



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky**

---

**Měření vlivu akustických prvků na pole v malé místnosti**

**Measurement of the influence of acoustic elements  
on the field in a small room**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

**Jaroslav Fikr**

---

**Praha 2016**



# Čestné 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.

Datum: 25. 5. 2016

.....

podpis



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
katedra radioelektroniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jaroslav Fikr**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Měření vlivu akustických prvků na pole v malé místnosti**

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte problematiku prostorové akustiky malých místností, proveďte rešerši na dané téma. Navrhněte měření mapy akustického pole v malé místnosti, které by demonstrovalo vliv různých akustických prvků se zaměřením na difuzory a absorpční rezonátory. Proveďte měření v prázdné a akusticky upravené místnosti. Měření zpracujte a komentujte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/Alfa 1980
- [2] Cox, T.; D'Antonio, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers. 2. edition. New York: Taylor and Francis, 2009.
- [3] Kuttruff, H., Room Acoustics, Spon Press, 2009

Vedoucí: Dr. Libor Husník Ing.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016



# Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem difuzorů se zabudovaným Helmholtzovým rezonátorem na prostorovou akustikou malých místností. V první části pojednává o základních pojmech akustiky, seznamuje se základními veličinami, jevy, způsoby řešení akustiky prostor a s akustickými prvky. Poté se zabývá měřením zaměřeným na difuzitu akustického pole a na vlastní módy místnosti. Následuje vyhodnocení tohoto měření a porovnání výsledků měření pro prázdnou místnost a pro místnost s přítomností akustických prvků, konkrétně čtyř difuzorů se zabudovaným Helmholtzovým rezonátorem.

**Klíčová slova:** Prostorová akustika, akustika malých prostorů, vlastní módy prostoru, Schroederův kmitočet, mapa akustického pole, akustické prvky, Helmholtzův rezonátor, difuzor, absorbéry, impulzní odezva

# Summary

The thesis deals with impact of diffusers with build-in Helmholtz resonator on acoustic field in small rooms. First part contains some basic terms of room acoustics, introduces basic variables and describes acoustic solution principles and acoustics treatment. Second part deals with measurement of diffused sound field and with measurement of room modes. Then follows evaluation of these measurements in empty room and in acoustically treated room with placement diffusers with build-in Helmholtz resonators.

**Index terms:** Room acoustics, acoustics of small rooms, room modes, Schroeder frequency, map of acoustic field, acoustics treatment, Helmholtz resonator, diffuser, absorber, impulse response





# Obsah

Úvod.....	11
1 Základní akustické veličiny.....	12
2 Řešení akustiky prostoru.....	14
2.1 Vlnová akustika.....	14
2.1.1 Vlastní módy místnosti.....	14
2.1.2 Schroederův kmitočet.....	15
2.2 Geometrická akustika.....	16
2.3 Statistická akustika.....	16
2.3.1 Doba dozvuku.....	17
3 Akustické prvky.....	19
3.1 Absorbéry.....	19
3.1.1 Porézní materiály.....	20
3.1.2 Rezonanční princip.....	20
3.2 Difuzory.....	22
3.2.1 Geometrické difuzory.....	23
3.2.2 Schroederův difuzor.....	23
3.2.3. Další rozdělení.....	24
3.2.4 Měřené difuzory.....	25
4 Rozvržení měření.....	26
4.1 Impulzní odezva.....	26
4.2 Metoda měření impulzní odezvy.....	28
4.2 Popis měření difuzního pole.....	29
4.3 Popis měření vlastních módů místnosti.....	31
5 Vyhodnocení měření difuzního pole.....	33
5.1 Porovnání mapy akustického pole.....	33
5.1.1 Skript v Matlabu.....	33
5.1.2 Výsledné grafy.....	33
6 Vyhodnocení měření vlastních módů místnosti.....	36
6.1 Porovnání mapy akustického pole.....	36
6.1.1 Skript v Matlabu.....	36
6.1.2. Výsledné grafy.....	36
6.1.3 Směrodatná odchylka.....	41
6.2. Zobrazení módu v průřezu.....	44
7 Závěr.....	45
8 Použitá literatura.....	46
9 Přílohy.....	47

# Seznam příloh

A: Fotografie měřených difuzorů Laaksum 5x8

B: Fotografie používané reprobedny VM III a odkaz na další informace

C: Fotografie z měření difuzního pole prováděného v místnosti 205

D: Fotografie z měření vlastních módů prováděného v místnosti 202a

E: Matlab skript pro vyhodnocení měření

F: Tabulka hodnot zobrazených grafů vlastních módů

G: CD s textem práce v pdf souboru, kompletními matlab skripty, fotografiemi, obrázky a se všemi naměřenými daty

# Úvod

Akustické vlastnosti místnosti se obtisknou do zvuku, který se v ní šíří. Neboť chceme, aby zvuk přenesený k posluchači byl pro něj co nejpříjemnější, nemůžeme vliv akustiky místnosti zanedbat a musíme ji tedy využít ke zlepšení výsledného zvuku, ne naopak. Akustika se tak stává jedním z kritérií pro hodnocení kvality místnosti a pro zlepšení jejích vlastností je třeba úprav pomocí akustických prvků.

Dobrá akustika v přednáškových sálech ovlivňuje srozumitelnost řečníka a tím kvalitu výkladu, v divadlech pomáhá při přenosu řeči herců k posluchačům, v koncertních sálech navozuje v posluchači pocit obklopení hudbou, ve studiu je podmínkou kvalitního mixu hudební nahrávky. Již v antice si lidé uvědomovali základní principy šíření zvuku a na základě těchto poznatků stavěli divadelní amfiteátry. To vše se ale řešilo pouze u velkých sálů.

Až v druhé polovině dvacátého století se ale akustika začala zajímat i o malé prostory. Hojně se nyní zkoumá akustika především menších studií, učeben, nebo poslechových místností.

V malých prostorách však nemusí platit stejné přístupy jako ve velkých, vzhledem k podmínkám odvození vycházejících z velkých místností, a proto je při řešení akustiky menších místností příhodné si nejen teoreticky spočítat chování zvuku, ale i každou místnost proměřit a předpoklady (které můžou, ale nemusí odpovídat výpočtům) si ověřit.

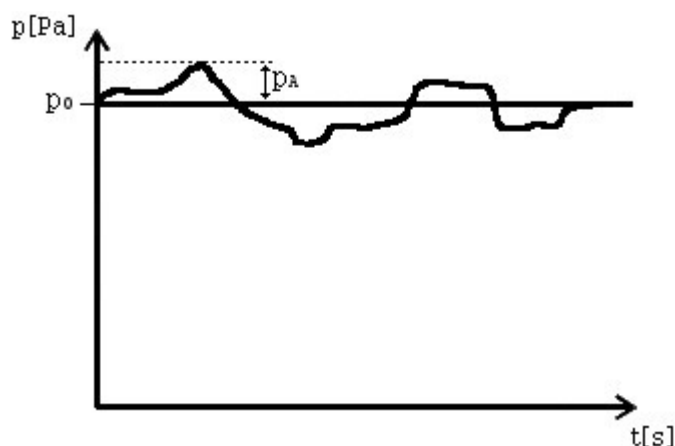
Při úpravě akustiky prostoru se používají takzvané akustické prvky a jsou nezbytné i jak při úpravě velkých, tak malých místností. Abychom byli schopni je efektivně použít, je třeba důkladně znát jejich vliv na zvukové vlny v místnosti. Toho nelze dosáhnout jinak, než praktickým měřením.

Tato bakalářská práce demonstruje vliv akustických prvků na zvukové pole ve dvou malých učebnách, analyzuje provedená měření a jejich výsledky teoreticky vysvětluje. Při měření v jedné učebně se zaměřuji na stojaté vlnění a tedy vlastní módy místnosti, respektive na jejich potlačení pomocí difuzorů se zabudovaným Helmholtzovým rezonátorem. Při měření v druhé místnosti zkoumám vytvoření difuzního pole při rozmístění difuzorů.

# 1 Základní akustické veličiny

Akustika obecně je věda věnující se všemu, kde se vyskytují **mechanické kmity** prostředí. Zabývá se jejich vznikem, přenosem a vnímáním. V této práci se budu zaměřovat pouze na šíření zvuku v rozsahu slyšitelných kmitočtů v místnosti – tedy na kmitání vzduchu o frekvencích 16 Hz až 20 kHz.

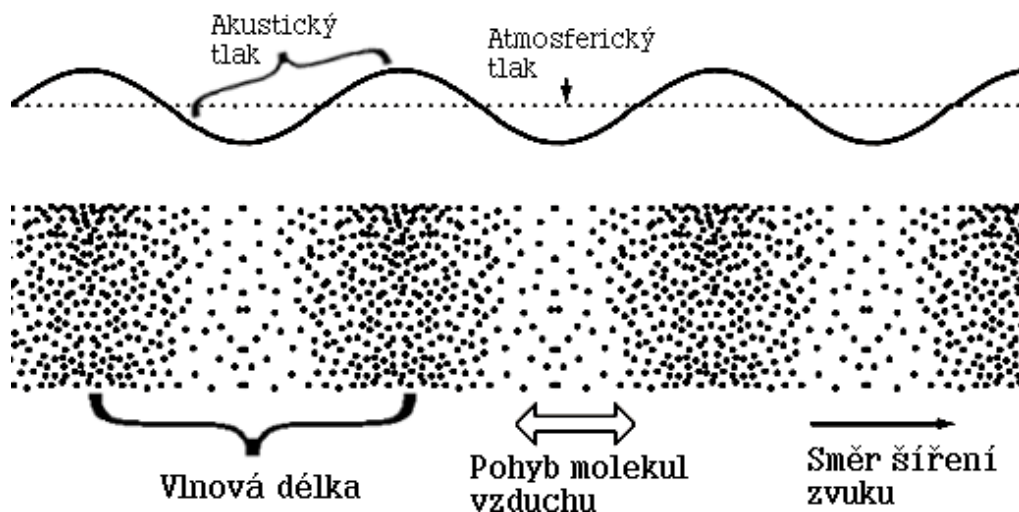
Zvuk můžeme vyjádřit jako časové změny akustického tlaku  $p_A$ , přičemž akustický tlak je rozdíl okamžité hodnoty tlaku a klidového (atmosferického) tlaku  $p_0$ .



Obr. 1 - Akustický tlak

Lidské ucho zaznamená akustický tlak o hodnotě již okolo  $p_{Amin} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa (pro frekvenci 1kHz) a práh bolestivosti má v okolí akustického tlaku  $p_{Amax} = 100$  Pa. Tyto hodnoty jsou ale samozřejmě proměnné s frekvencí zvuku. Kvůli širokému rozpětí těchto dvou krajních hodnot a kvůli logaritmickému vnímání člověka se však pro přehlednost zavádí **hladina akustického tlaku**  $L_p$ , která v decibelech udává změnu tlaku oproti hodnotě prahu slyšitelnosti  $p_{min} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa. [2]

Akustický tlak je vyvolán vždy nějakým kmitavým pohybem částic, které svoji kinetickou energii předávají sousedním molekulám vzduchu. Řetězovou reakcí pak dochází ke zhušťování a zředování vzduchu, tedy ke změnám atmosferického tlaku. Vzdálenost míst se stejnou fází tlaku pak udává jaká je vlnová délka (a tedy frekvence) výsledného zvuku.



Obr. 2 - Šíření zvukové vlny

Jelikož spektrum slyšení je v rozsahu asi 16 Hz až 20 kHz, vlnové délky slyšitelných zvuků budou nabývat hodnot od jednotek metrů až po centimetry. To je hlavní problém při akustickém řešení místností. Vlnové délky totiž mohou být razantně větší, menší nebo srovnatelné s rozměry místnosti či překážek a předmětů v ní. Pro každý tento možný případ musíme akustiku řešit jiným přístupem.

Následující tabulka ukazuje závislost vlnové délky na frekvenci tónu pro typickou rychlost šíření 340 m/s.

<b>Frekvence [Hz]</b>	16	20	100	170	1000	1700	2000	5000	10000	20000
<b>Vlnová délka [m]</b>	21,3	17,0	3,40	2,00	0,34	0,20	0,17	0,068	0,034	0,017

Tab.1 - Vlnové délky pro určité frekvence

## 2 Řešení akustiky prostoru

Při řešení akustiky místností se využívá tři základních přístupů. Pro nízké kmitočty se vyjde z řešení vlnové rovnice a pro střední a vyšší kmitočty buďto vycházíme z průměrné energie v celém prostoru, nebo ze simulace šíření zvuku jako při šíření světelného paprsku. [1]

### 2.1 Vlnová akustika

Vlnová akustika přistupuje k šíření zvuku jako k šíření vlny (nikoli paprsku). Tento přístup je třeba použít zejména, jsou-li vlnové délky zvuku blízké rozměrům místnosti – tedy nacházíme-li se v malých místnostech a na nízkých kmitočtech (viz tabulka 1). V praxi má tento přístup význam především pro pravoúhlé prostory s malou pohltivostí stěn, neboť vychází z řešení **vlnové rovnice**, kterou si zjednodušuje **počátečními podmínkami** – a to právě podmínkou pravoúhlosti stěn a jejich absolutní tuhostí. Bez těchto počátečních podmínek by nemělo smysl zabývat se řešením vlnové rovnice, neboť by její řešení bylo matematicky značně náročné. [1]

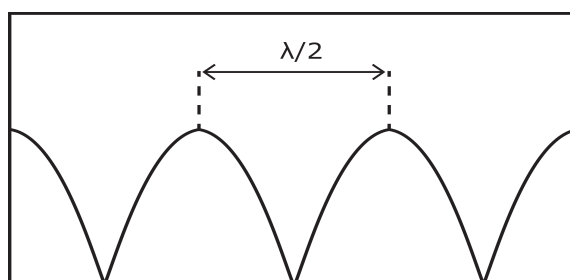
Při jejich dodržení nám vlnová akustika odhalí takzvané vlastní frekvence (módy) prostoru.

#### 2.1.1 Vlastní módy místnosti

Vlastní frekvence (nebo vlastní mód) místnosti vyjadřuje kmitočet, při kterém dochází v místnosti k **rezonanci**. Dojde-li ke shodě rozměrů místnosti s vlnovou délkou (nebo jejich násobků), tedy ke shodě vlastního a budícího kmitočtu, tento kmitočet bude mít mnohem větší amplitudu než ostatní. [7]

Na nižších kmitočtech se to projeví zvýrazněním právě této frekvence oproti ostatním (ve frekvenční odezvě místnosti bude patrná vzdálenost jednotlivých rezonančních křivek pro určité vlastní kmitočty). Při vyšších kmitočtech bude hustota vlastních kmitů už dostatečně vysoká a jedna rezonanční křivka tak bude přecházet v druhou. Kmitočet od kterého je tato podmínka splněna se nazývá **Schroederův** (nebo kritický). Tento kmitočet nám tedy určuje, od jakého bodu má místnost rovnou frekvenční charakteristiku. [11]

Vlastní módy jsou závislé na rozměrech místnosti. Vznikají totiž skládáním přímé a odražené vlny. Tím se při dané frekvenci vytvoří takzvané **stojaté vlnění** a v místnosti nalezneme místa s malou (uzly stojatého vlnění) a nebo naopak s dvojnásobnou (kmitny stojatého vlnění) intenzitou původního signálu – viz obrázek 2. Stejný tón tedy nebudeme slyšet v celém prostoru místnosti stejně hlasitě.



Obr. 3 - Rozložení akustického tlaku v místnosti pro třetí vlastní mód

Rozlišujeme **osové** (odrazy dvou protilehlých stěn), **tangenciální** (odrazy od čtyř stěn) a **kosé** (odrazy od všech šesti stěn) vlastní módy. [1] Nejsilnější jsou osové a nejslabší kosé. Obecně můžeme vypočítat vlastní módy právě řešením vlnové rovnice (pokud uvažujeme, že je prostor pravoúhlý a jeho stěny jsou dokonale tuhé) takto:

$$f_{x,y,z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{c}\right)^2} \quad (1)$$

kde  $c_0$  odpovídá rychlosti šíření zvuku,  $n_{x,y,z}$  zastupují o kolikátý násobek vlastního kmitočtu se jedná (celá kladná čísla) a  $a$   $b$   $c$  značí rozměry místnosti.

Při návrhu akustických úprav chceme, aby vlastní módy o nižší frekvenci než kritické, byly co nejvíce tlumeny a nedocházelo tak při přenosu zvuku k jejich zvýraznění vůči ostatním frekvencím.

### 2.1.2 Schroederův kmitočet

Tímto termínem se rozumí kmitočet, za kterým budou ve frekvenční charakteristice místnosti jednotlivé vlastní módy blízko sobě. Každý harmonický signál vyšší než tento kmitočet v místnosti vybudí dostatek vlastních módů a při buzení širokopásmovým signálem tak nebude docházet ke zvýraznění některého kmitočtu oproti ostatním. Aby k tomu došlo, musí být kmitočtová vzdálenost dvou sousedních vlastních kmitů menší než je polovina šířky rezonanční křivky vlastního kmitu. [1] Přibližně je možné vypočítat tento kmitočet dle vzorce:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2)$$

Kde  $T$  je doba dozvuku a  $V$  je objem místnosti.

Pokud chceme mít v poslechovém pásu co nejvíce vlastních kmitů a Schroederův kmitočet tedy umístěn nízko, ze vzorce (2) plyne, že je zapotřebí velkých prostor. Zabýváme-li se ale akustikou malých prostor, je třeba tento problém řešit jinak a co nejvíce vlastní módy místnosti utlumit.

Od tohoto kmitočtu se zvukové pole chová jako pole vyrovnané a můžeme ho začít řešit metodami statistické, případně geometrické akustiky.

## 2.2 Geometrická akustika

Při použití geometrické akustiky neuvažujeme šíření zvuku jako šíření vlny, ale simulujeme ho tak, jako kdyby se šířil **světelný paprsek**. Tímto způsobem sledujeme dráhu zvuku při šíření od zdroje k posluchači a na základě této cesty každého možného paprsku spočítáme přibližnou **impulzní odezvu** prostoru.

Pro toto řešení musí být splněna podmínka homogenity prostoru (rychlost šíření zvuku musí být v celé místnosti stejná) a počítá se se skokovým snížením intenzity paprsku při odrazu od stěny (v závislosti na činiteli pohltivosti materiálu). Neuvažuje se difrakce a situaci si tedy idealizujeme tak, že rozměry překážek jsou mnohem větší než rozměry vlnových délek. Z toho důvodu se geometrická akustika používá pouze se zaměřením na vysoké kmitočty.

Takto získanou impulzní odezvu můžeme využít při **auralizaci**. Pokud v počítači vytvoříme model místnosti a geometrickou akustikou simulujeme její impulzní odezvu, je možné se konvolucí **suché hudby** (hudba nahraná bez dozvuků) a této impulzní odezvy (3) přiblížit poslechu nahrávky v této navržené místnosti. [7]

Reálně je tento proces výpočetně náročný a není možné do něj zahrnout všechny fyzikální jevy při šíření zvuku. Nezabývá se difrakcí a kvůli kvadratickému růstu hustoty odrazů je možné modelovat pouze přibližně prvních 200 ms impulzní odezvy. Dává nám ale dobrou představu o akustice (třeba ještě nepostavené) místnosti.

## 2.3 Statistická akustika

Statistická akustika na rozdíl od vlnové neřeší akustické veličiny v závislosti na jejich umístění v prostoru, ale řeší akustické pole jako jeden celek. Nachází tedy průměrné hodnoty akustických veličin a to především hustoty zvukové energie nebo intenzity zvuku. [1]

Základním předpokladem pro použití statistické akustiky je přítomnost **difuzního pole**. To je akustické pole splňující následující předpoklady:

- Celková energie je dána součtem středních hodnot energie odražené od stěn
- Hustota zvukové energie je v celém prostoru stejně velká
- Úhly příchodu zvukové energie do uvažovaného bodu jsou všechny zastoupené stejnou pravděpodobností



Všechny tyto podmínky difúzního pole mohou být dodrženy až pro frekvence nad Schroederových kmitočtem. [5] Za těchto podmínek můžeme sestavit rovnici vycházející ze zákona zachování energie z kteréžto budeme dále podle potřeby vycházet:

$$P = V \frac{dw}{dt} + P_s \quad (4)$$

Rovnice nám říká, že celkový výkon  $P$  vyzářený do prostoru se rovná součtu výkonu  $P_s$  pohlceného stěnami a hustotě zvukové energie  $w$  v celé místnosti o objemu  $V$ .

Úpravou této rovnice dojdeme k vyjádření hustoty zvukové energie v závislosti na čase  $t$ :

$$w = \frac{4P}{\alpha c S} (1 - e^{(-\alpha c S / 4V)t}) \quad (5)$$

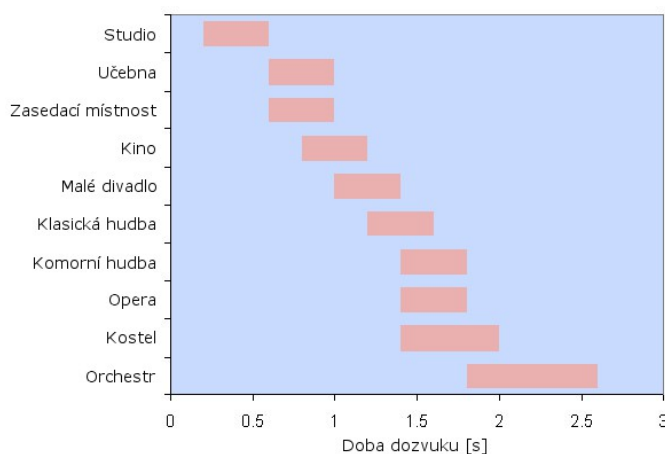
Kde  $c$  je rychlost šíření zvuku,  $V$  je objem místnosti,  $S$  je celková plocha stěn o celkové pohltivosti  $\alpha$ .

Z tohoto vztahu je možné vycházet při dalších výpočtech statistické akustiky.

### 2.3.1 Doba dozvuku

Doba dozvuku je čas, za který poklesne po vypnutí budícího zdroje hladina akustického tlaku v místnosti o 60 dB. [7]

Jedná se o vlastnost danou pohltivostí stěn místnosti (ale i útlumem zvuku při šíření), při jejíž znalosti můžeme objektivně hodnotit akustiku daného prostoru. Neexistuje jedna univerzální a nejlepší doba dozvuku, ale vždy musíme brát v potaz využití prostoru. Pro dobré akustické vlastnosti bude třeba dosáhnout jiné doby dozvuku v koncertním sále, v divadle, v přednáškové místnosti nebo na pracovišti. I produkce různých hudebních žánrů si vyžaduje různou dobu dozvuku viz obr. 4.



Obr. 4 – Ideální doba dozvuku dle prostředí, převzato z [14]

Pro přesné zjištění doby dozvuku je nutné provést měření. Způsobů měření doby dozvuku je několik – může se získat zpětnou integrací změřené impulzní odezvy, metodou měření přerušovaného šumu či jinými způsoby.

Pro orientační zjištění doby dozvuku však existují i následující teoretické vzorce dle [1]:

→ Doba dozvuku dle Sabina: 
$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad (6)$$

Kde  $V$  je objem místnosti,  $S$  je plocha stěn a  $\alpha$  jejich celková pohltivost. Ta je rovna průměru různých pohltivostí, dle jejich dílčí plochy  $S_n$  z celkové plochy  $S$ : 
$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (7)$$

Použití výpočtu doby dozvuku dle Sabina však můžeme použít jen pro stěny s malou pohltivostí  $\alpha$ , neboť pro větší koeficienty pohltivosti se tento výpočet doby dozvuku neblíží hodnotě 0. Sabin předpokládá postupné pohlcování zvukové energie.

→ Doba dozvuku dle Eyringa: 
$$T_s = 0,164 \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\alpha)} \quad (8)$$

Eyring upravil Sabinův vzorec přirozeným logaritmem ve jmenovateli, čímž umožnil použití tohoto výpočtu i pro více pohltivé prostory. Při dopadu zvukové vlny počítá se skokovým zeslabením její energie  $\alpha$  krát. I tento vzorec však selhává při hodnotách koeficientu pohltivosti větších než 0,8.

→ Doba dozvuku dle Millingtona: 
$$T_s = 0,164 \frac{V}{-S \sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad (9)$$

Pro činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  větší než 0,8 platí Millingtonův vzorec, který s příspěvky pohltivosti od jednotlivých stěn nepočítá jako s průměrem dle (7), ale počítá je v závislosti na jejich ploše neboť počet odrazů od jednotlivých pohltivostí závisí právě na této jejich dílčí ploše. [1]

## 3 Akustické prvky

Akustiku místnosti ovlivňuje každý předmět v ní. K její přímé úpravě ale používáme takzvané akustické prvky. Těmi úpravami můžeme rozumět omezení vlastních frekvencí prostoru, vytvoření optimální doby dozvuku nebo dosažení dostatečného difuzního pole. Rozdělujeme dva základní typy akustických prvků dle jejich funkce – difuzory a absorbéry.

### 3.1 Absorbéry

Absorbéry se používají především k omezení odrazů zvuku od stěn a k potlačení stojatého vlnění. Pokud chceme zamezit odrazům, ze zákona zachování energie je třeba při dopadu zvukové vlny část její energie pohltit – tedy přeměnit zvukovou energii na jinou. Poměr, kolik energie se při dopadu pohltí a kolik se zpět odrazí do prostoru udává **činitel zvukové pohltivosti**:

$$\alpha = \frac{W_{poh}}{W_{dop}} \quad (10)$$

Kde  $W_{dop}$  je celková energie dopadající zvukové vlny a  $W_{poh}$  je energie pohlcená při dopadu.

Část pohlcené energie se pak dále šíří materiálem, část se přemění na teplo a část projde dále překážkou a je znovu vyzářena do prostoru. To vše je samozřejmě závislé na kmitočtu dopadající vlny. Některá část spektra je při dopadu pohlcena více a některá méně. Tuto závislost ovlivňují rozměry, materiál, tvar a struktura překážky na kterou zvuk dopadá. [5]

K přeměně zvukové energie na jinou lze dosáhnout celkem třemi způsoby [1]:

- Přeměnou vznikající třením, kdy se vzduch pohybuje podél plochy (v limitní vrstvě) materiálu.
- Přeměnou vznikající poklesem akustického tlaku (změnami relaxačními), kdy není dodržena adiabatičnost jevu a při změnách akustického tlaku je vyrovnávána teplota – při kladné půlperiodě je teplo odváděno a při záporné dodáváno.
- Přeměnou vznikající nepružnou deformací těles, kdy je zvukovou vlnou deformován materiál s výraznou hysterezí ve své pružnosti. Při jeho deformaci je tedy vynaložena větší energie než při jeho rozpínání a zbylá energie se uvnitř materiálu přemění na teplo.

Podle těchto způsobů pohlcování zvuku dále rozlišujeme jednotlivé typy akustických absorberů.

### 3.1.1 Porézní materiály

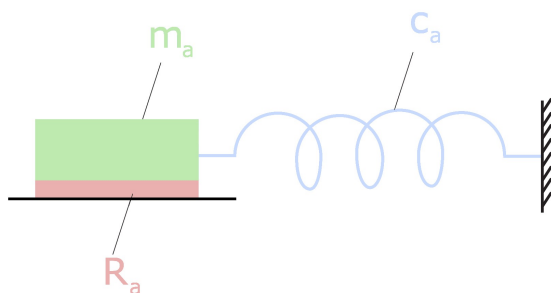
Porézní materiály jsou pevné látky, které mají v nadpoloviční většině (60% až 95%) [5] svého objemu dutinky vyplněné vzduchem. Při šíření zvuku v těchto dutinkách dochází ke tření vzduchu o stěny a tedy k přeměně zvukové energie na tepelnou.

Porézní akustické obklady se nejčastěji využívají pro absorpci středních a vyšších kmitočtů, neboť nejefektivnější pohlcování probíhá v místě, kde má zvuková vlna největší rychlost. To je v místě vzdáleném  $\frac{1}{4}$  vlnové délky od stěny místnosti. Při vlnových délkách dosahujících jednotek metrů je to značně nepraktické – obklady pro pohlcování těchto nižších kmitočtů by totiž musely být velice tlusté nebo umístěny v dostatečné vzdálenosti od stěny. Mimo to, ani takové porézní obložení nebude pohlcovat pouze nízké kmitočty bez současného pohlcování vyšších – porézní obklad bude vždy fungovat jako dolní propust. [1]

### 3.1.2 Rezonanční princip

Pro eliminaci nízkých kmitočtů je tedy výhodnější použít obklady vycházející z **rezonance**. Tento princip je založen na vynuceném rozkmitání akustické soustavy a následném tlumení těchto kmitů (přeměnou na teplo). [1] Neboť kmitání soustavy bude mít přirozeně největší amplitudu na frekvenci vlastních kmitů, tyto kmitočty budou také nejvíce tlumeny. Dojde tedy k pohlcování určitých frekvencí v závislosti na parametrech celé akustické soustavy.

Tento princip si můžeme představit jako tlumení kmitů tělesa kmitajícího na pružině viz obrázek 5.



Obr. 5 – Analogie rezonance

Jde tedy o akustickou hmotnost  $m_a$  kmitající přes akustickou poddajnost  $c_a$ , tlumenou akustickým odporem  $R_a$ .

Rezonanční kmitočet této soustavy můžeme za předpokladu, že soustava není tlumená určit dle [1] ze vztahu:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_a c_a}} \quad (11)$$

Při zahrnutí tlumení se rezonanční frekvence mírně posouvá směrem k nižším frekvencím a zároveň s tím dochází ke snížení činitele jakosti a maximální hodnoty indexu pohltivosti. [13]

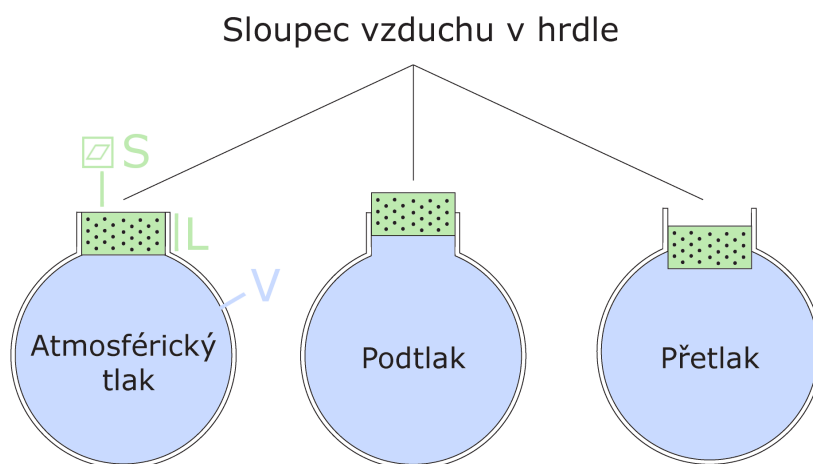
Rezonanční akustické obklady dále rozdělujeme (podle toho jaká část soustavy se rozkmitá) na deskové, membránové a Helmholtzova typu.

**Membránové a deskové rezonátory** těží z toho, že je možno zvukovou vlnou rozkmitat na frekvenci vlastních kmitů desku nebo membránu. Tím se přemění zvuková energie na mechanickou. Ta je poté utlumena vnitřními ztráty kmitající desky nebo membrány a ztráty vznikajícími v místě jejího upevnění. K hlavnímu útlumu však dochází v prostoru mezi membránou a stěnou, který je vyplněn porézním materiálem a tlumí kmitání částic vzduchu, tedy i celou soustavu. [1]

Rezonanční frekvence těchto rezonátorů je pak závislá na tloušťce a hustotě vzduchového polštáře a upevnění, rozměrech, plošné hmotnosti, tloušťce a modulu pružnosti desky (membrány). Neboť přesné určení a zohlednění všech těchto parametrů s sebou nese nezanedbatelnou chybu, reálné chování tohoto typu absorbérů je obtížné predikovat.

Druhou možností realizace rezonanční akustické soustavy je za pomoci **Helmholtzova rezonátoru**. To je dutina opatřena hrdlem a rezonance se zde tvoří na základě stejného principu jako když foukáním na lahev generujeme tón. Místo membrány jako v předchozím případě zde kmitá na rezonančním kmitočtu píst vzduchu v hrdle, viz obrázek 6. Tlumení probíhá buď porézním materiálem umístěným v ústí hrdla rezonátoru, vrstvou minerální vaty nebo malým průřezem hrdla. [3] Stejně jako lahev, i tento rezonátor je naladěn na určitou rezonanční frekvenci. Ta je (při rychlosti zvuku  $c$ ) dle (7) závislá na akustické hmotnosti, kterou představuje délka ( $L$ ) a průřez hrdla ( $S$ ) a akustické poddajnosti, kterou představuje množství vzduchu v dutině ( $V$ ). Jeho rezonanční frekvence se tedy oproti deskovým rezonátorům přesněji odhadne tímto výpočtem:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} \quad (12)$$



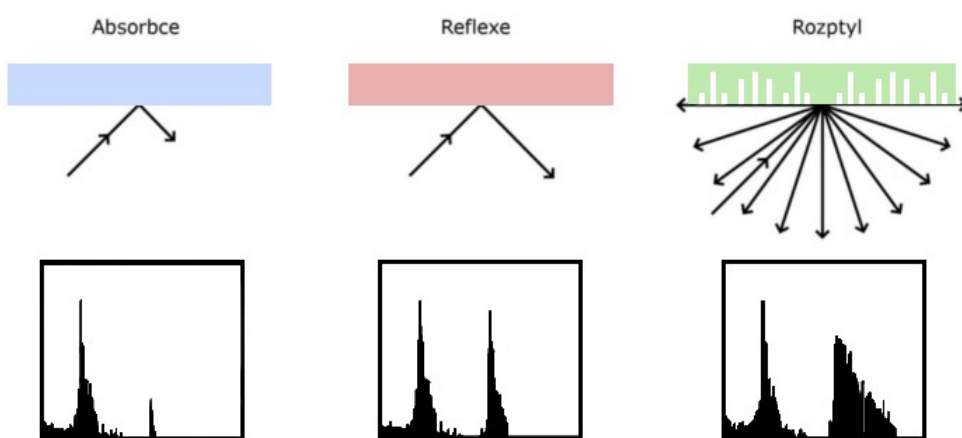
Obr. 6 - Princip Helmholtzova rezonátoru

Absorbéry založené na rezonančním principu pracují nejlépe tam, kde je největší **akustický tlak**. Tedy u stěn místnosti. Tím se stávají velice praktickými oproti použití pouze porézních materiálů.

## 3.2 Difuzory

Difuzory, nebo-li rozptylové prvky, se používají pro potlačení stojatého vlnění a k vytvoření **difuzního pole**. Takové pole má všude stejnou velkou energii a je podmínkou kvalitního poslechu, při kterém chceme, aby zvuk přicházel stále ze všech stran. Difuzory takto přibližují poslech v malé místnosti k poslechu ve velké místnosti. [12]

Obrázek 7 znázorňuje směr vlny a impulzní odezvu při odrazu zvuku od absorpčního prvku, odrazivého prvku a rozptylového prvku. Při rozptylu tedy dochází k rozptýlení energie dopadající vlny do všech směrů a ke zhuštění odražených vln v impulzní odezvě.



Obr. 7 - Ilustrace impulzní odezvy v závislosti na vlastnostech povrchu v místě odrazu zvukové vlny, převzato z [3]

Ve výsledku tak difuzor rozbíjí vlnoplochu odražené vlny a zamezuje tím hřebenovému filtru, který by vznikal interferencí odražené a přímé vlny. [3] Hřebenový filtr je samozřejmě nechtěná vlastnost akustiky místnosti, kterou pomáhají difuzory (ale i absorbéry) eliminovat.

Za difuzor lze považovat jakýkoli nepravidelný povrch, který rozptýlí dopadající zvuk. Nejefektivnější jsou však přesně navržené difuzory, jejichž rozměry nerovností odpovídají vlnovým délkám zvuku, který má být odražen. Difuzory jsou tak sestaveny většinou z vhodně uspořádaných malých krychlí, kvádrů nebo vypouklých ploch. Každá frekvence s odpovídající vlnovou délkou těchto rozměrů je pak po dopadu na difuzor odražena do různých směrů. Jeho největší účinnost na akustiku místnosti bude při umístění do místa prvotního dopadu vlny na stěnu.

Mimo akustickou úpravu místnosti mohou ale difuzory sloužit i k její vizuální úpravě a v poslední době se tak klade důraz jak na jejich funkčnost, tak i na jejich design.

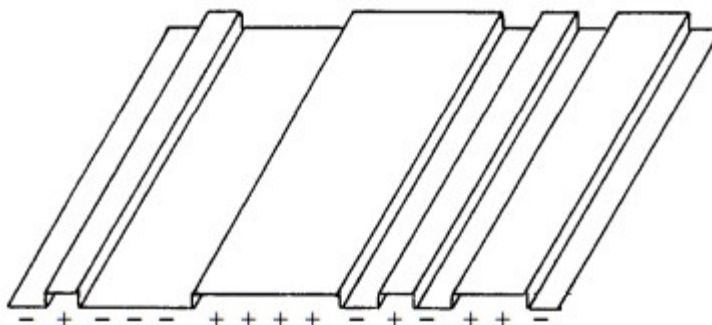
Difuzory můžeme rozdělit do několika skupin dle jejich typů konstrukce, účinnosti atd. Dále uvádím některé druhy difuzorů.

### 3.2.1 Geometrické difuzory

Nejjednodušší realizace difuzorů vychází z jednoduchých geometrických tvarů. Použití trojúhelníkových nebo polokulovitých vypouklých tvarů na ploše stěny zapříčiní obстойný rozptyl zvuku a nespornou výhodou je jejich velice jednoduchá realizace. Účinnost takto zhotoveného difuzoru záleží na rozmístění jednotlivých tvarů. Jedná se o velice jednoduchý přístup k difuzi zvuku, který později předčily přesně navržené difuzory na základě matematických výpočtů. [13]

### 3.2.2 Schroederův difuzor

Přesně navrženým difuzorům na základě matematických sekvencí se říká Schroederovy (podle Manfreda Schroedera). Schroeder vyšel z **matematických sekvencí** jako MLS (posloupnost maximální délky), která má rovné frekvenční spektrum a pokusil se tuto vlastnost převést do akustiky. Navrhl tedy první difuzor, který měl rozmístěné prohlubně dle MLS – viz obrázek 8. [10]



Obr. 8 - MLS difuzor

Jednotlivé prohlubně mají hloubku  $\frac{1}{4}$  vlnové délky a tedy vlivem šíření zvuku v prohlubni dojde při jeho odrazu k otočení fáze zvuku v prohlubni vůči odraženému zvuku na povrchu. Tyto fázové rozdíly se pak na výsledné odražené vlně sečtou tak, že rovnoměrně rozloží akustický tlak na jeho polokouli.

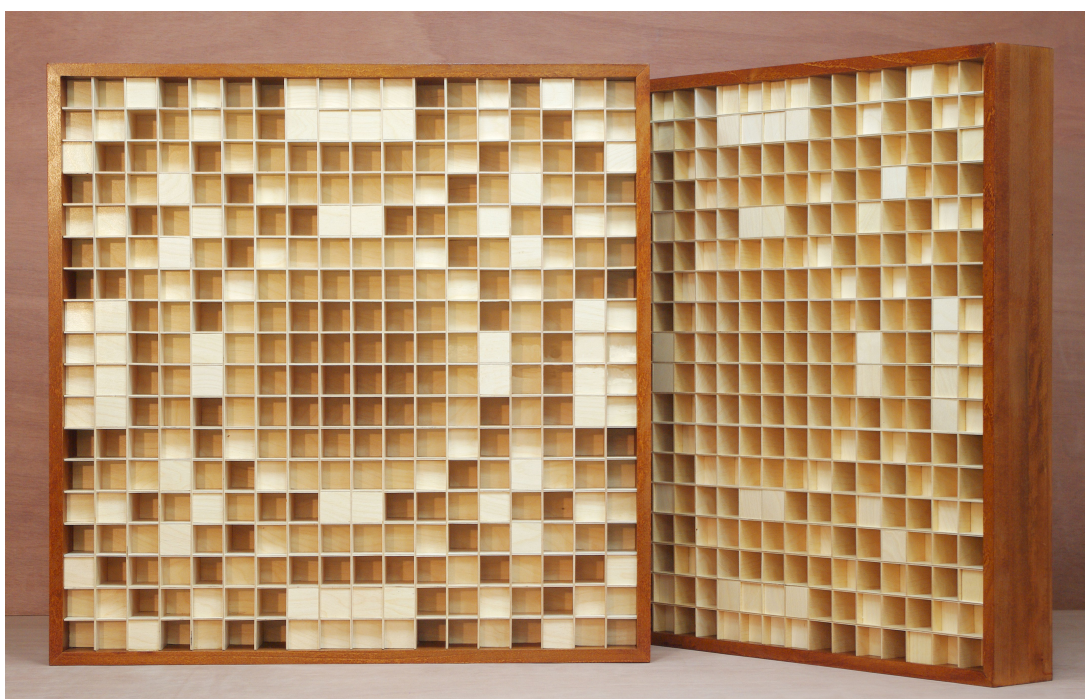
Šířka prohlubní určuje vyšší ohraničení funkčního frekvenčního pásma difuzoru, jejich hloubka pak nižší ohraničení. Z těchto poznatků se dále vyšlo a vyvinuly se velice účinné difuzory různých vlastností. [3]

### 3.2.3. Další rozdělení

Difuzory pak dále můžeme rozdělovat na takzvané 1D nebo 2D dle toho zda rozptylují pouze v jednom nebo ve dvou směrech. 1D difuzory jsou sice vůči 2D difuzorům účinnější právě v onom jednom směru (využívají se hojně ve velkých prostorech), ale pro akustické zvětšení menších prostor se používají především 2D difuzory, neboť ve výsledku přispějí k většímu počtu různých cest zvuku od zdroje k posluchači. [13] Mimo to existují i objemové (3D) difuzory, ale jejich použití je velice sporadické.

Difuzor samotný však nemusí být používán pouze k rozptylu zvuku, ale i k jeho absorpci. Je možné do něj zakomponovat rezonanční absorber a pohlcovat tak konkrétní nižší frekvenci (například vlastní mód místnosti). Je možné využít jak deskového, tak Helmholtzova rezonátoru, ale v praxi se díky možné laditelnosti používá právě druhý zmíněný. Takové difuzory budou používat i při měření v této práci a princip jejich ladění je popsán v následující podkapitole.

Při požadavku na široké funkční pásmo difuzoru lze ušetřit případnou velikost a složitost konstrukce vnořením menších difuzorů do prohlubně většího difuzoru. V praxi existují použití až tří takto vnořených difuzorů do sebe. [3]



Obr. 9 - Schroederův 2D difuzor [15]

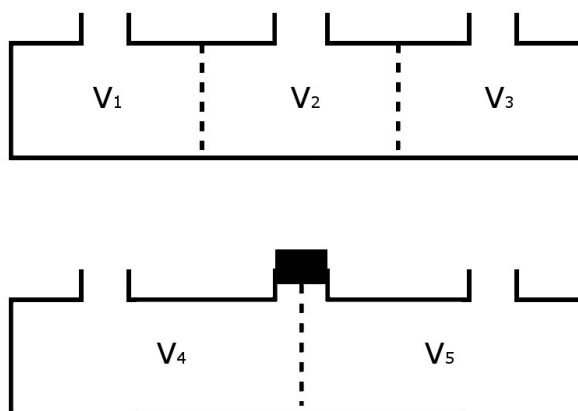


### 3.2.4 Měřené difuzory

Difuzory, které budu používat při měření se nazývají Laaksum 5x8 (fotografie viz příloha A). Celkem při měření využiji tři tyto difuzory a jeden prototyp, který jim předcházela. V obou případech se jedná o difuzory s funkčním pásmem od 800 do 10 000 Hz, které mají využitý svůj objem pro realizaci Helmholtzova rezonátoru pro absorpci nízkých kmitočtů.

Tento rezonátor se ale nejdříve musí naladit na svoji tíženou rezonanční frekvenci. Při měření vlastních módů jsem se rozhodl potlačit druhý vlastní mód místnosti v podélném směru, tedy vlastní mód o frekvenci 46 Hz. Ladění rezonátoru proběhlo ve školním studiu, neboť pro tento druh měření mělo lepší akustické podmínky než samotná místnost s velice dlouhou dobou dozvuku.

Difuzory mají v každé své studně otvor o průměru 18 mm, který vede do společného objemu celého dutého difuzoru. Každý tento otvor tak tvoří dílčí Helmholtzův rezonátor. Ucpáním některé z děr se odstraní jeden tento dílčí rezonátor a jeho objem vzduchu se přerozdělí mezi zbylé rezonátory - viz zjednodušení tohoto principu ilustrované na obrázku 10. Tím se změní akustická poddajnost celého systému a tedy dle (12) se změní rezonanční frekvence systému. Takto můžeme celý systém naladit na určitou frekvenci. V našem případě na 46 Hz.



Obr. 10 – Princip přerozdělení objemu vzduchu v rezonátoru při zaslepení otvoru

Měření rezonance probíhá tak, že se skrze jeden otvor vsune měřící mikrofon do difuzoru, budícím reproduktorem se vybudí rezonance měřícím signálem a změní se frekvenční charakteristika této soustavy. Na ní je pod kmitočtem 100 Hz vidět rezonanční křivka. Při postupném přidávání zátek do otvorů měření pokračuje a s každým ucpáním otvorem se objem vzduchu rezonátoru zvětšuje, tedy rezonanční frekvence klesá. Tento postup se opakuje do doby, kdy je rezonanční křivka na chtěném kmitočtu.

Tímto způsobem jsem naladil všechny rezonátory uvnitř difuzorů na frekvenci 46 Hz pro pohlčení druhého podélného módu.

## 4 Rozvržení měření

Dál se v této práci budu zabývat měřením mapy akustického pole v místnosti a jeho vyhodnocením. Při zobrazení mapy akustického pole pak budu schopný přímo porovnat změny v akustice místnosti, které způsobí rozmístění difuzorů.

Celkem jsem provedl dvě měření. Jedno se zaměřením na vlastní módy místnosti a druhé se zaměřením na difuzitu pole. Obě měření jsem provedl nejdříve v prázdné místnosti a poté v místnosti s rozmístěnými akustickými prvky (čtyři difuzory se zabudovaným Helmholtzovým rezonátorem).

Pro měření mapy akustického pole se zaměřením na vlastní módy jsem kvůli svým malým rozměrům vybral místnost číslo 202a v budově Fakulty elektrotechnické ČVUT.

Pro měření mapy akustického pole se zaměřením na jeho difuzitu jsem, především kvůli volnému rozvrhu umožňujícímu provést celodenní měření, vybral místnost 205 také v budově Fakulty elektrotechnické ČVUT.

V obou případech jsem měřil impulzní odezvu místnosti v několika bodech, které byly rozmístěny do pravoúhlé mapy.

### 4.1 Impulzní odezva

Při šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru se můžeme na místnost z hlediska zpracování signálu dívat jako na systém s několika vstupy a několika výstupy. Počet zdrojů signálu reprezentuje počet vstupů systému a počet přijímačů (uši člověka, mikrofon, aj.) reprezentuje počet jeho výstupů.

Chování tohoto systému můžeme mimo jiné popsat impulzní odezvou, což je reakce systému (místnosti) na Diracův impulz. Ukazuje s jakým časovým posunem a s o kolik menší amplitudou dorazí odražené paprsky od zdí, oproti paprsku přímému. [8]

Z teorie zpracování signálů víme, že výstupní signál se bude rovnat konvoluci vstupního signálu s impulzní odezvou, tedy že:

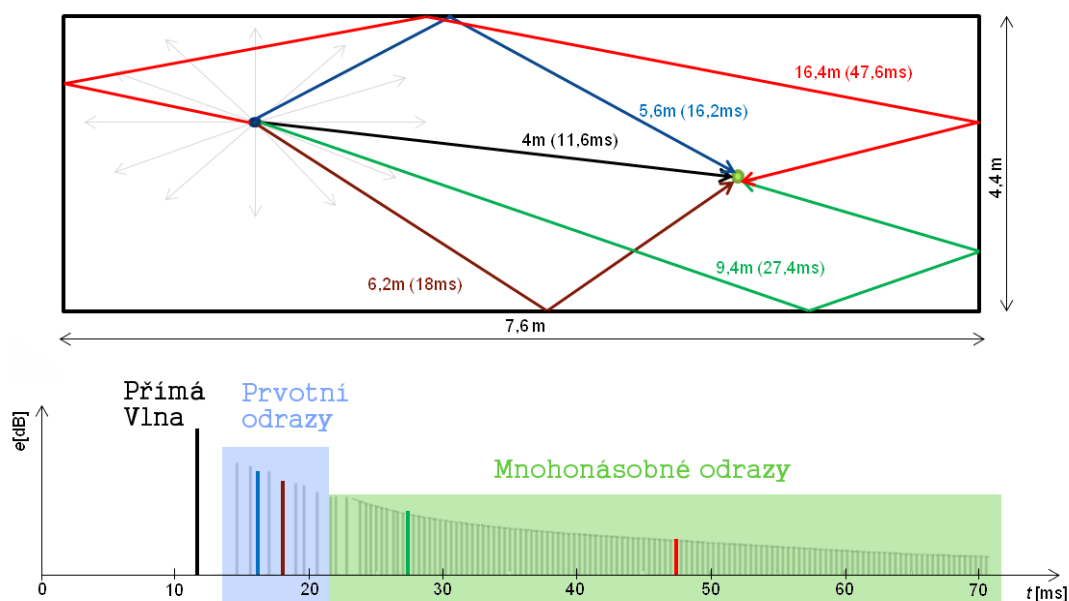
$$y[t]=x[t]*h[t] \quad (3)$$

Kde  $y[t]$  je výstupní signál systému,  $x[t]$  vstupní signál systému a  $h[t]$  představuje impulzní odezvu systému.

Impulzní odezva tak přesně definuje chování signálu v systému a tedy šíření zvuku v místnosti.

Tvar impulzní odezvy prostoru místnosti se skládá z (viz obrázek 11):

- Přímé vlny – vlna, která dorazí k posluchači přímou cestou od zdroje. Jde o jediný impuls nejbližší nulovému času a majícímu největší amplitudu.
- Prvotních odrazů – vlny, které k posluchači dojdou po prvním odrazu od stěn a jsou závislé především na tvaru místnosti.
- Mnohonásobných odrazů – vlny, které k posluchači dojdou po několikanásobných odrazech od stěn a jsou závislé především na velikosti a pohltivosti místnosti.



Obr. 11 - Impulzní odezva, převzato z [8]

Impulzní odezvu místnosti můžeme získat několika způsoby. Nejjednodušší je zaznamenáním výstupního signálu mikrofону při vybuzení místnosti zdrojem zvuku podobným Diracovu impulzu, tedy zdrojem zvuku s co nejkratší dobou trvání, co největší amplitudou a s co nejrovnoměrněji rozloženou spektrální hustotou.

Přesnější metoda však vychází ze vzorce (3) a při znalosti budícího signálu a nahraného přijímaného signálu využívá vzájemné dekonvoluce k získání neznámé impulzní odezvy. V praxi se pak pro buzení používají širokopásmové deterministické signály a to buď přeladovaný harmonický signál nebo MLS (Maximum Length Sequence), tedy posloupnost maximální délky. [5]

## 4.2 Metoda měření impulzní odezvy

Pro realizaci měření impulzní odezvy je nezbytné být vybaven zdrojem zvuku, jeho přijímačem, a měřícím programem pro záznam/vyhodnocení.

Jako zdroj zvuku jsem použil reproduktor **VMA-III** (viz příloha B). Pro záznam signálu jsem použil kondenzátorový měřicí mikrofon **Earthworks M30** s všesměrovou charakteristikou. Ten jsem zapojil do externí zvukové karty spojené s počítačem, kde byl nainstalován program **EASERA**, který nahraný signál vyhodnocoval. Mikrofon má natolik rovnou frekvenční charakteristiku, že měření ovlivnil neznatelně. Co ale mohlo nejvíce ovlivnit měření je reproduktor. Proto je pro případné přesnější výsledky nutné provést v bezodrazové komoře kalibrační měření a ideálně zjistit přenos celého měřícího řetězce, který bude poté odečten od výsledku měření. Pro mé měření ale nebylo nutné tuto kalibraci provádět.

Testovací signál mi stejně jako vyhodnocení poskytl program EASERA. Místnost jsem proměřoval signálem **MLS** (Maximum Length Sequence (posloupnost maximální délky)). To je pseudonáhodný signál, u kterého známe jeho přesný průběh a disponuje vlastnostmi šumu – tedy má rovnoměrně rozloženou spektrální hustotu. Při vybuzení místnosti MLS signálem poté měřicí program vypočte vzájemnou korelaci budícího signálu a mikrofonem přijatého signálu impulzní odezvu. [9] Pro měření jsem použil signál dlouhý tři sekundy a výpočet výsledné impulzní odezvy z pěti průměrů. Zároveň bylo použito takzvaného warm-up stimulu – tedy signálu, který je vyslán před samotným měřením nezaznamenan, aby akusticky vybudil danou místnost.

## 4.2 Popis měření difuzního pole

Měření probíhalo tak, že jsem v prázdné místnosti pomocí programu EASERA a reprobedny změřil impulzní charakteristiku v několika bodech místnosti. Proměřil jsem síť bodů o rozměrech 75 x 75 cm s jednotlivými pěticentimetrovými rozestupy (dle obr. 12). V těchto místech budu schopný dopočítat akustickou mapu prostoru. Volil jsem takto hustou síť, neboť frekvenční funkční pás difuzoru je od 800 do 10 000 Hz a aby byla mapa akustického pole čitelná a neovlivněna prostorovým aliasingem, je zapotřebí změřit minimálně 4 body na rozměr vlnové délky. S touto hustotou měření se mohu tedy dostat na frekvence pod 1700 Hz, dle tabulky 1.

Celkem jsem tedy musel pro toto měření změřit 450 impulzních odezev. Za pomoci kolegy jsme byli schopni během přibližně třiceti sekund změřit a uložit impulzní odezvu a přemístit mikrofon pro měření v novém bodě. Celkem tedy měření zabralo téměř čtyři hodiny čistého času, nepočítaje přípravu místnosti a měřicích bodů, difuzorů, měřícího systému a nutné přestávky.

Místnost má rozměry 540 x 940 x 330 cm, její objem je tedy asi 170 m<sup>3</sup> a můžeme ji tak považovat za malou místnost (to jsou místnosti s objeme pod 200 m<sup>3</sup>).

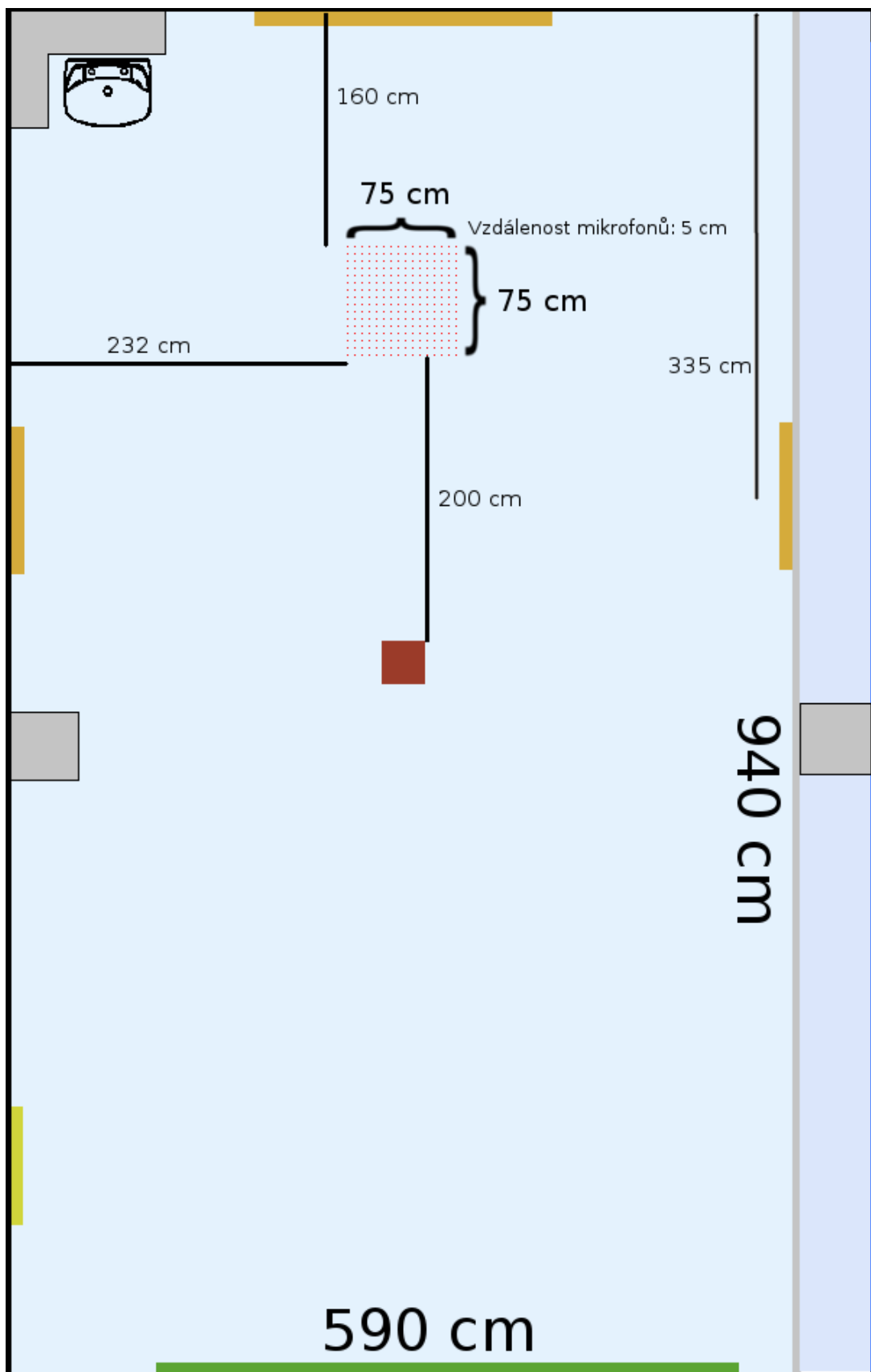
Ilustrační náčrt místnosti uvádím na obrázku 12. Červené tečky značí rozmístění mikrofonů, hnědý čtvereček ukazuje umístění budící reprobedny. Žluté obdélníčky značí umístění difuzorů. Dva jsem umístil na protější stěnu a po jednom difuzoru jsem osadil místa prvotního dopadu vlny na stěnu. Na obrázku je také vidět umístění oken v místnosti (o celkové ploše asi 19,4 m<sup>2</sup>), umístění parapetu, dveří, tabule (o ploše asi 4,9 m<sup>2</sup>), vystouplých sloupů zasahujících do prostoru místnosti a kachlíkového rohu s dřezem (viz foto v příloze C). Podlaha byla linoleová. Tyto různé materiály samozřejmě mají i různou vzájemnou pohltivost a tedy se na místnost nemůžeme koukat jako na ideálně stejnorodou.

Následující tabulka uvádí koeficient zvukové pohltivosti v závislosti na oktavových pásmech pro přítomné materiály dle [10].

Materiál	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Zed'	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Linoleum	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Okno	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Tabule	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Dveře	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Kachličky	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02

Tab. 2 - Činitel pohltivosti přítomných materiálů

S impulzní charakteristikou pro každý bod jsem mohl pokročit k vyhodnocení celého měření.



Obr. 12 - Náčrt místnosti 205

### 4.3 Popis měření vlastních módů místnosti

Stejně jako při měření difuzního pole jsem v prázdné místnosti pomocí programu EASERA a reprobedny změřil impulzní charakteristiku v několika bodech místnosti. Tentokrát ale bylo ale nutné pro zachycení vlastních módů místnosti proměřit celý prostor místnosti. Moje měřicí síť tedy představovala body rozmístěné po celé místnosti s půlmetrovými rozestupy (dle obr. 13). Akustickou mapu prostoru tedy budu schopný zobrazit téměř v celém prostoru místnosti. Měření jsem navíc provedl ve dvou výškách – pro výšku člověka sedícího (111 cm) a pro výšku člověka stojícího (155 cm).

Celkem jsem tedy musel pro toto měření změřit 660 impulzních odezev. Za pomoci kolegy jsme byli schopni během přibližně třiceti sekund změřit a uložit impulzní odezvu a přemístit mikrofon pro měření v novém bodě. Celkem tedy měření zabralo přibližně pět a půl hodiny čistého času, nepočítaje přípravu místnosti a měřících bodů, měřícího systému, difuzorů, jejich ladění a nutné přestávky.

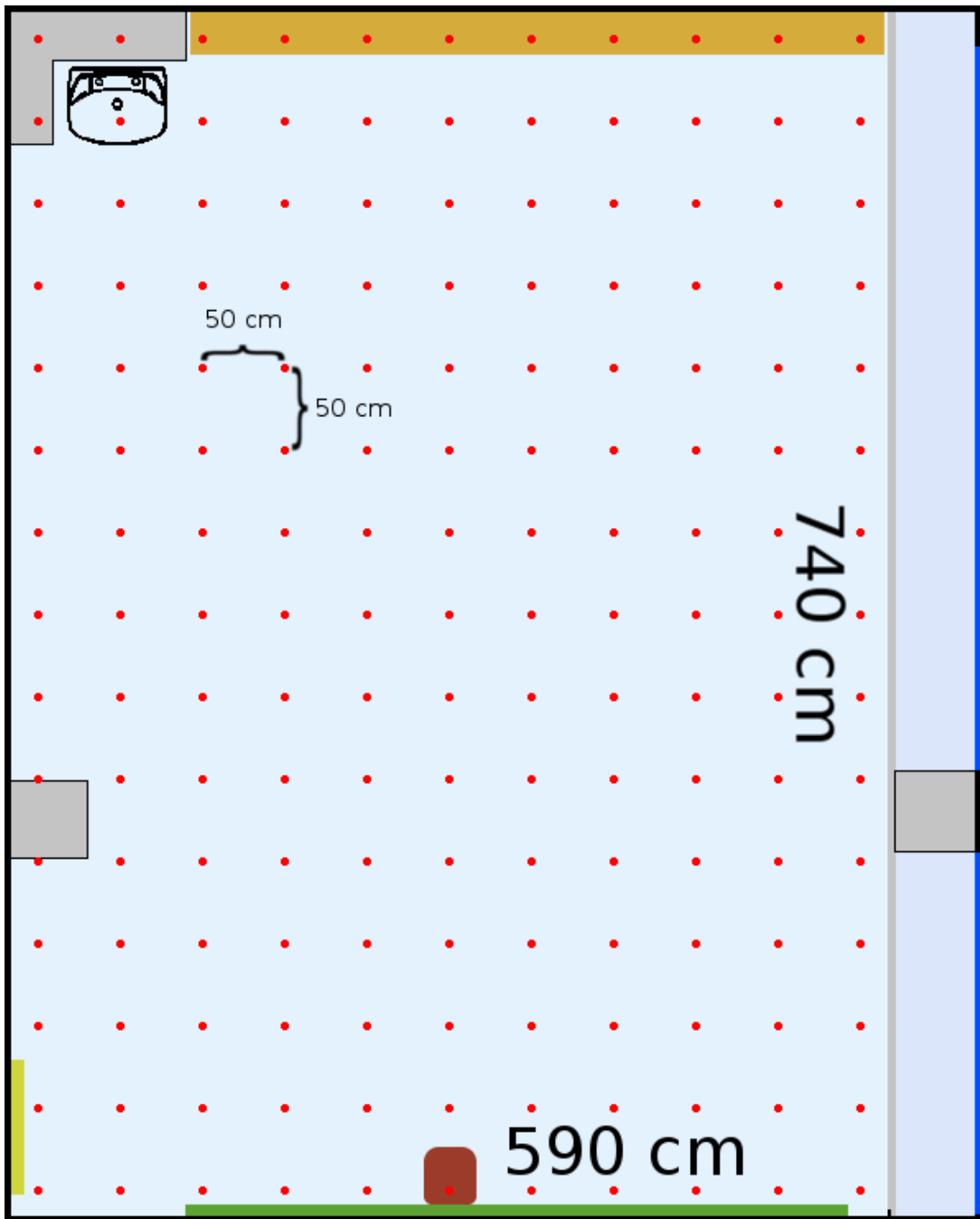
Rozměry místnosti jsou 540 x 740 x 330 cm, z čehož vyplývá, že její objem činí asi 140 m<sup>3</sup>. Se znalostí doby dozvuku místnosti přibližně 2,3 s, můžeme dle (2) vypočítat přibližný kritický kmitočet. Ten pro naši místnost vychází 250 Hz. Jelikož jsou mikrofony rozmístěny po 50 cm, můžeme zobrazit kmitočty s maximální vlnovou délkou 2 m (aby nedocházelo k prostorovému aliasingu). Tedy kmitočty do 170 Hz, dle tabulky 1.

Dále uvádím frekvence vlastních módů místnosti, na které se budu při vyhodnocování zaměřovat:

index módu	Frekvence [Hz]
0-2-0	46,4
1-0-0	31,8
1-1-0	39,3
0-3-0	69,5

Tab. 3 - Vybrané vlastní módy místnosti

Ilustrační náčrt místnosti uvádím na obrázku 13. Červené tečky značí rozmístění mikrofonů, hnědý čtvereček ukazuje umístění budící reprobedny. Žlutý obdélníček značí umístění difuzorů. Všechny čtyři difuzory jsem umístil ke stěně v uzlu módu, který chci potlačit. Neboť difuzory v sobě mají zabudovaný Helmholtzův rezonátor, u stěn bude tlumení nejúčinnější. Na obrázku je také vidět umístění oken v místnosti (o celkové ploše asi 19,4 m<sup>2</sup>), umístění parapetu, dveří, tabule (o ploše asi 4,9 m<sup>2</sup>) a kachlíkového rohu s dřezem (viz foto v příloze D). Tyto materiály samozřejmě mají jinou pohltivost než samotná zeď, a tedy se na místnost nemůžeme koukat jako na ideálně stejnorodou. Koeficient zvukové pohltivosti přítomných materiálů v závislosti na oktávových pásmech uvádím v tabulce 2.



Obr. 13 - Náčrt místnosti 202a



# 5 Vyhodnocení měření difuzního pole

## 5.1 Porovnání mapy akustického pole

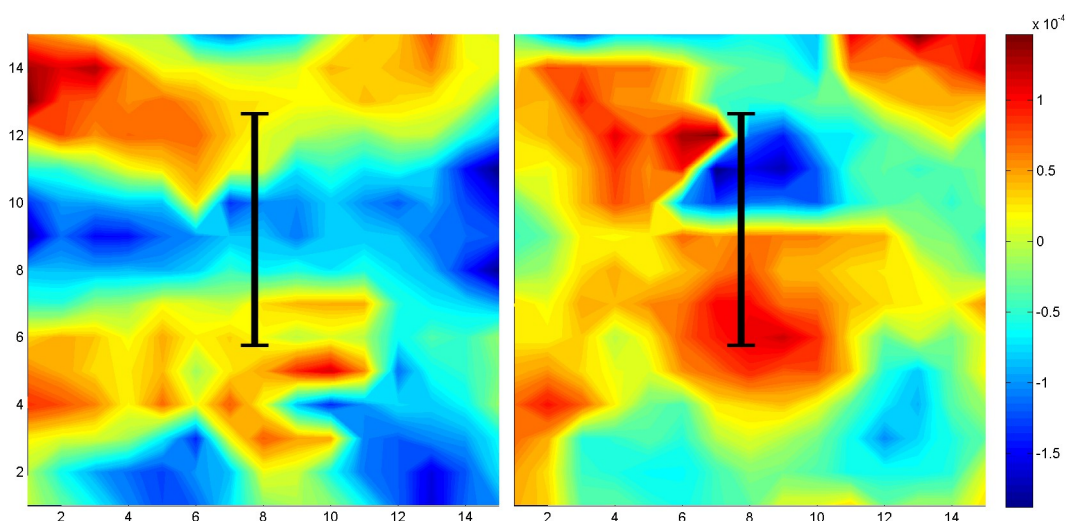
### 5.1.1 Skript v Matlabu

Pro vyhodnocení a kreslení měřeného akustického pole bylo třeba napsat matlabovský skript, jehož komentovaný kód uvádím v příloze E. Ve výsledku tento skript načte impulzní odezvu pro každý bod v prostoru, provede rychlou Fourierovu transformaci, čímž získá spektrum signálu a tedy frekvenční charakteristiku v daném bodě. Tyto komplexní hodnoty spektra převede na jejich absolutní hodnoty, ale zachová znaménko pro fázi, aby byla zobrazena celá vlna. Poté je možné si vybrat jakou frekvenci skript vykreslí, s jakým barevným rozlišením, či v jakém měřítku. Díky cyklu for je možné vykreslení a uložení více frekvencí naráz, což značně usnadnilo práci při vyhodnocování.

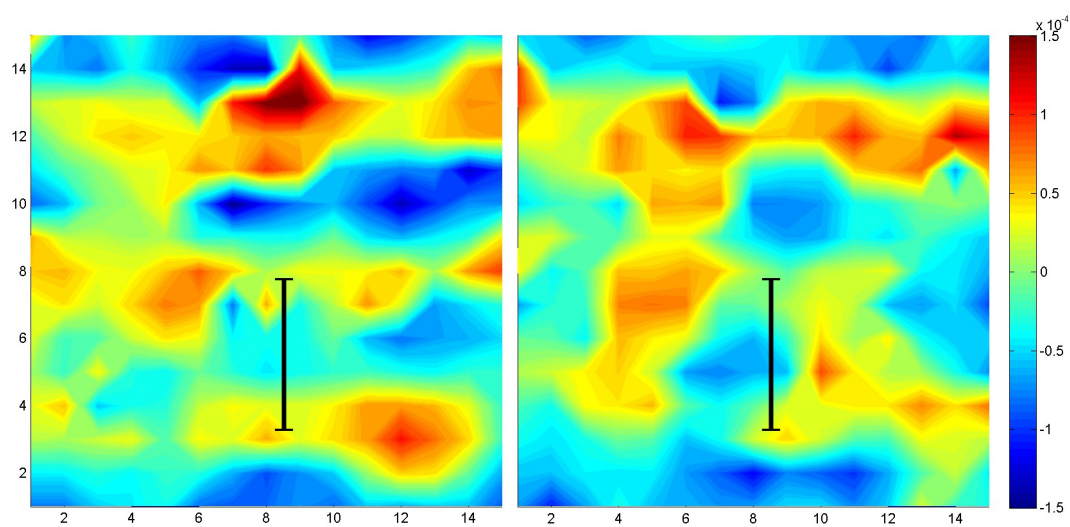
### 5.1.2 Výsledné grafy

Zde uvádím porovnání akustických polí pro tři různé frekvence. Vlevo je akustické pole v měřeném čtverci v místnosti bez difuzorů, vpravo s difuzory. Na těchto porovnáních je vidět jak difuzor ovlivní pole v místnosti a částečně rozbije zvukové vlny.

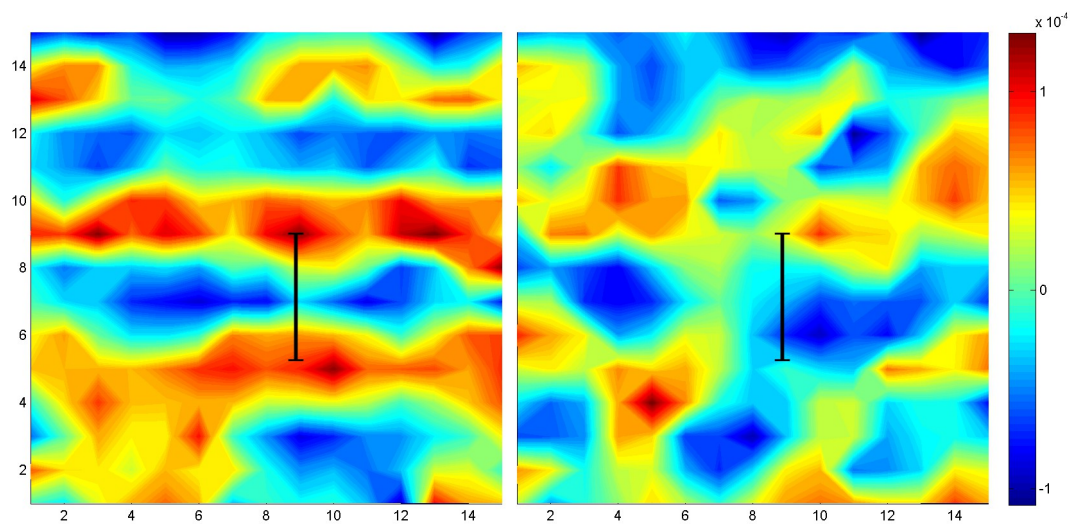
V každém grafu se nachází měřítko, které znázorňuje velikost vlnové délky zobrazované frekvence.



Obr. 14 – Vyhodnocení měření difuzního pole pro frekvenci 930 Hz

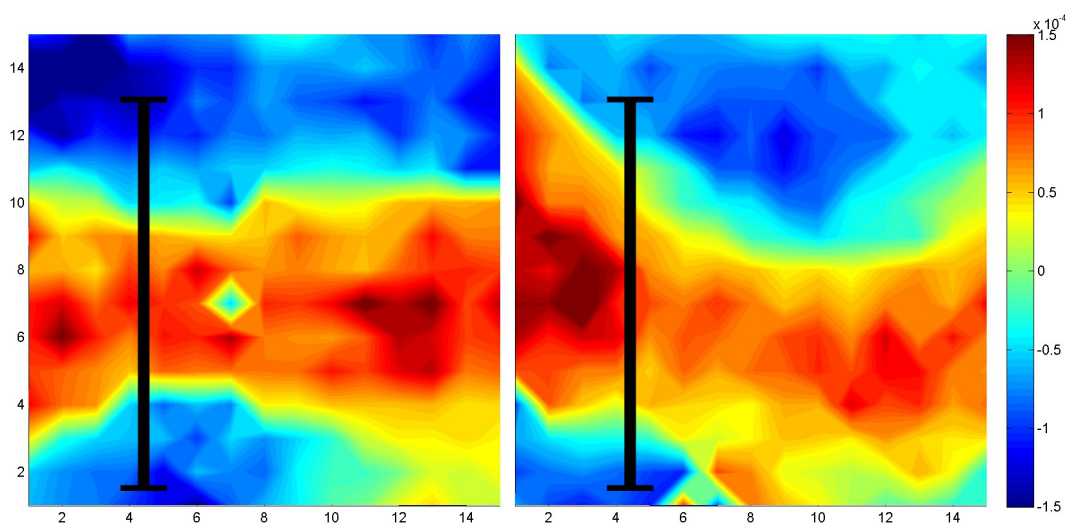


Obr. 15 – Vyhodnocení měření difuzního pole pro frekvenci 1500 Hz

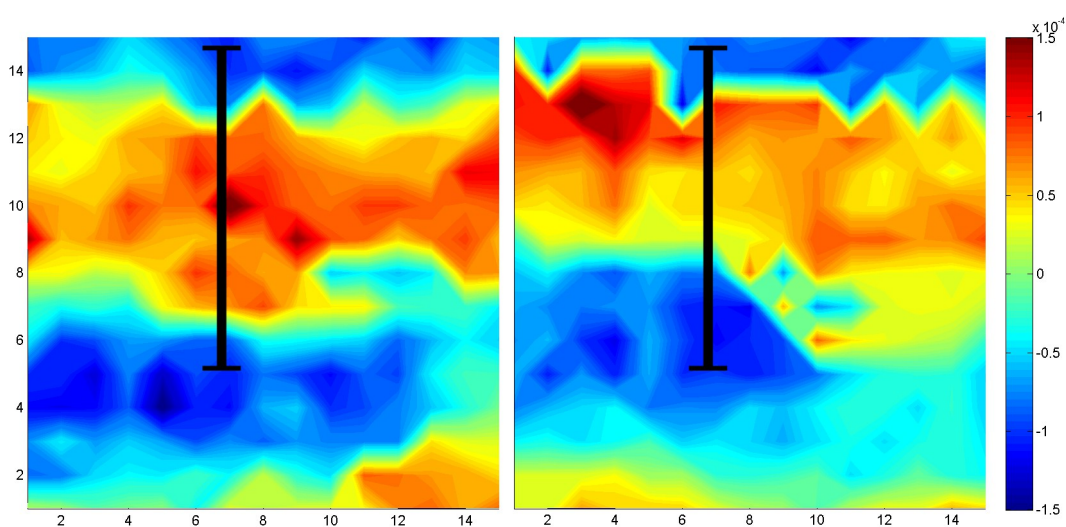


Obr. 16 – Vyhodnocení měření difuzního pole pro frekvenci 1700 Hz

Difuzor je navržen tak, aby rozptyloval frekvence od 800 do 10 000 Hz. Frekvence nad 10 000 Hz bohužel s mým prostorovým rozlišením nejsem schopen zobrazit, ale můžu porovnat frekvence pod pásmem difuzoru. Je vidět, že oproti frekvencím, které leží v pásmu difuzoru (viz obrázky 14 až 16), nedochází k tak razantnímu rozbití vlny – rozdíly mezi grafy mimo funkční frekvenční pásmo difuzoru jsou minimální.



Obr. 17 – Vyhodnocení měření difuzního pole pro frekvenci 553 Hz



Obr. 18 – Vyhodnocení měření difuzního pole pro frekvenci 671 Hz

# 6 Vyhodnocení měření vlastních módů místnosti

## 6.1 Porovnání mapy akustického pole

### 6.1.1 Skript v Matlabu

Pro vyhodnocení a kreslení měřeného akustického pole bylo stejně jako při vyhodnocování difuzního pole potřeba napsat matlabovský skript, jehož celý komentovaný kód uvádím v příloze E. Tento skript načte impulzní odezvu pro každý bod v prostoru, provede rychlou Fourierovu transformaci, čímž získá spektrum signálu, a tedy frekvenční charakteristiku v daném bodě. Tyto komplexní hodnoty spektra převede na jejich absolutní hodnoty. Jelikož z měřícího programu vyexportované wav soubory impulzní odezvy jsou všechny normovány na maximální amplitudu 1, již v sobě nenesou informaci o skutečném akustickém tlaku. Výsledky tedy bylo nutné korelovat maticí s hodnotami skutečných akustických tlaků normované ku celkové maximální hodnotě z celé mapy měření. Poté je možné si vybrat jakou frekvenci skript vykreslí, s jakým barevným rozlišením, či v jakém měřítku. Díky cyklu for je možné vykreslení a uložení více frekvencí naráz, což značně usnadní práci při vyhodnocování. Skript také umí zobrazit vlastní mód místnosti v průřezu (závislost akustického tlaku na vzdálenosti od stěny), počítat směrodatnou odchylku ze všech měřených hodnot akustického tlaku a zobrazit jejich histogram.

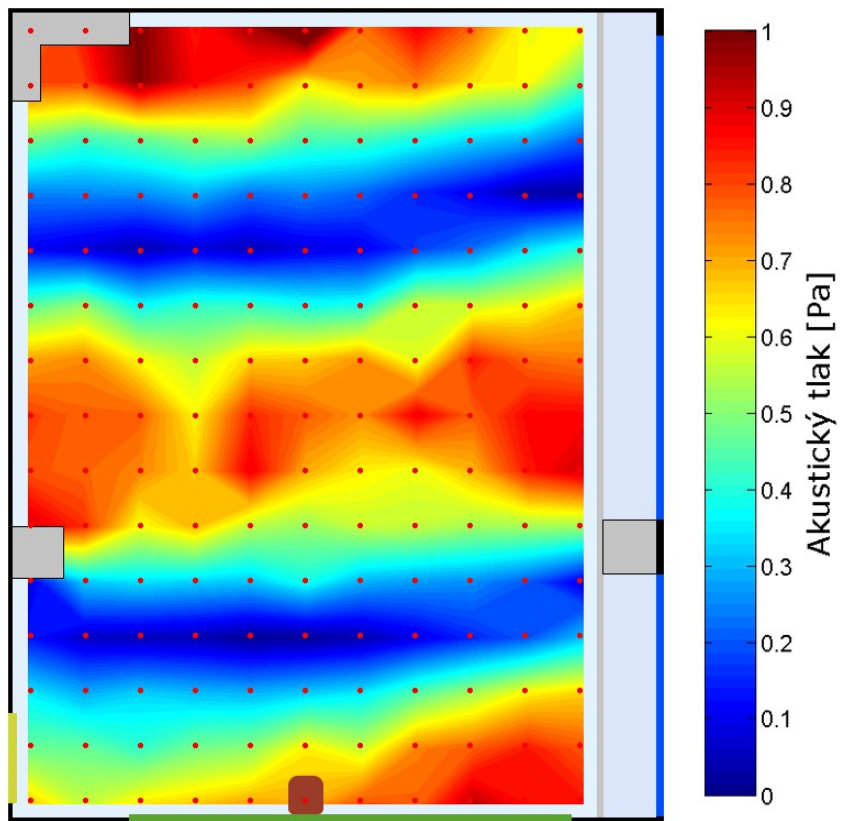
### 6.1.2. Výsledné grafy

Na dalších stranách uvádím vyobrazené vybrané vlastní módy místnosti a jejich porovnání v místnosti prázdné a v místnosti s difuzory se zabudovanými Helmholtzovými rezonátory naladěnými na 43 Hz, tedy na druhý podélný mód místnosti.

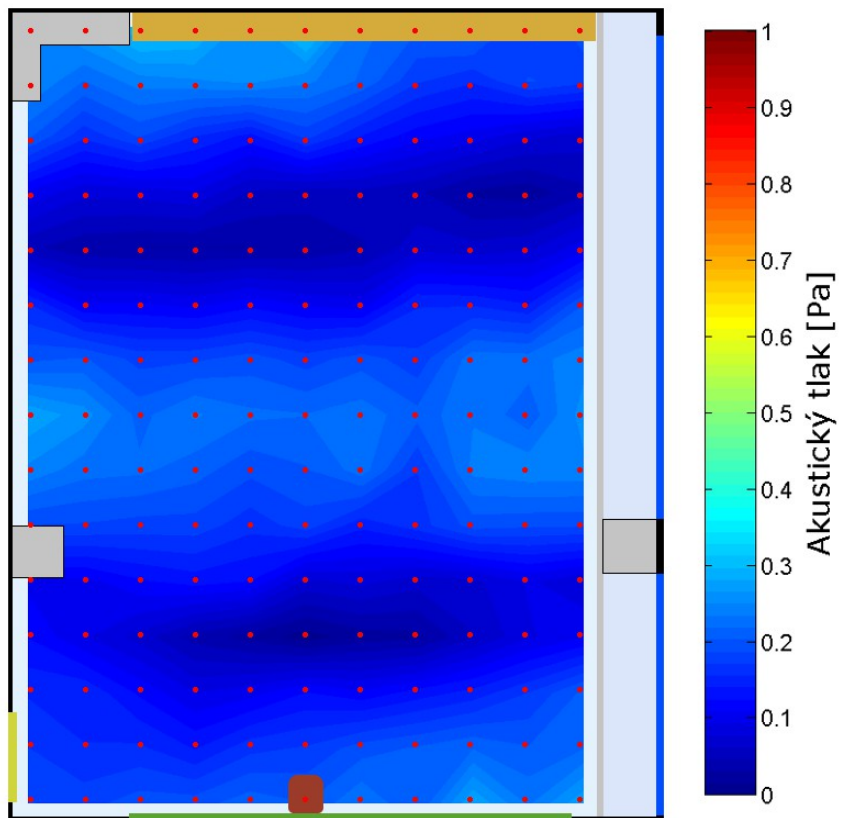
Na straně 27 a 28 je vykresleno, jak razantně potlačily rezonátory frekvenci, na kterou byly naladěny. Tyto grafy uvádím pro obě měřené výšky. Došlo přibližně k desetinásobnému potlačení amplitudy tohoto vlastního módu. Vlastní mód byl pro obě výšky stejně potlačen.

Na straně 29 a 30 jsou vyobrazeny další dva vlastní módy místnosti. Nedošlo k jejich razantnímu potlačení jako u vlastní frekvence rezonátorů, ale i tak byly módy lehce potlačeny. To je způsobeno difuzností difuzoru, případně šířkou rezonanční křivky, která mimo naladěný kmitočet zasahovala i do vedlejších kmitočtů, byť s ne tak velkou amplitudou.

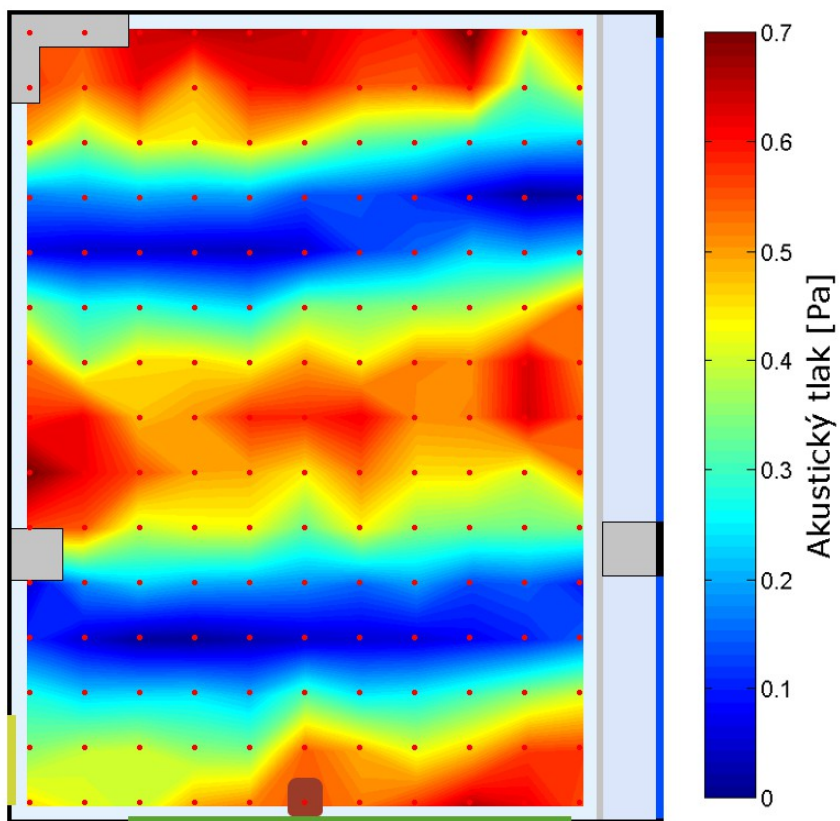
V příloze F dále uvádím číselné hodnoty těchto grafů v dB vůči minimální hodnotě z obou grafů.



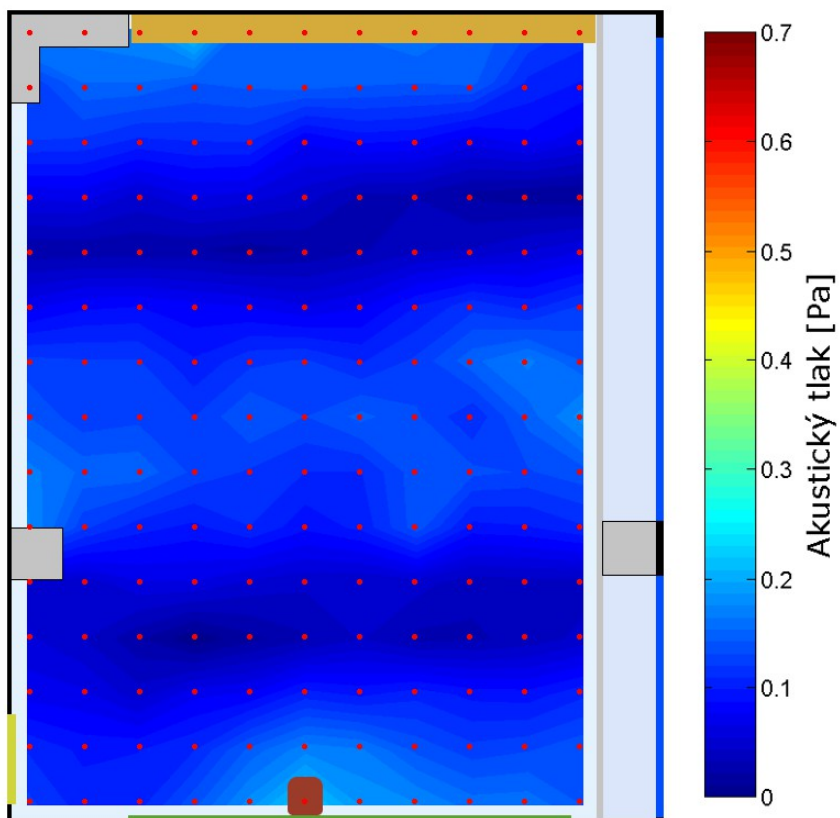
Obr. 19 – Mód 020, 46,4 Hz, výška 155 cm, bez difuzorů



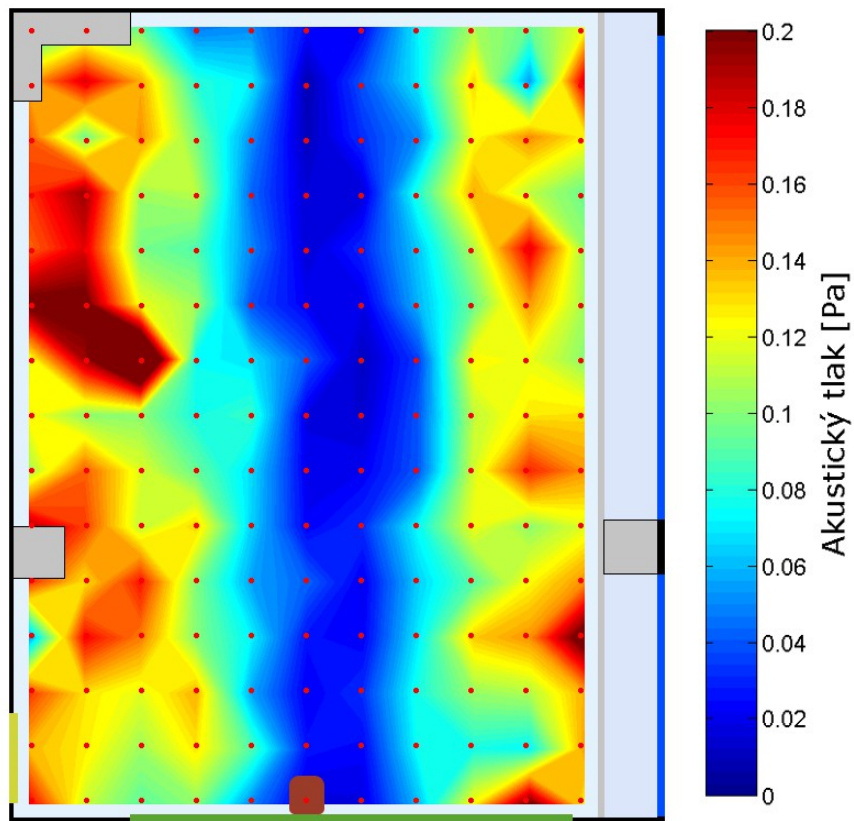
Obr. 20 – Mód 020, 46,4 Hz, 155 cm, s difuzory



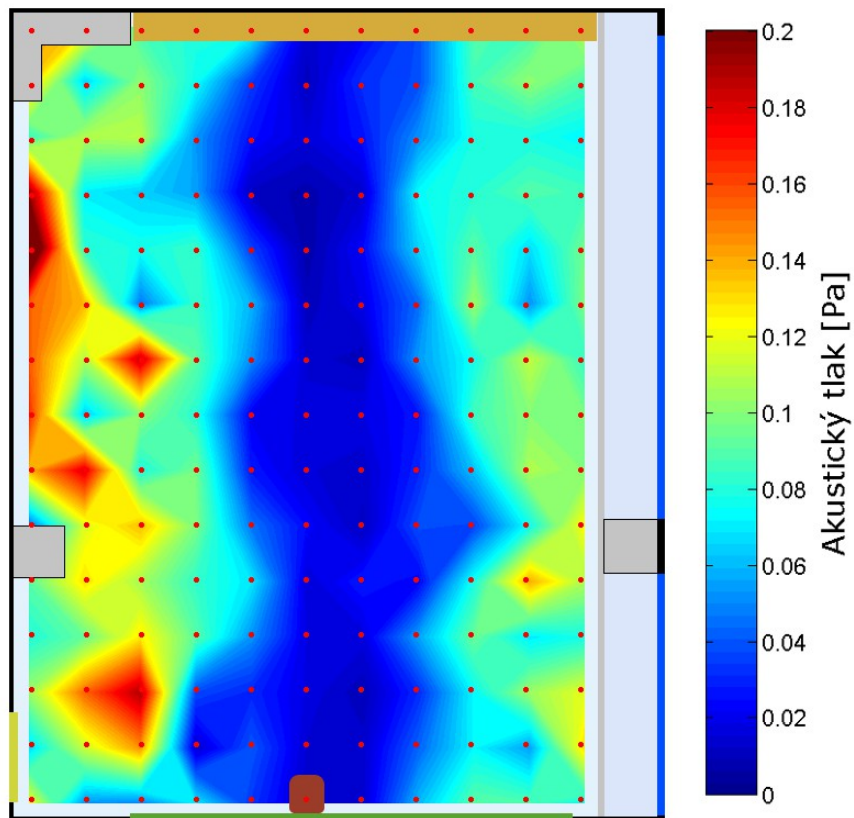
Obr. 21 – Mód 020, 46,4 Hz, výška 111 cm, bez difuzorů



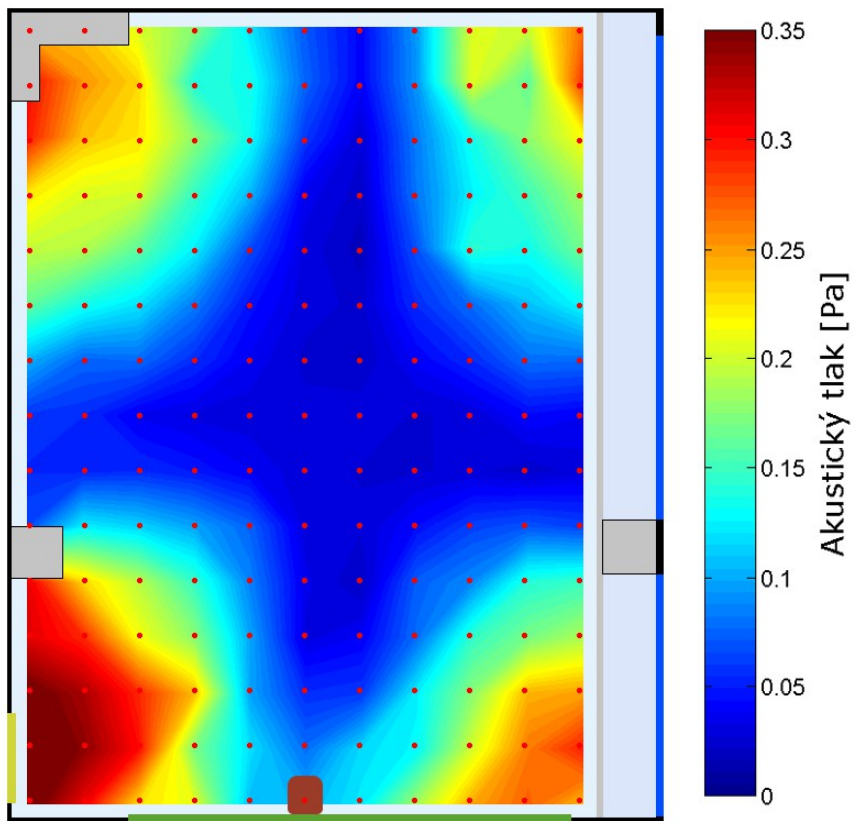
Obr. 22 – Mód 020, 46,4 Hz, 111 cm, s difuzory



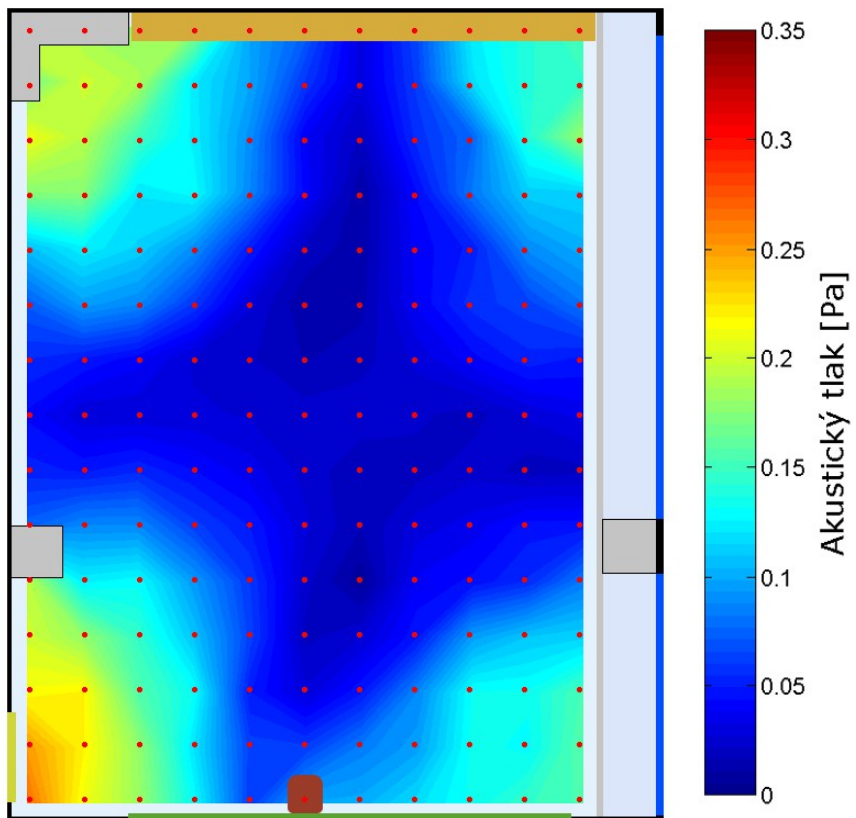
Obr. 23 – Mód 100, 31,8 Hz, výška 155 cm, bez difuzorů



Obr. 24 – Mód 100, 31,8 Hz, 155 cm, s difuzory



Obr. 25 – Mód 110, 39,3 Hz, výška 111 cm, bez difuzorů



Obr. 26 – Mód 110, 39,3 Hz, 111 cm, s difuzory



### 6.1.3 Směrodatná odchylka

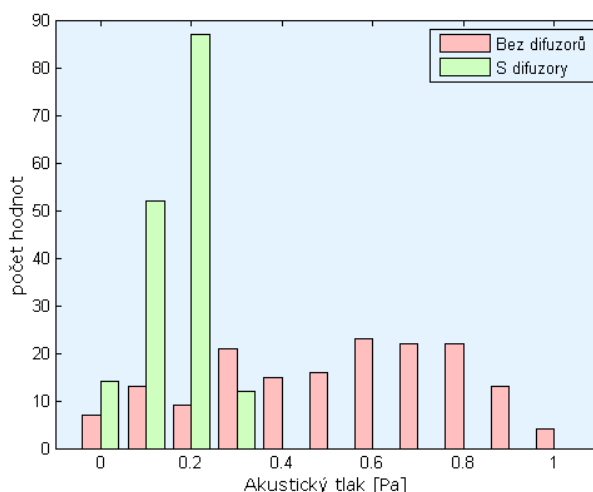
Pro číselné porovnání grafů jsem vypočítal pro každou zobrazenou frekvenci směrodatnou odchylku a vykreslil histogram akustických tlaků.

Směrodatná odchylka ukazuje, jak jsou jednotlivé hodnoty vzdálené od jejich průměru. V našem případě tedy vyjadřuje, jak velké rozdíly akustického tlaku (a tedy hlasitosti) budou pro zvolenou frekvenci v různých měřících bodech místnosti. Pokud směrodatná odchylka bude nula, hlasitost bude všude stejná. S rostoucí směrodatnou odchylkou nebude hlasitost v celém prostoru stejná, najdeme tak místa s větší a místa s menší hlasitostí – bude tedy výraznější vlastní mód místnosti.

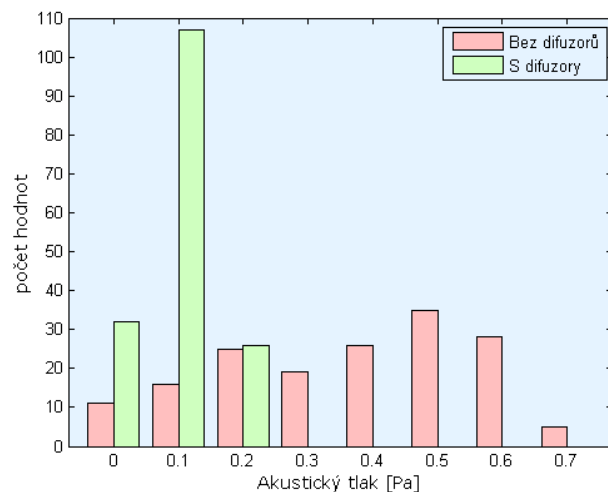
Histogram pak na ose  $y$  ukazuje, kolik celkem při měření bylo bodů, jejichž hodnota akustického tlaku ležela v intervalu podle osy  $x$ . Ukazuje tedy rozložení akustického tlaku.

Pro druhý podélný mód prázdné místnosti ve výšce 155 (resp. 111) cm vyšla směrodatná odchylka 0,267 (resp. 0,190); pro situaci s difuzory 0,071 (resp. 0,048). Akustická úprava v podobě Helmholtzova rezonátoru v difuzorech tedy velice zlepšila rozložení akustického tlaku a alespoň částečně tak na frekvenci tohoto módu vyrovnala rozdílné hlasitosti v celém prostoru. To platí opět pro obě výšky měření. Stejného závěru můžeme dojít i z histogramů na obrázcích 27 a 28.

Porovnáme-li pak průměrnou hodnotu akustického tlaku, která se snížila 3,3 (resp. 3,6 krát), je patrné, že došlo nejen ke zmenšení směrodatné odchylky, ale vlivem absorpce Helmholtzova rezonátoru i k celkovému poklesu této frekvence. To je patrné i z grafů mapy akustického pole na obrázcích 19 až 22.



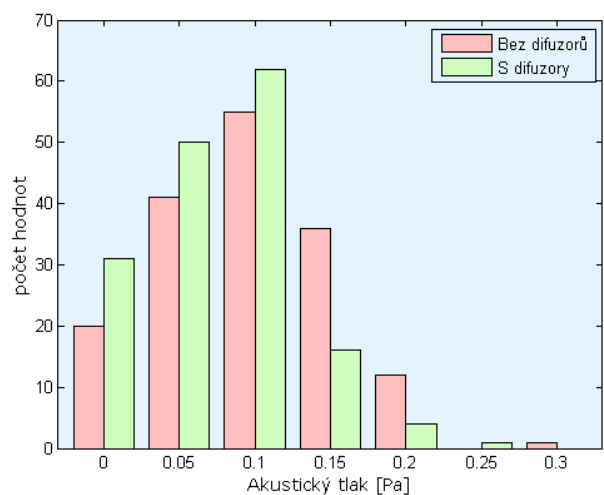
Orb. 27 - Histogram akustického tlaku pro 020 mód ve výšce 155 cm



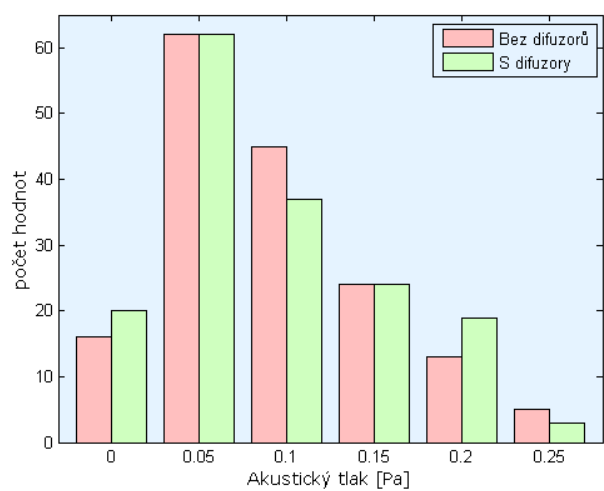
Orb. 28 - Histogram akustického tlaku pro 020 mód ve výšce 111 cm

Pro další zkoumané módy místnosti, konkrétně tedy mód 100 (resp. 110) vyšla směrodatná odchylka pro prázdnou místnost 0,056 (resp. 0,091) a pro místnost s difuzory 0,063 (resp. 0,061). Jejich vzdálenost od průměru se tedy v prázdné a v upravené místnosti nijak razantně neliší. Z histogramu (obrázky 27 a 28) však můžeme pozorovat, že se akustický tlak posunul k nižším hodnotám, což je způsobeno šířkou rezonanční křivky rezonátoru. Nepohlcuje tedy pouze frekvenci, na kterou je přímo naladěn, ale i okolní frekvence.

To si můžeme ověřit i porovnáním průměrných hodnot akustického tlaku. Pro mód 100 se sníží 1,3 krát a pro mód 110 1,5 krát. Není to tak razantní pokles jako pro vlastní mód v minulém případě, což je ale chtěné – ve výsledku se tak podaří akustickou úpravou potlačit výrazný rozdíl v hlasitosti mezi vlastními módy místnosti a okolními frekvencemi.



Orb. 29 - Histogram akustického tlaku pro 100 mód ve výšce 155 cm

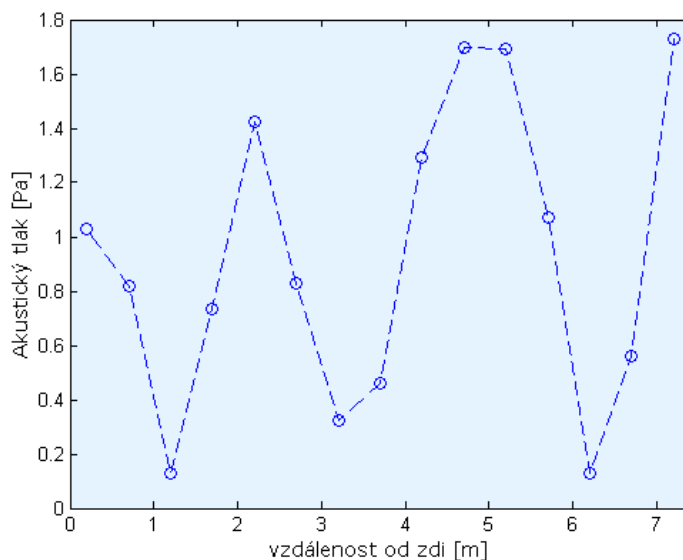


Orb. 30 - Histogram akustického tlaku pro 110 mód ve výšce 111 cm

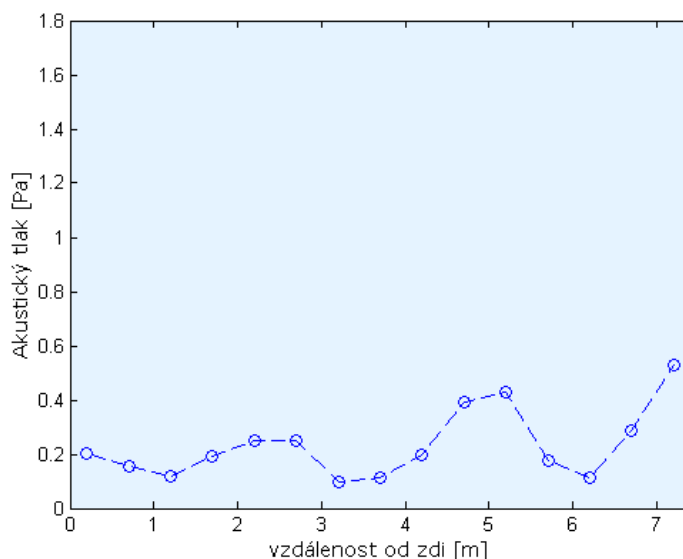
## 6.2. Zobrazení módu v průřezu

Pro zobrazení módů jsem volil i zobrazení hodnoty tlaku v závislosti na poloze jako v obrázku 3.

Takto jsem tlak zobrazil pro třetí podélný mód ve výšce 155 cm s difuzory i bez nich. Zde je znovu patrné, že mód místnosti pro zobrazení s difuzory je velice potlačen oproti prázdné místnosti.



Obr. 31 - 030 mód prázdná místnost



Obr. 32 - 030 mód místnost s difuzory

## 7 Závěr

V této práci jsem porovnal akustické pole v prázdné místnosti vůči poli v té samé místnosti s akustickou úpravou v podobě čtyř difuzorů se zabudovaným absorbérem na principu Helmholtzova rezonátoru.

Navrhl jsem celkem dvě měření. Jedno zaměřené na difuzní pole, které jsem provedl v místnosti 205 a porovnával jsem v něm akustické pole o rozměrech 75 x 75 cm s rozestupem mikrofonů 5 cm. Druhé měření bylo zaměřené na zkoumání potlačení vlastních módů místnosti, které jsem provedl v místnosti 202a a porovnával jsem v něm akustické pole v celé místnosti s rozestupem mikrofonů 50 cm.

V obou měřeních jsem v navržené mapě změřil impulzní charakteristiku místnosti pro místnost prázdnou a místnost upravenou difuzory. Dále jsem napsal program, který z těchto impulzních odezev vypočítal frekvenční charakteristiku a z těchto hodnot poté zobrazil 3D graf akustického pole místnosti pro zvolenou frekvenci.

Ve vyhodnocení měření difuzního pole jsem zobrazil mapu akustického pole pro případ prázdné místnosti i místnosti s difuzory. Porovnával jsem tuto mapu pro různé frekvence. Bylo zřejmé, že pro frekvence ve funkčním pásu difuzoru rozmístěné difuzory rozbily zvukové vlny a podpořily tak difuznost pole v místnosti. To se však nestalo pro frekvence mimo funkční pás difuzoru, tedy pod 800 Hz.

Ve vyhodnocení měření vlastních módů místnosti jsem v zobrazené mapě akustického pole zaznamenal chtěné potlačení druhého vlastního módu délky místnosti, na který byly naladěny zabudované Helmholtzovy rezonátory v difuzorech. Pokles byl zaznamenaný i na jiných frekvencích než pouze na vlastní frekvenci rezonátorů. To je způsobeno šířkou rezonanční křivky rezonátoru. Potlačením tohoto druhého vlastního módu došlo k vyrovnání frekvenční charakteristiky místnosti. Z analýzy směrodatné odchylky a z rozložení akustického tlaku v histogramu je také patrné, že pro vlastní frekvenci místnosti se vyrovnala hlasitost v různých místech celého prostoru.

## 8 Použitá literatura

- [1] Kolmer, Felix a Jaroslav Kyncl. Prostorová akustika
- [2] Geits, Bohumil. Akustika – jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi
- [3] D'Antonio, Peter and Trevor J. Cox. Acoustic Absorbers and Diffusers
- [4] Foley, Dennis and Mike Sorensen – Sound Waves Vs. Sound Rays And How They Apply To Room Acoustics
- [5] Schimmel, Jiří. Elektroakustika
- [6] Schroeder Frequency Revisted [online]. Dostupné z:  
[http://www.akutek.info/Presentations/MS\\_Schroeder\\_Frequency\\_Pres.pdf](http://www.akutek.info/Presentations/MS_Schroeder_Frequency_Pres.pdf)
- [7] Husník, Libor. Prostorová akustika. [přednáška]. Praha: ČVUT 2015
- [8] Schimmel, Jiří. Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření. [přednáška]. Brno: 20. ledna 2015. Záznam dostupný z:  
<http://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni>
- [9] Kopecký, Petr. Měření a analýza elektroakustických soustav na modelech
- [10] Everest, F. Alton. Master Handbook Of Acoustics
- [11] Kuttruff, Heinrich. Room Acoustics
- [12] Errede, Steven. Acoustics of Small Rooms, Home Listening Rooms, Recording Studios
- [13] Vitvar, Martin. Akustický difúzní prvek s absorpčními rezonátory. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická
- [14] Reverberation Time [online]. Dostupné z:  
<http://www.diracdelta.co.uk/science/source/r/e/reverberation%20time/source.html>
- [15] 17+1/80 diffuser [online]. Dostupné z: [acousticmanufacture.com.pl](http://acousticmanufacture.com.pl)

## 9 Přílohy

Příloha A: Měřené difuzory Laaksum 5x8



Příloha B: Používaná reprobedna VM III – více informací na:  
[http://vmaudio.cz/clanky\\_pokracovani/vma\\_3.php](http://vmaudio.cz/clanky_pokracovani/vma_3.php)

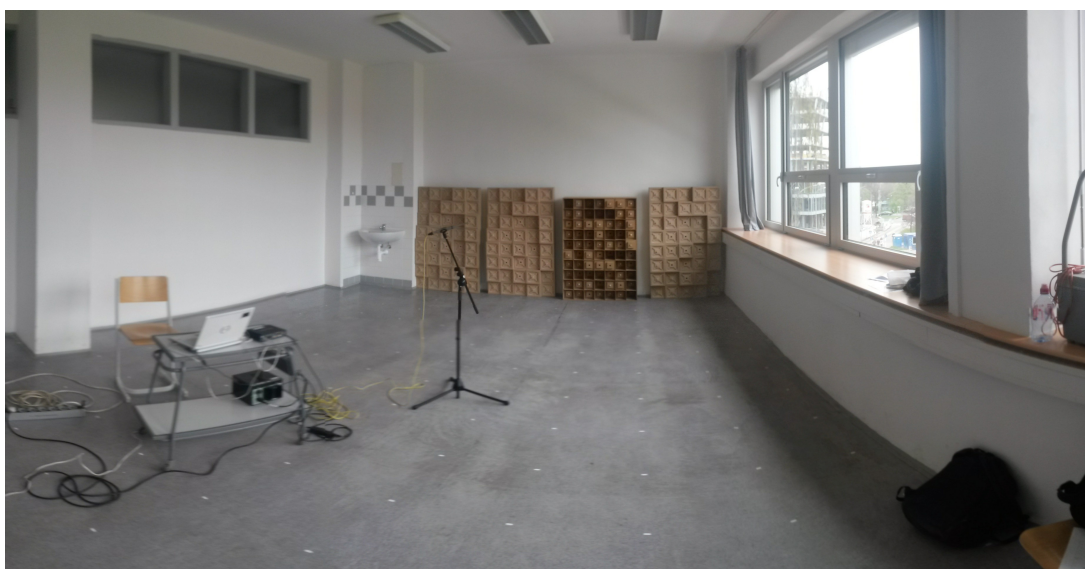




Příloha C: Měření v místnosti 205



Příloha D: Měření v místnosti 202a



Příloha E: Matlab kód vyhodnocení vlastních módů místnosti – téměř stejný kód platí pro vyhodnocení difuzního pole, proto ho neuvádím. Všechny kompletní kódy se nacházejí na přiloženém DVD.

```
clc, close all, clear all;
fs = 44100;
T = 1/fs;
vse(1:165) = 0;           % prealokace
frekvence = 137;        % Volba frekvence
vahovani = importdata('Vahovani.mat'); % Vahovani dle dat z Easery

for c = 1:165
soubor = sprintf('%d.wav', c);
[odezva_orig] = wavread(soubor);

% % % Oprava poskozene imp odezvy
posunuti = 3438;          % Kolik zezadu posunout dopredu
odezva_orig = odezva_orig(1:131072); % Nacist pouze uzitecny signal
odezva_zacatek = odezva_orig(end-posunuti:end);
odezva_zacatek = odezva_zacatek';
odezva_orig = odezva_orig';
odchylka = (length(odezva_zacatek) + length(odezva_orig)) - 131072;
odezva = [odezva_zacatek odezva_orig(1:end-odchylka)];
odezva = odezva';

%%%%%% Vahovani, ctvercove okno
odezva = odezva_orig.*vahovani(c);
% odezva = odezva(1:0.5*fs); % případné použití okna

L = length(odezva);      % délka signálu
doba = L/fs;             % doba signálu v sekundách
t = (0 : 1/fs : doba-1/fs);
spektrum = fft(odezva);
znamenko = sign(real(spektrum));
P2 = abs(spektrum/L)*1000; % Dvoustranné spektrum
```

```

% P2 = znamenko.*P2;          % Pro případ zachování znaménka
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1); % jednostranné spektrum
f = fs*(0:(L/2))/L;
for g = 1:length(frekvence)
vse(g,c) = P1(frekvence(g));
end
end
%% Směrodatná odchylka
prumer = sum(vse(1:end))/length(vse);
s = sqrt( (1 / (length(vse)-1)) * (sum((vse-prumer).^2)));

%% Grafy odchylka
xbins = 00:0.05:1;          % Rozlišení x osy
clear sloupce;
sloupce(:,1) = hist(vseP,xbins);
sloupce(:,2) = hist(vse,xbins);
gw = 0.8 ;                 % Vzdálenost sloupců
mezera = xbins(2) - xbins(1);

fig(1) = bar(xbins-(mezera*gw/4),sloupce(:,1),gw/2,'b') ;
hold on ;
fig(2) = bar(xbins+(mezera*gw/4),sloupce(:,2),gw/2,'r') ;
hold off ;
axis([-0.03 0.28 0 65]);
xlabel('Akustický tlak [Pa]', 'fontname', 'verdana');
ylabel('počet hodnot', 'fontname', 'verdana');
l = legend('Bez difuzorů', 'S difuzory');

barva1 = [234 176 176];
barva1 = barva1 ./ max(barva1);
barva2 = [190 234 176];
barva2 = barva2 ./ max(barva2);

```

```

barva3 = [228 242 253];
barva3 = barva3 ./ max(barva3);
whitebg(barva3);
set(fig(1),'FaceColor',barva1) ;
set(fig(2),'FaceColor',barva2) ;

%% Graf v Prurezu
rada = 6;      %Jaká řada k zobrazení
rozliseni_sloupce = 15;

for q = 1:length(frekvence)
tlak(1:rozliseni_sloupce) = 0;      %prealokace
for i = 1:rozliseni_sloupce
    y = 16-i;      % Y - souradnice
    qq = rada-((1-i)*11)
    tlak(y) = vse(q,qq);
end
xosa = (20:50:720)./100;      % X osa v metrech
figure(1);
plot(xosa,tlak,'bo--');
axis([0 7.40 0 1.8]);
xlabel('vzdálenost od zdi [m]', 'fontname', 'verdana');
ylabel('Akustický tlak [Pa]', 'fontname', 'verdana');
barva3 = [228 242 253];
barva3 = barva3 ./ max(barva3);
whitebg(barva3);
end

%% 3D graf
rozliseni_rady = 11;      %Kolik měření proběhne v jedné řadě
rozliseni_sloupce = 15;
pocet_mereni = rozliseni_rady * rozliseni_sloupce;

```

```

for q = 1:length(frekvence)
    tlak(1:rozliseni_sloupce, 1:rozliseni_rady) = 0;           %prealokace
    for i = 1:pocet_mereni
        x = i-11*floor((i-1)/11)           % X - souradnice
        y = 1+floor((166-i-1)/11)         % Y - souradnice

        tlak(y,x) = vse(q,i);
    end

    figure1 = figure;
    axes1 = axes('Parent',figure1);
    hold(axes1,'all');
    figure(1);
    contourf(tlak,280,'LineStyle','none');
    axis equal tight;
    caxis ([0 0.35]);
    h = colorbar('position',[0.83 0.12 0.04 0.8]);
    ylabel(h, 'Akustický tlak [Pa]', 'fontname', 'verdana');

    jmeno = round(f(frekvence(q))); %nazev podle velikosti frekvence
    jmeno = frekvence(q);
    jmeno = [jmeno];
    nazev = sprintf('%d.png', jmeno);
    % saveas(figure1, nazev);           % Ulozeni grafu
    close all;
end

```

Příloha F: Tabulka zobrazených grafů vlastních módů v dB vůči jejich min hodnotě

<b>Mód 020, 155 cm, prázdná místnost</b>											
<b>15</b>	19,1	18,3	18,9	19,1	19,3	19,2	19,8	19,7	20,5	20,1	20,1
<b>14</b>	17,6	17,5	17,0	17,7	17,9	18,8	18,4	19,5	19,7	20,1	19,8
<b>13</b>	16,3	15,5	16,0	15,7	15,6	15,9	16,3	17,4	18,1	18,8	19,0
<b>12</b>	12,2	8,9	8,2	7,5	2,9	3,8	7,2	10,7	12,7	13,9	15,8
<b>11</b>	10,1	15,8	16,2	15,9	15,8	16,7	15,5	15,1	14,9	13,9	10,7
<b>10</b>	20,4	20,0	18,7	19,2	18,2	17,9	18,3	18,3	18,0	18,0	18,0
<b>9</b>	19,8	19,7	19,5	19,0	20,3	19,2	18,8	18,6	19,2	20,1	20,4
<b>8</b>	19,9	19,7	19,7	18,8	20,0	19,7	19,4	20,3	19,7	20,2	20,2
<b>7</b>	19,3	19,5	18,7	18,3	19,0	19,1	19,4	18,5	20,1	19,6	19,5
<b>6</b>	17,3	17,8	16,4	17,0	16,9	16,6	16,6	18,4	18,3	18,6	19,1
<b>5</b>	11,3	10,0	7,6	10,2	8,3	10,4	11,0	13,3	14,4	16,1	16,9
<b>4</b>	14,8	14,9	15,0	15,6	14,5	14,8	14,2	12,7	11,1	5,9	5,5
<b>3</b>	17,8	17,2	17,6	18,0	18,2	17,3	17,3	16,8	16,2	15,7	14,3
<b>2</b>	19,9	19,9	20,8	20,2	19,9	18,8	19,3	19,5	18,9	18,7	17,4
<b>1</b>	19,3	20,1	20,8	20,1	20,6	21,5	19,6	20,3	19,7	18,6	18,8
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

<b>Mód 020, 155 cm, místnost s difuzory</b>											
<b>15</b>	13,5	13,4	13,7	13,7	14,1	13,9	14,5	13,9	15,3	14,5	15,3
<b>14</b>	13,2	12,8	12,8	12,3	13,0	13,2	13,7	13,9	14,2	13,9	14,2
<b>13</b>	12,7	12,7	11,7	10,5	11,0	11,8	11,4	12,0	12,5	13,2	14,0
<b>12</b>	11,7	10,6	9,4	6,8	4,8	0,0	4,5	5,1	8,7	10,4	11,2
<b>11</b>	11,0	11,0	11,7	12,0	11,8	9,5	10,0	9,2	9,5	10,6	9,8
<b>10</b>	13,5	13,5	13,4	13,4	12,9	13,4	12,4	13,0	13,7	13,6	13,6
<b>9</b>	14,7	14,3	14,3	14,0	13,6	13,9	14,4	13,2	14,6	14,7	14,7
<b>8</b>	15,3	14,9	14,1	14,5	14,3	14,2	14,4	14,0	14,5	14,0	14,9
<b>7</b>	13,8	13,9	13,4	13,5	13,7	13,4	13,7	13,3	14,4	14,4	14,7
<b>6</b>	12,8	11,2	11,3	10,9	11,6	11,1	10,8	12,7	12,6	12,3	13,9
<b>5</b>	7,9	6,4	5,7	5,7	5,7	6,0	7,4	9,4	9,1	9,5	10,9
<b>4</b>	11,1	10,0	10,2	10,5	8,6	8,3	8,5	7,8	5,2	4,3	7,2
<b>3</b>	14,0	12,9	13,6	12,7	12,1	13,3	12,3	11,4	10,9	9,9	9,4
<b>2</b>	14,9	14,2	14,7	14,8	14,9	14,6	14,2	13,2	12,8	13,6	13,3
<b>1</b>	14,6	15,2	15,8	15,7	14,9	15,9	14,3	14,0	14,3	13,0	13,8
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

<b>Mód 020, 111 cm, prázdna miestnosť</b>											
15	22,7	22,4	22,1	23,1	23,3	23,5	23,3	23,8	24,4	24,1	23,6
14	21,6	22,1	22,2	21,7	21,5	23,5	23,0	22,4	22,9	23,7	23,7
13	20,6	19,8	19,9	20,0	19,4	21,2	20,1	20,3	21,0	21,7	22,3
12	16,6	13,4	7,8	6,5	10,6	12,7	13,4	13,7	15,0	16,2	17,9
11	13,1	18,7	19,7	19,1	19,0	18,7	18,0	19,0	17,3	17,8	16,1
10	23,7	23,5	22,1	22,4	22,4	21,3	22,5	21,6	21,4	21,4	21,5
9	24,7	24,1	23,6	23,1	23,0	22,6	23,4	22,7	22,7	22,2	23,4
8	23,8	24,0	22,9	23,2	23,8	23,8	24,0	23,2	23,3	24,2	23,5
7	23,3	21,7	22,7	22,7	22,4	23,1	22,5	23,3	23,2	24,2	23,3
6	21,6	20,5	20,7	20,2	19,8	21,5	21,5	21,6	21,8	22,4	23,5
5	14,3	12,9	12,9	12,4	11,7	13,4	17,0	17,9	19,6	19,2	19,8
4	18,6	18,9	19,3	19,1	19,2	17,6	17,6	16,6	13,9	7,0	9,7
3	23,0	21,8	22,7	22,5	23,0	22,4	21,4	21,1	20,3	20,0	19,7
2	23,8	23,4	24,0	23,0	24,0	24,1	23,6	23,5	24,0	21,4	22,8
1	23,6	23,6	24,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,8	24,8	22,7	23,8
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

<b>Mód 020, 111 cm , miestnosť s difuzory</b>											
15	17,1	16,3	16,4	17,6	18,7	19,7	18,8	18,6	18,2	18,2	17,7
14	16,5	16,0	16,1	16,5	17,8	18,5	18,3	17,6	17,1	17,3	17,6
13	14,8	14,5	13,1	14,8	15,2	16,3	16,0	16,4	15,9	15,8	16,5
12	13,7	12,7	9,9	0,0	8,9	11,1	12,7	10,9	11,0	11,8	13,0
11	13,2	12,9	14,2	14,2	13,3	12,8	12,6	13,0	11,8	12,1	11,9
10	18,7	17,1	16,3	15,9	16,5	15,7	16,2	17,5	15,9	16,0	16,5
9	18,4	17,9	17,9	17,2	16,9	16,5	16,5	17,6	17,4	17,3	17,6
8	17,7	17,1	17,2	17,0	17,7	17,3	17,8	17,4	16,6	17,8	18,8
7	17,1	17,0	17,0	16,1	16,9	17,0	16,5	17,1	17,9	18,4	17,7
6	14,7	15,4	15,6	15,2	14,9	14,3	14,9	16,1	16,8	16,3	17,0
5	10,0	10,0	9,9	9,8	8,5	9,8	11,1	12,3	12,6	13,5	14,2
4	14,6	14,7	13,4	14,5	14,2	13,2	11,3	11,2	9,1	8,0	7,0
3	17,0	16,9	16,5	16,6	16,7	15,2	15,8	15,7	14,8	15,4	14,6
2	17,0	18,0	18,0	17,7	17,8	17,9	17,8	17,7	17,8	16,4	16,0
1	18,9	18,5	18,6	19,7	17,7	18,0	18,1	18,3	18,0	17,4	16,9
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>



<b>Mód 100, 155 cm, prázdna miestnosť</b>											
<b>15</b>	13,8	11,9	11,0	11,4	8,3	3,8	4,1	9,3	12,4	14,5	12,3
<b>14</b>	12,7	12,4	11,6	12,4	10,9	5,6	5,1	10,2	10,3	10,0	12,9
<b>13</b>	13,5	12,5	12,1	12,8	8,9	4,7	6,5	10,3	11,5	11,7	12,8
<b>12</b>	8,8	13,8	13,1	11,4	10,0	5,6	4,9	9,9	12,6	13,0	14,7
<b>11</b>	13,5	12,5	13,7	11,3	8,8	7,7	4,6	9,5	11,0	12,3	13,0
<b>10</b>	14,1	13,4	11,8	12,6	9,5	5,0	6,5	10,1	12,2	11,4	12,1
<b>9</b>	11,6	13,3	12,1	11,1	9,6	4,5	4,8	7,5	12,0	13,6	12,9
<b>8</b>	12,3	11,4	11,4	10,3	10,6	4,1	3,1	7,4	11,8	12,4	12,5
<b>7</b>	12,1	14,2	15,8	10,1	9,8	7,5	2,0	6,9	12,3	12,1	11,4
<b>6</b>	14,5	14,5	12,2	11,6	7,3	4,7	4,3	9,1	11,1	12,9	11,6
<b>5</b>	13,2	13,9	11,2	10,9	8,4	3,5	6,2	9,4	11,7	13,9	11,5
<b>4</b>	13,5	14,2	11,6	11,8	7,8	3,4	3,6	10,4	12,8	11,8	11,1
<b>3</b>	13,3	11,2	13,0	11,2	8,5	1,6	6,6	8,5	12,3	13,0	12,4
<b>2</b>	12,8	13,9	12,8	10,5	9,9	0,9	7,4	9,9	12,5	8,7	14,0
<b>1</b>	9,9	11,2	11,0	8,0	8,5	5,6	5,0	10,0	11,6	11,1	12,2
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

<b>Mód 100, 155 cm, miestnosť s difuzory</b>											
<b>15</b>	12,2	8,6	8,3	9,9	6,7	2,6	3,1	9,2	11,0	10,9	10,1
<b>14</b>	9,6	11,9	13,0	3,0	7,5	3,3	3,0	7,8	10,0	8,8	12,5
<b>13</b>	11,5	13,2	14,1	7,1	6,2	4,1	1,5	6,4	10,1	11,5	12,1
<b>12</b>	10,4	11,1	12,4	11,0	8,5	4,0	3,9	8,8	11,1	9,9	10,3
<b>11</b>	11,0	12,4	11,6	10,6	9,8	3,7	5,8	5,0	10,3	12,8	11,7
<b>10</b>	7,9	12,0	12,7	11,3	8,1	5,2	2,1	7,3	7,0	10,2	12,3
<b>9</b>	12,8	13,9	10,3	11,2	5,7	3,6	2,8	6,2	9,3	11,7	11,3
<b>8</b>	13,5	9,5	11,4	10,5	4,7	4,1	4,2	5,7	10,7	11,3	11,2
<b>7</b>	13,3	11,7	14,1	11,0	8,5	3,0	1,8	8,7	10,2	11,8	10,6
<b>6</b>	13,2	12,7	8,1	10,6	9,1	1,7	4,3	7,9	11,5	8,6	11,3
<b>5</b>	15,0	10,5	10,2	10,6	6,9	0,0	5,2	9,6	10,9	9,7	11,2
<b>4</b>	14,2	9,9	9,5	8,8	2,3	0,6	3,1	10,1	10,5	10,9	10,7
<b>3</b>	10,7	11,7	11,8	8,6	5,5	3,6	5,7	8,5	10,3	10,3	9,9
<b>2</b>	12,7	9,6	11,4	10,2	6,8	2,0	6,5	7,3	10,8	11,4	10,9
<b>1</b>	12,9	12,6	10,7	10,4	10,3	3,1	4,7	7,2	10,9	10,7	11,8
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

<b>Mód 110, 111 cm, prázdná místnost</b>											
15	16,9	16,2	14,9	14,5	11,6	11,5	12,2	14,0	15,2	15,6	15,1
14	16,9	16,7	16,1	13,7	12,1	10,3	12,0	12,4	14,4	15,5	16,0
13	16,8	16,5	15,9	15,1	11,2	8,8	9,1	12,3	13,8	15,1	15,2
12	16,3	16,0	14,6	13,8	11,3	6,4	7,3	10,3	13,0	13,6	14,1
11	16,2	14,9	14,2	13,0	10,7	6,8	4,7	10,0	10,8	12,8	13,0
10	9,5	12,3	11,9	11,2	10,1	6,2	5,8	7,8	9,4	9,8	9,4
9	8,7	8,5	8,7	8,2	7,2	6,0	5,6	5,6	5,9	5,2	6,1
8	9,0	8,8	7,0	6,4	6,1	6,0	6,3	5,6	6,0	7,7	7,2
7	11,5	10,1	10,3	8,8	7,1	5,4	4,7	7,4	8,8	10,3	10,3
6	13,4	12,7	12,1	10,6	8,0	6,1	5,4	8,8	10,3	11,6	12,5
5	14,2	14,1	13,4	12,3	9,6	6,2	4,4	9,8	12,9	12,6	13,6
4	14,8	14,4	14,4	13,0	11,6	7,0	5,2	10,5	12,3	13,1	14,0
3	16,0	15,1	14,8	13,8	12,5	9,1	5,9	10,6	12,6	13,8	14,7
2	16,1	15,3	14,9	12,8	12,6	10,1	7,4	11,0	14,5	13,4	15,9
1	15,1	15,0	14,4	13,8	12,1	9,8	7,6	11,1	14,4	14,3	15,6
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

<b>Mód 110, 111cm, místnost s difuzory</b>											
15	15,6	14,6	13,9	12,5	9,3	11,3	11,4	12,0	12,6	13,0	13,2
14	15,3	14,7	13,8	12,1	9,4	9,3	10,6	11,1	12,6	12,4	13,3
13	14,6	14,7	13,3	12,5	8,3	6,0	8,2	10,7	12,5	12,5	13,2
12	14,3	13,9	12,9	11,7	9,4	4,4	5,7	8,2	11,1	11,7	11,9
11	14,2	12,3	12,4	11,1	9,1	5,2	0,0	7,3	7,9	8,8	10,5
10	10,0	10,8	10,8	9,3	8,3	5,9	3,6	6,1	6,8	8,0	8,0
9	8,5	8,2	8,6	7,8	6,8	5,4	3,7	4,3	5,4	4,2	4,5
8	7,6	5,9	5,9	5,9	5,6	5,3	5,5	5,0	4,2	5,9	6,8
7	8,7	8,2	7,4	5,6	4,9	3,4	4,2	6,0	7,6	8,6	8,2
6	9,9	11,1	10,8	9,1	5,9	2,1	3,0	7,3	8,9	9,4	10,4
5	11,6	12,3	11,9	10,9	8,4	4,5	2,4	7,4	8,4	10,8	11,4
4	13,8	13,8	12,1	12,4	10,7	7,5	2,0	7,8	10,5	11,8	11,9
3	14,6	14,1	13,1	12,2	10,9	7,3	4,5	8,9	10,1	12,8	13,9
2	13,5	14,3	14,1	12,2	11,3	9,1	6,2	9,3	12,1	12,8	13,0
1	15,0	13,9	13,8	13,9	11,2	10,1	6,2	9,5	12,3	12,8	13,2
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>