OSNOVNA ŠOLA ORMOŽ

Znanje | Varnost | Odgovornost | Ustvarjalnost

TARTINIJEVI TONI

PODROČJE: FIZIKA

RAZISKOVALNA NALOGA

Avtor:

Matic Petek

Mentor:

Roman Bobnarič, prof.

Ormož, marec 2017

ZAHVALA

Za pomoč pri raziskovalni nalogi se zahvaljujem mentorju Romanu Bobnariču, prof. fizike, ki mi je rad priskočil na pomoč. Pomagal mi je pri spoznavanju raziskovalnega procesa, me spodbujal in mi pomagal rešiti probleme, ki so nastajali pri razumevanju teorije kakor tudi razumevanju poskusov. Učiteljici Slavici Šajnović, predm. učit., se zahvaljujem za lektoriranje raziskovalne naloge, učiteljici Mariji Cvetko, predm. učit., pa se zahvaljujem za lektoriranje prevoda povzetka v angleščino.

Zahvaljujem se tudi Gimnaziji Ormož, kjer so mi omogočili uporabo merilne tehnike, s katero sem lahko opravil praktično delo raziskovanja.

KAZALO VSEBINE

KAZALO SLIK

KAZALO TABEL

KAZALO ENAČB

POVZETEK

V glasbi se uporabljajo glasbila, ki jih je potrebno prilagajati, da z njimi lahko igramo kot solo instrumente, v dvojicah ali v večjih skupinah – treba jih je uglasiti. Uglaševanje se lahko izvaja na več načinov – eden od načinov je uglaševanje s pomočjo kombinacijskih tonov, za katere velja, da jih je odkril Giuseppe Tartini leta 1714.

V literaturi se velikokrat navaja, da je uporaba teh kombinacijskih tonov zahtevna za uglaševanje. V raziskovalni nalogi je z uporabo fizikalnih meritev razloženo več lastnosti zvoka, ki so temelj za razumevanje teh tonov in njihovo uporabo. Hkrati so razložene metode in poskusi, s katerimi so ti toni tudi izmerjeni. Z uporabo tonov iz kitarskih strun pri različnih frekvencah in merilne tehnike je razloženo, kako in kdaj se ti toni pojavijo. Na primeru pa tudi prikazano, kako jih lahko uporabimo.

ABSTRACT

In music, musical instruments are used, but they have to be adjusted, so solo, two or even more musicians can play together – the instruments must be tuned. Tuning instruments can be achieved in many different ways – one of them is using combination tones for which is said that were discovered by Giuseppe Tartini in 1714.

It is often said in literature, that using these tones is very demanding and hard for tuning different instruments. In this paper there are several properties of sound that have been measured and are considered as a base of understanding combination tones and using them for tuning. At the same time methods and experiments for measuring them are also explained. By using different sounds from guitar strings at different frequencies and measuring techniques, it is explained how and when these tones apear. And in certain cases it is shown how we use these tones.

1. UVOD

Glasba je od začetka pojma »biti človek« pomemben del človeške kulture.

Med svojim učenjem glasbenih instrumentov in teorije sem naletel na spodnji zapis, ki me je pritegnil in sem o njem želel izvedeti več, ker si članka [1] nisem znal razložiti. Zato sem o tem povprašal učitelja glasbe in učitelja fizike. Na podlagi pogovora sem nato pričel z raziskovanjem kot fizik, kar mi je v the dveh letih postalo izziv.

"Leta 1744. je objavil nemški organist Georg Andreas Sorge kratko poročilo, da je slišal pri istočasnem zvenenju čiste kvinte c2g2 še tretji ton c1; žal ni bila njegova objava takrat deležna skoraj nobene pozornosti. Kasneje sta objavila isto Jean-Baptiste Romieu in piranski violinist Giuseppe Tartini. Iz tega skopega podatka bi bilo moč sklepati, da je resnični odkritelj diferenčnih tonov Sorge, kar je tudi največkrat navedeno v ustrezni strokovni literaturi. V resnici pa je odkritju diferenčnih tonov posvetil največjo pozornost ravno Tartini in se je zanje marsikje tudi udomačilo ime Tartinijevi."[1]

Z raziskovalno nalogo sem želel proučiti Tartinijeve tone kot zvoke s fizikalnega stališča in kot zvoke, ki so jih v preteklosti poskušali uporabljati kot uglaševalske pripomočke. Tartini je s pomočjo teh tonov uglaševal violine. Ker se ti toni pojavljajo precej šibkeje kot osnovni toni, jih je veliko težje zaznavati [1].

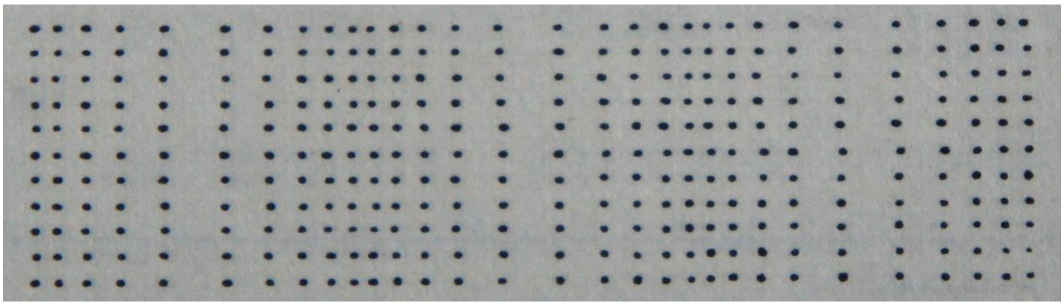
Pri tem sem uporabljal računalniško merilno tehniko (merilni vmesnik Vernier) in z različnimi pristopi iskal Tartinijeve tone. Ko se je posrečilo, tega z mentorjem sploh nisva opazila, ker ob poskusu nisva izvajala spektralne analize, da bi rezultat takoj imela pri roki. Šele pozneje sva pri analizi ugotovila, da sva tak ton že našla.

Zanimivo bi bilo poskusiti uglaševati glasbila s metodo Tartinijevih tonov.

2. TEORETIČNI DEL

2.1 Zvok

Enakomerno ponavljajoče se gibanje predmeta imenujemo nihanje. Ko se to nihanje začne širiti po tekočinah (npr. zraku) ali drugih telesih, to povzroči valovanje.



Slika 1: Razredčine in zgoščine v zraku med valovanjem predstavljajo zvok.

Vsako nihanje ima svojo jakost (amplitudo) ter nihajni čas (frekvenco). Amplituda je točka, kjer je predmet v nihanju najbolj oddaljen od točke mirovanja(ravnovesne točke), s frekvenco pa je označen čas, ki ga nihajoči predmet potrebuje, da se vrne nazaj na točko, v kateri je bil v prejšnjem nihaju. Frekvenco merimo v hercih (Hz), ki označujejo kolikokrat na sekundo predmet opravi celoten nihaj. Manjše enote so centi, vsak cent predstavlja 1/100 herca.

Med zvok štejemo frekvence valovanja med 20 Hz in 20000 Hz, ker je to povprečen slišni razpon človeka. Zvok nastane zaradi razredčin in zgoščin v zraku, ki jih povzročijo nihala. Po različnih snoveh se širi različno hitro. Poznamo več vrst zvoka.

- Ton je določen z amplitudo in frekvenco, upodobimo ga v obliki sinusoide[1].
- Zven je ton s harmonijami dodatnih tonov z večkratnki frekvenc osnovnega tona.
- Šum ni enakomerno valovanje, ampak le zvok s stalno spreminjajočo se amplitudo in frekvenco, ki mu ne moremo določiti neke tipične frekvence.

2.1.1 Nihala

Predmete, ki nihajo, imenujemo nihala. Glede na to, na kakšen način nihajo poznamo različna nihala.

Nihalo z idealnimi pogoji brez motenj je matematično nihalo. To nihalo je sestavljeno iz točkastega telesa, v katerem je vsa masa in iz nitke brez prostornine ali mase, ki je na enem koncu vpeta. Ni nobenih sil, ki bi zavirale nihalo, niha le zaradi sile težnosti.

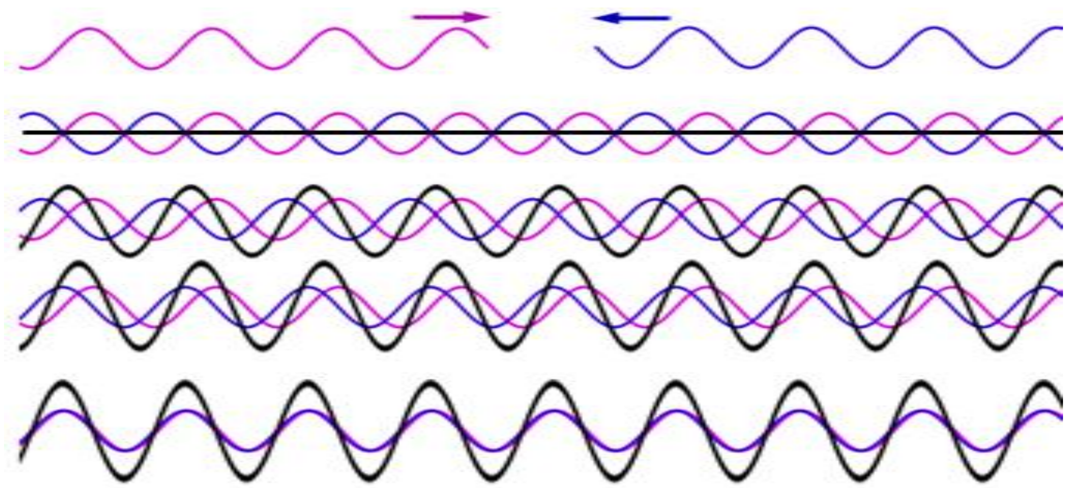
Težno nihalo pa je nihalo v resničnem svetu, saj ima tudi nitka maso, gibanje pa zavira upor zraka in trenje na mestu, kjer je nitka vpeta. Imenujemo ga tudi fizično nihalo.

Vzmetno nihalo je sestavljeno iz vzmeti (ene ali več) ter telesa, ki je na to vzmet pritrjeno. Masa in raztezni koeficient vzmeti določata, kako bo nihalo nihalo.

[1] Sinusoida – matematična krivulja – gl. slovar pojmov – 1.

2.1.1.1 Struna

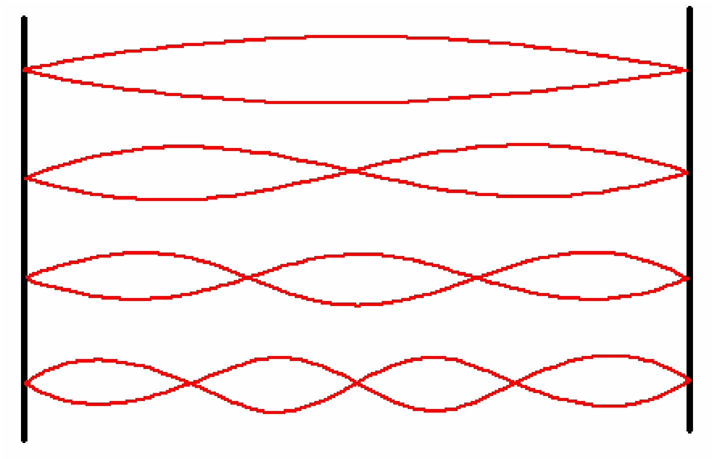
Vpeta vrv ali struna je elastična vrv, ki je vpeta na obeh straneh. Čim krajša, tanjša in bolj napeta je struna, tem višja je frekvenca. Ko na struno zabrenkamo, se valovanje začne širiti v obe smeri, in ko oba vala dosežeta vpeta konca strune, se valovanje na obeh koncih odbije. Ti odbiti valovanji se na nekem mestu na struni srečata [Slika 2] in pride do seštevanja valov. Ker je struna enake oblike kot val, bo primer lažje opisan na primeru valov. Če se srečata iz ene strani del vala z amplitudo +1 in z druge strani del vala z amplitudo -1, se bosta vala izničila in nastala amplituda bo 0 – destruktivno seštevanje valov. Če pa se srečata del vala z amplitudo +1 in drugi val prav tako z amplitudo +1, pa se bosta seštela in novonastala amplituda bo +2 – konstruktivno seštevanje valov.



Slika 2 :Seštevanje valov na struni

Če na sliki 2 opazujemo novonastalo amplitudo (črna črta), opazimo, da izgleda kot veliko valov, ki se ne premikajo. Zato te valove imenujemo stoječi valovi. Pojavijo se tudi mesta, kjer je struna pri miru in je amplituda ničta. Tem delom pravimo vozli.

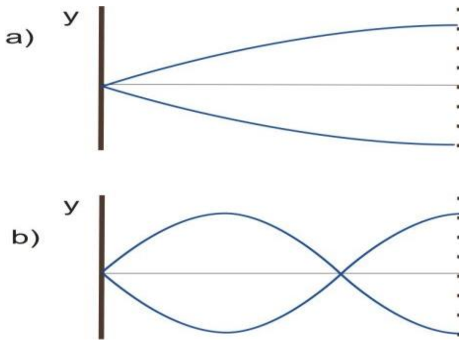
Vozli in stoječe valovanje se pojavijo le ob primeru, če struno primemo na mestu, kjer želimo, da nastane vozel in jo nato zabrenkamo. Vendar ker je na struni lahko le celo število stoječih valov, moramo struno prijeti npr. na polovici, tretjini, četrtini... Število delov razdeljenosti strune je enako večkratniku frekvence – če se vozel pojavi na sredini strune, je frekvenca dvokratna, če na tretjini, je trikratna itd. .



Slika 3: Struna z vozli

2.1.1.2 Jeziček

Jeziček je podolgovata ploščica, ki je na eni strani vpeta. Deluje na podobnem principu kot struna, zato tudi tvori vozle, vendar je zaradi vpetosti na eni strani vedno vozel, na nevpetem koncu vedno vrh in nikoli vozel.

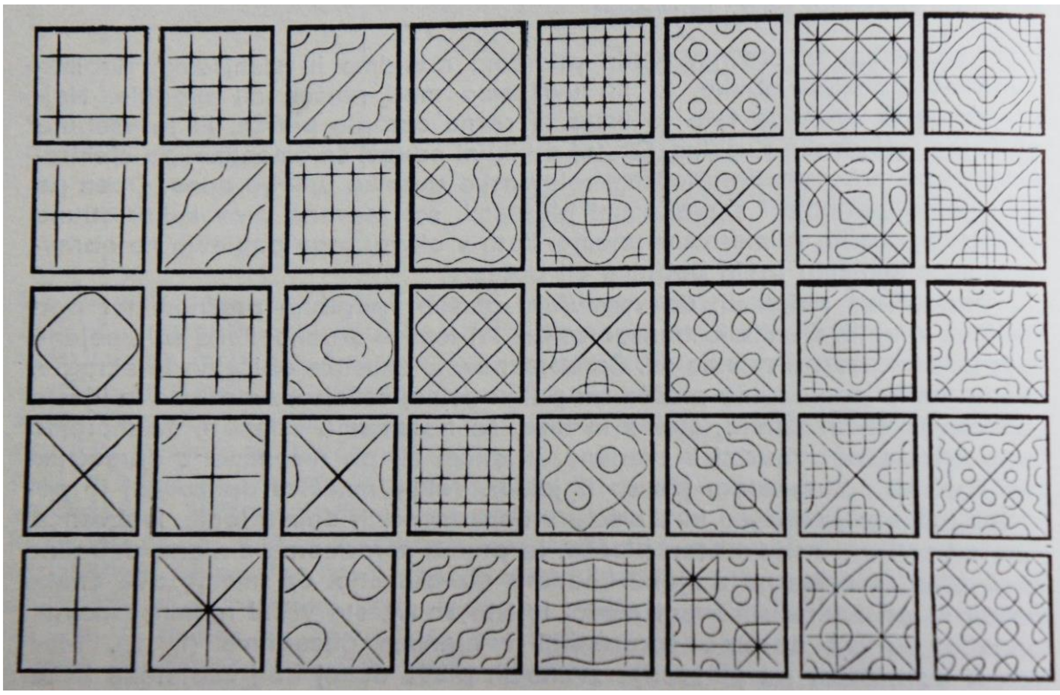


Slika 4: Jeziček z vozli

2.1.1.3 Chlandijeve figure

Če na kovinsko ploščo posujemo pesek ali sol in potem na njo zaigramo z violinskim lokom ali pa v njo vsiljujemo prave fekvence, bodo na teh ploščah nastali vozli (ker so to črte, jih imenujemo vozlovke). Pesek oz. sol bo na mestih plošče, kjer plošča miruje (vozlovke), ostal raje kot na mestih, kjer plošča niha – na vozlovkah miruje.

Ploščo pripravimo do tega, da nastanejo vozli na drugih mestih tako, da se na nekem mestu plošče dotaknemo s prstom in tistemu delu preprečimo nihanje, potem pa ploščo potegnemo z violinskim lokom. Lahko pa poiščemo ustrezne frekvence in jih vsiljujemo v ploščo še kako drugače (zvočniki, nihalo…).

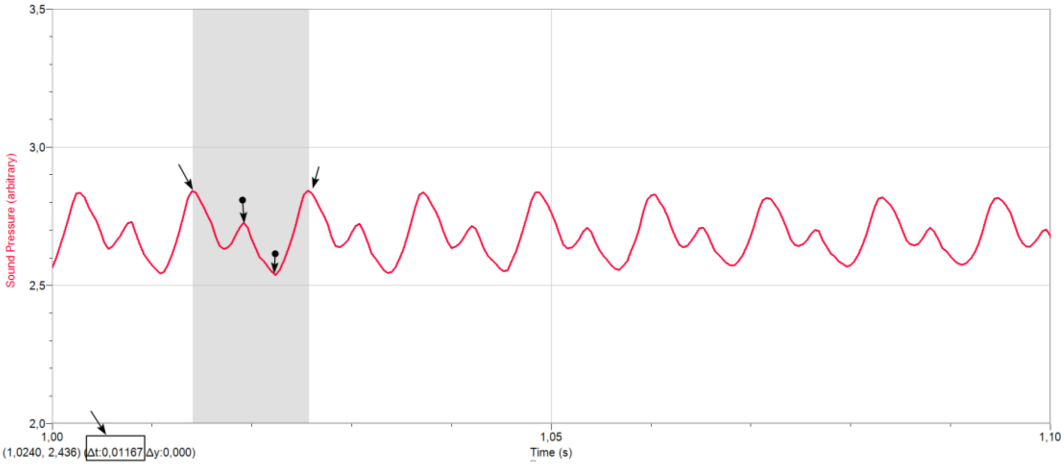


Slika 5: Chlandijeve figure

Na sliki 5 so Chlandijeve figure, ki jih dobimo ob vsiljevanju pravih frekvenc, ki so lastne frekvence plošče. Z dotikom oz. prijemom na določenem mestu se spremeni razporeditev vozlovk.

2.1.2 Alikvote

Vsaka struna, jeziček, membrana ali druga nihala lahko vibrirjo z večimi frekvencami, odvisno od vozlov na le-tem. V glasbi se takemu tonu reče alikvota ali pa pri strunskih inštrumentih flažolet. Velikokrat ko mislimo, da slišimo en ton, v resnici slišimo osnovni ton z njegovimi alikvotami.



Slika 6: Meritev zvoka strune E z alikvoto e

Ob zaigrani struni E na kitari slišimo ton E in oktavo višji ton e.

1. d. t.: c^1 = 261 Hz; A = 29	7. d. t.: b^3 = 1831 Hz; A = 6
2. d. t.: c^2 = 523 Hz; A = 7	8. d. t.: c^4 = 2093 Hz; A = 8
3. d. t.: g^2 = 783 Hz; A = 20	9. d. t.: d^4 = 2350 Hz; A = 16
4. d. t.: c^3 = 1046 Hz; A = 1	10. d. t.: e^4 = 2637 Hz; A = 9
5. d. t.: e^3 = 1308 Hz; A = 2	11. d. t.: fis^4 = 2960 Hz; A = 30
6. d. t.: g^3 = 1568 Hz; A = 6	12. d. t.: g^4 = 3135 Hz; A = 35

Slika 7: Ob zaigranem tonu c1 slišni toni na klarinetu

Na sliki 7 so prikazani slišani toni ob zaigranem tonu c1 na klarinetu (A so njihove amplitude). Barva zvoka nekega instrumenta je v veliki meri odvisna os razmerja amplitud alikvot.

Če postavimo struno, uglašeno na neko frekvenco pred zvočnik, ki proizvaja frekvenco enako eni izmed alikvot frekvence tiste strune, bo tudi struna začela vibrirati z isto frekvenco. Temu pravimo, da sta zvočnik in struna v resonanci.

2.1.3 Glasbila

Zvok je med živimi bitji uporabljen kot eno izmed orodij sporazumevanja. Ptiči, nekatere druge živali in sesalci smo v ta namen razvili organe za proizvajanje zvoka. Sesalci imamo glasilke. To sta dve opni, ki vibrirata ob vsiljevanju zraka skozi nje, ko sta zaprti. Z napenjanjem in krčenjem lahko ustvarimo različne frekvence.

Glasbila se delijo v skupine, glede na to, kako ustvarijo zvok.

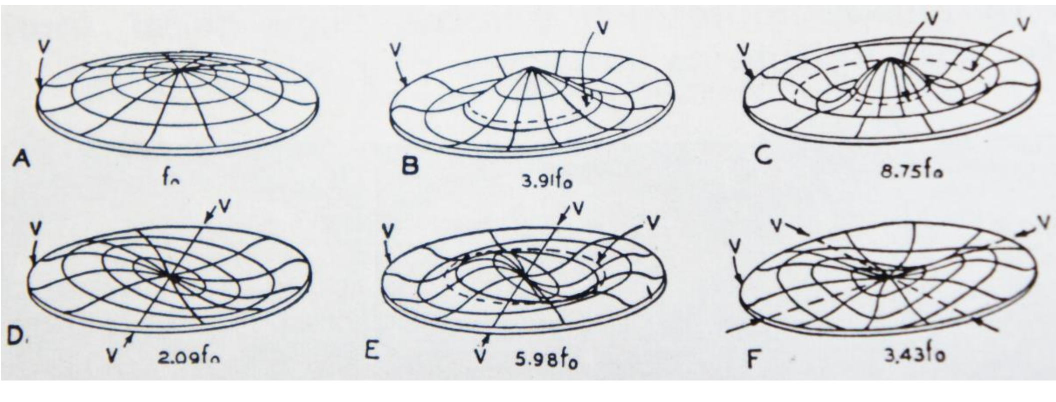
Pri kordofonih je vzrok nastanka zvoka tresoča struna. V to skupino spadajo godala, brenkala, klavir, čembalo in njegovi sorodniki (klavikord, virginal, spinet). Na strunah se lahko pojavijo vozli.

Aerofoni so glasbila, pri katerih zvok nastane zaradi zračnega stebra. To je prostor med luknjo, v katero pihamo ali trobimo in odprto luknjo, ki bi jo drugače pokrili s prstom (pri kljunasti flavti je to prostor med labiumom in odprto luknjico). Zrak med tema dvema luknjicama začne tvoriti zgoščine in razredčine (gl. Slika 1).

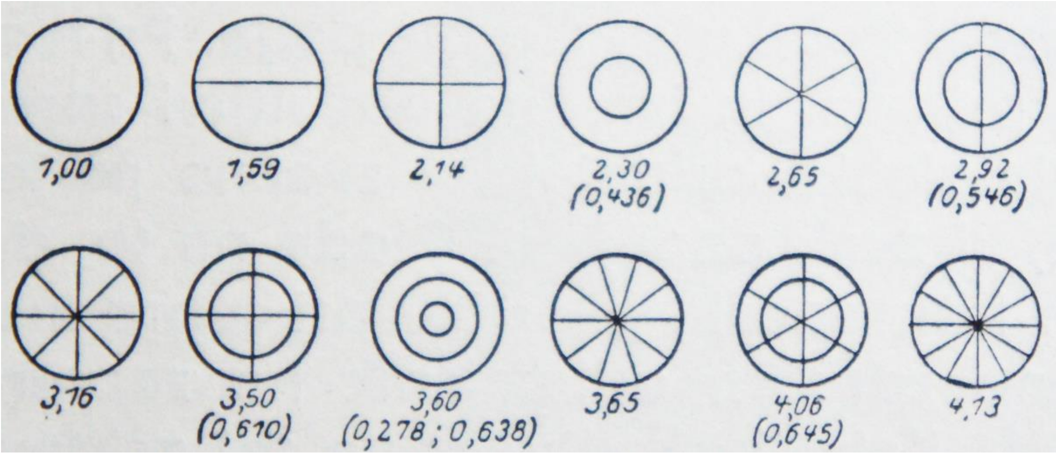
Tudi pri aerofonih brez jezičkov (flavte in kljunaste flavte) se lahko zaradi preforsiranja zraka v inštrument tvorijo "vozli". Takrat nastanejo nekakšni tridimenzionalni vozli.

Pri aerofonih z enojnimi in dvojnimi jezički (klarineti in saksofoni ter oboe in fagoti), pa se vozli tvorijo na jezičku in v cevi.

Pri membranofonih vibrira opna na podobnem principu kot struna, vendar v dveh dimanzijah po celotni površini opne. Prav tako lahko nastanejo vozlovke (gl. Chlandijeve figure). Med njih spadajo bobni (mali in veliki boben, tom tomi, pavke…).



Slika 8: Načini nihanja opne glede na različne načine vpetosti



Slika 9: Vozlovke pri membrani

Vozlovke pri membrani (pod vsako shemo je frekvenca membrane relativna glede na frekvenco na membrani brez vozlovk).

Idiofoni so inštrumenti, pri katerih zvok ustvarja material, iz katerega so narejeni.

Pri činelah zvok nastane podobno kot pri opni bobna, saj se činela ob robu hitro zvija in nastajajo valovi. Tudi tukaj se tvorijo vozli.

Pri palčkah pa se valovanje prenaša enako kot pri aerofonih, vendar namesto po zraku po lesenem telesu.

2.1.4 Delovanje ušesa

Uhelj zbere valovanje in zvok pošlje po sluhovodu. Ker je sluhovod na koncu zapečaten z bobničem, bobnič zaniha, nekolikšen del valovanja pa se odbije nazaj in ob srečanju z drugimi zvoki te lahko ojača. Evolucija je poskrbela, da so najbolj ojačani zvoki zvoki govorjenja – zvoki alikvot govorjenja, ki jih zato lahko med samo zelo dobro ločimo. Nekateri zvoki pa so ravno zaradi tega tudi zelo nadležni - npr. škripanje table.

Ko bobnič zaniha, to nihanje prenese na kladivce, ki potem udarja po nakovalcu v frekvenci, ki je enaka frekvenci zvoka. Nakovalce te tresljaje prenese na stremence, ki je pritrjeno na membrano polžka. Ta membrana je od 15 do 30-krat manjša od bobniča, zato se zvok še bolj ojača.

2.2 Tartinijevi toni

Tartinijev ton je tretji ton, ki ga slišimo ob sozvočno zaigranih dveh enako glasnih tonih, ki nimata enakih frekvenc.

2.2.1 Zgodovina

Tega fizikalnega pojava niso prvi raziskovali fiziki, temveč baročni in klasicistični glasbeniki. Čeprav je pojav bil opazovan že prej, je bil prvi, ki je trdil, da je ob dveh glasno zaigranih tonih slišal še tretjega, Georg Sorge, nemški organist in skladatelj leta 1740.

Francoski skladatelj Jean Baptiste Romieu pa je leta 1749 raziskoval, zakaj ima tisti ton, ki ga slišimo, točno določeno frekvenco glede na prejšnja dva tona.

Nato je leta 1754 slovensko-italijanski skladatelj Giuseppe Tartini prišel do enakega zaključka ob sočasnem igranju dveh strun na violini. Trdil je, da naj bi to opazoval že od leta 1714.

Kljub vsem, ki so pojav opazovali, je zaradi svoje poznanosti večino zaslug za odkritje tonov prevzel Tartini.

Ker fizika takrat še ni raziskovala zvoka, so pojav raziskovali le glasbeniki, v prejšnjih dveh stoletjih pa so fiziki in drugi znanstveniki začeli odkrivati zapise teh glasbenikov in se posvetili fizikalnim ali drugačnim razlagam pojava.

Verjetno najbolj obsežno raziskovanje o tem je naredil nemški fizik Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, ko je v svoji knjigi "Nauk o tonskih občutkih" Tartinijevim tonom posvetil preko 150 strani.

Slika 10: (levo) Hermann von Helmholtz (1821 – 1894) in (desno) Giuseppe Tartini (1692 – 1770)

2.2.2 Fizikalna razlaga Tartinijevih tonov

Tartinijev ton nastane zaradi odštevanja in seštevanja tonov.

Zvok je le spreminjanje zračnega pritiska skoz čas. Ker sta frekvenci različni, zgoščine in razredčine ne sovpadajo vedno enako. Ko je ob obeh frekvencah pritisk visok, nastane še večji pritisk, ko pa je ob eni frekvenci pritisk visok, ob drugi pa nizek, se izničita in zvok je tišji (enako kot pri seštevanju valov pri stoječem valovanju). To slišimo kot utripanje – spreminjanje glasnosti. Frekvenca tega utripanja je enaka razliki prvih dveh frekvenc. Ko razlika naraste, to utripanje zaznamo kot lasten ton, ki ga imenujemo Tartinijev ton oz. diferenčni ton.

Alikvote osnovnega tona pri govoru, zvoku inštrumentov ali drugih zvokih pripomorejo k ojačitvi le-tega, saj je ob dveh alikvotah njun Tartinijev ton največkrat prav osnovni ton. Ameriška telefonska družba Bell je v 20. st. izvedla poskus in je izdala dve vrsti gramofonskih plošč. Na obeh je bil posnetek govornika, pevca, orgel in nekaterih drugih inštrumentov. Posnetek na prvi plošči je bil pravi, na drugi pa so z akustično napravo odstranili vse osnovne tone, a pustili alikvote. Kljub temu med njima ni bilo opaziti razlike, saj je uho ob kombiniranju alikvot spet ustvarilo osnovni ton.

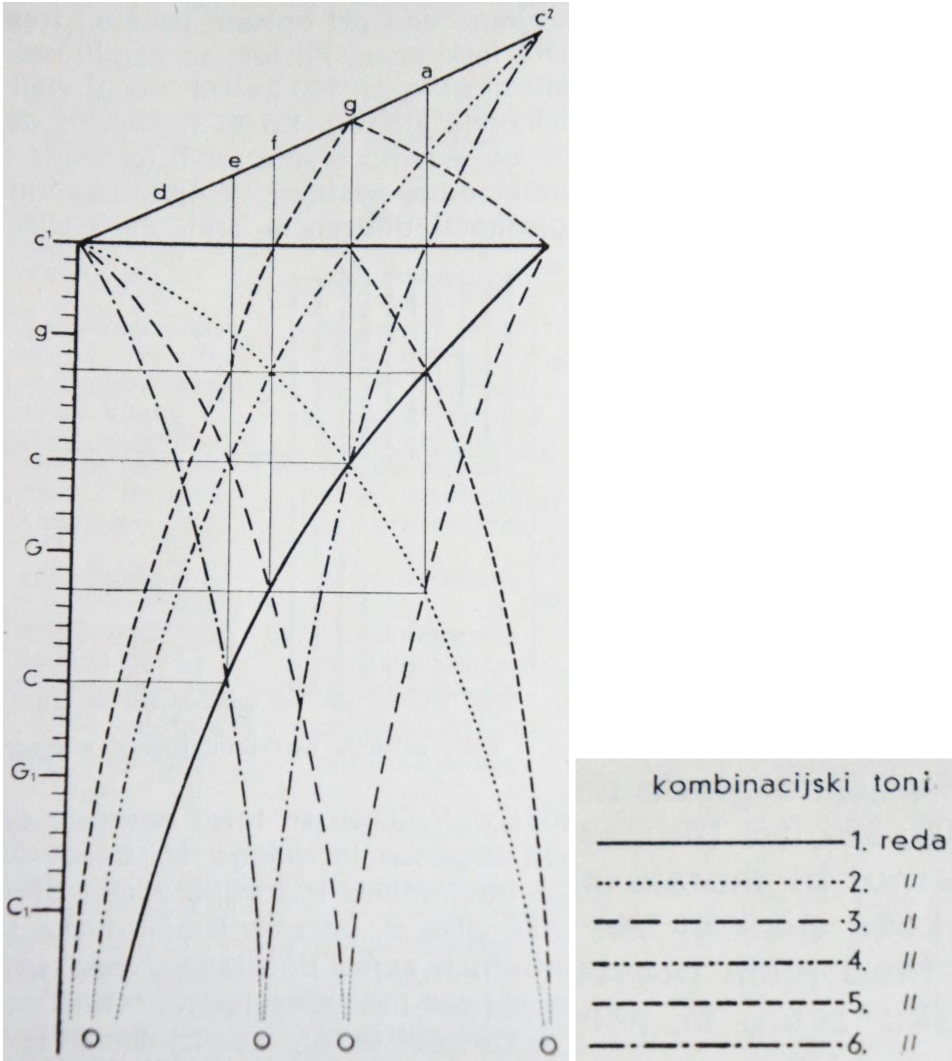
Če bi ves zvok bil linearen (torej bi graf zvoka bil sinusoida), bi nastali le diferenčni toni. Vendar je v resničnem svetu zaradi vseh motenj nihal in sprejemnikov zvoka zvok drugačen – popačen. Področje akustike, ki se ukvarja s takšnimi pojavi, se imenuje nelinearna akustika.

Če zvočnik z majhno membrano proizvaja zelo glasen ton s frekvenco 1000Hz, zaradi preforsiranja zvočnika in posledično nelinearnega zvoka dobimo tudi frekvence 2000HHz, 3000Hz, 4000Hz, 5000Hz... (kot alikvote pri inštrumentih). Če ta zvočnik zelo glasno proizvaja dva tona, pa bomo poleg diferenčnega tona dobili tudi vse sledeče frekvence:

$$mf_1 \pm nf_2$$

Enačba 1: Frekvence, ki jih dobimo ob sočasnem proizvajanju dveh frekvenc v nelinearni akustiki

V zgornji enačbi sta m in n celi števili.



Slika 11: Nastali kombinacijski toni

Nastali kombinacijski toni, če sta m in n spremenljivki (nanašujoč na enačbo 1) (1. red – m=1, n=1; 2. red – m=2, n=1; 3. red – m=3, n=2; 4.red – m=2, n=2; 5. red (v literaturi ni zapisa o m in npri tej stopnji), 6. red – m=4, n=3)

Slika 12: Notirani Tartinijevi toni

V notnem črtovju so napisani kombinacijski toni različnih redov (njihova notna vrednost[2] predstavlja njihovo glasnost – manjša, kot je notna vrednost, tišji je zvok).

[2] Notna vrednost – dolžina tona –gl. slovar pojmov 2.

2.3 Uglasitve[3]

Danes poznamo dve uglasitvi , od katerih se uporablja le temperirana uglasitev, pitagorejska uglasitev pa je le znana in se uporablja zelo redko. Razlika med njima so razmerja med frekvencami v različnih intervalih[4]. Do obdobja baroka so glasbeniki svoja glasbila uglaševali po pitagorejskem tonskem sistemu. Ta je bil zasnovan na fizikalnem ozadju.

2.3.1 Pitagorejska uglasitev

Tabela 1: Razmerja frekvenc pri intervalih

RAZMERJE MED FREKVENCAMA	INTERVAL
$1/1$	čista prima
$2/1$	oktava
$3/2$	čista kvinta
$4/3$	čista kvarta
$5/4$	velika terca
$6/5$	mala terca
$9/8$	velika sekunda
$16/15$	mala sekunda

Iz te tabele pitaorejskega uglaševanja izvemo, da če hočemo uglasiti dve struni v čisto kvarto (npr. c1-f1), mora biti 4. alikvota c1 strune enaka 3. alikvoti f1 strune. Za veliko sekundo (npr. f1-g1) bi morali uskladti 9. alikvoto f1 strune z 8. alikvoto g1 strune.

Ko te tone igramo na eni struni ali uglašujemo le dve struni, je vse uglašeno. Vendar za klavir, ali zgodovinsko gledano čembalo ali klavikord, potrebujemo 88 različnih tonov. Predvidimo, da imamo dan ton a1 (440Hz), iz katerega bomo izhajali. Do tona a2 lahko pridemo na mnogo različnih načinov. Vsi so teoretično pravilni, vendar da le en pravilen rezultat. Lahko ga uglasimo z oktavo in 440Hz pomnožimo z $\frac{2}{1}$, dobimo 880Hz in lepo zvenečo oktavo. Vendar, ko poskušamo a2 uglasiti s pomočjo čistih kvint, po seriji uglaševanj ne pridemo do čiste oktave.

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} \div \left(\frac{2}{1}\right)^{6} = \frac{531441}{262144} \approx 2{,}03 \neq 2$$

Enačba 2: Uglasitev oktave s pomočjo kvint

Poskus s čistimi kvartami $\left(\frac{4}{3}\right)^{12} \div \left(\frac{2}{1}\right)^{4} = \frac{16777216}{8503056} \approx 1{,}97 \neq 2$

Poskus z malimi tercami $\left(\frac{6}{5}\right)^{4} = \frac{1296}{625} \approx 2{,}07 \neq 2$

[3] Uglasitev – zaporedje tonov z enakimi dogovorjenimi frekvencami med intervali – gl. slovar pojmov 3.

[4] Interval – razdalja med dvema tonoma – gl. slovar pojmov 4.

Poskus z velikimi sekundami $\left(\frac{16}{15}\right)^{12} = \frac{281474976710656}{129746337890625} \approx 2{,}17 \neq 2$

V času pred iznajdbo temperirane uglasitve je bil pri igranju v orkestru največji iziv igrati uglašeno, saj s pitagorejsko uglasitvijo niso mogli določiti vseh dvanajstih tonov lestvice. Godala so se temu prilagajala z rahlimi premiki prstov na ubiralki, vendar pihala in trobila svojih tonov niso mogla spreminjati.

Ta uglasitev se nam lahko zdi malo tuja, saj vsi, tudi tisti ki nimajo dobrega posluha, poslušamo skladbe v temperirani uglasitvi in nam je temperirana že vpisana v možgane. Prav tako se nam lahko zdijo tuje uglasive plemenskih ljudstev ali drugih civilizacij.

2.3.2 Temperirana uglasitev

Temperirana uglasitev je uglasitev, pri kateri so razmerja med vsemi toni enaka, torej je razmereje med poltonoma $\sqrt[12]{2}$, saj je v oktavi dvanajst poltonov in če množimo $\sqrt[12]{2}$ samega s sabo 12-krat ($\left(\sqrt[12]{2}\right)^{12}$), dobimo 2, kar je res razmerje med oktavama.

Prva ideja, ki je bila povezana z dvanajstim korenom iz dva, se je že leta 1605 porodila Simonu Stevinu, matematiku z območja današnje Nizozemske. V svojem rokopisu je zapisal približne frekvence enako oddaljenih tonov, vendar so njegovo delo objavili šele leta 1884. Johann Faulhaber, nemški matematik, pa je leta 1630 uspešno objavil tabelo fekvenc tonov do centa natančno, katerih razmerja so bila $\sqrt[12]{2}$.

Glasbenikom baroka je bila ideja o matematično idealnem uglaševanju všeč, zato je to uglaševanje začelo uporabljati vse več izdelovalcev lutenj in glasbil s tipkami.

Ker so razmerja med zaporednimi toni enaka, lahko katerokoli melodijo transponiramo v katerokoli tonaliteto. To je eden najbolj znanih baročnih skladateljev, Johann Sebastian Bach, dokazal tako, da je napisal dve zbirki z naslovom Dobro uglašen klavir, v kateri so skladbe v vseh tonalitetah.

2.3.3 Tartinijevi toni v obeh uglasitvah

Če poskusimo Tartinijeve tone ustvariti v temperirani uglasitvi, to naredimo tako:

Vzamemo prvi ton a1: 440Hz

in drugi ton e1: $440Hz \times \left(\sqrt[12]{2}\right)^{7} \approx 440Hz \times 1{,}498 \approx 659{,}25Hz$.

Interval med tema tonoma je čista kvinta in iz Helmholtzovih ugotovitev o Tartinijevih tonih razberemo, da bi diferenčni ton ob teh dveh tonih moral biti a (220Hz).

Preizkus: $659{,}25Hz - 440Hz = 219{,}25Hz$ kar ni enako 220Hz. S tem smo dokazali, da Tartinijevi toni niso skladni s temperirano uglasitvijo.

Poskus s pitagorejsko uglasitvijo:

Prvi ton a1: 440Hz

in drugi ton e1: $440Hz \times \frac{3}{2} = 660Hz$.

Preizkus: $660Hz - 440Hz = 220Hz$, kar je enako frekvenci tona a (220Hz). To je dokaz, da so Tartinijevi toni skladni s pitagorejsko uglasitvijo.

3. HIPOTEZE IN METODE DELA

V naši raziskavi sem najprej določil širše zastavljena raziskovalna vprašanja:

1. Kaj so Tartinijevi toni?
2. Ali so Tartinijevi toni izmerljivi?
3. Ali jih lahko slišimo vsi ali le glasbeniki?
4. Ali so Tartinijevi toni na vseh glasbilih?
5. Kako lahko Tartinijeve tone uporabimo?

3.1 Hipoteze

Zgornja raziskovalna vprašanja so mi služila kot podlaga, na kateri sem postavil sledeče hipoteze:

H1: Tartinijevi toni so realni in jih lahko izmerimo z merilno tehniko.

H2: Tartinijevi toni nastanejo le v ušesu.

H3: Tartinijevi toni so uporabni za uglaševanje.

H4: Tartinijeve tone slišimo vsi.

3.2 Metode dela

3.2.1 Preučevanje literature

Na podlagi razgovora z mentorjem sem pričel raziskovati zvok in njegove osnovne llastnosti. Moje večletno obiskovanje glasbene šole in praktično znanje mi je pomagalo, da sem našel veliko literature in jo pravilno uporabil s pomočjo zapiskov. V veliko pomoč so mi bile knjige o glasbi, ki so last naše družine zaradi večgeneracijskega zanimanja za glasbo. Na podlagi zapiskov sem lahko pričel z eksperimentalnim delom. Zaradi pridobljenega znanja sem lahko eksperimente tudi razumel.

3.2.2 Nevihta možganov (Brainstorming)

Ob jutranjih druženjih z mentorjem sva skupaj nabrala veliko idej o obliki raziskovalne naloge in poteku eksperimentov ter njihovih opisih.

3.2.3 Eksperimentalna metoda

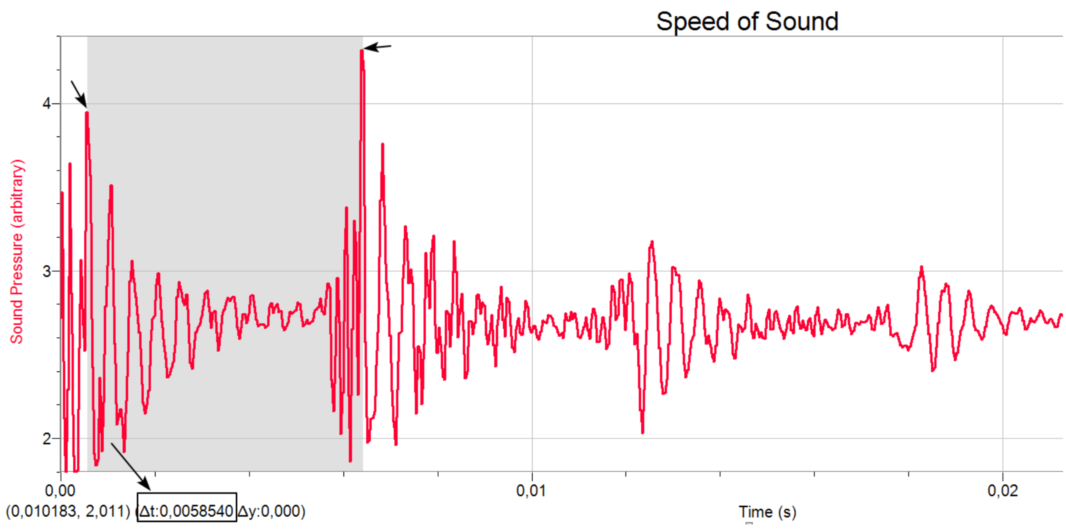
Meritve sem opravil v laboratoriju Gimnazije Ormož, kjer sem pridobil tudi merilne pripomočke. Meritve so potekale z računalnikom in merilnim vmesnikom Vernier in mikrofonom. Za zvočilo sem uporabil kitaro.

4. Praktični del

4.1 Hitrost zvoka

Slika 13: Postavitev poskusa

V laboratoriju smo pred 1 meter dolgo cev postavili mikrofon. Pred to cevjo smo z palčkama udarili in mikrofon je to zaznal (prvi vrh). Zvok je nato potoval po cevi, se na koncu odbil in spet vrnil (drugi vrh) do mikrofona, ki je vse posnel.



Slika 14: Meritev časa, ki ga zvok porabi za pot 2 metrov

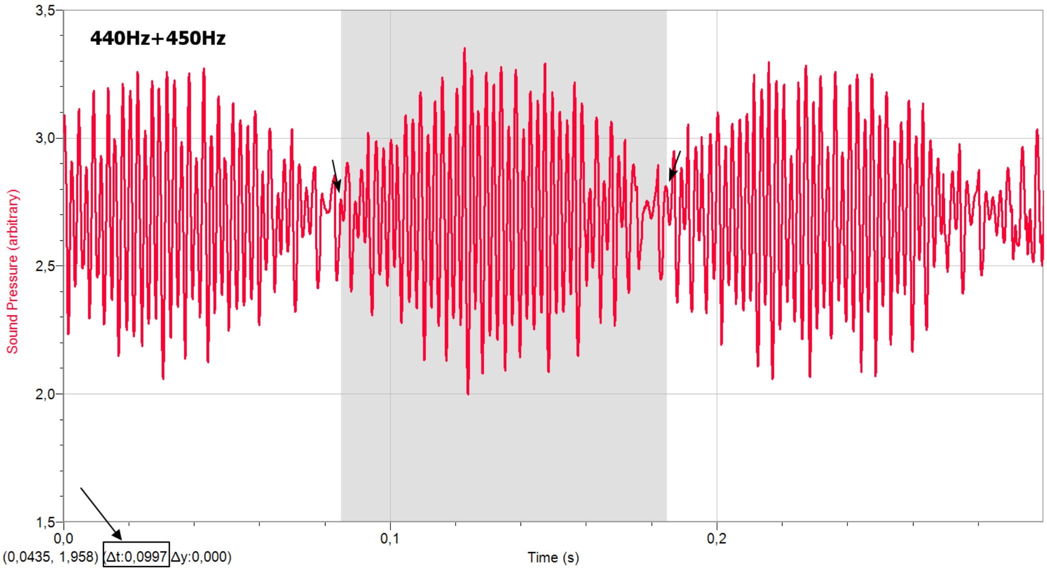
Iz časovne razlike izvemo, da je zvok v 0,005854 s prepotoval 2 metra, torej lahko izračunamo hitrost zvoka. V večkratnih ponovitvah poskusa sem ugotovil, da znaša hitrost zvoka približno 340 m/s.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2m}{0{,}005854s} \approx 341{,}6\frac{m}{s}$$

Enačba 3: Izračun hitrosti zvoka

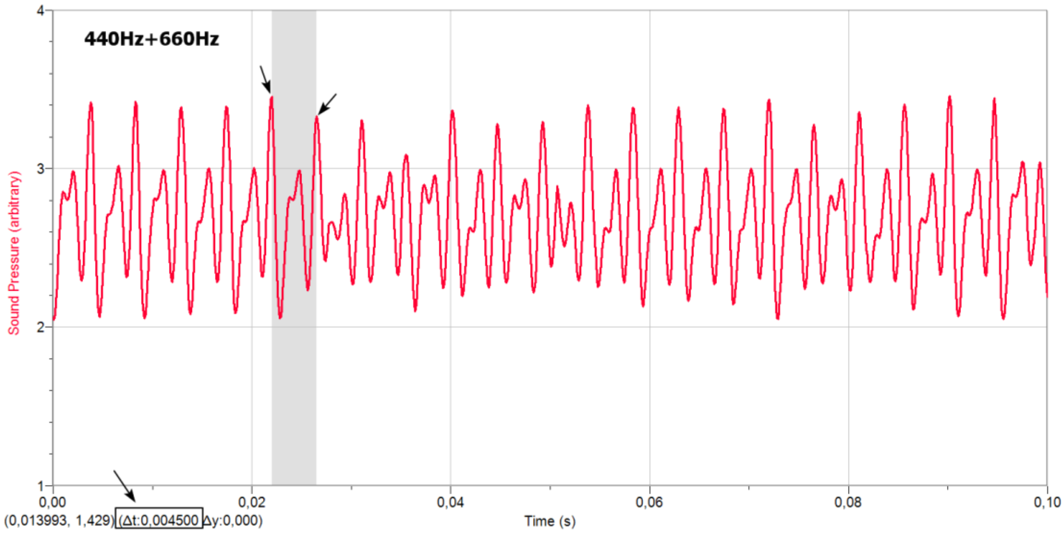
Opazimo tudi nadaljne odboje, vendar ima vsak drugi obrnjene vrhove. Ko je zvok trčil ob steno na koncu cevi, se je odbil z zgoščino (ali z razredčino), s katero je vanj trčil. Ko pa je prišel na prosti konec cevi, so se vrhovi obrnili.

4.2 Merjenje kombinacij tonov

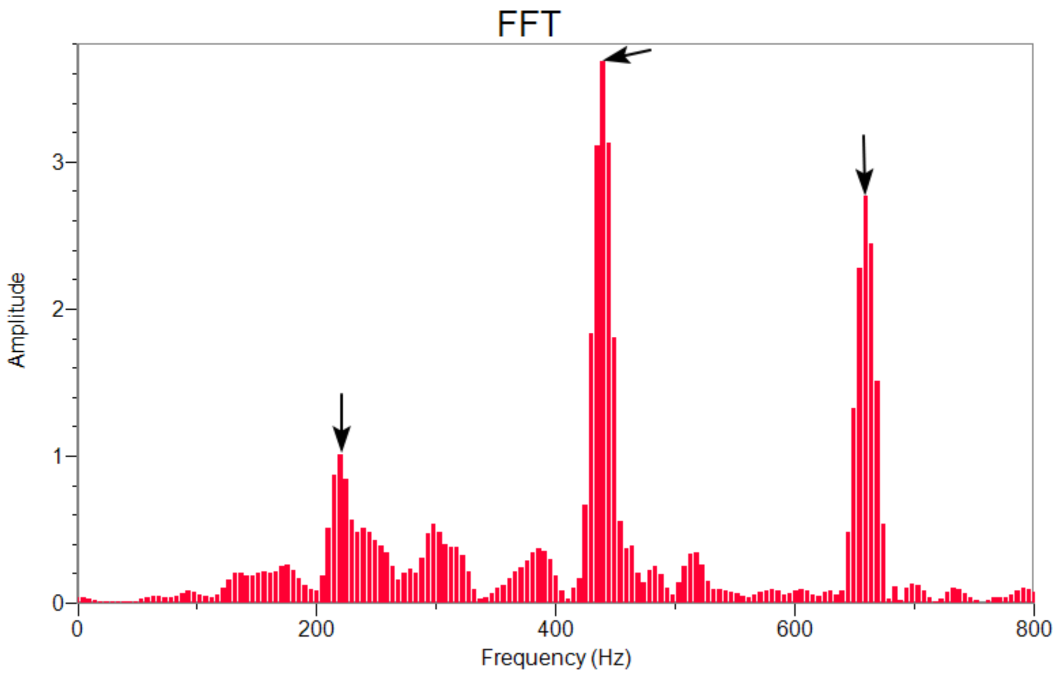


Slika 15: Meritev frekvenc 440Hz in 450Hz

Na podlagi meritve dveh bližnjih frekvenc sem ugotovil, da se na grafu zvočnega valovanja izriše utripanje.



Slika 16: Meritev frekvenc 440Hz in 660Hz



Slika 17: Spektralna analiza[5] posnetka kombiniranih tonov 440Hz in 660Hz

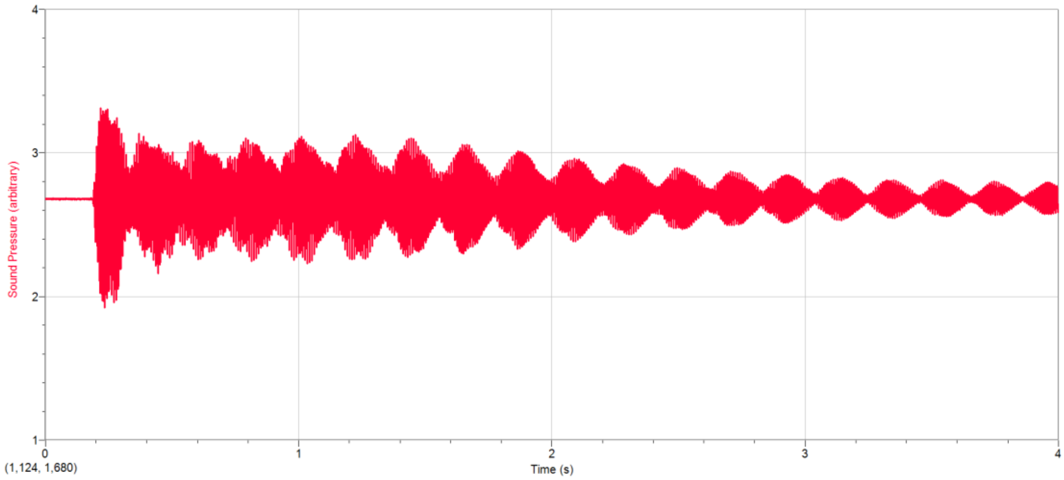
V zgornjih dveh poskusih smo merili spremembo zračnega pritiska skozi čas, torej zvok ob sočasno računalniško prozvajanima tonoma 440 Hz in 450 Hz v prvem poskusu ter 440 Hz in 660 Hz v drugem poskusu.

Pri prvi meritvi je razlika frekvenc bila 10Hz, in če je 1Hz en nihljaj na 1 sekundo, je 10Hz en udarec na 0,1 sekunde. Ob izmeru časovne razdalje med dvema podobnima vrhoma smo odkrili, da je frekvenca tretjega tona enaka razliki frekvenc prvih dveh tonov. Pri drugem poskusu je meritev 0,0045 s, kar je skoraj enako časovni razdalji nihajev ob frekvenci 220Hz (nihaj na 0,004545 s). Frekvenco 220 Hz smo odkrili pri skupni meritvi 440 Hz in 660 Hz ter jo poiskali s spektralno analizo. Rezultat je spekter[6] na sliki 17.

[5] Spektralna analiza – analiza vsebujočih frekvenc – glej slovar 5.
[6] Spekter – rezultat spektralne analize – glej slovar 6.

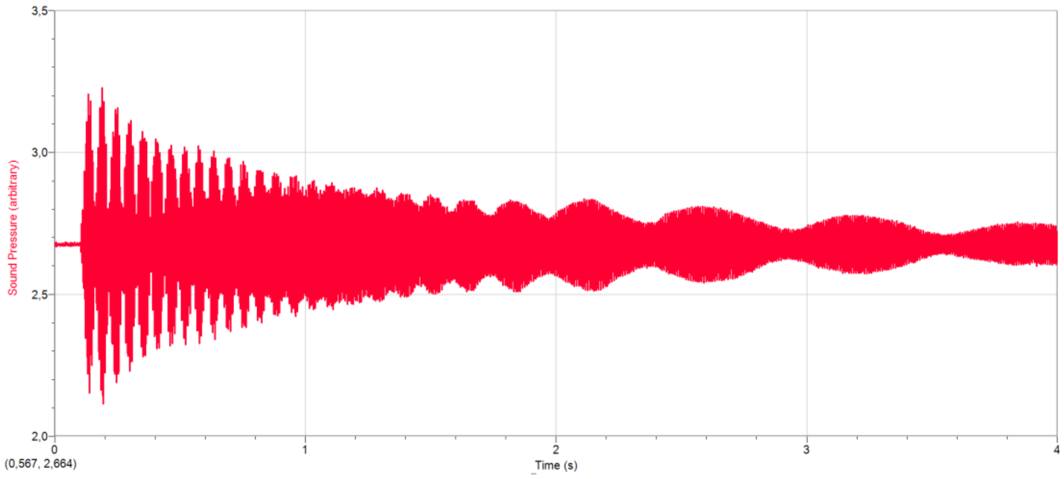
To se zgodi zaradi seštevanja valov. Graf prikazuje gostoto zraka v določenem času, ker je zvok le hitra sprememba zračnega pritiska. Ko je ob obeh frekvencah pritisk visok, nastane še večji pritisk, ko pa je ob eni frekvenci pritisk visok, ob drugi pa nizek, se izničita in zvok je tišji. To slišimo kot utripanje. Frekvenca tega utripanja je enaka razliki prvih dveh frekvenc. Ko razlika naraste, to utripanje zaznamo kot lasten ton. To je vidno kot spreminjanje glasnosti in zaradi popačenja v ušesu tudi kot dodaten ton.

Enak rezultat smo dobili ob rahlo razglašenih kitarskih strunah.

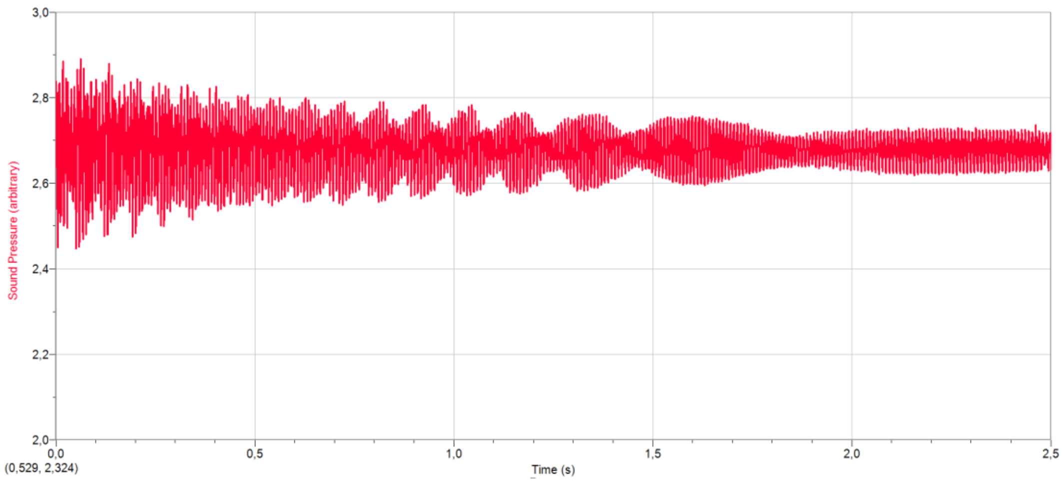


Slika 18: Meritev dveh rahlo razglašenih strun na kitari

4.2.1 Uglaševanje strun na isto frekvenco



Slika 19: Posnetek tonov dveh razlglašenih strun med uglaševanjem



Slika 20: Ponovitev poskusa uglaševanja pri drugih frekvencah

V zgornjih dveh poskusih smo dve struni rahlo razglasili, ju zabrenkali in v času merjenja drugo struno hitro uglasili na frekvenco prve. Rezultat na grafu je manjšanje razlik med frekvencama in posledično manjšanje frekvence utripanja. S tem je prikazan način, kako lahko z meritvami opazujemo spremembe v frekvencah dveh strun – bližje ko sta njuni frekvenci, daljši je čas utripanja. Zato pri uglaševanju sledimo časovnemu poteku utripanja – ko izgine, sta struni uglašeni na isto frekvenco.

4.3 Uporaba tartinijevih tonov za uglaševanje

Struno želimo uglasiti na določeno frekvenco (npr. 440 Hz). V ta namen lahko uporabimo generator tonov in struno uglasimo na več načinov.

Kot opisano v prejšnjih poglavjih lahko generator nastavimo na željeno frekvenco in struno zabrenkamo. Če je struna razglašena, bo nastalo utripanje, ko utripanje izgine, smo struno uglasili.

Namesto proizvajanja enake frekvence lahko ustvarjamo dvokratnik frekvence (oktavo). V tem primeru je to 880 Hz. Če je struna razglašena na 441 Hz, bo nastal Tartinijev ton s frekvenco 439 Hz (razlika frekvenc prvega reda). Ker bomo skupaj slišali ton strune (441 Hz) in Tartinijev ton (439 Hz), bomo slišali še utripanje s frekvenco 2Hz. Ko bo to utripanje izginilo, smo struno uglasili. To uglaševanje z dvokratno frekvenco je dvakrat natančnejše od uglaševanja z isto frekvenco, saj ima utripanje vedno dvokratno frekvenco.

Podobno lahko struno uglasimo tudi s pomočjo drugih intervalov. Recimo s kvinto. Struno želimo uglasiti na 440Hz. Najprej z generatorjem proizvedemo ton, ki predstavlja (po pitagorejski uglasitvi) kvinto prvega tona (660 Hz). Recimo, da je struna razglašena na 441Hz. Kot vsak nesinuni ton bosta tudi ta tona proizvajala alikvote. Od dvokratnika frekvence generatorja (1320 Hz) bomo odšteli dvokratnik frekvence strune (882 Hz). Dobili bomo Tartinijev ton 438 Hz. Ko bomo ta ton slišali skupaj s 441 Hz, bo nastalo utripanje s frekvenco 3 Hz. Ko utripanje izgine, je struna uglašena. Uglaševanje s kvintami, kvartami, ali s katerim manjšim intervalom pa je v praksi manj uporabno, saj smo namesto osnovnih tonov uporabili dve alikvoti, ki sta že v osnovi veliko tišji od prvih tonov, nato pa smo ustvarili še tišji Tartinijev ton, ki je na koncu komaj slišen in ga le stežka primerjamo s prvim tonom.

5. DISKUSIJA

Na podlagi opravljenih poskusov sem ugotovil, da lahko Tartinijeve tone z merilno tehniko zmerimo. S tem je hipoteza **H1 potrjena**. Sicer je veliko težje izmeriti Tartinijeve tone, ki nastanejo med alikvotami in osnovno frekvenco, ker so višje frekvence veliko šibkeje zastopane, ampak vseeno obstajajo. Vendar je temu tako zaradi popačenosti – nelinearnosti zvoka v resničnem svetu. V matematičnem svetu in z ušesi brez napak Tartinijevi toni ne bi obstajali. Zaradi nepravilnosti zvočil nastajajo alikvote in zvok, ki ga zvočilo oddaja, ni čista sinusoida. Ob dveh nesinusnih tonih nastane utripanje in prav tako svoj ton (ob matematičnem nihanju bi nastalo le utripanje). Prav tako naše uho ni popolno in utripanje ob razliki frekvenc zazna kot svojo frekvenco. S tem je hipoteza **H2 delno potrjena in delno ovržena**, saj Tartinijevi toni ne nastanejo le v ušesu, ampak je za to delno odgovorna tudi nelinearnost zvoka. Hkrati pa smo **potrdili** hipotezo **H4**, saj Tartinijevi toni nastanejo v vsakem ušesu, torej so slišni in jih lahko sliši vsak, ki lahko razlikuje frekvence.

Ali so Tartinijevi toni uporabni za uglaševanje ali ne, pa je povsem odvisno od naših želja po vrsti uglasitve. Če želimo matematično dovršeno uglasitev z enakimi razmerji frekvenc v istih intervalih, torej temperirano uglasitev, nam Tartinijevi toni ne bodo pomagali, saj z njo, kot smo dokazali, niso skladni. So pa nam v veliko pomoč, da pridemo do pitagorejske uglasitve. Na prvi pogled je ta uglasitev zaradi svoje nepravilnosti v razmerjih ob spreminjanju tonalitete neuporabna. Vendar, če imamo skladbo, ki je napisana v le eni tonaliteti in uporablja le tone tiste tonalitete, pa za boljši učinek in bolj naraven zvok zaradi svoje temeljitve na ulomkih uporabimo prav to uglasitev. Najbolj pa so uporabne, ko želimo igrati na kakšne stare instrumente, ki so izdelani le za to tonaliteo. Kot glasbenik te tone vidim še posebej uporabne pri uglaševanju koralnih lestvic. To so stare lestvice, ki temeljijo na starogrških lestvicah. Vse skladbe v teh lestvicah uporabljajo le tone tiste lestvice in zvok nekaterih lestvic je drugačen od durove in molove lestvice, ki smo ju vsi vajeni (tudi tisti, ki nimajo dobrega posluha, saj skladbe v teh lestvicah vsi poslušamo že od otroštva in so se nam vsadile v možgane). Hipotezo **H3 bi potrdil**, saj bi Tartinijeve tone uporabil v nekaterih primerih uglaševanja tudi sam.

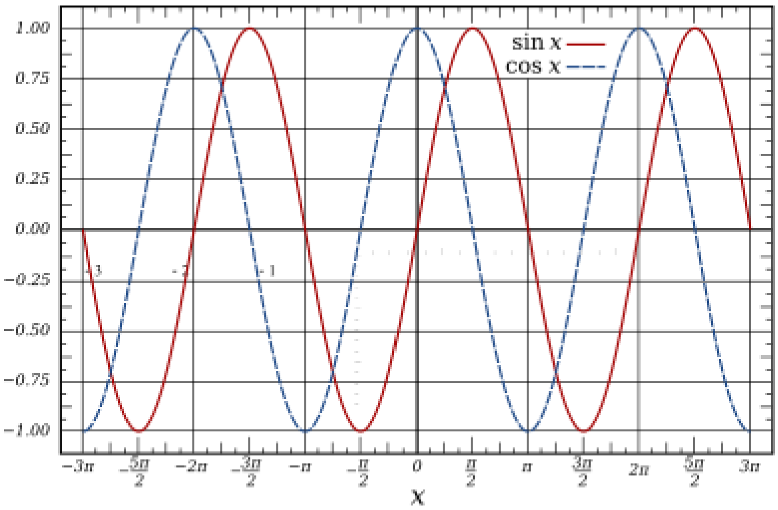
6. SLOVAR POJMOV

1. Sinusoida

Matematična krivulja, ki nastane pri izrisu grafa kotne funkcije sinus ali kosinus. V fiziki jo srečamo pri ponavljajočih se simetričnih gibanjih, ki jih imenujemo nihanje. [Viri 5]

$$\mathrm{A(t)} = A_0 \sin(\omega t)$$

Enačba 4: Opis nihanja s sinusno funkcijo



Slika 21: Oblika sinusoide za funkciji sinus in kosinus

2. Spektralna analiza

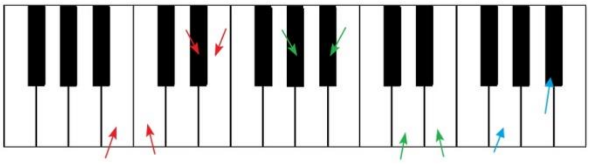
Spektralna analiza je znanstvena metoda, ki s pomočjo instrumentov določa sestavo valovanj. Običajno gre za določanje frekvenčne sestave svetlobe, kjer svetlobne žarke lahko razstavijo v barvne spektre in jih fotografirajo, ter nato obdelajo z merskimi tehnikami. Pri zvoku pa se uporablja računalniška obdelava posnetka in Fourierjeva analiza, ki iz zvoka ugotovi, katere frekvence zvoka so v posnetku. Graf, ki ga tako dobimo, imenujemo spekter.[Slovar 5]

3. Uglasitev

Uglasitev je dogovorjeno razmerje frekvenc tonov v lestvici. Ta razmerja frekvenc so lahko med vsemi toni enaka kot pri temperarini uglasitvi, ali pa so razmerja frekvenc v enakih intervalih različna, kot npr. pri pitagorejski uglasitvi ali pa pri uglasitvah plemenskih ljudstev ali svojih kultur.

4. Interval

Interval je v glasbeni teoriji razdalja med dvema tonoma.



Slika 22: Klaviatura

Na klaviaturi so z istobarvnimi puščicami označeni isti intervali. Interval je drugačen, če je v dveh parih tonov med tonoma različno število poltonov.

5. Spekter

Spékter (angleško spectrum) v večini primerov pomeni porazdelitev med raznolikimi možnostmi med obema skrajnostma. V preteklosti je imela beseda nekoliko drugačen pomen. Pri valovanju je spekter porazdelitev gostote energijskega toka valovanja po frekvenci. Kadar je porazdelitev diskretna, govorimo o črtastem spektru, kadar je zvezna, pa o zveznem spektru.

Spekter izsevanega valovanja je emisijski spekter, spekter prepuščenega valovanja absorpcijski spekter, spekter odbitega valovanja pa odbojni spekter. [Viri 6]

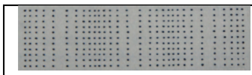
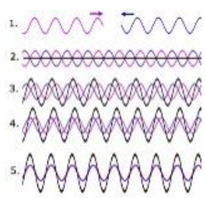
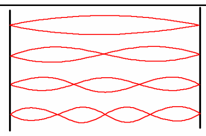
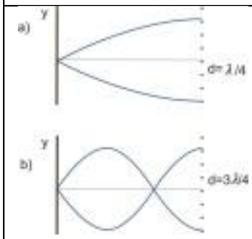
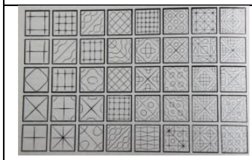
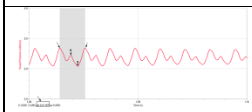
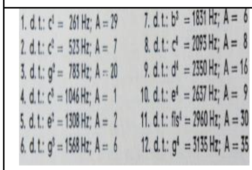
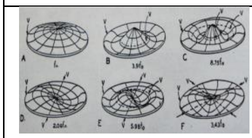
6. Notna vrednost

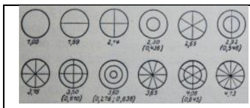
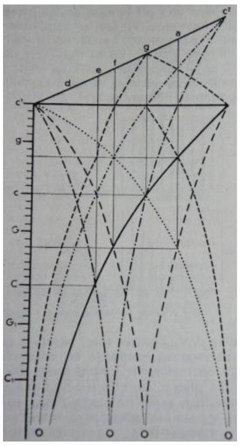
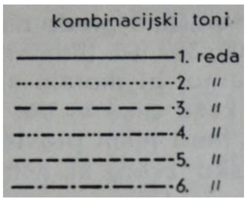
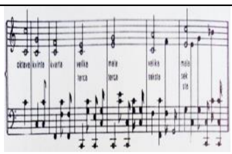
Dolžina tona v notaciji.

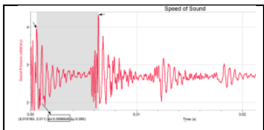
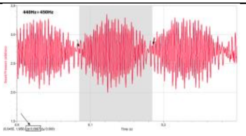
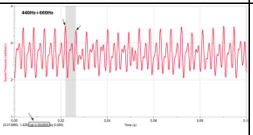
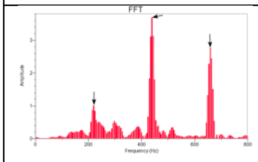
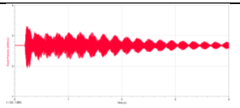
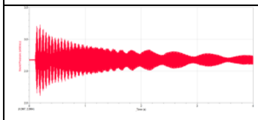
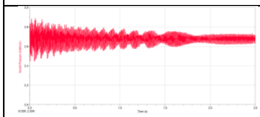
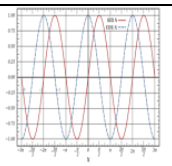
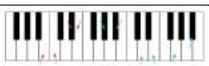
7. LITERATURA

1. Adlešič M.: Svet zvoka in glasbe, Mladinska knjiga, Ljubljana, 1964.
2. Ravnikar B., Tartini in kombinacijski toni, Muzikološki zbornik, št. 28, Ljubljana 1992;
3. http://projlab.fmf.uni-lj.si/arhiv/2009_10/naloge/izdelki/diferencialni_ton/teorija_toni.html , (13. 3. 2016);
4. http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Combination_Tones.html (13. 2016);
5. https://bs.wikipedia.org/wiki/Sinusoida (13. 2016);
6. https://sl.wikipedia.org/wiki/Spekter (13. 3. 2016).

Viri slik:

	Slika 1: slika iz vira 1
	Slika 2 http://a-levelphysicstutor.com/images/waves/statw-formation.jpg
	Slika 3:http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/resonance.html
	Slika 4: https://si.openprof.com/ge/images/79/stojei_val5_640_1.jpg
	Slika 5: slika iz vira 1
	Slika 6: slika iz meritev, M. Petek, 2016
 1. d. t.: c^1 = 261 Hz; A = 29 2. d. t.: c^2 = 523 Hz; A = 7 3. d. t.: g^2 = 783 Hz; A = 20 4. d. t.: c^3 = 1046 Hz; A = 1 5. d. t.: e^3 = 1308 Hz; A = 2 6. d. t.: g^3 = 1568 Hz; A = 6 7. d. t.: b^3 = 1831 Hz; A = 6 8. d. t.: c^4 = 2093 Hz; A = 8 9. d. t.: d^4 = 2350 Hz; A = 16 10. d. t.: e^4 = 2637 Hz; A = 9 11. d. t.: fis^4 = 2960 Hz; A = 30 12. d. t.: g^4 = 3135 Hz; A = 35	Slika 7: slika iz vira 1
	Slika 8: slika iz vira 1

	Slika 9: slika iz vira 1
 	Slika 10: slika iz vira 1
 	Slika 11: slika iz vira 1
	Slika 12: slika iz vira 1
	Slika 13: slika poskusa, M. Petek, 2016

	Slika 14: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 15: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 16: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 17: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 18: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 19: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 20: slika iz meritev, M. Petek, 2016
	Slika 21: https://bs.wikipedia.org/wiki/Sinusoida
	Slika 22: https://pixabay.com/en/piano-keyboard-instrument-847409/