

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky



Akustický model prostoru v software EASE

Bakalářská práce

Jan König

Bakalářský program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Praha

2020

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 dne:

.....

(podpis autora)

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **König** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **465923**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akustický model prostoru v software EASE

Název bakalářské práce anglicky:

Acoustic Model of a Space in EASE Software

Pokyny pro vypracování:

Namodelujte prostor sálu soukromého domu v obci Štěpanovice v programu EASE. Navrhněte akustické úpravy, aby se daný prostor dal využít jako společenská místnost. Tyto změny též namodelujte a diskutujte výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolmer, F., Kymnd, J.: Prostorová akustika, SNTL/Alfa, 1980
- [2] Kuttruff, H., Room Acoustics, Taylor Francis, 2001
- [3] EASE - manuál programu <http://ease.afmg.eu/>

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: **07.02.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Dr. Ing. Libor Husník
podpis vedoucího práce

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
podpis vedoucího 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 další pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jejích pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Dr. Ing. Liboru Husníkovi za podnětné komentáře, rady a ochotu, se kterou se mnou vždy komunikoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Bednářovi, Ph. D., díky kterému jsem mohl na této bakalářské práci pracovat vzdáleně i ve ztížených podmínkách.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá akustickou úpravou víceúčelového sálu v obci Štěpánovice v Jihomoravském kraji. Pro tento účel byla v práci zvolena metoda počítačové simulace. Jsou zde popsány základní postupy popisování akustiky prostorů. Následně jsou popsány parametry, které pomáhají objektivizovat akustické kvality prostoru. Tyto parametry byly následně nasimulovány při jednotlivých úpravách a jsou mezi sebou porovnávány. Výsledkem práce jsou navrhované akustické úpravy, které jsou vhodné pro zlepšení kvality celkového uměleckého dojmu z různých typů představení.

Klíčová slova: víceúčelový sál, EASE, prostorová akustika

Abstract

This bachelor thesis is dealing with acoustic treatment in multipurpose hall in the village Stepanovice in South Moravian region. For this purpose, the method of computer simulation is chosen in this work. There are several basic principles, which are usually applied to determine acoustics of rooms, that are covered here. Moreover, parameters, that are generally used to objectify acoustic qualities of the room, are described. These parameters are simulated for every suggestion on acoustic treatments in the Stepanovice hall. Results are compared with each other. This thesis concludes with the proposition of acoustic modifications, which are suitable for improving the quality of the overall artistic impression of various types of performances.

Key words: Multipurpose hall, EASE, room acoustics

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Zvuk.....	3
2.1	Šíření zvuku ve volném poli.....	3
2.2	Šíření zvuku v uzavřeném prostoru.....	4
3	Prostorová akustika	5
3.1	Vlnová akustika	5
3.2	Geometrická akustika.....	7
3.3	Statistická akustika	8
4	Objektivní parametry.....	11
4.1	EDT a EDT-RT ₆₀	11
4.2	Bass Ratio BR a High Frequency Ratio HRF	12
4.3	Clarity C_T	12
5	Akustické simulace.....	13
5.1	Program EASE.....	13
6	Aktuální stav modelovaného sálu.....	14
6.1	Modelování sálu	16
6.2	Doba dozvuku a výpočet vlastních módů	16
6.3	Nasimulované hodnoty objektivních parametrů	19
7	Akustické úpravy a jejich vliv na akustické parametry	20
8	Závěr	26
9	Citovaná literatura	28
10	Příloha A.....	30
11	Příloha B.....	31
12	Příloha C.....	32

Seznam obrázků

Obrázek 3.1: Vlastní módy místnosti	6
Obrázek 3.2: Ideální doba dozvuku sálů dle objemů a jejich účelů.....	9
Obrázek 3.3 Graf hladiny akustického tlaku v závislosti od zdroje	10
Obrázek 4.1: Typy poklesových křivek.....	11
Obrázek 6.1: Pohled shora.....	14
Obrázek 6.2: Umístění PA systému a obecnstva	15
Obrázek 6.3: Návrh místnosti v programu SketchUp	16
Obrázek 6.4: Pozice měřící aparatury	17
Obrázek 7.1: Místnost s rohovými basovými pastmi a) z vrchu b) uvnitř	21
Obrázek 7.2: Absorpční činitel basových pastí	21
Obrázek 7.3: Vyšetřování odrazů prvního řádu od stěn metodou Ray Tracing	22
Obrázek 7.4: Absorpční koeficient materiálu Acoustile v závislosti na frekvenci	23
Obrázek 7.5: Difuzor od firmy RPG	24
Obrázek 7.6: Navrhnutý difuzor a) samostatně a b) v sále.....	24
Obrázek 7.7: Paprsky a) před a b) po aplikaci difuzoru	25

1 Úvod

Sluch je jeden z pěti základních smyslů. Napomáhá k orientaci v prostoru, dorozumívání a umožňuje nám poslouchat přírodu a dění kolem nás. Využíváme ho nejen k přežití, ale také k estetickým vjemům.

V průběhu let, kdy se lidstvo vyvíjelo a vznikaly civilizace, rostl i zájem o kulturu. Součástí kultury je i divadlo či hudba, kdy se ve většině případů uplatňuje více (nebo alespoň v podobné míře) zvuk než obraz. Čím byla civilizace vyspělejší, tím více toužila po lepším prožitku z umění. Vznikaly nové hudební nástroje, větší hudební tělesa, komplexnější divadelní dramata etc. Rostl též zájem o místa či prostory, ve kterých by se toto umění dalo provozovat tak, aby z nich měl posluchač/divák kvalitní zážitek. Zájem o prostředí, ve kterém se performance odehrává, dal vzniknout novému vědnímu oboru akustice.

Vzestup audiotechnologií přišel až na začátku minulého století. Do té doby museli hudebníci a herci pracovat se zvukem pouze akusticky. Vymýšlely se různé mechanické technologie (například rezonanční nádoby), které pomáhaly šíření zvuku. Stará řecká divadla ukazují, jak brilantně si byli lidé schopni poradit. Herci mluvili bez mikrofonů a museli být slyšet i do zadních řad. První zmínky o šíření zvuku ve vzduchu pocházejí právě od řeckých filozofů. V té době už vznikají pojmy jako vlnění a šíření vln v prostoru.

Doba šla dopředu a s ní vznikaly novější a dokonalejší způsoby, jak daný zvuk zesilovat a napomáhat mu dostat se ke všem posluchačům rovnoměrně tak, aby byl srozumitelný. Stejně se zdokonaloval i způsob, jak dané prostory upravovat. Vznikl tak samostatný vědní obor prostorová akustika.

Prostorová akustika, jak již název napovídá, si klade za cíl zvukově přizpůsobit prostory pro specifické účely. Často se jedná o mluvené slovo, jako tomu bývá v přednáškových a konferenčních místnostech. Zároveň ale může jít například o hudební klub či koncertní síň, kde je hlavním prvkem hudba a její interpretace. Aby ovšem mohl prostor splňovat svůj účel, musí posluchači rozumět danému projevu.

Středně velký sál, který tato práce popisuje, má být primárně určen pro poslech hudby a tanec. Očekává se zde jak živá, tak i reprodukováná produkce. Nyní je místnost bez

jakékoli akustické úpravy a bez specifikací na konkrétní audio systém. Tato práce si klade za cíl nasimulovat akustické parametry a na základě nich navrhnout úpravy, které pomohou srozumitelnosti a příjemní poslech hudby.

Vybral jsem si toto téma, protože je mi hudba velmi blízká a myslím si, že prožitek z vybrané performance by měl být vždy co nejhodnotnější. Je proto tedy nezbytné upravit daný prostor tak, aby co nejlépe sloužil svému účelu.

2 Zvuk

Na zvuk se dá nahlížet dvěma pohledy. Z filozofického hlediska se lze ptát, kdy zvuk nabývá existence? Pokud je u zdroje přítomen někdo, kdo zvuk slyší, tedy se jedná o pocit nebo vnímání, či je zvuk stále přítomen i když ho nelze dokázat, což je čistě fyzikální předpoklad? Oba pohledy jsou validní, ale vzhledem k jejich povaze jsou rozděleny do různých oborů. Prvním případem, kdy zvuk působí na člověka a ovlivňuje tak jeho pocity skrz smyslové vnímání, se zabývá obor psychoakustika. Z čistě fyzikálního hlediska je zvuk mechanické vlnění média, které je stále přítomno i když není nikdo, kdo by ho slyšel. Oba tyto směry jsou navzájem provázané. Tato práce nicméně využívá výhradně fyzikálního popisu prostoru a nezabývá se vlivem zvuku na člověka. Zvukové vlnění interaguje s okolím a vznikají tak různá zvuková pole, která lze popisovat. Popisováním zvukových polí v uzavřených prostorech se zabývá obor prostorová akustika, jejíž nástroje jsou v této práci nejvíce využívány. Zvukový zdroj, kterému byla dodána energie, se chvěje a díky pružnému prostředí se toto chvění mění v mechanické vlnění. S tím vznikají i tzv. akustické částice. Tyto částice jsou shluky molekul, které kmitají ve fázi. Dochází tak ke zhušťování a zředování molekul v různých místech prostoru. To způsobuje v těchto místech změny tlaku. Tyto změny charakterizuje veličina nazývaná akustický tlak. Změny akustického tlaku vyvolávají i změny teplot. Díky vysoké rychlosti, se kterou se mění, se jedná o děje adiabatické [1]. Rychlost, kterou se zvuk šíří, se nazývá rychlost zvuku a v této práci bude označována jako c . Tato hodnota byla experimentálně změřena jako 343 ms^{-1} při 20 °C a suchém vzduchu. Jedná se o skalární veličinu. Důležitou veličinou je také akustická rychlost, která na rozdíl od rychlosti zvuku je veličina vektorová a její směr určuje směr šíření zvuku ve vzduchu. Tato veličina popisuje pohyb molekul. Ze vztahů mezi těmito veličinami lze odvodit obecnou vlnovou rovnici, kterou musí zvukové pole splňovat [1].

2.1 Šíření zvuku ve volném poli

Zvuk se šíří od bodového zdroje sféricky, pokud nenarazí na žádné hranice a za předpokladu, že je prostředí homogenní a izotropní. Je tedy důležité si uvědomit, že výkon zdroje zůstává stejný, ale plocha kulové vlnoplochy, která popisuje šíření zvukové energie, se zvětšuje. Z toho vyplývá, že intenzita zvuku musí klesat.

Akustická intenzita je definována jako

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (2.1)$$

kde P [W] je akustický výkon zdroje a r [m] je poloměr kulové vlnoplochy. Z této definice vidíme, že intenzita zvuku I [W/m²] klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje.

Z rovnice (2.1) můžeme vynásobením referenční hodnotou 10^{-12} , která je stejná pro akustický výkon [W] i akustickou intenzitu [W/m²], následným zlogaritmováním a vynásobením deseti, vyjádřit vztah [2]

$$L = L_p + 10 \lg\left(\frac{1}{4\pi r^2}\right), \quad (2.2)$$

ze kterého je zřejmé, že s dvojnásobnou vzdáleností klesá hladina akustické intenzity o 6 dB.

2.2 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

Na rozdíl od volného pole dochází v uzavřeném prostoru k odrazům a ohybům zvuku. Objevují se zde tedy jevy charakteristické pro jakýkoli typ vlnění. Výsledné zvukové pole je složeno ze dvou částí. Zvuku, který se k posluchači šíří přímo od zdroje. Tuto část lze popisovat rovnicemi z kapitoly 2.1. Druhou částí je pole odražených vln. Jedná se o prostor, kde převažuje zvuk, který se již odrazil od překážek a hraničních objektů. Lze na jednoduchém případu ukázat, jak stěny ovlivňují hladinu akustické intenzity (akustického tlaku) při různých polohách zdroje. Vydeme z rovnice

$$I = \frac{QP}{4\pi r^2}. \quad (2.3)$$

Je vidět, že rovnice (2.3) a rovnice (2.1) se liší pouze činitelem směrovosti, který se definuje jako

$$Q = \frac{I_{\max}}{P/4\pi r^2} = \frac{W_{\max}}{P/4\pi cr^2}, \quad (2.4)$$

kde P je výkon zdroje, I_{\max} je maximální intenzita. Tato definice se dá chápat jako poměr maximální intenzity v daném směru zdroje v poměru k intenzitě ve všech směrech [3]. Tedy pro všesměrový zdroj se rovná 1. Pokud bychom ovšem zdroj položili na zem, zvukové vlnoplochy by měly tvar polokoule ($Q = 2$). Činitel směrovosti bude v tomto případě záviset

na počtu ploch, ke kterým je zdroj postaven (pro dvě plochy $Q = 4$, pro tři plochy $Q = 8$) [4]. Pokud rovnici (2.2) upravíme na tvar

$$L = L_p + 10 \lg(Q) - 10 \lg(4\pi) - 20 \lg(r), \quad (2.5)$$

Ize pozorovat, že pro jednu plochu se hladina akustické intenzity (akustického tlaku) zvýší o 3 dB a s každou další plochou opět o 3 dB. Pokud by bylo hranic více, činitel směrovosti se bude nadále zvyšovat, jak je tomu u zvukových vlnovodů. Nicméně žádné z ploch nesmějí být rovnoběžné.

Pokud jsou minimálně dvě stěny rovnoběžné, zvuk se od nich odráží a nelze již aplikovat rovnici (2.5). Jestliže je prostor obemknutý stěnami, lze v něm najít oblasti, kde převládá zvuk odražený. Tato oblast se nazývá dozvukové pole. Toto pole je charakterizováno dobou dozvuku a dalšími parametry, kterým je věnována kapitola 3.3.

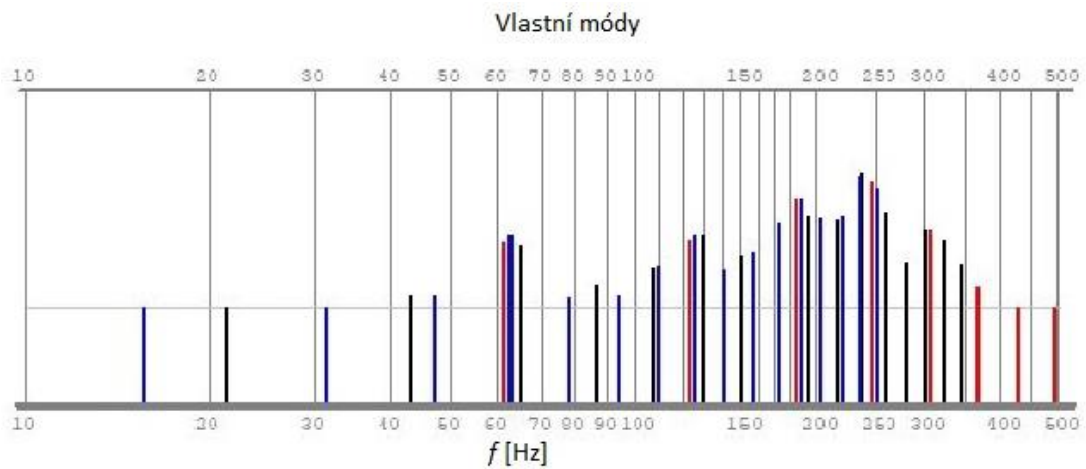
3 Prostorová akustika

Šíření zvuku v uzavřeném prostoru je věnován celý podobor akustiky, který se nazývá prostorová akustika. Jejím cílem je popis zvukových polí v různých uzavřených prostorech. Ať už se jedná o malá divadla či kluby, nebo o velké koncertní sály. Nástroje prostorové akustiky jsou hojně využívány pro úpravy těchto prostorů tak, aby posluchači a diváci měli co nejlepší zážitek z daného představení. Z hlediska relativně širokého slyšitelného frekvenčního spektra je nutné pro různé frekvenční rozsahy řešit zvuková pole různými přístupy.

3.1 Vlnová akustika

Toto řešení šíření zvuku v uzavřeném prostoru se využívá pro výpočet vlastních frekvencí v prostoru. Jedná se o vlny, jejichž vlnová délka (přesněji řečeno minimálně její polovina a její celočíselné násobky) je srovnatelná s rozměry místnosti. Jedná se zpravidla o vlny s dlouhou vlnovou délkou. V této frekvenční oblasti vzniká v prostoru stojaté vlnění. Pokud bychom metodu využívali k výpočtu celkového modelu prostoru, bylo by to nejspokojivější řešení. Nicméně narážíme zde na problém náročnosti výpočtů a také na komplikované popisování okrajových podmínek, které jsou v reálné místnosti tvořeny i nábytkem a různými nepravidelnostmi [3]. Proto se tato metoda využívá výhradně pro oblast nízkých

kmitočtů, kde jsou od sebe jednotlivé módy místnosti relativně daleko od sebe (viz obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Vlastní módy místnosti¹

Spodní frekvence oblasti vlastních módů se určí z rozměrů místnosti, dle rovnice

$$f = \frac{c}{2l_a}, \quad (3.1)$$

kde l_a je největší rozměr místnosti. Horní hranice frekvenční oblasti, ve které využíváme vlnovou teorii k charakterizování zvukového pole v uzavřeném prostoru určuje tzv. Schroederova frekvence. Ta se vypočítá dle rovnice

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}, \quad (3.2)$$

kde RT_{60} je doba dozvuku a V je objem prostoru [3].

V této oblasti určené spodní frekvencí z rovnice (3.1) a horní frekvencí vypočtenou rovnicí (3.2) se zajímáme zejména o stojaté vlnění a vlastní kmity. Tyto kmity mají také velký význam pro přechodně se vyskytující jevy [1].

¹ Na obrázku lze vidět zhušťování módů směrem k vyšším frekvencím. Výška jednotlivých čar závisí na vzdálenosti nejbližších módů kolem nich (tj. čím větší hustota módů, tím delší čára). Obrázek byl vygenerován v programu RealTraps ModeCalc.

Vlastní kmity se počítají z rovnice

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_a}{l_a}\right)^2 + \left(\frac{n_b}{l_b}\right)^2 + \left(\frac{n_c}{l_c}\right)^2}, \quad (3.3)$$

kde c je rychlost zvuku, $n_{a,b,c} = 0, 1, 2, 3, \dots$, a $l_{a,b,c}$ jsou rozměry místnosti. Rovnice (3.3) je řešením vlnové rovnice pro prostor s rovnoběžnými stěnami [1]. Důležitým předpokladem je tuhost stěn, díky kterému lze rovnici (3.3) odvodit.

3.2 Geometrická akustika

Vlnová teorie je velmi náročná na výpočet a pokud bychom chtěli tímto způsobem vyšetřovat celé slyšitelné spektrum, museli bychom pracovat s velkým množstvím dat. Navíc v kapitole 3.1 bereme v potaz pouze triviální pravoúhlé prostory. V praxi je většina prostorů nepravidelná a počítání základních módů prostoru je výrazně náročnější. Je tedy nanejvýš praktické si vyšetřování prostoru určitým způsobem zjednodušit. Při nárazu zvukové vlny na překážku nastává ke dvěma jevům: odrazu a ohybu [1]. Zjednodušení geometrické akustiky spočívá v předpokladu, že k ohybu zvukové vlny nedochází. Jinými slovy předpokládá, že vlnová délka je mnohem menší než rozměry překážky. Z toho vyplývá, že toto zjednodušení se týká pouze vln o vyšších frekvencích. Dalším předpokladem geometrické akustiky je, že šířící se zvukové vlny jsou nekoherentní. Nebereme tedy v potaz fázové změny vlnění.

Z předpokladů, že nedochází k ohybu vlny a fázovým změnám, vychází základní zjednodušení – nahrazení sférické vlny zvukovým paprskem [3]. Paprskem je zde myšlena čára, která má směr normály kulové plochy, která se šíří přímo od zdroje. Při dopadu paprsku na odrazivou plochu se úhel dopadu rovná úhlu odrazu, přičemž oba paprsky se nacházejí ve stejné rovině – rovině dopadu. Geometrickou akustikou lze vyšetřit směr šíření zvuku po odrazu od různých tvarů povrchu. Lze například snadno ukázat chování vln při odrazu od vypuklých a vydutých stěn. Tento postup se často využívá v simulačních softwarech.

3.3 Statistická akustika

V této teorii se na rozdíl od vlnové teorie nevyšetřují akustické veličiny jako funkce polohy a času, ale vyšetřují se jejich průměrné hodnoty. Aby bylo možno tyto průměrné hodnoty nalézt, musí opět dojít k určitému zjednodušení na základě následujících předpokladů (převzato z [1]):

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

Všechny předpoklady jsou navzájem provázány a platí pro takzvané difuzní pole, které je základem statistické akustiky. Je to pole, ve kterém převládají paprsky odražené a paprsky, které dorazí do uvažovaného bodu přímo od zdroje se neuvažují.

Na obrázku 3.3 vidíme průběh hladiny akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Vidíme, že pro pole přímých vln² je typický pokles o 6 dB na dvojnásobnou vzdálenost³. Na obrázku je rovněž veličina r_d , která označuje dozvukovou vzdálenost (viz kapitola 3.3.2).

3.3.1 Doba dozvuku

Dobu dozvuku poprvé definoval Wallace C. Sabine, ve své knize *Collected Papers of Acoustics* v roce 1922. Sabine nejprve definuje dozvuk jako proces, při kterém se zvuk odráží od stěn, stropu a země a při každém odrazu ztrácí energii až do úplného utichnutí [5]. Doba, za kterou hladina akustického tlaku zvuku poklesne o 60 dB, je nazývána dobou dozvuku [1]. Jedná se o jednu ze základních veličin statistické akustiky a prostorové akustiky obecně. Dobu dozvuku lze odvodit z rovnice (3.6) [6] a lze zapsat jako

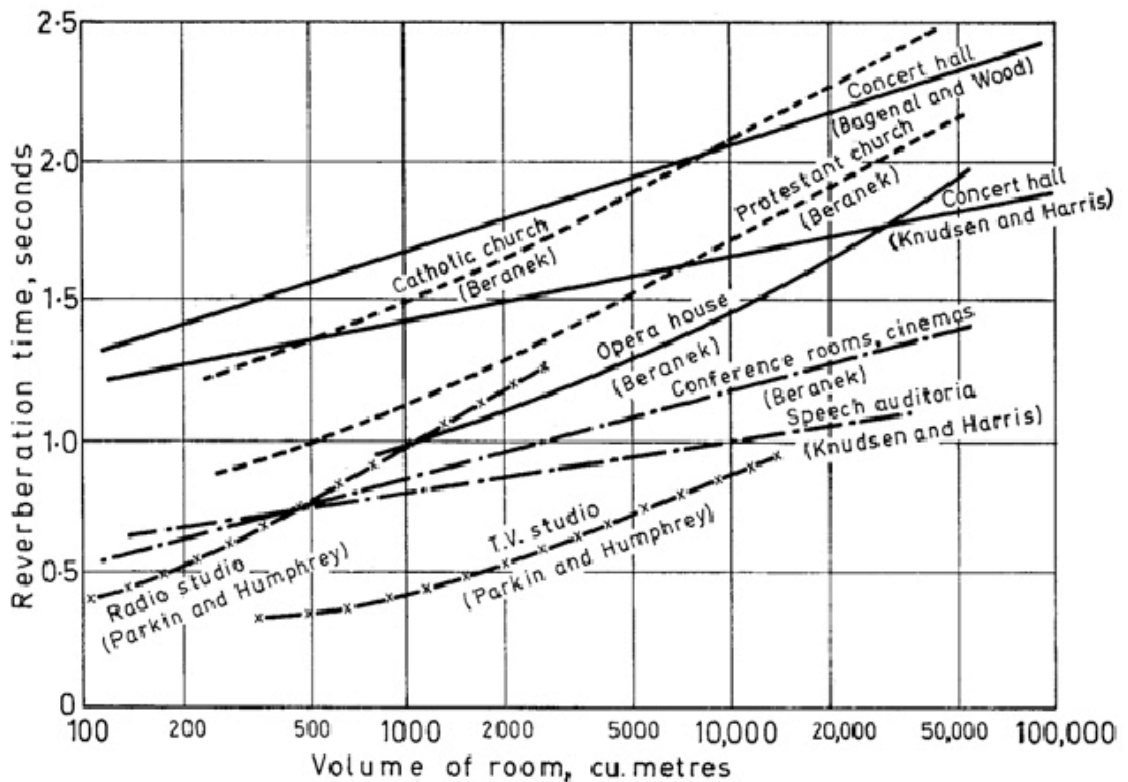
$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{\alpha S}. \quad (3.4)$$

² na obrázku jako volné pole

³ na grafu je pokles lineární, protože x-ová osa je v logaritmickém měřítku

Hodnota 0,161 plyne z odvození W. S. Franklinem (1863–1930). Experimentální cestou byla tato hodnota určena jako 0,164 W.C. Sabinem (1868–1919) a v této práci se tedy pracuje s touto hodnotu [6].

Doba dozvuku je jedním ze základních kritérií pro hodnocení kvality zvuku v dané místnosti. Pro různé účely a objemy sálů je ideální jiná doba dozvuku (viz obrázek 3.2).



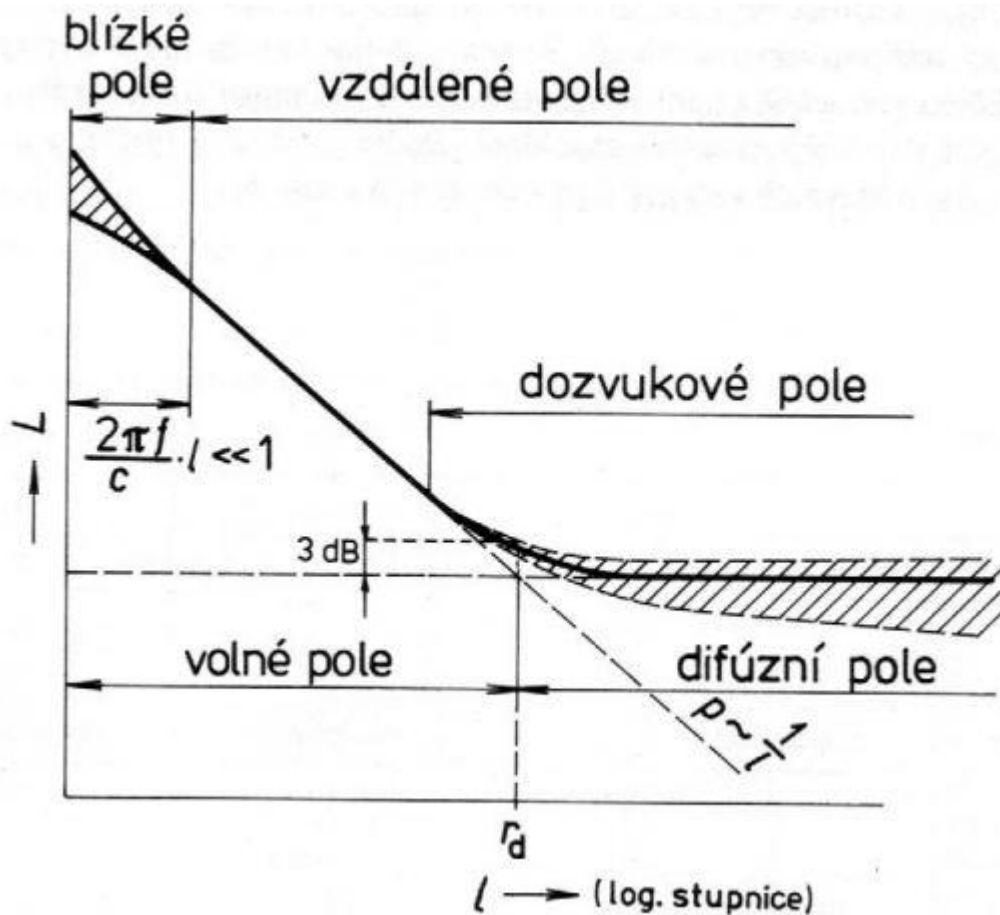
Obrázek 3.2: Ideální doba dozvuku sálů dle objemů a jejich účelů (Zdroj [7])

3.3.2 Dozvuková vzdálenost

Určuje rozhraní v prostoru, kde oblasti přímých vln přechází v oblasti odražených vln. V této vzdálenosti se tedy rovnají hustoty energie v ustáleném stavu a hustoty energie přímého pole [1]. Obrázek 3.3 ukazuje průběh hladiny akustické energie v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Dozvukovou vzdálenost lze spočítat jako [8]

$$r_d = 0,057 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}}, \quad (3.5)$$

kde V je objem místnosti, RT_{60} je doba dozvuku a Q je činitel směrovosti zdroje.



Obrázek 3.3 Graf hladiny akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje
Převzato z [9]

Z předpokladů je patrné, že veličinou, se kterou statistická akustika pracuje, je hustota zvukové energie, která se dá vyjádřit vztahem [10]

$$w = w_0 e^{-(c\alpha S/4V)t}, \quad (3.6)$$

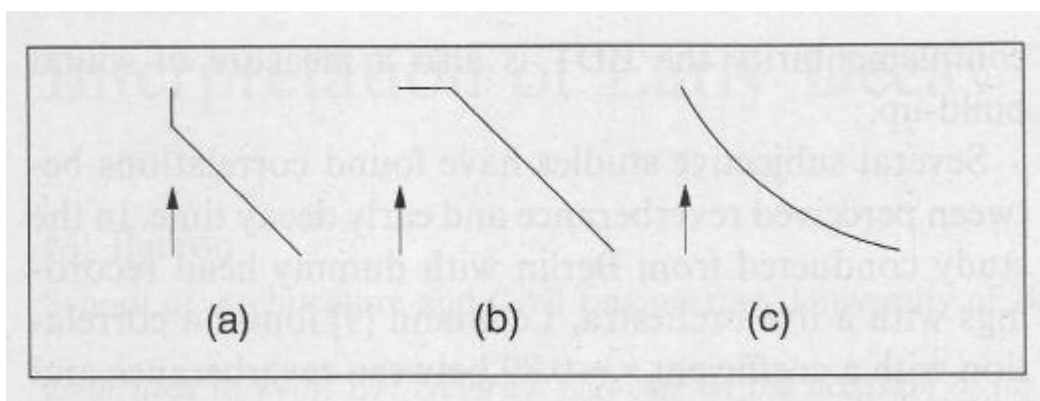
kde S je celková plocha obepínající místnost, α je činitel zvukové pohltivosti, V je objem místnosti a $w_0 = 4P/c\alpha S$. Rovnice (3.6) platí po vypnutí zdroje v čase $t = 0$ s.

4 Objektivní parametry

Nástroje prostorové akustiky jsou důležité pro popis zvukového pole v daném prostoru. Neříkají nám ovšem jak daný prostor upravit, aby se v něm například lépe poslouchala hudba, či v něm bylo rozumět mluvenému slovu. Tato práce je na akustikovi. Aby se akustik mohl efektivně a alespoň částečně objektivně rozhodovat, jsou zapotřebí parametry, které mu to umožní. Zde je popis tří nejvíce využívaných parametrů.

4.1 EDT a $EDT-RT_{60}$

Early decay time (dále jen EDT) je akustický parametr, který popisuje charakter raného poklesu zvukové energie. Její hodnotou je čas, za který poklesne zvuková energie o 10 dB a následně je tato doba vynásobená 6. Kvůli nerovnoměrnosti poklesu zvuku se hodnota EDT může velmi lišit od doby dozvuku RT_{60} .



Obrázek 4.1: Typy poklesových křivek
(převzato z [11])

Na obrázku 4.1 vidíme tři typy poklesů. Zleva se jedná o Cliff-type (lavinový pokles), Plateau-type (plochý typ) a sagging decay. První typ je způsobený větší mírou přímých paprsků nebo brzkých odrazů [11]. Zde bude EDT mnohem kratší než doba dozvuku. Pokud se v prostoru neuskuteční žádné brzké odrazy (nebo pouze ve velmi malém množství), vzniká plochý typ poklesové křivky, který vidíme na obrázku 4.1b) [11]. Třetí typ, kterému bylo přiřazeno označení sagging type [12], se může vyskytovat v prostorech, jejichž podlaha má velmi velký činitel zvukové pohltivosti [11]. Ukazuje se, že kratší EDT v porovnání s RT_{60} se vyznačuje vyšší srozumitelností řeči, ale pro interpretování hudby to není ideální, jelikož bude zvuk více tlumený („mrtvý“). Pokud je tomu naopak, je srozumitelnost zhoršená. Ideální poměry jsou ($EDT-RT_{60}$): pro

divadla má být EDT mezi $0,60RT_{60}$ a $0,75RT_{60}$, operní sály by EDT měly mít mezi $0,75RT_{60}$ a RT_{60} a pro koncertní sály je ideální EDT mezi $0,9RT_{60}$ a RT_{60} [13].

4.2 Bass Ratio BR a High Frequency Ratio HRF

Jedná se o parametr, který říká, jak velké doznívání v nízkých pásmech je oproti doznívání v pásmech vyšších. Počítá se z rovnice [14]

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{2000} + RT_{4000}}, \quad (4.1)$$

kde indexy značí dané třetinooktávové pásmo. Hodnoty BR by měly být mezi 1,1 až 1,45 pro sály s RT_{60} nižší než 1,8 s [15]. BR by nikdy nemělo být nižší než 1 [14]. V tom případě by byl dozvuk vyšších frekvencí delší než nižších frekvencí.

Princip výpočtu HFR je totožný s BR, ovšem místo pásem 125 Hz a 250 Hz se dosadí doba dozvuku pásem 500 Hz a 1000 Hz.

4.3 Clarity C_T

Tento parametr spadá do energetických parametrů, neboť pracuje s energetickým poměrem signálu. Definice parametru je

$$C_T = 10 \log \frac{\int_0^T h^2(t) dt}{\int_T^\infty h^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_T}{E_\infty - E_T}, \quad (4.2)$$

kde T je námi zvolený čas. Jde o poměr zvukové energie, která do daného místa přijde do času T vůči energii, která do místa přijde po tomto čase. Čím větší je parametr C_T tím větší je jasnost zvuku [14]. Jinými slovy tím je počáteční zvuková energie větší v porovnání se zvukovou energií, která dorazí později. Pro měření se používá několik časových úseků. Pokud zvolíme časový úsek 7 ms, vyšetřujeme převážně sílu zvuku zdroje (v EASE software nazýváno D/R ratio). Časové úseky 50 ms a 80 ms se využívají pro srozumitelnost řeči a hudby v tomto pořadí [16]. C_{50} se nazývá míra zřetelnosti. Mírou jasnosti je potom nazýván parametr C_{80} . Tyto parametry jsou v této práci nejvíce využívány.

5 Akustické simulace

Na trhu se v tuto chvíli vyskytuje velké množství simulačních softwarů od různých firem. Příkladem mohou být Soundvision od L'Acoustics, zabývající se převážně navrhováním PA⁴ systémů pro velké koncerty (mají omezenou databázi reproduktorů pouze na své produkty), Fohhn Software (nevyžaduje instalaci, přístupný přes prohlížeč), Odeon (společnost ODEON A/S v rámci Dánské technické univerzity) a EASE (společnost AFMG). Poslední dva programy jsou k dispozici pro studenty v rámci ČVUT. Programy jsou si velmi podobné. Odeon se obecně považuje za software pro popisování akustických vlastností prostoru, kdežto EASE je lepší pro popis konkrétních komerčních produktů zasazených do sálů (má rozsáhlejší databázi konkrétních produktů).

5.1 Program EASE

Program EASE (stejně jako Odeon) pracuje na principech geometrické akustiky. Tedy sleduje zvukové paprsky a jejich interakci s okolím [17]. Z toho vyplývá, že program není spolehlivý na frekvencích, které jsou v okolí Schroederovy frekvence a níž.

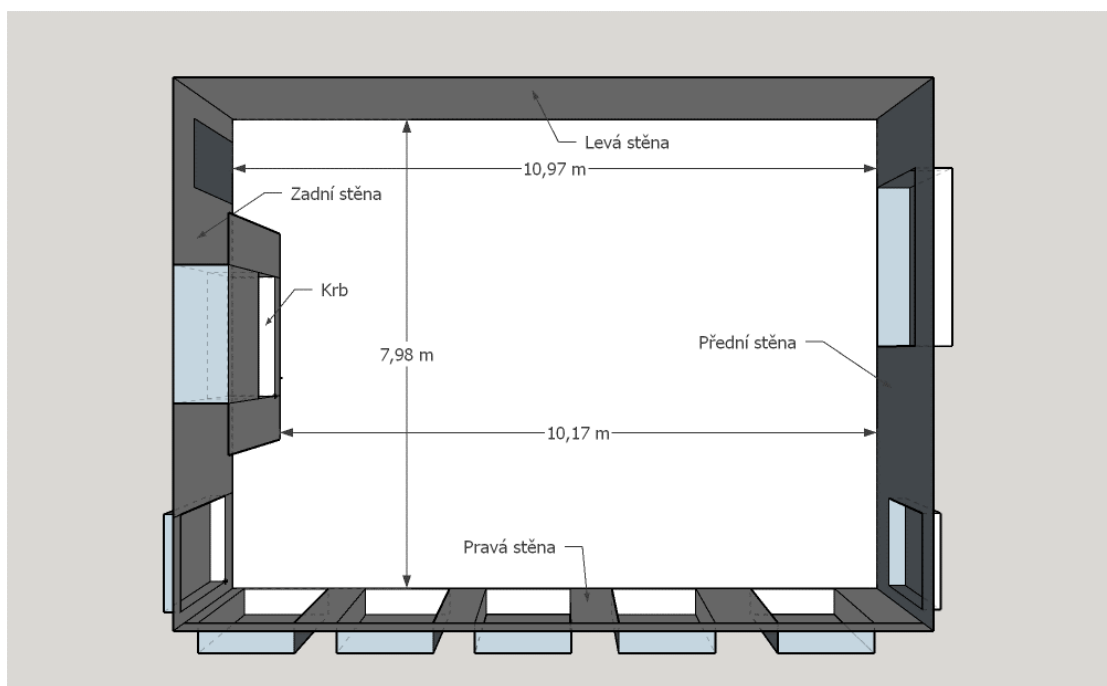
Program využívá dvou metod. První je metoda Monte Carlo. Základem této metody je použití stochastických přístupů (náhody) k určení konkrétních hodnot problému, který může mít deterministický charakter [18]. Druhou metodou je zrcadlení zdrojů, která využívá procesů deterministických. Tato metoda je přesnější a v nižších řádech je i rychlejší. Nicméně s rostoucím řádem odrazů a počtem ploch se radikálně zpomaluje [17].

Software umí počítat velkou škálu akustických parametrů a nabízí velkou databázi konkrétních akustických prvků a reproduktorových soustav s možností navržení vlastních. Pro veškeré simulace v této práci byl využit modul AURA, který je schopný přesnějších simulací.

⁴ Public Address system

6 Aktuální stav modelovaného sálu

Sál se nachází v obci Štěpánovice. Leží na soukromém pozemku a v budoucnu bude využíván jako multifunkční společenská místnost v rámci penzionu. Celý prostor je z velké části kvádrový (viz obrázek 6.3 a obrázek 6.1) a má objem 256 m³.

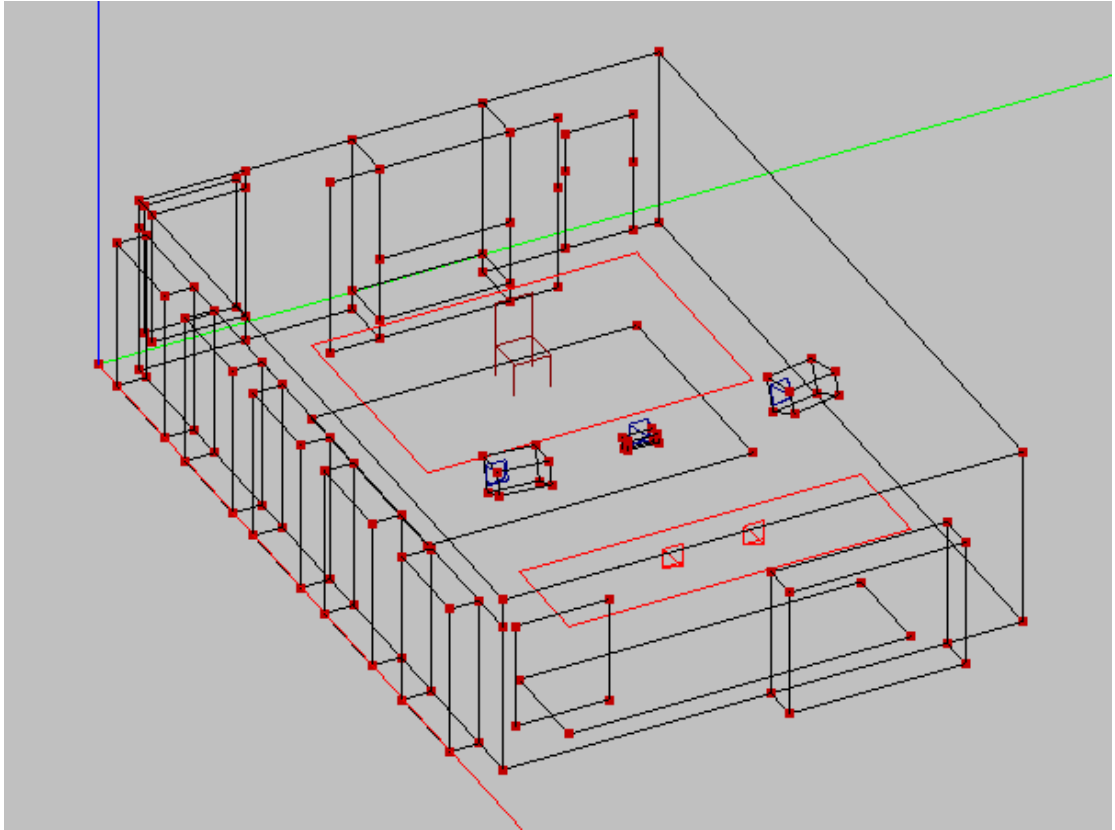


Obrázek 6.1: Pohled shora

Menší nepravidelnost zde tvoří krb, který je u zadní stěny a výklenky oken na pravé straně. Místnost se v tuto chvíli nevyužívá a nenachází se zde ani napevno instalovaný PA systém. Akustické úpravy v sále nejsou žádné. Na přední, levou a zadní stěnu byl použit sádkokarton, který překrývá vrstvu minerální vaty tlustou cca 12 cm. Na pravé stěně se střídají zděné sloupy se skleněnými dveřmi. Podlahu tvoří dřevěné parkety a strop je taktéž obložen dřevem. Krb v zadní části je zděný. Prostor z pohledu jeviště je na obrázku 6.3. Celková představa spočívá v umístění PA systému na strop a v umístění obecnstva do prostoru před krb (viz obrázek 6.2). Prostor by měl také vykazovat dobrou srozumitelnost, pokud by se zde hrálo například divadlo, či zde byla přednáška.

Jako ideální reproduktory byly vybrány dva hlavní reproduktory model CQ-1 od firmy Meyer a jeden menší středový reproduktor pro doplnění, pokud by bylo potřeba. Ten je též značky Meyer model UPM-1. Pro simulování hodnot C_{50} a vlastností mluveného slova byly

vybrány předpřipravené modely mužského a ženského hlasu, které byly umístěny do výšky 175 cm na jeviště.



Obrázek 6.2: Umístění PA systému a obecnstva

6.1 Modelování sálu

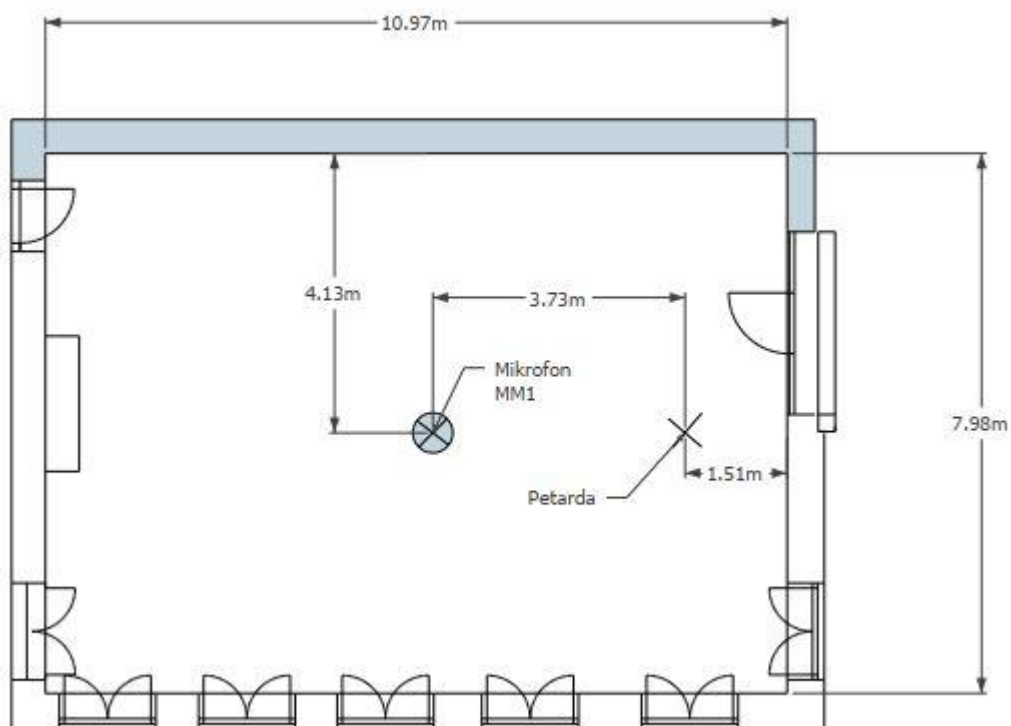
EASE nenabízí kvalitní 3-D modelovací rozhraní, takže pro návrh místnosti byl využit program SketchUp (viz obrázek 6.3). Při dodržení postupu, který je popsán v [19], lze naimportovat 3D model místnosti do programu EASE.



Obrázek 6.3: Návrh místnosti v programu SketchUp

6.2 Doba dozvuku a výpočet vlastních módů

Měření doby dozvuku probíhalo vystřelením petardy, která nahrazovala akustický Diracův impulz a následném zachycení signálu mikrofonom Beyerdynamic MM1, který byl zvukovou kartou Focusrite 2i2 zpracován a nahrán do počítače. Pozice polohy mikrofону a petardy jsou na obrázku 6.4. Frekvenční a směrová charakteristika mikrofónu z datasheetu je v příloze A. Následně byl zvuk pomocí skriptu napsaném v programu Matlab (příloha B) vyšetřen na základě Shroederovy integrační metody měření doby dozvuku.



Obrázek 6.4: Pozice měřící aparatury

Frekvence [Hz]	Naměřené hodnoty [s]	Nasimulované hodnoty [s]
200	1,20	1,02
250	1,56	1,11
315	1,69	1,27
400	1,46	1,29
500	1,68	1,34
630	1,54	1,36
800	1,48	1,46
1000	1,43	1,53
1250	1,40	1,53
1600	1,41	1,52
2000	1,39	1,5
2500	1,31	1,45
3150	1,26	1,38
4000	1,20	1,28
5000	1,08	1,17
6300	0,92	1,02
8000	0,78	0,85
10000	0,65	0,67

Tabulka 1: Naměřené a nasimulované hodnoty doby dozvuku RT_{60}

Naměřené a nasimulované hodnoty sálu jsou v tabulce 1. Dle této tabulky byly vybírány materiály v simulaci tak, aby rozdíl mezi naměřenými a nasimulovanými hodnotami RT_{60}

byly co nejmenší a zároveň, aby materiály v simulaci byly podobné reálným. Na vyšších kmitočtech se podařilo snížit rozdíl pod jednu desetinu. Byly vybírány materiály z výchozí nabídky programu EASE. Pro větší přesnost by musely být materiály samostatně modelovány, což není obsahem této bakalářské práce.

Pro tuto místnost by (dle obrázku 3.2) měla být doba dozvuku kolem 0,7 až 0,8 s. Upravovaly se hodnoty, které vycházejí ze simulace.

Vlastní kmitočty sálu byly počítány dle rovnice (3.3) v prostředí MS Excel. Výsledné módy jsou v tabulce 2.

Mód	f [Hz]
1,0,0	16
2,0,0	31
3,0,0	47
4,0,0	63
5,0,0	78
6,0,0	94
7,0,0	109
8,0,0	125
9,0,0	141

a) módy na délku

Mód	f [Hz]
0,1,0	21
0,2,0	43
0,3,0	64
0,4,0	86
0,5,0	107
0,6,0	129

b) módy na šířku

Mód	f [Hz]
0,0,1	61
0,0,2	123

c) módy na výšku

Tabulka 2: Vlastní módy sálu

Módy se uvažovaly pouze axiální, protože jsou nejsilnější [20] a pro další módy náročnost výpočtů roste. Přesného určení nejsilnějších módu se dosahuje zejména měřením.

6.3 Nasimulované hodnoty objektivních parametrů

Hodnoty parametrů EDT, RT_{60} a EDT- RT_{60} poměru jsou v tabulce 3.

f [Hz]	EDT [s]	RT_{60} [s]	EDT- RT_{60}
200	1,14	1,02	1,12
250	1,27	1,11	1,14
315	1,50	1,27	1,18
400	1,55	1,29	1,20
500	1,62	1,34	1,21
630	1,66	1,36	1,22
800	1,78	1,46	1,22
1000	1,87	1,53	1,22
1250	1,87	1,53	1,22
1600	1,85	1,52	1,22
2000	1,86	1,5	1,24
2500	1,77	1,45	1,22
3150	1,66	1,38	1,20
4000	1,55	1,28	1,21
5000	1,38	1,17	1,18
6300	1,20	1,02	1,18
8000	0,97	0,85	1,14
10000	0,76	0,67	1,13

Tabulka 3: Hodnoty EDT, RT_{60} a jejich poměru

Dle [11] se větší poměry vyskytují velmi zřídka a většinou znamenají buď nízkou úroveň zvuku přímého nebo vysokou úroveň zvuku, který se odrazí.

Dále byly simulovány parametry C_{50} a C_{80} , které jsou popsány v kapitole 4.3. Jejich interpretace a doporučení podle [21] jsou následující:

- Všechny hodnoty C_{50} nad 0 dB znamenají dobrou srozumitelnost.
- V sále bude nejčastěji interpretována jazzová, cimbálová a rocková muzika, takže hodnoty C_{80} by se měly pohybovat mezi 4 až 6 dB.

Hodnoty těchto parametrů jsou v tabulce 4.

f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]
200	-0,64	2,73
250	-1,12	2,13
315	-2,09	1,1
400	-2,31	0,98
500	-2,57	0,69
630	-2,69	0,74
800	-3,11	0,44
1000	-3,48	0,18
1250	-3,19	0,27
1600	-2,97	0,23
2000	-2,56	0,33
2500	-2,43	0,78
3150	-2,3	1,1
4000	-1,78	1,57
5000	-1,03	2,27
6300	0,02	3,24
8000	1,45	4,99
10000	3,02	7,08

Tabulka 4: Aktuální hodnoty parametrů C_{50} a C_{80}

Vzhledem k rozměrům poslechové plochy jsou všechny parametry uváděny zprůměrované přes tuto plochu. Nicméně v sále bylo patrné zhoršování srozumitelnosti řeči (C_{50}) a jasnosti hudby (C_{80}) při pohybu od pravé stěny k levé.

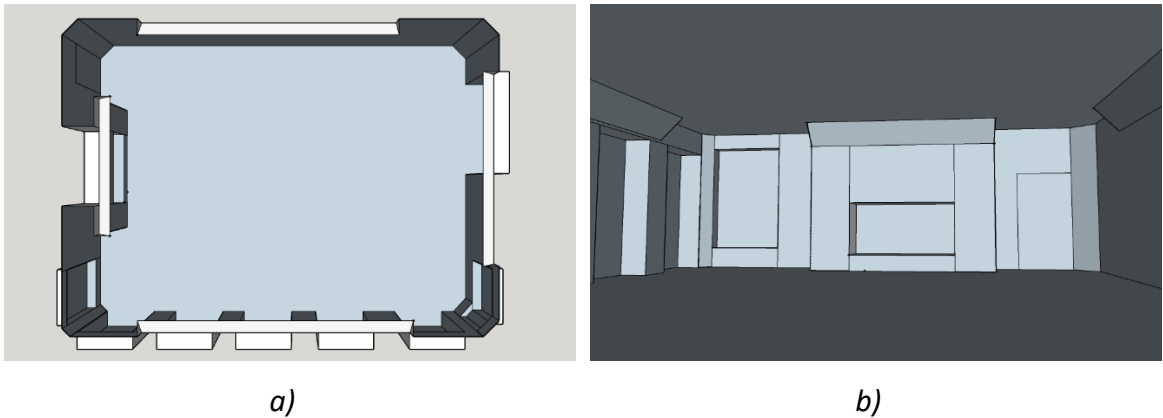
7 Akustické úpravy a jejich vliv na akustické parametry

Ze všech nasimulovaných a naměřených hodnot je patrné, že v sále je prostor pro akustické úpravy. Vzhledem k víceúčelovosti sálu musely být zvoleny určité kompromisy, protože to, co je dobré pro hudbu, není vždy dobré pro mluvené slovo a naopak. Při úpravě srozumitelnosti je většinou snaha o „umrtvení“ prostoru, aby v něm nevznikaly žádné dozvuky. U hudby jsou dozvuky žádoucí, jelikož vytvářejí pocit její mohutnosti a plnosti. Avšak toto vnímání je velmi subjektivní. V této kapitole jsou popsány jednotlivé úpravy a jejich teoretický záměr.

První úpravou⁵, která byla simulována, jsou rohové basové pasti. Tato úprava byla zvolena, protože v menších prostorech (a v prostorech pravoúhlých) bývá větší problém

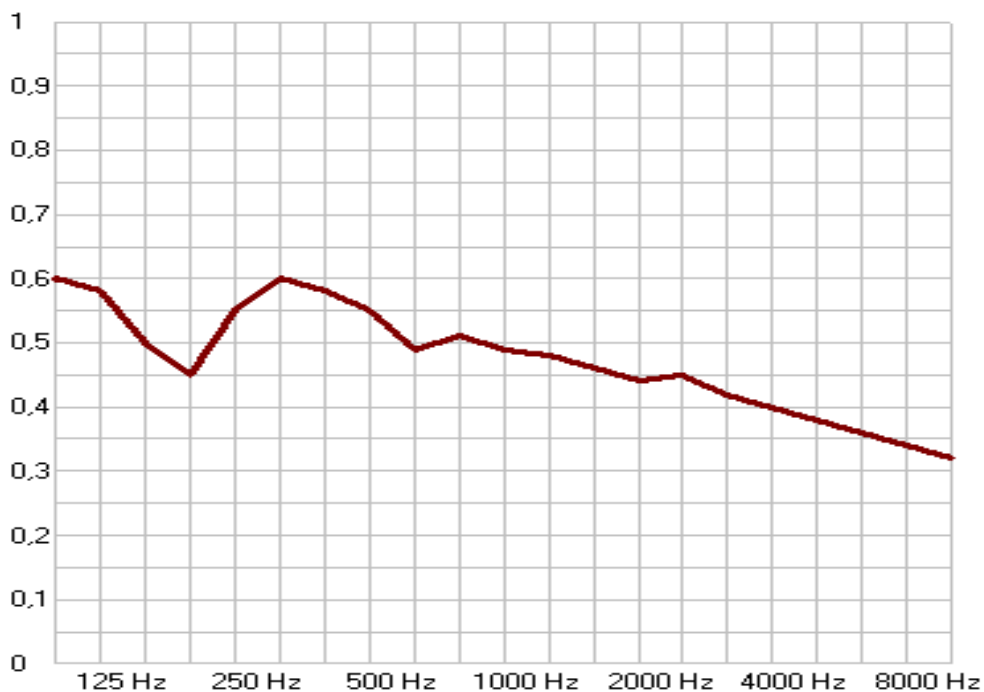
⁵ V tabulce 5 a příloze C jako 1. úprava

s nižšími frekvencemi a bude zde zapotřebí vyřešit rezonance bez zásahu do stavby. Rohové basové pasti jsou v tomto případě rozmístěny podle obrázku 7.1.



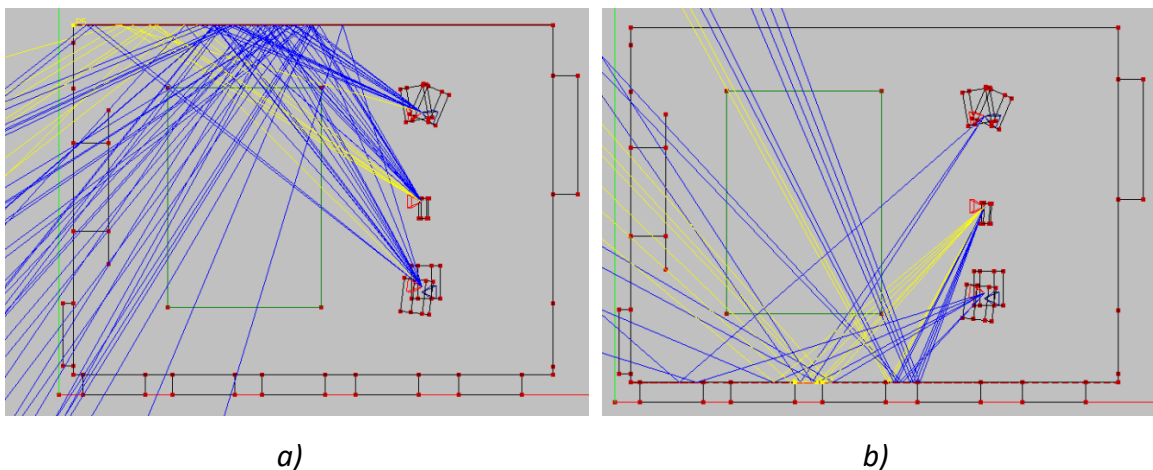
Obrázek 7.1: Místnost s rohovými basovými pastmi a) z vrchu b) uvnitř

Touto úpravou vzroste celková plocha absorpčních prvků a měla by se tedy snížit doba dozvuku a v oblasti nízkých frekvencích by měl klesat akustický tlak. Snížením doby dozvuku, se úměrně zvýší faktory C_{50} a C_{80} . Materiál, ze kterého jsou basové pasti, byl nasimulován na základě dat z datasheetu reálných basových pastí společnosti Pyrotek. Jeho absorpční činitel v závislosti na frekvenci je na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Absorpční činitel basových pastí

Druhou úpravou⁶ je umístění absorberů do míst prvních odrazů zvuku od reproduktorů do publika. Tyto odrazy mají za následek zkreslování zvuku vlivem hřebenového filtru. Místa prvních odrazů se našla pomocí metody RayTracing, která je vidět na obrázku 7.3. V kombinaci s pohledem na zadní stěnu lze přesně najít místa, kam by bylo vhodné umístit pohltivé prvky tak, aby tyto první odrazy zachytily.



Obrázek 7.3: Vyšetřování odrazů prvního řádu od stěn metodou Ray Tracing

Od této úpravy se také očekává mírné snížení doby dozvuku, jelikož také zvyšuje plochu absorpčních materiálů, ovšem výrazněji by se měl zkrátit parametr EDT, a tedy poměr $EDT-RT_{60}$ by měl být menší než 1. Z obrázku 7.3 b) lze vidět, že se absorbery budou umísťovat pouze na dva prostřední zděné sloupy. Bylo by možné umístit závěs na střed pravé stěny, nicméně tato úprava není žádoucí. Zde byl jako absorber využit výchozí materiál Acoustile z knihovny EASE. Jedná se o obecný porézní materiál s nižší hustotou. Jeho absorpční koeficient v závislosti na frekvenci je ukázán na obrázku 7.4. Je vidět, že tento materiál má nejvyšší absorpční koeficient kolem frekvence 1000 Hz. Tato frekvence byla oblastí nejvíce problematickou při simulaci. V dalších úpravách je jako absorber zvolen stejný akustický materiál.

⁶ V tabulce 5 a příloze C jako 2. úprava



Obrázek 7.4: Absorpční koeficient materiálu Acoustile v závislosti na frekvenci

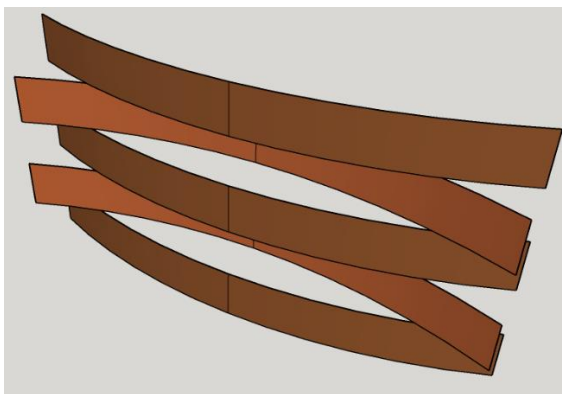
Třetí úpravou⁷ je umístění difuzoru nad prostor krbu. Tato úprava si klade za cíl rozptýlení přímých paprsků z reproduktorů. Zároveň difuzory mohou být vnímány i jako příjemný designový prvek v místnosti. EASE nabízí řadu výrobců akustických prvků a konkrétně byl vyzkoušen akustický prvek omnifusor od evropské firmy RPG (viz obrázek 7.5).

⁷ V tabulce 5 jako 3. úprava



Obrázek 7.5: Difuzor od firmy RPG

Bohužel v programu EASE není simulace difuzorů průkazná. Při simulaci metody RayTracing nedochází k žádným změnám. Byla navržena tedy náhradní varianta, a to difuzor složený kombinací konvexních a konkávních dřevěných ploch, který je na obrázcích 7.6 a) a b). (inspirováno z [22])



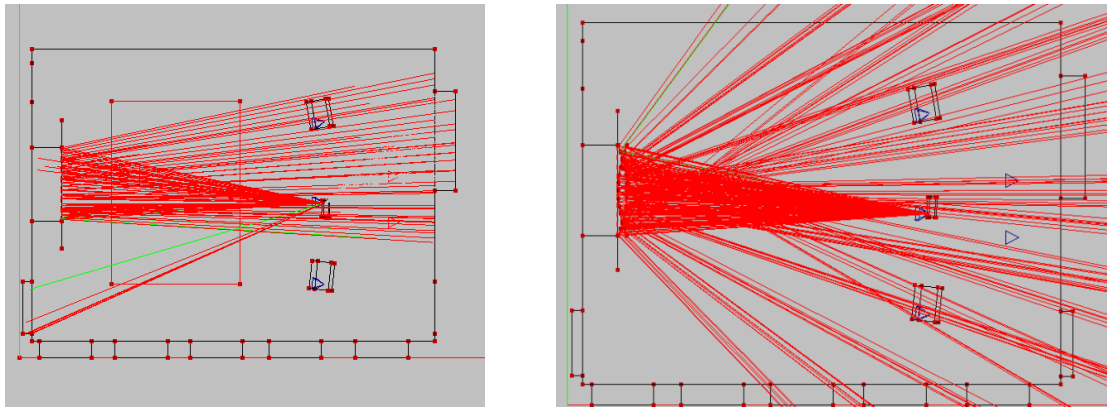
a)



b)

Obrázek 7.6: Navrhnutý difuzor a) samostatně a b) v sále

Na obrázku 7.7 a) a b) lze pozorovat výrazné změny v rozprostření paprsků z prostředního reproduktoru. Tento difuzor pomůže vytvořit difuzní pole. V ideálním případě tento prvek nezkrátí dobu dozvuku.



a) b)
Obrázek 7.7: Paprsky a) před a b) po aplikaci difuzoru

Na předchozí úpravu lze navázat možností tento difuzor zastínit, či ho upravit tak, aby při mluveném slovu byla zadní stěna (tedy křbová stěna) utlumená. Pro mluvené slovo (nebo hlasitou rockovou hudbu) je žádoucí, aby celá místnost byla tzv. mrtvá. Toho lze docílit několika způsoby. Například postavením dvou absorpčních desek před difuzor, či vymyslet difuzor tak, aby se dal zakrýt nebo měnil svoje vlastnosti. Například srovnání pružných desek do roviny a jejich následné otočení kolem vodorovné osy na stranu, kde by byl absorpční povrch. Stejně tak pro lepší akustiku lze využít absorber na přední straně (za jevištěm). Tyto úpravy byly již simulovány v celku se všemi předchozími změnami⁸. Zároveň byla nasimulovaná situace se všemi prvky a difuzorem vzadu. V tomto případě byl zvolen difuzor RPG, jelikož importování navrženého difuzoru bylo velmi obtížné.⁹ Tato úprava je primárně zamýšlena pro poslech hudby.

V tabulce 5 je příklad testovaných objektivních parametrů při frekvence $f = 500$ Hz.

Úpravy	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT [s]	$EDT-RT$
Aktuální stav	-2,57	0,69	1,62	1,34	1,21
1. úprava	-0,73	3,05	1,17	1,17	1,00
2. úprava	-1,83	1,60	1,44	1,20	1,20
3. úprava	-1,66	2,01	1,35	1,12	1,21
1. konečná varianta	0,37	4,33	0,92	0,94	0,98
2. konečná varianta	0,10	3,98	1,02	1,03	0,99

Tabulka 5: Příklad objektivních parametrů úprav při $f = 500$ Hz

Výčet všech hodnot je v tabulkách v příloze C.

⁸ V tabulce 5 jako 1. konečná varianta

⁹ V tabulce 5 jako 2. konečná varianta

8 Závěr

V této práci byl namodelován multifunkční sál na soukromém pozemku v oblasti Štěpánovice. Byla změřena doba dozvuku, podle které byl následně naimportovaný model v prostředí EASE kalibrován tak, aby co nejlépe odpovídal reálné situaci. Dále bylo vybráno umístění vhodné reproduktorové soustavy.

Následně byly v programu nasimulovány parametry C_{50} , C_{80} , EDT a RT_{60} . Na základě zadání byly navrženy úpravy, které tyto parametry zlepšují a tím zlepšují akustiku celého sálu. Zásadním problémem prostoru byla dlouhá doba dozvuku a tím i zhoršené podmínky pro poslech hudby a srozumitelnost mluveného slova.

Všechny úpravy byly simulovány zvlášť a následně byla provedena simulace celkového stavu. Z dat v příloze C je patrné, že největší změnou byla 1. úprava, a to přidání rohových basových pastí, které byly modelovány na základě dat z datasheetu reálných basových pastí. Účinnost těchto pastí je větší při frekvencích, které se nachází pod Schroederovou frekvencí a nelze je tedy simulovat. Jejich přítomnost se ovšem předpokládá a je s nimi tedy počítáno. Spolu s absorberý po stranách a difuzorem vzadu jsou tyto úpravy převážně pro poslech hudby. Jak z dat vyplývá, parametr C_{80} se skutečně dostal ze záporných hodnot až k hodnotám kolem 5 dB, což je podle [21] vhodná hodnota pro přednes jazzové a jemnější hudby. Nebylo možné simulovat situaci, kdy jsou přítomny všechny prvky spolu se zadním difuzorem, protože import navrženého difuzoru byl velmi obtížný, nicméně předpokládají se vlastnosti, které byly nasimulovány samostatně a pro výpočet koeficientů byl zvolen náhradní model reálného difuzoru od firmy RPG.

Poslední úpravou bylo nahrazení difuzoru absorpčním prvkem. Tato změna si kladla za cíl zlepšení mluveného slova díky většímu utlumení prostoru. Vylepšila parametr C_{50} , ale parametr C_{80} také vzrostl a díky tomu je vhodná nejen pro poslech, ale i pro hlasitější populární hudbu (nikoli však pro hudbu tišší).

Dále bylo pozorováno zhoršování parametrů od pravé stěny k levé. To je pravděpodobně způsobeno rozdílným členěním stěn. Tento problém se nepodařilo vyřešit. Nicméně snížení rozdílu bylo mírně dosaženo navrženým difuzorem.

Ani jednou úpravou se nepodařilo dosáhnout doby dozvuku mezi 0,7-0,8 s, nicméně tento parametr byl radikálně zlepšen. Stejně tak se snížil parametr EDT. V konečných variantách lze pozorovat, že se poměr EDT-RT₆₀ blíží jedné. Z toho vyplývá, že se doba dozvuku linearizuje. Tento jev nebyl objasněn.

Dalším postupem by mělo být řádné změření nasimulovaných návrhů, které se zakládají čistě na výpočtech. Také by bylo vhodné změření vlastních kmitočtů a případné umístění rezonančních útlumových prvků, které zabrání vysokému akustickému tlaku v kmitnách stojatých vln.

9 Citovaná literatura

1. **F. Kolmer, J. Kyncl.** *Prostorová akustika*. Praha : ALFA, 1980.
2. **Kaňka, J.** Šíření zvuku ve volném prostoru – volné zvukové pole. *TZB-Info*. [Online] Topinfo s.r.o. <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/222-sireni-zvuku-ve-volnem-prostoru-volne-zvukove-pole>.
3. **Kuttruff, Heinrich.** *Room Acoustics*. New York : Taylor & Francis e-Library, 2000.
4. **Howard, David M. a Angus, Jamie.** *Acoustics and Psychoacoustics*. Oxford : Elsevier, 2006.
5. **Sabine, W. C.** *Collected Papers on Acoustics*. Cambridge : Harvard University, 1922.
6. **Beyer, Robert T.** *Sounds of Our Times: Two Hundred Years of Acoustics*. Providence : Springer-Verlag New York, Inc., 1999. 0-387-98435-6.
7. **Harris, C.** *Handbook of Noise Control*. New York : McGraw Hill, 1997.
8. **Mijić, M. a Mašović, D.** Reverberation Radius in Real Rooms. *Telfor Journal*. 2010, Sv. 2, 2.
9. **Skupina akustiky.** http://acoust.feld.cvut.cz/files/uak_files/uloha5.pdf. *Skupina Akustiky, Katedra Fyzika, ČVUT*. [Online]
10. **Jiříček, O.** *Úvod do akustiky*. Praha : ČVUT, 2002.
11. **Barron, Mike.** Interpretation of Early Decay Times in Concert Auditoria. *Acta Acustica united with Acustica*. 1995, Vol. 81.
12. **Cremer, L., Müller, H. A. a Schultz, T. J.** Principles and applications of room acoustics,. *Applied Science*. 1982, Sv. 1.
13. **Santiago, Francisco.** *Portuguese Theatres and Concert Halls Acoustics*. Barcelona : autor neznámý, 2007.
14. **Vondrášek, Martin a Antek, Michael, ml.** Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů. [Online] <http://poseidon2.feld.cvut.cz/AES/schuze2004/vondrasek.pdf>.

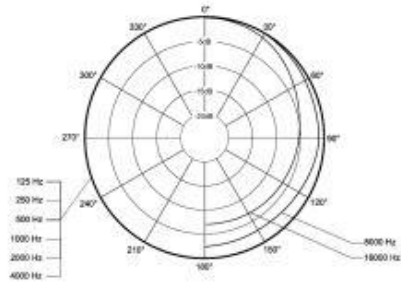
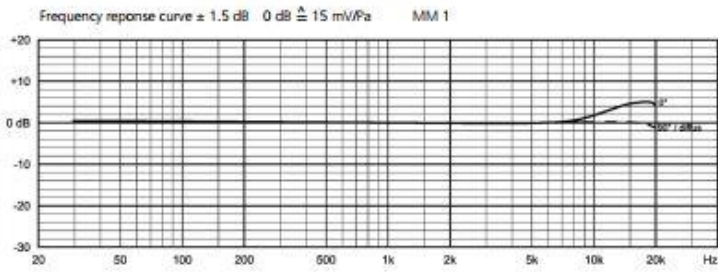
15. **Group, Nebraska Acoustics.** Warmth and Brilliance. *concerthalls.org*. [Online] 2020.
http://www.concerthalls.org/?page_id=90.
16. **Pereira, Ricardo.** *Acoustic characterization of rooms*. Lisboa : Departamento de Física do Instituto Superior Técnico.
17. **AFMG.** Calculations for in-depth reflection analysis – Stochastic and Deterministic Ray Tracing methods. *EASE.afmg.eu*. [Online] AFMG. <https://ease.afmg.eu/index.php/in-depth-reflection-analysis.html>.
18. *Why the Monte Carlo method is so important today.* **Kroese, Dirk P., a další, a další.** místo neznámé : WIREs Comput Stat, 2014, Sv. Vol. 6.
19. **AFMG.** How do I create a new EASE 4.x Project from a Sketchup model? *EASE*. [Online] AFMG, 2020.
20. What Are Room Modes. *GIK Acoustics*. [Online] GIK Acoustics, 2020.
<https://www.gikacoustics.com/what-are-room-modes/>.
21. **Renkus-Heinz, Inc.** EASE manual. *AFMG Support*. [Online] October 2009.
http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASE/EASE_4.3_Tutorial_English.pdf.
22. **Nováček, Filip.** *Akustika orchestřišť*. Praha : autor neznámý, 2019.
23. **Vér, István L. a Beránek, Leo L.** *Noise and Vibration Control Engineering*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2006.

10 Příloha A

MM 1

FREQUENCY RESPONSE & POLAR PATTERN

This polar pattern and frequency response curve (measuring tolerance ± 1.5 dB) correspond to a typical production sample for this microphone. Each microphone is supplied with an individual 0° frequency response curve. Measured data can be requested via the following link: www.beyerdynamic.com/mm1-register



11 Příloha B

```
clear;clc;
%filename into audioread
[y,Fs] = audioread(filename);
if (size(y,2)>1)
    y(:,2:end)=[];
end
%casovy vektor pro signal
time=1/Fs:1/Fs:(size(y,1)/Fs);
time=time';

%nacteni pasem 1/3 oktavoveho filtru
bands=dlmread('oneThirdBands.csv');
bands(:,4)=[];

%vytvoreni prazdne matice p (pressure)
p=nan(size(y,1),34);
n=1;
%% 1/3 oktavovy filtr

while (bands(n,3)<=Fs/2)
    p(:,n)=bandpass(y,bands(n,[1 3]),Fs);
    n=n+1
    if(n==size(bands,1))
        break;
    end
end
%p_sq (pressure squared)
p_sq=p.^2;
% Filtrovany signál je uložen po sloupcich, kazdy sloupec je pasmo.

%% Schroederova metoda
clear Rev_time;clear Rev_time_flip;clear time_final;clear Final_Rev_time_matrix;
res=50;%rozliseni vypoctu doby dozvuku zavisí na vstupnim signalu
% casovy vektor pro vypocet doby dozvuku
time_final=nan(round(size(time,1)/res),1);
t=size(p,1);
o=1;

while (t>=res)
    time_final(o)=time(t);
    t=t-res;
    o=o+1;
end
time_final(o)=[];
time_final=flipud(time_final);

%Samotny vypocet
m=1;
while (m<=n-1)
    t=size(p,1);
    o=1;
    while (t>=res)
        Rev_time(o,m)=20*log10(sum(p_sq(t:end,m)));
        t=t-res;
        o=o+1;
    end
    m=m+1
end
% Rev_time je doba dozvuku jednotlivych frekvencnich pasem.
Rev_time=flipud(Rev_time);
```


12 Příloha C

Aktuální stav					
f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT_{60} [s]	EDT-RT
200	-0,64	2,73	1,14	1,02	1,12
250	-1,12	2,13	1,27	1,11	1,14
315	-2,09	1,1	1,50	1,27	1,18
400	-2,31	0,98	1,55	1,29	1,20
500	-2,57	0,69	1,62	1,34	1,21
630	-2,69	0,74	1,66	1,36	1,22
800	-3,11	0,44	1,78	1,46	1,22
1000	-3,48	0,18	1,87	1,53	1,22
1250	-3,19	0,27	1,87	1,53	1,22
1600	-2,97	0,23	1,85	1,52	1,22
2000	-2,56	0,33	1,86	1,5	1,24
2500	-2,43	0,78	1,77	1,45	1,22
3150	-2,3	1,1	1,66	1,38	1,20
4000	-1,78	1,57	1,55	1,28	1,21
5000	-1,03	2,27	1,38	1,17	1,18
6300	0,02	3,24	1,20	1,02	1,18
8000	1,45	4,99	0,97	0,85	1,14
10000	3,02	7,08	0,76	0,67	1,13

1. úprava					
f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT_{60} [s]	EDT-RT
200	0,23	3,54	1,02	1,00	1,02
250	0,06	3,61	1,03	1,03	1,00
315	-0,23	3,32	1,10	1,10	1,00
400	-0,50	3,18	1,14	1,12	1,02
500	-0,73	3,05	1,17	1,17	1,00
630	-0,92	3,21	1,19	1,18	1,01
800	-0,87	3,17	1,20	1,18	1,02
1000	-0,88	3,30	1,21	1,18	1,03
1250	-0,42	3,67	1,17	1,14	1,03
1600	-0,14	3,66	1,16	1,11	1,05
2000	0,33	3,79	1,15	1,08	1,06
2500	0,37	4,34	1,07	1,05	1,02
3150	0,73	4,76	1,05	1,02	1,03
4000	0,88	5,22	1,00	0,98	1,02
5000	1,80	5,55	0,97	0,92	1,05
6300	2,47	6,59	0,85	0,84	1,01
8000	3,49	7,86	0,73	0,74	0,99
10000	4,82	9,56	0,60	0,63	0,95

2. úprava					
f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT ₆₀ [s]	EDT-RT
200	-0,20	3,13	1,08	0,96	1,13
250	-0,69	2,69	1,16	1,03	1,13
315	-1,40	1,93	1,33	1,16	1,15
400	-1,48	1,85	1,36	1,17	1,16
500	-1,83	1,60	1,44	1,20	1,20
630	-1,81	1,74	1,44	1,20	1,20
800	-2,12	1,57	1,49	1,25	1,19
1000	-2,28	1,65	1,56	1,25	1,25
1250	-2,21	1,42	1,59	1,27	1,25
1600	-2,06	1,26	1,60	1,32	1,21
2000	-2,15	1,09	1,72	1,36	1,26
2500	-1,71	1,42	1,62	1,40	1,16
3150	-1,43	1,93	1,53	1,35	1,13
4000	-1,10	2,61	1,40	1,28	1,09
5000	-0,26	3,11	1,31	1,21	1,08
6300	0,61	4,02	1,18	1,12	1,05
8000	1,96	5,57	0,94	1,00	0,94
10000	3,54	7,63	0,73	0,86	0,85

3. úprava					
f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT ₆₀ [s]	EDT-RT
200	0,00	3,59	1,01	0,86	1,17
250	-0,35	3,29	1,07	0,92	1,16
315	-1,29	2,40	1,26	1,04	1,21
400	-1,42	2,37	1,27	1,07	1,19
500	-1,66	2,01	1,35	1,12	1,21
630	-1,72	2,19	1,37	1,13	1,21
800	-2,21	1,91	1,48	1,20	1,23
1000	-2,46	1,76	1,53	1,24	1,23
1250	-2,21	1,90	1,52	1,24	1,23
1600	-2,00	1,97	1,55	1,24	1,25
2000	-1,73	1,97	1,51	1,24	1,22
2500	-1,61	2,39	1,44	1,25	1,15
3150	-1,26	2,72	1,38	1,17	1,18
4000	-0,85	3,27	1,30	1,11	1,17
5000	-0,13	4,17	1,18	1,04	1,13
6300	0,95	5,12	1,03	0,94	1,10
8000	2,25	6,61	0,85	0,81	1,05
10000	3,81	8,59	0,66	0,67	0,99

1. konečná varianta					
f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT ₆₀ [s]	EDT-RT
200	0,9	4,4	0,85	0,85	1,00
250	1,03	4,7	0,85	0,86	0,99
315	0,71	4,41	0,90	0,90	1,00
400	0,51	4,45	0,91	0,91	1,00
500	0,37	4,33	0,92	0,94	0,98
630	0,31	4,63	0,95	0,93	1,02
800	0,56	5,04	0,91	0,92	0,99
1000	0,42	5,36	0,93	0,91	1,02
1250	0,79	5,1	0,94	0,90	1,04
1600	0,93	5,01	0,94	0,90	1,04
2000	0,89	4,95	0,97	0,90	1,08
2500	1,26	5,18	0,92	0,87	1,06
3150	1,32	5,56	0,92	0,85	1,08
4000	1,67	6,23	0,83	0,82	1,01
5000	2,34	6,87	0,79	0,78	1,01
6300	3,15	7,58	0,76	0,72	1,06
8000	4,25	9,01	0,67	0,65	1,03
10000	5,5	10,48	0,55	0,55	1,00

2. konečná varianta					
f [Hz]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	EDT [s]	RT ₆₀ [s]	EDT-RT
200	0,81	4,21	0,94	0,93	1,01
250	0,61	4,37	0,94	0,93	1,01
315	0,39	4,02	0,97	0,98	0,99
400	0,47	4,06	0,99	0,99	1,00
500	0,10	3,98	1,02	1,03	0,99
630	0,08	4,13	1,02	1,01	1,01
800	0,19	4,68	0,98	0,99	0,99
1000	0,13	4,99	0,97	0,97	1,00
1250	0,26	4,84	0,96	0,98	0,98
1600	0,73	4,61	1,01	0,99	1,02
2000	0,69	4,66	1,02	0,99	1,03
2500	0,99	4,96	1,02	0,95	1,07
3150	1,27	5,18	0,99	0,93	1,06
4000	1,45	6	0,88	0,89	0,99
5000	2,13	6,52	0,82	0,85	0,96
6300	2,94	7,12	0,79	0,78	1,01
8000	3,95	8,75	0,67	0,69	0,97
10000	5,50	10,18	0,57	0,59	0,97