

# Projektiranje tonskog studija i tonske režije u glazbenim školama

---

Kopi, Ema

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:116:910490>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
MUZIČKA AKADEMIJA  
VIII. ODSJEK ZA GLAZBENU PEDAGOGIJU

EMA KOPI

**PROJEKTIRANJE TONSKOG STUDIJA I  
TONSKE REŽIJE U GLAZBENIM ŠKOLAMA**

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
MUZIČKA AKADEMIJA  
VIII. ODSJEK ZA GLAZBENU PEDAGOGIJU

**PROJEKTIRANJE TONSKOG STUDIJA I  
TONSKE REŽIJE U GLAZBENIM ŠKOLAMA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

Studentica: Ema Kopi

Ak.god. 2021/2022.

ZAGREB, 2022.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILO MENTOR

prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

U Zagrebu, \_\_\_\_\_

Diplomski rad obranjen \_\_\_\_\_

POVJERENSTVO:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU  
KNJIŽNICI MUZIČKE AKADEMIJE SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

## PREDGOVOR

Ovim putem želim zahvaliti mentoru prof. dr. sc. Kristianu Jambrošiću, prije svega, na pruženoj prilici i ukazanom povjerenju, razumijevanju, strpljenju te, naposljetku, savjetima i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Posebnu zahvalu želim iskazati svojoj obitelji koja je uvijek bila uz mene, koja mi je omogućila školovanje u drugom gradu i veliko hvala na bezuvjetnoj podršci da uspijem u onome što volim raditi.

*Wenn du spielst, kümmere dich nicht darum, wer dir zuhört.<sup>1</sup>*

(Kada sviraš, ne brini o tome tko te sluša.)

Robert Schumann

---

<sup>1</sup> Izvor: [https://www.schumann-zwickau.de/de/04/robert/haus\\_lebensregeln.php](https://www.schumann-zwickau.de/de/04/robert/haus_lebensregeln.php) (Pristupljeno: 6. veljače 2022.)

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad obuhvaća područje glazbene akustike. Cilj rada je projektirati i dizajnirati optimalan i pogodan tonski studij namijenjen za glazbene škole. Riječ je o tonskom studiju koji zahtijeva dvije tehnološke prostorije za produkciju zvuka: prostorija za snimanje i kontrolna soba (tzv. režija). Postupak projektiranja tonskog studija prikazan je kroz objašnjavanje nužnih osnova i potrebnog znanja za dizajn tonskog studija. Na samome početku rada uzeto je u obzir osnovno znanje o karakteristikama zvuka, širenju zvuka te ponašanju zvuka u zatvorenom prostoru. Razumijevanje tih osnova ključno je za proces izgradnje tonskog studija na pravilan način. Pri projektiranju tonskog studija težnja je ostvariti čistu i realnu zvučnu sliku bez ikakvih izobličenja što bi ukazivalo na to da su prostorije kvalitetno projektirane i adekvatno akustički tretirane. Time se zapravo može otkriti kako nepoštivanje pravila struke kod dizajna i izgradnje takvih prostorija vodi gotovo neizbježno do problema koji mogu uzrokovati izobličenje zvuka prilikom izvođenja i slušanja. Potrebno je unaprijed znati na koji način izbjeći moguće pojavne probleme, te ih ujedno i riješiti ukoliko se pojave tijekom procesa projektiranja i izgradnje. S obzirom da se u radu obrađuje tonski studio u glazbenoj školi, treba imati na umu da bi soba za snimanje trebala biti dovoljno velika kako bi u nju stao zbor koji prosječno sadrži tridesetak učenika, a jednako bi tako trebao biti pogodan i za smještaj školskog orkestra koji broji petnaestero učenika sa svojim instrumentima. Naposljetku, napravljen je i kratki osvrt na potrebnu osnovnu opremu bez koje tonski studio ne bi mogao funkcionirati.

Ključne riječi: glazbena akustika, dizajn, kontrolna soba, soba za snimanje, tonski studio, audio oprema, glazbena škola

## SUMMARY

This diploma thesis covers the field of musical acoustics. The aim of the thesis is to project and design an optimal and suitable music studio intended for music schools. It is about a music studio that requires two technological rooms for sound production: a recording room and a control room. The process of designing a music studio is presented by explaining the necessary basics and the necessary knowledge for designing a music studio. The basic knowledge about the characteristics of sound, sound propagation and the behavior of sound in

enclosed spaces was taken into account at the very beginning of the thesis. Understanding these basics is the key to the process of building a music studio in the right way. When designing a music studio, the aim is to achieve a clean and realistic sound image without any distortions, which would indicate that the rooms are well designed and adequately acoustically treated. This may in fact reveal that non-compliance with the rules of the profession in the design and construction of such premises leads almost inevitably to problems that can cause sound distortion during performance and listening. It is necessary to know in advance how to avoid possible problems, and at the same time solve them if they occur during the design and construction process. Since the thesis deals with the music studio in the music school, it should be considered that the recording room should be large enough to accommodate a choir containing an average of thirty students, and should also be suitable for the school orchestra which counts fifteen students with their instruments. Finally, a brief overview of the necessary basic equipment was made without which the music studio could not function.

Key words: musical acoustics, design, control room, recording room, music studio, audio equipment, music school

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>2. ZVUK</b> .....	<b>15</b>
2. 1. Karakteristike zvuka .....	17
2. 1. 1. Brzina zvuka .....	17
2. 1. 2. Amplituda .....	19
2. 1. 3. Valna duljina .....	19
2. 1. 4. Frekvencija.....	21
2. 1. 5. Faza zvučnog vala.....	23
2. 1. 6. Harmonička struktura.....	24
2. 2. Osjet sluha .....	26
2. 2. 1. Anatomija i princip funkcioniranja uha .....	27
2. 2. 2. Slušno područje, prag čujnosti i prag boli .....	29
2. 2. 3. Izloženost buci .....	30
<b>3. AKUSTIKA U ZATVORENOM PROSTORU</b> .....	<b>33</b>
3. 1. Refleksija .....	34
3. 2. Apsorpcija.....	35
3. 3. Difuzija i fokusiranje .....	37
3. 4. Difrakcija ili ogib.....	37
3. 5. Vrijeme odjeka .....	39
3. 6. Problematika .....	40
3. 6. 1. Kritične površine.....	40
3. 6. 2. Rane refleksije .....	41
3. 6. 3. Stojni valovi .....	41
3. 6. 4. Lepršajuća jeka .....	42
3. 6. 5. Češljasti filter .....	43
<b>4. PROSTORIJE</b> .....	<b>45</b>
4. 1. Funkcija prostorija .....	45
4. 2. Veličina prostorija .....	45
4. 3. Raspored prostorija.....	47
<b>5. ELEKTRIČNE INSTALACIJE I HVAC SUSTAV</b> .....	<b>48</b>



<b>6. ZVUČNA IZOLACIJA.....</b>	<b>52</b>
6. 1. Konstrukcija poda, zidova i stropa .....	54
6. 2. Konstrukcija vrata i prozora .....	58
<b>7. VRSTE AKUSTIČKE OBRADJE .....</b>	<b>62</b>
7. 1. Apsorberi .....	62
7. 1. 1. Porozni apsorberi .....	62
7. 1. 2. Membranski i rezonatorski .....	64
7. 1. 3. Kutni apsorberi.....	65
7. 2. Difuzori.....	66
7. 3. Kombinirani apsorberi i difuzori .....	67
7. 4. Položaji apsorbera i difuzora u prostoriji .....	68
<b>8. STUDIJSKA OPREMA.....</b>	<b>73</b>
<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAFIJA.....</b>	<b>75</b>

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Brzina zvuka u različitim medijima .....	18
Tablica 2: Prikaz zvučnog tlaka i razine zvučnog tlaka različitih izvora zvuka.....	31
Tablica 3: Prikaz različitih razina zvučnog tlaka i dopušteno vrijeme njihovom izlaganju.....	31
Tablica 4: Koeficijenti apsorpcije različitih materijala ovisno o frekvenciji zvučnog vala .....	36

## POPIS SLIKA

Slika 1: Prikaz širenja energije kao niz impulsa kroz oprugu .....	15
Slika 2: Gibanje molekula i širenje zvučnog vala u zraku .....	16
Slika 3: Promjene u tlaku zraka prilikom reproduciranja zvuka iz zvučnika .....	16
Slika 4: Amplituda zvučnog vala .....	19
Slika 5: Valna duljina .....	20
Slika 6: Frekvencijska područja prikazana u Hz (vodoravno) .....	22
Slika 7: Osnovne frekvencije tonova na primjeru klavijature i frekvencijski raspon instrumenata .....	22
Slika 8: Vremenski pomaci faze.....	23
Slika 9: Interakcija dvaju valova.....	24
Slika 10: Osnovni ton i njegovi harmonici u valnom obliku te njihov rezultat složenog vala.....	25
Slika 11: Harmonici.....	25
Slika 12: Osnovni ton (a) i njegovi harmonici na žici.....	26
Slika 13: Dijelovi ljudskog uha .....	28
Slika 14: Prikaz ljudskog uha s „odmotanom“ pužnicom .....	28
Slika 15: Područje infrazvuka, čujnog frekvencijskog područja i ultrazvuka prikazanim u Hz .....	29
Slika 16: Slušno područje (osjenčano područje), prag čujnosti (krivulja A) i prag boli (krivulja B)....	30
Slika 17: Smanjenje zvučnog tlaka u zatvorenom prostoru .....	33
Slika 18: Refleksija zvuka u zatvorenom prostoru.....	34
Slika 19: Apsorpcija energije zvuka.....	35
Slika 20: Fokusanje (A) i difuzija zvuka (B) .....	37
Slika 21: Difrakcija zvuka različitih frekvencija.....	38
Slika 22: Difrakcija zvuka visokih (A) i niskih frekvencija (B) u odnosu na zvučnu barijeru .....	38
Slika 23: Difrakcija dvaju izvora zvuka jednakih frekvencija na manjoj (A) i većoj prepri (B).....	39
Slika 24: Stojni valovi .....	42
Slika 25: Lepršajuća jeka .....	43
Slika 26: Signal češljastog filtra u grafu.....	44
Slika 27: Skica tlocrta tonskog studija .....	46
Slika 28: Primjer tlocrta raspoređenih prostorija u tonskom studiju .....	47

Slika 29: Klasični električni razvodni ormar.....	49
Slika 30: Primjer izolacije HVAC sustava u strojarnici.....	51
Slika 31: Primjeri instalacije sa zajedničkim ventilom (A) i odvojenim ventilima (B).....	51
Slika 32: Sustav uzemljene mase-opruga-masa .....	55
Slika 33: Plutajući zid - sustav uzemljene mase-opruga-masa u praksi.....	56
Slika 34: Soba za udaraljke temeljena na koncepciji „kutija-u-kutiji“.....	56
Slika 35: Konstrukcija poda .....	57
Slika 36: Konstrukcija stropa .....	58
Slika 37: Konstrukcija vrata.....	59
Slika 38: Konstrukcija prozora.....	61
Slika 39: Primjer poroznih apsorbera od poliuretanske pjene.....	63
Slika 40: Rezonatorski apsorberi.....	65
Slika 41: Kutni apsorberi.....	66
Slika 42: Difuzor .....	66
Slika 43: Rotirajući element.....	67
Slika 44: Kombinirajući panel.....	68
Slika 45: Novi tlocrt kontrolne sobe.....	71
Slika 46: Konačna skica tlocrta tonskog studija.....	72

## LISTA SIMBOLA

### Fizikalne veličine

$\Sigma A$	ukupna apsorpcija (m <sup>2</sup> )
$A$	apsorpcija (m <sup>2</sup> )
$c$	brzina zvuka (m/s)
$E$	energija (J)
$f$	frekvencija (Hz)
$p$	tlak zraka ili zvučni tlak (Pa)
$S$	površina (m <sup>2</sup> )
SPL	razina zvučnog tlaka (dB)
$T_{60}$	vrijeme odjeka (s)
$v$	brzina širenja zvučnog vala kroz medij (m/s)
$V$	volumen (m <sup>3</sup> )
$Z$	akustička impedancija (Pa·s/m <sup>3</sup> )
$\alpha$ (alfa)	koeficijent apsorpcije
$\lambda$ (lambda)	valna duljina (m)
$\rho$ (ro)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )

### Mjerne jedinice

%	postotak
°C	celzijev stupanj
cm	centimetar
dB	decibel
dBA	decibel uz primijenjeni A-težinski filter
h	sat
hPa	hektopaskal
Hz	herc
kg	kilogram
kHz	kiloherc
km	kilometar
m	metar

## **Mjerne jedinice**

$m^2$  metar kvadratni

$m^3$  metar kubični

ms milisekunda

mm milimetar

Pa paskal

s sekunda

$\mu Pa$  mikropaskal

# 1. UVOD

Tijekom studija na Muzičkoj akademiji Sveučilišta u Zagrebu na odsjeku Glazbene pedagogije imala sam priliku upoznati glazbu iz drugačije perspektive zahvaljujući modulu *Ton majstor* s pripadajućim kolegijima *Glazbena akustika*, *Elektroakustika i audiotehnika* te *Snimanje i obrada zvuka* pod vodstvom doc. dr. sc. Marka Horvata i nositeljem modula prof. dr. sc. Kristiana Jambrošića, ujedno i mentora ovog rada. Inspirirana stečenim znanjima na spomenutim kolegijima odlučila sam se dodatno školovati i približiti se području audio inženjeringa i glazbene produkcije. Zasad kratkotrajno stečeno iskustvo na edukaciji potaknulo me je da proširim svoje znanje na području glazbene akustike te shvatim težinu i složenost pothvata kao što je projektiranje tonskog studija, a samim time i produbim znanje o svemu onome što se zvukovno događa unutar prostorija u studiju.

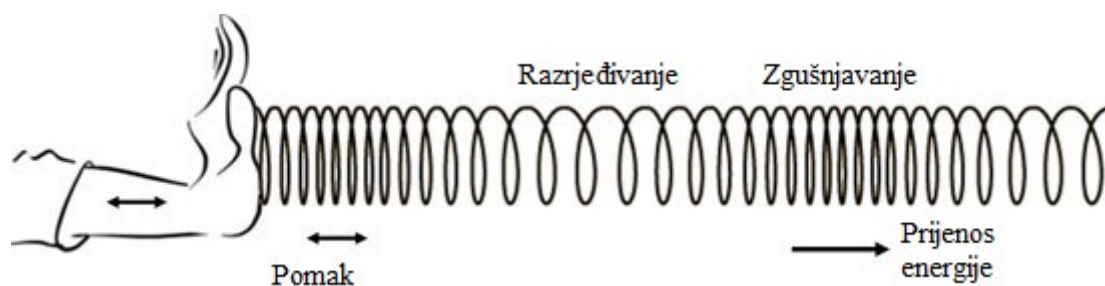
Nakon uvoda, u diplomskom radu slijedi drugo poglavlje koje je posvećeno teorijskom dijelu koji obuhvaća osnovno znanje o prirodi zvuka što je neizbježno u bilo kojem području glazbene produkcije i glazbene akustike. Ono je temelj ne samo za snimanje i obradu zvuka, već i za proces projektiranja kako manjeg kućnog tonskog studija tako i velikog profesionalnog tonskog studija. U trećem poglavlju pojašnjeno je ponašanje zvuka u zatvorenom prostoru koje svakodnevno susrećemo pa samim time i u tonskom studiju. Osviješteno je kakvi problemi mogu nastati određenim ponašanjem zvuka u prostoru i utjecati na rad u tonskom studiju. Četvrto poglavlje pojašnjava funkcije prostorija o kojima ovisi kako će izgledati dizajn tonskog studija. Pojašnjava i potrebne dimenzije prostorija o kojima uvelike ovisi akustika u prostoru te utječe na možebitne probleme u raspodjeli zvučnog polja. Ovo poglavlje dotiče se i tematike o tome na koji se način prostorije tonskog studija mogu međusobno rasporediti. Peto poglavlje posvećeno je električnim instalacijama i sustavom grijanja, klimatizacije i ventilacije. Ovakvi sustavi imaju tendenciju stvaranja buke koja neupitno može ugrožavati rad u tonskom studiju. Ovo je poglavlje stoga posvećeno općenitim savjetima o tome na koje se sve načine pažljivom ugradnjom pojedinih elemenata sustava može pospješiti reduciranje ometajuće buke. Šesto poglavlje namijenjeno je konstrukciji zvučne izolacije čija se neophodna potreba ne dovodi u pitanje. Opisano je na koje se načine u praksi vrši potrebna konstrukcija zvučne izolacije svih pregradnih elemenata tonskog studija. U sedmom poglavlju opisuju se vrste akustičke obrade koje se koriste u tonskom studiju koje pomažu u poboljšanju akustičke slike u prostoru. Osim toga, pojašnjeno je i na kojim bi se mjestima unutar prostora tonskog studija trebale nalaziti određene vrste akustičke obrade čime bi pospješili rješavanje neizbježnih problematika sa

zvukom. Posljednje, osmo poglavlje, posvećeno je kratkom osvrtu na potrebnu osnovnu studijsku opremu i audio opremu bez koje niti jedan tonski studio ne bi mogao funkcionirati.

## 2. ZVUK

U našem svakodnevnom iskustvu, zvuk redovito doživljavamo kao val koji se širi zrakom (Long, 2006). Zrak vrši određeni atmosferski pritisak na svaku površinu<sup>2</sup>. Tlak zraka ( $p$ ), kojemu je mjerna jedinica Paskal (Pa), nije uvijek konstantan. On je promjenjiv ovisno o nadmorskoj visini i količini vlage u zraku, no 1999. godine odlučeno je da će se kao vrijednost standardiziranog atmosferskog tlaka zraka uzeti vrijednost 100 000 Pa, iliti 1000 hPa (hektopaskala)<sup>2</sup>. Taj iznos uzima se kao referentna vrijednost, odnosno „dogovorno odabrana vrijednost neke fizikalne veličine“<sup>3</sup>.

Zrak je ispunjen mnogobrojnim molekulama i to više od milijun molekula po kubnom inču (Everest i Pohlmann, 2009). Kada su potaknute vibracijom, molekule se počinju gibati. Svojim gibanjem one mijenjaju standardni atmosferski tlak. Način na koji se molekule u zraku gibaju, u velikoj brzini, jest u smjeru naprijed i natrag, poput opruge i prenose jedna drugoj akustičku energiju (slika 1) (Bartlett i Bartlett, 2009; Everest i Pohlmann, 2009; Kleiner i Tichy, 2014; Long, 2006). Ponavljajući gibanje jedna prema drugoj, zatim jedna od druge vraćajući se u svoju prvotnu poziciju, međusobno se zgušnjavaju i razrjeđuju (slika 2), stvarajući tako zvučne valove. Tamo gdje su molekule međusobno zgušnjene atmosferski tlak zraka je toga trenutka veći, a gdje su molekule međusobno razrijeđene tlak je niži od svoje referentne vrijednosti (Bartlett i Bartlett, 2009; Everest i Pohlmann, 2009; Kleiner i Tichy, 2014; Long, 2006). Zvučni valovi grafički se prikazuju valnim oblikom koji sadržava brjegovе (zgušnjavanje molekula) i dolove (razrjeđivanje molekula) što također prikazuje slika 2.



Slika 1: Prikaz širenja energije kao niz impulsa kroz oprugu

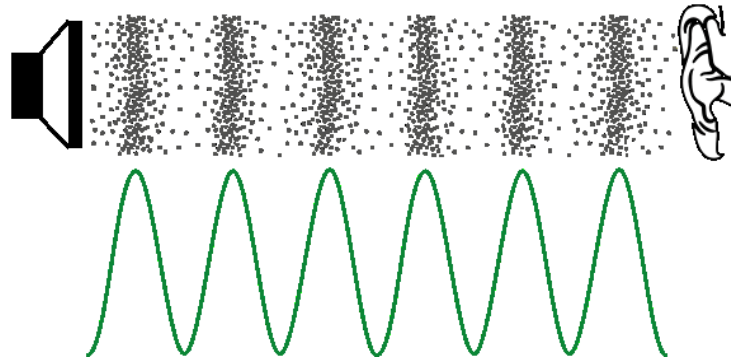
Izvor: <https://www.fp7-restarts.eu/images/experiments/noise/slinky.jpg>

(pristupljeno: 19. siječnja 2022.)

<sup>2</sup> Atmosferski tlak. Wikipedija. Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Atmosferski\\_tlak#cite\\_ref-2](https://hr.wikipedia.org/wiki/Atmosferski_tlak#cite_ref-2) (Pristupljeno: 1. rujna 2021.)

<sup>3</sup> referentna vrijednost. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69730> (Pristupljeno: 1. rujna 2021.)





Slika 2: Gibanje molekula i širenje zvučnog vala u zraku

Izvor: [https://www.seekpng.com/png/full/541-5417767\\_sound-wave-demonstrating-compression-and-rarefaction-calligraphy.png](https://www.seekpng.com/png/full/541-5417767_sound-wave-demonstrating-compression-and-rarefaction-calligraphy.png)

(pristupljeno: 19. siječnja 2022.)

Crich (2010) širenje zvučnog vala pomoću molekula zraka opisuje na, nama jednom od prisnijih primjera izvora zvuka, zvučniku kada reproducira zvuk (slika 3). Zvučnik dok je u stanju mirovanja, odnosno, kada ne reproducira nikakav zvuk, nije u mogućnosti inicirati promjene u tlaku zraka i molekule zraka miruju (a). U trenutku kada se kroz zvučnik pusti bilo kakav signal, molekule su tada potaknute vibracijom membrane zvučnika zbog čega se počinju gibati i mijenjaju tlak zraka međusobnim zgušnjavanjem (b) i razrjeđivanjem (c). Upravo takvim cikličkim ponavljanjem (d) formiraju se i kreiraju zvučni valovi (Crich, 2010). Zahvaljujući prijenosu akustičke energije s jedne molekule na drugu, postoji zvuk (Everest i Pohlmann, 2009).



Slika 3: Promjene u tlaku zraka prilikom reproduciranja zvuka iz zvučnika (Izvor: Crich, 2010, str. 12)

S obzirom da zvuk putuje uobičajenim sredstvom kakav je upravo zrak, lako je ustvrditi da zvuk ne putuje niti jednim drugim sredstvom (Everest i Pohlmann, 2009). No, kada bi

primjerice u daljini, na željezničke tračnice bio bačen kamenčić, zvuk koji bismo čuli dolazio bi i putem zraka i putem tračnica. Jednako tako, zvuk se također može zamijetiti i nakon što proputuje tisuće kilometara kroz ocean. Stoga, zvuk, osim što je provodljiv u plinovima, poput zraka, provodljiv je ujedno i u krutim tvarima i tekućinama. Sredstva kojima zvuk putuje nazivaju se elastičnim medijima (Everest i Pohlmann, 2009). Kada je u planu izgradnja profesionalnog studija, važno je znati, posebice po pitanju zvučne izolacije, da zvuk ne putuje jednakom brzinom svakim medijem te da se dio zvuka može apsorbirati u medij, a dio reflektirati natrag u prostoriju, što će više biti pojašnjeno u kasnijim poglavljima. Od svih postojećih medija, zvuk jedino ne može biti prisutan u vakuumu, posebice u svemiru gdje je vakuum gotovo savršen (Everest i Pohlmann, 2009). Riječ „vakuum“ latinskoga je porijekla (lat. *Vacuum*) što u prijevodu znači „prazan prostor“, a u praznom prostoru koji ne sadrži zrak niti druge tvari<sup>4</sup>, zvuk ne može postojati, jer zvuk bez elastičnog medija nema sposobnost širiti se (Everest i Pohlmann, 2009).

## 2. 1. Karakteristike zvuka

Glazbena se akustika na prvi pogled, prema Harrisu (2009), u isto vrijeme može činiti zanimljivom, zbudjujućom ili se nije potrebno brinuti zbog nje, ali njezino poznavanje je ključno za učinkovitu akustičku obradu prostorije u studiju. Na početku drugog poglavlja upoznati smo sa širenjem zvuka i postojanjem zvučnih valova. Kako bismo upoznali glazbenu akustiku, potrebno je i razumjeti što to obilježava zvuk i zvučne valove.

### 2. 1. 1. Brzina zvuka

Opće je poznato da je brzina zvuka značajno manja od svjetlosne (Everest i Pohlmann, 2009). Brzina svjetlosti približno iznosi 300 000 kilometara u jednoj sekundi (km/s), dok je zvuku, kako bi prešao samo jedan kilometar, potrebno više sekundi. Sama činjenica da je zvuk sporiji od svjetla može se vrlo jednostavno potvrditi. U bilo kojem razdoblju života, prilikom olujnog nevremena, svatko je barem jednom pokušao izmjeriti udaljenost između sebe i mjesta gdje se pojavila munja. Od trenutka kada munja sijevne počinju se brojati sekunde do pojave zvuka grmljavine, jer se zna da gromoviti zvuk dolazi kasnije (Everest i Pohlmann, 2009). Iz

---

<sup>4</sup> *vakuum*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Izvor: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63674> (Pristupljeno: 3. rujna 2021.)

osobnog iskustva uvjerena sam kako se popriličan broj ljudi vodi pravilom koji nalaže: ovisno o tome koliko sekundi je izbrojeno, toliko je kilometara udaljeno mjesto udarca munje. Naime, ovakvo vođenje obično nije točno. Pravilnije je pri izračunu koristiti prosječnu brzinu zvuka u zraku. Everest i Pohlmann (2009) objašnjavaju kako se zvuk u svakom mediju širi određenom brzinom, ovisno o gustoći medija i određenim faktorima. „Što je molekularna struktura gušća, to je molekulama lakše prenijeti zvučnu energiju.“ (Everest i Pohlmann, 2009, str. 6). Prema tome, zvuk se brže širi ako je medij gušći i obrnuto. Primjeri gušćih medija u odnosu na zrak su voda (oko 1494 m/s), čelik (oko 5090 m/s) i ostali mediji koji su navedeni u tablici 1. Osim gustoće medija, postoji nekoliko faktora koji utječu na brzinu zvuka, primjerice, temperatura i vlaga u zraku. S porastom temperature i količinom vlage u zraku povećava se i brzina zvuka. No, kao referentnu vrijednost odabrana je vrijednost brzine zvuka u idealnim uvjetima u zraku, odnosno pri sobnoj temperaturi od 20°C, koja iznosi (Bartlett i Bartlett, 2009; Everest i Pohlmann, 2009; Gervais, 2011; Harris, 2009; Long, 2006; Newell, 2008):

$$c = 344 \text{ m/s}$$

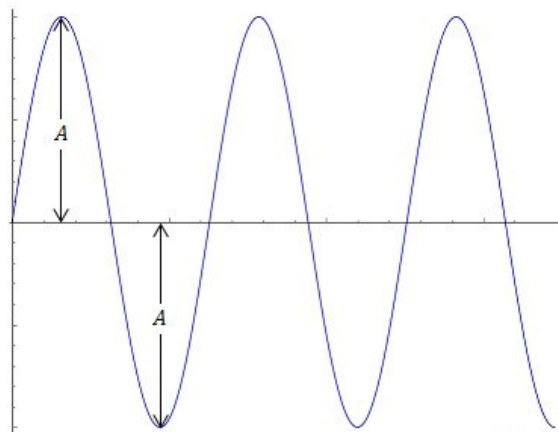
Everest i Pohlmann (2009) ujedno napominju kako je potrebno razlikovati brzinu zvuka od brzine molekula. Autori navode slijedeće: „Brzina zvuka određuje koliko se brzo zvučna energija kreće kroz medij“ (str. 6) te istovremeno definira koliku udaljenost zvuk prijeđe u jedinici vremena, dok brzina molekula određuje glasnoću (intenzitet) zvuka.

Tablica 1: Brzina zvuka u različitim medijima (Izvor: Long (2006) prema Beranek i Ver (1992) i Kinsler i Frey (1962))

Medij	Brzina zvuka (m/s)
vulkanizirana guma	54
zrak (0°C)	331
para (100°C)	405
pluta	500
olovo	1230
beton	3400
bakar	3560
hrast	4000
željezo	5130
staklo	5200
gips ploča (1.27 cm do 5.08 cm)	6800

## 2. 1. 2. Amplituda

Amplituda označava razinu zvučnog tlaka, odnosno glasnoću (Harris, 2009). Razina zvučnog tlaka označava se kraticom SPL koja je nastala prema engleskome izrazu *sound pressure level* (u prijevodu: razina zvučnog tlaka). Gervais (2011), drugim riječima opisuje kako amplituda predstavlja razliku između najvišeg i najnižeg tlaka unutar zvučnog vala u odnosu na trenutni atmosferski tlak. Jednostavnije rečeno, amplituda prikazuje koliko su molekule promijenile atmosferski tlak i mjeri se u paskalima (Pa). Slika 4 prikazuje označene amplitude te najvišu i najnižu razinu zvučnog tlaka. Također, trenutni atmosferski zrak (vertikalna os) prikazan je u vrijednosti nula (0) zbog jednostavnijeg prikaza pri čemu tlak iznad nule sadrži pozitivnu vrijednost, dok tlak ispod nule sadrži negativnu vrijednost (Gervais, 2011).



Slika 4: Amplituda zvučnog vala

Izvor: <https://pic.weblogographic.com/img/news/295/difference-between-amplitude.jpg>

(pristupljeno: 19. siječnja 2022.)

## 2. 1. 3. Valna duljina

Poznato je kako se zvuk širi i putuje u obliku zvučnog vala. Svakom zvučnom valu moguće je izračunati udaljenost između nekih od njegova dva vrha ili, slikovito rečeno, susjedna dva „brijega“ (Bartlett i Bartlett, 2009; Gervais, 2011). Ta udaljenost naziva se valna duljina. Karakteristične valne duljine na visokim frekvencijama vrlo su kratke, dok su niskim frekvencijama valne duljine uobičajeno dugačke (Everest i Pohlmann, 2009). Udaljenost ne mora nužno označavati samo vrhove dvaju „brjegov“, već se udaljenost može definirati

između bilo koje dvije jednako udaljene točke vala s istom fazom (Bartlett i Bartlett, 2009; Everest i Pohlmann, 2009). Najčešće se, zbog jednostavnosti, uzimaju vrhovi dvaju „brjegov“a, vrhovi dvaju „dola“ ili početak jednog „dola“ i kraj susjednog „brijega“. Sva tri načina prikazana su na slici 5. Valna duljina, drugim riječima, prikazuje koliku je udaljenost valu potrebno prijeći kako bi završio jedan ciklus (Crich, 2010; Everest i Pohlmann, 2009; Harris, 2009). Jedan ciklus sinusnog vala, koji se još naziva i *periodom*, predstavlja upravo jedan „brijeg“ i jedan „dol“, prema tome, na slici 5 moguće je vidjeti kako su u grafu prikazana dva ciklusa jednake valne duljine. Valna duljina označava se grčkim slovom  $\lambda$  (lambda), a formula glasi (Bartlett i Bartlett, 2009; Crich, 2010; Everest i Pohlmann, 2009; Gervais, 2011; Kleiner, 2012; Newell, 2008; Long, 2006):

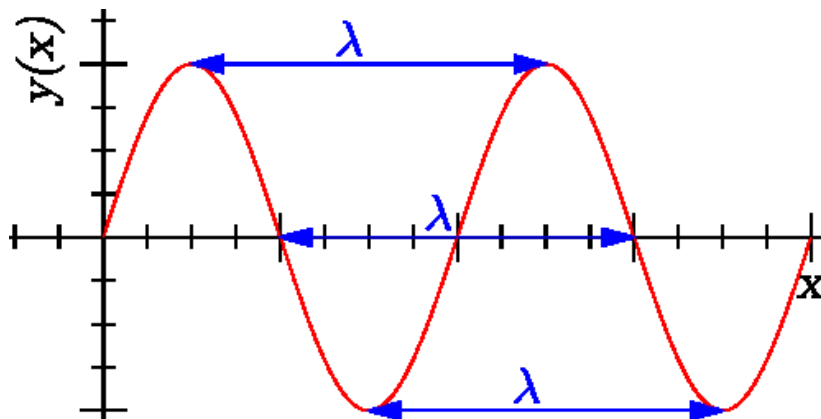
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

pri čemu je:

$\lambda$  = valna duljina (m),

$c$  = brzina zvuka (m/s) (344 metara u sekundi pri temperaturi od 20°C),

$f$  = frekvencija (Hz).



Slika 5: Valna duljina

Izvor: <https://www.ijunoon.com/sw-store/images/dictionary/wavelength.png>

(pristupljeno: 19. siječnja 2022.)

## 2. 1. 4. Frekvencija

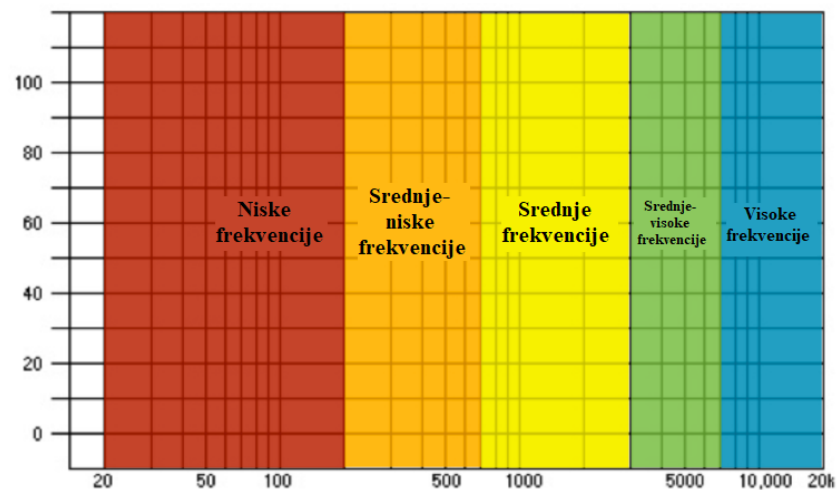
Frekvencija i valna duljina dvije su karakteristike zvuka koje su u međuodnosu (Everest i Pohlmann, 2009). Frekvencija se označava slovom  $f$ , izražava se u hercima (Hz), a određuje ju broj ponavljanja valnog oblika u jednoj sekundi (Everest i Pohlmann, 2009). Gervais (2011), pomoću žičanog instrumenta objašnjava to na sljedeći način: frekvencija najniže žice četverožičanog električnog basa iznosi 41.2 Hz. To znači da 41.2 vala putuju na udaljenosti od 344 metara u jednoj sekundi. Također, primjerice, zvuk frekvencije 1000 Hz sadržava 1000 valova koji prelaze udaljenost od 344 metara u jednoj sekundi.

U glazbi je svakako poznata frekvencija od 440 Hz koja predstavlja osnovnu frekvenciju tona  $a_1$ , a prema kojoj se štimaju razni instrumenti. Tom frekvencijom titra, primjerice, i glazbena vilica koja služi kao pomoć pri uštivanju raznih instrumenata ili *a cappella* vokalnih ansambala, a osim toga koristi se, primjerice, i u školama u eksperimentima na predmetu fizike za pokazivanje rezonancije<sup>5</sup>.

Postoji čitav frekvencijski spektar zvuka koji ljudski sluh može čuti, a koji se dijeli na nekoliko frekvencijskih područja (slika 6): niske frekvencije (crveno područje), srednje-niske frekvencije (narančasto područje), srednje frekvencije (žuto područje), srednje-visoke frekvencije (zeleno područje) i visoke frekvencije (plavo područje). S obzirom na spomenutu osnovnu frekvenciju 440 Hz tona  $a_1$ , moguće je zaključiti kako prema tome svaki ton sadržava svoju vlastitu osnovnu frekvenciju. Svaki instrument posjeduje vlastiti raspon, odnosno udaljenost između najdubljeg i najvišeg tona kojeg instrument može odsvirati, a također posjeduje i svoj frekvencijski raspon i moguće ga je uvrstiti u frekvencijski spektar (slika 7). Poznavanje frekvencijskog spektra i frekvencijskih raspona instrumenata od velike je važnosti pri odabiru adekvatne opreme tijekom pripreme ozvučavanja, u ovom slučaju školskog orkestra ili zbora u studiju te ujedno i pri obradi zvuka snimljenoga materijala.

---

<sup>5</sup> *glazbena vilica*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=70733> (Pristupljeno: 19. siječnja 2022.)

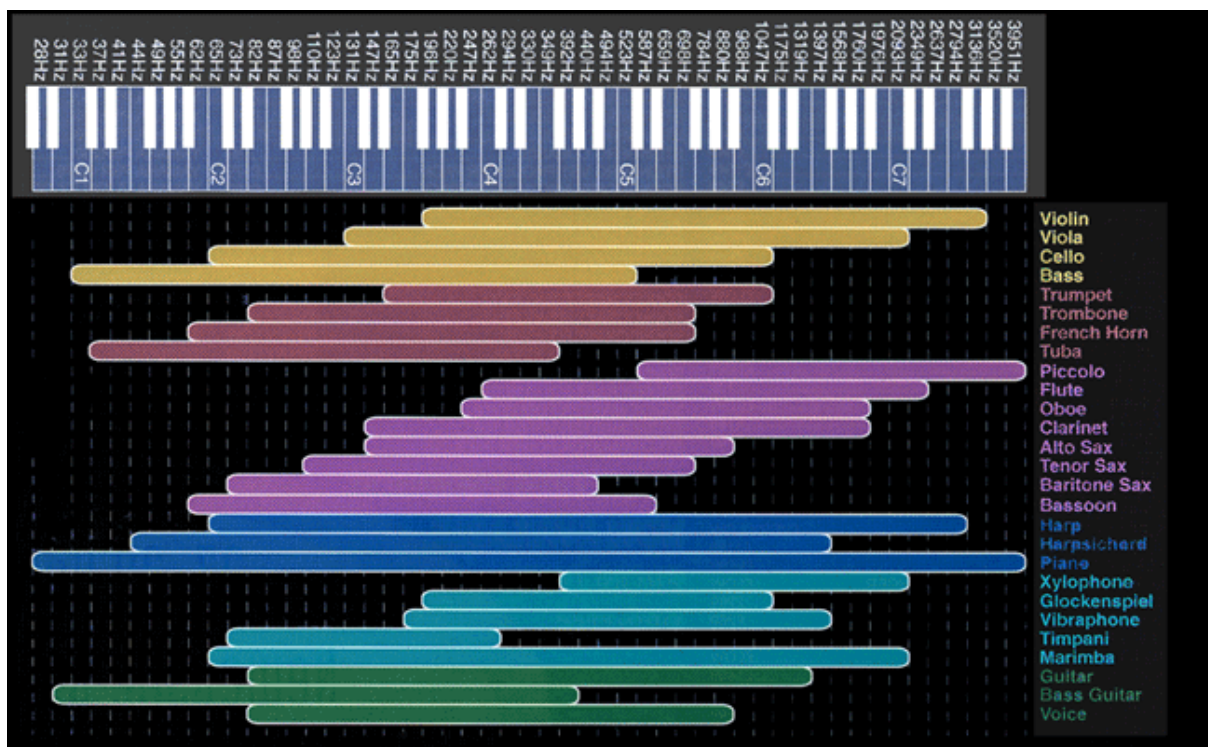


Slika 6: Frekvencijska područja prikazana u Hz (vodoravno)

Izvor:

[https://novaspire.files.wordpress.com/2016/01/figure\\_5\\_typical\\_descriptive\\_terms\\_for\\_various\\_frequency\\_range\\_s.png?w=750&h=443](https://novaspire.files.wordpress.com/2016/01/figure_5_typical_descriptive_terms_for_various_frequency_range_s.png?w=750&h=443)

(pristupljeno: 17. siječnja 2022)



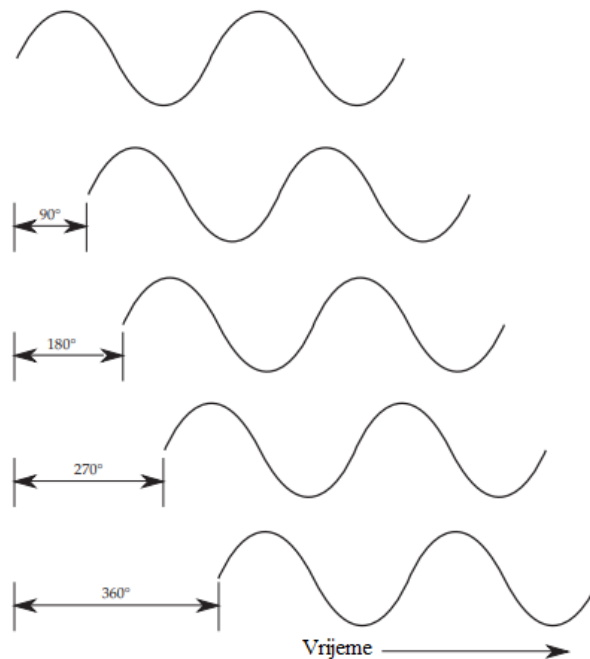
Slika 7: Osnovne frekvencije tonova na primjeru klavijature i frekvencijski raspon instrumenata

Izvor: <https://www.sined.nl/images/BasicMixing/7NotesFreq.gif>

(pristupljeno: 19. siječnja 2022)

## 2. 1. 5. Faza zvučnog vala

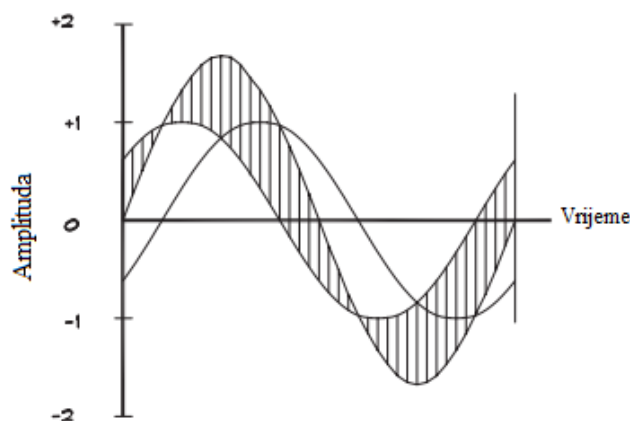
Faza je karakteristika zvuka koja prikazuje jesu li zvučni valovi međusobno usklađeni ili nisu. To se može provjeriti uspoređivanjem valnih oblika postavljajući ih jedan ispod drugoga ili jedan uz drugoga što je vidljivo na primjeru slike 8 (Long, 2006). Ukoliko zvučni valovi jednake frekvencije zajedno počinju u istoj točki ili ako im se vrhovi pogode u istom vremenskom trenutku, kaže se da su valovi *u fazi*. Ukoliko se njihovi vrhovi ne poklapaju ili ako valovi ne počinju zajedno u istoj točki, to znači da su vremenski pomaknuti jedan od drugoga. Takva pojava naziva se *fazni pomak* koji upućuje da valovi nisu u fazi. Ako su valovi tako pomaknuti da imaju u nekom trenutku istu amplitudu, ali suprotnog predznaka, onda kažemo da su valovi *u protufazi* (Long, 2006).



Slika 8: Vremenski pomaci faze (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 10)

Vremenski pomak zvučnog vala u odnosu na drugi val izražava se u stupnjevima od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ . S obzirom da svi valovi istodobno prolaze kroz isti prostor, među njima se odvija interakcija koja rezultira novim valovima drugačijih oblika. Drugim riječima, ti valovi se zbrajaju, odnosno zbrajaju se njihove amplitude. Stoga, ovisno o frekvencijama valova i njihovom međusobnom vremenskom pomaku, novi oblik zvučnog vala sadržavat će veću ili manju amplitudu. Slika 9 prikazuje interakciju dvaju zvučnih valova iste frekvencije s pomakom u fazi i njihov rezultat zbrajanja (osjenčani val).

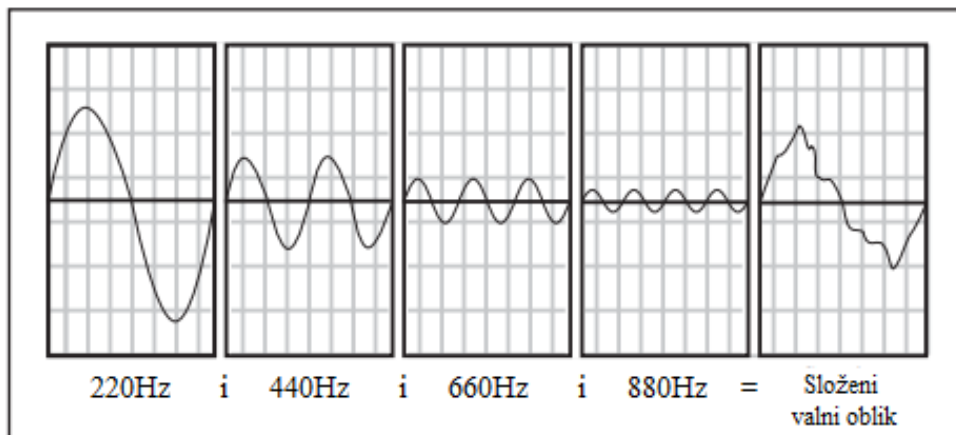




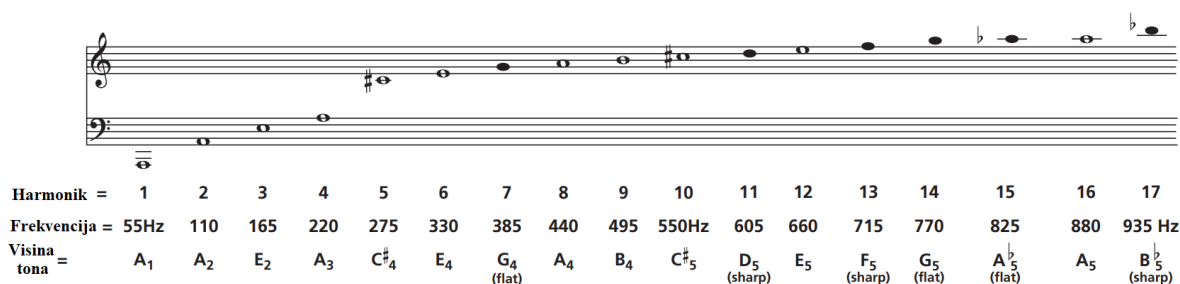
Slika 9: Interakcija dvaju valova (Izvor: Long, 2006, str. 48)

## 2. 1. 6. Harmonička struktura

Slušajući neki instrument uobičajeno je pomisliti kako u zvuku kojeg čujemo postoje samo osnovne frekvencije svakog odsviranog tona. No, u svakom zvuku, uz osnovnu frekvenciju tona, zapravo su prisutne još i više frekvencije, jer se spektar zvuka sastoji od osnovne frekvencije tona, njegovih harmonika i njegovih prizvuka (eng. *overtones*) (Moylan, 2007). Everest i Pohlmann (2009) pojasnili su da je svaki harmonik višekratnik osnovne frekvencije. Drugim riječima, drugi harmonik načinjen je od dva puta veće frekvencije u odnosu na osnovnu frekvenciju, treći harmonik načinjen je od tri puta veće frekvencije u odnosu na osnovnu frekvenciju, četvrti i peti harmonici načinjeni su od četiri i pet puta većih frekvencija u odnosu na osnovnu frekvenciju, itd. (slika 10) (Everest i Pohlmann, 2009). Svi harmonici, odnosno njihove „frekvencije pojačavaju važnost osnovne frekvencije (i odgovorni su za kvalitetu zvuka)“ (Moylan, 2007, str. 7). Slika 11 prikazuje na početku notnog crtovlja osnovni ton A1 i njegovu osnovnu frekvenciju 55 Hz, a svi slijedeći prikazani tonovi njegovi su harmonici. Prizvuci (eng. *overtones*) su sve ostale prisutne frekvencije u spektru zvuka koje nisu proporcionalno vezane s osnovnom frekvencijom kao što su harmonici (Moylan, 2007).

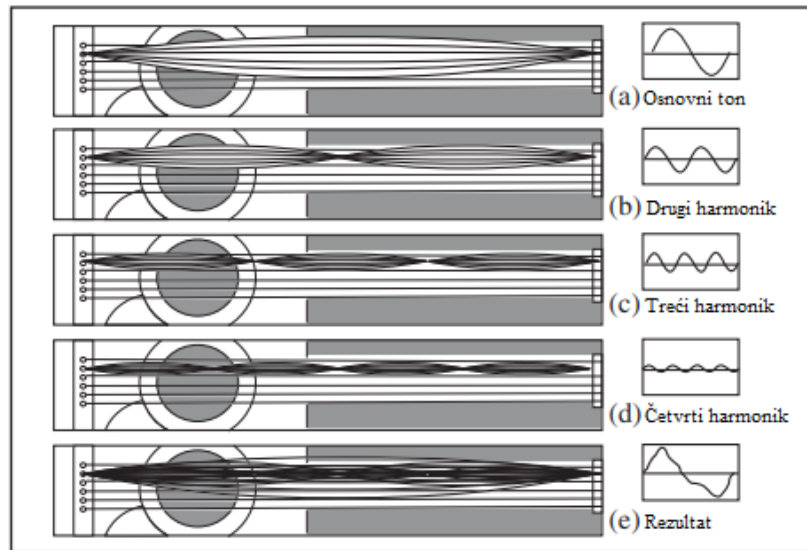


Slika 10: Osnovni ton i njegovi harmonici u valnom obliku te njihov rezultat složenog vala (Izvor: Crich, 2010, str. 15)



Slika 11: Harmonici (Izvor: Moylan, 2007, str. 8)

Crich (2010) pojam harmonika objašnjava koristeći instrument gitaru kao primjer. Titrajuća žica na gitari koja je pokrenuta trzalicom ili prstom, sastoji se od osnovnoga tona (osnovne frekvencije) i njegovih prizvuka (eng. *overtones*) i njegovih harmonika. Zajedno oni čine složeni valni oblik, odnosno složeni ton. Načini kojima žica trza utječe na stvaranje harmonika te njihovi konačni rezultati vidljivi su na slici 12. „Bogatstvo zvuka leži u tim prizvucima i drugim harmonijskim frekvencijama. Oni su ono što razlikuje boju zvuka jednog glazbenog instrumenta od drugoga. Bez harmonika, svi instrumenti bi zvučali isto.” (Crich, 2010, str. 15).



Slika 12: Osnovni ton (a) i njegovi harmonici na žici (Izvor: Crich, 2010, str. 14)

## 2. 2. Osjet sluha

Psihoakustika je znanost koja se bavi proučavanjem percepcije ljudskoga sluha, fizikalnim svojstvima ljudskoga uha i funkcijama zvučnoga puta unutar uha (Everest i Pohlmann, 2009). Njezina uloga osnova je za čitavo područje audio inženjeringa, zbog toga što se, između ostaloga, pomoću nje može saznati na koji način zvukovi u prostoru utječu na ljudski sluh te kako ih slušatelj percipira. Ljudsko uho prikuplja podražajne valove iz zraka koji potiču mehaničke vibracije unutar uha, pretvarajući ih pritom u električne impulse koje naš mozak naposljetku percipira kao zvuk. Iako se na prvi pogled prepoznavanje zvuka čini prilično jednostavnim, ljudsko uho smatra se najsloženijim „uređajem“ u svijetu audio inženjeringa, a unatoč rezultatima brojnih eksperimentalnih istraživanja, neki aspekti ljudskoga sluha još uvijek nisu u potpunosti istraženi. Primjer koji pokazuje koliko je kompleksan sustav ljudskoga sluha jest slušanje nekoliko različitih izvora zvuka u istom trenutku, primjerice simfonijskog orkestra kojeg čine brojni raznovrsni instrumenti, pri čemu je slušni kanal unutar uha ispunjen mješavinom zvukova, a mozak ih uspješno može pojedinačno izdvojiti i usmjeriti svoju pažnju na samo jednog od njih. Takva sposobnost odvajanja i usmjeravanja pažnje na pojedini zvuk naziva se *koktel-party* fenomen. (Everest i Pohlmann, 2009).

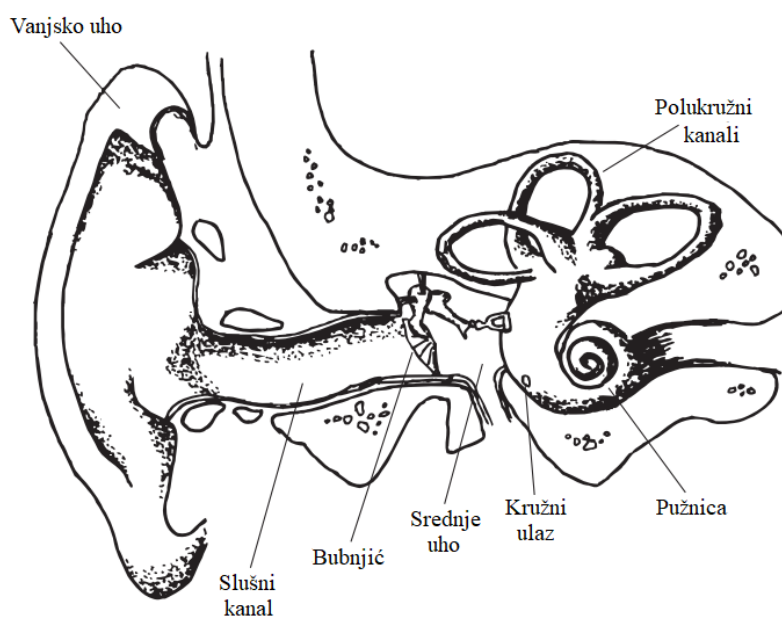
## 2. 2. 1. Anatomija i princip funkcioniranja uha

Ljudsko uho (slika 13 i slika 14), odnosno organ sluha kao jedan od podsustava uz slušne živce i mozak koje koristimo tijekom slušanja, sastoji se od tri glavne cjeline: vanjsko uho, srednje uho i unutarnje uho (Kleiner, 2012). „Zajedno oni tvore sustav za pretvorbu oscilacija zvučnog tlaka u povezane živčane signale u slušnom živcu“ (Kleiner, 2012, 47).

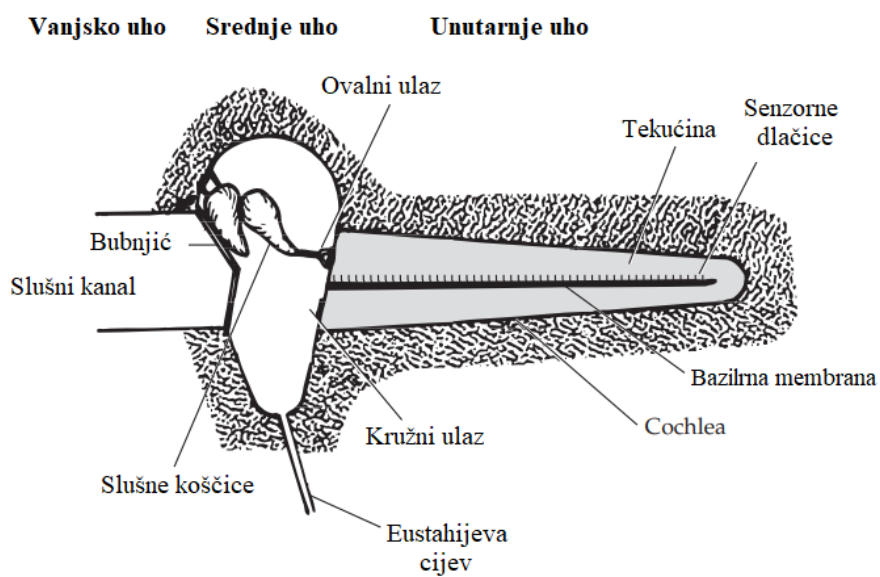
Uloga vanjskoga uha je prikupljanje zvučnih signala iz okoline, a sastoji se od ušne školjke, slušnog kanala i bubnjića (Kleiner, 2012). Slušanje zvuka s oba uha naziva se *binauralnim slušanjem* koje nam pomaže u određivanju smjera dolaska zvuka, odnosno lokalizaciji izvora zvuka u horizontalnoj ravnini glave (binauralna lokalizacija) (Everest i Pohlmann, 2009). Slušni kanal, cjevastoga oblika otvorenoga s jedne te zatvorenoga s unutarnje strane, prosječne je veličine promjera oko 7 milimetara i dužine oko 25 milimetara. U njemu se odvija efekt rezonancije zbog kojeg se pojačava akustičko područje glasovnih frekvencija i rezultira povećanim zvučnim tlakom na bubnjiću (Everest i Pohlmann, 2009). Bubnjić je elastična membrana koja se nalazi na kraju slušnog kanala (Kleiner, 2012). On razdvaja vanjsko uho od srednjega uha te ima ulogu prenošenja vanjske akustičke energije u srednje uho.

Srednje uho potpuno je zatvoreno i zvučno izolirano. Čine ga tri malene kosti: čekić, nakovanj i stremen (Kleiner, 2012). Jedine podražaje koje srednje uho prima su vanjski podražaji preko vibracija, točnije mehaničkih titraja membrane bubnjića. S obzirom da je unutrašnjost srednjeg uha u potpunosti zatvorena, ono je ispunjeno „zarobljenim“ stalnim tlakom (Everest i Pohlmann, 2009). Kako bi se taj pritisak izjednačio s vanjskim tlakom koji se nalazi unutar slušnog kanala, od velike je važnosti Eustahijeva cijev koja svojim otvaranjem i zatvaranjem izjednačava stalni tlak u unutrašnjosti srednjeg uha. Taj čin ujedno je i rezultat pravilnog funkcioniranja bubnjića i triju malenih kostiju. Spomenute koščice djeluju kao mehanizam prijenosa podražaja s membrane bubnjića u unutarnje uho (Everest i Pohlmann, 2009).

Važan, ujedno i posljednji dio ljudskoga uha je unutarnje uho koje je ispunjeno tekućinom (Everest i Pohlmann, 2009). Čine ga polukružni kanali i pužnica s bazilarnom membranom. Pužnica prima podražaje, drugim riječima, titraje, preko slušnih koščica koje su spojene na jedan od dva ulaza smještenih na pužnici – na ovalni ulaz. Titraji pritom uzrokuju vibraciju tekućine unutar pužnice u kojoj se nalazi bazilarna membrana ispunjena senzornim dlačicama. Reakcijom dlačica na vibraciju nastaju električni impulsi koje bazilarna membrana pošalje u mozak te ih na kraju interpretira kao zvuk (Everest i Pohlmann, 2009).



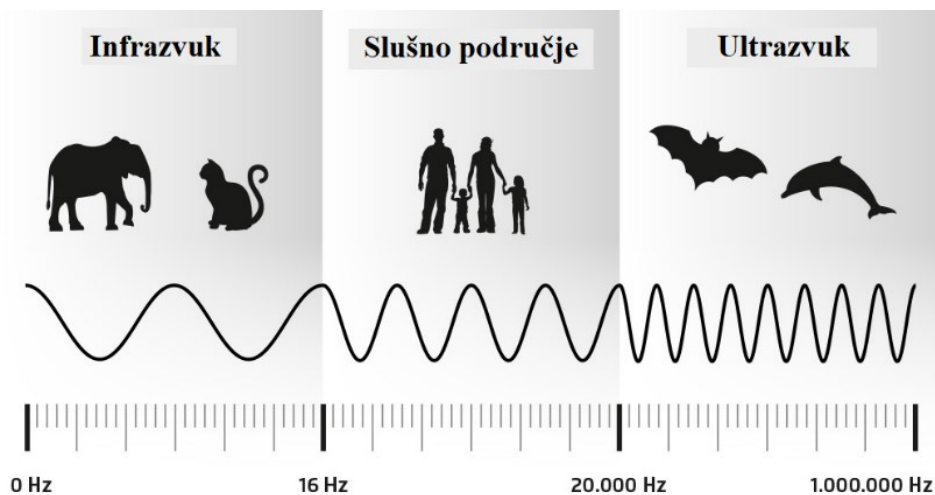
Slika 13: Dijelovi ljudskog uha (Izvor: Everest i Pohlmann. 2009, str. 40)



Slika 14: Prikaz ljudskog uha s „odmotanom“ pužnicom (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 44)

### 2. 2. 2. Slušno područje, prag čujnosti i prag boli

Slušno područje drugim riječima podrazumijeva opseg zvučnog spektra ili čujno frekvencijsko područje. To je područje od minimalno 20 Hz do maksimalno 20 kHz (Everest i Pohlmann, 2009). Te granice se podrazumijevaju i uobičajene su kod mladih i zdravih ljudi, jer ljudski sluh uvelike varira s godinama, navodi Long (2006). Prema tome, gornja granica slušnog područja u dobi od 40 do 50 godina može se spustiti i do 10 kHz. Sve frekvencije izvan slušnog područja ljudskom uhu nisu čujne (Everest i Pohlmann, 2009). Frekvencije ispod 20 Hz (prema nekim autorima ta je granica 16 Hz) nazivaju se infrazvukom, dok sve frekvencije iznad 20 kHz nazivaju se ultrazvukom (slika 15). Takve frekvencije mogu čuti neke životinje, dok ih ljudsko uho ne može zvučno percipirati, ali ih može doživjeti u fizičkom smislu kao rezonancije u tijelu ili osjećaj pritiska u ušima.



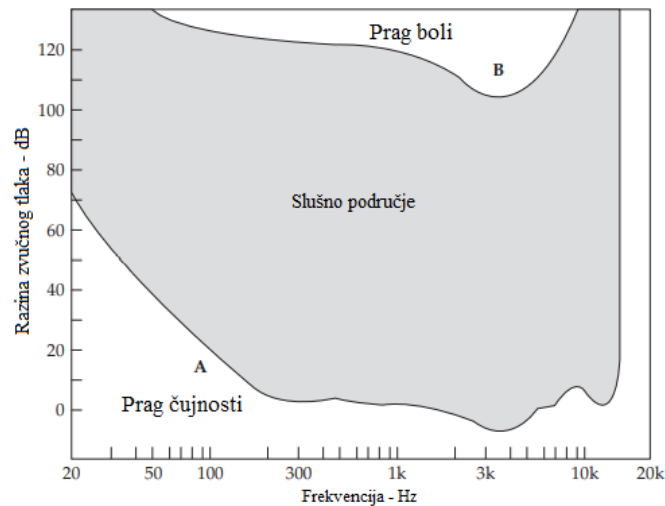
Slika 15: Područje infrazvuka, čujnog frekvencijskog područja i ultrazvuka prikazanim u Hz

Izvor: <https://www.techmira.com/mira-teeth/wp-content/uploads/sites/11/2020/06/Mira-Teeth-ultrasound.jpg>

(pristupljeno: 19. siječnja 2022.)

Na samome početku drugoga poglavlja spomenuto je kako je paskal (Pa) određena mjerna jedinica za tlak ( $p$ ). Prag čujnosti, poznat i pod nazivima *prag sluha* ili *slušni prag*, označava najnižu razinu zvučnog tlaka koju ljudsko uho može opaziti (Kleiner, 2012). Ta najniža razina zvučnog tlaka iznosi 20  $\mu$ Pa (mikropaskala) na frekvenciji 1 kHz i ona se uzima kao referentni tlak (Everest i Pohlmann, 2009). Prag boli, navode Everest i Pohlmann (2009), linija je koja označava razine svih frekvencija na kojima se počinje osjećati „škakljanje“ u ušima koje

upozorava na opasnu glasnoću zvuka i da bi moglo doći do mogućeg oštećenja sluha. Slika 16 prikazuje dvije krivulje, A (prag čujnosti) i B (prag boli), koje „predstavljaju krajnosti naše percepcije glasnoće“ (Everest i Pohlmann, 2009, str. 48).



Slika 16: Slušno područje (osjenčano područje), prag čujnosti (krivulja A) i prag boli (krivulja B) (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 48)

### 2. 2. 3. Izloženost buci

Harris (2009), navodi kako zvuk postaje glasniji ako je njegov tlak, odnosno pritisak veći. Zbog jednostavnosti i načina na koji ljudski sluh percipira promjenu intenziteta zvuka, razina zvučnog tlaka (SPL), češće se, umjesto paskala, mjeri jedinicom koja je nastala logaritamskim izračunom, a naziva se decibel (dB) (Harris, 2009). U tablici 2 prikazano je nekoliko izvora zvuka s njihovim vrijednostima u paskalima i njihovom izračunatom razinom zvučnog tlaka izraženim u decibelima koristeći slijedeću formulu (Everest i Pohlmann, 2009):

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p}{20 \mu\text{Pa}}$$

pri čemu je:

SPL = razina zvučnog tlaka (dB),

$p$  = zvučni tlak (Pa),

20  $\mu\text{Pa}$  = referentni zvučni tlak.

Tablica 2: Prikaz zvučnog tlaka i razine zvučnog tlaka različitih izvora zvuka (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009)

Izvor zvuka	Zvučni tlak (Pa)	Razina zvučnog tlaka (SPL) (dB)
raketa Saturn	100 000	194
mlazni zrakoplov	2000	160
propelerski zrakoplov	200	140
zakivač	20	120
teški kamion	2	100
bučni ured ili gust promet	0,2	80
razgovor	0,02	60
tiho prebivalište	0,002	40
šum lišća	0,0002	20
prag sluha, izvrsne uši pri maksimalnom odzivu frekvencije	0,00002	0

Prema Longu (2006), izloženost velikoj buci iznad 120 dB rezultira fizičkom boli unutar ljudskog uha. U tablici 3, vidljive su razine zvučnog tlaka u decibelima kojima čovjek vremenski maksimalno može biti izložen. Uho se na razini buke od 80 dB pokušava zaštititi na način da smanjuje svoju vlastitu osjetljivost koristeći slušni refleks (Long, 2006). Često ovakav obrambeni mehanizam na takvoj razini ne uspijeva što uzrokuje pojavu boli koja oštećuje tkivo pužnice i dovodi do gubitka osjetljivosti sluha. Kratka izloženost buci rezultira fenomenom privremenog pomaka slušnog praga (TTS – *temporary threshold shift*) nakon kojega se svi zvukovi uobičajene glasnoće čine tišima. Uho se od toga može oporaviti nakon određenog vremena, no preduga izloženost visokoj razini zvuka trajno oštećuje senzorne dlačice bazilarne membrane i dolazi do trajnog pomaka slušnog praga (PTS – *permanent threshold shift*) ili do potpunog gubitka sluha (Long, 2006).

Tablica 3: Prikaz različitih razina zvučnog tlaka i dopušteno vrijeme njihovom izlaganju (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009)

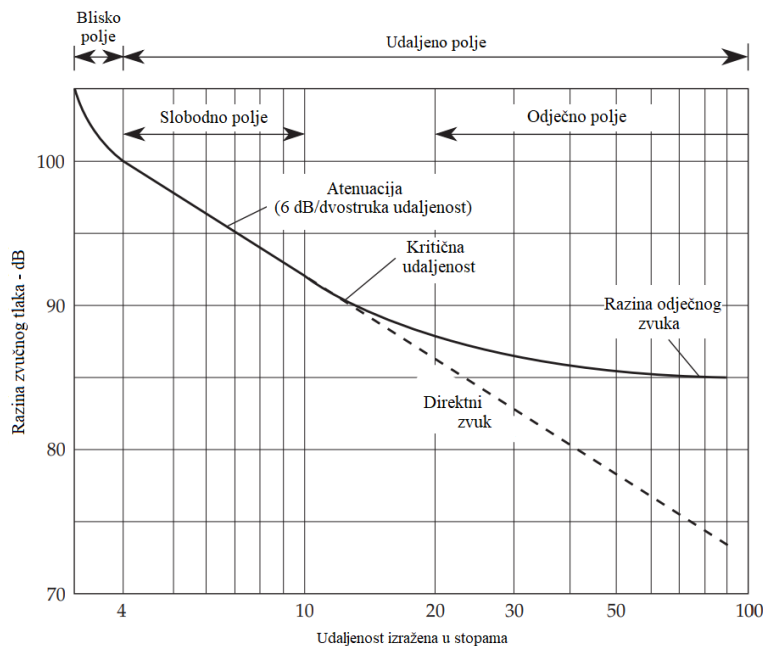
Razina zvučnog tlaka (SPL) (dB)	Maksimalna dnevna izloženost (h)
85	16
90	8
92	6



<b>Razina zvučnog tlaka (SPL) (dB)</b>	<b>Maksimalna dnevna izloženost (h)</b>
95	4
97	3
100	2
102	1.5
105	1
110	0.5
115	0.25

### 3. AKUSTIKA U ZATVORENOM PROSTORU

U otvorenom prostoru izravni zvuk (direktni zvuk) jednako se širi u svim smjerovima od nekog točkastog izvora te njegov zvučni tlak s udaljenošću postaje slabiji, a zvuk pritom postaje tiši (Bartlett, 2009; Everest i Pohlmann, 2009). To znači da pri svakoj udvostručenoj udaljenosti od izvora zvuka razina zvučnog tlaka opada za 6 dB. U zatvorenom prostoru direktni zvuk sadrži svoje refleksije odbijene od obližnjih površina te upravo zbog njih razina zvučnog tlaka pri svakoj udvostručenoj udaljenosti slabije opada. Stoga u zatvorenom prostoru pravilo smanjenja zvučnoga tlaka nije jednako kao u otvorenom prostoru. Everest i Pohlmann (2009) objašnjavaju to na sljedeći način: pravilo smanjenja zvučnog tlaka za 6 dB za svaku dvostruko veću udaljenost u zatvorenom prostoru vrijedi samo u području u blizini izvora zvuka, dok pri svakoj sljedećoj udvostručenoj udaljenosti nakon toga područja razina zvučnog tlaka opada znatno manje (slika 17). Razlog tome je što se u spomenutom području u blizini izvora zvuka, koje se naziva *slobodno polje*, izjednačavaju vrijednosti direktnog zvuka i reflektiranog zvuka, a na većim udaljenostima od izvora zvuka razina zvučnog tlaka opada znatno slabije te postaje gotovo konstantna i ovisi o količini apsorpcije u prostoriji. Mjesto gdje se izjednačene vrijednosti počinju razdvajati naziva se *kritična udaljenost*. Veće udaljenosti od kritične udaljenosti pripadaju području koje se naziva *odječno polje* (Everest i Pohlmann, 2009).

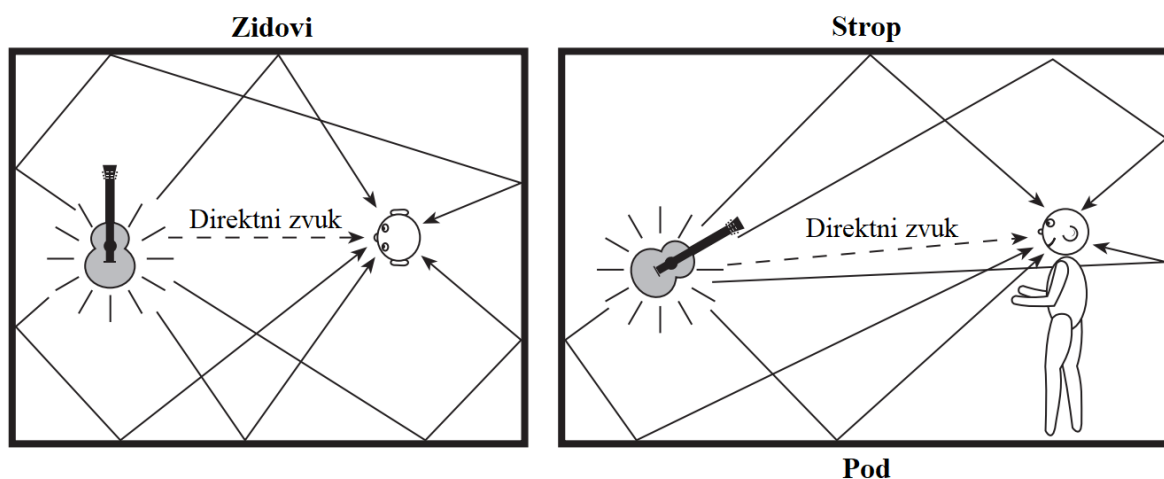


Slika 17: Smanjenje zvučnog tlaka u zatvorenom prostoru (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 37)

Prema Gervaisu (2011), razumijevanje o tome kako se zvuk ponaša u zatvorenom prostoru uvelike pomaže u procesu projektiranja studija. Prije svega, u kontrolnoj sobi (tzv. režiji) u tijeku slušanja procesa snimanja izvođača u studiju ili tijekom preslušavanja i obrade već gotovih snimki, producent ili inženjer zvuka želi doživjeti realnu zvučnu sliku iz zvučnika. Ukoliko se umjesto čiste i realne zvučne slike pojavljuju nepravilnosti, primjerice ako se neke note čine netipično tišima ili glasnijima od drugih, ako neke note zvuče mekše ili neke note u potpunosti nestanu, važno je znati zašto je došlo do takvih neusklađenosti te znati kako ih izbjeći (Gervais, 2011).

### 3. 1. Refleksija

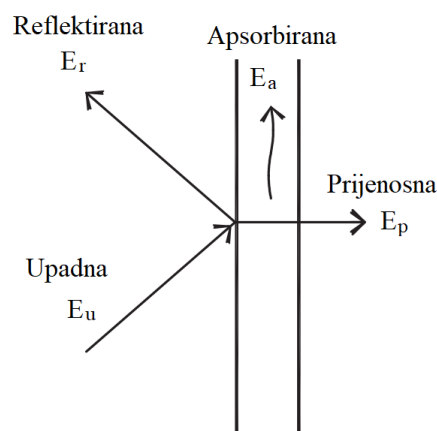
Refleksija predstavlja odbijanje zvuka od površine. Slika 18, koja prikazuje pogled na refleksije zvuka iz dvije perspektive, poslužit će kao primjer. Izvor zvuka u ovom slučaju predstavljen je instrumentom, gitarom. Njezin zvuk putuje u svim smjerovima čitavom prostorijom odbijajući se od svih reflektirajućih površina i stiže do slušatelja (Moylan, 2007). Prvi zvuk koji stiže do slušatelja naziva se direktnim zvukom jer ima najkraću putanju (Everest i Pohlmann, 2009; Moylan, 2007). U hrvatskoj terminologiji često se može susresti i naziv „izravni zvuk“. Prema Everestu i Pohlmannu (2009), zahvaljujući direktnom zvuku, kao slušatelji, imamo mogućnost percipirati smjer dolaska zvuka i zaključiti gdje je izvor zvuka smješten u prostoru.



Slika 18: Refleksija zvuka u zatvorenom prostoru (Izvor: Moylan, 2007, str. 11)

### 3. 2. Apsorpcija

Apsorpcija podrazumijeva upijanje zvuka u površinu materijala na kojeg upada zvučni val. Naime, iako se zvuk koji upada na površinu reflektira natrag u prostor, ipak se dio energije koju upadni zvuk posjeduje apsorbira u materijalu, a dio se prenosi kroz njega dalje (Long, 2006). Dio energije koji je apsorbiran u materijalu pretvara se u toplinu, dok preostali dio energije jednostavno prolazi kroz materijal i širi se dalje van njega. Ovakva pojava prikazana je na slici 19 gdje je  $E_u$  energija upadnog zvuka,  $E_r$  energija reflektirajućeg zvuka,  $E_a$  energija zvuka koja se apsorbirala u materijalu te  $E_p$  energija koja se prenosi i širi dalje.



Slika 19: Apsorpcija energije zvuka (Izvor: Long, 2006, str. 249)

Koliko se energije zvuka pretvorilo u toplinu u određenom materijalu prikazuje se koeficijentom apsorpcije (Everest i Pohlmann, 2009). Oznaka za koeficijent apsorpcije različita je prema mnogim referencama, jer se autori služe različitim oznakama. Odabrana oznaka za ovaj diplomski rad temeljena je prema autorima Everest i Pohlmann (2009), koja se označava simbolom:  $\alpha$  (alfa). Autori pojašnjavaju kako se koeficijent apsorpcije izražava u rasponu od 0.00 (nikakva apsorpcija) do 1.00. (maksimalna apsorpcija). Drugim riječima, ukoliko se zvučna energija u materijalu smanjila za 55%, koeficijent apsorpcije iznosio bi 0.55. Prema tome bi se 100% apsorbirana zvučna energija označavala sa 1.00. Autori također napominju kako koeficijenti apsorpcije jednog materijala nisu jednaki na svim frekvencijama, što bi značilo da svaki materijal sadrži različit koeficijent apsorpcije za svaku frekvenciju. U tablici 4 prikazani su koeficijenti apsorpcija različitih materijala ovisno o frekvencijama zvučnih valova. Formula prema kojoj se može izračunati apsorpcija zvučne energije neke površine glasi (Everest i Pohlmann, 2009):

$$A = S\alpha$$

pri čemu je:

$A$  = apsorpcija (u sabinima ili  $m^2$ ),

$S$  = površina ( $m^2$ ),

$\alpha$  = koeficijent apsorpcije materijala.

Formula za ukupnu apsorpciju prostora glasi (Everest i Pohlmann, 2009):

$$\sum A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots$$

pri čemu je:

$\sum A$  = ukupna apsorpcija ( $m^2$ ),

$S_1, S_2, S_3 \dots$  = površine ( $m^2$ ),

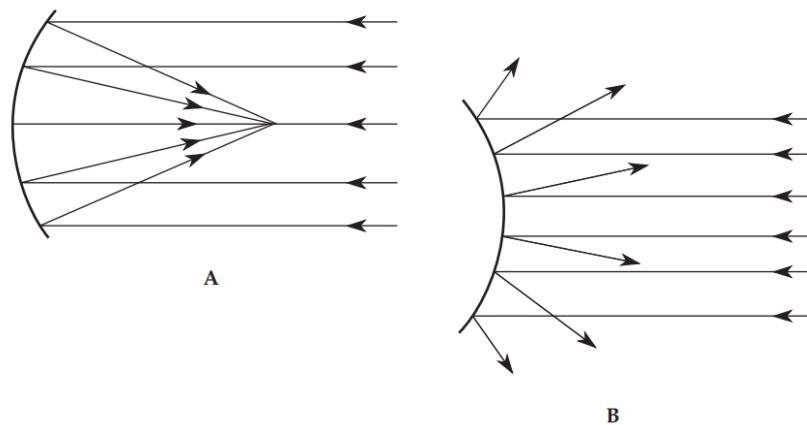
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$  = odgovarajući koeficijent apsorpcije.

Tablica 4: Koeficijenti apsorpcije različitih materijala ovisno o frekvenciji zvučnog vala (Izvor: Long, 2006)

Materijal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
betonski blok, obojani	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
cigla, neglazirana, nebojana	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
gips ploča	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
drveni pod	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
staklo, veliko, 6 mm	0.18	0.06	0.04	0.05	0.02	0.02
staklo u prozoru, 2 mm	0.55	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
mineralna vlakna, 1,6 cm	0.68	0.76	0.60	0.65	0.82	0.76
mineralna vlakna, 2 cm	0.72	0.84	0.70	0.79	0.76	0.81
mineralna vlakna, 2,5 cm	0.76	0.84	0.72	0.89	0.85	0.81
staklena vuna, 2 cm	0.74	0.89	0.67	0.89	0.95	1.07
staklena vuna, 2,5 cm	0.77	0.74	0.75	0.95	1.01	1.02
staklena vuna, 3,8 cm	0.78	0.93	0.88	1.01	1.02	1.00
zavjesa, lagani velur	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
zavjesa, srednje teški velur	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
zavjesa, teški velur	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65
tepih, težak na betonu	0.02	0.06	0.14	0.57	0.60	0.65
tepih na podlozi	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73

### 3. 3. Difuzija i fokusiranje

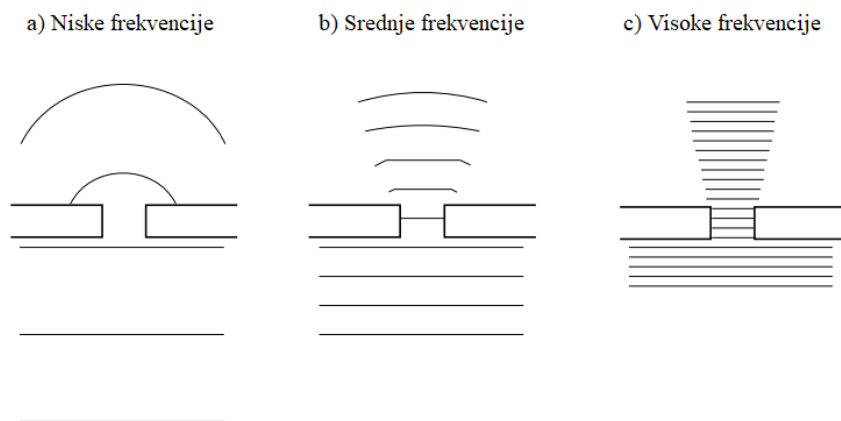
Difuzija i fokusiranje dva su načina kojima se upadni zvuk na karakterističan način odbija od dvije specifične prepreke, a to su konveksna i konkavna površina. Prema Everestu i Pohlmannu (2009), konkavne površine (slika 20A) nisu preporučljive u studijima, posebice u malim studijima i kontrolnim sobama, jer imaju tendenciju fokusirati upadni zvuk i njegovu energiju u jednu točku prostora što u praksi nije poželjno. Prednost se daje konveksnim površinama (slika 20B) zbog toga što se na njima upadni zvuk reflektira i raspršuje u širem luku (Everest i Pohlmann, 2009). Takav način, odnosno difuzija zvuka, pomaže zvuku da se, posebice u sobi za snimanje, podjednako širi u prostoru.



Slika 20: Fokusiranje (A) i difuzija zvuka (B) (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 132)

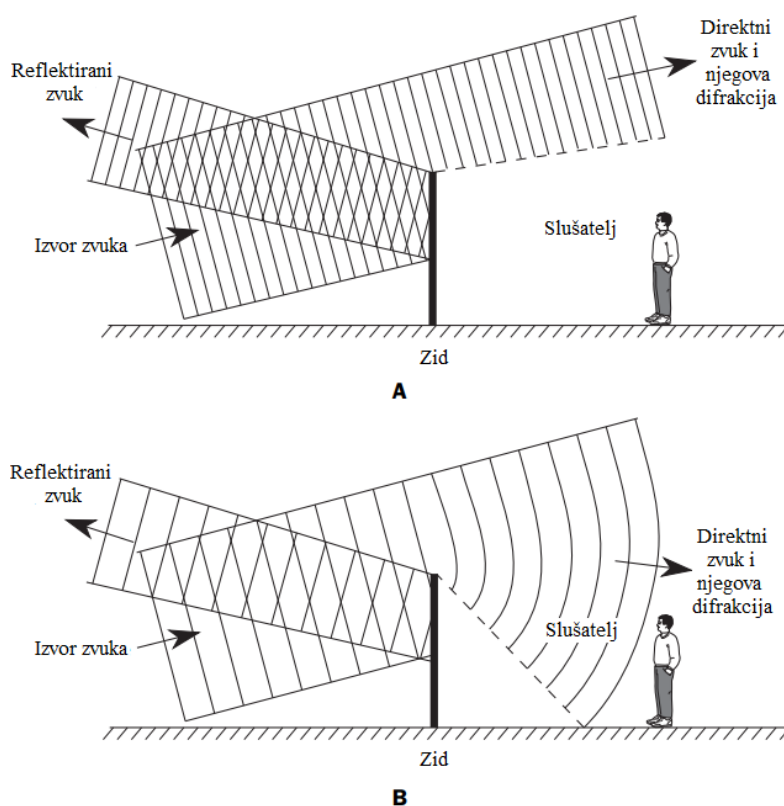
### 3. 4. Difrakcija ili ogib

Difrakcija ili ogib podrazumijeva karakteristično ponašanje zvuka u trenutku kada zvuk na svom putu nailazi na prepreku. Difrakcija ili ogib ovisna je o valnoj duljini, samim time i o frekvenciji (Everest i Pohlmann, 2009; Newell, 2008). Zbog toga što su na visokim frekvencijama valne duljine kratke, njihova difrakcija je manja za razliku od niskih frekvencija kojima je zbog dugih valnih duljina difrakcija veća (Everest i Pohlmann, 2009). Na slici 21a vidljivo je kako niske frekvencije obilaze prepreke, prolaze kroz otvor te se, naposljetku, u širokom luku šire dalje (difrakcija). Na srednjim (slika 21b) i visokim frekvencijama (slika 21c) difrakcija zvuka nakon prolaska kroz otvor je drugačija te im je luk širenja zvuka sužen.



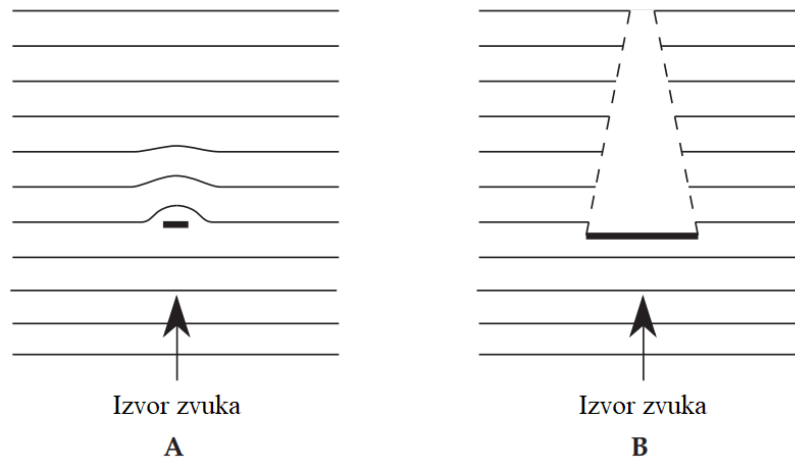
Slika 21: Difrakcija zvuka različitih frekvencija (Izvor: Newell, 2008, str. 114)

Difrakcija zvuka pojavljuje se i u prometu na mjestima gdje su postavljene čvrste zvučne barijere koje štite okolna naselja od prometne buke (Everest i Pohlmann, 2009). Na slici 22 dio direktnog zvuka se, nakon što dosegne prepreku (zid), reflektira, dok preostali dio direktnog zvuka nastavlja svoj put iznad prepreke te se zbog difrakcije zamjećuje njegovo postojanje i iza prepreke, ovisno o frekvenciji i valnoj duljini zvuka.



Slika 22: Difrakcija zvuka visokih (A) i niskih frekvencija (B) u odnosu na zvučnu barijeru (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 110)

Još nešto o čemu ovisi difrakcija zvuka uz frekvenciju i valnu duljinu jest i veličina prepreke koju zvuk obilazi. Prema Everestu i Pohlmannu (2009), ukoliko je prepreka manja od valne duljine zvuka, zvuk ju u potpunosti može nesmetano obići (slika 23A), dok prepreka koja je veća od valne duljine zvuka iza sebe stvara zvučnu sjenu (slika 23B). Valja napomenuti kako se dio zvuka, osim što obilazi prepreku, uvijek reflektira od nje iako to na slikama 21 i 23 nije prikazano.



Slika 23: Difrakcija dva izvora zvuka jednakih frekvencija na manjoj (A) i većoj prepreci (B) (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 108)

### 3. 5. Vrijeme odjeka

Vrijeme odjeka, označen oznakom RT prema engleskoj inačici *reverberation time*, prikazuje koliko vremena je potrebno reflektirajućem zvuku da mu razina amplitude padne za 60 dB od izvorne razine zvuka u prostoriji nakon što izvor zvuka prestane s emitiranjem (Everest i Pohlmann, 2009; Moylan, 2007). Zašto je odabran iznos od 60 dB, Everest i Pohlmann (2009) navode kako je taj iznos proizvoljno odabran, „ali otprilike odgovara vremenu potrebnom za smanjenje intenziteta zvuka do nečujnosti“ (Everest i Pohlmann, 2009, str. 153). Stoga se vrijeme odjeka zapravo češće označava sa  $T_{60}$  (Gervais, 2011). Vrijeme odjeka je važno u projektiranju akustike prostorija jer s obzirom na iskustva ljudi koji borave u različitim vrstama prostorija akustički različite namjene, postoji optimalni raspon vremena odjeka koji ovisi o namjeni i veličini prostorije. Tako je, primjerice, optimalno vrijeme odjeka koncertnih dvorana bitno veće od vremena odjeka u kino dvoranama i tonskim studijima. Prema Everest i Pohlman (2009), optimalno vrijeme odjeka u tonskom studiju trebalo bi iznositi  $T_{60} = 0.3$  do



0.54 sekundi. Formula kojom se može izračunati vrijeme odjeka u prostoru glasi (Everest i Pohlmann, 2009):

$$T_{60} = \frac{0.161V}{\sum A}$$

pri čemu je:

$T_{60}$  = vrijeme odjeka (s),

$V$  = volumen prostorije ( $m^3$ ),

$\sum A$  = ukupna apsorpcija prostora ( $m^2$ ).

### 3. 6. Problematika

#### 3. 6. 1. Kritične površine

Pod kritičnim površinama smatraju se površine koje svojim oblikom ili pozicijom u prostoru utječu na zvuk, odnosno zvučne valove i njihove refleksije. Jedne od takvih površina predstavljaju paralelne površine. Takve površine, posebice zidovi s tvrdom površinom, poželjno je izbjegavati jer one kao takve pružaju mogućnost stvaranja zvučnih izobličenja poput stojnih valova, lepršajuće jeke ili češljastog filtra (Newell, 2008). Njihov postupak nastajanja i što oni točno predstavljaju opisani su detaljnije u potpoglavljima kasnije. Osim što se paralelne površine odnose na zidove, često se pojavljuju i između stropa i poda (Newell, 2008). Upravo se zbog spomenutih razloga preporučuje asimetričnost kao uobičajena karakteristika sobe za snimanje jer ona može dodatno umanjiti problematiku navedenih zvučnih izobličenja zbog izbjegnutih paralelnih površina (Newell, 2008).

Ako je u kojem slučaju prostor načinjen od konkavnih površina, problem s refleksijama može se pogoršati, raspodjela razina zvuka bila bi neravnomjerna u prostoriji jer konkavne površine imaju karakteristiku fokusiranja, odnosno usmjeravanja zvuka u određene točke prostora (Acoustics of Schools, 2015). Najgore je ako je fokus konkavne površine u visini glave. U većim prostorima poput kazališta ili koncertnih dvorana konkavne površine mogu poslužiti kao raspršivači zvuka ukoliko im je polumjer zakrivljenosti vrlo velik. Ukoliko neka kupola fokusira zvuk dovoljno visoko iznad glava, zvuk će imati dovoljno dugačku putanju i stigne se raspršiti dok ne stigne do slušatelja. Ako je pak fokus daleko izvan prostorije i slušatelja, neće biti jako izražen niti problematičan. Stoga, prema Acoustics of Schools (2015),

konkavne površine općenito nisu preporučljive u glazbenim prostorima poput tonskoga studija, glazbenih učionica ili glazbenih vježbaonica.

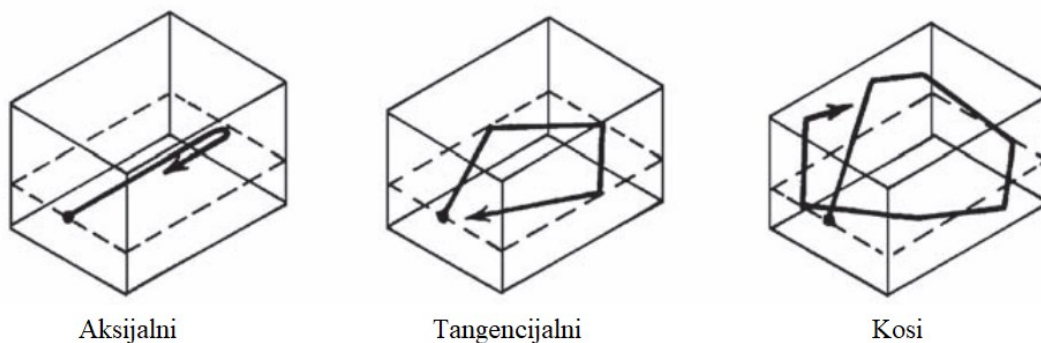
### 3. 6. 2. Rane refleksije

Rane refleksije smatraju se prvim refleksijama koje nakon direktnog (izravnog) zvuka dolaze unutar oko 80 ms (milisekundi) (Acoustics of Schools, 2015). Sve kasnije refleksije podrazumijevaju veće kašnjenje, a one s najvećim kašnjenjem mogu rezultirati neugodnim odjecima. Takvo se kašnjenje, primjerice, može dogoditi u dvoranama čiji stražnji zidovi sadrže velike površine od stakla ili sličnih reflektirajućih materijala (Acoustics of Schools, 2015). No, rane refleksije predstavljaju značajan problem, jer one uvelike mogu poremetiti zvučnu sliku slušatelja (Gervais, 2011). One mogu biti toliko jake da se slušatelju može učiniti kako zvuk dopire s reflektirajuće površine, a ne s mjesta otkuda je direktan zvuk zapravo došao (Acoustics of Schools, 2015). Takav čin rezultat je „pomaknute“ slušateljeve slušne slike koji nipošto nije poželjan. Način kojim se problematika ranih refleksija može zatomiti jest postavljanje određenih materijala koji djeluju kao upijači zvuka na točno određena mjesta na površinama o čemu će više biti riječ u poglavlju o vrstama akustičke obrade.

### 3. 6. 3. Stojni valovi

Stojni valovi, poznati još i pod nazivom modovi, povezani su uz problematiku niskih frekvencija. Naime, oni predstavljaju frekvencije kod kojih se, ovisno o dimenzijama prostora, zvučni valovi mogu pojačati, smanjiti ili poništiti (Harris, 2009). Pojava stojnih valova normalna je u svim prostorijama, no prisutnost stojnih valova u malim prostorijama postaju čujne jer se događaju na višim frekvencijama (Long, 2006). Riječ je o fenomenu koji nastaje kada se valna duljina poklapa s dimenzijom prostora te udaljenost kojom zvučni val putuje nije dovoljno velika da energija zvučnog vala prirodno opadne te se zapravo pri ponovnoj interakciji s valom jednake frekvencije i jednake amplitude zvuk pojača, što predstavlja mjesto „trbuha“, ili se poništava, što predstavlja mjesto „čvora“ (Gervais, 2011). Mjesta takvih čvorišta poznatiji su prema engleskim inačicama riječi *nodes* (čvor) i *antinodes* (trbuh). Ovakva zvukovna izobličenja rezultiraju problematičnim i neujednačenim zvukom rasprostranjenim po prostoriji (Harris, 2009). Postoje tri vrste stojnih valova koji mogu nastati ovisno o tome između kojih se površina prostora pojavljuju. To su aksijalni, tangencijalni i kosi (Everest i Pohlmann, 2009;

Gervais, 2011; Kleiner i Tichy, 2014; Long, 2006; Newell, 2008). Aksijalni stojni val karakteristično se pojavljuje između dviju površina, tangencijalni između četiri, a kosi između svih šest površina prostorije (Everest i Pohlmann, 2009; Gervais, 2011; Shea i Everest, 2010). Slika 24 prikazuje nastanak sva tri stojna vala u odnosu na površine na koje se odnose. Prema Gervaisu (2011), stojni valovi uvijek predstavljaju veliki problem na niskim frekvencijama u kutevima prostorije, jer svaki kut u prostoru predstavlja područje najvećeg zvučnog tlaka. Kontrolu nad stojnim valovima moguće je postići uz neparalelne površine ili uz posebnu vrstu akustičke obrade o kojoj će biti riječi u sedmom poglavlju (Building Bulletin 93, 2003). Prema Kleiner i Tichy (2014), puštanjem čistoga sinusnog vala iz monitora (zvučnika) u prostor može pomoći pri slušnom pronalasku mjesta ovakvih pojačanih ili poništenih zvučnih valova u prostoriji.



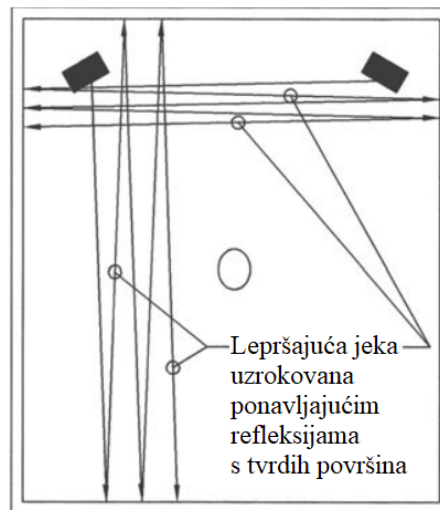
Slika 24: Stojni valovi (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 229)

#### 3. 6. 4. Lepršajuća jeka

Jeka je karakteristična pojava kašnjenja zvukova jedan nakon drugoga. Vezano uz područje fizike, jeka nastaje vraćanjem zakašnjelih refleksija direktnog zvuka ka slušatelju nakon odbijanja od neke površine<sup>6</sup>. Lepršajuća jeka karakterističan je problem čiji se nastanak najčešće povezuje uz paralelne površine. Riječ je o zvuku koji se nakon direktnog zvuka, primjerice pljeska, više puta zaredom odbija između tvrdih i paralelnih površina naprijed-natrag (Gervais, 2011). Autori Everest i Pohlmann (2009) lepršajuću jeku opisuju poput periodičnih treperavih odjeka čije se periodično treperenje vrlo jasno čuje ukoliko je vrijeme odjeka veće od 30 ms do 50 ms. Problem lepršajuće jeku, pojašnjavaju autori, može se reducirati na nekoliko

<sup>6</sup> *jeka*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=28941> (Pristupljeno: 3. veljače 2022.)

načina. Prvi od njih je postavljanje zidova pod kutem većim ili manjim od  $90^\circ$  kako bi se izbjegli pravi kutevi koji uzrokuju međusobno paralelne površine. Nadalje, ukoliko nije moguće izbjeći paralelne površine važno je da one nikako ne bi smjele biti jako reflektirajuće. Također, postavljanje materijala koji upijaju zvuk na određena mjesta može umanjiti neugodna treperenja lepršave jeke (Everest i Pohlmann, 2009). O spomenutim materijalima za upijanje zvuka bit će više riječi u poglavlju o vrstama akustičke obrade. Prikaz lepršajuće jeke vidljiv je na slici 25.

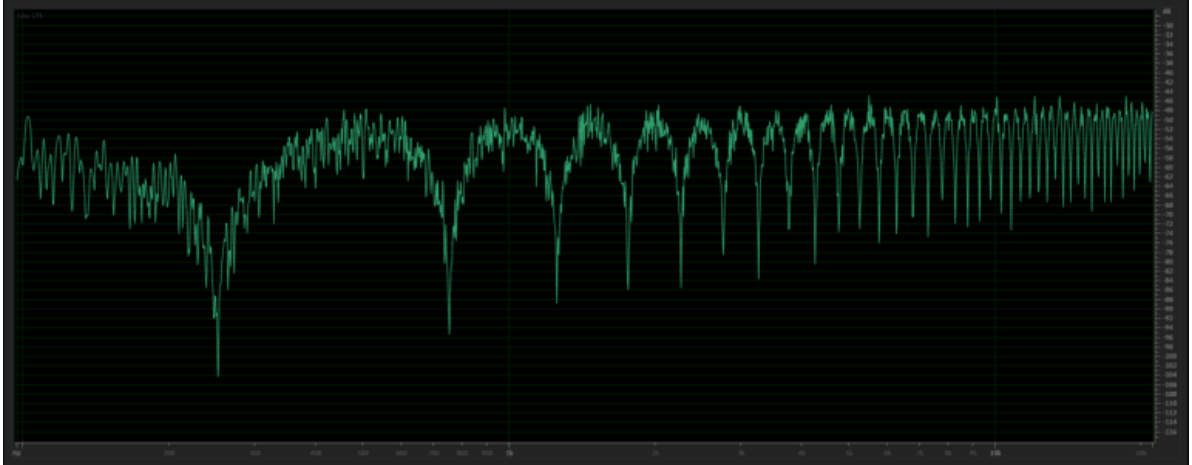


Slika 25: Lepršajuća jeka (Izvor: Gervais, 2011, str. 30)

### 3. 6. 5. Češljasti filter

Češljasti filter jedna je od problematičnih pojava koja je vezana uz refleksije i fazu zvučnog vala. Kako je poznato da se iz izvora zvuka šire zvučni valovi različitih frekvencija u svim smjerovima te se odbijaju od obližnjih površina i mijenjaju svoj smjer kretanja, tako se u nekim trenucima može dogoditi da do mikrofona ili uha slušatelja dođu direktni zvuk i reflektirani zvuk jednakih frekvencija u različito vrijeme (Gervais, 2011; Harris, 2009). Drugim riječima, ako je reflektirani zvuk jednake frekvencije, ali kasni u odnosu na direktni zvuk, to znači da su im faze pomaknute. Prema tome, zbrojem takvih zvučnih valova na nekim bi mjestima frekvencije bile u fazi, što bi značilo da im se vrhovi poklapaju u isto vrijeme, neke frekvencije bile bi djelomično u fazi, dok bi neke bile potpuno izvan faze. Pomičući mikroskop ili glavu u takvom slučaju, zvuk koji bi pritom bio čujan bio bi u nekim trenucima šupalj, a u nekim trenucima rezak (Gervais, 2011; Harris, 2009). Ova problematična zvučna pojava dobila je svoj naziv češljastog filtra prema tome kako njegov snimljeni signal u grafičkom prikazu

frekvencijskog spektra ima oblik nazubljene strukture koja podsjeća na češalj, a predstavljen je na slici 26 (Gervais, 2011; Harris, 2009). Najviši vrhovi signala predstavljaju frekvencije u fazi, najniže točke predstavljaju frekvencije izvan faze, a ostale frekvencije su frekvencije koje su djelomično u fazi.



Slika 26: Signal češljastog filtra u grafu

Izvor: <https://audiouniversityonline.com/wp-content/uploads/2019/12/Frequency-Response-2ms-Delay-768x301.png>

(pristupljeno: 5. veljače 2022.)

## 4. PROSTORIJE

### 4. 1. Funkcija prostorija

O tome na koji način će se tonski studio projektirati i izgraditi ovisi i o funkciji njegovih dviju tehnoloških prostorija za produkciju zvuka i o zvuku koji se u njima želi dobiti. Obično se podrazumijeva simetrični i asimetrični dizajn za takve prostorije. Jedna od tehnoloških prostorija za produkciju zvuka u tonskom studiju je soba za snimanje. Prema Gervaisu (2011) asimetričan dizajn idealan je za sobu za snimanje. Druga tehnološka prostorija je kontrolna soba (tzv. režija) koja podrazumijeva isključivo simetričan dizajn prostorije jer se njom kao takvom postiže očekivana balansirana stereo zvučna slika.

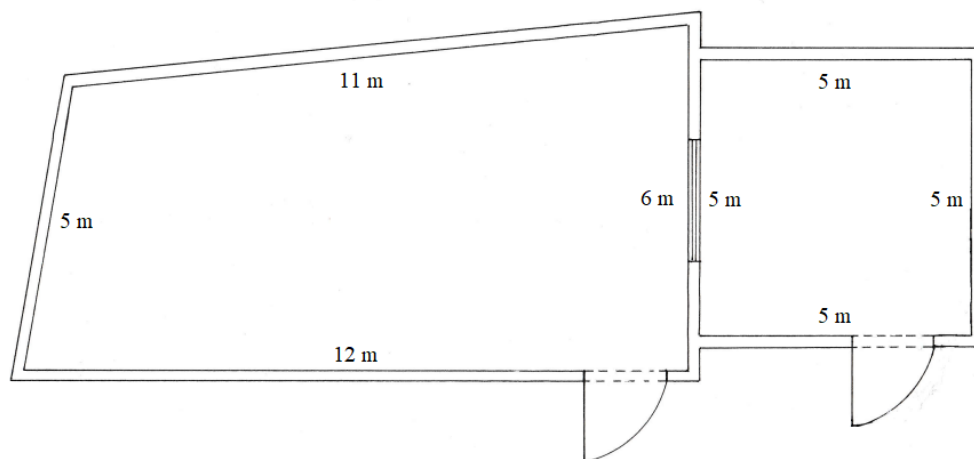
### 4. 2. Veličina prostorija

Veličinu odabranog prostora za izgradnju profesionalnog studija vrlo je lako podcijeniti (Newell, 2008). Newell (2008) objašnjava kako se općenito vrlo često događa da potencijalni vlasnici studija nisu svjesni koliko potrebna adekvatna akustička izolacija zapravo može „pojesti“, odnosno dodatno ispuniti prazan prostor i očekuju da će gotova prostorija održati željenu tlocrtnu površinu poda i visinu stropa kakvu su izračunali pri kupnji prostorije dok je bila prazna. Stoga, visokokvalitetan tonski studio podrazumijeva i adekvatnu veličinu prostorija.

Prema Newellu (2008), prostor s neodgovarajućom visinom onemogućava lako dizajnirati kvalitetan studio. Potrebno je unaprijed znati da konstrukcija zvučne izolacije popunjava prostor i da ga time ujedno i smanjuje. U kontrolnoj sobi (tzv. režiji) znaju se pojaviti problemi s odzivom monitora (zvučnika) koji u prostoru nastaju kod paralelnih površina, tipično između poda i stropa. Kako bi se izbjegao takav problem, kontrolna soba podrazumijeva optimalnu visinu od 2,5 m što upućuje na to da bi početni prazan prostor trebao biti optimalne visine od najmanje 4 m. Isto tako, nije lako dobiti akustički fleksibilnu i visokokvalitetnu sobu za snimanje ako prazan prostor prije postavljanja zvučne izolacije nema visinu od barem 4 m (Newell, 2008).

Pri odabiru veličine sobe za snimanje potrebno je uzeti u obzir maksimalan broj osoba koje bi istovremeno morale prisustvovati na snimanju. U ovome slučaju, s obzirom na tematiku

diplomskog rada, u sobi za snimanje bilo bi potrebno smjestiti otprilike tridesetak učenika koji čine zbor ili školski orkestar koji otprilike broji petnaestero učenika zajedno sa svojim instrumentima. Prema tome, soba za snimanje trebala bi biti velikih dimenzija. Prema Gervaisu (2011), veliki prostori imaju prednost u tome što zbog svojih općenito većih dimenzija zvuk ima na raspolaganju dužu putanju, a time i veću mogućnost opadanja što bi pojednostavilo daljnji proces obrade površina. U svrhu ovog projekta za diplomski rad, optimalne dimenzije pravokutne sobe za snimanje nakon izgradnje zvučne izolacije iznosile bi: 12 metara dužine, 6 metara širine i 5 metara visine. No, imajući na umu da bi soba za snimanje trebala biti asimetričnog oblika, bit će potrebno zakrenuti međusobno paralelne zidove te će se dimenzije prostora time morati promijeniti. Slika 27 prikazuje promijenjeni oblik i nove dimenzije sobe za snimanje s ucrtanim prozorom između prostorija. Kontrolna soba u pravilu je uvijek manjih dimenzija i simetričnog oblika, te je ona smještena odmah uz sobu za snimanje, a odabrane optimalne dimenzije za ovaj projekt iznose: 5 metara dužine, 5 metara širine i 3 metra visine.



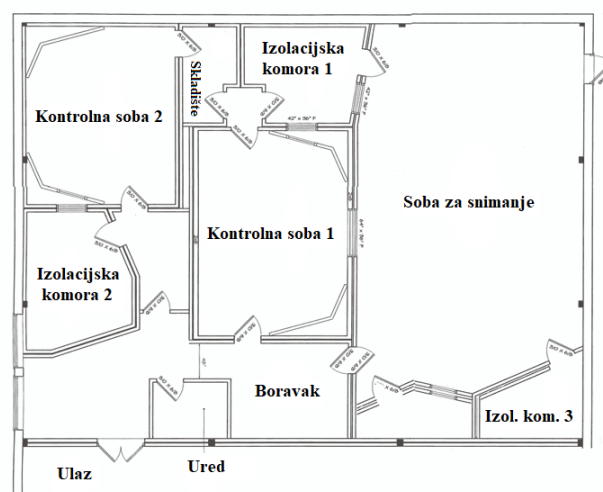
Slika 27: Skica tlocrta tonskog studija (Izvor: iz vlastitog arhiva)

U skicama tlocrta iz praktičnih razloga neće biti uključeni elementi konstrukcije zvučne izolacije, već će sadržavati samo konačne vanjske dimenzije prostorija nakon izgradnje zvučne izolacije. S obzirom da ovaj projekt i dizajn nisu rađeni prema postojećem i dostupnom prostoru neke glazbene škole koji bi bio namijenjen projektiranju i izgradnji tonskog studija, u svrhu diplomskog rada podrazumijevat će se da je ovaj projekt zamišljenog tipa. Isto tako, u odnosu na smještaj ovog tonskog studija i konstrukciju njegove izolacije, podrazumijevat će se da se ovaj tonski studio nalazi na tišoj strani glazbene škole, drugim riječima daleko od prometa te da je smješten u prizemlju, u najdaljem kutu glazbene škole gdje je jedan dio tonskog studija

omeđen hodnikom koji bi u ovome slučaju vršio dodatnu ulogu zvučne izolacije te na takav način dodatno smanjio narušavanje nastavnog procesa u obližnjim učionicama glazbene škole.

### 4. 3. Raspored prostorija

Postoje razni načini raspodjele prostorija u tonskom studiju, jer uz sobu za snimanje i kontrolnu sobu, tonski studio može sadržavati primjerice i jednu ili više posebnih izolacijskih komora namijenjenih najčešće pjevačima kako bih ih se dodatno moglo izolirati od buke. Ponekad izolacijska komora može biti postavljena uz kontrolnu sobu s ugrađenim prozorom u zidu koji ih dijeli, a ponekad je ona smještena nasuprot njoj postavljajući sobu za snimanje između njih. Izolacijske komore mogu biti postavljene jedna do druge, često odvojene dodatnim malim prostorijama radi poboljšane izolacije među njima, a mogu biti i razdvojene jedna od druge svaka postavljena na različitom mjestu studija. Studio može sadržavati i echo komoru koja je potpuno suprotna izolacijskim komorama, zbog toga što je takva komora specifično građena od materijala koji pospješuju stvaranje odjeka. U nekim studijima može biti prisutna i prostorija za boravak i druženje, uredski prostor, skladišni prostor, a postoje čak i neki studiji sa više kontrolnih soba. Prema tome, ovisno o tome kakve će sve prostorije tonski studio sadržavati te ovisno o mogućnostima koje prostor tonskog studija pruža vrši se određivanje najoptimalnijeg rasporeda prostorija u njemu. Slika 28 prikazuje primjer tlocrta jednog studija s različitim prostorijama.



Slika 28: Primjer tlocrta raspoređenih prostorija u tonskom studiju

Izvor: <https://i.pinimg.com/originals/bf/c8/0a/bfc80a52ea9d3f400dcf4beb60e90ea7.png>

(pristupljeno: 7. veljače 2022.)



## 5. ELEKTRIČNE INSTALACIJE I HVAC SUSTAV

Neupitna je potreba kako u svakoj javnoj ustanovi ili u vlastitom domu tako i u tonskom studiju za električnim instalacijama i sustavima grijanja, klimatizacije i ventilacije. Takvi sustavi svakom svojom komponentom imaju mogućnost stvaranja buke što utječe na upotrebljivost prostorija (Gervais, 2011). Njihova pravilna instalacija i montaža rezultirat će smanjenjem šuma u prostorijama i produkcijskom radu.

U ožičenju tonskog studija postoji jedan specifičan način rasporeda električnog napajanja u električnom razvodnom ormaru koji se pokazao učinkovitim, a to je odvajanje električnog i HVAC<sup>7</sup> sustava od studijske opreme (Gervais, 2011). Drugim riječima, svrstavanje čitave studijske opreme na jednu naponsku fazu električnog razvodnog ormara, a sve ostale električne instalacije i HVAC sustav na drugu fazu. Ovakvim načinom ožičenja, prema Gervaisu (2011), moguće je izbjeći da se prijenos električne energije do strojeva na standardnoj frekvenciji od 50 Hz, tijekom procesa snimanja, u snimljenim materijalima čuje kao šum. Time se, između ostalog, želi postići uravnoteženo opterećenje u električnom razvodnom ormaru, odnosno da se cjelokupno opterećenje električnog napajanja koje se ovdje koristi, jednako rasporedi na obje faze (Gervais, 2011). Klasični električni razvodni ormar prikazan je na slici 29.

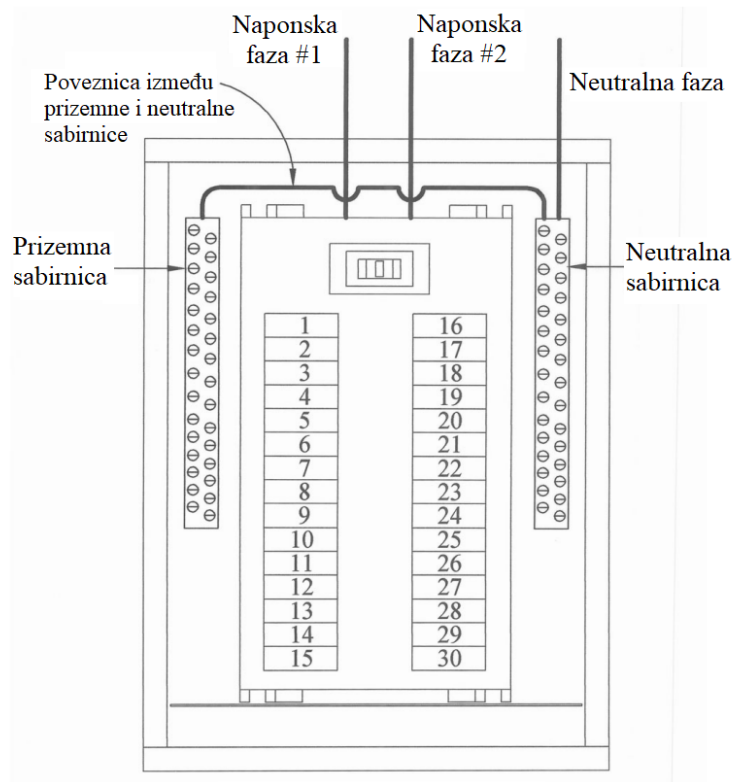
Prema Gervaisu (2011), postoji jedna činjenica koju bi trebalo imati na umu. Naime, niskonaponsko strujno ožičenje ne bi trebalo biti u blizini izvora audio linijskih napona. Drugim riječima, trebalo bi ih razdvojiti što je više moguće. Gervais (2011) opisuje kako bi najpogodnije bilo provesti niskonaponsko ožičenje kroz pod, a linijsko kroz strop ili obratno. Ako se nekim slučajem ožičenja moraju križati, najbolje ih je tada križati pod kutem od 90°. Najgore ih je postaviti paralelno jedan uz drugoga, no ukoliko su iz određenih razloga primorani biti u takvoj poziciji, potrebno ih je razdvojiti na udaljenosti od najmanje 1 metar. Razlog tome je što se razdvajanjem niskih napona od linijskih također smanjuje buka u konačnom proizvodu (Gervais, 2011).

Uporaba određene vrste rasvjete također igra ulogu u stvaranju buke ili šuma. Fluorescentna rasvjeta u kombinaciji s jednostavnijim preklopnim sustavima zatamnjenja svjetla poprilično su bučni (Gervais, 2011). Kao izvrsna rasvjeta za primjenu u tonskim studijima pokazala se LED (*Liquid Emitting Diode*) rasvjeta. Iako se uz nju veže nešto veća cijena naspram standardne rasvjete, vrijedi uloženog kada se naposljetku pogleda trošak

---

<sup>7</sup> *Heating, ventilating and air-conditioning sistem* (u prijevodu: sustav grijanja, klimatizacije i ventilacije) (prema Beck i Zacharov, 2006; Everest i Pohlmann, 2009; Kleiner, 2012; Kleiner i Tichy, Long, 2006; Newell, 2008; Shea i Everest, 2010)

tijekom rada. LED rasvjeta ima prednosti u tome što je tiha, proizvodi vrlo malo topline i ne emitira elektromagnetsko zračenje (Gervais, 2011). Naime, RFI, punoga naziva *Radio Frequency Interference*, u prijevodu radiofrekvencijske smetnje, predstavljaju „zujanje, koje se može pojaviti u nekoj audio i radio opremi kada se u blizini koriste poluvodički prigušivači“ (Gervais, 2011, str. 125). Stoga je vrlo važno obratiti pažnju pri odabiru određene vrste rasvjete i prigušivača svjetla.



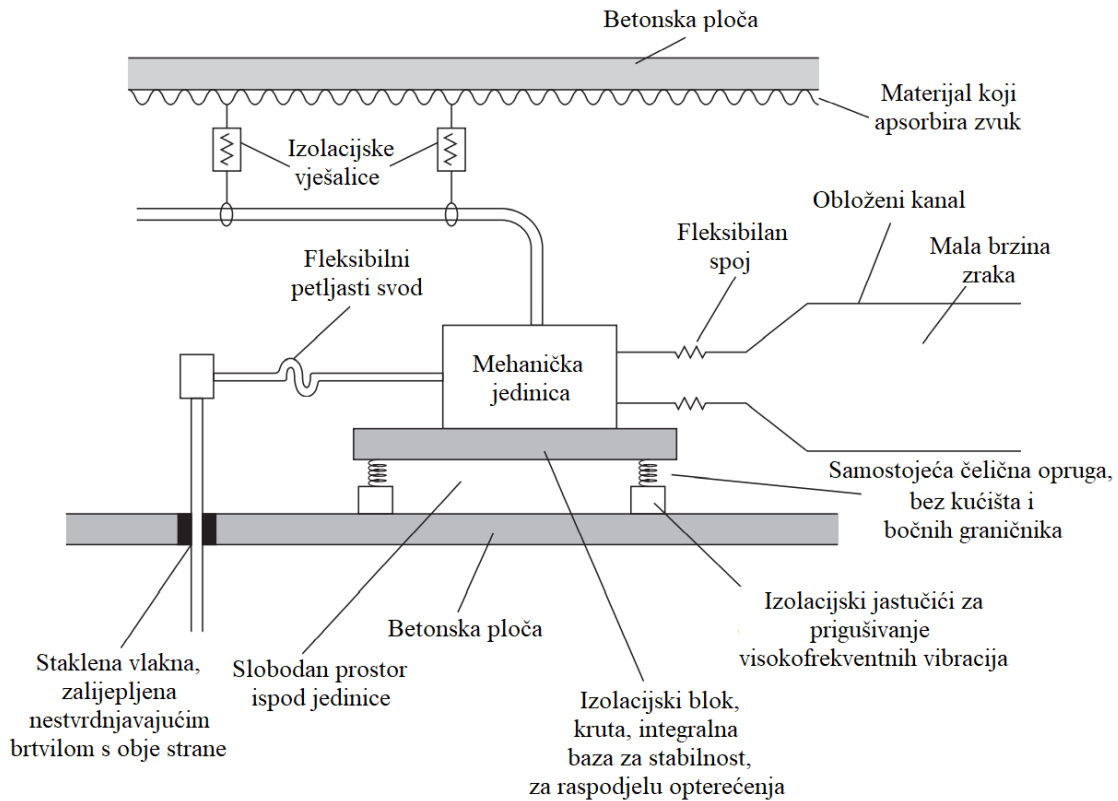
Slika 29: Klasični električni razvodni ormar (Izvor: Gervais, 2011, str. 116)

Osim potrebe da studio bude opskrbljen električnom energijom, neophodno je održavati pogodnu temperaturu, prozračenost i vlažnost (Beck i Zacharov, 2006). Riječ je dakle o HVAC sustavu. Prema Becku i Zacharovu (2006), prije odabira ventilacijskog sustava važno je definirati nekoliko elemenata. Jedan od takvih je unaprijed odrediti koliko će se često studio koristiti, jer svaki dio studijske opreme zajedno s ljudima proizvodi određenu toplinu. Osim toga čovjek predstavlja jedan od izvora vlage, a vlažnost predstavlja problem ne samo za čovjekovo zdravlje već i za instrumente i audio opremu. Ako je prisutna vlažnost velika može postati korozivna za instrumente, prouzročiti nelagodu izvođačima, a od prevelike vlage može nastati plijesan (Newell, 2008). S druge pak strane, prenizak postotak vlažnosti može „isušiti grlo pjevača i uzrokovati pucanje zvučnih ploča klavira“, stoga nekakav optimalan postotak

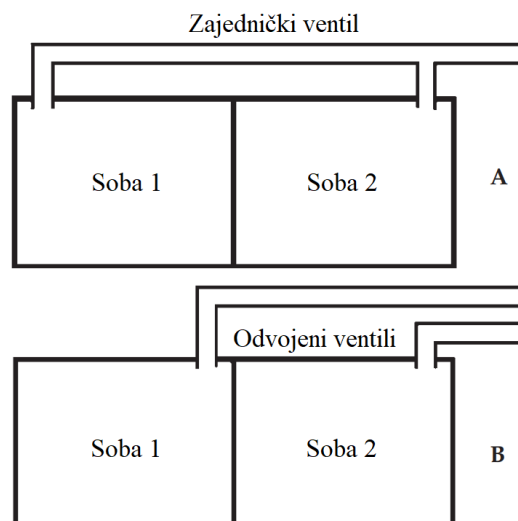
vlažnosti u prostoru koji bi se trebao održavati iznosi 60% (Newell, 2008, str. 256). Naposljetku, ventilacijski sustav potrebno je ugraditi na način da je buka koju proizvodi svedena na minimum koji ne ugrožava rad u tonskom studiju. Prema Everestu i Pohlmannu (2009), nekoliko faktora može poboljšati smanjenje buke protoka zraka kroz ventilaciju. To su pozicija, odnosno smještaj glavnog sustava HVAC-a, pomno isplanirana ugradnja svih komponenata sustava, izolacija zračnih kanala i strojarnice u kojoj se nalazi glavni sustav HVAC-a te kontrola nad brzinom prolaska zraka i rada ventilatora.

Blizina glavnog sustava HVAC-a može predstavljati problem akustički osjetljivim prostorijama kao što je tonski studio, ako je, primjerice, smješten netom iznad studija. (Everest i Pohlmann, 2009). Sustav dok je aktivan stvara vibracije koje bi se, osim putem stropa i zidova, prenosile i kroz pod prema studiju šireći na taj način buku. Stoga je iznimno važno smjestiti takav sustav daleko od svih akustički osjetljivih prostora. Može biti „smješten na suprotnoj strani zgrade, ili u prostoriji ili objektu koji je odvojen od svih osjetljivih prostorija“ ili obično u strojarnici (Everest i Pohlmann, 2009, str. 316). Nadalje, poželjno je izolirati sâmi motor zaslužan za ventilaciju na način da ga se odvoji od poda koji je dio građevinske konstrukcije. To se može učiniti postavljanjem motora na kruti izolacijski blok pa zatim na izolacijski materijal poput spiralnih opruga ili gumenih jastučića. Time je smanjeno širenje buke i vibracija proizvedenih motorom. Komponente kao što su cijevi ili kanali pričvršćuju se na izolacijske vješalice, a šupljine kroz koje prolaze prema svim prostorima, zabrtvljene su (Everest i Pohlmann, 2009). Također bi ploče od staklene vune, koje predstavljaju upijače zvuka, trebalo postaviti na strop i na zidove. Ovakvi postupci izolacijskih primjena moguće je vidjeti na primjeru slike 30. Everest i Pohlmann (2009) objašnjavaju kako je količina zraka koja je sustavu potrebna proizvesti i dopremiti do ciljanog prostora, osnovni parametar HVAC sustava. Koliko će buka turbulencije biti velika, ovisi o brzini strujanja zraka, stoga predložena brzina protoka zraka za tonska studija iznosi najviše 150 m/min (metara u minuti). Osim kontroliranja brzine strujanja zraka, Everest i Pohlmann (2009) predlažu još nekoliko elemenata koji pospješuju smanjenje buke ventilacijskog sustava. To je uporaba ventilacijskih kanala većeg promjera, uporaba rešetki s većim otvorima, uporaba pregibnih kanala pod glađim i zaobljenijim kutem, korištenje lopatica unutar kanala za što fluidnije usmjeravanje zraka, postavljanje materijala za upijanje zvuka unutar kanala, ugradnja plenuma, strujanje zraka u obje prostorije tonskog studija pomoću zajedničkog kanala pod uvjetom da su njihovi ventilacijski otvori što udaljeniji jedan od drugoga. Još bolji pristup bio bi da svaka prostorija ima svoj vlastiti ventilacijski kanal (slika 31).

Naizgled se ovakvo iznošenje osnovnih činjenica i savjeta o instalacijama električnog i ventilacijskog sustava ne čini toliko zahtjevnim. No, s obzirom na to koliko je zapravo riječ o tehnički zahtjevnom zadatku te koliko je zapravo znanja i iskustva potrebno imati i uložiti, nedvojbeno je potrebno osigurati stručnjaka u ovakvom projektu kako bi odgovarajući dizajn bio uspješno ostvaren i rezultat zajamčen (Beck i Zacharov, 2006).



Slika 30: Primjer izolacije HVAC sustava u strojarnici (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 317)



Slika 31: Primjeri instalacije sa zajedničkim ventilom (A) i odvojenim ventilima (B) (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 327)

## 6. ZVUČNA IZOLACIJA

Očigledna težnja akustičkog dizajna prostora je onemogućiti zvuku izlazak iz studija te izbjeći ugrožavanje rada profesora i koncentracije učenika u obližnjim učionicama glazbene škole (Newell, 2008). Jednako tako važno je i ne ometati tijekom snimanja vanjskom bukom ili zvukom ostalih instrumenata koji mogu dospjeti unutar studija što ukazuje da je izolacija zapravo dvosmjernan problem. Prilikom planiranja zvučne izolacije obično se razmatraju četiri aspekta: masa, krutost, prigušenje i udaljenost (Newell, 2008).

Velika masa, izložena akustičkom valu, reflektira puno više energije u odnosu na malu masu, jer sadrži veću inerciju, odnosno tromost. Drugim riječima, gušći medij pružat će veću akustičku impedanciju valu i otežati mu njegovu putanju (Newell, 2008). Ona predstavlja koliki će otpor zvuk pružati jednom kada njegovi zvučni valovi prođu kroz medij ovisno o gustoći medija i brzini širenja zvučnog vala kroz medij. Formula joj glasi<sup>8</sup>:

$$Z = \rho \cdot v$$

gdje je:

$Z$  = akustička impedancija (Pa·s/m<sup>3</sup>),

$\rho$  = gustoća medija (kg/m<sup>3</sup>),

$v$  = brzina širenja zvučnog vala kroz medij (m/s).

Što se aspekta krutosti tiče, Newell (2008) objašnjava kako masa koja nije kruta apsorbira energiju akustičkog vala koji stvara rezonancije u strukturi. Zbog toga masa potom vibrira na svojim prirodnim frekvencijama i, djelujući poput dijafragme, ponovno širi akustičku energiju. U suprotnom slučaju, potpuno kruta masa isključuje rezonanciju, a samim time i vibraciju koja podrazumijeva kretanje površina mase. Ako studio sadrži optimalnu izolaciju od 40 dB, a proizvode se zvukovi veći od 75 dBA<sup>9</sup>, preostalih 35 dBA predstavljaju smetnju za okruženje izvan studija, posebice ako je odlučeno koristiti studio u kasnijim satima. Realna vršna razina zvučnog tlaka, primjerice, bubnja iznosi minimalno 110 dBA. Smanjiti glasnoću bubnja je

---

<sup>8</sup> *acoustic impedance*. Oxford Reference. Izvor:

<https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095347872> (Pristupljeno: 31. siječnja 2022.)

<sup>9</sup> Mjerna vrijednost dBA vezana je uz pojmove „razina zvuka“ ili „glasnoća zvuka“. Naime, pri mjerenju razine zvuka potrebno je koristiti odgovarajući filter za ponderiranje od kojih su uobičajeni A, B i C filtri. Ovisno o tome koji filter je korišten pri mjerenju on pruža rezultat izražen u mjernim vrijednostima dBA, dBB ili dBC. U praksi se redovito za prikaz mjerenih vrijednosti razine zvuka upotrebljava dBA jer dobro korelira sa subjektivnim osjećajem glasnoće te se ujedno upotrebljava i za definiranje rizika od gubitka sluha uzrokovanog bukom. (prema Kleiner i Tichy, 2014, str. 420)

nemoguće, a tiho sviranje rezultira potpuno drugačijim karakterom i pruža drugačiju kvalitetu tona, stoga, to nije rješenje (Newell, 2008). Isto tako, vezano uz glazbenu školu, školski orkestar nekad ima potrebu glasno zasvirati ukoliko skladba koju izvode to zahtijeva. Ako bismo se oslonili samo na masu u strukturi za postizanje zvučne izolacije, oslonili bismo se na *zakon mase* u građevinskoj akustici (Newell, 2008). On nalaže sljedeće: ukoliko se inercija mase, ne njezina krutost, uzima kao vodeće pravilo za onemogućavanje zvuku izlazak van iz studija, tada se izolacija povećava za 6 dB pri svakom udvostručenju mase po jedinici površine. Newell (2008) pojednostavljuje shvaćanje zakona mase na sljedećem primjeru: cilj je, primjerice, postići izolaciju od 60 dB. Na raspolaganju je betonski zid debljine 20 cm koji omogućava izolaciju od 40 dB. Ukoliko se udvostruči debljina zida na 40 cm, izolacija se povećava na 46 dB. Pri sljedećem udvostručenju debljine zida na 80 cm, izolacija iznosi 52 dB, a na ponovnom udvostručenju zida na 1.60 m, zvučna izolacija iznosila bi 58 dB što je još uvijek nedostižno postavljenom cilju željene izolacije. Prema tome, bilo bi potrebno imati zidove debljine oko 2 m kako bi osigurali izolaciju od 60 dB, što u praksi nije zamislivo. Dakle, potrebno je okrenuti se drugačijem pristupu.

Ovdje se dolazi do trećeg aspekta zvučne izolacije, a to je prigušenje. Prigušenje ima veliki utjecaj na učinkovitost zvučne izolacije. Ono predstavlja stupanj do kojeg se akustički val apsorbirao tijekom širenja unutar materijala ili strukture. Dodavanjem prigušnog materijala između dva sloja pregradne površine, struktura ne mora nužno biti u potpunosti kruta, jer je prigušni materijal znatno oslabio prolaz akustičkih valova (Newell, 2008).

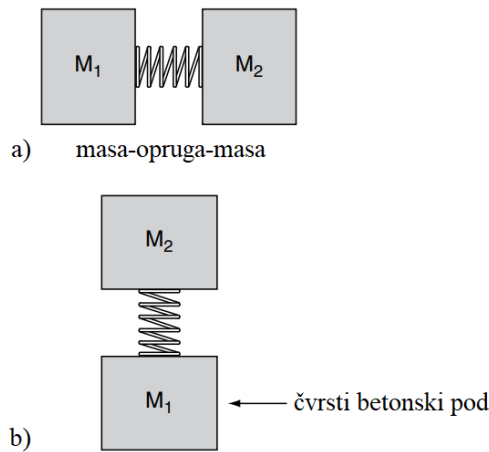
Što se četvrtog aspekta udaljenosti tiče, Newell (2008) objašnjava kako je potrebno uzeti u obzir i okruženje u kojemu bi se tonski studio nalazio. Drugim riječima, obratiti pozornost, primjerice, na blizinu prometa te koliko buke on proizvodi, obratiti pozornost na susjede, moguće poslovne zgrade (urede) te u ovome slučaju na učionice glazbene škole te rad profesora. Uzimajući u obzir o tome koliko bi rad u tonskome studiju ugrožavao i ometao blisko okruženje van njega i obrnuto, također ovisi o stupnju zvučne izolacije tonskog studija (Newell, 2008).

Na kraju krajeva, Newell (2008) napominje kako zvučna izolacija nikako nije jednostavna tema te se o njoj moraju brinuti stručnjaci. Svakako je važno prije same izgradnje studija zatražiti pomoć od odgovarajućih stručnjaka. Uostalom, znatno je manji trošak proračuna i profesionalne procjene stručnjaka za zvučnu izolaciju, nego trošak popravljivanja problema nakon izgradnje.

## 6. 1. Konstrukcija poda, zidova i stropa

Konstrukcija zvučne izolacije nije lagana, u smislu težine (Newell, 2008). Vrlo često zgrade s laganim podovima ujedno imaju i lagane zidove i stropove, što bi onda podrazumijevalo i težu konstrukciju pojačane izolacije koju građevina ne bi mogla izdržati. Takve zgrade nisu prikladne za izgradnju profesionalnog studija za snimanje. Samostalno pokretanje radova na konstrukciji zvučne izolacije bez odgovarajućeg znanja i ne savjetovanje s inženjerom akustike o potrebnoj odgovarajućoj čvrstoći i krutosti poda, osim što dovodi do loše izolacije, dovodi i do mogućeg urušavanja poda s neželjenim posljedicama (Newell, 2008). Prema Nisbettu (2003), tonski studio najbolje je sagraditi na čvrstom tlu, jer povećana zvučna izolacija podrazumijeva i veću masu pregradnih zidova, podova i stropa, stoga je statički sigurnije graditi na čvrstoj podlozi. Ukoliko se potencijalni prostor za studio ne nalazi na čvrstom tlu, primjerice prizemlju ili podrumu, Newell (2008) nalaže kako bi prema tome najbolja opcija za studio tada bila najniži kat s uvjetom da je zgrada čvrste konstrukcije.

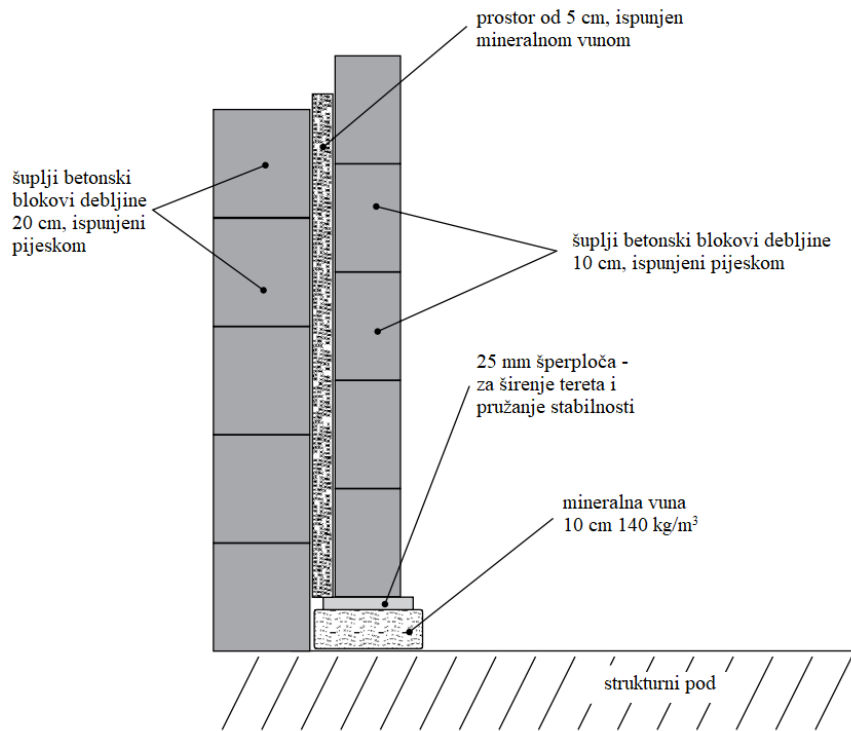
U praksi se izolacija obično postiže „mehaničkim odvajanjem unutarnje strukture prostorije od glavne građevine” (Newell, 2008, str. 34). To se ostvaruje poliuretanskom pjenom, čeličnim oprugama, neoprenskim ili gumenim blokovima ili mnogim drugim sredstvima. Time je postignuto takozvano „plutanje” unutarnje strukture prostorije oslanjajući se na rezonantni sustav: masa – opruga – masa. Takav princip ilustriran je na slici 32 u slučaju plutajućeg zida (a) i plutajućeg poda (b). Na primjeru plutajućeg zida, ako je pokrenuta masa  $M_2$ , odnosno pritisnuta na masu  $M_1$  i zatim otpuštena, inercija mase  $M_1$  oduprijet će se sili koja je djelovala na oprugu, a sustav će tada oscilirati u svojoj rezonantnoj frekvenciji. Iznad svoje rezonantne frekvencije sustav se vibracijskom energijom zagrijava, pri čemu se akustička energija pretvara u toplinsku što je spomenuto već u potpoglavlju o apsorpciji zvuka. U slučaju plutajućeg poda, uzemljena masa ( $M_1$ ) predstavlja čvrsti betonski pod s gotovo beskonačnom impedancijom. Ako je masa  $M_2$  pokrenuta, sustav oscilira na svojoj rezonantnoj frekvenciji do trenutka kada se sva energija rasprši. Koliko dugo će sustav oscilirati, ovisi o prigušenju. Ukoliko pokrenuta masa  $M_2$  uzrokuje „vibriranje na frekvenciji iznad rezonantne frekvencije sustava, opruga bi učinkovito odvojila vibracije od uzemljene mase,  $M_1$ ” (Newell, 2008, str. 35).



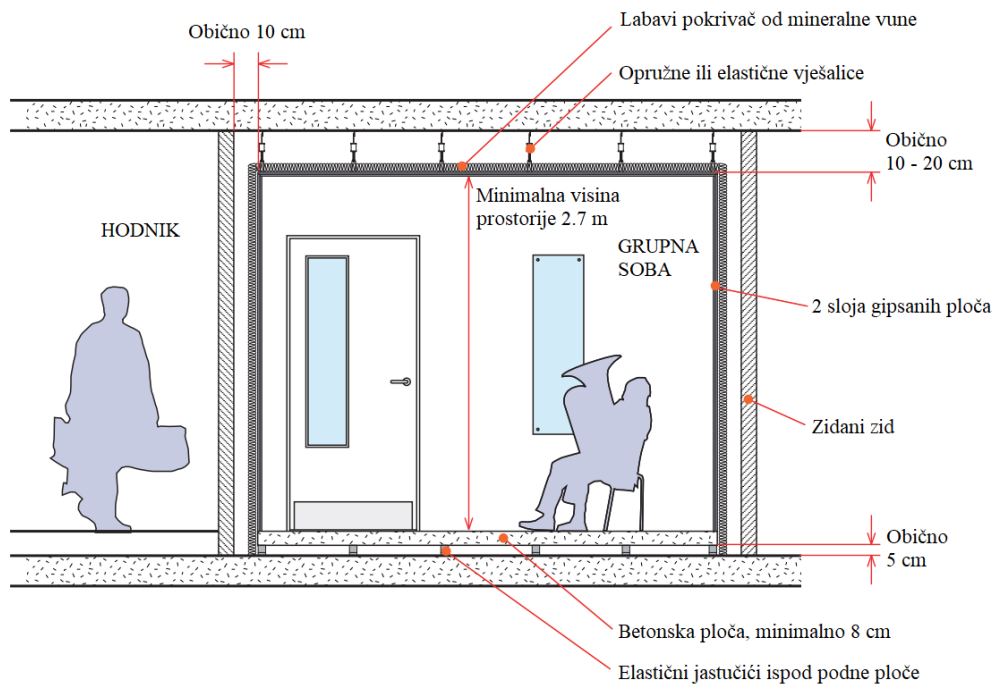
Slika 32: Sustav uzemljene mase-opruga-masa (Izvor: Newell, 2008, str. 35)

Prema Newellu (2008), cilj ovakvog principa zvučne izolacije, razdvajanje masa, jest obje strukture učiniti akustički neovisnima. Slika 33 prikazuje taj princip na temelju upotrijebljenih materijala u praksi. Ponovno se za primjer koristi težnja za postizanjem 60 dB izolacije. Struktura sastavljena od betonskih blokova ispunjenih pijeskom debljine 20 cm, pruža niskofrekventnu izolaciju od 40 dB. Jasno je vidljivo da nedostaje potrebnih 20 dB kako bi se ispunio željeni cilj. To bi značilo da je potrebno dodati unutarnju plutajuću konstrukciju zidova, odnosno betonskih blokova ispunjenih pijeskom, debljine 10 cm koja zadovoljava nužnih 20 dB dodatne izolacije. Ona će biti odvojena od vanjske konstrukcije (glavne građevine) prostorom ispunjenim mineralnom vunom debljine 5 cm, te odvojena od poda mineralnom vunom debljine 10 cm i 25 mm debelom šperpločom radi stabilnosti. Ovakav sustav naposljetku rezultira ukupnom debljinom od 35 cm i postigao je cilj izolacije od 60 dB, kakav bi postigao i prije navedeni način sa zidovima debljine oko dva metra. Da se zidovi dodiruju, valovi koji bi putovali kroz njih ne bi imali poteškoća u prijenosu kroz konstrukciju zida na svome putu te bi se lako širili dalje u obližnje prostore (Newell, 2008). U svrhu diplomskog rada preuzeo se upravo ovakav princip zvučne izolacije plutajućeg zida prema Newellovoj (2008) ideji, koristeći sve spomenute materijale točno na način kako su i opisani. Na slici 34 moguće je vidjeti da se sličan koncept zvučne izolacije u obliku razdvajanje masa zna primijeniti i u učionicama ili vježbaonicama udaraljki. Ovakvi principi zvučne izolacije pod nazivima „razdvajanje masa“ i „plutajuće površine“ poznati su još pod izrazima „kutija-u-kutiji“ i „soba u sobi“ (Acoustics of Schools, 2015; Gervais, 2011).



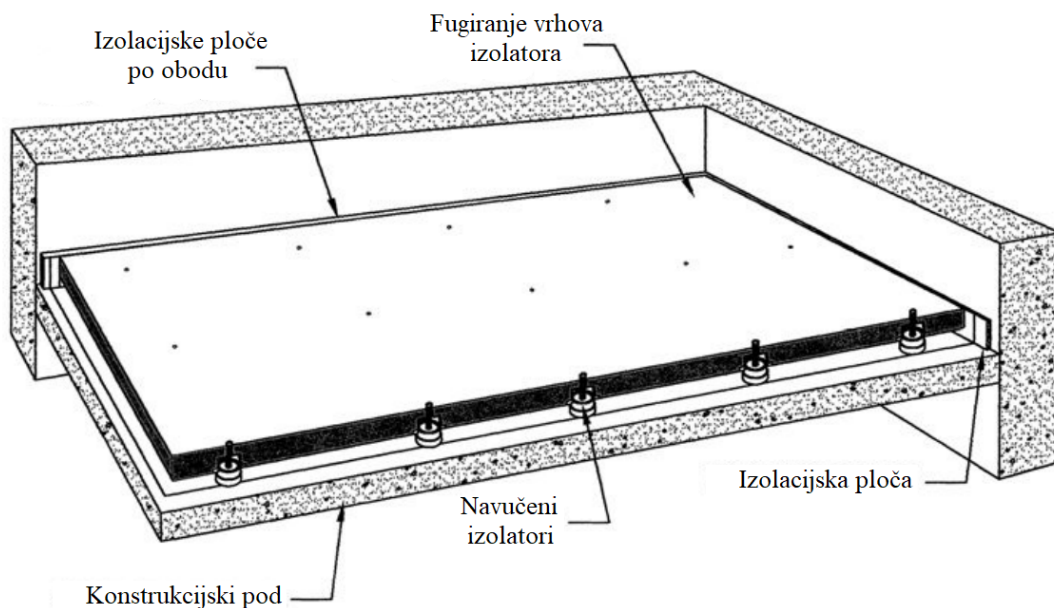


Slika 33: Plutajući zid - sustav uzemljene mase-opruga-masa u praksi (Izvor: Newell, 2008, str. 36)



Slika 34: Soba za udaraljke temeljena na koncepciji „kutija-u-kutiji“ (Izvor: Acoustics of School, 2015, str. 50)

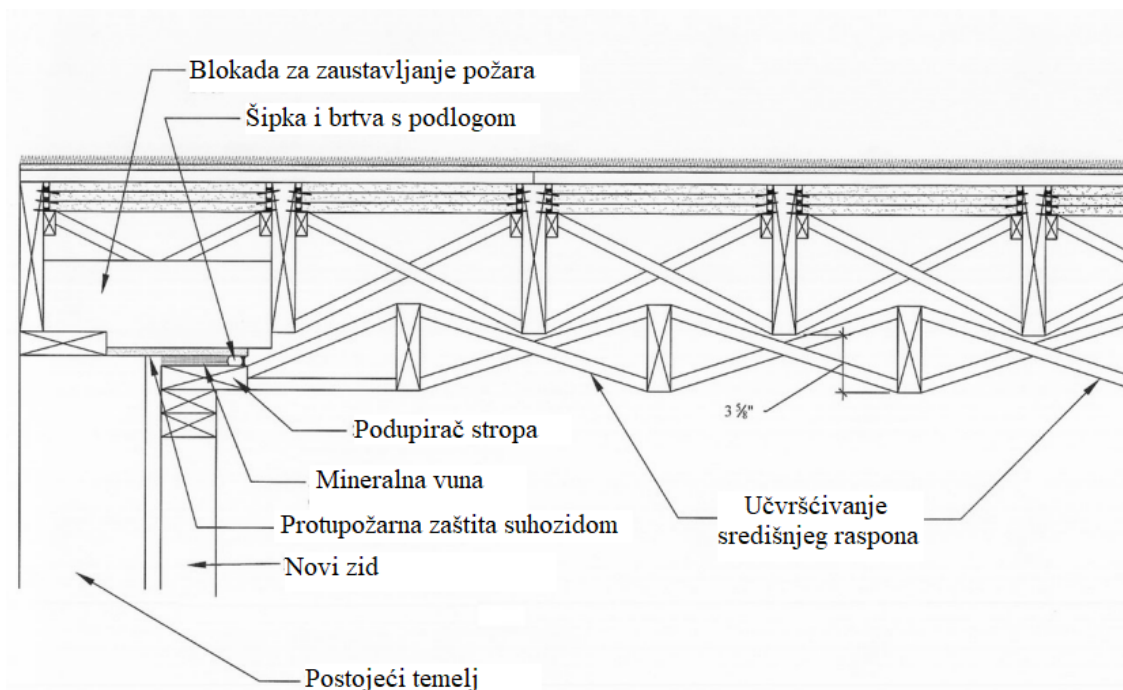
Za konstrukciju zvučne izolacije podova koristit će se princip izgradnje plutajućeg poda prema ideji autora Gervaisa (2011). Autor pojašnjava kako je prilikom izgradnje zvučne izolacije poda karakteristično korištenje opruga za podupiranje plutajućeg poda. Koliko će se opruga nalaziti ispod poda i na kojoj međusobnoj udaljenosti, ovisi o tome koliko će teški biti slojevi poslagani preko njih, uključujući i zidove i strop, te u konačnici općenito uzimajući u obzir težinu svih stvari koje bi se nalazile u prostoru. Gervais (2011) opisuje tijek izgradnje poda: na rubove zidova postavlja se izolacijska ploča, te se na postojeći betonski pod postavlja armatura (željezna mreža). Podupiruće opruge podešene na željenoj visini postavljaju se ispod armature na točke presijecanja. Svaku oprugu potrebno je žicom pričvrstiti za armaturu kako bi armatura ostala na mjestu jednom kad se preko nje prelije beton. Nakon toga potrebno je označiti liniju do koje bi se beton prelijevao. Ne smije se prije izlivanja betona zaboraviti ugraditi gumene čepove kako beton ne bi dospio unutar navojne komore opruga. Nakon što se beton izlio, autor naposljetku savjetuje najmanje 28 dana čekanja dok se beton potpuno ne stvrdne. Konačnu konstrukciju poda prikazuje slika 35.



Slika 35: Konstrukcija poda (Izvor: Gervais, 2011, str. 56)

Prema Gervaisu (2011), jedna od najučinkovitijih konstrukcija stropa u svrhu zvučne izolacije su neovisno ovješeni stropni sklopovi. Oni bi bili poduprti unutarnjom konstrukcijom zidova. Prednost koju pružaju takvi stropovi je ta što ne bi nametali nikakvu težinu i pritisak postojećoj strukturi. Slika 36 prikazuje jedan takav neovisni stropni sklop. Gervais (2011)

preporučuje da se za ovakve stropne grede koristi križno premoščivanje greda kako bi se gornji i donji sklop greda međusobno bolje uklopili. Autor također naglašava na umetnuti detalj protupožarne zaštite te ističe kako je važno uzeti u obzir stropne sklopove koji neće preuzimati ulogu dimnjaka u slučaju požara. Upotrijebljeni suhozid učinkovita je protupožarna zaštita i izolacija između struktura. Ovakvo vođenje računa o požarnim odjeljcima, navodi autor, „osigurava sigurno okruženje u slučaju nužde“ (str. 85). Pri obradi stropa, nužno je i ne zaboraviti kako je potrebno ostaviti dovoljno prostora između već postojećeg stropa i novonastalog stropa zbog potrebnih uvedenih kanala za strujanje zraka.

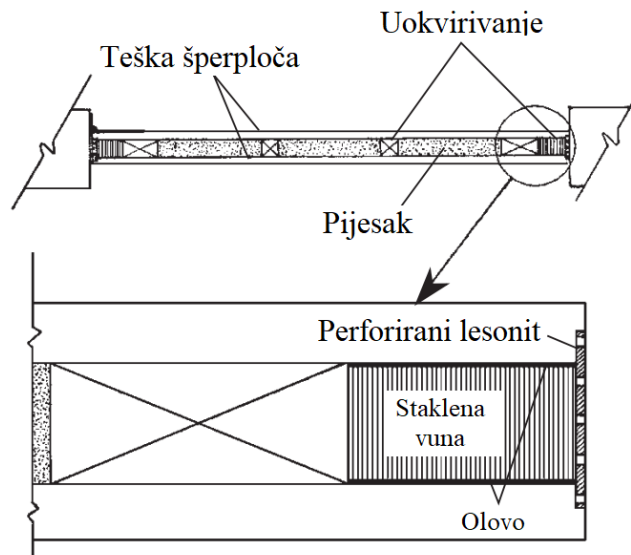


Slika 36: Konstrukcija stropa (Izvor: Gervais, 2011, str. 86)

## 6. 2. Konstrukcija vrata i prozora

Prema Everest i Pohlmann (2009), vrata mogu biti zahtjevan pothvat dizajna, jer ona za razliku od prozora nisu fiksno zabrtvljena. Autori pojašnjavaju kako je dobro zvučno izolirana vrata moguće postići uz uvjet zadovoljavanja nekoliko zahtjeva kao što su masa, krutost i nepropusnost. Na slici 37 prikazan je jedan primjer pristupa zvučne izolacije vrata koje autori predlažu. Prikazana vrata su u svojoj šupljosti unutrašnjosti ispunjena pijeskom, a ploče od kojih su vrata načinjena dvije su šperploče većih težina. Sustav montiranja i okvir trebali biti dovoljno jaki i izdržljivi kako bi se mogli prilagoditi težini vrata. Kvalitetno brtvljenje zvučno izoliranih

vrata, iznose autori, nije lako postići, jer u ovom slučaju za teška izolacijska vrata potrebna je velika sila, a učinkovitost brtvenih traka opada pri njihovoj istrošenosti. U izdvojenom detalju na slici 37 autori su prikazali jedan od načina kojim se omogućuje nepropuštanje zraka. U ovom slučaju to je pomoću izgrađenog upijajućeg ruba oko periferije vrata čija je uloga prepriječiti prolaz zvuku. Takav rub može se primijeniti i na dovratnik.



Slika 37: Konstrukcija vrata (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 303)

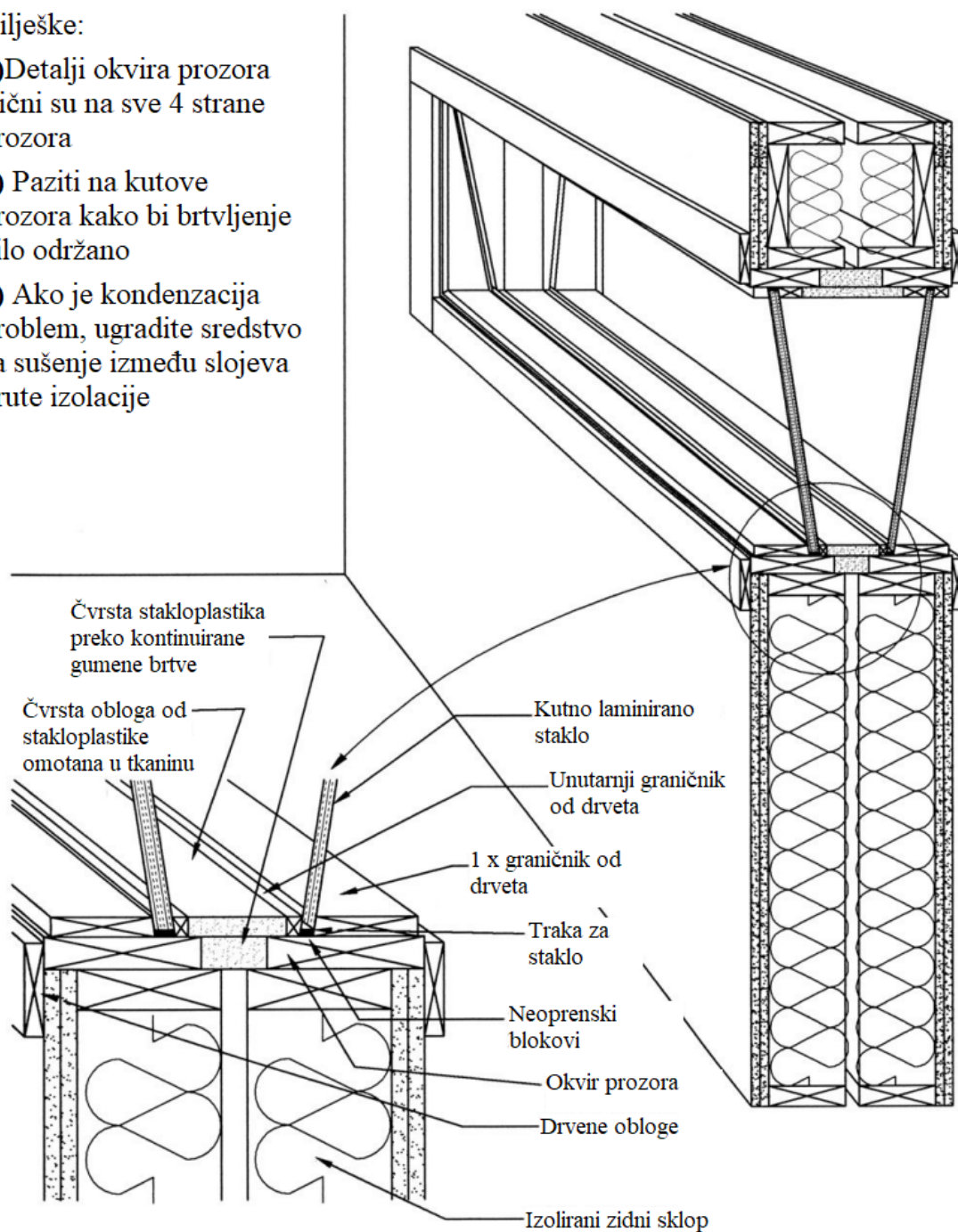
Osim što se komunikacija između režije i sobe za snimanje odvija preko tonskog pulta, ugradbeni prozor između sobe za snimanje i kontrolne sobe čest je i karakterističan način kako bi izvođač i inženjer zvuka međusobno mogli biti i u vidnoj interakciji. U današnjici je umjesto prozora učestala praksa ugradnje video kamera i ekrana u tonskim studijima kao jedan način komunikacije. U svrhu ovog rada ipak će se pristupiti klasičnoj ugradnji prozora s dvostrukim staklom između sobe za snimanje i kontrolne sobe temeljenoj na primjeru iz literature autora Gervaisa (2011) (slika 38) uz podrazumijevajuću prilagodbu dimenzija prozora prema postojećoj skici tlocrta tonskog studija. Prema tome, širina prozora iznosila bi 1,5 metara, a visina 1 metar.

Gervais (2011) navodi kako „teški drveni okvir prozora koji kontinuirano prolazi kroz otvor ne oslabljuje previše vrijednost gubitka prijenosa zvučne energije zida“, ali ukoliko se želi izvući „maksimalna korist, najbolje je koristiti odvojeni sklop drvenog okvira“ (str. 96). Autor objašnjava konstrukciju prozora sa slike 38 na slijedeći način: okvir prozora ugrađen je kao jednozidni sklop s drvenim okvirom. Ispod svakog stakla postavljene su neoprenske ploče

koje imaju ulogu stabilnog održavanja i potpore prozora u otvoru u zidu te je ujedno zbog njih omogućeno brtvljenje ispod prozora i uporaba trake za staklo namijenjena unutarnjem i vanjskom rubu okvira prozora. Postavljanje oba stakla međusobno ukoso ili paralelno stvar je osobnoga izbora. No, autor navodi nekoliko prednosti zakošenih prozora: sprječava inženjeru zvuka vidjeti odraze u staklu, sprječava vidjeti odsjaj od osvjetljenja, ali najvažnija prednost je ta što sprječava rane refleksije da se reflektiraju direktno prema inženjeru zvuka, već ih staklo usmjerava prema podu ili prema stražnjoj strani tonskog pulta. Na slici 38 moguće je primijetiti kako je jedno staklo prikazano s većom debljinom, a drugo s manjom debljinom. Razlog tome je što se u sobi za snimanje nalaze izvođači koji svojim izvedbama proizvode veliku „buku“, stoga je karakteristično da se deblje staklo postavlja prema sobi za snimanje, a tanje staklo prema kontrolnoj sobi. Na kojoj visini bi se u zidu, računajući od poda, ugradio prozor isključivo ovisi o položaju inženjera zvuka za tonskim pultom, što znači da bi se visina trebala, uzimajući također u obzir i moguće računalo iznad tonskog pulta, prilagoditi na način da inženjer zvuka ima jasan pogled na izvođače. Ako se pak u kontrolnoj sobi, unatoč adekvatnoj zvučnoj izolaciji, nakon što se potpuno utišaju monitori (zvučnici) vrlo slabo čuje glazba koja dopire iz sobe za snimanje, to je sasvim normalna pojava, jer je ta glasnoća dovoljno tiha da ne ometa proces snimanja i slušanja budući da ju ista glazba puštena kroz monitore prirodno nadjača i maskira.

Bilješke:

- 1) Detalji okvira prozora slični su na sve 4 strane prozora
- 2) Paziti na kutove prozora kako bi brtvljenje bilo održano
- 3) Ako je kondenzacija problem, ugradite sredstvo za sušenje između slojeva krute izolacije



Slika 38: Konstrukcija prozora (Izvor: Gervais, 2011, str. 102)

## 7. VRSTE AKUSTIČKE OBRADJE

### 7. 1. Apsorberi

Apsorberi su materijali koji apsorbiraju, odnosno upijaju zvuk (Everest i Pohlmann, 2009). Prema Everest i Pohlmann (2009), postoje tri vrste apsorbera koji se koriste u tonskim studijima ovisno o tome od kojih su materijala načinjeni i koja im je svrha uporabe. To su porozni, membranski i rezonatorski. Općenito, funkcija poroznih apsorbera učinkovita je u regulaciji visokih frekvencija, a karakteristični membranski i rezonatorski utječu na srednje i niske frekvencije. Bez obzira na materijale od kojih su građeni, ovi apsorberi funkcioniraju na jednak način (Everest i Pohlmann, 2009). Smanjuju mogućnost širenja zvučnih valova te smanjuju njihovu zvučnu energiju jer se ona ulaskom u apsorber raspršila u obliku topline. Autori dalje napominju kako valja biti svjestan da je toplina koja je nastala unutar apsorbera iznimno mala te da se ona ne može iskoristiti u svrhu zagrijavanja prostora.

#### 7. 1. 1. Porozni apsorberi

Porozni materijali karakteristični su po tome što u svojoj strukturi sadrže međuprostore, odnosno sićušne pore (Everest i Pohlmann 2009). Takvi su materijali obično pamuk, celuloza, staklena vuna ili bilo koja pjena, primjerice poliuretanske ili poliesterske pjene, koje sadržavaju karakteristične međuprostore koji omogućuju zvučnom valu prolaz kroz materijal (Everest i Pohlmann, 2009). Slika 39 prikazuje primjer poroznih apsorbera od poliuretanske pjene. Autori Everest i Pohlmann (2009) opisuju kako jednom kada zvučni val prođe u pamučnu vatu, pamučna vlakna aktivirana su vibracijom uzrokovanom zvučnom energijom te takvo trenje između zvučnog vala i pamučne vate pretvara energiju zvuka u toplinu. Najbitnije je stoga kod poroznih apsorbera da su sićušne pore, odnosno međuprostori dovoljno široki kako bi omogućili zvučnom valu ulazak te njegovu pretvorbu u toplinu. Ako su ti međuprostori preuski ili gotovo zatvoreni, oni ne predstavljaju kvalitetne apsorbere jer previše priječe zvučnom valu proboj u materijal. S druge pak strane, ukoliko su međuprostori preveliki energija zvučnog vala neće biti dovoljno apsorbirana i oslabljena. Stoga, učinkovitost poroznih apsorbera ovisi „o debljini materijala, zračnom prostoru i gustoći materijala“ (Everest i Pohlmann, 2009, str. 187). Postavljanje tankih poroznih apsorbera na površinu nažalost rezultira vraćanjem većeg broja refleksija u prostor, jer mala debljina apsorbirajućeg materijala nije dovoljna kako bi upio veći

dio zvučne energije na nižim frekvencijama zbog čega se zvuk odbija od površinu iza apsorbera i reflektira natrag u prostor. Takvi apsorberi mogu poslužiti čisto da se prostor malo priguši. Porozni apsorberi izrazito velike debljine imaju mogućnost potpuno upiti zvuk i njegovu energiju prije negoli kroz njih zvuk stigne do površine na kojoj se apsorber nalazi. No, takve velike dimenzije poroznih apsorbera nisu praktične u prostorijama ukoliko sama prostorija također nije prilično velikih dimenzija. Prema Everest i Pohlmann (2009), prekomjerna količina poroznih apsorbera u prostoriji ne rješava problematiku akustike prostora obzirom da je njihova uloga upijanje energije pretežito zvučnih valova visokih frekvencija.



Slika 39: Primjer poroznih apsorbera od poliuretanske pjene

Izvor: [https://i5.walmartimages.com/asr/55ea09da-fccf-49af-a311-45f44d881cf8\\_1.19763763742c29d55e15aacff9aca963.jpeg?odnHeight=450&odnWidth=450&odnBg=ffffff](https://i5.walmartimages.com/asr/55ea09da-fccf-49af-a311-45f44d881cf8_1.19763763742c29d55e15aacff9aca963.jpeg?odnHeight=450&odnWidth=450&odnBg=ffffff)

(Pristupljeno: 2. veljače 2022.)

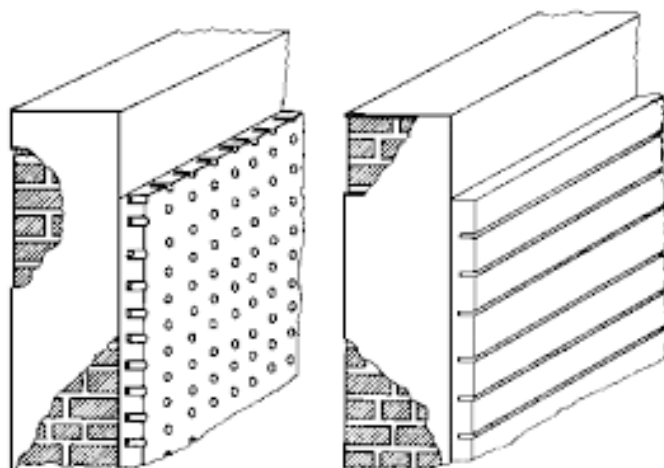
Ono što je zanimljivo je što nisu samo spomenuti specifični materijali namijenjeni za upijanje zvuka, već neke stvari koje se koriste u kućnoj upotrebi mogu poslužiti i imati ulogu kao upijači zvuka. Jedna od njih su zavjese (Everest i Pohlmann, 2009). Everest i Pohlmann (2009) objašnjavaju kako one predstavljaju poroznu vrstu apsorbera, jer zrak kroz njen materijal uspješno može protjecati te se zatim i apsorbirati. Koliko će se zvuk upiti u tkaninu zavjese, ističu autori, ovisi o tome kolika je težina njenog materijala i od kakve je tkanine napravljena. Drugim riječima, teže tkanine imaju mogućnost veće apsorpcije zvuka, primjerice, zavjese načinjene od velura osiguravaju jako dobru apsorpciju u odnosu na zavjese od lakših materijala koje gotovo i ne pružaju nikakvu apsorpciju. Osim toga, što je zavjesa više naborana, ona kao takva pruža unutar nabora veću površinu čime je i apsorpcija zvuka veća (Everest i Pohlmann,



2009). Tepihe i zavjese, objašnjavaju autori, vlasnici studija obično odabiru prvenstveno razmišljajući o izgledu i ugodnosti u prostoru, ali i tepih može poslužiti kao upijač zvuka visokih i srednjih frekvencija i to ne samo na podu, već i kao apsorber postavljen na zid. Autori, Everest i Pohlmann (2009), naveli su jedan primjer, odnosno razliku u apsorpciji zvuka dvaju tepiha različitih materijala postavivši ispod njih podlogu od lateksa. Došli do zaključka da je podloga od lateksa, u odnosu bez nje, poboljšala apsorpciju frekvencija zvuka iznad 500 Hz, a nešto manje frekvencije ispod toga. Prema tome, postavljanje podloge ispod tepiha poput filca, pjenaste gume ili kao što je u ovome slučaju bio lateks, uvelike utječe na stupanj apsorpcije zvuka. No, kako općenito ni u čemu ne valja pretjerivati, tako ne treba pretjerivati niti prekomjernom uporabom tepiha i zavjesa (Everest i Pohlmann, 2009).

### 7. 1. 2. Membranski i rezonatorski

Membranski apsorberi napravljeni su u obliku panela, zbog čega su još poznati i pod nazivom „akustički paneli”. Drugim riječima, od drvenih letvi ili laganih aluminijskih šipki oblikovan je okvir najčešće četvrtastog oblika, ispunjen poroznim materijalom te je čitav okvir potom prekriven obično tankom drvenom pločom bez rupica (membranski apsorber), ili s rupicama (rezonatorski apsorber) (slika 40) (Harris, 2009). Porozni materijali kojim se najčešće ispunjavaju ovakvi paneli su poliuretanske spužve, mineralna ili staklena vuna. Ono što je ključno kod ovakvih apsorbera je prostor zraka koji se nalazi između poroznog materijala i tanke ploče ili tkanine. Jednom kada zvučni val uđe u membranski apsorber, prednja strana apsorbera aktivirana je vibracijom dok je stražnja strana zatvorena i nepomična, a zvučna energija ostaje zatočena, pretvara se u toplinu te se više ne vraća natrag u prostor (Harris, 2009). Prema Harrisu (2009), membranski su apsorberi s perforiranom tankom drvenom pločom s većim postotkom perforacije učinkovitiji na srednjim i visokim frekvencijama, dok su apsorberi prekriveni s neperforiranom prednjom pločom ili pločom s manjim postotkom perforacije djelotvorniji na području srednje-niskih frekvencija. Membranski i rezonatorski apsorberi mogu se postaviti direktno na zid, ali mogu biti i prijenosni ukoliko se postave na stalak.



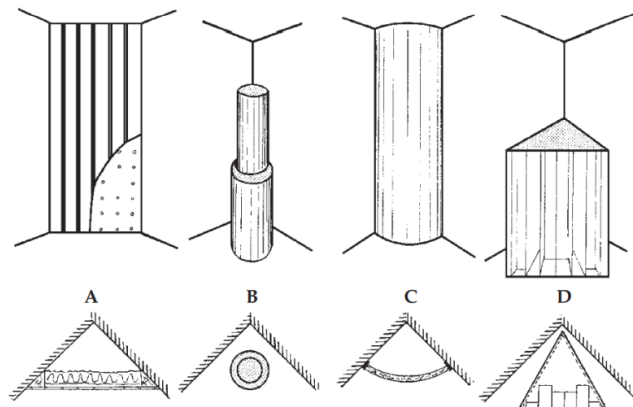
Slika 40: Rezonatorski apsorberi

Izvor: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT-j09wQMCjhngV5GnDbd1NrfRhqC7dYtoaBj8V69h8YGwgQ0ViAQh-IMH5c4iZsz79HVg&usqp=CAU>

(pristupljeno: 7. veljače 2022.)

### 7. 1. 3. Kutni apsorberi

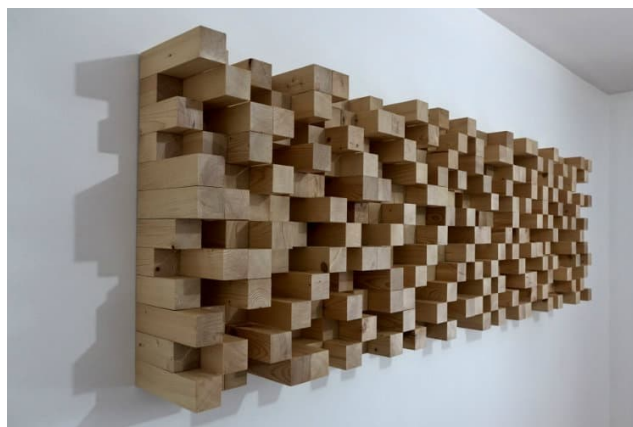
Karakteristika kutnih apsorbera je ta što su oni isključivo učinkoviti u području niskih frekvencija i kontroliranju stojnih valova. Autori Everest i Pohlmann (2009) objašnjavaju kako se njihova pozicija nalazi u kutevima prostora, jer su kutevi područja najviše nakupljenih zvučnih energija niskih frekvencija. Postoje četiri klasične vrste kutnih apsorbera i načina kako djeluju, a poznati su i pod engleskim nazivom *bass traps*, što bi u prijevodu značilo zamke za bas (slika 41). Prva vrsta (slika 41A) naziva se Helmholtz rezonatorska zamka koja je karakteristična po tome što ona prekriva čitav kut od stropa do poda. Ukoliko se promijeni dubina ove rezonatorske zamke moguće je proširiti apsorpcijski pojas (Everest i Pohlmann, 2009). Drugi apsorber (slika 41B) cilindričnog je oblika te se sastoji od jedne veće jedinice postavljene na pod i jedne manje koja je položena na njega. Ovakav rezonatorski apsorber upija niske frekvencije, ali zbog svog vanjskog materijala ima mogućnost odbijati više frekvencije čineći ga zbog toga djelomično i difuzorom. Slika 41C prikazuje akustičku ploču koja prekriva čitavi kut. Stražnji dio ploče načinjen je od zakrivljene reflektorske trake, a zrak koji se nalazi iza ploče predstavlja zamku za niske frekvencije. Naposljetku, četvrta vrsta kutnog apsorbera (slika 41D) sadrži dvije upijajuće stranice usmjerene prema kutu, a prednja stranica usmjerena prema prostoriji i ona reflektira zvuk natrag u prostor (Everest i Pohlmann, 2009).



Slika 41: Kutni apsorberi (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 336)

## 7. 2. Difuzori

Difuzori u odnosu na apsorbere čista su suprotnost. Oni predstavljaju vrstu akustičke obrade s reflektirajućom površinom koja reflektira zvuk natrag u prostor. Njihova je uloga raspršivanje zvučnih valova u svim smjerovima kako bi se na taj način zvučni valovi ravnomjerno rasporedili prostorijom ujedno time stvarajući određeni ambijent u prostoru. Osim toga, njihove bi se putanje ujedno produljile što bi rezultiralo opadanjem njihove zvučne energije i time izbjegli neke od nepoželjnih zvukovnih problema. Kao i apsorberi, tako i difuzora ima brojnih oblika, veličina i dizajna. Slika 42 prikazuje jedan od popularnih dizajna difuzora kojima vlasnici studija često znaju prekriti velik dio zidova ili stropa.



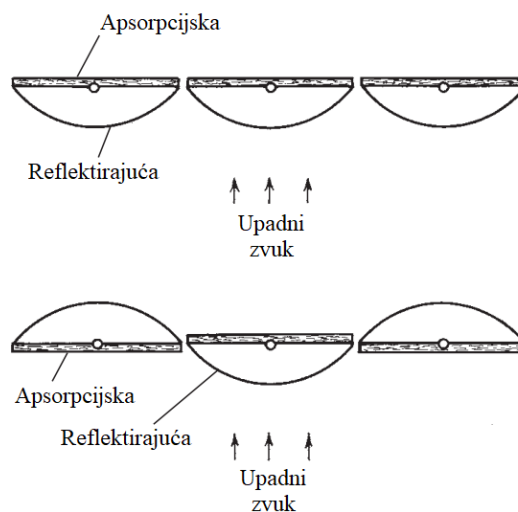
Slika 42: Difuzor

Izvor: <https://betersoundproofing.com/wp-content/uploads/2019/03/DIY-Skyline-Diffuser.jpg>

(pristupljeno: 7. veljače 2022.)

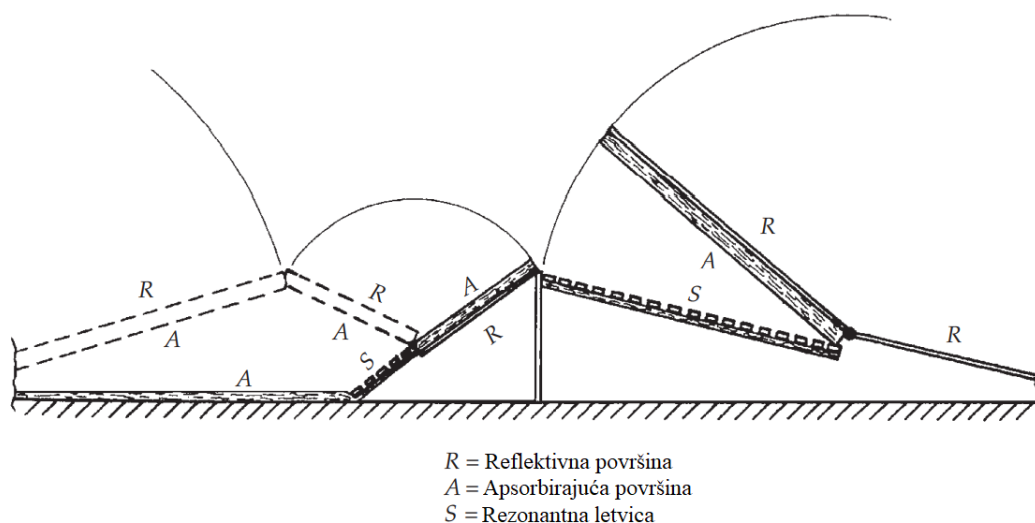
### 7. 3. Kombinirani apsorberi i difuzori

Osim što postoje apsorberi i difuzori napravljeni kao zasebni elementi, postoje i razni elementi koji čine kombinaciju i jednih i drugih. Slika 43 prikazuje jedan od takvih elemenata. Riječ je o rotirajućem elementu koji na jednoj strani sadrži apsorber, a na drugoj difuzor cilindričnog oblika (Everest i Pohlmann, 2009). Ovakav kombinirani element prilagodljiv je prema potrebi te se zbog svoje veličine i mehanizma rotacije preporučuje koristiti u većim prostorijama. Autori Everest i Pohlmann (2009) opisuju kako se, primjerice, soba za snimanje može dizajnirati na način da se ovakvi rotirajući elementi ugrade i nižu na stropu svaki postavljen na drugačijoj visini. Još jedan primjer rotirajućeg elementa predstavlja Triffusor koji sadrži tri strane različitih vrsta akustičke obrade: apsorpcijska, difuzijska i reflektirajuća strana (Everest i Pohlmann, 2009).



Slika 43: Rotirajući element (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 284)

Jedan vrlo učinkovit, praktičan kombinirajući element je jedna vrsta panela koja također pruža fleksibilnost kombiniranja potrebnih apsorbera ili difuzora (Everest i Pohlmann, 2009). Riječ je o panelu koji sadržava različite površine apsorbera, difuzora i rezonantnih ploča pod različitim kutevima koje se prema potrebi mogu otvarati i zatvarati te na taj način prilagođavati akustici prostora (slika 44).



Slika 44: Kombinirajući panel (Izvor: Everest i Pohlmann, 2009, str. 283)

#### 7. 4. Položaji apsorbera i difuzora u prostoriji

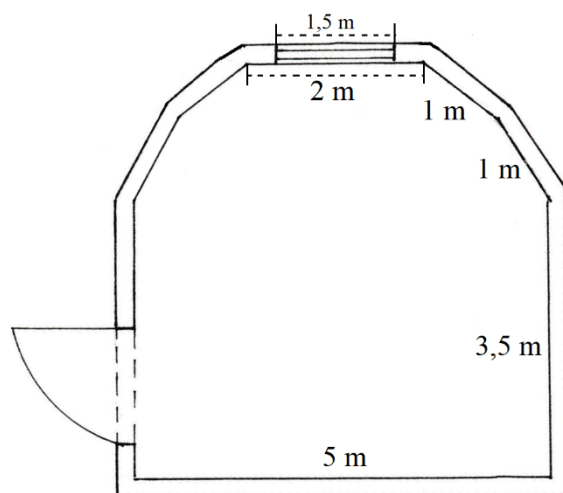
Zastupljenost apsorbera i difuzora u muzičkom prostoru znatno pridonosi kvalitete njegove akustike (Everest i Pohlmann, 2009). Osim što se njima poboljšava zvučna akustika i zvučna slika, njima se rješava i zatamljuje problematika koja je u većini slučajeva uzrokovana refleksijama. Autori Everest i Pohlmann (2009) savjetuju kako bi bilo poželjno, ukoliko se koristi više vrsta upijača zvuka, montirati nekoliko njih od svake vrste na strop, na bočne zidove i na stražnjem zidu kako bi oni na takav način mogli utjecati na sva tri stojna vala. Nadalje, savjetuju kako bi najučinkovitije bilo smjestiti apsorbere uz rubove površina i u uglovima prostora ukoliko je riječ o pravokutnim prostorijama. Objašnjavaju kako bi, primjerice, u govornim studijima bilo potrebno upijajuće materijale za visoke frekvencije postaviti u ravnini glava govornika i slušatelja. Na kraju krajeva, postoje razni načini, kombinacije, razlozi i ciljevi postavljanja određenih vrsta akustičke obrade na određena mjesta na površinama prostora. Ponekad je to subjektivno pitanje iz perspektive vlasnika tonskog studija u kontekstu kakav konačni zvučni ugođaj želi stvoriti u svome studiju. Ono što je svakako najbitnije jest prvenstveno riješiti problematiku niskih frekvencija i problematiku ranih refleksija.

Razmatrajući kamo postaviti apsorbere i difuzore, vezano za početak uz kontrolnu sobu, prema Gervaisu (2011), postoji nekoliko načina koji su se primjenjivali tijekom prošlih desetljeća. Prvi od njih nastao je 60-ih godina 20. stoljeća transformirajući kontrolnu sobu u takozvanu *mrtvu sobu*. Naziv potpuno opravda smisao, jer je takva soba ispunjena isključivo

apsorberima čiji je rezultat potpuno gluha soba bez odjeka. Iako takav dizajn prostora nije mogao stvarati izobličena te je omogućavao inženjeru zvuka realnu zvučnu sliku iz monitora (zvučnika), takvo okruženje inženjeru zvuka vrlo brzo postaje nelagodno. Zbog nedostatka odjeka u prostoru kojeg su apsorberi potpuno prigušili, inženjer zvuka brzo se može izmoriti. Takav prostor veoma je neprirodan jer je čovjek prirodno naviknut slušati refleksije zvuka (Gervais, 2011). Razmišljajući kako riješiti očigledan slučaj s ovakvom problematičnom kontrolnom sobom, počelo se prednje zidove, na mjestima gdje se nalaze monitori (zvučnici) i tonski pult, oblagati kamenjem, dok bi stražnji dio prostora ostao apsorbirajući, a bočne strane i strop sadržavali su zaobljene površine kontrolirajući na taj način lepršajuću jeku (Gervais, 2011). Takvi prostori, objašnjava Gervais (2011), ipak su uzrokovali značajne probleme sa zvukovima unutar prostora te je svaka takva prostorija zapravo zvučala različito. Stoga se 80-ih godina prošloga stoljeća pojavio dizajn koji je ubrzo postao vrlo popularan, a to je LEDE dizajn, prema engleskom izrazu *Live End/Dead End* što bi u prijevodu značilo da je jedan kraj prostora zvukovno „živ“, a suprotni „mrtav“ (Everest i Pohlmann, 2009; Gervais, 2011; Long, 2006). Ovim dizajnom podrazumijevalo se da je prednji kraj kontrolne sobe taj koji je potpuno obložen apsorberima stvarajući dio prostora gotovo bez odjeka, dok bi stražnji dio bio prekriven difuzorima šireći zvuk u svim smjerovima (Gervais, 2011). Ovo je bio nov način regulacije refleksija zvuka u prostoru, poboljšanje stereo zvučne slike te ujedno i prvi pokušaj vođenja računa o psihoakustici prilikom prilagodbe prostora. Desetljeće kasnije pojavio se dizajn koji je bio potpuno oprečan LEDE dizajnu. Riječ je o ESS dizajnu punog naziva *Early Sound Scattering* što bi u prijevodu značilo „raspršivanje ranog zvuka“ (Gervais, 2011). Ovaj dizajn uvjetovan je izrazito difuznim prednjim krajem prostora, dok je ostatak bio apsorbirajući. Konačan ishod ovakvog dizajna kontrolne sobe bio je ujednačeno raspršene refleksije koje nisu imale mogućnost utjecati, odnosno kvariti tijekom slušanja, jer je osnovni cilj prednjeg difuznog dijela prostora bio raspršiti rane refleksije, dok preostali upijajući dio prostora drži kontrolu niskih frekvencija. ESS dizajn pružao je ujedno i odličnu stereo sliku te je pružao osjećaj akustički „živog“ prostora (Gervais, 2011).

Za ovaj diplomski rad odabran je LEDE dizajn s jednim dodatnim karakterističnim pristupom namijenjenim za kontrolne sobe. Željeni pristup može se ostvariti na dva načina kojima je cilj potpuno jednak, a to je stvaranje „zone bez refleksija“ u području inženjera zvuka, odnosno onoga tko sjedi za tonskim pultom. Takav pristup poznat je pod engleskim izrazom *Reflection Free Zone* (RZF) (Everest i Pohlmann, 2009; Gervais, 2009). Unutar područja u kojemu je smješten inženjer zvuka pred monitorima (zvučnicima) i tonskim pultom nastaje dakle područje u kojemu nema problematike s refleksijama (Everest i Pohlmann, 2009). To se

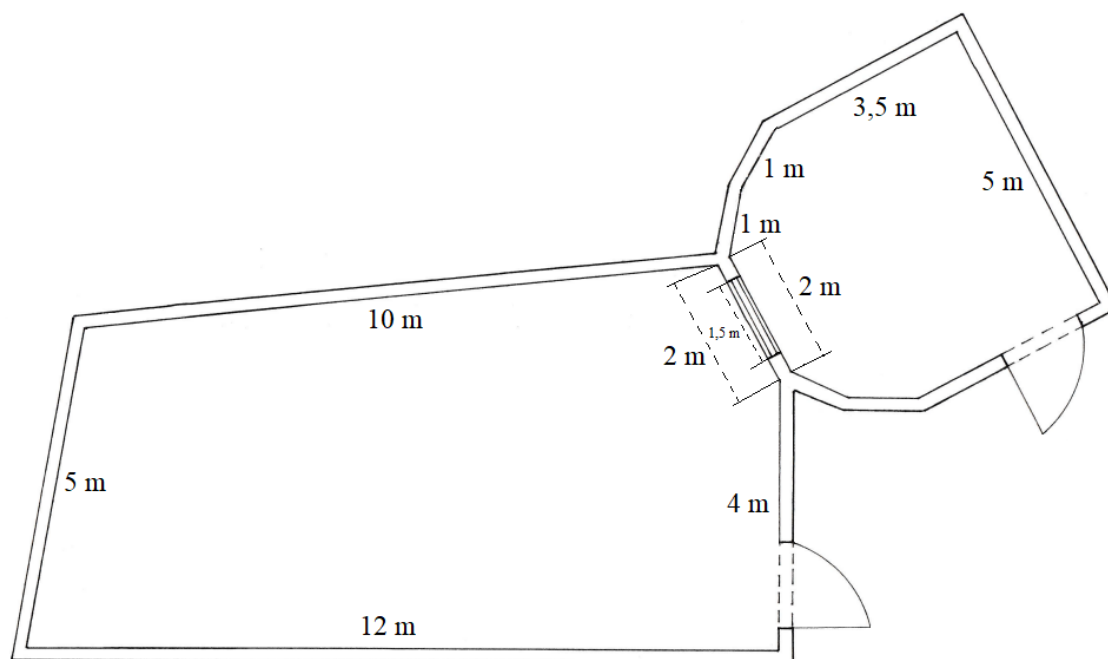
izričito odnosi na problematiku ranih refleksija, odnosno prvim refleksijama odmah nakon direktnog zvuka, koje se pojavljuju iz više smjerova, jer se svaka rana refleksija odbija od oba bočna zida, stropa i poda te stižu na mjesto slušateljeva uha. Kako bi se ostvarila zona bez refleksija u području inženjera zvuka, potrebno je zatamiti rane refleksije. Postoji jedan zgodan način kojim se mogu pronaći mjesta prvih refleksija. Sve što je potrebno posjedovati je jedno maleno ogledalo i pomoć druge osobe. Slušatelj bi trebao sjediti na mjestu ispred monitora (zvučnika) za tonskim pultom te pomičući glavu pratiti drugu osobu koja prislonjeno ogledalo na zid pomiče u svim smjerovima. U trenutku kada slušatelj u ogledalu ugleda monitor, to je mjesto prve refleksije ugledanog monitora. Takav postupak bilo bi potrebno primijeniti za oba monitora na svakom bočnom zidu i stropu. Pronađena mjesta prvih refleksija trebalo bi potom prekriti visećim upijačima zvuka, a to se obično čini poroznim ili rezonatorskim apsorberima. S obzirom da nije uobičajeno da se takvi upijači zvuka poliježu na pod, njega će biti dovoljno prekriti odgovarajućim tepihom. Ovakvim načinom traženja točaka prvih refleksija na površinama, može se poslužiti svatko tko ima u planu stvoriti mali kućni studio ili svatko tko općenito ima želju riješiti ili poboljšati akustiku u svom domu. Ovakvo rješavanje problematike ranih refleksija pomoću apsorbera, jedan je način za ostvarivanje zone bez refleksija, posebice ako je prostorija četvrtastog oblika. U svrhu diplomskog rada odabran je drugi način ostvarivanja zone bez refleksija. On ovisi „o oblikovanju površina kako bi se poništio negativni učinak refleksija“ (Everest i Pohlmann, 2009, str. 362). Drugim riječima, površine prednjeg dijela prostora formirale bi specifičan oblik koji bi manipulirao smjerom kretanja ranih refleksija. Postavljanjem zidova (površina) prednjeg dijela kontrolne sobe na određeni način također omogućuje ugradnju monitora (zvučnika) unutar zidova koji tada pod potrebnim kutem usmjeravaju direktan zvuk ka slušatelju, odnosno inženjeru zvuka. Potrebno je stoga postojeći tlocrt kontrolne sobe promijeniti i prilagoditi. Slika 45 prikazuje novi tlocrt, odnosno okvirnu skicu kako bi otprilike trebala izgledati kontrolna soba sa specifičnim oblikom prednjeg dijela prostorije. Monitori bi u ovom slučaju bili ugrađeni u prve zakošene bočne površine. Prednost ovakvog oblika je u tome što rane refleksije iz monitora tada ne bi stizale do slušatelja već bi se odbile od slijedećih ukošenih bočnih površina pokraj monitora koje bi ih zatim reflektirale iza slušatelja u stražnji dio prostora. Isto tako bi jedan dio stropa iznad tonskog pulta bio nakošen na način da se rane refleksije koje putuju prema stropu odbiju od njega i izbjegnu slušatelja na način da se reflektiraju iznad slušateljeve glave. Stražnji dio prostora do kojeg bi stizale rane refleksije bio bi prekriven difuzorima koji bi ih tada raspršili u razne smjerove te ih na taj način i oslabili. Postavljanjem apsorbera na mjesta gdje se rane refleksije odbijaju i u ovakvom prostoru, dodatno bi ih prigušili.



Slika 45: Novi tlocrt kontrolne sobe (Izvor: iz vlastitog arhiva)

Između ostalog, jedan od čestih problema mogu predstavljati i refleksije odbijene od tonkog pulta, jer one i na takvome mjestu u kombinaciji sa direktnim zvukom mogu stvoriti češljasti filter (Everest i Pohlmann, 2009). Stoga, uz podrazumijevajuću potrebnu višu poziciju monitora (zvučnika) pod određenim kutem, spomenuto pomicanje nagiba zidova, odnosno površina prostora, može rezultirati zonom bez refleksija čak i preko cijelog tonkog pulta (Everest i Pohlmann, 2009). Naposljetku, promjenom izgleda i oblika kontrolne sobe, potrebno je stoga promijeniti i konačnu skicu tlocrta cijelog tonkog studija. No, ovoga je puta organizacija prostorija tonkog studija malo promijenjena. Naime, sobi za snimanje uklonjen je jedan kut te je na mjesto tog kuta smještena kontrolna soba. Ovakva promjena, koja je vidljiva na slici 46, rezultira dodatno asimetričnom sobom za snimanje što joj zapravo još više ide u korist, a kontrolna soba ima bolji pogled na čitav prostor sobe za snimanje.





Slika 46: Konačna skica tlocrta tonskog studija (Izvor: iz vlastitog arhiva)

Što se tiče postavljanja apsorbera i difuzora u sobi za snimanje, najbitnije je prije svega svakako postaviti kutne apsorbere u kuteve prostora kako bi se izvršila kontrola nad problematičnim niskim frekvencijama i stvorenim stojnim valovima. Prostranost koju puža velika soba za snimanje omogućuje postavljanje rotirajućih elemenata na strop te se po potrebi mogu rotirati ovisno o kakvoj vrsti izvođača je riječ te ovisno o tome gdje su izvođači smješteni u prostoru. Iz istih razloga na bočne zidove mogu se postaviti kombinirajući paneli. Ukoliko je potrebno još više prilagoditi prostor određenom izvođaču, mogu se koristiti prijenosni apsorberi i difuzori kako bi se dodatno mogla poboljšati ili kontrolirati akustika.

## 8. STUDIJSKA OPREMA

Studijska oprema nešto je bez čega tonski studio ne bi imao smisla. Bez audio opreme ne bi bio snimljen i ovjekovječen niti jedan glazbeni projekt. Prva audio oprema u nizu je ona bez koje niti jedan zvuk ne bi mogao biti „ulovljen“ i snimljen, a to je mikrofoni. Postoji nekoliko vrsta različitih mikrofona, a razlog tome je što se različite vrste mikrofona prilagođavaju različitim bojama glasova, različitim instrumentima, okruženju u kojem se snima ili ozvučava, prilagođavaju se različitim tehnikama snimanja te naposljetku određenom broju ljudi koje se snima. Mikrofonom „ulovljeni“ zvuk trebao bi nekim načinom sići do središnjeg uređaja u kontrolnoj sobi, a to je omogućeno kablom. Kao i mikrofoni, tako postoje i različite vrste kablova s različitim konektorima na krajevima kablova koji se koriste ovisno o kakvoj je potrebi ožičenja riječ, vrsti audio opreme i udaljenostima između audio uređaja. U središtu kontrolne sobe smješten je glavni uređaj na kojeg je spojena većina audio uređaja. Riječ je o tonskom pultu čija je glavna uloga obrada čitavog niza zvučnih signala. Kako bi se snimljeni zvučni signal mogao grafički pratiti i digitalno obrađivati, potrebno je računalo koje sadrži jedan od nekih programa za obradu zvuka (DAW - *digital audio workstation*). Razvojem tehnologije, danas je postalo gotovo uobičajena praksa obrađivati audio signale upravo digitalnim putem, digitalnim uređajima i programima za obradu zvuka, zbog čega većina ljudi danas može kreirati i obrađivati svoje pjesme u svome domu s vrlo malo audio opreme. No, još uvijek je na neki način nemoguće odvojiti se od „fizičkih“ uređaja za obradu zvuka koji se nazivaju analognim uređajima. Iako su često zamijenjeni digitalnim varijantama, kao što je spomenuto, analogni uređaji ipak pružaju svoje posebne karakteristike i boju prilikom obrade zvuka. Potrebno je zatim snimljeni zvučni signal i čuti, stoga su u studiju potrebni i zvučnici, odnosno, pravilniji termin koji se za njih primjenjuje su monitori. Ostala oprema koja je česta u tonskim studijima su studijske slušalice, stalci za mikrofone, stalci za note, pop filteri namijenjeni reduciranju pucketavih smetnji prilikom pjevanja, ormarići za opremu unutar kojih se smještaju analogni uređaji, pojačala, DI-boxovi (*direct inject box*), odnosno pomoćni uređaji koji omogućavaju prilagodbu izvora signala kao što su električne gitare ili klavijature koji nemaju adekvatne karakteristike spojiti se na tonski pult, i još brojna druga oprema koja se može pronaći u profesionalnom tonskom studiju. Naposljetku, svaki je element studijske opreme na neki način međusobno povezan s drugima. Jedan ne bi mogao funkcionirati ili realizirati svoju svrhu bez drugoga.

## ZAKLJUČAK

Od početne ideje do same izgradnje jednog profesionalnog tonskog studija vrlo je kompliciran i složen proces. Veliko se znanje o glazbenoj akustici krije iza ostvarivanja ovakvog projekta, a sve prvenstveno kreće od samoga zvuka. Zvuka čije postojanje jedinstveno djeluje na nas kao ljude, a čije izobličenje izaziva poteškoće u ozračju profesionalnog studija. Potrebno je stoga znati kako se to zvuk ponaša u zatvorenom prostoru i koliku težinu problema time može stvarati. Projektiranje visokokvalitetnog tonskog studija nije moguće ostvariti niti bez savjetovanja i djelovanja određenih stručnjaka prilikom dizajna i izgradnje kako bi se od početnog prostora mogla stvoriti optimalna kontrolna soba i soba za snimanje. Novim saznanjima o akustici prostora kreativan proces stvaranja može rezultirati novim idejama, mijenjanjem tlocrta se može možda doći do boljih karakteristika samih prostorija, a samim time i njihovog smještaja ukoliko je to nužno ili ukoliko mogućnosti prostora to dozvoljavaju. Iako postoji brojna literatura koja dublje ulazi u svaku obrazloženu temu ovog diplomskog rada, ovo je pokušaj da se kompleksna problematika glazbene akustike približi glazbenicima i profesorima koji rade u glazbenim školama kako bi se populariziralo područje audio produkcije u glazbenim školama.

Tijekom pisanja ovog diplomskog rada došla sam do spoznaje koliko toga je zaista nužno poznavati za jedan ovakav projekt te da ga je bolje ostaviti u rukama stručnjaka koji iza sebe imaju veliko iskustvo. Ipak, osnovno znanje i savjeti o akustici u ovom diplomskom radu može pridonijeti svakome tko ima u planu poboljšati akustiku u svome domu ili oblikovati svoj mali kućni studio. Jedna od prednosti koju sam prepoznala tijekom pisanja ovog rada, je postojanje tonskog studija u glazbenim školama u nekoliko većih gradova Republike Hrvatske što bi već u ranijoj dobi omogućilo velikom broju učenika osnovnih i srednjih glazbenih škola iz prve ruke doživjeti i iskusiti okruženje i rad u tonskom studiju i produkciji. Takav način pruža učenicima mogućnost da im se razvije potencijalna želja da se time bave u budućnosti. Samim time otvorena je mogućnost korištenja studija u pedagoške svrhe te bi, primjerice, srednja glazbena škola mogla u svoj plan i program uvrstiti i predmete koji obuhvaćaju područje audio produkcije, odnosno snimanja i obrade zvuka. Svakako, najvažnija prednost bila bi arhiva raznih snimljenih školskih projekata, a posebice što je time ovjekovječeno učenicima glazbenih škola njihov dugogodišnji trud i rad tijekom školovanja u glazbenoj školi.

# BIBLIOGRAFIJA

## Knjige:

1. Building Bulletin 93 (2003): *Acoustic design of schools: performance standards*. United Kingdom: Education Funding Agency
2. *Acoustics of Schools: A Design Guide* (2015). UK: IOA i ANC
3. Bartlett, B., Bartlett, J. (2009): *Practical Recording Techniques*, Fifth Edition. USA: Focal Press
4. Beck, S., Zacharov, N. (2006): *Perceptual Audio Evaluation—Theory, Method and Application*. Engleska: John Wiley & Sons Ltd
5. Crich, T. (2010): *Recording Tips for Engineers: For cleaner, brighter tracks*, Third edition. SAD: Focal Press
6. Everest, F.A., Pohlmann, K.C. (2009): *Master Handbook of Acoustics*, Fifth Edition. SAD: McGraw-Hill
7. Gervais, R. (2011): *Home Recording Studio; Build It Like the Pros*. SAD: Course Technology PTR
8. Harris, B. (2009): *Home Studio Setup; Everything You Need to Know from Equipment to Acoustics*. SAD: Focal Press
9. Kleiner, M. (2012): *Acoustics and Audio Technology*, Third Edition. SAD: J. Ross Publishing.
10. Kleiner, M., Tichy, J. (2014): *Acoustics of Small Rooms*. SAD: CRC Press
11. Long, M. (2006): *Architectural Acoustics*. SAD: Elsevier

12. Moylan, W. (2007): *Understanding and Crafting the Mix: The Art of Recording*, Second Edition. SAD: Focal Press
13. Newell, P. (2008): *Recording Studio Design*, Second Edition. UK: Focal Press
14. Nisbett, A. (2003): *The Sound Studio: Audio techniques for radio, television, film and recording*, Seventh edition. UK: Focal Press
15. Shea, M., Everest, F.A. (2010): *How to Build a Small Budget Recording Studio from Scratch*, Fourth Edition. SAD: McGraw Hill

## Mrežni izvori:

1. *acoustic impedance*. Oxford Reference.  
Izvor: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095347872>  
(Pristupljeno: 31. siječnja 2022.)
2. *Atmosferski tlak*. Wikipedija.  
Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Atmosferski\\_tlak#cite\\_ref-2](https://hr.wikipedia.org/wiki/Atmosferski_tlak#cite_ref-2)  
(Pristupljeno: 1. rujna 2021.)
3. *glazbena vilica*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža.  
Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=70733>  
(Pristupljeno: 19. siječnja 2022.)
4. *jeka*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža.  
Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=28941>  
(Pristupljeno: 3. veljače 2022.)
5. *referentna vrijednost*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža.  
Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69730>  
(Pristupljeno: 1. rujna 2021.)
6. *vakuum*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža.  
Izvor: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63674>  
(Pristupljeno: 3. rujna 2021.)