

Bakalářská práce



České

vysoké

učení technické

v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky

Návrh úpravy akustiky klubového sálu Kasáren Karlín

Antonín Švarc

Vedoucí: Dr. Ing. Libor Husník

Obor: Elektronika a komunikace

Únor 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Švarc** Jméno: **Antonín** Osobní číslo: **507349**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Úprava akustiky klubového sálu

Název bakalářské práce anglicky:

Improvement of Acoustics in a Club Hall

Pokyny pro vypracování:

Na základě vyhodnocení stávajícího stavu navrhnete akustické úpravy v klubovém sále "Garáže" v komplexu Kasárna Karlín. Cílový stav má vyhovovat pro produkci různých hudebních žánrů. Zaměřte se i na ekonomickou stránku řešení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SVTL/Alfa 1980
- [2] Kuttruff, H.: Room Acoustics, Spon Press 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Dr. Ing. Libor Husník katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Dr. Ing. Libor Husník
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Dr. Ing. Liboru Husníkovi za podnětné připomínky a materiály, které mi k vypracování práce poskytnul. Dále děkuji Janu Jarchovskému za poskytnutí cenných rad, Matěji Velkovi za možnost zpracovat návrh klubového sálu Kasáren Karlín a Vojtěchu Freiovi za korekturu textu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 7. února 2024

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem akustických úprav klubového sálu kulturního centra Kasárna Karlín.

V teoretické části jsou shrnuty základy problematiky prostorové akustiky. Jsou rozebrány tři základní přístupy k prostorové akustice, objektivní parametry pro hodnocení kvality akustiky, metody měření v prostorové akustice a možnosti akustických úprav.

V praktické části je popsáno zpracování modelu sálu pro práci v simulačním programu EASE, zpracování akustického návrhu a následná simulace návrhu v programu EASE.

Klíčová slova: akustika, prostorová akustika, EASE, doba dozvuku, úprava akustiky, klubový sál

Vedoucí: Dr. Ing. Libor Husník

Abstract

This thesis addresses suggestion of acoustic treatment of the club hall which is part of the cultural centrum Kasárna Karlín.

In the theoretical part, three main approaches to the room acoustics are broken down as well as objective parameters for evaluation the quality of acoustics, methods for measuring room acoustics and possibilities of acoustic treatments.

In the practical part, there is described modeling of the room for simulation in the EASE programe, suggestion of the acoustical treatments and simlutaion of the project in the EASE software.

Keywords: acoustics, room acoustics, EASE, reverbation time, acoustic treatment, club hall

Obsah

Úvod	1	Praktická část	
		6 Klubový sál Kasáren Karlín	35
		6.1 Specifikace sálu	35
		6.2 Zvukový systém	37
		6.3 Současné akustické úpravy	37
		6.4 Požadované změny a cílová vize po úpravě	38
		7 Modelování místnosti	41
		7.1 Model v programu AutoCAD	41
		7.1.1 Problémy s přenosem modelu	42
		7.2 Model v programu SketchUp	44
		7.3 Model v programu EASE	44
		8 Vyšetření vlastních kmitů místnosti	47
		8.1 Kritický kmitočet	47
		9 Měření	51
		9.1 Měření doby dozvuku	51
		9.1.1 Výsledky měření doby dozvuku	52
		9.2 Měření vlastních kmitů	53
		9.2.1 Výsledky měření vlastních kmitů	54
		10 Úprava modelu po měření	57
		11 Návrh akustických úprav	59
		11.1 Návrh sádkovkartonových rezonátorů	59
		11.2 Umístění obkladů	63
		11.3 Sál po akustických úpravách	64
		Závěr	67
		Literatura	69
	Část I		
	Teoretická část		
1 Zvuk	5		
2 Akustika uzavřeného prostoru	7		
2.1 Geometrická akustika	8		
2.2 Vlnová akustika	9		
2.2.1 Vlastní kmitý uzavřené místnosti	10		
2.2.2 Schroederův kmitočet	11		
2.3 Statistická akustika	12		
2.3.1 Dozvuk	12		
2.3.2 Činitel zvukové pohltivosti	13		
2.3.3 Doba dozvuku	14		
3 Parametry kvality akustiky uzavřeného prostoru	17		
3.1 Hladina hluku	17		
3.2 Průběhová a poměrová kritéria	17		
3.2.1 Standardní a počáteční doba dozvuku	18		
3.2.2 Rušivé odrazy	19		
3.2.3 Difúznost	19		
4 Měření v prostorové akustice	21		
4.1 Měření činitele zvukové pohltivosti	21		
4.1.1 Měření v dozvukové komoře	22		
4.2 Měření doby dozvuku	22		
4.2.1 Standardní metoda	22		
4.2.2 Schroederova metoda	23		
4.3 Měření impulzové odezvy	24		
4.3.1 MLS signály	24		
4.4 Měření kmitočtové odezvy uzavřeného prostoru	25		
5 Pohlcování zvukové energie	27		
5.1 Porézní materiály	27		
5.2 Obklady založené na rezonančním principu	28		
5.2.1 Kmitající membrány a desky	29		
5.2.2 Helmholtzovy rezonátory	30		
5.3 Difuzory	31		
	Část II		

Obrázky

2.1 Závislost hladiny akustického tlaku na vzdálenosti od zdroje zvuku [4]	8
2.2 Akustické pole v místnosti	8
2.3 Konstrukce odrazu zvukového paprsku od rovinné stěny pomocí zdánlivého zdroje. A je zdroj zvuku, A' je zdánlivý zdroj zvuku a B je pozorovací bod [5].	9
2.4 4. vlastní kmit místnosti ve směru osy x [6]	10
2.5 Příklad spektra vlastních kmitů dozvukové komory o objemu $V = 136\text{m}^3$ [1].	11
2.6 Průběh hladiny intenzity zvuku při buzení konstantním zvukovým zdrojem [8].	13
2.7 Pohlcování zvuku v materiálu [9]	13
3.1 Impulzová odezva místnosti [5]	18
3.2 Rozdělení impulzové odezvy na užitečnou a rušivou část podle Nieseo [1]	20
4.1 Kundtova impedanční trubice pro měření poměru stojatých vln zvukového signálu [10]	22
5.1 Umístění porézní vrstvy: (a) bez vzduchové mezery; (b) se vzduchovou mezerou. Čárkovaná křivka značí akustickou rychlost příslušné frekvence [5].	28
5.2 Řez deskovým rezonátorem uloženým na gumovém závěsu s pěnovou výplní [12]	29
5.3 Schéma Helmholtzova rezonátoru v podobě děrované desky [12]	30
5.4 Charakteristiky pro různé parametry Helmholtzových rezonátorů	31
5.5 Příklad místnosti s rezonančními obklady Helmholtzova typu [14]	31
5.6 Difuzor Artnovion Alps W [15]	32
6.1 Sál Garáže, pohled zezadu směrem k pódiu	36
6.2 Půdorys sálu Garáže	36
6.3 Fotografie sálu Garáže	37
6.4 Fotografie ozvučovací techniky sálu	38
7.1 Architektonický nákres sálu a přilehlých místností	42
7.2 3D model sálu Garáže v programu AutoCAD	43
7.3 3D model sálu Garáže v programu SketchUp	44
7.4 3D model sálu Garáže v programu EASE	45
9.1 Polohy zdrojů (Z) a měření (M)	52
11.1 Frekvenční závislost činitele pohltivosti α stropních obkladů	61
11.2 Frekvenční závislost činitele pohltivosti α obkladů ve směru osy x	62
11.3 Frekvenční závislost činitele pohltivosti α obkladů ve směru osy y	62
11.4 Frekvenční závislost činitele pohltivosti α stropních obkladů se zavěšenými pěnovými obklady	63
11.5 Graf frekvenční závislosti doby dozvuku a příslušné hodnoty pro třetinooktávová pásma po akustické úpravě	65
11.6 Graf frekvenční závislosti doby dozvuku z modulu AURA	65

Tabulky

3.1 Přehled základních definic doby dozvuku [1]	19
8.1 Vlastní kmity (osové) klubového sálu Kasáren Karlín	48
8.2 Vlastní kmity (tangenciální) klubového sálu Kasáren Karlín ...	48
8.3 Vlastní kmity (kosé) klubového sálu Kasáren Karlín	49
9.1 Naměřená doba dozvuku v oktávových pásmech	53
9.2 Naměřená doba dozvuku ve frekvenčním rozsahu 32 - 100 Hz ..	53
9.3 Naměřené hodnoty na vlastních kmitech ve směru osy x	54
9.4 Naměřené hodnoty na vlastních kmitech ve směru osy y	54
9.5 Naměřené hodnoty na vlastních kmitech ve směru osy z	55



Úvod

Skutečnost, že koncertní sály, přednáškové místnosti, kina, kluby, studia atd. by měly mít vhodně vyřešenou akustiku pro daný účel, je obecně známá. S problematikou zvukových vlastností místností se však setkáváme každý den v jakékoliv místnosti. V těch, ve kterých pak trávíme více času, je o to důležitější se tímto problémem zbývat. Akustické vlastnosti místnosti mají přímý vliv na příjemnost pobytu v místnosti, srozumitelnost při dorozumívání se, míru hluku, ale i na únavu, stres a výkonnost každého člověka.

Kulturní centrum Kasárna Karlín je v provozu od června roku 2017. Součástí komplexu je venkovní prostranství s letním kinem, kavárna, vnitřní kinosál, ale především klubový sál „Garáže“. Sál slouží především pro živé ozvučené koncerty kapel různých žánrů – od komornějších jako je folk až po ty hlasité jako rock či hard rock. Kapacita místnosti je 350 posluchačů, tedy jedná se o středně velký sál.

V současné době jsou jedinou akustickou úpravou závěsy z těžkého sametu. V důsledku toho jsou akustické vlastnosti ve středních a vyšších kmitočtech dobré. Problém se zde však vyskytuje v kmitočtech nízkých, které nejsou nijak tlumené.

Cílem této práce je navrhnout vhodné úpravy klubového sálu Kasáren Karlín. Cílové toleranční pásmo doby dozvuku je kolem 0,5 s v celém frekvenčním rozsahu. Dalším cílem je zlepšení rovnoměrnosti zvukového pole na nízkých kmitočtech. Návrh by měl rovněž pracovat s ekonomickým aspektem, tedy s poměrem efektivity a ceny daného řešení, neboť bude zřejmě v létě 2024 během rekonstrukce sálu realizován.



Část I

Teoretická část

Kapitola 1

Zvuk

Zvuk je vlnění mechanického typu šířící se pevným, kapalným nebo plynným prostředím. Slyšitelná oblast zvuku se obvykle uvádí od 16 Hz do 16 KHz [1][2], jiné zdroje uvádějí hodnoty 20 Hz až 20 KHz [3]. Faktem je, že tyto hranice jsou individuální. Ve vzduchu či kapalinách se zvuk šíří postupným podélným vlněním, tedy vlněním ve směru šíření. Dochází tak ke střídavému zhuštění a zředění vzduchu či kapaliny [1]. Zvuk je možné fyzikálně popsat veličinami:

- Frekvence f (Hz)
- Amplituda A
- Akustický tlak p (Pa) – Střídavý tlak vyvolaný zvukovým zdrojem. Tedy rozdíl celkového tlaku a barometrického tlaku.
- Intenzita zvuku I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) – výkon procházející jednotkou plochy kolmé ke směru šíření vln [1].
- Hladina akustického tlaku L (dB) – Logaritmické vyjádření akustického tlaku vztažené k hodnotě $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$. Tedy $L = 20 \log \frac{p}{p_0}$ [3].

Obor, který se zabývá naukou o zvuku, se nazývá akustika. Do oblasti akustiky se zařazuje mimo jiné věda o vzniku, přenosu, ale i vnímání zvuku. Akustika se může dále dělit na specializované oblasti jako je například hudební akustika, stavební akustika, nebo právě prostorová akustika [2], které se tato práce týká. Uvedené příklady jsou ale jen několika z mnoha vědních oblastí akustiky.

Kapitola 2

Akustika uzavřeného prostoru

Prostorová akustika se zabývá šířením zvuku v uzavřeném prostoru. V otevřeném prostoru lze pozorovat pouze přímé vlny vyzařované zvukovým zdrojem, tedy dochází k vniku pouze tzv. volného pole. Zde platí pravidlo, že u kulové vlny při vzdálení od zdroje na dvojnásobek klesne hladina intenzity zvuku o 6 dB (viz obr. 2.1). V částečně nebo zcela uzavřeném prostoru však dochází vlivem odrazů od stěn k vzniku dozvukového pole (pole odražených vln, obr 2.2), ve kterém již závislost lineárního poklesu hladiny akustického tlaku na vzdálenosti od zdroje neplatí. Samotný dozvuk je pak jev vzniklý superpozicí mnoha odrazů od stěn, které se lidskému sluchu jeví jako spojitý doznívající zvukový signál (viz. kapitola 2.3.1).

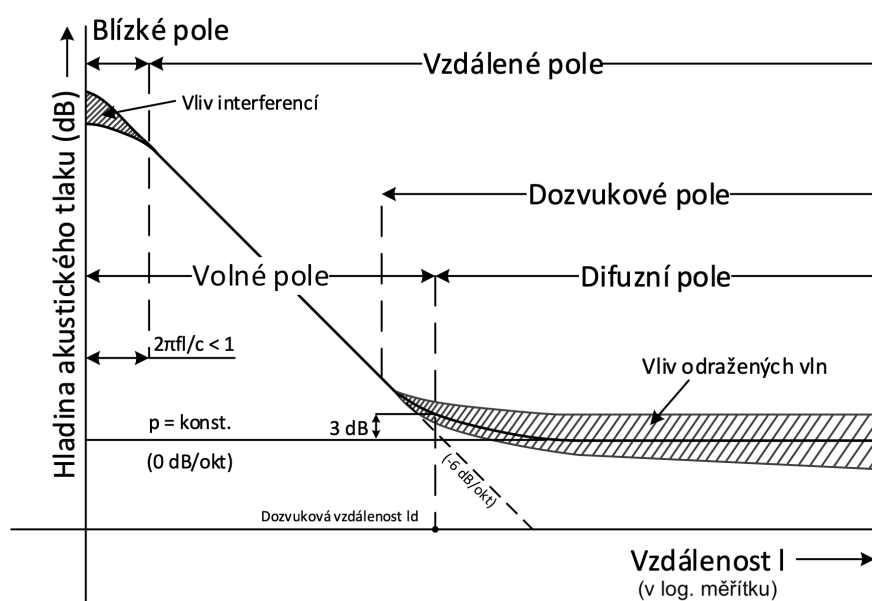
Na nízkých frekvencích můžeme kromě dozvukového jevu pozorovat i negativní vliv vlastních kmitů místnosti, který může vést k frekvenčně nerovnoměrnému rozložení intenzity zvuku (viz 2.2.1). To samozřejmě neznámá, že na středních a vysokých frekvencích bude zvukové pole vždy rovnoměrné.

Ve zvláštních případech, zpravidla v rovnoběžných či polouzavřených prostorech, může docházet i k jevu zvanému třepotavé ozvěny nebo ozvěny, což je jev, při kterém je lidský sluch schopen rozeznat jednotlivé odrazy.

Při teoretickém řešení akustiky v místnosti lze využít několika přístupů. Mezi ty základní a nejpoužívanější, které vycházejí ze základních fyzikálních principů, patří:

- Geometrická akustika
- Vlnová akustika
- Statistická akustika

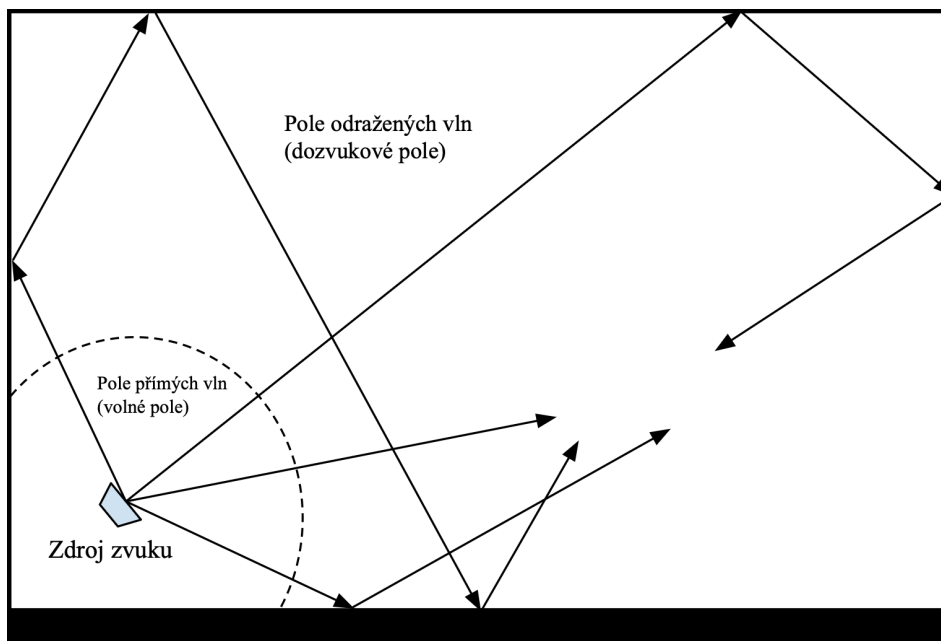
Každý přístup má svá specifika a je vhodné jej využít v jiné situaci. V následující části je uveden stručný rozbor a shrnutí výhod i nevýhod těchto základních přístupů.



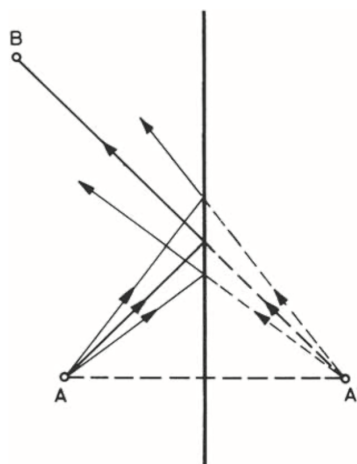
Obrázek 2.1: Závislost hladiny akustického tlaku na vzdálenosti od zdroje zvuku [4]

2.1 Geometrická akustika

Geometrická akustika pracuje se zvukovou vlnou jako s optickým paprskem. Dochází zde k záměně zvukové vlny za zvukový paprsek, pro který platí zákon rovnosti úhlu



Obrázek 2.2: Akustické pole v místnosti



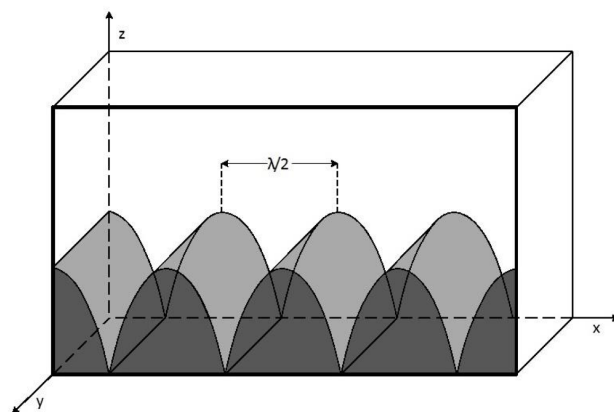
Obrázek 2.3: Konstrukce odrazu zvukového paprsku od rovinné stěny pomocí zdánlivého zdroje. A je zdroj zvuku, A' je zdánlivý zdroj zvuku a B je pozorovací bod [5].

dopadu a odrazu jako u světelného paprsku [1]. S touto teorií lze však pracovat pouze za předpokladu dokonale hladkých odrazivých ploch, resp. je nutné splnit podmínku, že jejich hrubost a nepravidelnost musí být řádově menší než vlnová délka dopadajícího zvukového paprsku. Pokud jsou hrubosti a nepravidelnosti přibližně stejných rozměrů jako vlnová délka dopadajícího paprsku, dochází k náhodnému odrazu či ohybu vln [5]. Dalším zjednodušením v geometrickém přístupu je zanedbání fáze při odrazu – je sledována pouze amplituda [5].

K sestrojování odražených paprsků je výhodné používat metodu zdánlivých zdrojů, která je naznačena na obrázku 2.3. Je však nutné zmínit, že při vícenásobných odrazech roste úměrně i náročnost konstrukce. V praxi se proto metoda pro odrazy vyšších řádů téměř nepoužívá. Vyšetřování odrazů prvního řádu ale může být poměrně výhodné pro vizualizaci odrazů od křivých ploch, kdy vypouklé plochy zvuk rozptylují, zatímco vyduté jej soustřeďují. Analýza geometrickou metodou v hlavních řezech může velmi dobře osvětlit funkci tvaru stropu a stěn, pokud jde o rovnoměrné zásobení hlediště zvukem a odstranění případného nežádoucího soustředění zvuku [1]. Geometrickou akustiku také s výhodou používají simulační programy jako je například EASE.

2.2 Vlnová akustika

Vlnová akustika funguje na principu vyjádření okrajových podmínek, které matematicky popisují akustický prostor, a následného hledání řešení vlnové rovnice, které těmto okrajovým podmínkám odpovídá [5]. Na rozdíl od geometrické akustiky



Obrázek 2.4: 4. vlastní kmit místnosti ve směru osy x [6]

se zde také nezanedbává fakt, že při odrazu zvukové vlny od stěny má dopadající a odražená vlna fázový rozdíl, který závisí na vlnové délce a akustické impedanci stěny.

Metoda vlnové akustiky je bohužel analyticky řešitelná pouze pro triviální tvary prostorů [1]. Pro složitější místnosti je potřeba použít numerických metod a i v takové situaci je výpočet velmi komplikovaný, protože kromě vysoké výpočetní náročnosti je poměrně složité zajistit konvergenci. Metoda však má své užití při výpočtu vlastních kmitů místnosti.

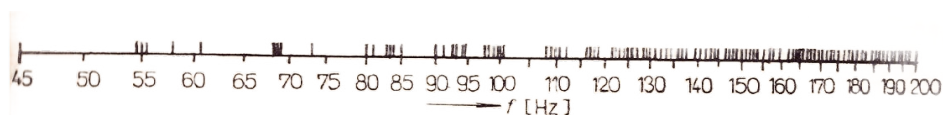
2.2.1 Vlastní kmitů uzavřené místnosti

Každý uzavřený prostor má teoreticky nekonečně mnoho vlastních kmitů (alt. vlastních módů). Jejich umístění na frekvenční ose je závislé na rozměrech a tvaru místnosti [1]. Jednotlivé vlastní kmitů pravoúhlého prostoru s dokonale tuhými stěnami v hertzech lze vypočítat pomocí vztahu.

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [1], \quad (2.1)$$

kde c je rychlost zvuku, $n_{x,y,z}$ je index vlastního kmitu v dané ose x, y, z a $l_{x,y,z}$ je rozměr místností v dané ose x, y, z .

Při vybuzení místnosti signálem o frekvenci shodné s frekvencí vlastního kmitu dochází k rezonanci. Důsledkem toho jsou na frekvencích vlastních kmitů v místech násobků $\lambda/2$ vlnové délky vlastního kmitu výrazně větší amplitudy než u kmitočtů jiných [1], viz obrázek 2.4. Za účelem dosažení co největší rovnoměrnosti zvukového pole je tak potřeba zajistit co největší hustotu vlastních kmitů v spektru, které



Obrázek 2.5: Příklad spektra vlastních kmitů dozvukové komory o objemu $V = 136\text{m}^3$ [1].

chceme v místnosti reprodukovat nebo poslouchat¹. To je ale v rozporu s faktem, že na nižších kmitočtech je hustota vlastních kmitů menší než na vyšších, viz obr. 2.5. Pro zajištění rovnoměrného přenosu zvuku by tedy měl být nejnižší vlastní mód hluboko pod uvažovaným kmitočtovým pásmem [1]. Toto je problém především u malých místností, neboť nejnižší vlastní kmitočet je v nejjednodušší situaci² dán vztahem [1]

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2l_x}, \quad (2.2)$$

kde c je rychlost šíření zvuku a l_x je největší délka hrany uvažovaného pravoúhlého prostoru. Je evidentní, že tato podmínka pro malé prostory neplatí – např. pro místnost s největší délkou hrany $l_x = 6\text{m}$ je nejnižší vlastní kmitočet roven zhruba $f_{1,0,0} = 28\text{Hz}$. Důležitější než nejnižší vlastní kmit je však v tomto kontextu tzv. kritický nebo také Schroederův kmitočet.

2.2.2 Schroederův kmitočet

Při dostatečné hustotě vlastních kmitů na určitý frekvenční rozsah lze díky překryvům rezonančních křivek jednotlivých kmitů prohlásit frekvenční charakteristiku za rovnoměrnou [1]. Schroederův kmitočet udává oblast přechodového pásma, od kterého lze toto pozorovat. Naopak pod touto frekvencí je frekvenční odezva vlivem malé hustoty vlastních kmitů nerovnoměrná. Kmitočet lze spočítat z objemu místnosti V , průměrné doby dozvuku T a je dán vztahem

$$f_s = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \quad [5]. \quad (2.3)$$

Tato frekvence rovněž udává hranici, od které je možné používat metody statistické akusticky. Pod ní je nutné užívat vlnový přístup.

¹U klubového sálu, který je předmětem této práce, je tento rozsah v téměř celém slyšitelném spektru.

²Vlastní kmity pouze v jedné ose místnosti.

2.3 Statistická akustika

Statistická akustika je v praxi nejpoužívanějším přístupem, neboť její závěry jsou velmi jednoduché a dobře se s ní počítá [7]. Nevýhodou je, jak již bylo zmíněno, že uspokojivé výsledky podává pouze pro frekvenční rozsah nad kritickým kmitočtem.

Základními veličinami charakterizujícími zvukové pole jsou zde energetické veličiny – hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku [1]. Abychom mohli používat statistickou teorii bez větších chyb, je nutné zavést několik předpokladů [1]:

- Velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného prostoru dospěla vlivem odrazů od stěn.
- Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně velká.
- Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností – tedy náhodně.

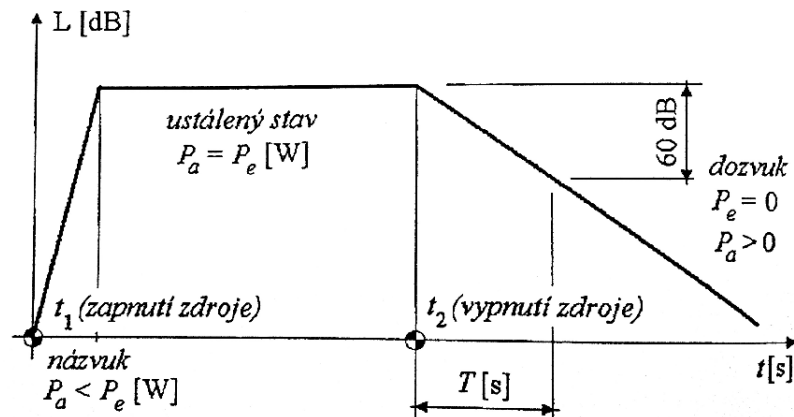
Jinými slovy: předpokladem k úspěšnému použití statistické teorie je existence difúzního pole (viz obr. 2.1). Součástí, resp. základním kamenem statistické akustiky, je práce s dobou dozvuku, která je definována v následující části.

2.3.1 Dozvuk

Stěžejním prvkem udávajícím kvalitu akustiky v uzavřeném prostoru je dozvuk. Je také nejsnáze subjektivně pozorovatelným jevem v prostorové akustice. Po vybuzení místnosti konstantním zvukovým zdrojem se vlivem odrazů postupně zvyšuje hladina akustického tlaku a tedy i hladina intenzity zvuku. Tomuto jevu říkáme názvuk. Po určité době (tzv. době názvuku) dojde k ustálenému stavu a hladina intenzity zvuku se nemění. Je evidentní, že u místnosti s nízkou pohltivostí stěn dojde k ustálenému stavu později než u místnosti s vysokou pohltivostí.

Snadno si to lze představit na hypotetickém příkladu místnosti s činitelem pohltivosti³ $\alpha = 0$ a zanedbáním absorpce zvuku ve vzduchu. V takové místnosti by se veškerá zvuková energie vybuzená zdrojem odrazela bez poklesu hladiny intenzity. Pro ustálený stav by tedy stačil pouze počáteční zvukový impulz. V případě dlouhotrvajícího zdroje konstantního výkonu by se energie v místnosti dále kumulovala a k ustálenému stavu by tak nikdy nedošlo. K takové situaci ale samozřejmě v praxi nikdy nemůže dojít. Po vypnutí budicího zdroje bude vlivem pohlcování zvuku stěnami ubývat energie zvuku šířící se místností. Tento jev nazýváme dozvuk [1].

³Činitel zvukové pohltivosti viz následující podkapitola.



Obrázek 2.6: Průběh hladiny intenzity zvuku při buzení konstantním zvukovým zdrojem [8]

2.3.2 Činitel zvukové pohltivosti

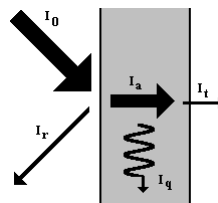
Nejdůležitějším parametrem ovlivňujícím dozvuk je pohltivost stěn a objem dané místnosti. Pohltivost materiálu je vlastnost, která udává schopnost „neodrážet“ zvukový výkon. Při dopadu zvuku na stěnu se část intenzity odrazí, část je díky specifickým vlastnostem materiálu přeměněna v jiný druh energie (nejčastěji teplo [1]), část prostupuje materiálem do jiné místnosti, viz obrázek 2.7. Kombinace přeměněné a prostoupené intenzity zvuku se pak souhrnně označuje jako intenzita pohlcená. Činitel zvukové pohltivosti α pak udává poměr dopadající a pohlcené intenzity zvuku

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0}, \quad (2.4)$$

kde I_a je pohlcená intenzita a I_0 je dopadající intenzita. Případně lze zavést i pojem činitel zvukové odrazivosti r , který dává do poměru dopadající a odraženou intenzitu zvuku [9].

$$r = \frac{I_r}{I_0}, \quad (2.5)$$

kde I_r je odražená intenzita.



Obrázek 2.7: Pohlcování zvuku v materiálu [9]

Je zřejmé, že pro tyto veličiny musí platit rovnost $\alpha + r = 1$.

2.3.3 Doba dozvuku

Vnímaná doba dozvuku nezávisí pouze na parametrech místnosti, ale i na budícím zdroji a fyziologických vlastnostech lidského sluchu, jako je např. citlivost ucha. Za účelem objektivizace parametru doby dozvuku zavedl americký fyzik W. C. Sabine pojem *standardní doba dozvuku*, který je definován jako taková doba, za kterou po vypnutí zdroje zvuku poklesne hustota energie nebo intenzita zvuku o 60 dB [1].

Dobře se dá odhadnout při vybuzení krátkým širokopásmovým zdrojem. Orientačně může posloužit pouhé tlesknutí. Pro dosažení větší hlasitosti (a tím i většího odstupu od šumu) je však vhodné použít jiné metody, např. výstřel z pistole, elektrický výboj apod.

Doba dozvuku podle Sabina

W. C. Sabine předpokládal plynulé pohlcování energie v místnosti. Ve svém odvození vztahu pro dobu dozvuku vycházel ze zákona zachování zvukové energie v prostoru

$$P = V \frac{d\omega}{dt} + P_s, \quad (2.6)$$

množství pohlcené energie dopadající na stěny se zvukovou pohltivostí α a celkovou plochou S

$$P_s = \alpha S \frac{\omega c}{4} \quad (2.7)$$

a s počáteční podmínky vypnutí budícího zdroje v čase $t > 0$, tedy $P = 0$. Vztah ke kterému dospěl je

$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha S}, \quad (2.8)$$

kde T je vypočtená doba dozvuku, V je objem místnosti, S je celková plocha stěn místnosti a α je průměrná pohltivost zdí. Experimentálně se však následně ukázalo, že vztah

$$T = 0,164 \frac{V}{\alpha S}, \quad (2.9)$$

je v praxi přesnější [1].

Tento vztah se dá poměrně dobře využít v jednoduchých prostorech bez větších akustických úprav, tedy s poměrně nízkým průměrným činitelem pohltivosti [1]. Je však zřejmé, že pokud by byla pohltivost stěn α rovna jedné, tedy žádný zvuk by se neodrážel, žádný dozvuk by neměl vznikat, tedy doba dozvuku by měla být rovna

nule. Zde však dostáváme výsledek

$$T = 0,164 \frac{V}{S} \neq 0. \quad (2.10)$$

■ Doba dozvuku podle Eyringa

Jak jsme v 2.3.3 odvodili, Sabinův vzorec nedává dostatečně uspokojivé výsledky pro zatlumenější sály. Eyring přepokládal, že paprsek zvuku se po odrazu od zdi skokově zeslabí z intenzity I na intenzitu $I(1 - \alpha)$. Po úpravách pak dostal vzorec

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} = 0,164 \frac{V}{S \alpha'}, \quad (2.11)$$

kde $\alpha' = -\ln(1 - \alpha)$ [1]. Tento vzorec již teoreticky vyhovuje i pro činitel pohltivosti $\alpha = 1$. V praxi se však ukázalo, že ani takto upravený vzorec není dostatečně přesný pro místnosti s průměrnou pohltivostí vyšší než $\alpha = 0,8$ [1].

■ Doba dozvuku podle Millingtona

Pro výpočet doby dozvuku v místnostech s pohltivostí vyšší než $\alpha = 0,8$ se používá vztah Millingtonův.

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - a_i)}, \quad (2.12)$$

kde n je počet „ploch“ ohraničujících místnost a každá z těchto ploch S_i má činitel pohltivosti α_i [1]. Místností s takto vysokou pohltivostí je však poměrně málo a zpravidla jsou to ty, které jsou již akusticky upravené, proto tento vzorec není tak důležitý.

Kapitola 3

Parametry kvality akustiky uzavřeného prostoru

Vzhledem k tomu, že lidský sluch a vnímání zvuku je značně subjektivní záležitost, dělíme i kritéria hodnocení kvality akustiky na subjektivní a objektivní. Předmětem této práce budou především objektivní kritéria, neboť výzkum a práce v oblasti subjektivního hodnocení kvality akustiky jsou zcela mimo rozsah tohoto textu.

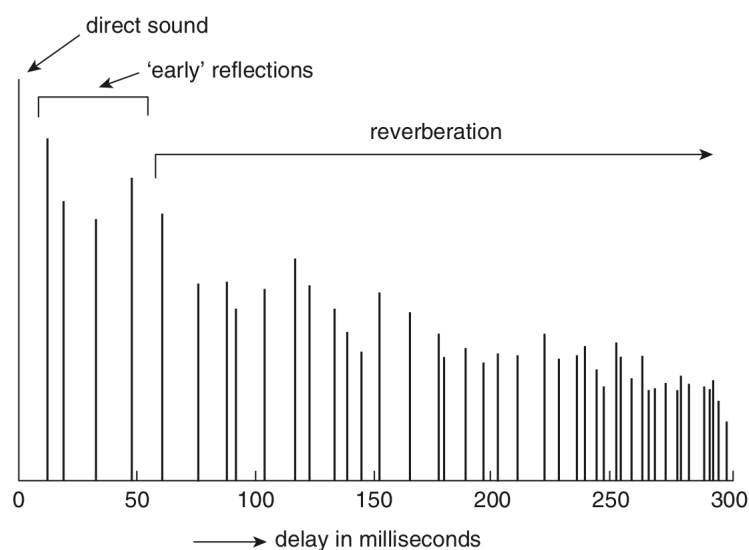
3.1 Hladina hluku

Pro vytvoření optimálních poslechových podmínek je nutné dodržet předpoklad, že v místnosti, která je pro produkci určena, je bez jakéhokoliv buzení co nejmenší hladina hluku pronikajícího z okolí místnosti nebo budovy. Řešení co nejmenší průzvučnosti hluku do místnosti spadá spíše do oboru stavební akustiky, nicméně u prostorové akustiky se jedná o důležitý parametr, který je potřeba zahrnout především v měření. Udává zde totiž spodní hranici šumu a podle jeho hodnoty je potřeba nastavit dostatečný odstup signálu od šumu. Při příliš velké hladině hluku je pak evidentně nutné upravit i hlasitost produkce tak, aby nebyl poslechový zážitek nijak narušen.

Pro koncertní sítě, hlediště divadel a kin či podobné kulturní místnosti se při použití váhového filtru A udává doporučená maximální hladina hluku $L_A = 35$ dB(A) [1].

3.2 Průběhová a poměrová kritéria

Většina objektivních kritérií sloužících pro hodnocení kvality akustiky prostoru vychází z jeho impulzové odezvy [1] [5]. Impulzová odezva (alt. impulzní charakteristika) je z definice odezva lineárního systému na jednotkový (diracův) impulz. V akustice ji získáme vybuzením prostoru krátkým širokopásmovým signálem (např. výstřel z pistole). Jednotlivé odrazy, které pak lze na pozorovaném místě zaznamenávat,



Obrázek 3.1: Impulzová odezva místnosti [5]

mají tři charakteristické parametry [5]:

- Čas, resp. zpoždění, se kterým jsou zaznamenány oproti přímému signálu.
- energii.
- Směr, ze kterého přichází.

Impulzová odezva zaznamenává první dva ze zmíněných parametrů, tedy zpoždění a energii jednotlivých odrazů, a zobrazuje je v grafu závislosti energie na času (echogram), viz obrázek 3.1.

■ 3.2.1 Standardní a počáteční doba dozvuku

Standardní doba dozvuku je, jak již bylo zmiňováno, nejčastěji používaným parametrem pro hodnocení akustiky prostoru. Existuje však několik dalších definic doby dozvuku, které se označují jako *počáteční doba dozvuku* [1]. Svou roli hrají především u sálů, ve kterých je možné pozorovat nelineární pokles hladiny intenzity zvukového pole [1], případně pak u sálů, ve kterých je příliš vysoká hladina hluku pro měření standardní doby dozvuku. Jejich měření je možné více způsoby (viz kapitola 4.2), nicméně v principu se vždy jedná o naměření poklesu hladiny intenzity zvuku v určitém úseku (např. 0 až -20 dB), co nejpečlivější proložení přímkou a následnou extrapolaci na celý interval 0 až -60 dB. V tabulce 3.1 je uveden základní přehled různých definic doby dozvuku.

Tabulka 3.1: Přehled základních definic doby dozvuku [1]

Název a označení	Definice
Standardní doba dozvuku T_{60}	Doba, za kterou poklesne hladina intenzity zvuku na -60 dB. Dle ČSN získaná extrapolací úseku -5 až -35 dB
Počáteční doba dozvuku T_{20}	Doba dozvuku získaná extrapolací úseku 0 až -20 dB na úsek 0 až -60 dB
Počáteční doba dozvuku EDT (alternativně T_{10})	Doba dozvuku získaná extrapolací úseku 0 až -10 dB na úsek 0 až -60 dB

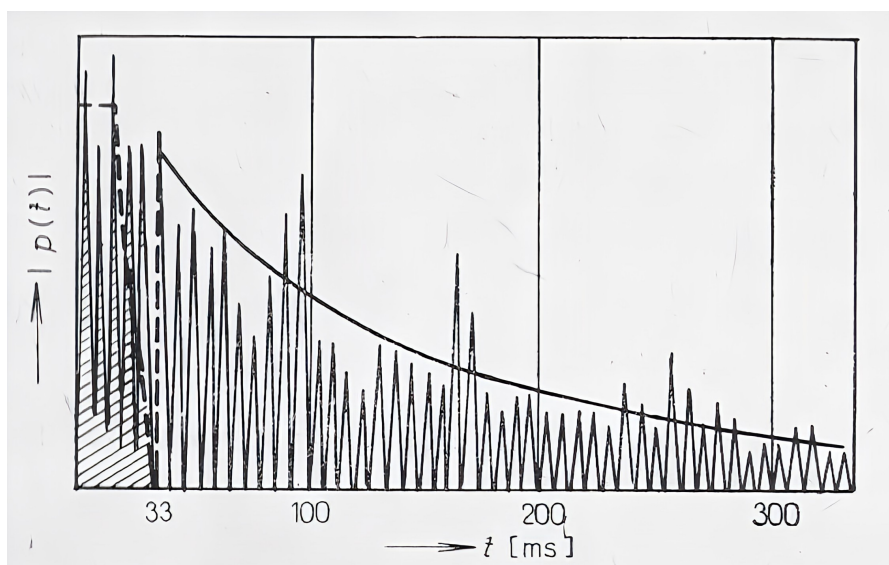
3.2.2 Rušivé odrazy

V návaznosti na subjektivní experimenty zaměřené na srozumitelnost byla zavedena hranice mezi užitečnou a rušivou oblastí impulzové odezvy [1]. Odrazy následující bezprostředně po přímém zvuku dle pozorování nepůsobí rušivě, naopak svou energií přispívají k vyšší hlasitosti. Tyto odrazy jsou tedy vnímány jako užitečné. Naopak odrazy, které do pozorovaného místa dojdou až po dané hranici, již způsobují menší srozumitelnost a zřetelnost produkovaného signálu – jsou tedy označeny jako rušivé [1].

R. Thiele jako první stanovil onu hranici mezi užitečnou a rušivou částí impulzové odezvy a to na hodnotu 50 ms. Odrazy před touto hranicí se pak označují jako počáteční odrazy (anglicky early reflections) [1]. Toto rozdělení impulzové odezvy je naznačeno na obrázku 3.1. Jiný pohled na teorii o užitečných a rušivých odrazech vnesl do problematiky H. Niese, který za hranici užitečné a rušivé části stanovil 33 ms v kombinaci s váhováním kdy do 17 ms je váha rovna jedné a poté lineárně klesá až k nule na 33 ms. Za hranicí 33 ms pak nepokládá za rušivé všechny odrazy, ale jenom ty, jejichž energie překročí exponenciální křivku poklesu [1], jako je zobrazeno na obrázku 3.2.

3.2.3 Difúznost

Parametr difúznosti zvukového pole udává jeho všesměrovost. V praxi to znamená, že v pozorovaném místě musí přicházet zvuk ze všech stran se stejnou intenzitou – tedy tak by tomu bylo v ideálně difúzním poli. Čím větší je difúznost daného pole, tím větší má posluchač pocit prostorovosti a „obklopení“ hudbou či jiným zvukovým signálem. Jedná se tedy o velmi důležitý parametr především u tradičních koncertních sálů (tj. sálů pro produkci orchestrů, klasické hudby, opery atd.), kde je tento pocit obklopení silně žádoucí. U klubového sálu, který je předmětem této práce, je však difúznost



Obrázek 3.2: Rozdělení impulzní odezvy na užitečnou a rušivou část podle Nieseo [1]

do jisté míry nežádoucím jevem, neboť veškerá hudební produkce je amplifikována elektroakustickým systémem ve stereo konfiguraci. Za účelem co nejlepšího zachování reprodukováného stereo obrazu je pak cílem dosáhnout co nejmenší difúznosti a co největší dozvukové vzdálenosti.

Podmínky pro existenci difúzního pole byly uvedeny v kapitole 2.3. Ačkoliv je přítomnost difúzního pole podmínkou pro použití statistické akustiky, faktem je, že ideálně difúzního pole nelze nikdy dosáhnout, a to ani ve specializovaných dozvukových místnostech [5]. Předpoklad jeho existence je však natolik přínosný, že se s ním i přes tuto skutečnost téměř vždy pracuje [5].

Kapitola 4

Měření v prostorové akustice

Základem každé studie a každého návrhu akustické úpravy prostoru je získání objektivních dat, která co nejlépe popisují jeho vlastnosti. Právě k tomu slouží měření. Měření se mohou provádět za různými účely a pomocí různých metod, z nichž každá má své výhody a nevýhody. V této kapitole budou popsány základní metody, které se v prostorové akustice využívají.

4.1 Měření činitele zvukové pohltivosti

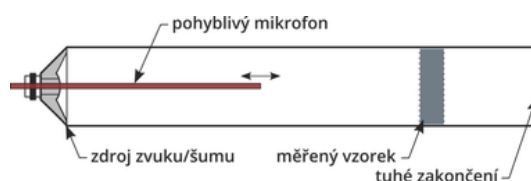
Činitel zvukové pohltivosti (viz kapitola 2.3.2) je důležitým parametrem pro statistickou akustiku a určování doby dozvuku. Znalost činitele zvukové pohltivosti jednotlivých stěn nebo jiných materiálů tvořících uzavřený prostor je nejdůležitějším parametrem pro tvorbu akustického modelu místnosti.

Možnou metodou pro měření činitele zvukové pohltivosti je měření pomocí interferometru, konkrétně pomocí Kundtovy impedanční trubice. V té lze pomocí naměřeného poměru stojatých vln spočítat množství odražené zvukové energie od zkoumaného materiálu. Schéma Kundtovy impedanční trubice je na obrázku 4.1.

Takovéto měření je však relevantní pouze pro kolmý dopad vln. To však evidentně neodpovídá realitě a také je to v přímém rozporu s předpokladem existence difúzního pole. Kundtova impedanční trubice navíc umožňuje měření pouze omezeného kmitočtového rozsahu. Pro relevantní zjištění všesměrového činitele zvukové pohltivosti v celém frekvenčním pásmu je zapotřebí měření v dozvukové komoře.

V praxi se proto používá pojem průměrný činitel zvukové pohltivosti. Ten lze snadno spočítat, pokud známe objem místnosti a dobu dozvuku, úpravou vhodného vztahu pro výpočet doby dozvuku (Sabine, Eyring nebo Millington, viz kapitola 2.3.3). Měření doby dozvuku je věnována následující kapitola 4.2.

Pro přesnější práci s virtuálním modelem místnosti je možné vycházet z předpokládaných hodnot činitele zvukové pohltivosti pro materiály jednotlivých obklopujících



Obrázek 4.1: Kundtova impedanční trubice pro měření poměru stojatých vln zvukového signálu [10]

stěn a v závislosti na měření upravit hodnoty tak, aby modelová doba dozvuku odpovídala té naměřené.

4.1.1 Měření v dozvukové komoře

Měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře je přesnější a výsledky lépe odpovídají realitě. To je způsobeno tím, že je měřeno v difúzním poli, tedy v podmínkách, které jsou realitě výrazně bližší, než jaké se nacházejí v jednorozměrné trubici. Navíc zde není žádné frekvenční omezení [5].

Metoda funguje na principu porovnání doby dozvuku prázdné dozvukové místnosti a doby dozvuku s vloženým akustickým materiálem. Ze Sabinova vztahu 2.9 lze při známém objemu místnosti a změřené době dozvuku snadno spočítat průměrný činitel pohltivosti α . Následně se do místnosti umístí měřený materiál o známé ploše S_s . Z nově naměřené doby dozvuku se pak dá snadno dopočíst činitel pohltivosti měřeného materiálu a to pomocí vztahu

$$T = 0,164 \frac{V}{S_s \alpha_s + (S - S_s) \alpha}, \quad (4.1)$$

kde S_s je plocha měřeného vzorku a α_s je činitel pohltivosti měřeného vzorku.

4.2 Měření doby dozvuku

Jelikož doba dozvuku je nejdůležitějším parametrem pro hodnocení kvality akustiky uzavřeného prostoru, její měření má zásadní význam a je tak nejčastěji prováděným měřením v praxi. Existuje několik metod, nicméně probrány budou dvě základní – standardní a Schroederova.

4.2.1 Standardní metoda

Standardní metoda měření doby dozvuku je principiálně nejjednodušší metodou. Spočívá ve vybuzení prostoru většinou přerušovaným zvukovým signálem, záznamu průběhu hladiny intenzity zvuku a následném odečtení času, který uplyne po vypnutí

buzení do poklesu hladiny intenzity zvuku o 60 dB. Výsledku lze alternativně dosáhnout i proložením menšího úseku přímkou a následné interpolace na celý interval, viz tabulka 3.1.

Měřicí aparatura sestává na vysílací straně z generátoru signálu, zesilovače a všesměrového reproduktoru a na přijímací straně z všesměrového mikrofonu, případného frekvenčního filtru (třetinooktávový nebo oktávový), zesilovače a záznamového zařízení [1]. Vysílací strana by se měla nacházet v místě, kde se při normálním provozu místnosti nachází zvukový zdroj [5]. Jako budicí signály se používají širokopásmové šумы (zpravidla růžový nebo bílý šum) nebo kmitočtově modulované sinusové signály [5]. Vysílací stranu lze také nahradit jiným zdrojem širokopásmového impulzu jako je elektrický výboj [1] nebo výstřel z pistole. Ve všech případech je však nutné dodržet dostatečný odstup signálu od šumu (resp. hladiny hluku) ve všech frekvenčních pásmech. Jako minimální doporučený odstup se udává 40 dB [1]. Frekvenční závislost dozvuku lze měřit zařazením příslušných filtrů do měřicí soustavy a postupným měřením jednotlivých frekvenčních pásem. V současnosti se ale díky možnostem digitální výpočetní techniky využívá spíše širokopásmové měření a následná spektrální analýza záznamu. Měření pomocí sinusového signálu bez modulace se používá pouze ojediněle v případech, kdy je potřeba vyšetřit útlumové konstanty jednotlivých vlastních kmitů [1].

Měření by se mělo provádět v několika polohách mikrofonu (v závislosti na velikosti místnosti) a v každé poloze by se měly průměrovat alespoň dva záznamy. Pokud se hodnoty z jednotlivých pozic neliší o více než 10 %, jako výsledek se udává jejich průměr. V opačném případě se musí udávat každá hodnota zvlášť [1]. Důvodem pro nutnost průměrování vícero měření je přítomnost pseudonáhodných časových fluktuací hladiny akustického tlaku v šumovém signálu v jejichž důsledku jsou jednotlivé výsledky naměřené doby dozvuku nekonzistentní [1]. Tato metoda je tak časově náročnější. Alternativou je měření pomocí Schroederovy metody.

4.2.2 Schroederova metoda

Schroederova metoda umožňuje bezprostřední získání vyhlazeného průběhu dozvuku, který by jinak bylo nutné počítat průměrováním několika měření [1]. Nevýhodou je, že pro její aplikaci je nutné změřit impulzovou odezvu (viz kapitola 4.3). Metoda je založená na vztahu mezi průměrným průběhem poklesu energie $W(t)$ a impulzovou odezvou $h(t)$:

$$W(t) = \int_0^{\infty} h^2(x) dx - \int_0^t h^2(x) dx \quad [1]. \quad (4.2)$$

První integrál vyjadřuje celkovou energii impulzové odezvy, druhý pak postupný časový nárůst energie impulzové odezvy. Po odečtení získáme křivku ekvivalentní

dozvukovému poklesu [1]. Při vyhodnocování je však důležité si uvědomit, že rychlost poklesu je vlivem kvadratury impulzové odezvy dvojnásobná [1].

4.3 Měření impulzové odezvy

V kapitole 3.2 bylo uvedeno, že impulzová odezva je záznam informací o dráhových (tj. i časových) rozdílech jednotlivých odrazů a jejich energii. Pro její měření nebo spíše záznam je tedy vhodný velmi krátký zvukový impulz. I zde se však musí dodržet dostatečný odstup od hluku v místnosti.

Pro pouhé zaznamenání echogramu (graf závislosti energie odrazů na čase) bez kmitočtové závislosti je důraz zdrojového signálu kladen pouze na časové rozlišení. Tomu vyhovuje impulz délky maximálně 1 ms [1]. V praxi se nejčastěji využívá výstřel z pistole, především pro jeho jednoduchou realizaci. Pro lepší reprodukovatelnost signálu lze využít elektrického výboje [1]. Elektroakustické měniče by teoreticky měly nejlepší míru reprodukovatelnosti, bohužel však nejsou schopné generovat dostatečnou energii v takto krátkém časovém úseku.

Pro získání impulzové odezvy závislé na kmitočtu je možné využít několika metod. Prostor se může postupně budit úzkopásmovými impulzy kde se pro každé kmitočtové pásmo zaznamená jeho impulzová odezva. Tato metoda se kvůli své časové náročnosti zpravidla nepoužívá. Alternativně se prostor vybudí širokopásmovým signálem a kmitočtová analýza se provádí až na přijímací straně resp. zpětně ze záznamu. Pro tento účel může taktéž dobře posloužit výstřel z pistole, ale pouze za předpokladu, že známe jeho frekvenční charakteristiku [1]. Výhodné je proto použití tzv. MLS signálů, viz dodatek 4.3.1.

Impulzová odezva je velmi užitečným nástrojem, který popisuje chování místnosti jakožto lineárního systému. Lze z ní vypočítat nejen dobu dozvuku, ale i jeho charakter¹, rušivé odrazy nebo kmitočtovou závislost dozvuku. Měřicí program EASERA proto funguje právě na principu měření impulzové odezvy a následné kalkulace ostatních parametrů.

4.3.1 MLS signály

MLS (maximum-length sequence) jsou pseudonáhodné signály, které splňují jednu zásadní vlastnost – jejich autokorelace je rovna jednotkovému impulzu [11], tedy

$$x_{\text{MLS}}[t] \oplus x_{\text{MLS}}[t] = \delta[t]. \quad (4.3)$$

¹Např. velmi dobře jsou v echogramu viditelné třepotavé ozvěny.

Díky této vlastnosti lze spočítat impulzovou odezvu lineárního systému jako korelaci vstupního a výstupního signálu. Pro lineární systém platí

$$y(t) = h(t) * x(t). \quad (4.4)$$

Bude-li budícím signálem $x(t)$ MLS signál, pak platí

$$y(t) \oplus x(t) = [h(t) * x(t)] \oplus x(t) = h(t) * [x(t) \oplus x(t)] = h(t). \quad (4.5)$$

Pro změření impulzové odezvy v celém frekvenčním pásmu proto stačí vybudit prostor pomocí elektroakustických měničů signálem MLS a následně provést autokorelaci se signálem naměřeným.

■ 4.4 Měření kmitočtové odezvy uzavřeného prostoru

Cílem měření kmitočtové odezvy místnosti je vyšetření nerovnoměrnosti zvukového pole v závislosti na poloze. Z kapitoly 2.2 je zřejmé, že nad kritickým kmitočtem lze považovat frekvenční odezvu za rovnoměrnou, resp. náhodnou [1]. Analýzou výsledku tedy lze kritický kmitočet odhadnout. Měření je ale nutné provádět na různých místech místnosti. Tomu odpovídá poměrně velká časová náročnost.

Vzhledem k tomu, že vlastní kmity i kritický kmitočet místnosti se dají pro jednoduché prostory vyšetřit teoreticky, měření kmitočtové odezvy má větší smysl pouze u tvarově složitějších prostorů. Častější je v tomto kontextu užití úzkopásmových signálů pro měření konstanty útlumu jednotlivých vlastních kmitů.

Kapitola 5

Pohlčování zvukové energie

Existuje několik metod, kterými lze pohlcovat akustickou energii, a tím měnit vlastnosti prostoru, především dobu dozvuku. V principu se vždy jedná o přeměnu zvukové energie na energii jinou, nejčastěji tepelnou. Pohltivé materiály a konstrukce se souhrnně označují jako *akustické obklady*. Je důležité vymežit, že akustické obklady se používají zpravidla pro řešení problémů prostorové akustiky, a nedají se tak zaměňovat s obklady zlepšující zvukovou izolaci a neprůzvučnost [1].

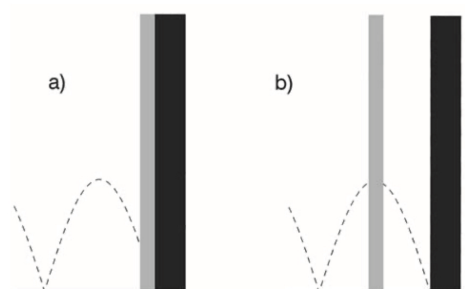
K přeměně zvukové energie na jinou dochází pomocí tření, poklesu akustického tlaku nebo nepružnou deformací těles [1]. Akustické obklady pak dělíme do dvou hlavních kategorií – porézní materiály a obklady založené na rezonančním principu.

5.1 Porézní materiály

Porézní materiály či obklady jsou pevné látky obsahující póry, tedy vzduchové dutiny. Při průchodu zvukových vln takovýmto materiálem dochází v důsledku tření k přeměně akustické energie na energii tepelnou. Pro dobrou absorpci zvuku je potřeba, aby byl poměr objemu vzduchových dutin k celkovému objemu látky co největší (zpravidla 80 až 99 %) a póry byly vzájemně propojeny, aby se mohl zvuk materiálem šířit [1].

Charakteristickou vlastností porézních materiálů je měrná akustická impedance, která je kmitočtově závislá. Dalším parametrem udávajícím kmitočtovou závislost činitele zvukové pohltivosti je tloušťka obkladu (většinou označovaná d). Nejnižším tlumeným kmitočtem je pak takový kmitočet, jehož vlnová délka λ je rovna čtyřnásobku tloušťky obkladu d . Jinými slovy obklad o tloušťce d bude tlumit pouze do frekvencí stejné čtvrtvlnné délky. To je dáno tím, že porézní materiál nejlépe pohlcuje zvukovou energii v místech, kde má zvuková vlna největší akustickou rychlost a dochází tak k největšímu tření. V místě odrazu je pak vždy uzel akustické rychlosti a ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{4}$ od místa odrazu je kmitna, viz obrázek 5.1.

Z toho je evidentní, že pomocí porézních materiálů by se daly při použití dostatečně silné vrstvy tlumit i nízké frekvence. Alternativně lze zvýšit efektivitu obkladu určité tloušťky vytvořením vzduchového polštáře za porézní vrstvou. Frekvenční závislost činitele pohltivosti α takového akustického obkladu vykazuje maxima pro liché násobky čtvrtiny vlnové délky rovné velikosti vzduchové mezery [1].



Obrázek 5.1: Umístění porézní vrstvy: (a) bez vzduchové mezery; (b) se vzduchovou mezerou. Čárkovaná křivka značí akustickou rychlost příslušné frekvence [5].

Akustické obklady založené na principu porézních materiálů jsou velmi často používané pro svou dostupnost, cenu a snadnou instalaci. Používají se zpravidla k tlumení středních a vysokých kmitočtů.

5.2 Obklady založené na rezonančním principu

Tento typ obkladů využívá k pohlcování akustické energie principu nucených kmitů akustické rezonanční soustavy, které jsou vyvolávány dopadem zvukové energie. Amplituda kmitů je největší v případě naladění rezonanční frekvence [1]. Frekvenční závislost činitele pohltivosti má proto vždy maximum na rezonančním kmitočtu soustavy.

Každý rezonátor mění část akustické energie v energii tepelnou. Pro co největší účinnost takovýchto obkladů je proto nutné, aby byl rezonanční obvod dostatečně tlumen a co největší množství energie nashromážděné v rezonátoru se přeměnilo na teplo.

Rezonanční obklady lze ladit v širokém pásmu frekvencí, od těch nejnižších až po vysoké. Zpravidla se používají k pohlcování energie na nízkých či středních kmitočtech. Vhodnou kombinací různých nebo různě laděných rezonančních obkladů lze modifikovat ekvalizaci doby dozvuku a tím dosáhnout požadovaných parametrů na všech kmitočtových pásmech [5].

■ 5.2.1 Kmitající membrány a desky

Prvním typem rezonančních obkladů jsou kmitající membrány či desky. V případě membrány se jedná o tenký pružný materiál umístěný nad uzavřeným vzduchovým polštářem, pevně připevněný k okrajům. V případě desky je nad vzduchový polštářem umístěn pevný nepružný materiál připevněný na pružném ukotvení. Oba typy fungují na principu přeměny akustické energie na energii mechanickou, potažmo tepelnou.

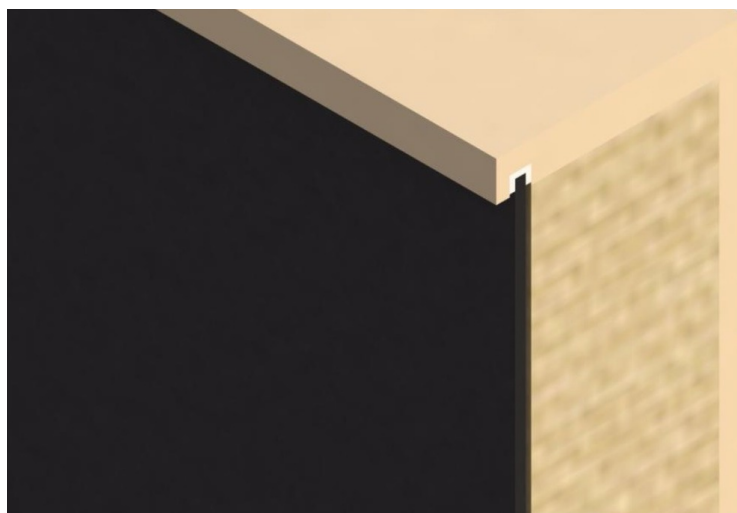
Rezonanční kmitočet membránového nebo deskového rezonátoru lze spočítat pomocí vztahu

$$f_r = \frac{600}{\sqrt{Md}} \quad [5], \quad (5.1)$$

kde M je plošná hmotnost membrány, resp. desky (kg/m^2) a d je velikost vzduchové mezery (m). Je nutné dodat, že tento vztah pracuje s rezonančním obvodem pouze jako s kmitajícím pístem a zcela zanedbává ohybové kmity desky či membrány, které ve výsledné charakteristice hrají roli.

Vzduchovou mezeru je možné vyplnit porézním materiálem, který celou soustavu tlumí. Změna absorpční charakteristiky je pak stejná jako u dutinových rezonátorů (viz obrázek 5.4b), tedy dojde ke snížení maximální hodnoty činitele pohltivosti, ale rozšíření kmitočtové oblasti, na které obklad tlumí.

Využití deskových a membránových rezonátorů je díky tenké konstrukci velmi výhodné v prostorech, kde je potřeba co nejmenší tloušťka obkladu. Vidět je lze např. ve Dvořákově síni pražského Rudolfa. Příklad deskového rezonátoru je na obrázku 5.2.

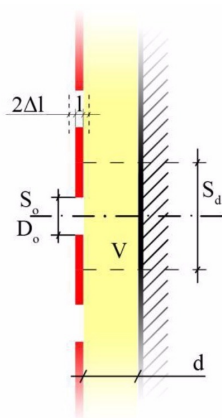


Obrázek 5.2: Řez deskovým rezonátorem uloženým na gumovém závěsu s pěnovou výplní [12]

5.2.2 Helmholtzovy rezonátory

Asi nejdůležitějším typem akustických rezonančních obkladů jsou Helmholtzovy rezonátory, někdy také označované jako dutinové rezonátory. Tyto prvky lze používat i jednotlivě ale v drtivé většině případů se používají sdruženě v podobě děrovaných desek. Princip pohlcování zvukové energie je stejný jako u deskových rezonátorů, ovšem zde místo desky kmitá vzduch v každém otvoru rezonátoru. Ten si můžeme představit jako nestlačitelný píst. Objem vzduchu v rezonátoru je pak analogií mechanické pružiny.

Rezonanční obklad Helmholtzova typu se v praxi nejčastěji vytváří umístěním děrované desky nad vzduchový polštář. Parametry udávající vlastnosti obkladu jsou podíl děrování ε (poměr plochy děr S_0 ku ploše jednoho rezonátoru S_d), tloušťka vzduchového polštáře d , tloušťka děrované desky l a tvar děrování.



Obrázek 5.3: Schéma Helmholtzova rezonátoru v podobě děrované desky [12]

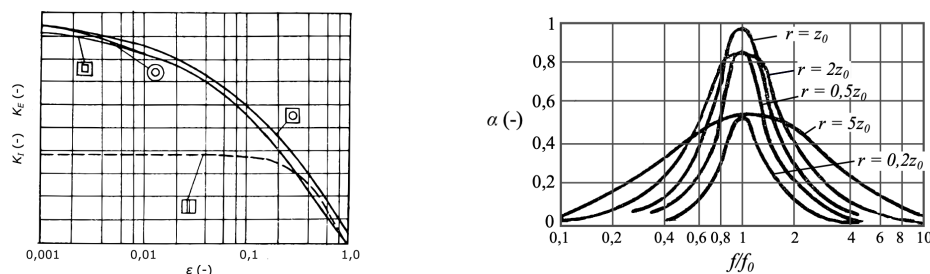
Rezonanční kmitočet je pak dán vztahem

$$f_r = \frac{c_s}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{d(l + 2\Delta l)}} \text{ [Hz] [1]}, \quad (5.2)$$

kde c_s je rychlost zvuku a $2\Delta l = \sqrt{S_0} K_I$ je korekční činitel závislý na tvaru děrování, viz obrázek 5.4a. Je tedy evidentní, že pro snižování rezonančního kmitočtu je potřeba snižovat perforaci desky a zvyšovat tloušťku vzduchového polštáře a desky.

Dalším důležitým parametrem je tlumení rezonátoru, které charakterizuje měrný akustický odpor r [1]. Pokud se rovná vlnovému odporu vzduchu, rezonátor vykazuje největší hodnotu činitele pohltivosti α . Při zvyšování r , tedy tlumení rezonátoru, se sice maximální hodnota α snižuje, ale rozšiřuje se kmitočtové pásmo, ve kterém prvek absorbuje zvukovou energii, viz obrázek 5.4b. Některé tlumicí materiály je potřeba z hygienických důvodů izolovat do plastové fólie či netkané látky. V takovém

případě je nutné zachovat mezi děrovanou deskou a tlumícím materiálem alespoň malou vzduchovou mezeru, jinak by vzduch v rezonančních otvorech nemohl správně kmitat [13].

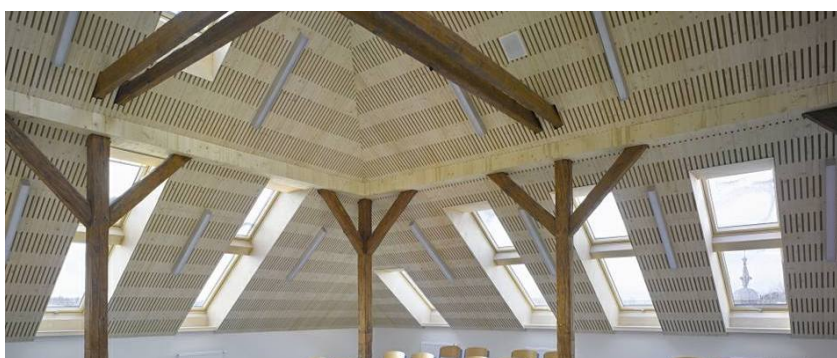


(a) Závislost korekčního činitele K_T na poměru děrování ϵ a tvaru děrování [1]

(b) Kmitočtová závislost pro různá tlumení rezonátoru s poměrem $l/d = 4$ [1]

Obrázek 5.4: Charakteristiky pro různé parametry Helmholtzových rezonátorů

Rezonanční obklady na principu Helmholtzových rezonátorů jsou jedním z nejrozšířenějších akustických obkladů, především pro jejich poměr ceny, snadnosti instalace a efektivity tlumení. Příklad místnosti tlumené tímto obkladem je na obrázku 5.5.

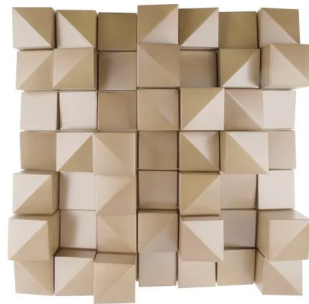


Obrázek 5.5: Příklad místnosti s rezonančními obklady Helmholtzova typu [14]

5.3 Difuzory

Difuzory jsou akustické prvky, které akustickou energii nepohlcují, ale pouze rozptylují. Jejich účelem není snižování doby dozvuku, ale rozptýlení nežádoucích odrazů a zvýšení difúznosti zvukového pole. Ve některých případech se dají použít specificky tvarované odrazné plochy pro směřování a rozptýlení odrazů na žádoucí místa. Např. vhodné umístění vypouklé odrazné desky nad divadelní orchestřiště může zlepšit přenos zvuku od orchestru k divákům.

Konstrukčně se většinou jedná o plochy s výstupky různých délek a tvarů, které způsobují náhodný odraz dopadajících zvukových vln. Velikostí jednotlivých výstupků



Obrázek 5.6: Difuzor Artnovion Alps W [15]

lze upravit, které kmitočty bude difuzor rozptylovat. Příklad difuzoru je na obrázku 5.6.

s



Část II

Praktická část

Kapitola 6

Klubový sál Kasáren Karlín

Kulturní komplex Kasárna Karlín má více sálů sloužících pro různé účely. Celá hlavní budova, v níž se nacházejí vnitřní sály je zasazena v nádvoří. Na tom se např. v létě konají venkovní kina či koncerty a festivaly. Z druhé strany jsou pak na budovu napojeny vysoké obytné domy a jedna slepá ulice. Budova, v níž se nacházejí vnitřní sály, je tak poměrně dobře izolovaná od městského a dopravního hluku.

Na začátku hlavní budovy se nachází kavárna, jejíž součástí je starý vypuštěný bazén, předělaný pro potřeby kavárny. Konají se zde však i přednášky a někdy i koncerty. V zadní části budovy se pak nacházejí dva sály. V horním patře je nově vybudovaný kinosál, který slouží pro filmové promítání a přednášky. V jeho předsáli je tichá studovna. Ve spodním patře se nachází sál označovaný jako *sál Garáže*, který je ze všech doposud popisovaných místností největší a nejuniverzálnější. Nejčastěji je využíván jako klubový sál, tedy pro konání koncertů ozvučených kapel nejrůznějších žánrů od těch komornějších, jako je folk, až po ty nejhlasitější jako hard rock a metal. Dále se sál využívá pro konference, přednášky, divadlo a v mimořádných případech i promítání – zpravidla pokud není dostatečná kapacita kinosálu v horním patře.

6.1 Specifikace sálu

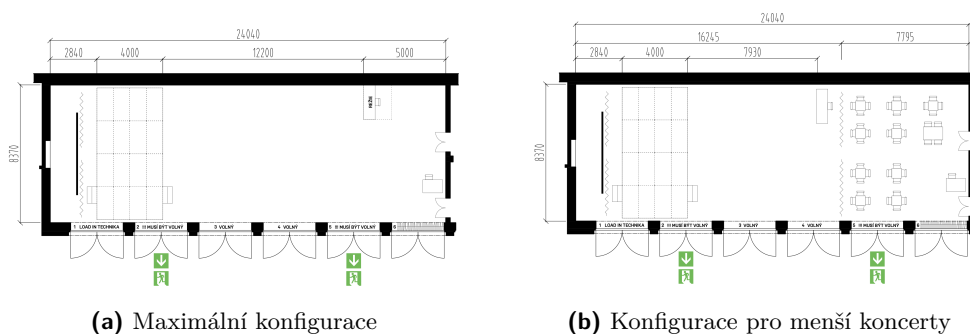
Sál má tvar podlouhlého kvádrů. Rozměry jsou:

- Délka 24,04 m
- Šířka 8,37 m
- Výška 5,70 m

Jedná se tedy o středně velký sál. Oficiální maximální kapacita je 350 míst k stání, 150 míst k sezení [16]. Většina akcí má návštěvnost mezi 100 a 200 lidmi. V případě konání akcí, které mají nižší návštěvnost nebo jsou komornějšího charakteru, lze sál v půlce hlediště rozdělit pomocí závěsu z těžkého hedvábí, viz obrázek 6.2.



Obrázek 6.1: Sál Garáže, pohled zezadu směrem k pódiu



(a) Maximální konfigurace

(b) Konfigurace pro menší koncerty

Obrázek 6.2: Půdorys sálu Garáže

Strop i stěny sálu jsou povrchově ošetřeny standardní omítkou. Strop je zajímavý tím, že jej po celé délce lemují nosníky o výšce 60 cm a šířce 20 cm. Mezi nosníky je vždy mezera 1,4 m. U desátého nosníku je tento prvek zdvojený (viz obrázek 6.3a). Sál není symetrický, neboť se na levé straně (při pohledu směrem k pódiu) nachází 6 velkých kovových vrat zasazených ve výklenku s mírně klenutým stropem (viz obrázek 6.3b). Tři z těchto výklenků slouží jako skladní prostor pro židle a stoly. Zbylé tři musí být volné, neboť dvě z vrat slouží jako nouzový východ a jedny jako vstup pro kapely do prostoru za pódiem. Podlaha je betonová, v horším stavu – na některých místech je beton mírně vydrolený.

V přední části sálu je za pódiem umístěné velké plátno o rozměrech 5,8×4,3 m. Toto plátno je z materiálu PVC a je napnuté mezi čtyřmi trussy¹ visícími ze stropu.

¹Tuhý kovový nosík často používaný pro věšení zvukové i světelné techniky.



(a) Stropní nosníky

(b) Kovová vrata

Obrázek 6.3: Fotografie sálu Garáže

Před plátnem je trvale postavené pódium o rozměrech 8×4 m. Je poskládané z pódiových desek od firmy Nivtec. Každá pódiová deska má rozměr 2×1 m a tvoří ji kovová konstrukce s překližkou o tloušťce 12mm. Povrch překližky je upraven černým nátěrem odolným proti poškození. Pod pódium se v pojízdných šuplících skladuje různý materiál potřebný k provozu a zajištění akcí.

6.2 Zvukový systém

Nad předním okrajem pódia se nachází PA² systém zajišťující ozvučení sálu. Lehce za polovinou hlediště (cca 8,5 m od pódia) je pak další pár vykrývacích reproduktorových beden, které se zapínají pouze koncertech s větší návštěvností. Celý systém je od firmy d&b audiotechnik a tvoří jej dva pasivní reproduktorové boxy typu Q7 (max SPL 138 dB [17]) a jeden pasivní subwoofer typu J-SUB (max SPL 138 dB [18]). Tyto tři zdroje jsou zavěšeny ze stropu ve výšce 3,5 m nad zemí v případě boxů Q7 a 4 m nad zemí v případě boxu J-SUB, viz obrázek 6.4a. Vykrývací soustavu v zadní části sálu tvoří pasivní reproduktorové boxy typu Ci90 (max SPL 135 dB [19]), zavěšené ve výšce 3,5 m.

Systém je napájen třemi zesilovači d&b audiotechnik D12 s maximálním výkonem 2×1200 W při zátěži 4Ω . Celkový maximální výkon tedy může dosáhnout až 7,2 kW.

6.3 Současné akustické úpravy

Již od počátku provozu sálu byly instalovány určité akustické úpravy. Po celém obvodu místnosti jsou pověšeny závěsy z těžkého sametu s řasením téměř 2:1.³

²Public Address.

³Na 1 m stěny je použito 2 m závěsu.



(a) Hlavní PA

(b) Vykrývací reproboxy

Obrázek 6.4: Fotografie ozvučovací techniky sálu

V přední části sálu není závěs umístěný na zadní stěně, ale před a za promítacím plátnem. V případě konferencí, přednášek či promítání se tento závěs před plátnem musí roztáhnout, aby bylo možné na plátno promítat. U těchto typů akcí však není požadavek na co nejnižší dobu dozvuku tak zásadní jako u reprodukováných koncertů. Podíl plochy, která zabírá závěs před plátnem ke zbytku sálu, navíc není nijak zásadní. Další roztahovatelné závěsy jsou umístěny zhruba v polovině hlediště, kde slouží k již zmiňovanému rozdělení místnosti pro akce s menší návštěvností nebo komornějším charakterem. Akustický projekt je ale koncipován pro celý sál v maximální konfiguraci. Tento závěs tak nebude brán v úvahu.

Ačkoliv tyto úpravy jsou pro kvalitu akustiky v sálu stěžejní, ukazuje se, že především na nižších kmitočtech nejsou dostatečné a pro optimální poslechové podmínky je potřeba snížit dobu dozvuku na nízkých kmitočtech.

6.4 Požadované změny a cílová vize po úpravě

Hlavním požadavkem provozovatele a zvukařů Kasáren Karlín je snížit dozvuk na nízkých frekvencích. Stanovená cílová doba dozvuku je 0,5 s v celém frekvenčním pásmu. Rovněž je požadavkem co největší eliminace nerovnoměrného rozložení hladiny akustické intenzity na frekvencích pod 100 Hz.

Samozřejmě je nutné brát při návrhu úprav v potaz i ekonomickou stránku věci. V tomto ohledu není od provozovatele stanovená žádná přesná částka, která je na rekonstrukci vyhrazena, nicméně je samozřejmě požadavek na co nejlevnější řešení.

Poměrně zásadní roli u návrhu této úpravy hraje také vizuální stránka. Provozovatel zdůraznil prosbu, aby byl co nejvíce zachován současný charakter místnosti, který by se dal popsat jako industriální. Charakteristické jsou pro sál velké stropní nosníky

(viz obrázek 6.3a a rozbitá betonová podlaha. Zbytek sálu tvoří již zmiňované závěsy, které s největší pravděpodobností zůstanou zachovány. Od osvětlovače rovněž zazněla prosba o černý strop nad pódiem.

Kapitola 7

Modelování místnosti

V rámci návrhu úpravy akustiky se velmi často pracuje se simulačními programy. Těch je v současnosti na trhu velké množství. Mezi ně patří program EASE od německé společnosti AFMG. Jako alternativy lze uvést např. program ODEON vyvíjený na Dánské technické univerzitě, program RAVEN od firmy Virtual Acoustics, nebo třeba volně dostupný¹ program i-Simpa.

Je dobré zmínit, že většina výrobců ozvučovací techniky (např. L-Acoustics, d&b audiotechnik, Nexo) poskytuje zdarma simulační software s databází svých produktů. Tyto programy však slouží primárně k návrhu konfigurace ozvučovacího systému, nikoliv k vyšetřování prostorové akustiky.

V této bakalářské práci byl k simulaci prostorové akustiky použit program EASE ve verzi 4.4, který je pro studenty fakulty elektrotechnické ČVUT dostupný.

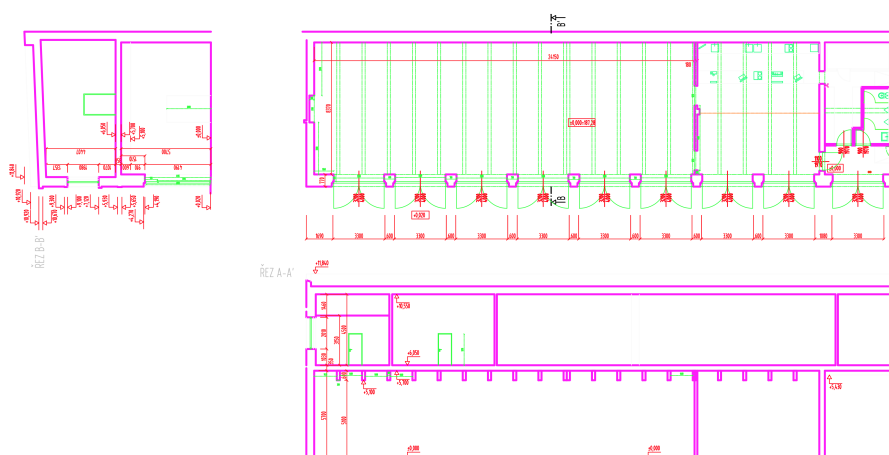
Pro simulování akustiky v místnosti je nejprve potřeba vytvořit 3D model dané místnosti. Program EASE sice nabízí CAD modul, ve kterém je možné modelovat, nicméně je založen na bodovém, nikoliv objektovém principu². V důsledku toho je v porovnání s jinými CAD programy určenými k 3D modelování (např. AutoCAD od firmy Autodesk nebo SketchUp od společnosti Trimble) velmi neefektivní.

7.1 Model v programu AutoCAD

Z důvodů uváděných v minulém odstavci byl k modelování klubového sálu Kasáren Karlín použit program AutoCAD. Firma Autodesk, která program vyvíjí, poskytuje pro studenty jakékoliv univerzity roční licenci zdarma. Model byl vytvářen na základě architektonických řezů místností, které byly od Kasáren Karlín poskytnuty ve formátu .dwg (formát souborů AutoCAD), viz obrázek 7.1. Díky formátu .dwg bylo

¹Tzv. open-source.

²Tj. veškeré linie, plochy a tělesa vznikají spojováním bodů umístovaných do souřadnicového



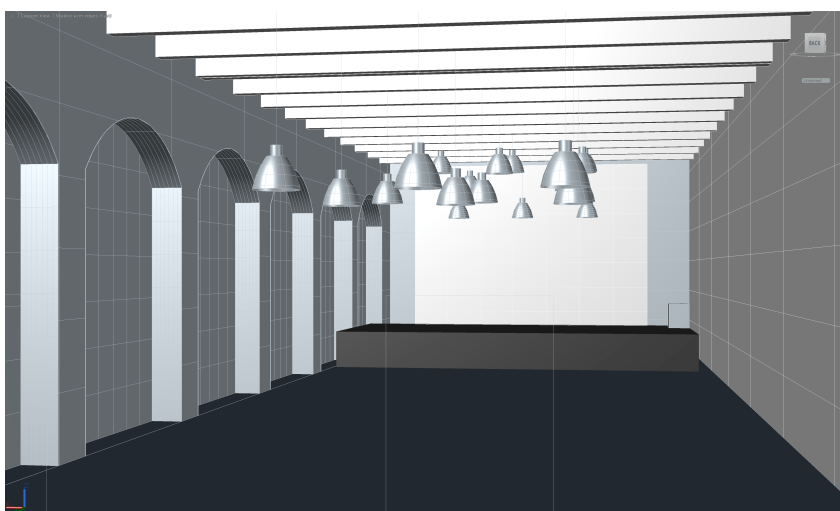
Obrázek 7.1: Architektonický náčrt sálu a přilehlých místností

možné v programu AutoCAD mimo jiné měřit rozměry, které nebyly od architekta v náčrtu zanesené, což výrazně zjednodušilo celý postup. Přesto nebyly v náčrtech obsaženy veškeré informace potřebné k vytvoření modelu, a bylo tak nutné některé rozměry měřit manuálně přímo na místě. Výsledný model je na obrázcích 7.2. Tento model pak měl být pomocí formátu .dxf přenesen do programu EASE za pomoci modulu *import/export*.

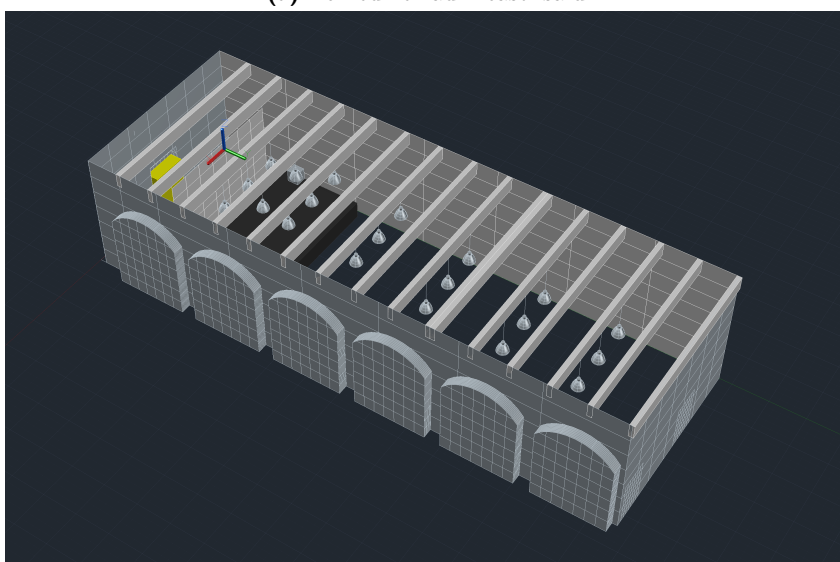
7.1.1 Problémy s přenosem modelu

Ačkoliv v uživatelském návodu k programu EASE [20] je věnována modelování v AutoCADu a následném převodu modelu poměrně velká pozornost, vyvstaly při přenosu četné problémy. Většina z nich byla způsobena zmiňovaným bodovým přístupem CAD modulu v EASE. Zatímco v AutoCADu (a jiných obdobných programech) se kreslí rovnou linií a celé objekty, v EASE se do souřadnicového systému umísťují body a až jejich následným spojováním se tvoří linie a plochy. Importovací modul EASE tedy při převodu .dxf souboru rozeznává koncové body objektů obsažených v projektu a následně je spojuje do ploch, se kterými již EASE umí pracovat. Bohužel na nejednom místě se stalo, že výsledné plochy po konverzi neodpovídaly plochám původně modelovaným, a drtivá většina ploch byla zdvojená či dokonce ztrojená. Program rovněž nedokázal správně převést informaci o vrstvách, podle které se následně určují materiály stěn a ploch, ačkoliv dle návodu toho měl být schopen.

Další komplikací byly zakřivené plochy (obloukové klenby bočních vrat a lampy),
systému.



(a) Pohled ze zadní části sálu

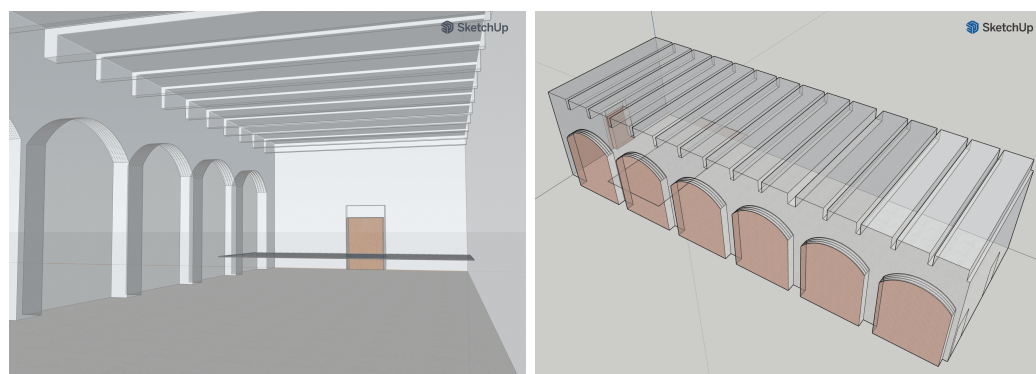


(b) Pohled ze shora (bez stropní plochy)

Obrázek 7.2: 3D model sálu Garáže v programu AutoCAD

se kterými EASE také neumí pracovat. Zde bylo při řešení problému rovněž postupováno přesně dle pokynů uvedených v uživatelském návodu EASE [20], nicméně ani tak se nepodařilo přiblížit k funkčnímu modelu. Po konzultaci s vedoucím práce byly z modelu odstraněny lampy a klenbové oblouky byly nakresleny bodově, přímo v CAD modulu programu EASE. I poté ale model hlásil „díry“³ na místech, na kterých žádné nebyly. Především velké množství jich bylo v oblasti stropních trámů. Při konzultaci problému s akustikem Janem Jarchovským jsem byl seznámen s faktem,

³Aby mohl EASE s modelem pracovat, je potřeba aby byla místnost uzavřená a neměla žádné díry. V CAD modulu programu EASE je obsažena funkce *check holes* neboli *zkontrolovat díry*, která vypíše, u kterých linií se díry nacházejí.



(a) Pohled ze zadní části sálu

(b) Pohled ze shora (bez stropní plochy)

Obrázek 7.3: 3D model sálu Garáže v programu SketchUp

že aby EASE považoval model za uzavřený, musí být tvořený jednolitou uzavřenou plochou. Tedy jinými slovy do místnosti není možné vkládat objekty typu pódium, promítací stěna, lampy atd. Veškeré objekty a zakřivení musí být prolomené ze stěn (viz stropní nosníky na obrázku 7.3b). Rovněž mi bylo i v souvislosti s ostatními problémy doporučeno používat pro modelování místo programu AutoCAD program SketchUp, jehož formát souborů .skp je pro převádění do EASE vhodnější.

7.2 Model v programu SketchUp

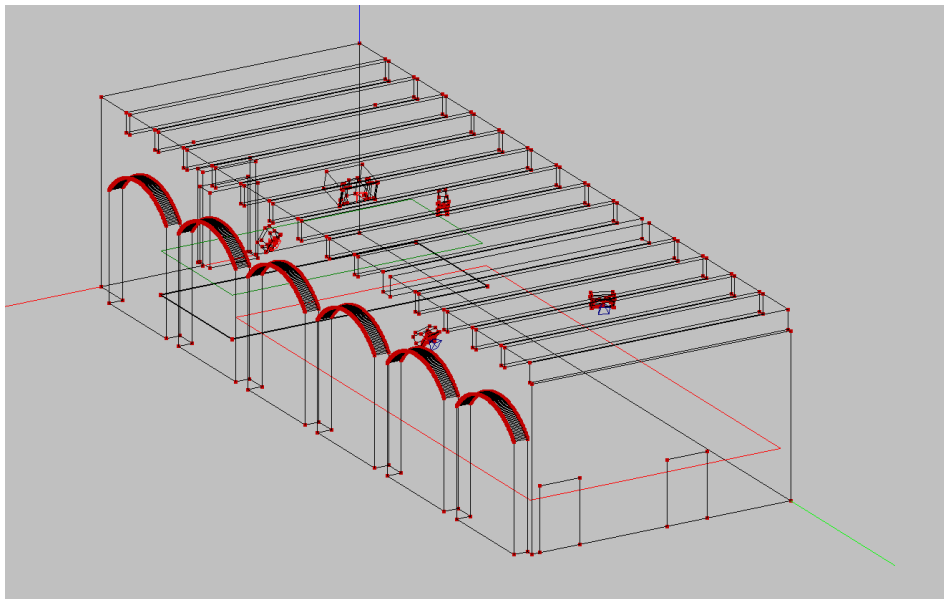
V návaznosti na problémy a doporučení uváděné v minulém odstavci byl celý model znovu přepracován v programu SketchUp od společnosti Trimble. Společnost nabízí 7 denní zkušební licenci programu, který byla využita.

Po pokusech o převedení již hotového AutoCAD modelu do SketchUpu jsem dospěl k závěru, že bude jednodušší udělat nový model od začátku. V rámci nového modelu bylo zanedbáno kromě stropních svítidel i promítací plátno v přední části sálu. Toto rozhodnutí bylo učiněno vzhledem k vyšetřovanému kmitočtu, kterým jsou nízké frekvence především pod 300Hz. Na tyto frekvence nemá tenké promítací plátno z PVC velký vliv a je tak možné jej z modelu vynechat.

Výsledný model v programu SketchUp je na obrázku 7.3. Přenos tohoto modelu do EASE byl již bez problémů a zachováno zůstalo i rozdělení do vrstev.

7.3 Model v programu EASE

Po přenesení modelu z programu SketchUp do programu EASE byly podle vrstev, vytvořených ve SketchUpu, přiřazeny stěnám materiály z databáze knihovny EASE, které co nejvíce odpovídají skutečným materiálům v místnosti. Tedy pro stěny



Obrázek 7.4: 3D model sálu Garáže v programu EASE

omítka, pro podlahy beton, pro boční vrata plech a pro dveře dřevěná deska.

Dále byly do modelu přidány zdroje zvuku. V databázi EASE se od firmy d&b audiotechnik nachází pouze reproboxy Q7 a Ci90. Reprobox J-SUB v databázi není, a byl tak nahrazen reproboxem B2, který je svými konstrukčními a frekvenčními vlastnostmi reproboxu J-SUB podobný nejvíce. Výsledný model v programu EASE je na obrázku 7.4.

Simulovaná doba dozvuku byla v této fázi výrazně vyšší, než jaká v sálu skutečně je. Jedná se však pouze o hypotetickou hodnotu pro zcela prázdný sál. Korekce materiálů byla provedena až následně po měření doby dozvuku, které je popsáno v kapitole 9.

Kapitola 8

Vyšetření vlastních kmitů místnosti

Vlastní kmity místnosti byly spočítány v tabulkovém kalkulátoru Microsoft Excel pomocí vztahu 2.1. Počítány byly primárně osově (axiální) kmity, tedy kmity pouze v jednom ze směrů x, y, z , jelikož ty mají obvykle největší vliv, a jejich vyšetření je nejsnadnější. Ve výpočtu byly uvažovány rozměry místnosti:

- Délka 24,0 m
- Šířka 8,8 m
- Výška 5,7 m

Hodnota šířky je o 0,45 m delší, než hodnota uváděná v kapitole 6. Důvodem je, že pro výpočet vlastních kmitů je počítáno se šířkou až k plechovým vratům namísto okraje místnosti. Plocha plechových vrat totiž zabírá 54 % celkové plochy boční stěny a v dolní polovině stěny dokonce 79,5 %. Prvních 12 osových kmitů zaokrouhlených na celé hertzy je vypočteno v tabulce 8.1.

Kromě osových kmitů byly spočítány i tangenciální a kosé. Ty jsou uvedeny v tabulkách 8.2 a 8.3. Tyto kmity byly spočítány pouze v rozmezí 30 až 60 Hz a jsou seřazeny vzestupně dle frekvence.

8.1 Kritický kmitočet

Při předpokládané průměrné době dozvuku 0,7 s a objemu místnosti $24,04 \text{ m} \times 8,37 \text{ m} \times 5,7 \text{ m} = 1146,9 \text{ m}^3$ vychází Schroederův kritický kmitočet dle vztahu 2.3 na hodnotu 49,4 Hz.

Je tedy zřejmé, že pod touto hodnotou nebo v její těsné blízkosti se nachází pouze prvních 7 kmitů ve směru délky sálu, první 2 kmity ve směru šířky a jeden kmit ve směru výšky. Přesto byly při měření vyšetřeny i vlastní kmity nad kritickým kmitočtem.

Tabulka 8.1: Vlastní kmity (osové) klubového sálu Kasáren Karlín

Kmit č.	Délka (Hz)	Šířka (Hz)	Výška (Hz)
1	7	20	30
2	14	39	60
3	21	59	91
4	29	78	121
5	36	98	151
6	43	117	181
7	50	137	211
8	57	156	241
9	64	176	272
10	72	195	302
11	79	215	332
12	86	234	362

Tabulka 8.2: Vlastní kmity (tangenciální) klubového sálu Kasáren Karlín

Kmit č. (d, š, v)	Frekvence (Hz)	Kmit č. (d, š, v)	Frekvence (Hz)
(1, 0, 1)	31	(5, 0, 1)	47
(2, 0, 1)	33	(6, 1, 0)	47
(4, 1, 0)	35	(4, 2, 0)	48
(0, 1, 1)	36	(0, 2, 1)	49
(3, 0, 1)	37	(6, 1, 0)	53
(1, 2, 0)	40	(5, 2, 0)	53
(5, 1, 0)	41	(7, 1, 0)	54
(2, 2, 1)	42	(6, 2, 0)	58
(4, 0, 1)	42	(7, 0, 1)	58
(3, 2, 0)	45	(1, 3, 0)	59

Tabulka 8.3: Vlastní kmity (kosé) klubového sálu Kasáren Karlín

Kmit č. (d, š, v)	Frekvence (Hz)	Kmit č. (d, š, v)	Frekvence (Hz)
(1, 1, 1)	37	(5, 1, 1)	51
(2, 1, 1)	39	(2, 2, 1)	51
(3, 1, 1)	42	(3, 2, 1)	54
(4, 1, 1)	46	(6, 1, 1)	56
(1, 2, 1)	50	(4, 2, 1)	57

Kapitola 9

Měření

K získání objektivních dat o současné akustické situaci v sálu byla provedena měření doby dozvuku a měření vlastních kmitů. Obě měření proběhla dne 4. dubna v rozmezí 10 - 14 hodin.

9.1 Měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku probíhalo pomocí programu EASERA od společnosti AFMG. Společnost nabízí 30 denní zkušební licenci, která byla využita. Měřena byla impulsová odezva pomocí váhovaného signálu MLS.

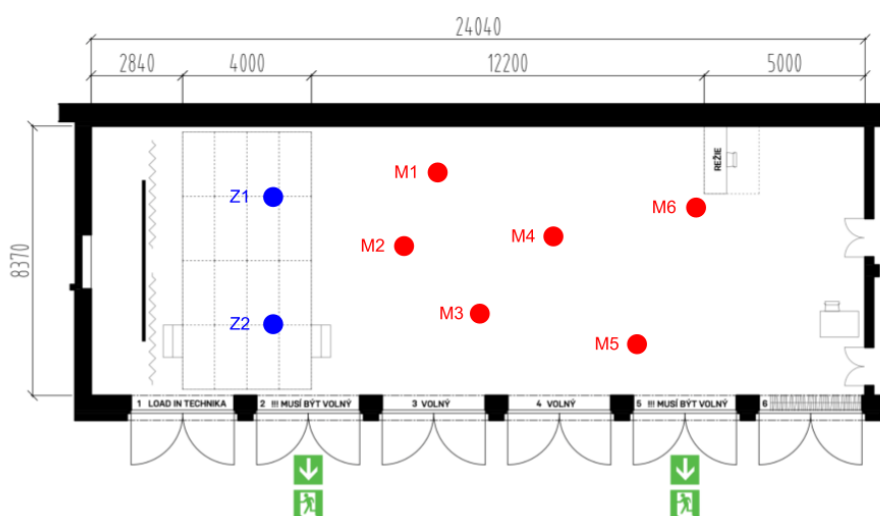
Měřicí aparatura

- Mikrofon DBX RTA-M
- Zvuková karta SSL 2+
- Počítač s programem EASERA
- Mikrofonní stojan K&M

Zdroj zvukového signálu

- Dva reproduktorové boxy d&b audiotechnik MAX15
- Subwoofer d&b audiotechnik J-SUB
- Zesilovač d&b audiotechnik P1200A
- Zesilovač d&b audiotechnik D12

Měření bylo provedeno v 6 různých bodech místnosti při 2 různých polohách mikrofonu, viz obrázek 9.1. Zdroj zvuku byl umístěn na pódiu, tedy ve výšce 80 cm



Obrázek 9.1: Polohy zdrojů (Z) a měření (M)

nad podlahou. Skládal se ze dvou reproduktorových boxů otočených zády k sobě, aby docházelo k co nejvšesměrovějšímu vyzařování. Mikrofon byl ve výšce 160 cm nad podlahou.

Měření bylo vyhodnocováno v oktávových i třetinooktávových pásmech (z důvodu třetinooktávového rozlišení funkce *Optimize RT* v programu EASE). Délka signálu MLS byla nastavena na 5,5 s. V každém bodě měření a poloze zdroje bylo průměrováno 10 jednotlivých průběhů. Výsledné hodnoty jsou průměrem z hodnot naměřených v různých vzájemných polohách zdroje zvuku a mikrofonu, tedy z 12 hodnot. Uvedeny jsou v tabulce 9.1.

Reproduktorové boxy použité k širokopásmovému měření bohužel nestačí k dostatečnému vybuzení prostoru pod frekvencí 100 Hz. Bylo proto provedeno ještě dodatečné měření, kdy byl k buzení použit subwoofer d&b audiotechnik J-SUB. Měření bylo provedeno identickým signálem, ale pouze v bodech 1, 3 a 6 (viz obrázek 9.1). Vyhodnocováno bylo pomocí Schroederovy metody. Výsledky jsou v tabulce 9.2.

9.1.1 Výsledky měření doby dozvuku

Výsledky potvrzují předpokládaný průběh dozvuku, kdy na středních a vyšších frekvencích je doba dozvuku v rozmezí 0,4 - 0,8 s, zatímco na basových frekvencích prudce roste.

Zatímco na v oktávovém pásmu 125 Hz je doba dozvuku pouze 1,4 s, při měření pomocí subwooferu již vystoupala průměrná hodnota doby dozvuku na 2,5 s. Vzhledem k frekvenčnímu rozsahu subwooferu (32 - 100 Hz [18]) je možné toto pásmo

Tabulka 9.1: Naměřená doba dozvuku v oktávových pásmech

Frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Doba dozvuku (s)	1,37	0,86	0,74	0,76	0,72	0,62	0,43

prohlásit za oktávové pásmo 63 Hz (44 - 88 Hz [21]).

Tabulka 9.2: Naměřená doba dozvuku ve frekvenčním rozsahu 32 - 100 Hz

Měřicí pozice	1	3	6	Průměrná hodnota
Doba dozvuku (s)	2,41	2,45	2,51	2,46

9.2 Měření vlastních kmitů

Měření vlastních kmitů probíhalo pomocí programu Open Sound Meter, který je volně dostupný. Program umožňuje generovat sinusový signál s přesností na 1 Hz a pomocí komparace generovaného a naměřeného signálu určovat celou řadu parametrů včetně hlasitosti.

Měřicí aparatura

- Mikrofon DBX RTA-M
- Zvuková karta SSL 2+
- Počítač s programem Open Sound Meter
- Mikrofonní stojan K&M

Zdroj zvukového signálu

- Dva reproduktorové boxy d&b audiotechnik Q7
- Reproduktorový box d&b audiotechnik J-SUB
- Dva zesilovače d&b audiotechnik D12

Měření probíhalo vybuzením prostoru sinusovým signálem frekvence daného vlastního módu a následným měřením úrovně hlasitosti v násobcích čtvrtiny vlnové délky dané frekvence v příslušném směru. Zkoumána byla pouze oblast hlediště sálu. Zařízení nebylo zkalibrované, avšak při měření jde pouze o měření rozdílů v úrovni

hlasitosti mezi kmitnami a uzly jednotlivých vlastních kmitů. Kalibrace na přesnou úroveň hlasitosti tak není nutná.

Ve směru osy x (délka sálu) byly měřeny vlastní kmity čísel 5 až 10. Frekvence nižších kmitů jsou mimo reprodukovatelný rozsah aparatury a frekvence vyšších kmitů jsou již dostatečně blízko sebe. Ve směru osy y (šířka) a z (výška) byly měřeny kmity 2, 3 a 4. Vyšší kmity jsou již dostatečně vysoko nad kritickým kmitočtem.

9.2.1 Výsledky měření vlastních kmitů

Kromě detailního prohlédnutí výsledků byl z naměřených hodnot odečten rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší úrovní hlasitosti u každého vlastního kmitu. Rovněž byl pro každý kmit spočítán rozptyl z naměřených hodnot.

Tabulka 9.3: Naměřené hodnoty na vlastních kmitech ve směru osy x

Kmit č.	Frekvence (Hz)	Rozdíl (dB)	Rozptyl
5	36	27,7	74,6
6	43	11,9	17,6
7	50	14,8	13,7
8	57	15,7	14,2
9	64	26,2	40,3
10	72	18,7	24,9

Tabulka 9.4: Naměřené hodnoty na vlastních kmitech ve směru osy y

Kmit č.	Frekvence (Hz)	Rozdíl (dB)	Rozptyl
2	39	4,6	3,2
3	59	14,9	26,9
4	78	14,5	35,3

Z měření vyplývá, že v ose x se nejvýrazněji projevuje pátý vlastní kmit na frekvenci 36 Hz. Tato frekvence je však na hraně frekvenčního rozsahu PA aparátu a v hudebních signálech se takto nízké frekvence vyskytují pouze ojediněle. Tomuto módu tak není třeba věnovat hlavní část pozornosti. Ta by se spíše měla přesunout k 9., potažmo 10. kmitu (frekvence 64 a 72 Hz). Především 9. kmit měl velký propad (cca 20 dB) na šestém uzlu ve směru od zadní strany sálu, což vychází přesně do oblasti několika metrů před pódiem.

Tabulka 9.5: Naměřené hodnoty na vlastních kmitěch ve směru osy z

Kmit č.	Frekvence (Hz)	Rozdíl (dB)	Rozptyl
2	60	3,6	6,5
3	91	9,4	22,2
4	121	8	13,3

Ve směru osy y se nejvíce projevuje kmit č. 4 (78 Hz). Kmit č. 3 (59 Hz) hraje také nezanedbatelnou roli. Ve směru osy z nedochází k výraznějším nerovnostem. Nejhorší je zde frekvence 91 Hz.

Kapitola 10

Úprava modelu po měření

Při modelování sálu Garáže byly stěnám, stropu, podlaze a všem dalším objektům přiřazeny příslušné materiály. To znamená, že program EASE v tu chvíli ukazuje takovou dobu dozvuku, jakou by místnost měla bez jakýchkoliv akustických úprav.

Jak bylo zmiňováno, sál již nějaké úpravy má. Bylo tedy potřeba model upravit do takové podoby, aby parametry počítané programem odpovídaly naměřeným parametrům. Všem stěnám byl proto přiřazen materiál *heavy velour drapes*, tedy těžké sametové závěsy, které v místnosti jsou. Do modelu byla dále vrácena plocha promítacího plátna, z jejichž obou stran také visí tyto závěsy. Oběma stranám plátna byl proto taktéž přiřazen materiál *heavy velour drapes*.

Po této úpravě již doba dozvuku na středních až vysokých kmitočtech odpovídala naměřeným hodnotám, nicméně nízké frekvence dle modelu doznávaly výrazně déle, než bylo naměřeno. Tento rozdíl je zřejmě dán zanedbáním některých objektů, které se v místnosti nacházejí. Především se jedná o židle naskládané za závěsy v dveřních výklencích, věci naskládané pod pódiem a také věci naskládané v přední části místnosti za promítacím plátnem. To vše v reálné situaci ke snížení doby dozvuku na nízkých frekvencích přispívá. Řešením pro modelovou situaci bylo nahrazení betonové podlahy v modelu podlahou dřevěnou. Po této úpravě již počítaná doba dozvuku odpovídala té naměřené v celém frekvenčním rozsahu.

Do modelu byly umístěny dvě plochy hlediště¹ pro výpočet modulem AURA. Jedna odpovídající hledišti a druhá odpovídající ploše podia. Obě ve výšce 160 cm nad zemí, resp. pódiem.

¹tzv. audience area

Kapitola 11

Návrh akustických úprav

Z měření je evidentní, že akustické úpravy jsou potřeba především na nízkých frekvencích pod 300 Hz. Vhodným způsobem pro tlumení nízkých frekvencí je využití rezonančních obkladů, viz kapitola 5.

Akustický návrh má být vypracován tak, aby se dal realizovat. To v praxi znamená brát v potaz, kromě několika dalších aspektů, především ekonomickou stránku. V klubovém sálu je však nutné dodržet ještě požární předpisy, což znamená vyřazení jakýchkoliv hořlavých materiálů jako dřevo nebo plastové pěny.

Pro sál této velikosti je z ekonomického hlediska téměř nemožné využít komerčně dostupných rezonančních obkladů, jejichž cena se většinou pohybuje kolem 5 tisíc Kč za metr čtvereční (viz např. rezonátory firmy GIK Acoustics [22]). V návrhu proto bylo pracováno s obklady z perforovaných sádrokartonů, které fungují na principu Helmholtzových rezonátorů. Cena za tyto panely je výrazně nižší.

Při návrhu těchto rezonančních obkladů se vycházelo ze vztahu 5.2. Ve stropní části lze akustickými prvky vyplnit prostor mezi stropními nosníky, tedy je zde k dispozici pro výplň až 60 cm. U bočních stěn je pak nutné schovat veškeré akustické prvky za sametové závěsy, tedy zde je k dispozici pouze 10 až 15 cm. Při úvaze těchto možných tloušťek rezonátorů je ze vztahu evidentní, že potřebný podíl děrování ε se pohybuje kolem hodnoty 1 %. Komerčně dostupné perforované sádrokartony mají však nejnižší podíl děrování 8,7 %. Návrh tedy pracuje s „vlastnoruční“ perforací sádrokartonových desek na míru.

11.1 Návrh sádrokartonových rezonátorů

Pro stropní obklad lze využít hloubku až 60 cm. Od provozovatele Kasáren Karlín však zazněla prosba o co největší udržení současného vizuálního stavu sálu. V návrhu proto bylo pracováno pouze s hloubkou 25 cm, aby na stropě i po úpravě zůstaly

částečně viditelné stropní nosníky.

Na strop byly navrženy 3 rezonanční obklady, laděné na 60, 80 a 150 Hz. Jejich parametry jsou následující:

■ Rezonátor 60 Hz

- Hloubka $d = 25$ cm
- Průměr otvorů $h = 10$ mm
- Podíl děrování $\varepsilon = 1,1$ %
- Vzdálenost mezi jednotlivými otvory $a = 84,50$ mm

■ Rezonátor 80 Hz

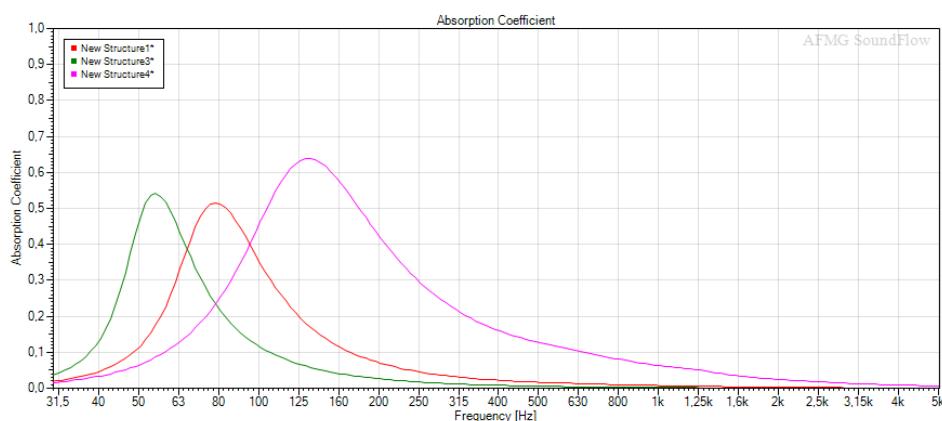
- Hloubka $d = 25$ cm
- Průměr otvorů $h = 10$ mm
- Podíl děrování $\varepsilon = 0,6$ %
- Vzdálenost mezi jednotlivými otvory $a = 114,41$ mm

■ Rezonátor 150 Hz

- Hloubka $d = 25$ cm
- Průměr otvorů $h = 8$ mm
- Podíl děrování $\varepsilon = 3$ %
- Vzdálenost mezi jednotlivými otvory $a = 40,93$ mm

Vzhledem k tomu, že ve směru osy z , tedy ve směru výšky sálu, není příliš potřeba řešit žádné konkrétní vlastní kmity, rozložení rezonančních kmitočtů bylo navrženo tak, aby byla co nejlépe pokryta oblast 45 - 250 Hz. Pro rozšíření frekvenční závislosti činitele pohltivosti je navrženo vložit 120 cm minerální vaty k zadní stěně.

Obklady byly po tomto výpočtu modelovány v programu SoundFlow od společnosti AFMG. Tento program umožňuje návrh akustických obkladů a výsledné frekvenční charakteristiky činitele pohltivosti umožňuje exportovat ve formátu .mat, který používá program EASE. Grafy výsledných činitelů pohltivosti jednotlivých rezonátorů jsou na obrázku 11.1.



Obrázek 11.1: Frekvenční závislost činitele pohltivosti α stropních obkladů

Ve směru osy x , tedy délky sálu byl obklad navrhován tak, aby co nejvíce ztlumil vlastní kmity na 64 a 72 Hz, které se měřením projeví jako nejdominantnější.

■ Rezonátor 64 Hz

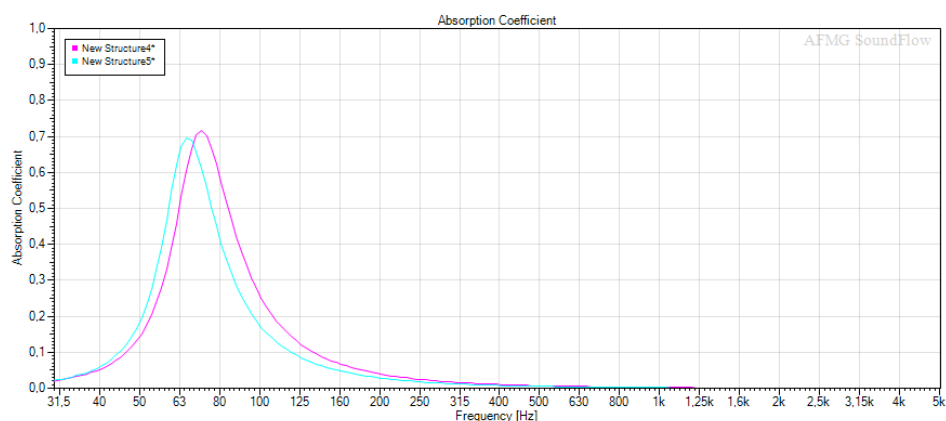
- Hloubka $d = 15$ cm
- Průměr otvorů $h = 10$ mm
- Podíl děrování $\varepsilon = 0,42$ %
- Vzdálenost mezi jednotlivými otvory $a = 136,75$ mm

■ Rezonátor 72 Hz

- Hloubka $d = 15$ cm
- Průměr otvorů $h = 10$ mm
- Podíl děrování $\varepsilon = 0,54$ %
- Vzdálenost mezi jednotlivými otvory $a = 105,92$ mm

Do vzduchové mezery bylo navrženo vložit 100 cm minerální vaty k zadní stěně. Grafy výsledných činitelů pohltivosti jsou na obrázku 11.2.

Ve směru osy y , tedy šířce, také nebylo záměrem tlumit konkrétní vlastní kmit. Navržen byl co nejširokopásmovější rezonátor s rezonanční frekvencí v 110 Hz.

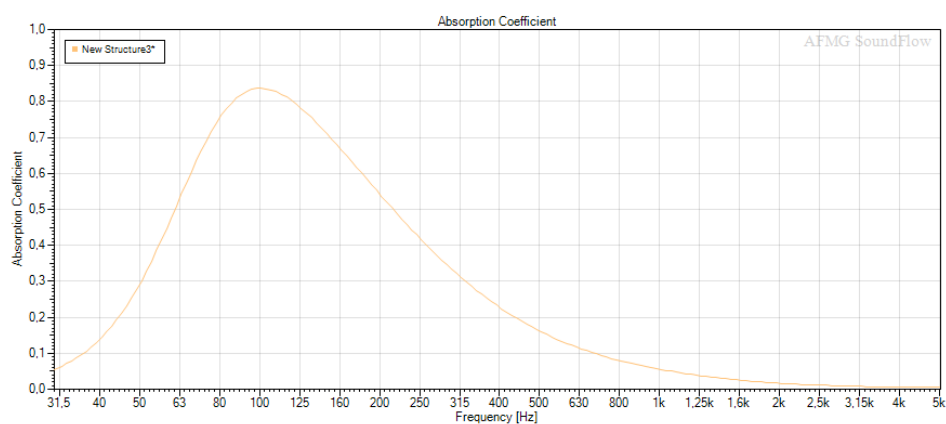


Obrázek 11.2: Frekvenční závislost činitele pohltivosti α obkladů ve směru osy x

Rezonátor 110 Hz

- Hloubka $d = 10$ cm
- Průměr otvorů $h = 10$ mm
- Podíl děrování $\varepsilon = 1,7$ %
- Vzdálenost mezi jednotlivými otvory $a = 96,12$ mm

Vzduchová mezera je zde celá vyplněna minerální vatou. Graf výsledného činitele pohltivosti je na obrázku 11.3.

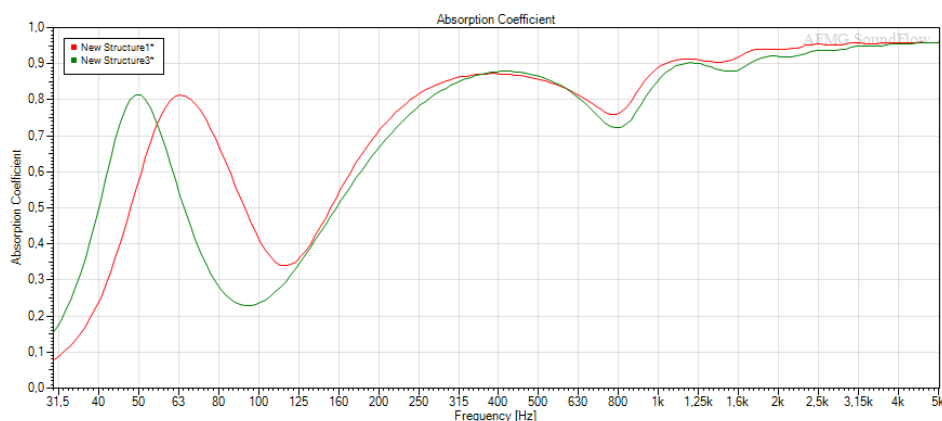


Obrázek 11.3: Frekvenční závislost činitele pohltivosti α obkladů ve směru osy y

11.2 Umístění obkladů

Stropní rezonátory byly umísťovány mezi stropní nosníky. V EASE modelu byly sníženy tyto stropní plochy o 26,25 cm¹ a jednotlivým plochám byly přiřazeny materiály příslušných obkladů.

Pro zatlumení odrazů ze stropu i na vysokých frekvencích v oblasti pódia a těsně před ním byly před rezonátory přidány vysokofrekvenční absorbéry. Použit byl pěnový obklad s hustotou 30 kg/m³. Tloušťka obkladu byla navržena na 5 cm se vzduchovou mezerou (tj svěšením) 10 cm pod rezonátory. Obklad tedy i po této úpravě zůstane lehce schovaný mezi stropními nosníky a zároveň bude při použití černých pěnových obkladů splněn i požadavek osvětlovače na černý strop nad pódium. Tato úprava byla provedena pro rezonátory laděné na 60 a 80 Hz. Výsledné činitele pohltivosti jsou na obrázku 11.4.



Obrázek 11.4: Frekvenční závislost činitele pohltivosti α stropních obkladů se zavěšenými pěnovými obklady

Z grafu je patrné, že dle simulačního programu Soundflow se předřazením porézních pohlcovačů snížil rezonanční kmitočet obou rezonátorů a zároveň se jejich účinnost poměrně výrazně zvýšila.

Jednotlivé obklady pak byly umístěny tak, aby u rohových částí místnosti byly absorbéry laděné na 80, potažmo 60 Hz. V oblasti nad a před pódium byly umísťovány střídavě absorbéry 80 Hz a 60 Hz se zavěšeným pěnovým obkladem. Do zbylých stropních průvlaků byly náhodně rozmístěny absorbéry všech tří frekvencí tak, aby výsledná křivka doby dozvuku byla co nejvyrovnanější. Obklady ve směru délky sálu byly rozmístěny tak, aby se v horizontálních pruzích po jedné délce sádkokartonu, tedy po 2 m, střídaly absorbéry laděné na 64 a 72 Hz. V zadní části sálu by měl být

¹25 cm vzduchová mezera + 1,25 cm tloušťka sádkokartonu

rezonátor umístěn za sametovým závěsem, který byl však v modelu pro tuto stěnu zanedbán. Ve směru šířky pak byly umístovány obklady na různé části stěny za sametové závěsy. Původně bylo záměrem použít na tuto stěnu co nejméně obkladů, resp. pouze takové množství, které bude nutné k dosažení požadované křivky doby dozvuku. Ukázalo se však, že k té se lze přiblížit pouze zatlumením celé stěny.

Je nutné zmínit, že program EASE neumí vrstvit akustické obklady. Každé ploše je možné přiřadit pouze jeden materiál. Realizace vrstvení se tedy musí simulovat již v programu Soundflow a výslednou strukturu je nutné jako celek převést do EASE. Program Soundflow ovšem nenabízí materiál, jehož činitel pohltivosti by odpovídal sametovým závěsům. Závěsy proto byly nahrazeny tenkou vrstvou flísového materiálu se vzduchovou mezerou. Tato kombinace odpovídala charakteristikám sametového závěsu nejlépe.

11.3 Sál po akustických úpravách

Charakteristiky po akustické úpravě jsou pouze teoretickými hodnotami vypočtenými programem EASE. Realizace akustických úprav se uskuteční až v létě roku 2024 a realizován bude návrh akustika Jana Jarchovského.

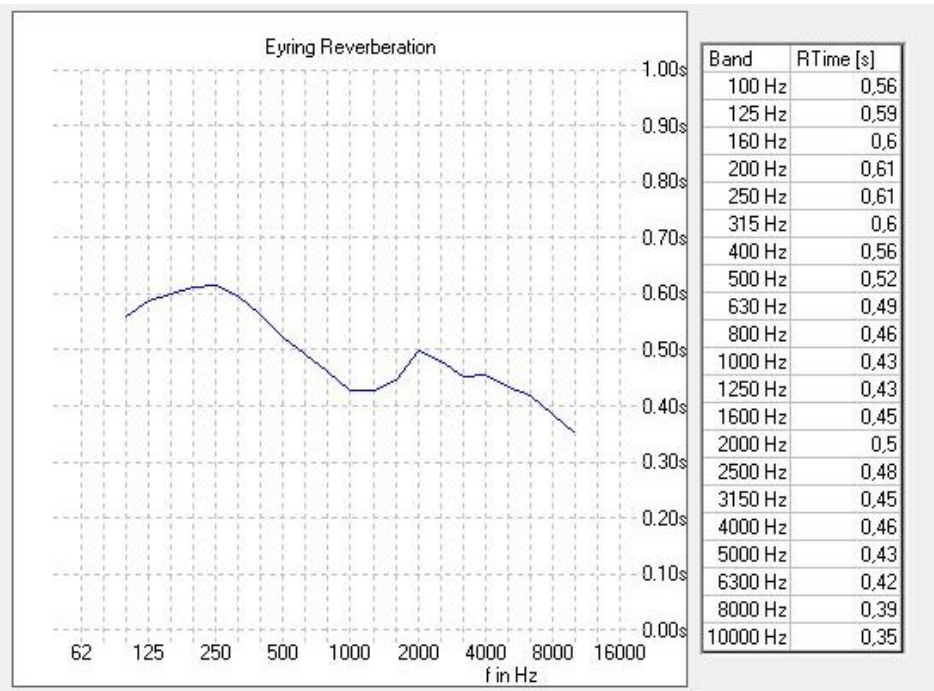
Výsledné doby dozvuku v třetinooktávových pásmech a příslušný graf závislosti doby dozvuku na frekvenci jsou na obrázku 11.5.

Z grafu a hodnot je zřejmé, že maximální Eyringova doba dozvuku je 0,61 s a to na frekvencích 200 a 250 Hz. Směrem k nižším frekvencím pak klesá na 0,56 s, směrem k vyšším dále pod hranici 0,5 s.

Toleranční pásmo je dle ČSN 73 0527, pro cílovou dobu dozvuku 0,5 s, interval 0,4 až 0,6 s s poklesem na frekvencích od 2000 Hz. Je tedy evidentní, že jediná frekvence, na které doba dozvuku přesahuje toleranční pásmo, je v pásmech 200 a 250 Hz. Přesah je pak pouze 0,01 s, to znamená zcela zanedbatelný.

Program EASE pracuje bohužel, stejně jako všechny dostupné simulační programy, pouze v třetinooktávových pásmech 100 Hz až 10 KHz. To znamená, že výsledky tlumení ve frekvenčním rozsahu pod pásmem 100 Hz, kde byla naměřená doba dozvuku nejdelší, není možné pomocí simulace ověřit. Nicméně na základě trendu křivky a množství použitých rezonančních obkladů pro tyto frekvence se dá usuzovat, že doba dozvuku bude i v této frekvenční oblasti uvnitř tolerančního pásma.

Akustická situace místnosti po úpravách byla ověřena i v modulu AURA, který má poskytovat přesnější výpočty a simulace. I zde je graf frekvenční závislosti doby dozvuku vyrovnaný, jak lze vidět na obrázku 11.6, avšak doba dozvuku je v celém spektru nepatrně vyšší, konkrétně dosahuje hodnoty 0,7 s.



Obrázek 11.5: Graf frekvenční závislosti doby dozvuku a příslušné hodnoty pro třetino-oktávová pásma po akustické úpravě



(c) EASE 4.4 / SketchUp garaze skp fiunal final

Obrázek 11.6: Graf frekvenční závislosti doby dozvuku z modulu AURA



Závěr

V této bakalářské práci jsem zpracoval základní teorii potřebnou k porozumění problematice prostorové akustiky. Byly rozebrány tři základní přístupy k prostorové akustice, objektivní parametry pro hodnocení kvality akustiky, měření v akustice a metody používané pro úpravu akustiky a pohlcování zvukové energie.

V praktické části byl rozebrán klubový sál kulturního komplexu Kasárna Karlín. Byl popsán průběh modelování místnosti pro simulaci v programu EASE a byly navrženy a popsány akustické úpravy, které byly poté v programu EASE simulovány.

Je nutné zmínit, že celý projekt probíhal pouze na úrovni softwarových simulací a není tak jednoduše možné ověřit, zdali by návrh vyhovoval i v praxi. Především charakteristiky navrhovaných rezonančních obkladů by bylo potřeba ověřit měření v dozvukové komoře.

Na základě výsledků simulací lze prohlásit, že cíle stanovené v úvodu práce byly splněny. Výsledná doba dozvuku je dle Eyringova výpočtu programem EASE v téměř celém frekvenčním rozsahu uvnitř tolerančního pásma se středem v hodnotě 0,5 s. Modul AURA, který poskytuje přesnější simulace, pak potvrzuje frekvenční vyrovnanost doby dozvuku, pouze vykazuje vyšší hodnoty v rozmezí kolem 0,7 s.



Literatura

1. KOLMER, Felix; KYNCL, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 2. nezm. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
2. AGA, [Aldebaran Group for Astrophysics]. *Zvuk – základní pojmy*. *Aldebaran* [online]. [B.r.] [cit. 2024-01-02]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/onlineskola/etapy/zvuk/>.
3. SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4452-2.
4. SMETANA, Ctirad. *Ozvučování*. 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987.
5. KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics*. Fifth edition. Abingdon: Spon Press, 2009. ISBN 0-203-87637-7.
6. NOVÁČEK, Filip. *Úprava akustiky učebny*. Praha, 2016. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/64698>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Libor HUSNÍK.
7. SCHIMMEL, Jiří. *Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření - přednáška* [online]. 2015. [cit. 2024-01-03]. Dostupné z: <https://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni>.
8. KAŇKA, Jan. *Stavební fyzika 1: akustika budov*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03664-8.
9. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Odraz zvuku, pohlcování zvuku*. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2023-12-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1182-dozvuk-doba-dozvuku>.

22. STUDIO D - AKUSTIKA S.R.O. *Webové stránky firmy Studio D - Akustika* [online]. 2024. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.akustickareseni.cz/produkty/basove-pasti/>.