

# AURALAB – Auralizacijski laboratorij Zavoda za elektroakustiku Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu

Kristian Jambrošić<sup>1</sup>, Marko Horvat<sup>1</sup> i Siniša Fajt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

<sup>2</sup> Redoviti član, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

**Sažetak:** *Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu (FER) prije desetak je godina započeo s uspostavljanjem istraživačkih laboratorija radi bržeg i fokusiranog razvoja istraživačke djelatnosti i obrazovanja unutar specifičnih specijalizacija [1]. Potaknut sve bržim rastom i razvojem područja snimanja, obrade i reprodukcije zvuka u sustavima prostornog zvuka, istraživački tim sastavljen od članova Zavoda za elektroakustiku 2012. je godine odlučio osnovati Auralizacijski laboratorij (skraćeno AURALAB). Od samog početka ulažu se veliki napori u nabavu opreme i razvoj svih potrebnih alata za uspješnu implementaciju i auralizacije, i to korištenjem klasične reprodukcije prostornog zvuka pomoću slušalica sa i bez praćenja položaja glave, kao i pomoću sustava zvučnika. Potencijal ovog laboratorija u istraživačkim, nastavnim i stručnim djelatnostima je velik, a ovaj članak opisuje dosadašnja postignuća i mogućnosti koje laboratorij pruža istraživačkom timu, svom fakultetu kao i sveukupnoj akademskoj zajednici.*

**Ključne riječi:** *Auralizacija, zvučna polja, sustavi za reprodukciju zvuka, binauralni sustavi.*

## 1. Uvod

Iz šture definicije akustike kao znanosti o zvuku teško je iščitati značaj koji ova grana fizike ima na sveukupnu djelatnost i život ljudi. Sluh je vrlo kompleksno osjetilo koje je ključno za verbalnu komunikaciju, a istodobno pomaže čovjeku spoznati i razumjeti svoju okolinu. Stoga je važno razumjeti fizikalne osnove nastanka i širenja zvuka te interakcije zvučnog vala s okolinom u kojoj se širi, ali i psihoakustičke značajke zvuka koje utječu na njegovu percepciju i spoznaju zvučne okoline. Za potonji aspekt razumijevanja zvuka ključno je područje auralizacije.

## 1.1. Akustički komfor i akustika prostora

Čovjek u svom životu prirodno stremi osjećaju ugone prilikom boravka u nekom prostoru. Pritom je važno zadovoljiti različite elemente koji utječu na osjet ugone - od vizualno privlačnog interijera, rasvjete, temperature zraka, mirisa, ergonomije stola- ca na kojima se sjedi, općeg psihofizičkog stanja ljudi, kao i mnoge druge. Jedan od ključnih čimbenika koji utječe na osjet ugone u prostoru svakako je akustički komfor, odnosno ukupna akustička kvaliteta nekog prostora. Karakteriziramo je akustikom prostora koju projektiramo ovisno o njegovoj namjeni, razinom unutarne buke te razinom vanjske buke koja je usko povezana s kvalitetom zvučne izolacije prostora. Prostor koji se diči visokom razinom akustičkog komfora odlikuje se dobrom zvuč- nom izolacijom od okolnih prostora, niskom razinom buke te akustikom prostora prikladnom za određenu namjenu [2, 3].

Iako postoje vrlo jasne preporuke, smjernice i norme kojima su propisane vrijednosti ili rasponi vrijednosti različitih parametara prostorne akustike kojih se treba držati kako bi se korisnici prostora osjećali ugodno i komforno u akustičkom smislu, u praksi su prostorije u novoizgrađenim objektima često neadekvatno akustički dizaj- nirane s obzirom na svoju namjenu, ili se akustici prostora u fazi dizajna uopće ne po- svećuje pozornost. Kolokvijalno rečeno, “akustika” tih prostorija se ne može smatrati dobrom. Iako se akustika kao znanost temelji na fizikalnim zakonima, stručnjacima iz područja akustike nerijetko je teško prenijeti važnost primjene akustičke obrade inve- stitorima i naručiteljima koji ne posjeduju znanje potrebno za razumijevanje stručnih termina i tumačenje numeričkih vrijednosti akustičkih parametara. Zato je vrlo važno pronaći intuitivno i jednostavno rješenje kojim će na razumljiv način biti moguće prenijeti informacije i protumačiti važnost prostorne akustike. Jedno takvo rješenje svakako je auralizacija.

## 1.2. Buka u okolišu

Buka u okolišu na različite načine utječe na život i zdravlje ljudi [4]. Utjecaj buke na zdravlje primarno se ogleda u promjenama i umanjenju funkcionalnosti sluha. Kratkotrajno izlaganje buci dovodi do privremenog smanjenja osjetljivosti sluha od kojega se uho može oporaviti. Izloženost buci visokog intenziteta i dovoljno dugog trajanja izaziva trajno smanjenje osjetljivosti sluha i tinitus. Osim oštećenja sluha, utjecaj buke na zdravlje čovjeka manifestira se nizom sekundarnih štetnih posljedica kao što je razvoj kardiovaskularnih bolesti, zatajenje srca i bubrega, trajno oštećenje glasa, pogoršanje mentalnog zdravlja, povećanje stresa i napetosti, štetne promjene endokrinog sustava, smanjenje radne produktivnosti i koncentracije, nesanica i kro- nični umor.

Dobro poznavanje uzročno-posljedične veze između buke i štetnih fizioloških i psiholoških posljedica koje ona ima na zdravlje čovjeka ključno je za sprečavanje ili barem ublažavanje tih posljedica. Zbog toga su ispitivanja koja uključuju slušne testove sa stvarnim ispitanicima i dalje nezaobilazna u istraživanju buke, njezinog širenja i mogućnosti zaštite, kao što je vidljivo na slici 1. I u ovom se slučaju auralizacija nameće kao jedan od bitnih i ujedno vrlo korisnih i praktičnih alata za provedbu ovakvih ispitivanja.



Slika 1: Tri principa zaštite od prevelikih razina buke

## 2. Auralizacija

Auralizacija se često koristi u akustici, baš kao što se vizualizacija koristi u arhitekturi ne bi li se investitorima lakše pojasnila zamisao i vizija te konačni izgled neke građevine. Najvažnija primjena i ujedno glavni zadatak auralizacije jest vjerno reproducirati snimljen zvučni sadržaj neke stvarne okoline ili sintetizirani zvučni sadržaj neke virtualne okoline koja će se tek realizirati. Pritom se u tako nastaloj zvučnoj slici zadržava informacija i o zvučnom sadržaju i o smjeru dolaska zvuka. Reprodukcijski zvučni provodi se u kontroliranim, laboratorijskim uvjetima pomoću zvučnika ili slušalica [5]. Auralizacija otvara neslućene mogućnosti u području subjektivnog vrednovanja široke lepeze akustičkih pojava i fenomena.

Matematička pozadina različitih tehnika auralizacije detaljno je pojašnjena u znanstvenoj literaturi [6]. Svim postojećim tehnikama auralizacije koje su implementirane u komercijalnim računalnim programima zajednička je uporaba geometrijskog mo-

dela prostora kao ulaznog podatka za proces auralizacije. Zvučni val promatra se u domeni geometrijske akustike, pri čemu je ovakav pristup egzaktan samo u području srednjih i visokih frekvencija te u velikim prostorijama. Na niskim frekvencijama, posebno u malim prostorijama, primjećuje se veliki utjecaj vlastitih modova prostorije koje je potrebno proračunati korištenjem numeričkih metoda simulacije kao što su metode rubnih ili konačnih elemenata. Takve su metode znatno zahtjevnije što se tiče procesorske snage računala u odnosu na standardne, statističke metode proračuna. Zbog toga se one još uvijek ne mogu upotrebljavati kao brzi alat za akustički proračun različitih modela prostorija te za auralizaciju zvučnih polja.

## 2.1. Model prostora

Kako bismo auralizacijom stvorili vjernu reprodukciju zvučnog polja kakvo bi postojalo u zatvorenom ili (polu)otvorenom prostoru koji auraliziramo, nužno je što bolje opisati akustička svojstva samog prostora. U tu je svrhu potrebno izraditi geometrijski model koji uključuje sve značajke ploha koje omeđuju prostor. Pritom se naglasak stavlja na frekvencijski ovisne koeficijente apsorpcije materijala koji čine pojedine plohe, ali i koeficijente raspršenja zvuka, a ponekad i koeficijente transmisijske zvuka kroz granične površine u susjedne prostore, pri čemu su i oni frekvencijski ovisni. Nadalje, potrebno je poznavati značajke izvora zvuka i prijarnika, prvenstveno njihov položaj, usmjerenost i međusobnu orijentaciju. Za proračun impulsnog odziva prostorije uz navedene ulazne podatke obično se upotrebljava hibridni model za točkasti izvor zvuka, tj. rane zrcalne refleksije izračunavaju se korištenjem metode zrcalnih izvora (engl. Image Source Method), a kasne refleksije korištenjem algoritma praćenja zraka (engl. Raytracing Algorithm). Uz to, potrebno je uključiti i algoritam koji simulira raspršenje zvuka na svim rubovima ploha prostorije (engl. Sound Scattering). Osim ovakvih razmjerno jednostavnih simulacija postoje i složenije simulacije koje se koriste za zvučne izvore koji se ne mogu prikazati kao točkasti izvori, već se ponašaju kao linijski ili čak površinski izvori. Takav je primjer prozor u prostoriji koji prenosi zvuk iz vanjskog prostora cijelom svojom površinom.

## 2.1. Zvučno polje sa zadržanim prostornim značajkama

Osnovni rezultat simulacije akustike u prostoriji je impulсни odziv. Za potrebe izračuna bitnih akustičkih parametara prostora dovoljno je naći impulсни odziv u nekoj točki prostora za neusmjereni prijarnik zvuka (npr. mikrofón). U takvom impulsnom odzivu nalazi se potpuna informacija o odzivu prostora vezana uz energetski sadržaj tog odziva, no informacija o smjeru dolaska zvuka (direktnog zvuka i pojedinih refleksija) ne postoji. Za potrebe auralizacije ključno je imati obje opisane informacije

kako bi se dojam boravka u prostoru mogao vjerno rekonstruirati. Naime, u stvarnom prostoru osoba je okružena zvukom koji, osim iz smjera izvora zvuka, do nje dolazi u obliku brojnih refleksija od ploha prostorije iz svih mogućih smjerova, omogućujući time doživljaj zvuka u sve tri dimenzije prostora. Slušni sustav čovjeka omogućava nam ispravnu lokalizaciju izvora zvuka, tj. čovjek će biti u stanju odrediti smjer dolaska zvučnih izvora iz okolnog prostora u odnosu na svoj položaj i orijentaciju u prostoru. Binauralna tehnologija snimanja, sinteze i reprodukcije zvuka omogućava nam zadržavanje te informacije u snimljenom i/ili sintetiziranom audio materijalu. U tom se slučaju ne izračunava jednokanalni impulsni odziv zvuka za neusmjereni prijemnik, već je potrebno naći binauralni impulsni odziv prostorije (engl. Binaural Room Impulse Response, BRIR) kod kojeg se impulsni odziv izračunava zasebno za lijevo i desno uho slušatelja kao prijammnika zvuka, uzimajući u obzir položaj i orijentaciju glave. Takvim se izračunom zapravo dobiva par impulsnih odziva koje smatramo binauralnim impulsnim odzivom. Binauralni impulsni odziv jako ovisi o lokaciji izvora i prijammnika zvuka u prostoriji, kao i njihovim orijentacijama, pa svi ti parametri jako utječu na konačni rezultat auralizacije.

Proširenje jednokanalnog impulsnog odziva na binauralni zahtjeva samo još jedan dodatni audio kanal, što zahtjeve na opremu čini sasvim jednakima onima koji se postavljaju za obradu i reprodukciju standardnog stereo signala. Vjernost reprodukcije binauralnog zvuka dobivenog ovakvim jednostavnim metodama auralizacije uvelike je narušena time što je binauralni prijammnik statičan i ne prati položaj glave stvarnog slušatelja prilikom reprodukcije. Naime, ljudi su navikli pomicati glavu prilikom slušanja, a upravo ti pomaci su ključni za ispravnu lokalizaciju izvora zvuka. Auralizacija pri kojoj je binauralni prijammnik statičan nerijetko dovodi do pojave tzv. konusa konfuzije (engl. Cone of Confusion), zbog koje pri slušanju dobivenog binauralnog materijala slušatelj na koncu sasvim pogrešno lokalizira zvučni izvor. Zbog toga je uključivanje sustava za praćenje položaja glave ključno za postizanje vjerne reprodukcije zvuka u postupku binauralne auralizacije u smislu ispravne lokalizacije izvora zvuka. Binauralni impulsni odziv izračunava se na temelju tzv. prijenosnih funkcija glave (engl. Head Related Transfer Functions, HRTF) koje pokazuju kako će zvuk biti filtriran pri dolasku na bubnjić uha ovisno o smjeru dolaska zvuka. Točan oblik HRTF funkcija specifičan je za svaku osobu jer ovisi o veličini i obliku glave, vrata, torza i ušne školjke, te se u tom smislu govori o vlastitim prijenosnim funkcijama glave slušatelja [7, 8]. S obzirom na to da je proces mjerenja vlastitih prijenosnih funkcija glave tehnološki kompleksan i kao takav je dostupan tek nekolicini specijaliziranih istraživačkih institucija, pri binauralnoj se auralizaciji koriste generičke prijenosne funkcije glave izmjerene na antropološki prosječnoj osobi. Razlika između generičkih i vlastitih prijenosnih funkcija glave važan je čimbenik koji utječe na točnost i vjernost auraliziranog binauralnog zvuka. Posljednji izazov u ovom procesu je i ispravna ekvalizacija slušalica kako bi se sustav prilagodio svim vrstama otvorenih i zatvorenih slušalica. Problem ispravne kalibracije sustava za reprodukciju još

je složeniji ako se reprodukcija zvuka provodi na sustavu za reprodukciju baziranom na zvučnicima [9].

Osim binauralne tehnologije postoje i drugi sustavi auralizacije koji zvuk reproduciraju putem zvučnika. Njihova zajednička prednost u odnosu na binauralni sustav je što slušatelj ne mora nositi slušalice, i što je načelno povećano područje precizne lokalizacije izvora zvuka (engl. Sweet Spot). Ovakvi sustavi dozvoljavaju pomicanje glave slušatelja bez pogoršanja ili gubitka lokalizacije izvora, tj. zvučna slika je stabilna i ne pomiče se s glavom kao što je slučaj kod binauralne tehnologije bez praćenja položaja glave. S druge strane, gotovo je nemoguće postići vjernu reprodukciju zvučnih izvora blizu glave korištenjem isključivo zvučnika za reprodukciju zvuka.

### 3. Auralizacijski laboratorij

Prije tridesetak godina, mjerenje i analiza akustičkih veličina na Zavodu za elektroakustiku FER-a ulazi u novu eru. Kvalitativni pomak u tehničkom je smislu ostvaren zahvaljujući novim digitalnim mjernim sustavima koji su omogućavali prikaz rezultata u realnom vremenu. Razvojem računalnih procesora, procesorska snaga računala konačno je omogućila prelazak iz domene analize u realnom vremenu u domenu sinteze akustičkog okruženja, tj. u sintezu virtualnih zvučnih polja u realnom vremenu, što je jedan od preduvjeta uspješne auralizacije.

Tijekom 2011. i 2012. godine poduzeti su konstrukcijski zahvati u sklopu kojih je zvučno izolirana i akustički obrađena prostorija za slušanje Auralizacijskog laboratorija. U njoj je postavljen 16-kanalni sustav za reprodukciju zvuka temeljen na zvučnicima u tzv. konfiguraciji 4-8-4, tj. osam zvučnika pravilno je raspoređeno na kružnici u horizontalnoj ravnini s centrom u točki slušanja, a po četiri dodatna postavljena su ispod i iznad razine slušanja. Time je dobiven sustav za reprodukciju prostornog zvuka sa zvučnicima raspoređenim na sferi s centrom u točki slušanja. Ovakav sustav može se koristiti za implementaciju različitih sustava za reprodukciju zvuka, od mono, stereo i okružujućih sustava (engl. Surround Sound), do homogenih audio sustava kao što su VBAP (engl. Vector-Based Amplitude Panning) i Ambisonics. Upravo potonji se u posljednjih nekoliko godina nametnuo kao glavni sustav za reprodukciju zvuka sa zadržanim prostornim informacijama (engl. Spatial Sound). Sustav Ambisonics pogodan je ne samo kao sustav za vjernu reprodukciju snimki zvučnih okoliša (engl. Soundscape), već i za najrazličitija ispitivanja u kojima se od ispitanika traži ocjena niza subjektivnih parametara koji se koriste u vrednovanju ugođe ili smetnje koju izazivaju zvučni izvori različitog frekvencijskog sastava i razina. Ovakva analiza percepcije zvuka prati recentne znanstvene trendove određivanja zvučnih smetnji, ne samo u kvantitativnom smislu (razina zvučnog tlaka), nego i u kvalitativnom (kognitivnom) vrednovanju zvuka kao podražaja. U Republici Hrvat-

skoj ne postoji sličan istraživački laboratorij koji nudi ovakvu razinu fleksibilnosti prilagodbe različitim sustavima reprodukcije zvuka.

Prostorija za slušanje u kojoj se provode ispitivanja percepcije zvuka izgrađena je po principu “kutija u kutiji”, prema ilustraciji na slici 2. Kako bi se postigla poboljšana zvučna izolacija od buke koja dolazi iz drugih prostora laboratorija i same zgrade, ali i od buke prometa prometnica u neposrednoj blizini, prostorija slušaonice je dodatno izolirana laganim dvostrukim zidom od gipskartonskih ploča s ispunom od mineralne vune. Pri tome je izveden elastični dosjed svih ploča na postojeću konstrukciju zgrade radi smanjenja prijenosa vibracija. Na isti način je i spušteni strop izrađen od gipskartonskih ploča elastično ovješeno na postojeću armiranobetonsku ploču stropa.

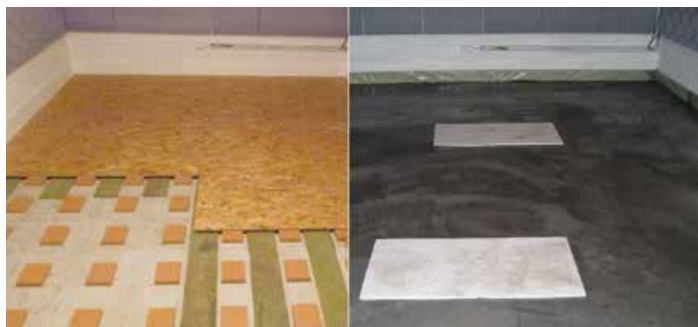


**Slika 2:** Tlocrt Auralizacijskog laboratorija - prostorija za slušanje u lijevom dijelu izgrađena je po principu “kutija u kutiji”

Poboljšanje zvučne izolacije postignuto je i plivajućim podom. Pri njegovoj su izvedbi na postojeće kamene ploče izravno vezane s armiranobetonskom konstrukcijom zgrade položene elastične antivibracijske poliuretanske pločice. Na njih je položen sloj OSB ploča na koji je konačno izlivena betonska ploča plivajućeg poda. Nakon sušenja, na betonsku je ploču položen tepison kao hodna ploha prostorije za slušanje. Cijeli sustav poda proračunat je kao sustav masa-opruga kako bi vlastita frekvencija rezonancije poda bila što niža i tako maksimalno smanjila buku koja se u obliku vibracija širi zgradom, ali i buku u laboratoriju uzrokovanu vibracijama vanjskih izvora kao što su, primjerice, tramvaji. Ključne faze izrade plivajućeg poda prikazane su na fotografijama na slici 3. Izgradnja slušaonice zaključena je ugradnjom akustičkih vrata s povećanom zvučnom izolacijom između slušaonice i radnog prostora laboratorija.

Zidovi i strop slušaonice akustički su obrađeni pomoću zvukoupojnih ploča od poliuretanske pjene, montiranim na razmaku od 5 cm od tvrdih ploha radi postizanja učinkovite apsorpcije zvuka i u području niskih frekvencija. Na ovaj je način postignuto prosječno vrijeme odjeka na srednjim frekvencijama od 0,1 s. Time su ostvareni uvjeti za preciznu reprodukciju zvučnih polja u procesu auralizacije pri kojoj sama prostorija vrlo malo utječe na zvučnu sliku koju stvaraju zvučnici.

Zvučnici u prostoriji za slušanje montirani su na posebno dizajniranom sustavu pomičnih držača, što omogućava jednostavnu promjenu konfiguracije, odnosno položaja zvučnika ukoliko je to potrebno. Radi postizanja visoke vjernosti reprodukcije zvuka, izvornih 16 zvučnika su aktivnim dvostazni zvučnici koji se upotrebljavaju u tonskim studijima. Naknadno su dodana i dva zvučnika specijalizirana za kvalitetnu reprodukciju niskih frekvencija, kao i LCD ekran koji omogućava prikaz vizualne pobude za potrebe audio-vizualnih ispitivanja te upravljanje sustavom izravno iz prostora slušaonice. Potpuno dovršena slušaonica u svom trenutnom stanju prikazana je na slici 4.



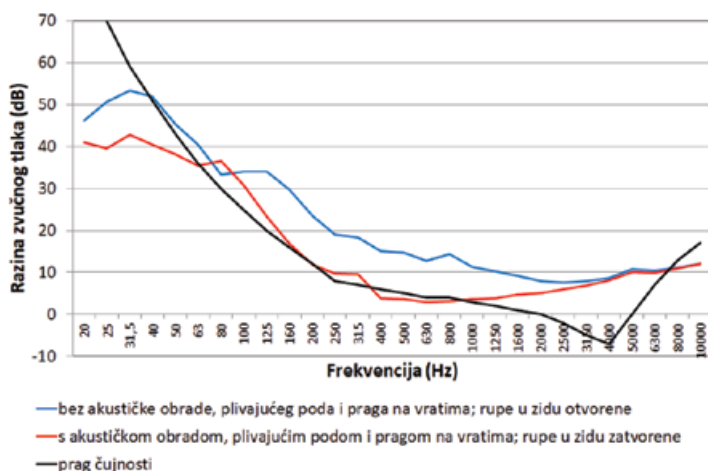
**Slika 3:** Hodna ploha slušaonice laboratorija povećane zvučne izolacije: lijevo - antivibracijske podložne pločice, desno - betonski plivajući pod



**Slika 4:** Unutrašnjost prostorije za slušna ispitivanja Auralizacijskog laboratorija



Ovakvim dizajnom laboratorija prosječna pozadinska buka u unutrašnjosti slušaonice smanjena je na razinu praga čujnosti, kao što pokazuje slika 5 [10], pa se laboratorij može upotrebljavati i za ispitivanje percepcije vrlo tihih zvukova. Primjer takvih ispitivanja je subjektivno vrednovanje kvalitete zvučne izolacije stambenih prostora od tipične buke koja dolazi iz susjednih stanova, buke instalacija i opreme u zgradi te vanjske buke.



Slika 5: Prosječna razina pozadinske buke u ovisnosti o frekvenciji u prostoru slušaonice prije i nakon implementacije akustičke obrade i mjera zaštite od buke

Aktualne članove laboratorija s doktorandima kao i trenutno aktivne istraživačke i stručne projekte koji se provode u sklopu laboratorija moguće je pronaći na njegovim mrežnim stranicama <https://auralab.fer.hr/>.

### 3.1. Istraživačka djelatnost

Oprema i organizacija laboratorija omogućuje znanstveno-istraživačke aktivnosti u sljedećim područjima: sustavi za reprodukciju zvuka koji nadilaze stereo, i to u domeni analize i sinteze; optimiranje algoritama za višekanalnu reprodukciju zvuka (Ambisonics 1., 2. i 3. reda, Ambiophonics, VBAP, stereo, surround, binauralna reprodukcija) na različitim hardverskim i softverskim platformama (Windows, Linux, macOS); lokalizacija izvora zvuka; subjektivna ispitivanja zvučnih okolina; percepcija buke ovisno o izvoru i smjeru dolaska zvuka; audio u sustavima virtualne stvarnosti u sprezi sa sustavima za praćenje pokreta glave; optimiranje zatvorenih i poluotvorenih prostora radi postizanja optimalne akustičke slike.

Važan korak u razvoju laboratorija je i povezivanje s drugim znanstvenim disciplinama, poglavito u područjima kao što su računalni vid, arhitektura i graditeljstvo, psihologija i glazbena umjetnost.

Uspostavljene su veze sa znanstvenicima iz Europe i svijeta, što je potvrda aktualnosti istraživanja koja se provode u laboratoriju. Članovi laboratorija tako surađuju kroz niz znanstvenih projekata financiranim od strane Europske komisije (Horizon, Erasmus+, COST), Hrvatske zaklade za znanost i drugih linija financiranja s istraživačima iz mnogih sveučilišta i istraživačkih institucija, kao što su: RWTH Aachen, Institut für Technische Akustik (Njemačka), KU Leuven, Acoustics and Thermal Physics Section, (Belgija), Hochschule für Musik Detmold, Erich-Thienhaus-Institut (Njemačka), HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath (Njemačka), Slovak University of Technology, Dep. of Building Constructions, Bratislava (Slovačka), Harbin Institute of Technology (Kina), University College London (Velika Britanija), University Gent University, Department of Information Technology, Research Group Acoustics, Gent (Belgija), Technologisches Gewerbemuseum, Beč (Austrija), Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani (Slovenija).

Auralizacijski laboratorij pridonosi suradnji unutar institucije i povećava njezinu prepoznatljivost unutar Sveučilišta u Zagrebu, ali i u međunarodnim znanstvenim krugovima u ovom području znanosti.

### **3.2. Obrazovna djelatnost**

Obrazovna djelatnost laboratorija obuhvaća rad sa studentima na različitim predmetima i projektima na preddiplomskoj i diplomskoj razini studija kroz teme koje pokrivaju nastavnici članovi laboratorija. Upravo je specifičnost opreme vezane uz laboratorij ključ za njegovo uključivanje u nastavni proces na svim predmetima aktualnih FER3 preddiplomskih i diplomskih studija koji se dotiču područja akustike prostora, buke, simulacije i mjerenja zvučnih polja, psihoakustike te audio tehnologija.

Veći broj završnih, diplomskih i specijalističkih radova napravljen je na temelju istraživanja koja su provedena u Auralizacijskom laboratoriju, a osobito su značajna istraživanja koja su provedena ili se trenutno provode u okviru više doktorskih disertacija.

### **3.3. Stručna djelatnost**

Stručna djelatnost Auralizacijskog laboratorija odvija se kroz suradnju s gospodarstvom, uglavnom putem izrade projekata i elaborata prostorne akustike različitih razina složenosti. Trajna suradnja u području istraživanja ostvarena je kroz razvoj

akustičkih elemenata usklađenih s interijerskim rješenjima. Osim toga, često se koristi mogućnost sinteze i auralizacije zvučnog polja za prostore koji su tek u fazi projektiranja, i to pri prezentaciji projekata akustičke obrade izvođačima i krajnjim korisnicima. Tako je u posljednjih nekoliko godina izrađeno niz stručnih projekata za naručitelje iz zemlje i inozemstva, kao što su Muzička akademija Zagreb, Koncertna dvorana Vatroslava Lisinskog Zagreb, Hrvatski dom Split, Kulturni centar Osijek, Končar transformatori Zagreb, Muzej suvremene umjetnosti Zagreb, Zagrebački velelesajam, Provia Ljubljana, i mnoge druge.

## 4. Primjeri auralizacije u praksi

Primjena auralizacije proteže se na mnogo različitih područja te će u nastavku biti opisano nekoliko tipičnih primjera primjena ove tehnike u dosadašnjoj praksi Auralizacijskog laboratorija.

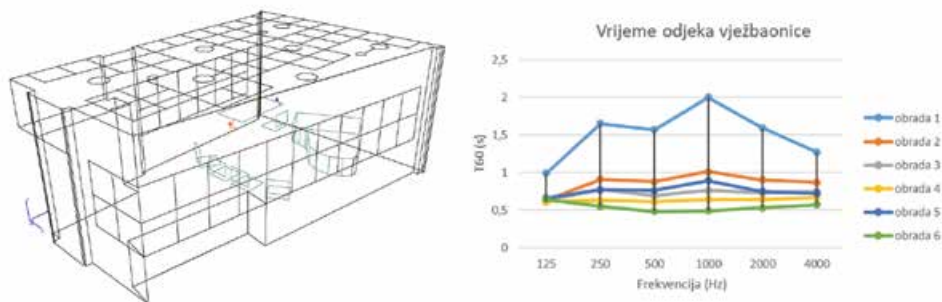
### 4.1. Slušni doživljaj akustike prostora koji još nisu izgrađeni

Auralizacija se često koristi u procesu dizajna akustički osjetljivih prostorija i zgrada te je kao vrlo koristan alat iskorištena pri izradi akustičkog projekta nove zgrade Muzičke akademije Sveučilišta u Zagrebu. U 2015. godini svi odsjeci akademije po prvi su put uselili u jedinstvenu zgradu koja se sastoji od gotovo 11.900 m<sup>2</sup> bruto površine, odnosno oko 8.850 m<sup>2</sup> neto površine. Osim odsjeka Akademije, u zgradu je smještena i administracija institucije, knjižnica, glazbene vježbaonice, kao i tri koncertne dvorane. Zgrada je izgrađena na devet katova, od čega su dva podzemna.

Projektom je zadatkom definirana akustička obrada stotinu prostorija s obzirom na njihovu primarnu namjenu, tj. izvođenje glazbe. U to se ubrajaju vježbaonice za glazbenike, učionice, dvije male i jedna veća koncertna dvorana. Glavni parametar prostorne akustike kojim se definiraju optimalni akustički uvjeti u prostoru je vrijeme odjeka. Iako postoje načelne preporuke vremena odjeka u frekvencijskom području od 125 Hz do 4000 Hz, glazbenici i profesori na Akademiji konzultirani su u procesu akustičkog dizajna, vezano uz optimalno vrijeme odjeka u pojedinim prostorijama. Naime, numeričke vrijednosti vremena odjeka laicima ne pružaju dovoljno informacija o tome jesu li te vrijednosti uistinu prikladne za određeni tip i veličinu prostorije. Dodatne zahtjeve na akustičke uvjete postavili su sami nastavnici u smislu tipa glazbenih instrumenata na kojima će se u pojedinim prostorijama izvoditi glazba, no nije im bilo moguće takve zahtjeve izraziti brojkama, tj. vrijednostima vremena odjeka. Jaz između akustičara i glazbenika prevladan je uporabom auralizacije. Kao primjer, definirana je ogledna prostorija koja je onda modelirana u računalnom programu za simulaciju prostorne akustike. Definirano je nekoliko scenarija koji su se međusobno razlikovali po količini unesene akustičke obrade u obliku akustičkih elemenata koji

upijaju i raspršuju zvuk. Time su u svakom scenariju postignuti određeni akustički uvjeti u prostoriji opisani odgovarajućom vrijednošću vremena odjeka. Za svaki od tih scenarija provedena je auralizacija uz nekoliko različitih glazbenih instrumenata kao izvora zvuka. Auralizirani zvučni zapisi reproducirani su nastavnice Muzičke akademije pomoću sustava Ambisonics Auralizacijskog laboratorija [11] te su oni na temelju odslušanog odlučili kakve akustičke uvjete u prostoru žele za pojedine tipove glazbala.

Na slici 6 vidljiv je trodimenzionalni žičani model ogledne prostorije (vježbaonice) s naznačenim pozicijama slušatelja (plava točka) i glazbenika (crvena točka), kao i mogućim pozicijama akustičkih elemenata na zidovima i stropu prostorije (kvadratni elementi dimenzija 60 x 60 cm). Uz to, prikazano je vrijeme odjeka u prostoriji za različite razine predložene akustičke obrade. Konkretna zaključak koji je donesen bio je to da će u vježbaonicama s klavirima idealni akustički uvjeti biti postignuti uz akustičku obradu razine 3, u vježbaonicama za gudače i flaute potrebna je obrada razine 4, u individualnim vježbaonicama s klavirom obrada razine 5, a u individualnim vježbaonicama bez klavira obrada razine 6. Time su nedvojbeno potvrđeni osnovni principi dizajna akustike prostora prema kojima optimalni akustički uvjeti u prostoriji ovise o njejoj veličini i namjeni, o broju glazbenika, kao i o vrsti izvora zvuka, tj. glazbala koja se koriste u prostoriji.



**Slika 6:** Lijevo - 3D žičani model primjera vježbaonice u kojoj su simulirane različite razine akustičke obrade; desno - izračunano vrijeme odjeka u vježbaonici za šest različitih razina akustičke obrade

## 4.2. Akustička mjerenja i auralizacija

U dizajnu nekog prostora može doći do pogrešaka koje utječu na ukupni akustički komfor u tom prostoru, najčešće zbog toga što se akustici prostora ne posvećuje dovoljno pozornosti. Te se pogreške vrlo lako detektiraju boravkom u prostoru i slušanjem ili mjerenjem akustičkog odziva prostorije. Auralizacija omogućuje otkrivanje takvih pogrešaka u fazi dizajna prostora, a svakako prije početka izgradnje, jer se

model prostora i simulacija akustičkih uvjeta u njemu mogu izraditi čim su poznati oblik i veličina prostorije, materijali završne obrade i, barem načelno, oprema prostorije (predviđeni namještaj i sl.).

Općenito govoreći, vrijednosti parametara prostorne akustike dobra su indikacija akustičke kvalitete prostorije, no često ih mogu protumačiti jedino stručnjaci akustičari. Laicima poput investitora, pa čak i stručnjaka iz drugih područja, parametri prostorne akustike i njihove vrijednosti bit će nerazumljivi te će kao takvi predstavljati nedovoljno čvrst argument u prilog nužnosti akustičke obrade ili renovacije neke prostorije. Zbog toga je izmjerene podatke moguće i potrebno prikazati na vizualno razumljiv način. Primjerice, promjene vrijednosti nekog parametra na površini koju zauzima auditorij mogu se prikazati pomoću standardnog raspona boja, kao što je prikazano na primjeru na slici 7, pri čemu hladne boje redovito označavaju niske, a tople visoke vrijednosti nekog parametra, odnosno lošije ili bolje akustičke uvjete na nekom mjestu u auditoriju. Najuvjerljivija se ilustracija nekog problema u akustici prostora dobiva upravo auralizacijom koja omogućava da se navedeni problem predstavi, iskusni i doživi upravo osjetilom sluha kao konačnim i najvišim sućem. Idealno je kombinirati oba pristupa - i vizualizaciju ključnih akustičkih parametara, i auralizaciju prostora, kako bi se svim zainteresiranim osobama moglo prikazati zašto je neki prostor potrebno akustički projektirati ili renovirati.



**Slika 7:** Lijevo - Velika koncertna dvorana Vatroslava Lisinskog; desno - prostorna raspodjela vrijednosti mjenjenog parametra indeksa binauralne kvalitete u dvorani (BQI) prikazana na tlocrtu dvorane

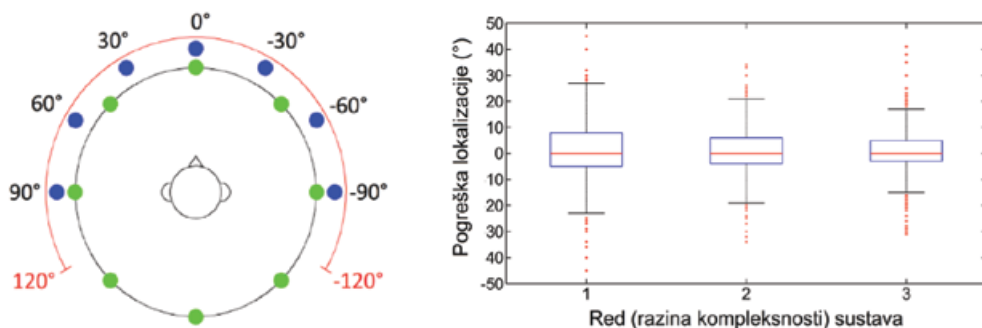
### 4.3. Auralizacija i psihoakustička ispitivanja

U području psihoakustike u prošlosti je provedeno izuzetno mnogo ispitivanja percepcije zvuka u ovisnosti o sadržaju i položaju izvora zvuka. Klasični pristup provedbi takvih istraživanja zahtijevao je fizičku prisutnost izvora zvuka na mjestu ispitiva-

nja, ili je njihov položaj simuliran postavljanjem zvučnika na mjesta koja odgovaraju zahtijevanim pozicijama zvučnih izvora.

Korištenjem sustava za reprodukciju prostornog zvuka, zvučni izvori oko slušatelja, definiraju se kao tzv. virtualni ili fantomski izvori zvuka (engl. Phantom Source), koji se općenito nalaze negdje između zvučnika koji čine sustav za reprodukciju zvuka. Samim time, njihov je virtualni položaj potrebno rekonstruirati pomoću zvuka koji emitiraju pojedini zvučnici na zadanim pozicijama u sustavu i koji se u točki slušanja stapa u jedinstvenu zvučnu sliku. Kvaliteta opisane rekonstrukcije, a time i točnost i stabilnost lokalizacije virtualnih izvora, ovisi o tipu i karakteristikama sustava za reprodukciju zvuka. Zbog toga je sva klasična psihoakustička ispitivanja lokalizacije izvora zvuka potrebno ponoviti uporabom suvremenih sustava za reprodukciju kako bi se odredilo koji sustavi su optimalni za određene primjene poput budućih sustava audio produkcije, audia u računalnim igrama, sustavima virtualne stvarnosti, itd.

Primjerice, u Laboratoriju je provedeno istraživanje kojim se ispitao utjecaj vrste izvora zvuka, zadanog položaja izvora, tj. smjera dolaska zvuka, i razine kompleksnosti (reda) sustava baziranog na Ambisonics kodiranju i dekodiranju na točnost i preciznost lokalizacije izvora zvuka [12]. Jedan od rezultata prikazan je na slici 8. Vidljivo je da se uz viši red sustava postiže preciznija lokalizacija izvora zvuka u smislu manjeg rasipanja odstupanja percipiranog smjera dolaska zvuka od stvarnog smjera. Stoga bi sustave za reprodukciju zvuka koji se baziraju na Ambisonics tehnologiji, a upotrebljavaju se u auralizaciji, načelno trebalo dizajnirati sa što većim redom (razinom kompleksnosti), imajući u vidu tehnička i financijska ograničenja.



**Slika 8:** Lijevo - shematski prikaz položaja zvučnika (zeleno) i položaja virtualnih izvora (plavo) definiranih za potrebe slušnog ispitivanja točnosti lokalizacije; desno - pogreška lokalizacije u ovisnosti o redu (razini kompleksnosti) Ambisonics sustava za reprodukciju

## 5. Zaključak

Auralizacija se u posljednjih desetak godina nametnula kao jedna od ključnih tehnologija u velikom broju akustičkih disciplina u kojima je važna ljudska percepcija zvuka. Porastom računalne snage povećao se i broj aplikacija računalne sinteze zvuka uz zadržane prostorne informacije, čime je omogućeno stvaranje što vjernijeg prikaza trodimenzionalnog zvučnog polja na sustavima baziranim na zvučnicima ili slušalicama. Pritom su i sada ključne tehnologije koje se vežu uz auralizaciju. Tipični primjer su moderne računalne igre i aplikacije u sustavima virtualne i proširene stvarnosti. Kako bi se mogla provoditi istraživanja u ovom području, bitno je imati potrebne materijalne resurse - fizičku i programsku opremu pomoću kojih je moguće provoditi istraživanja i slušna ispitivanja u području auralizacije. Zbog toga je i osnovan AURALAB, odnosno Auralizacijski laboratorij Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu koji se već pokazao ključnim alatom i resursom pri provedbi mnogih znanstvenih i stručnih ispitivanja u području auralizacije i prostornog zvuka. Želja članova istraživačkog tima svakako je nastaviti s razvojem ovog područja, ali i približiti već stečena saznanja, kao i mogućnosti samog laboratorija širem krugu znanstvene zajednice.

### Literatura

- [1] Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva: Istraživački laboratoriji, Dostupan na [https://www.fer.unizg.hr/istrazivanje/istrazivacki\\_laboratoriji](https://www.fer.unizg.hr/istrazivanje/istrazivacki_laboratoriji) Pristupljeno: 2022-01-04
- [2] Sound Matters. How to achieve acoustic comfort in the contemporary office, U.S. General Services Administration, Public Buildings Service, (2011)
- [3] PBS-P100. Facilities Standards for the Public Buildings Service, U.S. General Services Administration, Public Buildings Service, (2015)
- [4] Environmental Noise Guidelines for the European Region, World Health Organisation, Regional Office for Europe (2018)
- [5] Vorländer, M.: Auralization, Springer, Berlin, ISBN 978-3030512019, (2008)
- [6] Christensen, C. L.: ODEON Room Acoustics Software, Version 16, User Manual for Basics, Industrial, Auditorium and Combined Editions, Odeon A/S, Lyngby, (2020)
- [7] Jambrošić, K.: Auralization as a Tool for the Acoustic Design of Spaces, Proceedings of the 7th AAAA Congress on Sound and Vibration with Exhibition, Čudina, M. (ur.), 87-100, Ljubljana, Slovenian Acoustical Society, (2016)
- [8] Jambrošić, K.; Horvat, M.; Kisić, D.; Oberman, T.: Speaker Discrimination in Multisource Environments Auralized in Real Rooms, *Akustika*, 37 (2020), 20-28, doi:1036336/akustika20203719
- [9] Kudrna, N.; Jambrošić, K.; Planinec, V.: Loudspeaker Equalization in Real-Life Multichannel Environments, The 9th Congress of the Alps Adria Acoustics Association – Con-

- ference Proceedings, Mesterházy, B.; Márkus, M. (ur.), 181-190, Budimpešta, Optikai, Akusztikai, Film- és Színháztechnikai Tudományos Egyesület, (2021)
- [10] Horvat, M.; Jambrošić, K.; Domitrović, H.: Construction of an auralization laboratory based on multichannel loudspeaker system, Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, 2356-2359, Berlin, German Acoustical Society (DEGA), (2013)
- [11] Jambrošić, K.: Auralization as a Tool for the Acoustic Design of Spaces, Proceedings of the 7th AAAA Congress on Sound and Vibration with Exhibition, Čudina, M. (ur.), 87-100, Ljubljana, Slovenian Acoustical Society, (2016)
- [12] Horvat, M.; Anzulović, F.; Kisić, D.; Jambrošić, K.: The accuracy and precision of localization of instruments and vocals found in a typical pop or rock band in an ambisonics-based virtual environment, Proceedings of e-Forum Acusticum 2020, Parizet, E.; Becot, F.-X. (ur.), 2841-2847, Lyon, Universite Lyon, (2020)