazbene vilice B te iz gore navedenih jednadžbi dobivamo izraze:

$$my'' = -fy' - m\omega_0^2 y + y_1$$

$$my'' = -fy' - m\omega_0^2 y + A_1 \sin \omega_1 t \quad (1)$$

Harmonijske oscilacije glazbene vilice A izazvati će kod glazbene vilice B prisilne oscilacije. Glazbena vilica B postiže frekvenciju titranja ω_1 glazbene vilice A i promijeniti će amplitudu i fazu svoga titranja. Ukoliko elongaciju resultantnih prisilnih oscilacija označimo s y , amplitudu sa A_{rez} , faznu razliku dobivenih oscilacija sa δ i oscilaciju glazbene vilice A dobivamo:

$$y = A_{rez} \sin(\omega_1 t + \delta) \quad (2)$$

Kako bismo odredili amplitudu A_{rez} i faznu razliku prisilnih oscilacija trebamo naći prvu i drugu derivaciju po vremenu i uvrstiti rezultate u diferencijalnu jednadžbu (1) koja vrijedi za bilo koji vremenski trenutak. Derivacije funkcije (2) po vremenu su:

$$y' = A_{rez} \omega_1 \cos(\omega_1 t + \delta) \cdot t$$

$$y'' = -A_{rez} \omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \delta)$$

U jednadžbu (1) uvrstimo vrijednosti za y, y', y'' te dobivamo:

$$-mA_{rez}\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \delta) = -fA_{rez}\omega_1 \cos(\omega_1 t + \delta) - m\omega_0^2 A_{rez} \sin(\omega_1 t + \delta) + A_1 \sin \omega_1 t \quad (3)$$

Koristeći adicijske formule

$$\sin(x + y) = \sin x \cos y + \cos x \sin y$$

$$\cos(x + y) = \cos x \cos y - \sin x \sin y$$

razvijamo jednadžbu (3)

$$-mA_{rez}\omega_1^2(\sin\omega_1 t \cos\delta + \cos\omega_1 t \sin\delta) = -fA_{rez}\omega_1(\cos\omega_1 t \cos\delta - \sin\omega_1 t \sin\delta) - m\omega_0^2 A_{rez}(\sin\omega_1 t \cos\delta + \cos\omega_1 t \sin\delta) + A_1 \sin\omega_1 t$$

i njezinim sređivanjem dobivamo:

$$\left[(m\omega_0^2 - m\omega_1^2)A_{rez} \cos\delta - fA_{rez}\omega_1 \sin\delta - A_1 \right] \sin\omega_1 t + \left[(m\omega_0^2 - m\omega_1^2)A_{rez} \sin\delta + fA_{rez}\omega_1 \cos\delta \right] \cos\omega_1 t = 0 \quad (4)$$

Navedena jednadžba predstavlja vezu između slobodnog titranja glazbene vilice A, čiji je period T_0 , a kružna frekvencija $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ i prisilnih oscilacija, čiji je period T_1 i kružna frekvencija

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}.$$

Također jednadžba (4) vrijedi općenito za titrajne sustave kod kojih jedan svojim slobodnim oscilacijama izaziva kod drugog prisilne oscilacije.

Budući da jednadžba vrijedi za bilo koji vremenski trenutak, možemo prvo staviti $\omega_1 t = 0$,

odnosno da je $t = 0$. Zatim pišemo da je $\omega_1 t = \frac{\pi}{2}$, odnosno $t = \frac{T_1}{4}$. Samim time zbog vrijednosti

trigonometrijskih funkcija $\left(\sin 0^\circ = 0, \cos 0^\circ = 1, \sin \frac{\pi}{2} = 1, \cos \frac{\pi}{2} = 0 \right)$ iz jednadžbe (4) dobivamo

dvije nove jednadžbe:

$$mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\sin\delta + fA_{rez}\omega_1 \cos\delta = 0 \quad (5)$$

$$mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\cos\delta - fA_{rez}\omega_1 \sin\delta = A_1 \quad (6)$$

Iz jednadžbi (5) i (6) možemo odrediti faznu razliku δ , ali i novu amplitudu poslije djelovanja oscilacija glazbene vilice A na glazbenu vilicu B.

Koristeći funkciju tangens: $\tan\delta = \frac{\sin\delta}{\cos\delta}$ iz jednadžbe (5) dobivamo:

$$mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\sin\delta = -fA_{rez}\omega_1 \cos\delta$$

$$\tan\delta = \frac{-fA_{rez}\omega_1}{mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)}$$

Ukoliko brojnik i nazivnik razlomka dobivene jednadžbe podijelimo s mA_{rez} te kažemo da je

$\frac{f}{m} = 2\varepsilon$, gdje je ε predstavlja broj prigušenih oscilacija dobivamo:

$$\tan \delta = -\frac{2\varepsilon\omega_1}{\omega_0^2 - \omega_1^2} \quad (7)$$

Kako bismo dobili izraz za amplitudu A_{rez} trebamo jednadžbe (5) i (6) kvadrirati te ih nakon toga zbrojiti.

Matematički postupak određivanja amplitude A_{rez} :

$$mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\sin \delta + fA_{rez}\omega_1 \cos \delta = 0/2$$

$$\underline{mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\cos \delta - fA_{rez}\omega_1 \sin \delta = A_1/2}$$

$$\left. \begin{aligned} m^2 A_{rez}^2 (\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 \sin^2 \delta + 2mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\sin \delta \cdot fA_{rez}\omega_1 \cos \delta + f^2 A_{rez}^2 \omega_1^2 \cos^2 \delta &= 0 \\ m^2 A_{rez}^2 (\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 \cos^2 \delta - 2mA_{rez}(\omega_0^2 - \omega_1^2)\cos \delta \cdot fA_{rez}\omega_1 \sin \delta + f^2 A_{rez}^2 \omega_1^2 \sin^2 \delta &= A_1^2 \end{aligned} \right| +$$

$$m^2 A_{rez}^2 (\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + f^2 A_{rez}^2 \omega_1^2 = A_1^2$$

$$A_{rez}^2 = \frac{A_1^2}{m^2 (\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + f^2 \omega_1^2} = \frac{A_1^2}{m^2 \left[(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + \frac{f^2}{m^2} \omega_1^2 \right]} \quad (8)$$

Uzimajući u obzir da je $\frac{f^2}{m^2} = 4\varepsilon^2$, iz jednadžbe (8) dobivamo:

$$A_{rez} = \frac{A_1}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega_1^2}} \quad (9)$$

Jednadžbe (7) i (9) određuju fazu δ i amplitudu A_{rez} oscilacija koje nastaju djelovanjem jednog titrajnog sustava na drugi titrajni sustav. Ukoliko prokomentiramo ove jednadžbe, možemo odrediti uvjete za koje će prijelaz energije s jednog titrajnog sustava na drugi titrajni sustav biti najpotpuniji. Postoje četiri slučaja koja slijede u nastavku.

Kružna frekvencija oba sustava ω_0 i ω_1 , odnosno njihovi periodi T_0 i T_1 nisu jednaki.

Član $(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2$ u nazivniku jednadžbe (9) poprima veliku vrijednost. Pretpostavimo da je broj oscilacija u sekundi za prvi titrajni sustav $\nu_0 = 435$, a broj oscilacija u sekundi za drugi titrajni sustav $\nu_1 = 420$.

Tada je razlika u broju oscilacija u sekundi 15 oscilacija i spomenuti član iz nazivnika jednadžbe poprima jako veliku vrijednost:

$$(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 = [(2\pi\nu_0)^2 - (2\pi\nu_1)^2]^2 = (506311)^2$$

Ukoliko je uz to i karakterističan broj ε prigušenih oscilacija vrlo mali ($\varepsilon \rightarrow 0$) iz jednadžbe (9) zaključujemo da i amplituda A_{rez} ima vrlo malu vrijednost. Iz jednadžbe (7) proizlazi da $\tan \delta \rightarrow 0$, odnosno da $\delta \rightarrow -\pi$ zbog toga što $\varepsilon \rightarrow 0$, a to znači da je faza prisilnih oscilacija drugog titrajnog sustava suprotna fazi prvog titrajnog sustava. Zaključujemo da drugi titrajni sustav ne prihvaća oscilacije prvog sustava, a rezonancija oba sustava je vrlo mala. Stoga u praksi kažemo da između ova dva titrajna sustava ne postoji rezonancija. [3]

- I. Kružna frekvencija drugog titrajnog sustava ω_1 se približava kružnoj frekvenciji prvog titrajnog sustava ω_0 .

U ovom slučaju je $\omega_1 \rightarrow \omega_0$ te razlika $\omega_0^2 - \omega_1^2$ postaje sve manja i teži nuli. Zbog toga će prema jednadžbi (9) amplituda A_{rez} imati sve veće i veće vrijednosti. Drugi titrajni sustav sve više prihvaća oscilacije prvog titrajnog sustava. [3]

- II. Kružne frekvencije oba titrajna sustava su jednake ($\omega_1 = \omega_0$)

U ovom slučaju je $\omega_0^2 - \omega_1^2 = 0$ i prema jednadžbi (9) amplituda A_{rez} poprima svoju maksimalnu vrijednost:

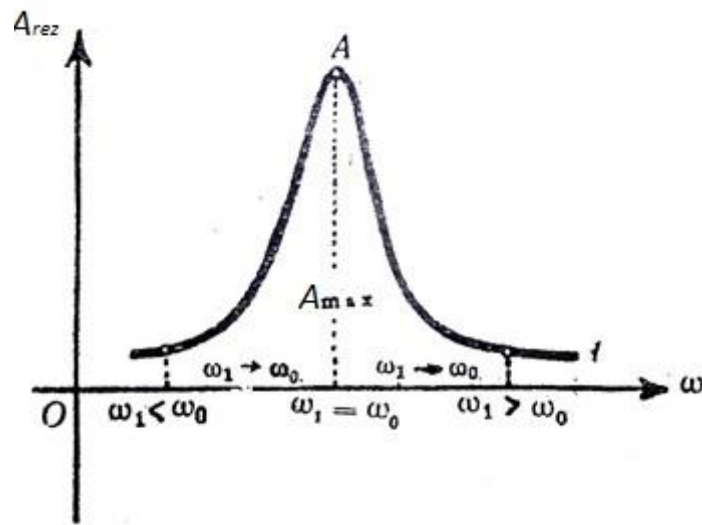
$$A_{rez} = \frac{A_1}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\varepsilon^2\omega_1^2}} = \frac{A_1}{m\sqrt{0 + 4\varepsilon^2\omega_1^2}}$$

$$A_{max} = \frac{A_1}{2m\varepsilon\omega_1} \quad (10)$$

Snažno povećanje amplitude prisilnih oscilacija znači da drugi titrajni sustav potpuno prihvaća oscilacije prvog titrajnog sustava te kažemo da su oba titrajna sustava u rezonanciji. [3]

Pošto je $\omega_1 = \omega_0$ iz jednadžbe (7) vidimo da $\tan \delta \rightarrow -\infty$ pa slijedi da $\delta \rightarrow -\frac{\pi}{2}$. U slučaju rezonancije, faza prisilnih oscilacija zaostaje iza faze prvog titrajnog sustava za $\frac{\pi}{2}$.

Pojave koje smo proučili u ova prva tri slučaja možemo grafički prikazati kao na slici 25.



Slika 25. Pojave proučene u tri izložena slučaja [3]

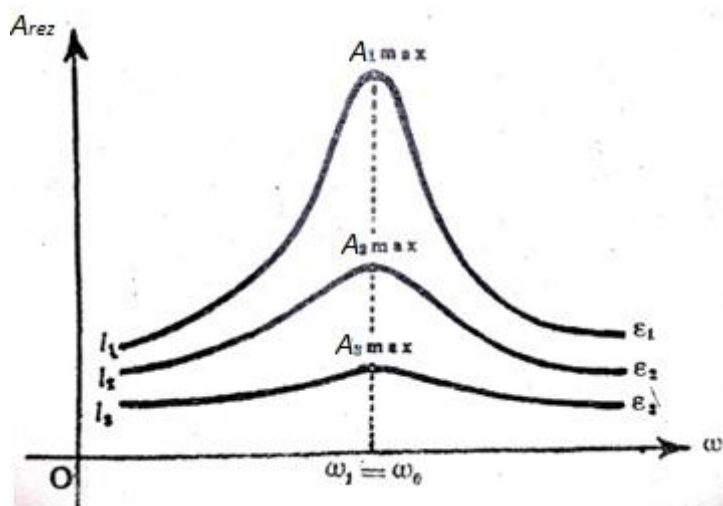
Vidimo da os apscisa sadrži vrijednosti kružne frekvencije ω , a os ordinata vrijednosti amplitude A_{rez} .

Krivulja l prikazuje promjenu amplitude A_{rez} . U točki A čija je apscisa $\omega_1 = \omega_0$ amplituda ima maksimalnu vrijednost (A_{max}) i to znači da su oba titrajna sustava u rezonanciji.

III. Maksimalna amplituda za različite vrijednosti karakteristike prigušenih oscilacija ε

Iz jednadžbe (10) vidimo da je maksimalna amplituda obrnuto proporcionalna karakterističnom broju ε prigušenih oscilacija. To znači da rezonancija dostiže velike vrijednosti za male vrijednosti ε , tj. kod oscilacija koje su vrlo malo prigušene. Za velike vrijednosti karakterističnog broja ε , maksimalna amplituda A_{\max} prisilnih oscilacija postaje sve manja. Možemo se zapitati što je kod oscilacija sa velikim prigušenjem? Kod oscilacija sa velikim prigušenjem, rezonancija iščezava, što se može izračunati iz formule (10).

Odgovarajuće vrijednosti maksimalnih amplituda A_{\max} također možemo grafički prikazati kao na slici 26.



Slika 26. Vrijednosti maksimalnih amplituda A_{\max} [3]

Krivulje l_1, l_2, l_3 prikazuju odgovarajuće vrijednosti maksimalnih amplituda $A_{1\max}, A_{2\max}, A_{3\max}$ za vrijednosti karakterističnog broja $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ prigušenih oscilacija, kada je $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$. [3]

Iz svega do sada navedenog zaključujemo da se teorijsko razmatranje pojave rezonancije poklapa s rezultatima dobivenim eksperimentalnim putem. Kažemo da najpotpuniju rezonanciju pri određenoj kružnoj frekvenciji dva titrajna sustava imaju ona tijela koja titraju sa malim prigušenjem oscilacija.

6. ODREĐIVANJE OSNOVNE FREKVENCIJE REZONATORA

Prije opisa postupka izvođenja ovoga eksperimenta, definirati ćemo rezonatore. Rezonatori su šuplja tijela koja služe za pojačanje tona gdje je to potrebno.

Najjednostavniji i najbolji su Helmholtzovi rezonatori koji su šuplje kugle od stakla ili nekog metala (Slika 27.).



Slika 27. Helmholtzov rezonator [3]

Otvor A označen na slici je širi otvor koji se okrene izvoru zvuka, a uži otvor B se stavlja na uho. Rezonatori se primjenjuju u glazbi, odnosno kod glazbenih instrumenata. Sama vrijednost nekog žičanog glazbenog instrumenta ovisi o dobrim osobinama njegovih rezonatora. Ranije smo spominjali glazbenu vilicu. Ona se također postavlja na drvenu kutiju otvorenu s jedne strane. Duljina te kutije jednaka je četvrtini valne duljine osnovnog tona glazbene vilice jer tada zrak u kutiji rezonira sa glazbenom vilicom ($l = \frac{\lambda}{4}$).

Moj prvi zadatak bio je odrediti osnovnu frekvenciju rezonatorskih kutija koje služe kao aparatura na Odjelu za fiziku. Glazbene vilice bile su postavljene na rezonatorske kutije te se provjeravalo je li svaka od glazbenih vilica postavljena na dobar rezonator. U prvom dijelu mjerila sam duljine rezonatorskih kutija pomoću mjerne vrpce. Nakon što sam izmjerila duljine rezonatorskih kutija, izračunala sam valnu duljinu pomoću relacije $\lambda = 4 \cdot l$

gdje je:

λ - valna duljina

l - duljina zračne šupljine rezonatorske kutije.

Nakon dobivenih rezultata, izračunata je osnovna frekvencija rezonatora prema relaciji:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda}$$

gdje je:

f - osnovna frekvencija rezonatora

v - brzina zvuka u zraku (340 m/s)

λ - valna duljina.

Tablica 3. Izmjerene duljine rezonatorskih kutija (rezonatora) te izračunate vrijednosti osnovnih frekvencija rezonatora

l (m)	λ (m)	f (Hz)
0,2350	0,9400	361
0,2930	1,1720	290
0,1870	0,7480	454
0,1650	0,6600	515
0,1320	0,5280	643
0,1720	0,6880	494
0,1720	0,6880	494
0,1710	0,6840	497
0,1650	0,6600	515
0,1710	0,6840	497
0,1920	0,7680	442
0,2640	1,0560	321
0,2640	1,0560	321

Iz navedene tablice možemo zaključiti da je frekvencija obrnuto razmjerna duljini rezonatora, odnosno što je duljina rezonatora veća to je frekvencija manja i obrnuto. Nakon mjerenja smo propisno označili rezonatorske kutije kako bi se lako moglo uočiti kojoj glazbenoj vilici pripadaju.

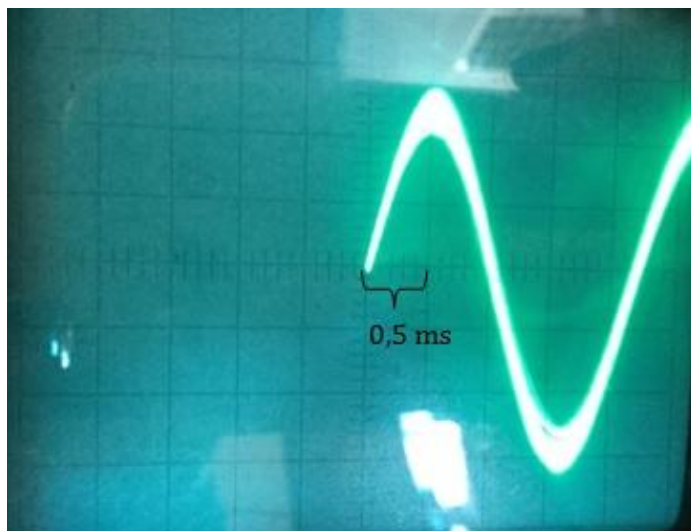
7. MJERENJE FREKVENCIJE GLAZBENE VILICE POMOĆU OSCILOSKOPA

Frekvenciju glazbene vilice možemo izmjeriti pomoću osciloskopa i mikrofona (Slika 28.).



Slika 28. Aparatura za mjerenje frekvencije glazbene vilice

Nakon uključivanja osciloskopa i mikrofona s pojačalom, udarimo batićem glazbenu vilicu i podesimo osciloskop za najbolji izgled slike (vremensku skalu, amplitudu,...). Možemo zamijetiti signal prikazan na ekranu osciloskopa, slika 29. Vrlo je bitno da je okolina mirna, odnosno da nema prevelike buke koja utječe na rezultate mjerenja.



Slika 29. Signal

Znamo naše postavke osciloskopa i da nam veliki kvadrat predstavlja jedan odjeljak ($\Delta t = 0,5$ ms). Iz prikaza signala očitamo koliko odjeljaka imamo te zaključujemo da imamo 4,3 odjeljaka. Možemo izračunati period, a zatim i frekvenciju glazbene vilice.

Rezultati:

$$T = \text{br.odjeljaka} \cdot \Delta t$$

$$T = 4,3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$T = 0,00215 \text{ s}$$

Znamo da frekvenciju u ovom slučaju možemo izračunati prema relaciji: $f = \frac{1}{T}$

gdje je:

f - frekvencija glazbene vilice

T - period

te dobivamo frekvenciju $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,00215\text{s}} = 465 \text{ Hz}$.

Izračunom smo dobili vrijednost frekvencije glazbene vilice koja iznosi 465 Hz, dok je na samoj glazbenoj vilici naznačen broj 440 Hz.

Pogreška mjerenja:

$$p = \frac{|f_t - f|}{f_t} \cdot 100\%$$

$$p = 6\%$$

Uzimajući frekvenciju od 440 Hz kao točnu vrijednost frekvencije glazbene vilice, izračunali smo pogrešku mjerenja koja iznosi 6%.

8. NAJDRAMATIČNIJI DEMONSTRACIJSKI POKUS ZVUČNE REZONANCIJE

Došli smo do ključnog dijela ovog diplomskog rada. Prvi korak prije izvođenja samog pokusa je proučiti koja nam je aparatura ključna i potrebna kako bismo uspješno izveli pokus. Vrlo je bitno biti motiviran, ali još više strpljiv jer je potrebno utrošiti dosta vremena na sakupljanje svih potrebnih informacija, ali i kupnju potrebne aparature.

Za izvođenje demonstracijskog pokusa potreban je slijedeći pribor: pojačalo (P20-B 200 W), funkcijski generator (MA 3730), zvučnik (DE1050-8), električni stroboskop (Iskra MA 3900), spojni vodiči, vinska kristalin čaša (na stalku), zaštitne slušalice (antifoni), zaštitne naočale, rukavice, metla, lopatica.



Slika 30. Aparatura potrebna za izvođenje demonstracijskog pokusa

Najmukotrpniji posao prije izvođenja samog pokusa bio je pronaći odgovarajući zvučnik koji je vrlo bitna komponenta za postizanje zacrtanog cilja. U listopadu 2017. godine krenula je intenzivna potraga za zvučnikom i pronalaskom tvrtki koje imaju mogućnost nabave zvučnika čije specifikacije slijede u nastavku.

8.1. Karakteristike zvučnika

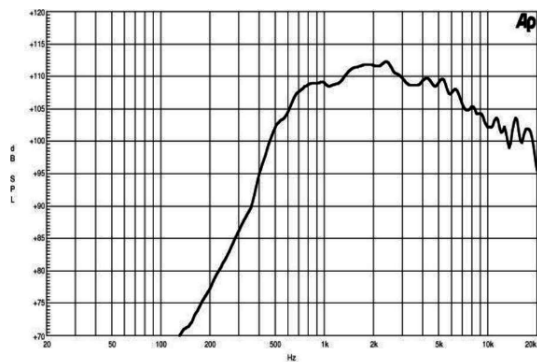
Za izvođenje pokusa vrlo nam je bitna snaga izvora zvuka. Zvučnik (Slika 31.) korišten za izvođenje pokusa je visokotonac čije su karakteristike navedene u tablici 4. Uz sve ranije navedeno, treba napomenuti kako smo kod izbora zvučnika najviše potrošili vremena zbog cijene (oko 3 500 kn) i dobavljača koji bi nam mogao isporučiti traženi zvučnik u kratkom roku. No „izgubljeno“ vrijeme se isplatilo s obzirom da smo zadovoljni radom zvučnika u ovom pokusu. Isti zvučnik je isproban i u pokusu s Kundtovom cijevi gdje se također dobro iskazao.



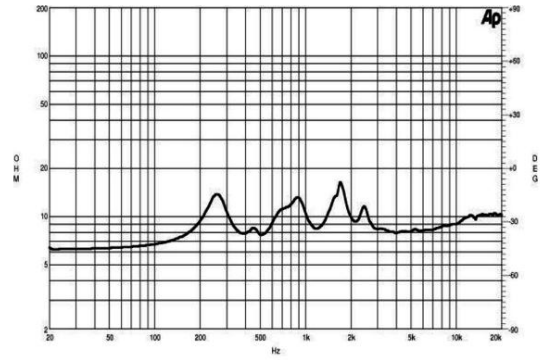
Slika 31. Zvučnik DE1050-8 proizvođača B&C Speakers[1]

Tablica 4. Karakteristike zvučnika [1]

Promjer grla	50 mm (2,0 inča)
Nominalna snaga	140 W
Raspon frekvencija	500 – 20 000 Hz
Materijal izrade	Aluminij
Gustoća magnetskog toka	1,95 T
Nominalna impedancija	8 Ω
Minimalna impedancija	8,1 Ω
Stalna snaga	240 W
Osjetljivost	109 dB
Materijal izrade membrane	Titan
Prijelazna frekvencija	800 Hz
Induktivnost	0,18 mH
Magnetski materijal	Neodimijski prsten
Titrajna zavojnica s nosačem promjera 100 mm (4,0 in)	



a)



b)

Slika 32. Karakteristike zvučnika [1]

Iz gore navedenih grafova, slika 32 a) i b), možemo iščitati pojedine karakteristike zvučnika. Iz prvog grafa - slika 32 a) možemo zaključiti kako za frekvenciju od 500 Hz možemo ostvariti intenzitet zvuka od 103 dB, odnosno za manje frekvencije ne možemo ostvariti isti intenzitet zvuka. Karakteristike su nam važne jer odabrane vinske čaše imaju svoje prirodne frekvencije između 300 i 1000 Hz, pa je važno da odaberemo one čaše čije su prirodne frekvencije više od 500 Hz. Isto tako promatrajući drugi graf - slika 32 b) zaključujemo da frekvenciji 500 Hz odgovara otpor od 8Ω što nam je važno za odabir dobrog pojačala koje može raditi sa zvučnicima određenog električnog otpora.

Nakon što je zvučnik stigao na adresu Odjela za fiziku u Osijeku, bilo ga je potrebno na neki način učvrstiti, odnosno izraditi adekvatan stalak. Slijedilo je skiciranje izgleda stalka te nabava drveta potrebnog za njegovu izradu. Nakon što smo osmislili izgled, uhvatili smo se posla i izradili stalak na koji smo učvrstili zvučnik. Sva ostala aparatura (osim staklenih čaša) nalazila se na Odjelu za fiziku. Uslijedila je potraga za staklenim čašama, konkretno vinskim čašama o kojima nešto više slijedi u nastavku rada.

8.2. Vrste vinskih čaša

Možda na prvi pogled zvuči smiješno, ali vrlo nam je bitno kakvu čašu koristimo za izvođenje pokusa. Znamo da postoji više vrsta vina, ali isto tako postoji i više vrsta vinskih čaša. Tome se možda u svakodnevnom životu (kod kuće) ne daje velika pozornost, više u restoranu ili posebnim svečanostima. Znamo i sami kada idemo kupiti npr. čaše za vino da nećemo previše gledati oko detalja što se tiče debljine, visine čaša i sl. U restoranima, a posebno u vinarijama obraća se pozornost i na pojedine karakteristike čaša. Svaka vrsta vina zahtjeva i određeni izgled čaše u kojoj će se vino poslužiti kako bi se očuvale njegove čari, što se može vidjeti na slici 33.



Slika 33. Vrste vinskih čaša [35]

Kad govorimo o staklenima masama za izradu čaša, obično staklo je najlošije kakvoće. Kristalin sadrži 9 % olovovog monoksida (PbO) i od njega se najčešće rade vinske čaše. Njihova prozirnost je veća negoli kod običnog stakla, a upravo dodatak PbO bistri staklo i čini ga kvalitetnijim.

Kristal je staklo koje sadrži 24 % PbO, što znači da je staklo još kvalitetnije i mekše. Postoje još i vatrostalno staklo koje se koristi pri kuhanju, borosilikatno, natrijsko, alumosilikatno, kremeno staklo, a sve prema dodatnim karakteristikama koje želimo postići. [29]

Za izvođenje pokusa korištena je vinska čaša na stalku. Vrlo je bitno da čaša nema zadebljani rub nego da je rub tanak te da je i sama čaša što tanja. Posebno rezonantne čaše su čaše za vino i šampanjac zbog svog šupljeg i izduženog oblika, ali isto tako i uskih drški. Upravo te drške smanjuju prigušenje vibracija, slično kao i kod glazbenih vilica. Osim vinskih čaša kupljenih u trgovačkom centru (Slika 34 a) prilikom izvođenja pokusa rabile su se i čaše koje su stare više od 50 godina tipa „coupe“ ili „vintage“ (Slika 34 b). Na tim čašama mogu se vrlo lijepo vidjeti vibracije (titraji) pod stroboskopskim svjetlom pošto su vrlo tanke i kod njih se titranje odvija na vrhu čaše te se samim time bolje primijeti. Dodatak diplomskom radu je i niz video snimki HD rezolucije koje se mogu koristiti u nastavi fizike. Titranje kod vinskih čaša od kristalina kupljenih u trgovačkom centru tipa „standard“ odvija se na sredini čaše te je zbog toga teško uočljivo.



a)



b)

Slika 34. Vinske čaše korištene prilikom izvođenja demonstracijskog pokusa

8.3. Opis izvođenja demonstracijskog pokusa

Prije početka izvođenja pokusa, potrebno je odrediti frekvenciju staklene čaše. Određivanje frekvencije pojedine staklene čaše pomoću osciloskopa i mikrofona nije bilo potpuno uspješno. Signal nije bio jasan te je njegovo trajanje bilo kratko i samim time nije moguće izračunati frekvenciju staklene čaše. No usprkos tim problemima postoji drugi, jednostavniji način pomoću kojega se vrlo lako može odrediti frekvencija pojedine čaše, a biti će opisano u nastavku ovog rada.

Složimo postav kao na slici 30, detalj kod čaše je prikazan na slici 35. Kao što sam ranije navela, na početku nam je vrlo bitno odrediti frekvenciju čaše. Čaša će puknuti samo ukoliko ju izložimo upravo njezinoj vlastitoj frekvenciji. Najjednostavniji i najbrži način je taj da stavimo jahač (papirić) na rub čaše, uključimo pojačalo i funkcijski generator (ali ne na najjače pojačanje) te pokušamo pronaći frekvenciju čaše.



Slika 35. Jahač na rubu čaše

Tražimo koja frekvencija odgovara vlastitoj frekvenciji čaše, a to vidimo kada papirić-jahač počne "skakati" te tako znamo da čaša najintenzivnije titra. Tu određenu frekvenciju nazivamo rezonantnom frekvencijom. Vrlo nam je bitna snaga izvora zvuka koja je potrebna za razbijanje čaše. Kada uspješno odredimo frekvenciju čaše, povećamo intenzitet zvuka na pojačalu i dolazi do pucanja čaše što prikazuje slika 36.



Slika 36. Čaša razbijena zvukom

Što se tiče same problematike vezane uz način pucanja vinskih čaša, ne pucaju sve čaše jednako. Ukoliko pažljivo zarežemo staklo čaše pomoću noža za rezanje stakla i provedemo pokus, čaša će brže puknuti i rasuti se u krupnije dijelove. Odlučimo li ipak izvesti pokus sa nezarezanom čašom, ona će se rasuti u sitnije dijelove te će biti potrebno više vremena da se razbije.

8.4. Zašto smo u pokusu koristili stroboskop?

Pokus se može izvesti i bez uporabe stroboskopa te se možemo zapitati zbog čega smo ga zapravo koristili te što je to stroboskop?

Stroboskop je uređaj za mjerenje frekvencije te omogućava da se objekti u vrlo brzom periodičnom gibanju promatraju kao da miruju ili da se vrlo polagano gibaju. Samim time moguće je odrediti frekvenciju periodičnog gibanja. Najjednostavniji stroboskop je rotirajuća ploča s rupama kroz koje se promatra gibanje objekta. Suvremeni električni stroboskopi daju isprekidani snop svjetla u pravilnim razmacima te tako obasjavaju objekt koji se periodično giba. Ukoliko svjetlo uvijek obasjava objekt kada se nalazi na istome mjestu kružne putanje, promatraču se čini da objekt miruje. [11]

Pomoću stroboskopa namjestili smo frekvenciju približno jednaku frekvenciji staklene čaše kako bi što bolje prikazali vibracije (titranja) čaše. Već je ranije rečeno da su titranja kod čaša kupljenih u trgovačkom centru na sredini čaše te ih je teško primijetiti. Kod čaša tipa „vintage“ mogli smo zamijetiti titranja (vibracije) na vrhu, odnosno rubu čaše. Zbog korištenja stroboskopa te vibracije su bile još ljepše prikazane i bilo ih je lakše uočiti golim okom i snimiti kamerom.

9. METODIČKA OBRADA

Nastavna jedinica „Zvuk i ultrazvuk“ obrađuje se u trećem razredu gimnazije. U nastavku se nalazi priprema za izvođenje navedene nastavne jedinice. Na uvodnom satu učenici se upoznaju s pojmom zvuka i ultrazvuka te glavnim karakteristikama, a na satu koji slijedi učenici će rješavati zadatke vezane uz obrađenu nastavnu jedinicu.

PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVNOG SATA

ZVUK I ULTRAZVUK

KANDIDAT: Valentina Predrevac

ŠKOLA:

MJESTO: Osijek

ŠK: GOD:

RAZRED: 3.

NASTAVNI PREDMET: Fizika

NASTAVNA CJELINA: Valovi

NASTAVNA JEDINICA: Zvuk i ultrazvuk

I. Sadržajni plan

1. Podjela nastavne cjeline na jedinice:

Valovi

- Valno gibanje
- Transverzalni val
- Longitudinalni val
- Harmonijski val
- Brzina vala
- Faza vala
- Interferencija valova
- Refleksija valova
- Stojni val
- **Zvuk**
- **Ultrazvuk**
- Udarni val i Dopplerov učinak
- Elektromagnetski valovi
- Od radiovalova do gama-zraka
- Ponavljanje i utvrđivanje gradiva
- Ispit znanja
- Analiza ispita znanja

OČEKIVANA POSTIGNUĆA UČENIKA I NJIHOVO VRJEDNOVANJE

Cilj nastavne jedinice:

Opisati nastanak zvuka te definirati ključne pojmove vezane uz nastavnu jedinicu.

Ključni pojmovi:

zvuk, zvučni val, intenzitet (jakost) zvuka, prag čujnosti, razina jakosti zvuka, ultrazvuk, infrazvuk, snaga izvora, frekvencija, Hz, longitudinalni val, decibel, dB

Obrazovna (spoznajna) postignuća:

Učenik će moći:

- opisati nastanak zvuka
- definirati jakost zvuka
- definirati razinu jakosti zvuka
- razlikovati ultrazvuk i infrazvuk

Funkcionalna (psihomotorička) postignuća :

Učenik će moći:

- napisati relaciju za jakost zvuka
- napisati relaciju za razinu jakosti zvuka

Odgojna (afektivna) postignuća (vrijednosti, stavovi, navike) :

Učenik će:

- razvijati sistematičnost i samostalnost rada
- prihvaćati tuđe mišljenje
- isticati važnost fizikalnih koncepata u svakodnevnom životu

Način provjere postignuća:

- postavljanjem pitanja i razgovorom tijekom sata
- praćenjem aktivnosti učenika tijekom sata
- rješavanjem numeričkih zadataka

Učenička postignuća za učenike po prilagođenom programu:

Učenik će moći:

- definirati ključne pojmove iz nastavne jedinice
- navesti oznaku i osnovnu mjernu jedinicu za jakost zvuka
- navesti oznaku i osnovnu mjernu jedinicu za razinu intenziteta zvuka
- primijeniti ključne pojmove prilikom ponavljanja gradiva na jednostavnim zadacima

Način provjere postignuća za učenike po prilagođenom programu:

Praćenjem rada i sudjelovanja učenika tijekom cijelog nastavnog sata (praćenjem aktivnosti učenika) i poticanjem na rad.

ORGANIZACIJA NASTAVNOG SATA

<i>Etape nastavnog procesa</i>	<i>Sadržaj</i>	<i>Oblici nastave:</i>	<i>Metode i postupci</i>	<i>Vrijeme</i>
<i>Uvodni dio</i>	<p>Postavljanjem pitanja motivirati učenike za rad.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ponavljanje ključnih pojmova potrebnih za razumijevanje gradiva 	Frontalni oblik	Metoda razgovora i rasprava	3 min
<i>Središnji dio</i>	<p>SADRŽAJ:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Izvesti demonstracijski pokus sa glazbenom vilicom • Objasniti učenicima nastanak zvuka • Prikazati video-demonstracijski pokus zvučne rezonancije kao uvod u pojmove vezane uz zvuk • Upoznati učenike s ključnim pojmovima vezanim uz zvuk (zvučni val, jakost zvuka, prag čujnosti, razina jakosti zvuka, ultrazvuk, infrazvuk, snaga izvora, decibel, dB) • Iznošenje zanimljivosti povezanih s gradivom koje se obrađuje 	Frontalni oblik, Individualni rad	Usmeno izlaganje, metoda pisanja, metoda crtanja, metoda razgovora, metoda demonstracije	37 min
<i>Završni dio</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ponavljanje ključnih pojmova obrađenih na satu pomoću pitanja za ponavljanje • Rješavanje zbirke zadataka ukoliko ostane vremena do kraja sata 	Frontalni oblik, individualni rad	Metoda razgovora, metoda rada na tekstu, metoda pisanja	5 min

Tip nastavnog sata: obrada novog gradiva

Oblici rada:	Nastavne metode:	Nastavna sredstva i pomagala:	Korelacija s ostalim predmetima:
<ul style="list-style-type: none">• frontalni• individualni	<ul style="list-style-type: none">• metoda crtanja• metoda pisanja• metoda razgovora• metoda usmenog izlaganja• metoda demonstracije• metoda rada na tekstu	<ul style="list-style-type: none">• računalo• projektor• projekcijsko platno• ploča• kreda• spužva• bilježnice• pribor za pisanje• glazbena vilica• batić	<ul style="list-style-type: none">• biologija• matematika• glazbena kultura

Literatura za učitelja:

- D. Horvat, D. Hrupec – Fizika 3 – Pojmovi i koncepti – udžbenik s multimedijским sadržajem za 3. razred gimnazija, Neodidacta, Zagreb, 2013.
- D. Horvat, D. Hrupec – Fizika 3 – Pojmovi i koncepti – zbirka zadataka za 3. razred gimnazija, Neodidacta, Zagreb, 2013.
- Rudolf Krsnik: Suvremene ideje u metodici nastave fizike, Školska knjiga, Zagreb, 2008.

Literatura za učenike:

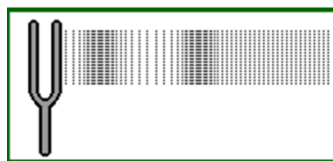
- D. Horvat, D. Hrupec – Fizika 3 – Pojmovi i koncepti – udžbenik s multimedijским sadržajem za 3. razred gimnazija, Neodidacta, Zagreb, 2013.
- D. Horvat, D. Hrupec – Fizika 3 – Pojmovi i koncepti – zbirka zadataka za 3. razred gimnazija, Neodidacta, Zagreb, 2013.

Središnji dio sata:

- Izvodim demonstracijski pokus i postavljam pitanje učenicima
 - Batićem ću udariti o glazbenu vilicu
 - Što mi sada čujemo?
 - Može li mi netko opisati ovaj pokus i kako mi zapravo čujemo?
- Crtam skicu pokusa na ploču
 - Molim vas nacrtajte pokus, napišite pribor koji smo koristili za izvođenje pokusa te ćemo zajedno opisati pokus



- Žica glazbenog instrumenta koja titra prenosi svoje titranje na okolni zrak. Isto radi i titrajuća membrana zvučnika ili titrajuća glazbena vilica kao u našem pokusu.
- Što se događa sa zrakom oko glazbene vilice kada ona zatitra? Prikazujem animaciju na projekcijskom platnu.



- Dobro ste to zaključili, ali sada ćemo detaljnije pojasniti.
 - Kad se tijekom titranja vilica pomakne iz ravnotežnog položaja udesno, tada se na desnoj strani kratkotrajno stvori područje zgusnutog zraka (područje veće gustoće i tlaka), a na lijevoj strani se kratkotrajno stvori područje razrijeđenog zraka (područje

- Kada ste udarili o glazbenu vilicu mi smo čuli zvuk
- Pokušavaju opisati pokus i odgovoriti na postavljeno pitanje

- Precrtavaju s ploče

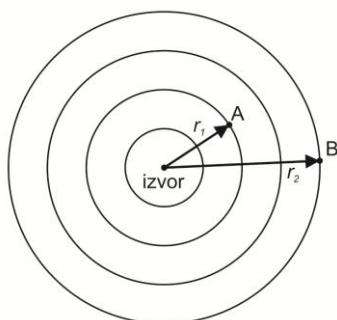
- Slušaju što profesorica objašnjava

- Zrak se zgusne i razrijedi

- Razmišljaju i slušaju što im profesorica govori

<p>manje gustoće i tlaka).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lokalna područja zraka ponašaju se kao oscilatori. Zgušnjavanja i razrjeđenja putuju kroz zrak na isti način kao zgušnjavanja i razrjeđenja opruge. <ul style="list-style-type: none"> ○ Sjećate li se pokusa s oprugom koji smo izvodili kada smo radili valove? • Možemo li reći da je zrak elastično sredstvo? • Tako je! I zrak je elastično sredstvo. Već smo ranije spominjali i definirali longitudinalni val, a danas na početku sata smo to i ponovili. • Ako se longitudinalno titranje zraka širi određenom frekvencijom možemo ga zamijeniti osjetom sluha i tu pojavu nazivamo zvukom. Frekvencije zvučnih valova na koje je osjetljivo ljudsko uho kreću se u rasponu od 20 Hz do 20 000 Hz. • Postavljam pitanje učenicima: <ul style="list-style-type: none"> ○ Kroz što se sve može širiti zvuk? ○ Kakve su brzine širenja zvučnih valova u određenim sredstvima? • Tablica približnih brzina zvuka u različitim sredstvima se nalazi u udžbeniku. • Možemo definirati zvučni val. Zvučni val je longitudinalni mehanički val (za širenje mu je potrebno sredstvo) frekvencije od 20 Hz do 20 000 Hz. • Prikazati video- demonstracijski pokus zvučne rezonancije kao uvod u pojmove vezane uz zvuk i reći učenicima da razmisle te na kraju videa iznesu ideje i pojmove vezane uz zvuk • Nakon što ste naveli vrlo bitne pojmove utvrdimo što je to snaga izvora, jakost zvuka, razina jakosti zvuka, prag čujnosti... • Zvučni valovi prenose energiju kao i ostale vrste valova. Energiju koju izvor zvuka emitira u jedinici vremena je snaga izvora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Da! • Možemo! • Zrak, vodu, željezo, kamen • Brzine su različite zbog različitih gustoća tih sredstava. • Slušaju što profesorica govori te zapisuju definiciju u svoje bilježnice. • Gledaju video i iznose svoje ideje i pojmove vezane uz zvuk
--	--

- Kada čujemo zvuk slabije, a kada jače?
- Prikazujem i pojašnjavam sliku na projekcijskom platnu



- Promatrati ćemo točkasti izvor zvuka radi jednostavnosti.
- Postavljam pitanje učenicima:
 - Kako se zvuk širi iz točkastog izvora?
 - Zašto slušatelj B čuje slabiji zvuk od slušatelja A?
 - U redu! Drugi razlog je opadanje jakosti zvuka (atenuacija ili prigušenje).
 - Kako bismo definirali jakost zvuka?
- Za točkasti izvor u prostoru jakost zvuka na udaljenosti r jednaka je omjeru snage izvora i površine kugle polumjera r ; $I = \frac{P}{4r^2\pi}$ (relaciju pišem na ploču)
 - Kako opada jakost zvuka?
- Ukoliko uzmemo u obzir i atenuaciju tada je jakost zvuka: $I = \frac{P}{4r^2\pi} e^{-kr}$ (relaciju pišem na ploču), gdje je k koeficijent prigušenja.
- Sada kada smo odgonetnuli formulu za jakost zvuka, pojasniti ćemo što je prag čujnosti i razina jakosti zvuka.
 - Zna li netko reći što bi to bio prag čujnosti?
- Prag čujnosti definiramo kao: $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ (zapisujem na ploču)
- Prag čujnosti ovisi o frekvenciji. Gornja vrijednost definirana je za frekvenciju od 1 000 Hz.
- Zvuk koji već uzrokuje bol u ušima ima jakost od oko 1 Wm^{-2} . Još jači

- Slabije čujemo zvuk kada smo udaljeniji od izvora zvuka

- Slušaju što im profesorica govori; precrtavaju sliku s projekcijskog platna
- Zvuk se širi jednako na sve strane pa slušatelji koji su jednako udaljeni čuju zvuk iste jakosti
- Zato što se u B slučaju ista snaga rasporedila na veću površinu.

- Snaga izvora zvuka po jedinici površine; $I = \frac{P}{S}$

- Jakost zvuka opada s kvadratom udaljenosti
- Zapisuju relacije u svoje bilježnice

- Prag čujnosti je najslabiji zvuk koji može čuti tek malen broj ljudi osjetljiva sluha.

- Slušaju što profesorica govori

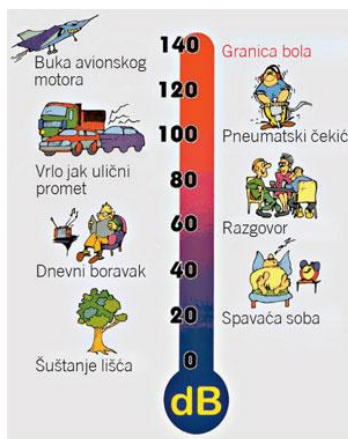
zvuk može izazvati trajno oštećenje sluha.

- Zbog velikog raspona jakosti zvukova, uvedena je još jedna jedinica, odnosno razina jakosti zvuka, koju označavamo s L . Ona je razmjerna logaritmu jakosti zvuka:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (relaciju zapisujem na}$$

ploču)

- Zna li netko u čemu se mjeri razina jakosti zvuka?
- Dobro! Koja je oznaka decibela?
- Prikazujem i pojašnjavam sliku na projekcijskom platnu.



- Ima li netko ideju što bi bio ultrazvuk?
- Kako smo definirali zvuk?
- Što mislite je li ultrazvuk longitudinalni mehanički val frekvencije ispod 20 Hz ili longitudinalni mehanički val frekvencije iznad 20 000 Hz?
- Bravo! Kako bismo onda nazvali longitudinalni mehanički val frekvencije ispod 20 Hz?
- Longitudinalni mehanički val frekvencije ispod 20 Hz nazivamo infrazvukom. Međutim naše uho (ljudsko uho) nije osjetljivo na infrazvuk ni na ultrazvuk.
 - Jesu li uši nekih životinja osjetljive na infrazvuk ili

- U decibelima
- dB
- Promatraju sliku na projekcijskom platnu i razmišljaju.

- Razmišljaju i iznose svoje ideje
- Zvuk smo definirali kao longitudinalni mehanički val frekvencije od 20 Hz do 20 000 Hz
- Ultrazvuk je longitudinalni mehanički val frekvencije iznad 20 000 Hz.
- Razmišljaju i iznose svoje ideje
- Vjerujemo da jesu kada ste nam

ultrazvuk?

- Potresni valovi su valovi niskih frekvencija pa tako neke životinje „predosjećaju“ potres – čuju infrazvuk potresa koji dođe kroz Zemljinu unutrašnjost prije nego površinski valovi potresa.

- Nakon teorijskog dijela (obrade) slijede neke zanimljivosti vezane uz ultrazvuk. Prikazujem zanimljivosti na projekcijskom platnu.

Zanimljivosti 1/2

Uz pomoć ultrazvuka šišmiši mogu letjeti i loviti u mraku. Oni ispuštaju zvukove vrlo visoke frekvencije, iznad 20 000 Hz pa čak do 100 000 Hz, koji se odbijaju od prepreka i vraćaju narag k njima. Na istom principu radi radar (uređaj kojim se pomoću radiovalova određuje udaljenost ili brzina dalekih objekata). Osim šišmiša, ultrazvuk čuju psi, mačke, miševi, ribe, dupini, kitovi i noćni leptiri.



Zanimljivosti 2/2

Mali prijenosni sonar (uređaj koji emitira ultrazvuk te ga detektira kad se odbije od objekta), mogu nabaviti ribolovci i koristiti ga za traženje ribe. Pomoću sonara je moguće precizno utvrditi dubinu i konfiguraciju dna te pratiti položaje i kretanje riba.



Završni dio:

- Pomoću pitanja za ponavljanje dobiva od učenika povratnu informaciju o tome koliko su toga na satu zapamtili
- Govori učenicima da rješavaju zbirku zadataka ukoliko bude vremena

postavili takvo pitanje

- Razmišljaju i slušaju što profesoricu govori

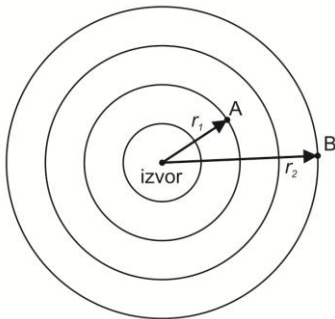
- Razmišljaju i odgovaraju na postavljena pitanja
- Ukoliko ostane vremena do kraja sata počinju rješavati zbirku zadataka

Plan ploče – učenikove bilježnice

ZVUK I ULTRAZVUK



Zvučni val je longitudinalni mehanički val (za širenje mu je potrebno sredstvo) frekvencije od 20 Hz do 20 000 Hz.



Jakost zvuka: $I = \frac{P}{S}$

Jakost zvuka za točkasti izvor u prostoru na udaljenosti r: $I = \frac{P}{4r^2\pi}$


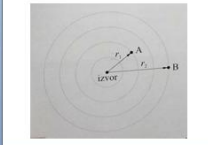


Ukoliko se u obzir uzme i atenuacija, tada je jakost zvuka: $I = \frac{P}{4r^2\pi} e^{-kr}$

Prag čujnosti: $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$

Razina jakosti zvuka: $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$

DODATAK :

- Izgled projekcijskog platna

<p>ZVUK I ULTRAZVUK</p>				<p>Zanimljivosti 1/2</p> <p>Uz pomoć ultrazvuka šišmiši mogu letjeti i loviti u mraku. Oni ispuštaju zvukove vrlo visoke frekvencije, između 20 000 Hz pa čak do 100 000 Hz, koje odbijaju od prepreka i vraćaju natrag k njima. Na osnovi principu radi radar uređaj kojim se pomoću radiovalova određuje udaljenost ili brzina dalekih objekata. Osim šišmiša, ultrazvuk čuju psi, mačke, miševi, ribe, dugini, kitovi i noćni leptiri.</p>
<p>Zanimljivosti 2/2</p> <p>Mali prijenosni sonar (uređaj koji emitira ultrazvuk te ga detektira kad se odbije od objekta), mogu nabaviti ribolovci i koristiti ga za traženje riba. Pomoću sonara je moguće precizno utvrditi dubinu i konfiguraciju dna te pratiti položaje i kretanje riba.</p> 	<p>Pitanja za ponavljanje</p> <ul style="list-style-type: none">• Raspon frekvencija na koje je ljudsko uho osjetljivo.• Što je zvučni val?• Koje formule za jakost zvuka poznajete?• Kako definiramo prag čujnosti?• Definiraj rasnu jakost zvuka i koja je njezina mjerna jedinica?• Definiraj infrazvuk i ultrazvuk.	<p>Hvala na pozornosti!</p>		

10. ZAKLJUČAK

Pomoću osjetila sluha mi primamo različite osjete koje nazivamo zvukom. Kako bismo čuli zvuk, između našeg uha te izvora zvuka mora postojati neki medij koji će prenijeti titranje i mi ćemo na taj način čuti zvuk. Zvuk definiramo kao longitudinalni mehanički val (za širenje mu je potrebno sredstvo) u rasponu frekvencija od 20 Hz do 20 000 Hz. Ukoliko zvuk natjera neki predmet da počne titrati u svojoj prirodnoj frekvenciji, titraji će se preklapati i pribrojavati te stvoriti veću amplitudu. Ovu pojavu nazivamo rezonancijom, a može čak razbiti predmet.

Različiti video zapisi koje se odnose na razbijanje čaše pomoću zvuka bili su ključna motivacija za odabir teme diplomskog rada. U početku mi se činilo nemogućim razbiti čašu rabeći zvučnik određenih specifikacija. Nakon razgovora s komentorom te u konačnici s mentorom, utvrđena je tema ovoga rada te se krenulo u potragu za odgovarajućim zvučnikom koji je vrlo bitna komponenta za postizanje zacrtanog cilja – razbijanje staklene čaše. Najviše vremena utrošeno je upravo na pronalazak zvučnika, ali i dobavljača koji nam je mogao isporučiti isti u kratkom vremenskom roku. Usprkos svemu navedenom, trud i muka su se „isplatili“ jer smo vrlo zadovoljni s radom zvučnika. Prilikom traženja staklenih čaša potrebnih za izvođenje pokusa, shvatila sam kako nama ljudima naizgled nebitne karakteristike čaša zapravo igraju veliku ulogu za postizanje pozitivnog ishoda pokusa. Demonstracijski pokus smo u konačnici snimili te se video zapisi mogu koristiti prilikom obrade nastavne jedinice „Zvuk i ultrazvuk“ u trećem razredu gimnazija. Isto tako video zapise mogu iskoristiti i predavači na fakultetima kao uvod u akustiku te na taj način motivirati studente za rad. Predavači na Odjelu za fiziku u Osijeku sada imaju mogućnost umjesto prikazivanja video zapisa studentima izvesti pokus. Snimljeni video zapisi mogu se postaviti i u bazu videa Odjela za fiziku.

Prilikom pisanja diplomskog rada shvatila sam da čovjek treba biti vrlo strpljiv i motiviran kako bi u konačnici postigao svoje zacrtane ciljeve, kako u obrazovnom smislu tako i u različitim životnim situacijama.

11. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI	
Ime i prezime:	VALENTINA PREDREVAC
Adresa-prebivalište:	Vukovarska 60, 33523 Čađavica
Datum i mjesto rođenja:	19.05.1993., Virovitica
OBRAZOVANJE	
2000. - 2008.	Osnovna škola „Davorin Trstenjak“, Čađavica
2008. - 2012.	SŠ „Marka Marulića“, Slatina (opća gimnazija)
2012. - 2015.	Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku u Osijeku
2015. - 2018.	Diplomski studij fizika i informatika (nastavnički smjer) na Odjelu za fiziku u Osijeku
AKTIVNOSTI	
<p>Članica sam KUD-a „Podravina“ Čađavica već šestu godinu. Isto tako član sam Nadzornog odbora KUD-a. Prisustvujem probama, sastancima te nastupima u Hrvatskoj, ali i izvan nje.</p> <p>U slobodno vrijeme izrađujem kutijice i boce rabeći tehniku dekupaž. Dekupaž je tehnika oslikavanja predmeta pomoću salveta. Kako su mi za dekupaž potrebne salvete, paralelno time bavim se i sakupljanjem istih.</p>	

12. LITERATURA

[1] B&C Speakers: HF Drivers, DE1050

URL: <http://www.bcspeakers.com/en/products/hf-driver/archive/de1050> (20.3.2018.)

[2] Bendelja, D., Culjak, Đ., Lukša, Ž., Operta, E., Orešković, E., Roščak, R., Biologija 8, udžbenik biologije u osmom razredu osnovne škole, Zagreb, Školska knjiga, 2014.

[3] Čulum, Ž., Đurić B., FIZIKA II DEO: Talasno kretanje, zvuk i toplota, Beograd, Naučna knjiga, 1967.

[4] Element: Akustični signali

URL: <https://element.hr/artikli/file/1605> (14.11.2017.)

[5] Environmental Protection Department: Characteristics of Sound and the Decibel Scale

URL: http://www.epd.gov.hk/epd/noise_education/web/ENG_EPD_HTML/m1/intro_5.html (13.11.2017.)

[6] Faktopedija.// Ilustrirana enciklopedija, Zagreb, Mozaik knjiga, 2001.

[7] FANE ACOUSTICS

URL: <https://www.fane-acoustics.com/> (17.5.2017.)

[8] Gajić, S., Gabela, N., Vrcelj, A., Eksperimentalni zadaci iz fizike za osnovnu i srednje škole, Sarajevo, Svjetlost, 1974.

[9] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fundamentals of Physics, John Wiley & Sons, Inc.

[10] Horvat., D., Hrupec. D., Fizika 3 – Pojmovi i koncepti – udžbenik s multimedijским sadržajem za 3. razred gimnazija, Zagreb, Neodidacta, 2013.

[11] Hrvatska enciklopedija: Stroboskop

URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58430>

[12] Hrvatska enciklopedija: Uho

URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63037> (21.11.2017.)

[13] Jelaković, T. Zvuk, sluh, arhitektonska akustika, Zagreb, Školska knjiga

[14] Keyword Suggest, Image Gallery: Sound Wavelength

URL:

https://www.google.hr/search?q=sound&tbm=isch&tbs=rimg:CcjI_1777zsTYIjpp5b1Vo3yBUx1-FueOgH4ZahSpAw9HNyHJU_1VZnEuv3rQYx3guXfViwQhsbyX1c4MH05-0wgO8AioSCenlvVWjflFTEWJK8rm4S9aXKhIJHX4W546AfhkRYkryubhL1pcqEglqFKkDD0c3IREm8W_1gqJgBeCoSCclT9VmcS6_1eEQeo_1Kj5r3F_1KhIJtBjHeC5d9WIRRD_1Ilo7ECT0qEgnBCGxvJfVzgxEQ8kZAFpse3yoSCQfTn7TCA7wCEaCk57pSZ5RP&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwiyqabK7cXZAhVHZFAKHdUYCAoQ9C96BAgAEBg&biw=1366&bih=662&dpr=1#imgrc=B9OftMIDvALnZM: (14.11.2017.)

[15] Labor, J. Fizika 3 – udžbenik za treći razred gimnazije, Zagreb, Alfa, 2014.

[16] Martinis, Vujnović, Paar. Fizika-Valovi i čestice, Svezak A i B, Zagreb, Školska knjiga, 1986.

[17] Nacrtano u programu Corel prema referenci [9]

[18] Nacrtano u programu Corel prema referenci [23]

[19] Nacrtano u programu Corel prema referenci [6]

[20] Nastavni materijali za Praktikum iz eksperimentalne nastave fizike

[21] National Geographic Srbija: Kako operски pevači mogu da razbiju staklo svojim glasom?

URL: <http://www.nationalgeographic.rs/vesti/8750-kako-razbiti-staklo-zvukom.html>

[22] Papertrell: Waves-Resonance, How can resonance cause crystal glasses to break?

URL:

https://www.google.hr/search?q=breaking+glass+sound&tbm=isch&tbs=rimg:Cb9w5EhKkUnB IjhGfv3l6ykndPRPldvbJZi6b7T6EqZaHoZy-I1XEBRSTEZZamwhsV7yLrS8krotInRLP7Q_1f2k32CoSCUZ-1eXrKSd0EUxFfMVKaC8FKhIJ9E-V29slmLoR0iGTgaiL6UAqEglvtPoSploehhEW_11jyx2Y7VSoSCXL4jVcQFFJMEeQqAYdiGlIIKhIJRllqbCGxXvIR7jP_11Qb_1k0YqEgkutLySui0idBFX0Nwdpi7FKCoSCUs_1tD9_1aTfYE X1kwpulThVT&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwixi4m98sXZAhVLmbQKHWaDCusQ9C96BAgAEBk&biw=1366&bih=662&dpr=1#imgrc=v3DkSEqRScFZaM: (21.11.2017.)

[23] Planinić, J., Osnove fizike 3, Filozofski fakultet - Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, 2005.

[24] Prva tehnička škola Tesla: Valovi i zvuk

URL:

http://www.ss-prva-tehnicka-tesla-zg.skole.hr/uploads/media/vecernja/upload26012016/Valovi_i_zvuk_intro.pdf (14.11.2017.)

[25] Strojarski fakultet Slavonski Brod

URL: http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3_2.pdf (21.11.2017.)

[26] Struna, Hrvatsko strukovno nazivlje

URL: <http://struna.ihjj.hr/> (14.11.2017.)

[27] Špac, V., Bakač, M. Život i škola: Nastava fizike u osnovnoj i srednjoj školi. God.37., 1988., 79-81.

[28] The Physics Classroom: The Human Ear

URL: <http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-2/The-Human-Ear> (21.11.2017.)

[29] Turist plus, portal za turizam, gospodarstvo i kulturu življenja: Tajne stakla-obično staklo, kristalin i kristal

URL:http://www.turistplus.hr/hr/tajne_stakla_obicno_staklo_kristalin_i_kristal/3811/3
(26.3.2018.)

[30] University of Salford Manchester: Breaking glasses using sound, continued

URL: http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/glass/?content=glass2 (17.5.2017.)

[31] University of Salford Manchester: Breaking glass sound?

URL: http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/glass/?content=index (17.5.2017.)

[32] University of Salford Manchester: The best way for breaking glass with sound

URL: http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/glass/?content=glass3 (17.5.2017.)

[33] Vernić-Mikuličić. Vježbe iz fizike, Zagreb, Školska knjiga, 1991.

[34] WebstaurantStore: Types of Wine Glasses

URL: <https://www.webstaurantstore.com/guide/580/types-of-wine-glasses.html> (20.3.2018.)

[35] Wine Folly: What Types of Wine Glasses Do You Really Need?

URL: <http://winefolly.com/tutorial/types-of-wine-glasses/> (20.3.2018.)

[36] YouTube: Breaking a glass with sound in slow motion-Dara O Briain's Science Club-BBC

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=bJj4Wjff0WI> (18.5.2017.)

[37] YouTube: Razbijanje čaše zvukom-Hrvoje Mesić

URL: https://www.youtube.com/watch?v=zDiA0uNC_AY (18.5.2017.)