

# Fizikalni aspekti sviranja roga i njihov utjecaj na dinamiku i kvalitetu tona

---

Škiljan, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Music Academy / Sveučilište u Zagrebu, Muzička akademija**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:116:086673>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

[Academy of Music University of Zagreb Digital Repository - DRMA](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU MUZIČKA AKADEMIJA

VII. ODSJEK

ANTONIO ŠKILJAN

FIZIKALNI ASPEKTI SVIRANJA ROGA I  
NJIHOV UTJECAJ NA DINAMIKU I  
KVALITETU TONA

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU MUZIČKA AKADEMIJA

VII. ODSJEK

# FIZIKALNI ASPEKTI SVIRANJA ROGA I NJIHOV UTJECAJ NA DINAMIKU I KVALITETU TONA

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

Komentor: izv. prof. art. Bánk Harkay

Student: Antonio Škiljan

Ak. god. 2017/2018.

ZAGREB, 2018.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILO MENTOR

izv. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

\_\_\_\_\_  
Potpis

izv. prof. art. Bánk Harkay (komentor)

\_\_\_\_\_  
Potpis

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 2018.

Diplomski rad obranjen \_\_\_\_\_ 2018. ocjenom \_\_\_\_\_ ( )

POVJERENSTVO:

1. red. prof. art. Marina Novak \_\_\_\_\_
2. red. prof. art. Branko Mihanović \_\_\_\_\_
3. izv. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić \_\_\_\_\_
4. izv. prof. art. Bánk Harkay \_\_\_\_\_

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU KNJIŽNICI  
MUZIČKE AKADEMIJE

## SADRŽAJ:

|  |    |
|--|----|
| 1. Uvod.....   | 6  |
| 2. Ukratko o rogu .....                                      | 8  |
| 2.1. Povijest roga.....                                      | 8  |
| 2.2. Građa roga .....  | 8  |
| 2.3. Građa usnika .....                                      | 9  |
| 3. Fizikalni aspekti sviranja roga .....                     | 10 |
| 3.1. Osnove akustike .....                                   | 10 |
| 3.1.1. Sinusni valovi .....                                  | 12 |
| 3.1.2. Kompleksni valovi .....                               | 13 |
| 3.1.3. Fourierov teorem.....                                 | 14 |
| 3.1.4. Poluzatvorene cijevi .....                            | 14 |
| 3.2. Akustika roga.....                                      | 15 |
| 3.3. Spektar zvuka.....                                      | 16 |
| 3.4. Proizvodnja tona - vibracija usnica .....               | 18 |
| 3.5. Utjecaj dinamike na ton .....                           | 18 |
| 4. Provedba eksperimenata .....                              | 20 |
| 4.1. Odabir, izvedba i prilagodba mjernih instrumenata ..... | 21 |
| 4.2. Analiza snimaka .....                                   | 23 |
| 5. Zaključak.....  | 31 |
| 6. Literatura.....   | 32 |

## SAŽETAK:

Frekvencijski spektar nastalog tona kod roga ovisi o različitim aspektima u procesu proizvodnje istog: način na koji je postavljena usnica, koji mišići su aktivirani, karakteristikama zraka koji prolazi kroz rog (brzina, intenzitet), konstrukcija usnika i, na kraju, konstrukcija samog roga. U svrhu ovog rada, provedeno je istraživanje u sklopu kojeg su izvedeni pokusi i mjerenja na rogu. Kako bi rezultati bili što transparentniji, mjerenja su provedena i snimana u gluhoj komori. Nakon provedenog istraživanja, može se zaključiti da boljoj kvaliteti tona pridonosi oblija postava usnica. Usnik treba izabrati tako da njegova dimenzija ne utječe na protok zraka do usne cijevi. Uz to, treba osvijestiti da veća količina zraka ne pridonosi kvaliteti tona, već samo dinamici.

Ključne riječi: francuski rog, fizikalni aspekti, dinamika, kvaliteta tona, položaj mikrofona pri snimanju

## SUMMARY:

The frequency spectrum of the produced tones in the horn depends on the different aspects of the production process: the way the lips are set, which muscles are activated, the characteristics of the air passing through the horn (speed, intensity), the mouthpiece construction and, finally, construction of horn. For the purpose of this work, a research was conducted out within which experiments and measurements were performed on horn. To make the results as transparent as possible, measurements were performed and recorded in the deaf chamber. After the research, it can be concluded that the rounder shape of the lips contributes better tone quality. Mouthpiece should be chosen so that its dimension does not affect the air flow to the mouthpipe. Additionally, it should be felt that greater amount of air does not contribute to tone quality, just only dynamics.

Key words: french horn, physical aspects, dynamics, tone quality, position of microphone at recording

## 1. Uvod

S obzirom da razumijevanje akustičkih osobina i fizičkih aspekata roga doprinosi boljem razvoju svirača i njegove tehnike, o njima se raspravlja još od samog izuma današnjeg oblika roga.

U prvom dijelu rada kratkim se teorijskim osvrtom čitatelje nastoji uputiti u specifičnost roga. Nakon kratkog zadiranja u povijest današnjeg roga, čitatelju se objašnjava te želi približiti njegova građa i građa usnika.

U drugom dijelu rada fokus leži na pojašnjenju fizikalnih aspekata sviranja roga te primjena istih za pokuse i analizu. U uvodu u akustiku objasniti će se pojave valova (transverzalni, longitudinalni i stojni) i zvuka. Za bolje razumijevanje principa sviranja roga ukratko ćemo objasniti i fizikalne pojave vezane uz proizvodnju tona i njegovu kontrolu te nastanak zvuka koji naposljetku čujemo. Ne smijemo zapostaviti ni razliku između cilindrične i konusne cijevi po kojoj je rog specifičan. Nadalje, uz kratki osvrt na akustičke osobine roga (boja instrumenta, dinamički, frekvencijski raspon itd.) pojasniti ćemo njegov put kroz sam instrument te njegovu projekciju i širenje.

Nakon teorijskog pojašnjenja fizikalnih pojava i akustičkih osobina roga slijede stvarna mjerenja i pokusi. Snimanje se odvija u tzv. gluhoj komori (vrlo prigušenoj sobi u kojoj su refleksije zidova manje od 1% upadnog zvuka). Nakon prethodno ispitanih dinamičkih mogućnosti roga i snimljenih par početnih snimki tonova svakodnevnog načina sviranja za usporedbu te kalibriranjem mjernog instrumenta počinjemo s pokusima. Uz razne tehnike disanja, intenzitete dahova, postavke vokalnog trakta, postavke muskulature lica te visine tonova istražujemo načine dobivanja različitih boja i dinamika instrumenta uz konstantno bilježenje mnogih opcija i kombinacija prethodno nabrojanih postavki kako bismo naposljetku mogli razaznati što je u danom trenutku učinjeno radi lakše usporedbe rezultata i donošenja zaključka.

Nakon pokusa, analizom spektralnog prikaza snimljenog zvuka i usporedbom s izmjerenim vrijednostima na mjernom uređaju, u zaključku iznosimo dobivene rezultate. Uz njih objašnjavamo i načine disanja, intenzitete dahova te postavke muskulature lica i vokalnog trakta kako bi pojasnili na koji način postići bolji i bogatiji ton bez narušavanja nekog drugog aspekta sviranja te kako iskoristiti stečeno znanje

u ovom radu za daljnji razvoj i napredak kako profesorima, tako i učenicima roga i ostalih limenih puhačkih instrumenata.



## 2. Ukratko o rogu

### 2.1. Povijest roga

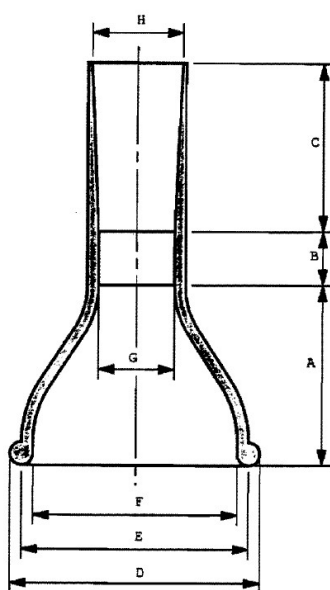
Iako priča roga kao instrumenta seže daleko u prošlost, onakav rog kakav poznajemo danas i kakav se najčešće koristi, dizajnira Fritz Krupse iz Erfurta tek 1898. godine, nakon mnogobrojnih promjena. Ideja se razvila zbog potrebe stabilnosti i bolje intonacije tona u gornjem registru jer je registar F roga, koji se do tada ustalio kao standardni rog, dublji te je samim time na njemu teže svirati u gornjem registru. Spajanjem F i B roga, koji ima veću intonativnu stabilnost u gornjem registru, raspon instrumenta je proširen na 4 oktave. Tako je postupno od obične cijevi s proširenjem u zvono do današnjeg oblika prošao razne procese i nadogradnje, kako u tonu tako i u opsegu. Uz dvostruki rog s rotacionim ventilima (njemački tip – rotacioni ventili, širi promjer zvona i šire cijevi) kakav i danas poznajemo i koji se najviše koristi, u koncertnim izvedbama djela iz razdoblja baroka i klasicizma (Mozart, Beethoven, Haydn), možemo vidjeti i njegove preteče - prirodni i barokni rog, izvedbe bez ventila.

### 2.2. Građa roga

Francuski rog (horn, cor, corno) je instrument koji spada u skupinu aerofonih glazbala kod kojih veliku ulogu u proizvodnji tona nema vibracija tijela već vibracija stupaca zraka koji struji kroz njega. Do danas je preživio mnoge preinake. Moderni oblik roga izrađen je od mjedi (legura bakra, cinka i nikla) te sastavljen od niza cijevi uvinutih tako da dobije kružni izgled radi lakšeg rukovanja. Iako spada pod konusne instrumente izrađen je kombinacijom konusnih i cilindričnih cijevi. Iako je sličan trubi i trombonu, omjer konusnog i cilindričnog dijela instrumenta kod njega je puno veći. Na usnik i usnu cijev, koji su konusnog oblika, nadovezuju se cilindrične cijevi (središnji dio instrumenta u kojem su smješteni ventili kako bi se proizvedenim tonom moglo dodatno upravljati). Nakon prolaska tona kroz središnji cilindrični dio instrumenta slijedi duga konusna cijev koja završava zvonom kako bi ton dobio na intenzitetu. Visina tona kontrolirana je brzinom i intenzitetom zraka koji prolazi kroz instrument (zrak kontroliramo dišnim organima te vokalnim traktom), napetosti i položajem usnica na usniku te kombinacijom ventila koji su ugrađeni u središnji dio roga. Visina tona također se može kontrolirati i položajem ruke u zvonu. U poglavlju 3.2. detaljnije ćemo opisati način nastajanja tona u rogu.

### 2.3. Građa usnika

Usnik francuskog roga sastoji se od više dijelova. Dijelovi usnika su: prsten, čašica, grlo, provrt i konusni završetak. Za razliku od usnika za trubu i trombon, hornistički usnik ima puno veći konus i dubinu čašice što mu daje tamniji, puniji, ne toliko prezentan zvuk. Postoji mnogo proizvođača usnika pa tako i variraju dimenzije svih navedenih dijelova usnika a time i boja tona, kontrola intonacije, raspon dinamika, fleksibilnost, čistoća atake, itd., stoga usnik valja odabrati prema željama i sviračkim mogućnostima glazbenika.



Slika 1: Građa usnika (Plitnik, 1999)

Na slici je prikazana građa usnika. A označava dubinu čašice, B dubinu provrta, C duljinu od provrta do ruba usnika, D vanjsku širinu prstena, E širinu između vrhova prstena, F unutarnji rub prstena, G širinu grla te H širinu stražnjeg dijela usnika (Plitnik, 1999).

Za potrebe ovog rada u eksperimentu su korištena tri različita usnika: PHC London H20A, PAXMAN 4B i DENIS WICK/PAXMAN 4.

- PHC H20A: 4 mm širina provrta, plitka čašica
- PAXMAN 4B: 4,5 mm širina provrta, srednje duboka čašica
- DENIS WICK/PAXMAN 4: 4,7 mm širina provrta, duboka čašica

### 3. Fizikalni aspekti sviranja roga

Za lakše razumijevanje ovog istraživanja i provedenih eksperimenata te načina dobivanja tona kod roga i ovisnosti istog o mnogim procesima, u nastavku ćemo opisati i približiti pojam valova, pojavu stojnih valova, kompleksne valove, pojam frekvencijskog spektra te akustiku instrumenta.

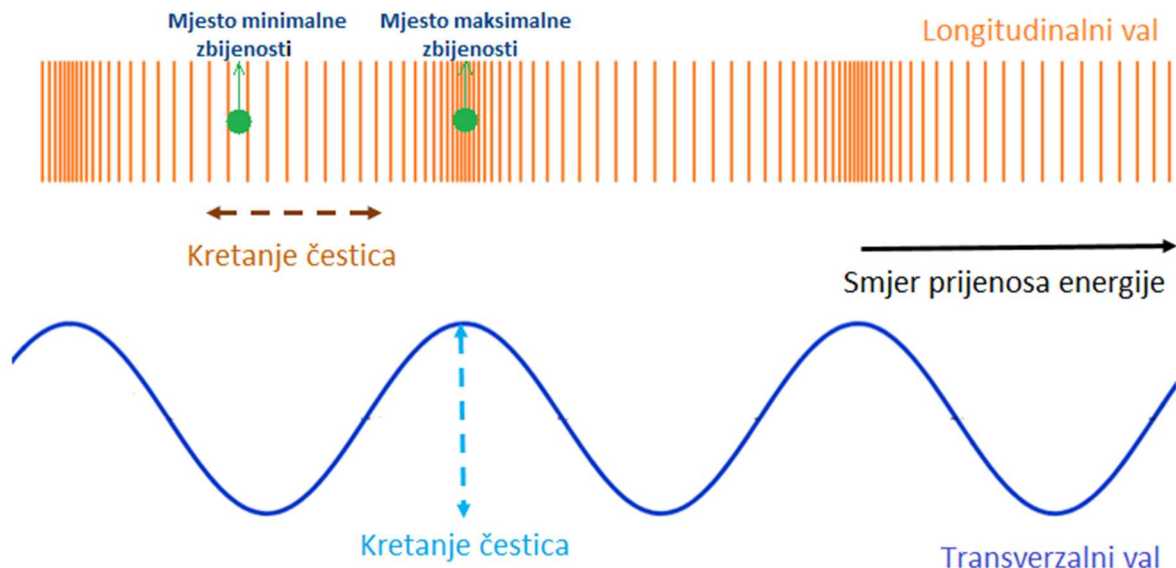
#### 3.1. Osnove akustike

Kada govorimo o valovima koji prenose energiju, moramo znati da postoje dvije vrste valova: transverzalni i longitudinalni valovi. Spomenuti valovi uvijek imaju smjer kretanja (prijenosa energije), ali ih razlikuje smjer kretanja čestica unutar vala.

**Transverzalni val** – češći tip vala koji možemo vidjeti. Najjednostavniji primjer transverzalnog vala jesu valovi na vodi. Kako se val kreće u jednom smjeru, čestice vode kreću se u smjeru okomitom na smjer prijenosa energije.

**Longitudinalni val** – ovaj tip vala je malo teže zamisliti pošto ga ne susrećemo toliko često kao transverzalni. Za razliku od transverzalnog vala gdje se čestice miču gore – dolje, kod longitudinalnog vala čestice se miču naprijed - nazad. Smjer kretanja čestica vala paralelan je sa smjerom prijenosa energije. U longitudinalnom valu dolazi do zbijanja i širenja prostora među česticama i njihovog sudaranja na mjestima maksimalne zbijenosti što dovodi do prijenosa energije.

## Transverzalni i longitudinalni val



Slika 2: Transverzalni i longitudinalni val<sup>1</sup>

Svaki spomenuti val u nastavku istraživanja odnosi se na longitudinalni val. Longitudinalni val je zvučni val koji nam prenosi energiju do uha te je relevantan za ovaj rad.

Nadalje, uz objašnjenje kakav je zvučni val po obliku treba objasniti pojavu stojnih valova koji su od ključne važnosti kod proizvodnje tona puhaćih instrumenata. Stojni valovi, kako i sam naziv sugerira, ne kreću se kao transverzalni i longitudinalni već su stacionirani. Iako se ne kreću, ne znači da se ne mijenjaju tijekom vremena. Puhaći instrumenti proizvode ton tek kada se stvori stojni val u njemu.

---

<sup>1</sup> Izvor: <https://www.onlinemathlearning.com/transverse-longitudinal-wave.html>

### 3.1.1. Sinusni valovi

Sinusni val najjednostavniji je oblik vala koji možemo opisati. Ima samo jednu komponentu spektra zvuka. U primjeru su prikazana dva primjera sinusnog vala. Prvi sinusni val amplitude je 60 jedinica, frekvencije 1000Hz i faznog pomaka  $0^\circ$  dok je drugi primjer sinusni val amplitude 40 jedinica, frekvencije 1000Hz i faznog pomaka  $90^\circ$  (Hartmann, 2013).

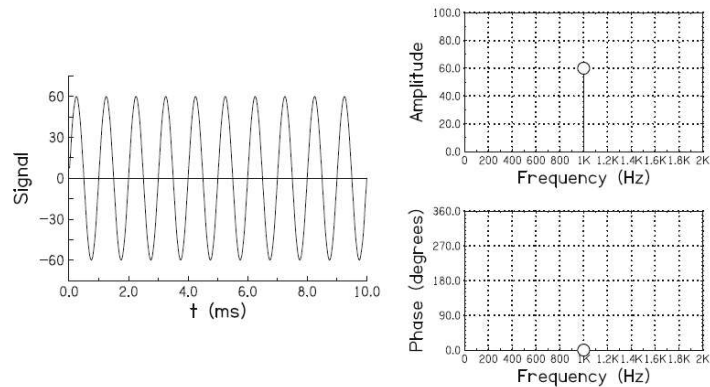
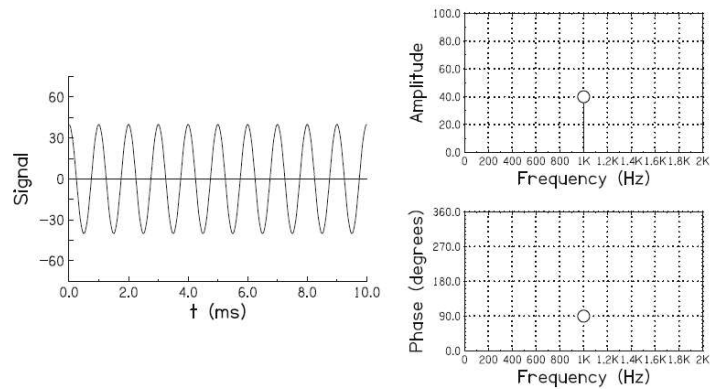


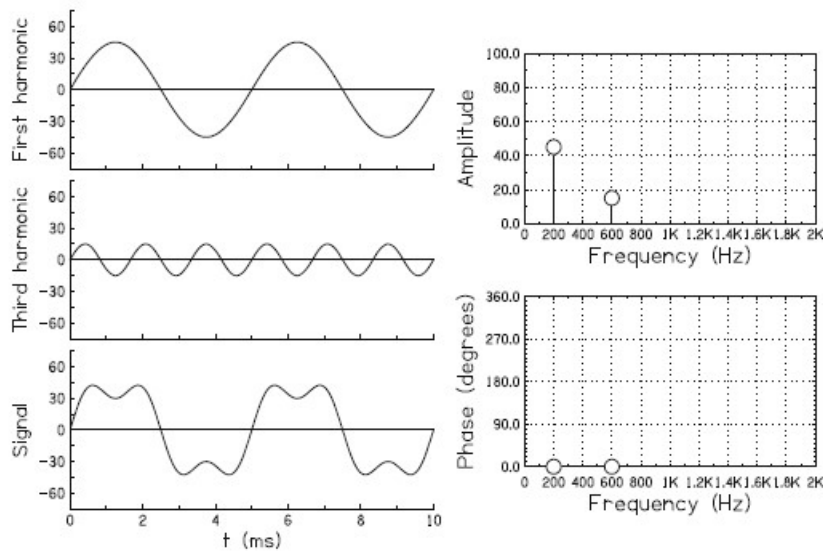
Fig. 9.1 A sine wave has the simplest possible spectrum



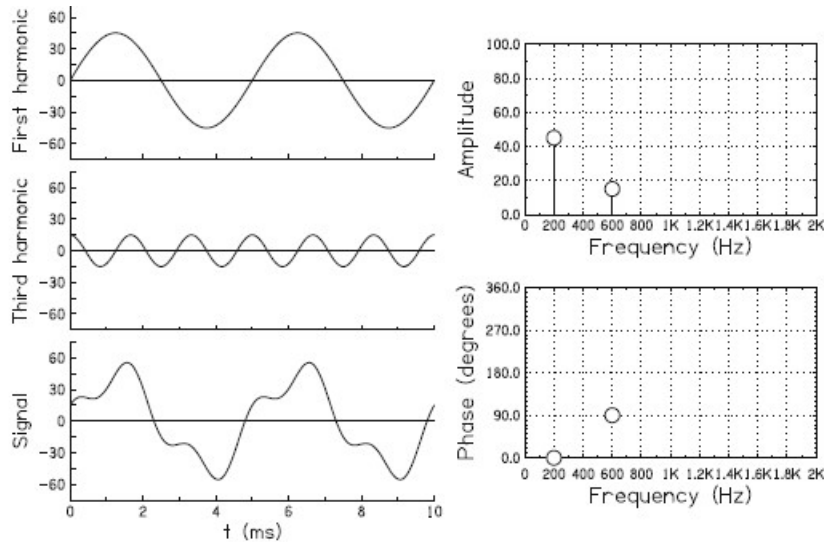
Slika 3: Primjera sinusnih valova (Hartmann, 2013)

### 3.1.2. Kompleksni valovi

Kada spojimo najmanje dva sinusna vala nastaju kompleksni valovi. Primjer kompleksnog vala prikazan je na slikama 4 a i b s osnovnom frekvencijom od 200Hz i amplitude 45 jedinica. Uz osnovnu frekvenciju, val sadrži i treći harmonik s frekvencijom od 600Hz i amplitude 15 jedinica. Primjeri a i b razlikuju se u fazi pomaka manjeg sinusnog vala (Hartmann, 2013).



Slika 4a: Kompleksni val



Slika 4b: Kompleksni val

Harmonicima nazivamo komponente kompleksnog vala koji su umnošci osnovnog tona. Npr., 200, 400 i 600 Hz su umnošci osnovne frekvencije 200 Hz.

### 3.1.3. Fourierov<sup>2</sup> teorem

Prema Fourierovom teoremu svaki je valni oblik samo zbroj sinusnih valova. Ta tvrdnja ima dvije aplikacije, Fourierovu sintezu i Fourierovu analizu.

Fourierova *sinteza* je matematički postupak kojim se s pomoću jednostavnih trigonometrijskih funkcija sinusa i kosinusa predočuje složena periodična funkcija. Fourierov teorem kaže kako dodavanjem sinusnih valova možemo stvoriti kompleksni val koji može proizvesti svaki valni oblik koji zamislimo.

Fourierova *analiza* je postupak suprotan sintezi. Postupak počinje kompleksnim valom i rastavlja ga na sinusne valove koji ga tvore. Fourierov teorem tvrdi kako svaki kompleksni val može biti analiziran samo s jedinim mogućim rezultatom frekvencija, amplituda i faza sadržanih sinusnih valova. Iz toga možemo izvući još i bolju izjavu teorema da je svaki valni oblik unikatan zbroj sinusnih valova (Hartmann, 2013).

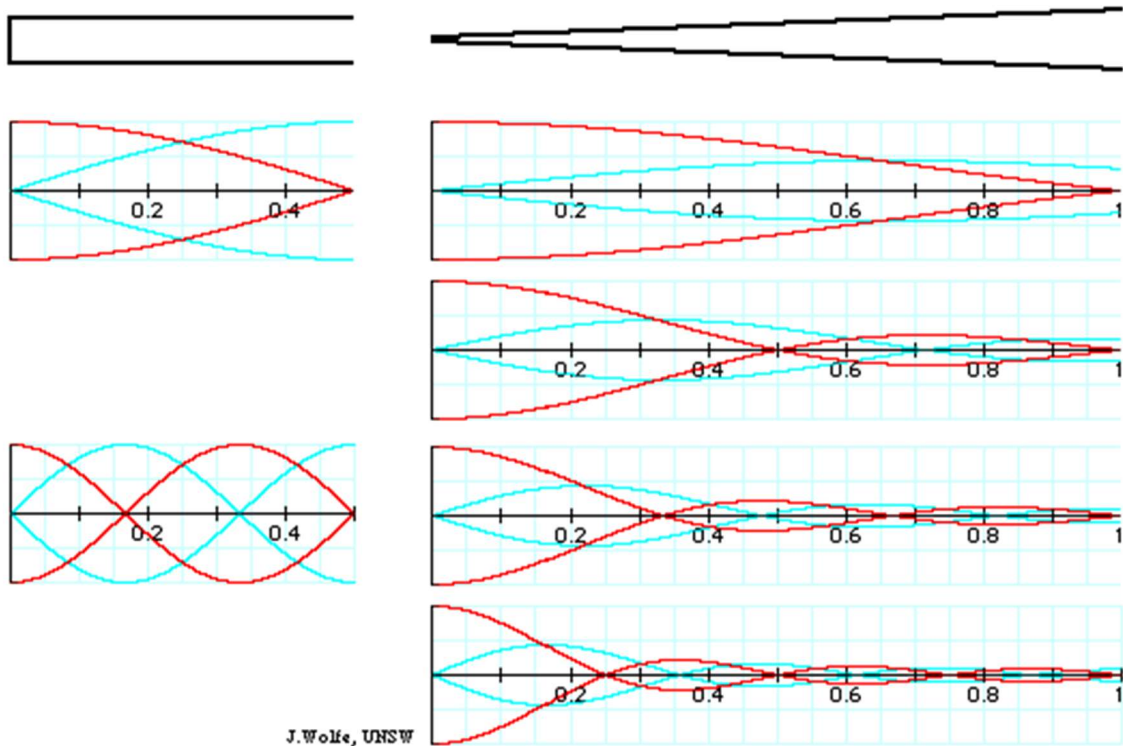
Fourierov teorem omogućuje nam zorniji prikaz spektra instrumenta kojeg ćemo koristiti pri analizi rezultata istraživanja.

### 3.1.4. Poluzatvorene cijevi

Poluzatvorene cijevi imaju prirodnu rezonantnu frekvenciju koja je usko vezana s duljinom cijevi i graničnim uvjetima koji diktiraju modove koji mogu biti održani. Kako bi proizveli stojni val koji smo već spomenuli, cijev mora imati točke maksimalnog tlaka na zatvorenom dijelu cijevi i točke maksimalnog gibanja čestica na otvorenom kraju cijevi. Rog po specifikaciji spada u instrumente s poluzatvorenom cijevi koničnog oblika. Ovdje ćemo kroz nekoliko primjera objasniti razliku između poluzatvorene cilindrične i konusne cijevi te oblik stojnih valova koji u njima nastaje.

---

<sup>2</sup> Fourier, J. (1768.-1830.) – francuski matematičar i fizičar



Slika 5: Razlika između poluzatvorene cilindrične i konusne cijevi

Na slici 5 prikazana je razlika između poluzatvorene cilindrične cijevi i konusne cijevi. Iz primjera je vidljivo kako poluzatvorena konična cijev proizvodi puni spektar parnih i neparnih harmonika, dok u cilindričnoj cijevi nastaju samo neparni harmonici. Da bismo uspostavili stojni val u poluzatvorenoj cijevi, mora postojati mjesto maksimalnog premještanja čestica na otvorenim krajevima i mjesto maksimalnog tlaka na zatvorenom kraju. Zvuk kroz cilindričnu poluzatvorenu cijev putuje kao val, a pošto cijev ima konstantni presjek, intenzitet ostaje isti. Suprotno tome, presjek se u konusnoj cijevi postupno povećava te se valni oblik raspršuje i sukladno tome, intenzitet zvučnog vala pada prolazeći kroz cijev. (Thompson, 2010).

### 3.2. Akustika roga

Rog je instrument koji spada u aerofone instrumente. Ton kod roga proizvodi vibrirajući stupac zraka koji kroz njega prolazi. Osnovni mehanizam proizvodnje tona jest zapravo stvaranje i održavanje longitudinalnih stojnih valova u cijevi o kojima smo ranije govorili. Usne dovoljno čvrsto prijanjaju uz usnik što rogu daju svojstvo poluzatvorene cijevi. Puls zraka koji se uvodi preko usnica svirača proizvodi tlačni val koji putuje brzinom zvuka. S obzirom da je impedancija, odnosno, otpor zraka u cijevi

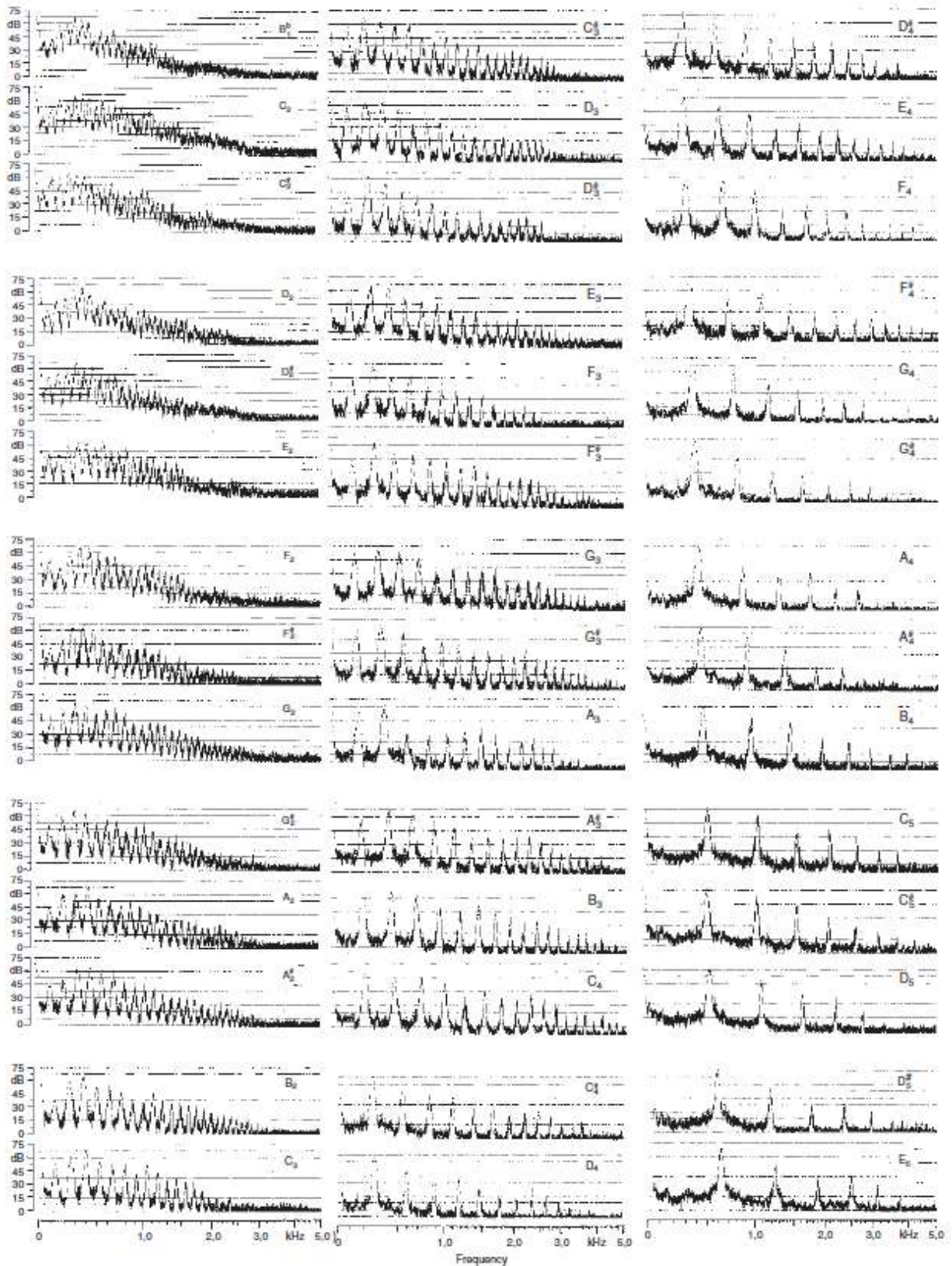


relativno visok uspoređujući s atmosferskim pritiskom, val pri izlasku iz roga iznenada susreće područje niskog otpora zraka. Kao rezultat ove razlike otpora dio vala se odbija i vraća u cijev roga. Val koji se ne odbija, izlazi iz cijevi i proizvodi zvuk koji mi čujemo. Teorija superpozicije diktira da se na određenim frekvencijama stojni val izgrađuje tamo gdje se nadolazeći i reflektirani val sudaraju te proizvode stacionarni uzorak vibracije. Na tim rezonantnim frekvencijama cijevi koje proizvode nadolazeći i reflektirani val proizvode se tonovi (Thompson, 2010).

### 3.3. Spektar zvuka

Kod limenih puhaćih instrumenata spektar možemo podijeliti u dvije grupe. U gornjem registru instrumenata osnovni ton je najintenzivniji, dok je za donji dio registra karakteristično da maksimum preuzme glavni formant. Kao što je vidljivo na slici br. 6, osnovni ton dominira od C4 prema višim tonovima registra, dok je ispod tog tona maksimum pomaknut na oktavni harmonik i zadržava svoju poziciju tako da u najnižem registru najviše energije sadrže 4. i 5. harmonik. Kao rezultat, što je i tipično za francuski rog, glavni formant se razvija otprilike na 340Hz (Meyer, 1967b. prema Meyer, 2009). Taj formant je zaslužan za okrugao i sonorant zvuk roga jer pada u područje boje samoglasnika „u“. Ispod ovog maksimuma, amplituda u niskim registrima pada strmovito (12dB/oktava) što pokazuje da niske frekvencije imaju samo sporednu ulogu u određivanju kvalitete tona roga jer je osnovni ton 25 dB tiši od najintenzivnijeg harmonika. Amplitude iznad maksimuma također padaju, no prisutnost nekoliko dodatnih harmonika utječe na tonsku sliku.

Donju granicu spektra uvijek određuje temeljni harmonik. Ispod temeljnog tona pravilno vibrirajuće tonske komponente ne postoje. S obzirom na to, donja granica spektra harmonika pomiče se prema gore dizanjem intonacije. Jasno je prepoznatljivo kako se i prvi vrhovi spektra pomiču udesno s porastom intonacije, tj. prema višim frekvencijama. Uz to, porastom intonacije povećava se i razmak između harmonika. Za niske su tonove harmonici višeg dijela spektra toliko zbijeni da tvore karakter sličan buci pri velikom intenzitetu sviranja, dok su harmonici visokih tonova u istom frekvencijskom rasponu još uvijek percipirani kao „čisti“ zbog njihovog većeg razmaka. Gornja granica spektra ovisi i o dinamici. Akustika prostora također ima važnu ulogu, osobito kada su u pitanju više frekvencije spektra (Meyer, 2009).



Slika 6: Prikaz spektra tonova roga po kromatskoj ljestvici

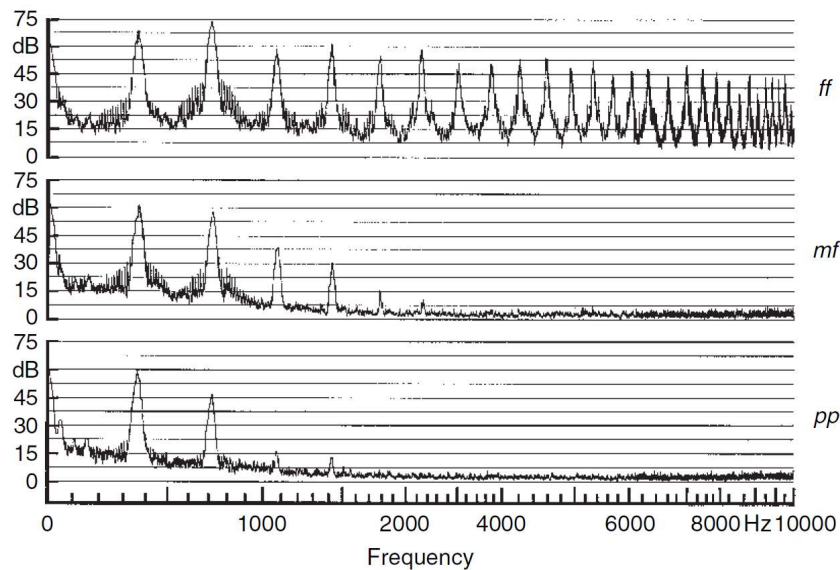
### 3.4. Proizvodnja tona - vibracija usnica

Za proizvodnju tona kod roga nije dovoljno jednostavno puhati zrak kroz instrument jer ne postoji stalni vibrirajući izvor zraka koji bi stvorio i održavao stojne valove. Na drvenim puhaćim instrumentima to je postignuto vibrirajućom trskom, a kod limenih puhaćih instrumenata vibracijom usnica. Prvenstveno zbog Bernoullievog efekta usnice će se pri upuhivanju zbog svoje mase i elastičnosti prirodno otvarati i zatvarati. Usnice rade kao tlačno kontrolirani ventil. Kada je pritisak zraka u usniku visok, usnice se prirodno zatvaraju i traže novi potisak zraka iz pluća koji pravovremeno pojačava oscilaciju. Tako se zapravo usnice priključe na varijacije tlaka na usniku te se njihova brzina otvaranja i zatvaranja sinkronizira s rezonantnim frekvencijama instrumenta (Thompson, 2010).

Putem eksperimenata može biti pokazano kako otvaranje i zatvaranje usnica nije sinusoidno, ali proizvodi kompleksni valni oblik obogaćen s nekoliko harmonika koji su harmonijski povezani s osnovnim tonom. Relativna ravnoteža harmonika određuje boju tona ili kvalitetu zvuka instrumenta. Svirajući tonove viših frekvencija, oscilacija postaje sve više sinusoidna (Thompson, 2010).

### 3.5. Utjecaj dinamike na ton

Na tonsku sliku najviše utječe glasnoća sviranja. Uz ostale faktore kao što su priroda atake i relativni pokret, glasnoća sviranja može imati efekt na slušateljevu percepciju dinamike (Meyer, 2009. prema Hadamowsky, 1958.). Izražajna vrijednost dinamike ni na koji način ne počiva isključivo na različitim razinama zvučnog tlaka koji bi se mogli postići različitim utjecajem, npr. podešavanjem jačine pojačala. Kod većine glazbenih instrumenata promjena glasnoće reprodukcije razlikuje se ne samo u intenzitetu zvuka u stacionarnom dijelu, već također donosi jasne promjene u sastavu spektra zvuka. Zahvaljujući tom efektu, odsviranu dinamiku forte na snimci prepoznavamo i kao tihu zvučnu reprodukciju putem zvučnika. Taj fenomen jasno možemo vidjeti u gornjem registru roga na primjeru koji prikazuje tri spektralne slike različitih dinamika: fortissimo, mezzoforte, pianissimo. (Meyer 2009. prema Meyer, 1967b.). Ljestvica je postavljena tako da najsnažniji fortissimo harmonik sa 75 dB taman dostiže gornji limit.



Slika 7: Spektar tona roga pri tri različite dinamike

Posebno je očigledan bogat sadržaj zvučnog signala gornjeg spektra. U fortissimo dinamici ton sadrži najviše harmonika što mu daje različit karakter i boju u odnosu na ostale dvije dinamike. U mezzoforte i pianissimu spektar sadrži osjetno manje harmonika. Ovim primjerom možemo vidjeti kako dinamika uvelike utječe na karakter i boju tona. Tome se dodaje da je u fortissimu maksimalni intenzitet pomaknut na drugi harmonik, što je suprotno tonu u dinamici mezzoforte i pianissimo. I to, također, pridonosi svjetlini boje. Važnost ove spektralne promjene za dinamiku posebno se prepoznaje kroz činjenicu da razlike amplitude između fortissimo i pianissimo iznose 50 dB u području viših frekvencija dok je razlika između najjačih harmonika gornjeg i donjeg spektra leži na samo petnaestak dB. To rezultira koracima u glasnoći, ali i u promjeni boje tona. Međutim, čak i ako uzmemo poveznicu između glasnoće i boje tona, individualne dinamičke oznake kao što su forte, mezzoforte, piano itd. ne mogu biti specificirane univerzalnim numeričkim vrijednostima. Značenje tih specifikacija ovisno je o glazbenom kontekstu kao i prostoru u kojem se zvuk proizvodi. Naposljetku, sami instrumenti igraju bitnu ulogu te svaka instrumentalna grupa ima svoj dinamički raspon između najveće moguće i minimalne glasnoće. Uz to, za mnoge instrumente ovaj dinamički raspon nije isti u cijelom registru. Dodatni čimbenik koji na njega utječe je i sama kvaliteta instrumenta (Meyer, 2009).

## 4. Provedba eksperimenata

U sklopu istraživanja provedena su snimanja tonova roga u određenim uvjetima uz konstantno mjerenje brzine strujanja zraka u rogu na dijelu glavnog cuga za ugađanje. Uz snimanje tonova različitih dinamika i visine, mijenjali smo i usnik instrumenta kako bi vidjeli njegov utjecaj na boju tona, ali i na strujanje zraka u rogu. Analizom i usporedbom dobivenih rezultata pokušati ćemo naći korelaciju između brzine zraka i dinamike tona. Snimanje je provedeno na Zavodu za elektroakustiku, Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, u gluhoj komori (prostorija u kojoj zidovi reflektiraju manje od 1% upadnog zvuka). Za potrebe snimanja koristili smo dva mikrofona AKG C414 XLS, jedan postavljen s prednje strane svirača, a drugi iza zvona instrumenta. Snimanje smo vršili putem Focusrite Scarlett snimača nakon čega je daljnja obrada i analiza vršena u programu Audacity 2.2.2. Paralelno sa snimanjem zvuka, zabilježeni su rezultati brzine strujanja zraka u rogu pomoću mjernog uređaja Testo 405i. Dobivene rezultate kasnije smo obradili u Microsoft Excelu i omogućili grafički prikaz radi bolje preglednosti. Za mjerenje brzine strujanja zraka pomoću mjernog uređaja bilo je potrebno prilagoditi rog kako bi mjerenje bilo moguće. Produžetkom glavnog cuga za ugađanje uspjeli smo mjerni dio uređaja ubaciti u cijev, no time je intonacija roga malo snižena što ipak nije imalo prevelik utjecaj na snimanje.

Eksperiment je započet proizvodnjom tona  $c_1$  za kalibraciju kako bismo lakše uočili podudaranja između snimke zvuka i zapisa mjernog instrumenta za brzinu zraka. Snimljene su tri iste snimke s tri različita usnika: PHC London H20A, PAXMAN 4B i DENIS WICH/PAXMAN 4. Sukladno tome izmjerene su i vrijednosti protoka zraka. Snimani su setovi tonova istih visina različitih dinamika i jedan set tonova iste visine i iste dinamike, ali različitih pristupa upuhivanju zraka u rog tj. različitog intenziteta puhanja, postavke vokalnog trakta i muskulature lica.



#### 4.1. Odabir, izvedba i prilagodba mjernih instrumenata

Kako bi bilo omogućeno mjerenje brzine zraka u cijevi, za potrebe ovog rada bila je nužna prilagodba roga. Na glavnu cijev za ugađanje intonacije roga improviziranim materijalima stvoren je dodatak za umetanje mjernog instrumenta u cijev (slika 8 i 9).



Slika 8: Nadomjestak na cijevi za ugađanje



Slika 9: Prikaz mjernog instrumenta na improviziranom dijelu

U istraživanju su korištena 2 mikrofona AKG C414 XLS postavljena tako da jedan snima izlazak zvuka iz zvona, a drugi zvuk s prednje strane instrumenta.



Slika 10: Postava mikrofona

Mjerni uređaj Testo 405i – mjerni uređaj koji spada u skupinu anemometara, a brzinu zraka mjeri pomoću izmjerene razlike temperature zagrijane žice koju hladi prolazeći zrak.



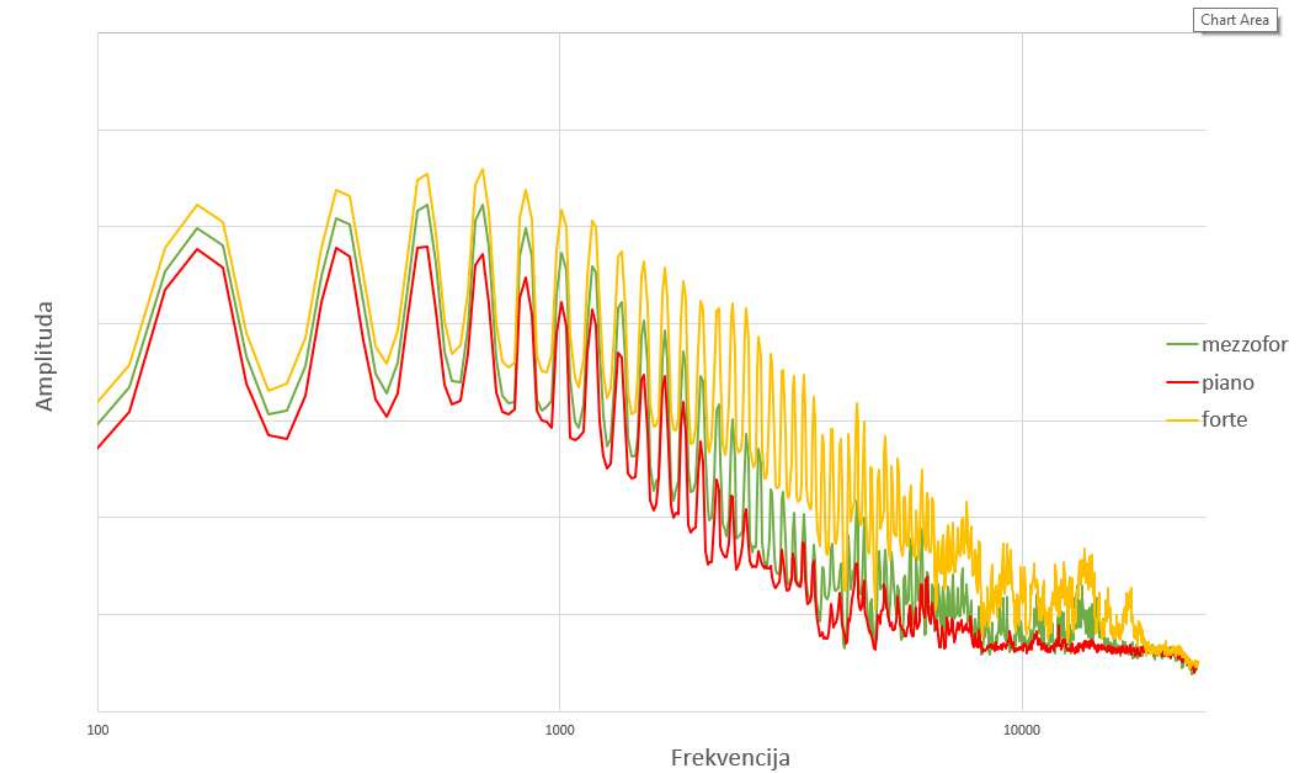
Slika 11: Anemometar<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Izvor: <http://www.testolimited.com/testo-405i-thermal-anemometer-bluetooth>

## 4.2. Analiza snimaka

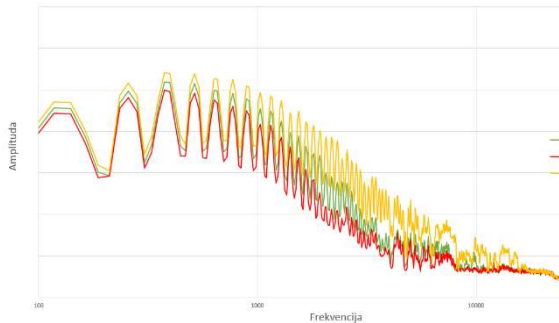
Nakon kalibracije tonom  $c_1$  ponovno je odsviran isti ton u tri različite dinamike redosljedom mezzoforte, piano, forte iz čije se spektralne analize može potvrditi razlika u višim harmonicima spektra između glasne i tiših dinamika kao što je spomenuto u poglavlju 3.3. Spektar zvuka.



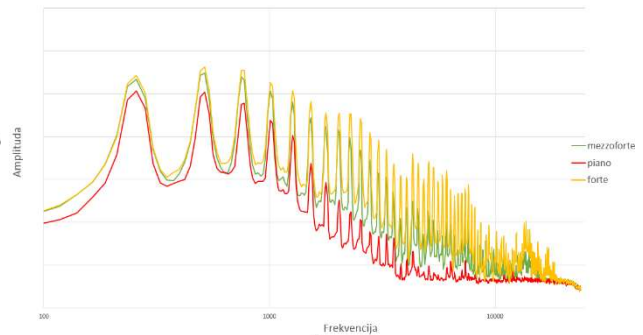
Slika 12: Ton  $c_1$  u tri različite dinamike



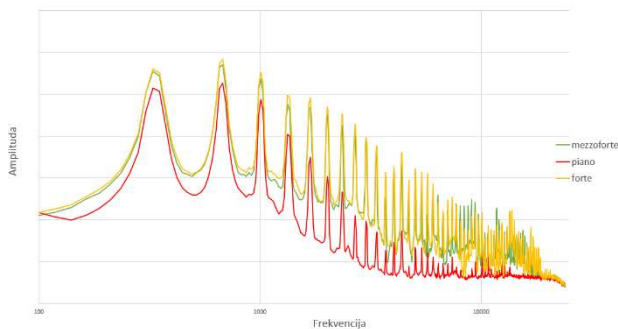
Isti postupak ponovljen je na tonovima  $g$ ,  $g_1$ ,  $c_2$  i  $g_2$  čije su slike spektra priložene u nastavku. Iz toga se može uočiti da se isto uzvišenje harmonika u višem spektru zvuka prenosi i na ostali registar roga prilikom povećanja glasnoće tona.



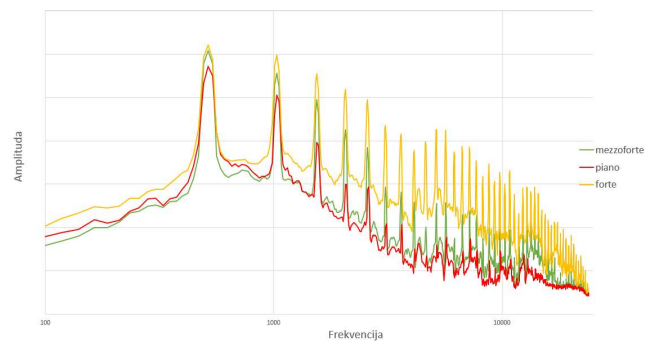
Slika 13 a: Ton  $g$



Slika 13 b: Ton  $g_1$



Slika 13 c: Ton  $c_2$

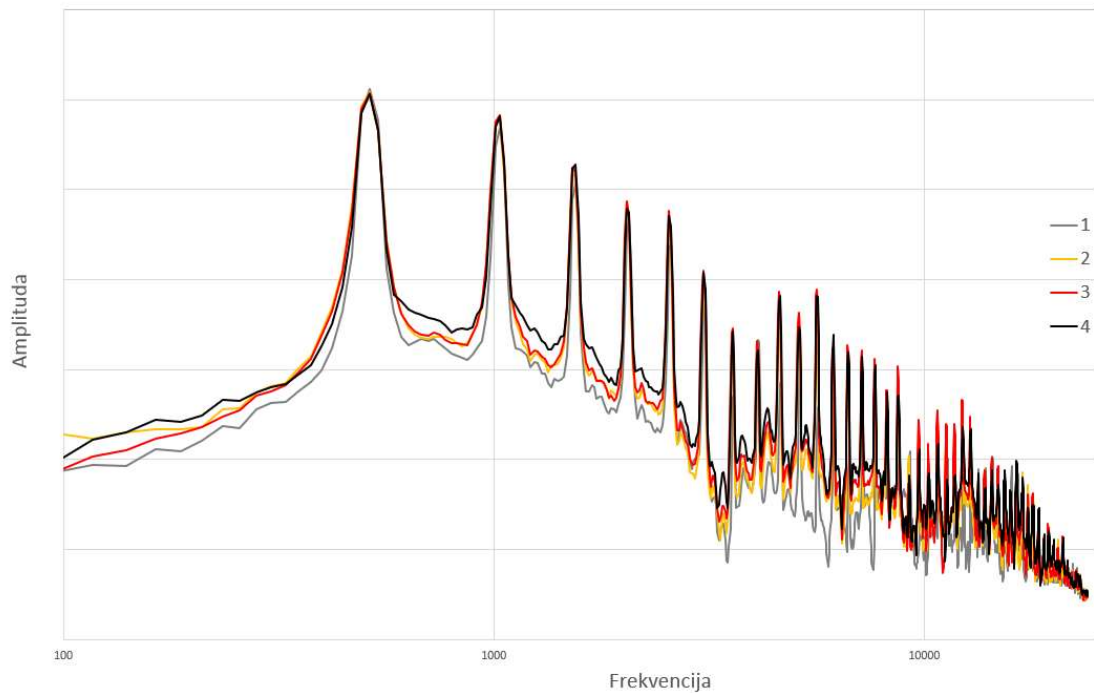


Slika 13 d: Ton  $g_2$

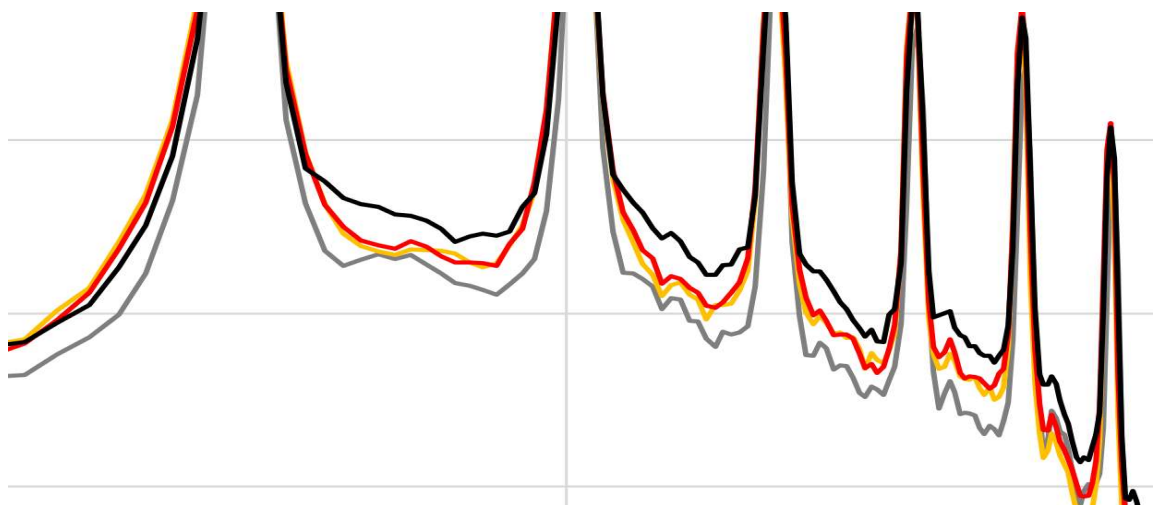
U želji da se istraži područje višeg registra kod roga, u potrazi za ujednačenom kvalitetom tona snimljen je i set od četiri puta ponovljenog tona  $g_2$  u srednjoj dinamici s različitim postavkama upuhivanja tona i muskulature lica. Uz prikaz spektra na slici 14 pridodani su rezultati mjerenja brzine zraka dobiveni tijekom proizvodnje spomenuta četiri tona (slika 17). Postavke koje su korištene za različito dobivanje tonova su:

1. normalna postava
2. manji pritisak usnica i intenzivnije upuhivanje zraka
3. otvorenija postava usnice (oblik „o“)
4. prethodno postavljene oblik usnica + dodatni pritisak zraka

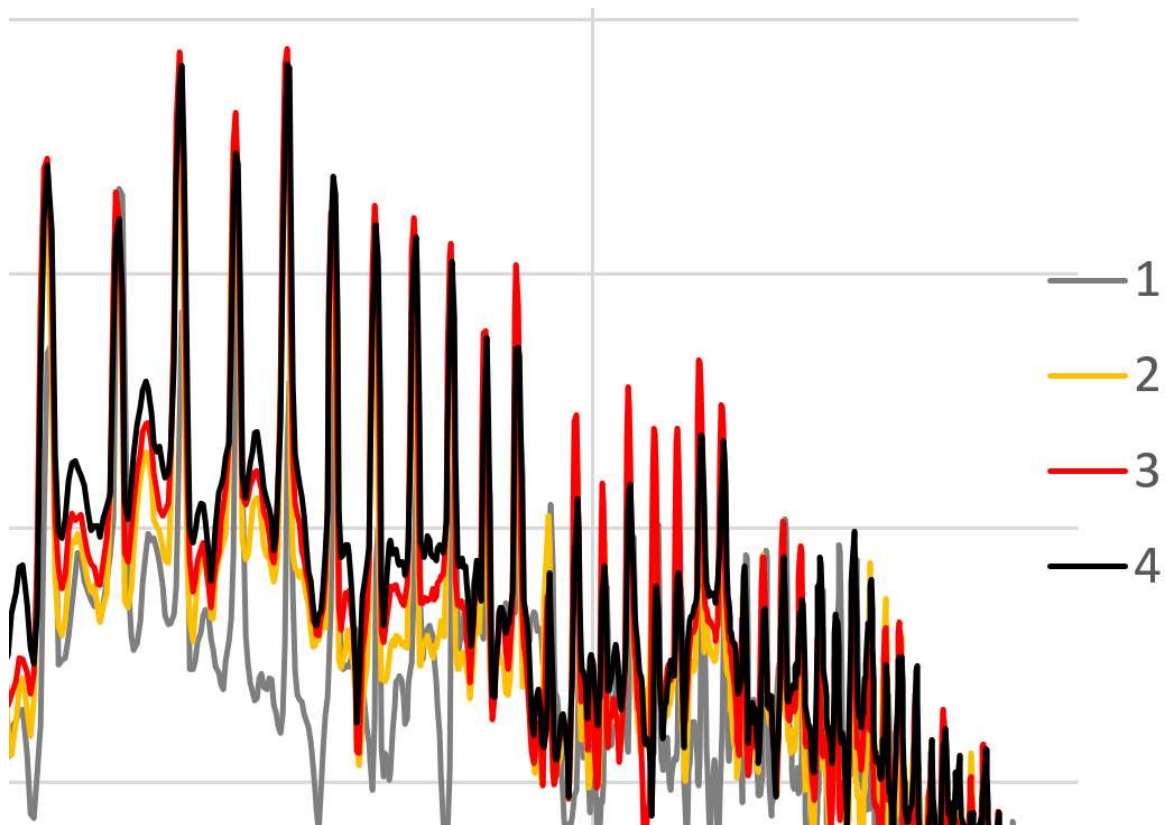
Iz priloženih grafova vidljivo je kako utjecaj zraka djeluje na amplitudu prvih 6 harmonika izdižući šum između harmonika. Suprotno mišljenju, u višem dijelu registra, u 3. postavi, dolazi do većeg izdizanja frekvencija nego što je slučaj u 4. postavi, što znači da je zaobljenija postava usnica imala veći utjecaj na taj dio spektra od veće količine zraka.



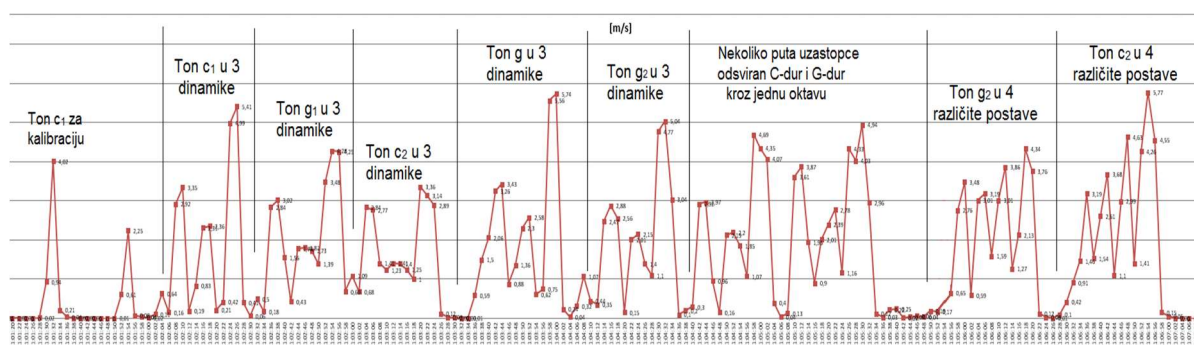
Slika 14: Ton  $g_2$  odsviran na 4 različita načina



Slika 15 a: Uvećan prikaz donjeg spektra slike 14



Slika 15 b: Uvećan prikaz gornjeg spektra slike 14

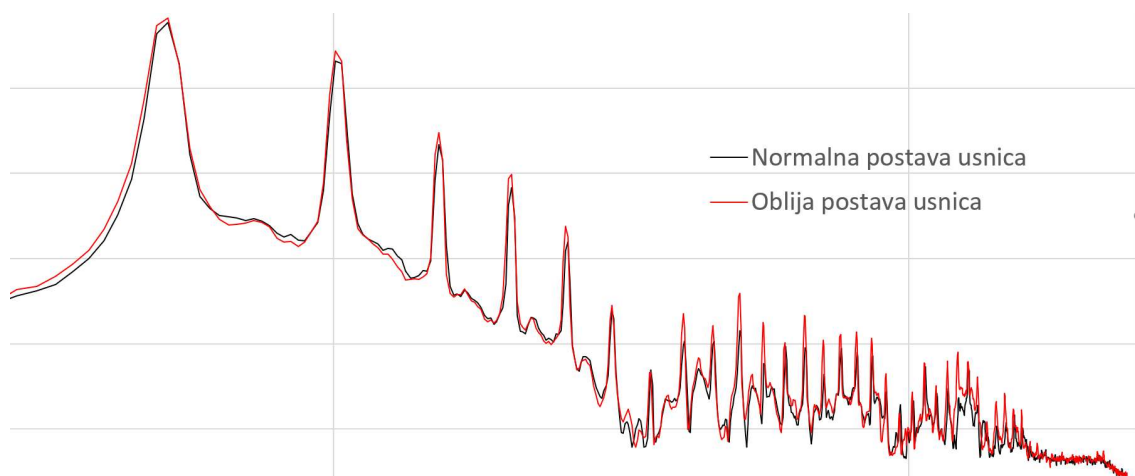


Slika 16: Grafički prikaz rezultata mjerenja brzine zraka

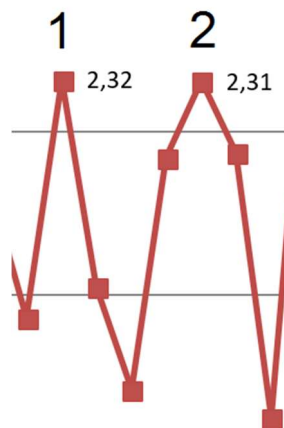


Slika 17: Isječak rezultata za slučaj slike 14  
(brojevi 1-4 predstavljaju oznake za 4 različite postavke)

Nakon analize snimke u srednje glasnoj dinamici, isto smo željeli istražiti i u tihoj dinamici. Od četiri postavke u kojima je sniman ton  $g_2$  u tihoj dinamici, izvukli smo usporedbu dvije kod kojih je najveća oscilacija. Na slici 18 vidljivo je kako oblija postava usnice pospješuje kvalitetu tona. Usprkos tome što je brzina zraka tokom obje postavke bila gotovo ista (slika 19), očitavanje u spektru rezultiralo je boljom kvalitetom tona.

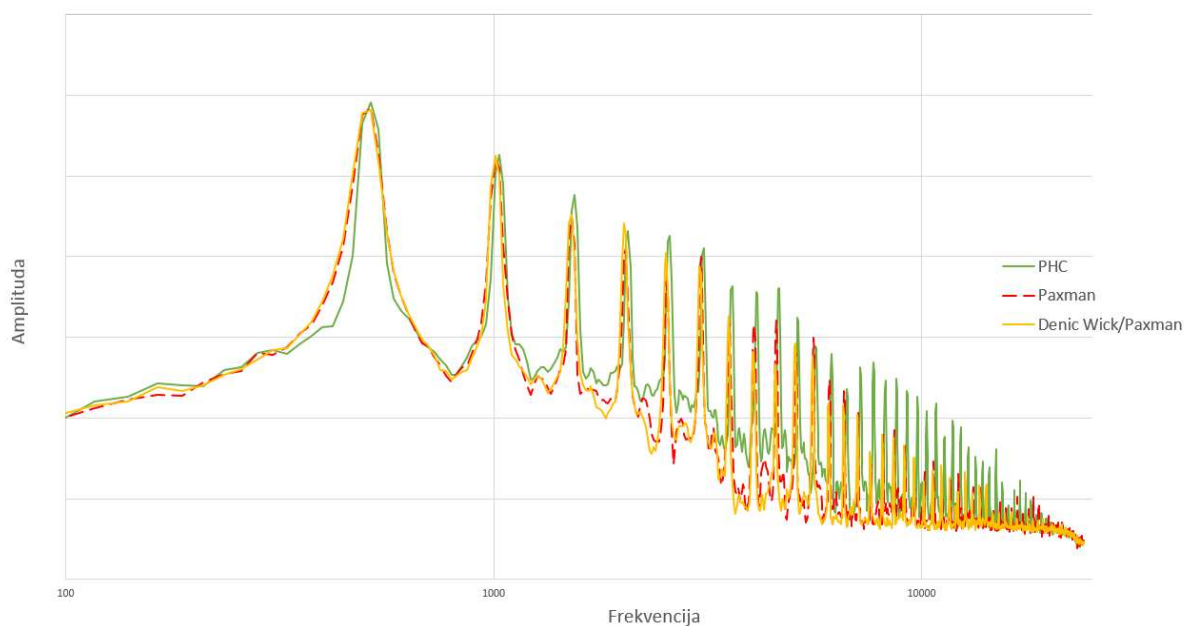


Slika 18: Različita postava usnica



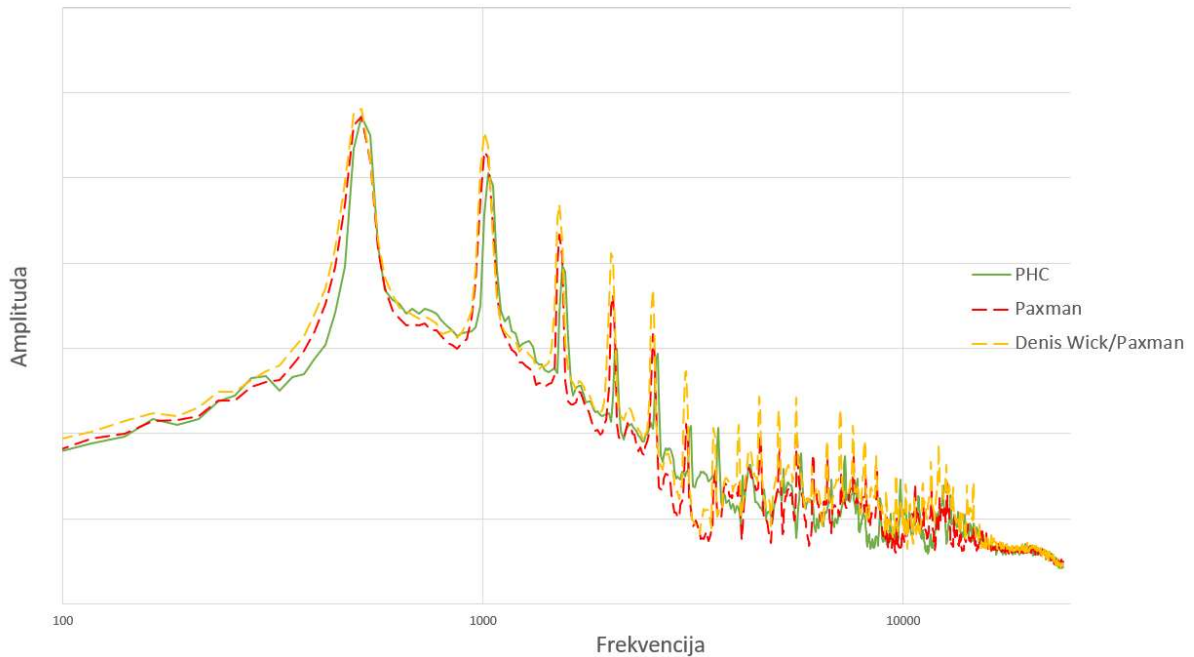
Slika 19: Isječak iz grafa brzine zraka za 1 - normalnu i 2 - obliku postavu usnica u tihoj dinamici

Nadalje, u istraživanju smo željeli vidjeti i razliku u ponašanju usnika pri dvije različite dinamike: piano i forte. Iako su sva tri usnika u prvih šest harmonika podjednake jačine, razlika se ipak uočava u drugom dijelu spektra. Pri sviranju glasne dinamike, najviše izdignute amplitude višeg spektra imao je usnik proizvođača PHC zbog svoje plitke čašice, dok su druga dva usnika gotovo podjednaka u cijelom spektru.



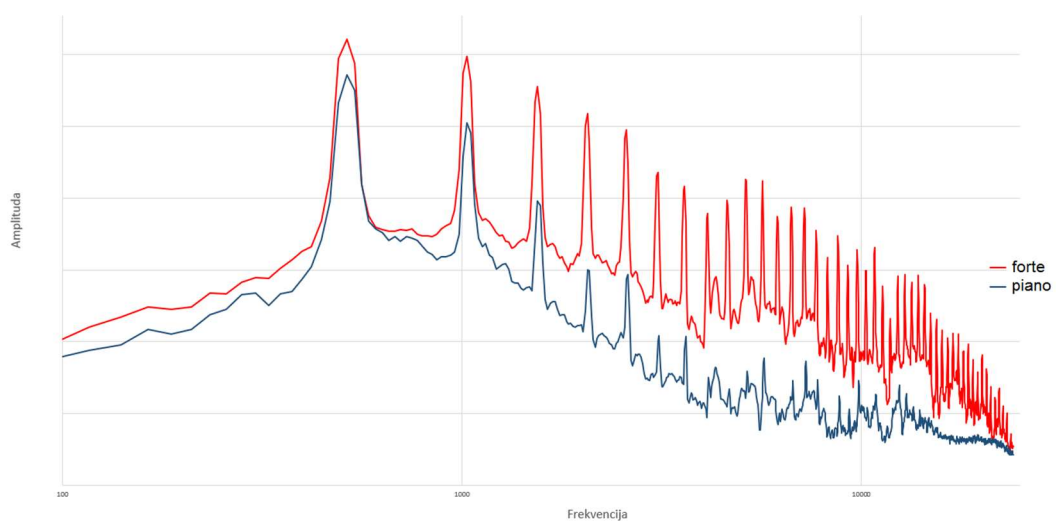
Slika 20: Ton  $g_2$  u glasnoj dinamici s tri različita usnika snimljen s pozicije ispred roga

Na slici 21 može se uočiti kako dolazi do obrata u kojem treći usnik, Denis Wick/Paxman ima najviše izdignute harmonike višeg spektra. Time možemo zaključiti kako taj usnik ima najjednačeniju boju kroz cijeli raspon dinamika.



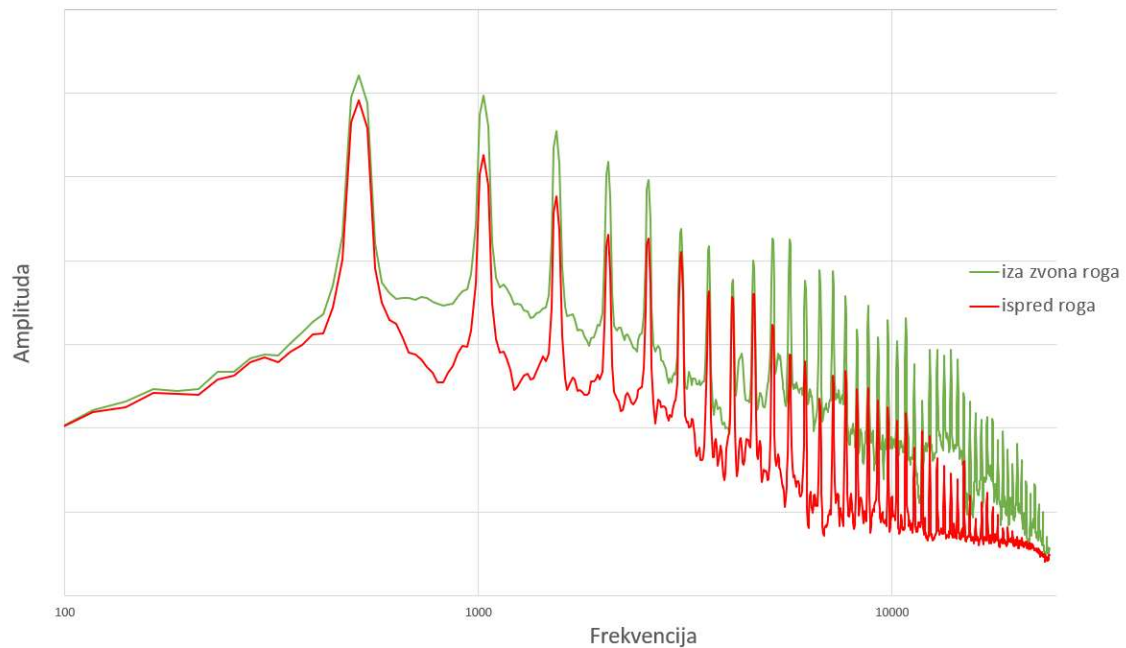
Slika 21: Ton  $g_2$  u tihoj dinamici na 3 različita usnika snimljen s pozicije ispred roga

Također, na slici 22 može se uočiti kako tonovi tihe dinamike također sadrže harmonike višeg spektra, no oni nisu toliko izraženi kao kod glasnijih dinamika.



Slika 22: Razlika između forte i piano na tonu  $c_2$

Na slijedećoj slici, slici 23, osim smanjene amplitude zbog položaja mikrofona, na mikrofону koji se nalazi s prednje strane instrumenta primjećuje se manje izdizanje harmonika u gornjem dijelu spektra. S obzirom da je izvor zvuka okrenut suprotno od smjera publike, toliko velik sadržaj tih visokih harmonika ne prenosi se ka slušatelju koji je s prednje strane. To je jedan od razloga što instrumentu daje percepciju topline.



Slika 23: Ton  $g_2$  s dvije različite pozicije mikrofona

## 5. Zaključak

Rog je kompleksan instrument na čiju proizvodnju i projekciju tona utječu brojni čimbenici. Pošto se bolja kvaliteta tona ne može postići samo jednim utjecajem, u istraživanju ih se dotaklo nekoliko. Analizom rezultata četiriju različitih načina sviranja (normalnom postavom usnica, intenzivnijim upuhivanjem zraka, oblijom postavom usnica i oblijom postavom uz intenzivnije upuhivanje zraka) uočeno je da se oblijom postavom usnica u kombinaciji s dovoljnom količinom zraka postiže bolja kvaliteta tona. Uz spomenuto, primijećena je i zanimljiva činjenica pri sviranju tona  $g_2$  u tihoj dinamici. Uz manju prisutnost zraka, ali oblijom postavom usnica postignuta je bolja kvaliteta tona. Promatranjem utjecaja brzine zraka na ton može se zaključiti kako pretjerano upuhivanje velike količine zraka u instrument ne mora nužno značiti i bolju kvalitetu tona. Iz daljnje analize rezultata istraživanja došli smo do spoznaje da posebnu pozornost treba pridati odabiru usnika. Usnici različitih karakteristika različito utječu na boju instrumenta i kvalitetu tona. Ovim istraživanjem uočeno je kako dubina usnika utječe na boju tona. Plići usnici rezultiraju svjetlijom bojom, dublji, tamnijom. Osim utjecaja dubine čašice usnika na boju tona, pri odabiru usnika valja skrenuti pozornost i na širinu grla usnika. Ukoliko se većom količinom zraka želi postići bolja kvaliteta tona, treba pripaziti da širina grla usnika bude dovoljna za upuhnuti zrak te ga neometano može proslijediti dalje u usnu cijev. Dodatno, iz dva različita položaja mikrofona tijekom snimanja može se zaključiti kako rog snimljen s pozicije mikrofona koji se nalazi s prednje strane instrumenta prirodnije zvuči.

Ovaj rad predstavlja temelj za daljnje analize i istraživanja. Svrha ovog rada je upoznati učenike i profesore s rezultatima dobivenim analizom istraživanja, odnosno dati uvid u čimbenike koji utječu na kvalitetu i dinamiku tona kako bi ih primijenili u svrhu poučavanja ili vlastitog napredovanja.



## 6. Literatura

- 1) Hartmann, William M. *Principles of Musical Acoustics*. New York: Springer, 2013.
- 2) Meyer, Jürgen. *Acoustics and the Performanse of Music*. New York: Springer, 2009.
- 3) Olson, Harry F. *Music, Physics, and Engineering*, Second Edition. New York: Dover Publications, Inc., 1967.
- 4) Plitnik, George R., Lawson, Bruce A. „An Investigation of correlations between geometry, acoustic variables, and psychoacoustic parameters for French horn mouthpieces.“ *The Journal Oof the Acoustical Society of America*, 106, 1999, 2, str. 1111-1123.
- 5) Rossing, Thomas D.; Fletcher, Neville H. *Principles of Vibration and Sound*. New York: Springer-Verlag, 2004.
- 6) Schmidt-Jones, Catherine. *Understanding Your French Horn*. Huston: Rice University, 2008.
- 7) Shroyer, Kathrin E. *Variation of French Horn Timbre over the Frequency and Intensity Range of the Instrument*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- 8) Thompson, Endy. *A Study of French Horn Harmonics*. St. Albans: Institut of acoustics, 2010.
- 9) Tomašek, Andrija; Antić, Branka. Rog. U: Kovačević, Krešimir (gl. ur.). *Muzička enciklopedija*, 3. svezak. Zagreb, Jugoslavenski leksikografski zavod, 1977, str. 216-217.