

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akustické úpravy poslechové místnosti

Autor práce: **Bc. Martin Landgráf**
Vedoucí práce: **Ing. Stanislav Bouzek**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin LANDGRÁF**
Osobní číslo: **E21N0032P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Akustické úpravy poslechové místnosti**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte možnosti akustických úprav poslechových prostorů pro reprosoustavy formátu 2.0 a 5.1
2. Navrhňte akustické úpravy místnosti EK708 tak, aby splňovala požadavky normy ČSN 73 0526 pro zvukovou režii.
3. Vybrané akustické úpravy realizujte a ověřte výsledné parametry.

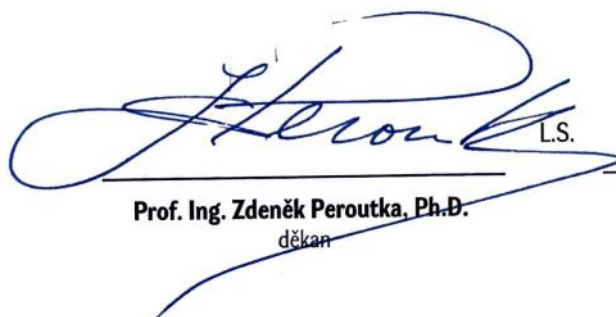
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Norma ČSN 73 0526 – Projektování v oboru prostorové akustiky – Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku.
2. M. Krňák. Akustické obklady.
3. F. Kolmer, J. Kyncl. Prostorová akustika.
4. T.J. Cox, P. D'Antonio. Acoustic Absorbers and Diffusers.
5. M. Long, Architectural Acoustics.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a konstrukci Helmholtzova rezonátoru pro poslechovou místnost. V úvodu práce jsou probrány základní teoretické znalosti z prostorové akustiky. Dále jsou shrnuty požadavky na poslechovou místnost z hlediska příslušných norem a popsány základní uspořádání reproduktorových sestav. Další části práce se věnují teorii pro návrh Helmholtzova rezonátoru a seznámení se současným stavem místnosti. Na základně teoretických výpočtů byl navržen Helmholtzův rezonátor a po realizaci byly změřeny jeho skutečné vlastnosti. Výsledky měření jsou zhodnoceny v závěru práce.

Klíčová slova

prostorová akustika, Helmholtzův rezonátor, laťový rezonátor, doba dozvuku, rezonanční frekvence, akustické prvky, akcelerometry, vlastní kmity

Abstract

This master thesis is focused on the design and construction of a Helmholtz resonator for a listening room. The introduction discusses basic theoretical knowledge from spatial acoustics. Furthermore, the requirements for the listening room in terms of relevant standards are summarized, and the basic arrangements of speaker setups are described. Next parts of the work are devoted to the theory for the design of a Helmholtz resonator and familiarization with the current state of the room. Based on theoretical calculations, a Helmholtz resonator was designed, and its actual properties were measured after implementation. The measurement results are evaluated in the conclusion of the work.

Key words

room acoustics, Helmholtz resonator, slotted panel, reverbation time, resonant frequency, acoustic elements, accelerometers, normal modes

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomové práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 26.5.2023

Bc. Martin Landgráf

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 PARAMETRY URČUJÍCÍ AKUSTICKOU KVALITU PROSTORU	11
1.1 DOBA DOZVUKU.....	11
1.2 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	12
1.3 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU.....	12
1.4 VLASTNÍ KMITY.....	13
2 POŽADAVKY NA POSLECHOVOU MÍSTNOST Z HLEDISKA NOREM	15
2.1 HLUK POZADÍ A ZVUKOVÁ IZOLACE.....	15
2.2 POSLECHOVÉ MÍSTO.....	16
2.3 DOBA DOZVUKU.....	17
2.4 VLIV VZDÁLENOSTI REPRODUKTORŮ OD STĚN A ODRAŽENÉ VLNY.....	18
3 REPRODUKTOROVÉ SESTAVY	20
3.1 MONO.....	20
3.2 STEREO.....	20
3.3 PROSTOROVÝ ZVUK.....	21
3.4 DOLBY SURROUND, DOLBY ATMOS.....	22
4 MOŽNOSTI AKUSTICKÝCH ÚPRAV	24
4.1 HELMHOLTZŮV REZONÁTOR A DĚROVANÉ DESKY.....	24
4.2 PORÉZNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO POHLCOVÁNÍ ZVUKU.....	27
5 POSLECHOVÁ MÍSTNOST EK708	29
5.1 SOUČASNÝ STAV MÍSTNOSTI EK708.....	29
5.2 PŘEDEŠLÁ ŘEŠENÍ POSLECHOVÉ MÍSTNOSTI EK708.....	30
5.3 VÝCHOZÍ STAV MÍSTNOSTI.....	31
5.4 DŮVOD STAVBY REZONÁTORU.....	32
5.4.1 <i>Návrh</i>	32
5.4.2 <i>Realizace</i>	34
6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MÍSTNOSTI PO INSTALACI REZONÁTORU	37
6.1 VÝSLEDKY – DOBA DOZVUKU PROSTORU.....	38
7 MĚŘENÍ PARAMETRŮ REPROSOUSTAVY	40
7.1 EXPERIMENT K OVĚŘENÍ VLIVU VZDÁLENOSTI REPRODUKTORU OD STĚNY.....	40
7.2 MĚŘENÍ VLIVU ROZESTAVENÍ REPRODUKTORU VŮČI POSLECHOVÉMU MÍSTU.....	42
7.3 MĚŘENÍ VIBRACÍ NA ČELNÍCH PLOCHÁCH REZONÁTORU.....	46
7.3.1 <i>Na úzkých deskách</i>	47
7.3.2 <i>Na širokých deskách</i>	47
7.3.3 <i>Jedna deska měřené ve třech bodech</i>	48
8 DALŠÍ POTŘEBNÉ AKUSTICKÉ ÚPRAVY	50
9 ZÁVĚR	52

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	53
PŘÍLOHY	1

Úvod

Na kvalitu poslechu hudby má velký vliv prostor, ve kterém se nacházíme. Akustické parametry prostoru jsou ovlivněné řadou faktorů, mezi něž patří jeho rozměry a geometrie, použité materiály, konstrukce stěn a vnitřní vybavení. Touto problematikou se zabývá obor prostorové akustiky, který popisuje šíření zvuku a vlastnosti akustického pole v uzavřených prostorech. Často se klade důraz pouze na výběr kvalitní reprosoustavy a pak se může stát, pokud prostor není dostatečně akusticky ošetřen, že po nákupu kvalitní a finančně nákladné reprosoustavy dojem ze zvukového projevu nesplní očekávání.

Při návrhu akusticky náročného poslechového prostoru je důležité správné rozmístění reproduktorů. Je nutné mít na paměti, že umístěním reproduktorů v příliš malé vzdálenosti od stěny dojde k nárůstu zvukové energie na nízkých frekvencích, při umístění v rohu místnosti může tento nárůst dosáhnout až 18 dB. Z tohoto důvodu mají některé typy reproduktorů možnost korekce na basových frekvencích o -3, -6 a -9 dB. Každý objekt v prostoru jako například nábytek, obrazy nebo koberec mohou pohlcovat určité frekvenční pásmo zvukové energie. Může se pak stát, že se zvýrazní nebo potlačí určité frekvenční pásmo, což má za následek zhoršení poslechového vjemu. V takovém případě je potřeba zvýrazněné pásmo utlumit přemístěním objektu nebo přidáním vhodného akustického prvku, který má v potřebném frekvenčním pásmu dostatečně vysokou hodnotu činitele zvukové pohltivosti. Dalším důležitým parametrem je rovnoměrné rozložení akustického pole alespoň v prostoru kolem uvažovaného poslechového místa.

Práce se zabývá poslechovou místností EK708, která je na ZČU FEL průběžně připravována. Pro vybranou místnost bude na základě výsledků měření doby dozvuku řešeného prostoru navržen vhodný Helmholtzův rezonátor a jeho parametry budou po realizaci ověřeny následným měřením. Bude experimentálně zkoumán i vliv vzdálenosti reproduktoru od stěny. Teoretická část práce je čerpaná z uvedené literatury, praktická část vychází ze znalostí získaných z učiva zaměřeného na akustiku v bakalářském a navazujícím studiu.

Seznam symbolů a zkratk

α	Činitel zvukové pohltivosti.
α_S	Činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad.
W_I	Dopadající energie na překážku.
W_3	Odražená energie od překážky.
W_4	Pohlčená energie překážkou.
L_p	Hladina akustického tlaku.
T_E	Doba dozvuku podle Eyringa.
m_t	Činitel útlumu ve vzduchu.
p	Akustický tlak.
p_0	Referenční akustický tlak $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.
f_n	Vlastní kmity prostoru.
f_k	Kritická frekvence prostoru.
f_r	Rezonanční frekvence.
c	Rychlost šíření zvuku ve vzduchu 340 m/s.
c_a	Akustická poddajnost.
m_a	Akustická hmotnost.
R_a	Akustická odpor.
λ	Vlnová délka.

1 Parametry určující akustickou kvalitu prostoru

K zajištění dobrých akustických podmínek uzavřeného prostoru je důležité sledovat dobu dozvuku, která je dána poklesem zvukové energie po vypnutí zdroje. Ke zkrácení doby dozvuku se používají vhodné akustické obklady s vyšší zvukovou pohltivostí.

1.1 Doba dozvuku

Doba dozvuku je hlavním objektivním kritériem pro hodnocení kvality subjektivního vnímání zvuku v uzavřeném prostoru a udává čas potřebný k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB [1]. Dozvuk je definován jako dokmitávání stojatých vln různých frekvencí (tzv. módů), které byly předtím v prostoru nějakým způsobem vybuzeny. Po vypnutí zdroje zvuku, zvuk v uzavřeném prostoru ještě po určitou dobu doznívá a až po nějaké době je veškerá akustická energie absorbována povrchy prostoru a vzduchem uvnitř prostoru. Pokud je v uzavřeném prostoru příliš dlouhá doba dozvuku, řeč se stává nesrozumitelnou následkem přílišného směšování signálů, naopak pokud je doba dozvuku krátká, přímý zvuk není doplněn o odrazy a subjektivně zní jako ve volném prostoru [2]. Existují tři možnosti výpočtu doby dozvuku: podle Sabina, podle Millingtona, podle Eyringa [1].

Pro prostory z materiálů s malým činitelem zvukové pohltivosti stěn se používá Sabineův vzorec, který ale ve více tlumených prostorách vznikem chyb už použít nelze. Pro výpočet doby dozvuku v prostorech s velkým činitelem zvukové pohltivosti stěn (až do $\alpha = 0,8$) se používá výpočet podle Eyringa z následujícího vztahu (1.1) [3].

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_s) + 4m_t V} \quad [s]. \quad (1.1)$$

V – Objem místnosti v m^3 .

S – Plocha ohraničujících stěn v m^2 .

α_s – Střední činitel zvukové pohltivosti v prostoru.

m_t – Činitel útlumu ve vzduchu v m^{-1} (může se zanedbat v auditoriích s objemem menším než 2000 m^3).

1.2 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α je bezrozměrné číslo pohybující se v intervalu od 0 do 1. U překážky, která všechnu dopadající energii zvukové vlny odrazí je činitel rovný 0, naopak dokonale zvuk pohlcující překážka má činitel rovný 1. Činitel zvukové pohltivosti udává poměr pohlcené energie k energii dopadající na překážku a je dán rovnicí (1.2) [3].

$$\alpha = \frac{W_4}{W_1} = \frac{W_1 - W_3}{W_1} = 1 - |\beta|^2 \quad [-]. \quad (1.2)$$

W_4 – Pohlcená energie.

W_3 – Energie odražená.

W_1 – Dopadající energie.

β – Činitel zvukové odrazivosti.

Při dopadu akustické energie na překážku se část energie odrazí a část se pohltí. Pohlcená energie se rozdělí na dvě části. První část se přemění na teplo a druhá část projde skrz překážku a prochází do prostoru za ní.

1.3 Hladina akustického tlaku

Hladina akustického tlaku je mírou intenzity zvuku udávaná se v decibelech (dB). Popisuje, jak silný je zvuk v určitém místě v porovnání s referenční úrovní, která je stanovena na 20 mikropascalů (μPa) pro zvuk při frekvenci 1000 Hz.

Hladina akustického tlaku se měří pomocí zvukoměru, který je citlivý na změny tlaku ve vzduchu. Při měření se určuje rozdíl mezi měřeným tlakem a referenčním tlakem a výsledek se převádí na logaritmickou škálu decibelů a je dán rovnicí (1.3)

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [dB]. \quad (1.3)$$

p – Naměřený tlak.

p_0 – Referenční tlak.

Hladina akustického tlaku se používá k popisu hlasitosti zvuku, definování úrovně prahu slyšení pro lidské ucho nebo naopak hranici bolesti při hodnotě kolem 120 dB, nad 140 dB způsobuje trvalé poškození sluchu.

1.4 Vlastní kmity

Uzavřený prostor, stejně jako každé mechanické těleso, má vlastní kmity a ty jsou vybudeny v případě rovnosti budícího kmitočtu s vlastním kmitočtem prostoru. K dobrému přenosu zvuku je nutné zajistit co největší množství vlastních kmitů ve slyšitelném pásmu. Vlastní kmity jednoduché kvádrové místnosti jsou závislé na jejich rozměrech a lze je vypočítat z následujícího vztahu (1.4).

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_c}{c}\right)^2} \quad [\text{Hz}]. \quad (1.4)$$

c – Rychlost šíření zvuku ve vzduchu v m/s.

n_a, n_b, n_c – Libovolně zvolená kombinace celých čísel 0, 1, 2, ...

a, b, c – Rozměry uvažovaného prostoru v m.

Pro každou zvolenou kombinaci celých čísel vypočítáme jeden vlastní kmit prostoru, získáme tak nekonečnou řadu kmitočtů, která je směrem k vyšším frekvencím stále hustší. Na každém takto vypočteném kmitočtu vzniká rezonance a tím je zdůrazňován přenášený signál [3].

Na nízkých frekvencích je počet vlastních kmitů nízký, a to má za následek nerovnoměrné rozložení akustického pole v prostoru, tedy střídání minim a maxim akustického tlaku. Proto se uvádí kritický kmitočet definován vztahem (1.5), od kterého už lze považovat rozložení vlastních kmitů za dostatečně rovnoměrně rozložené a akustické pole lze označovat za difúzní [1].

$$f_k = 2000 \sqrt{\left(\frac{T}{V}\right)} \quad [\text{Hz}]. \quad (1.5)$$

T – Průměrná doba dozvuku v s.

V – Objem místnosti v m³.

2 Požadavky na poslechovou místnost z hlediska norem

Cílem projektování v oboru prostorové akustiky je vytvořit optimální podmínky pro poslech a snímání hudby nebo řeči. Požadavky na akustiku uzavřeného prostoru vyplývají z účelu, ke kterému má prostor sloužit, u nichž kvalita poslechových podmínek či akustická pohoda hraje významnou roli. Týká se to nejen koncertních sálů, operních divadel, přednáškových sálů, nahrávacích studií ale i různých společenských a veřejných prostorů jako jsou sportovní haly, nádraží, či letištní haly. K definování požadavků se využijí dostupné normy – ČSN 73 0525 [4], ČSN 73 0526[5], ČSN 73 0527[6].

Norma ČSN 73 0525 stanovuje obecné zásady pro projektování akustiky uzavřených prostorů, určených k poslechu hudby a řeči v nově budovaných nebo zrekonstruovaných objektech. Uvádí hlavní opatření z hlediska stavební akustiky [4].

Norma ČSN 73 0526 uvádí zásady řešení studií a režii z hlediska požadavků na zvukovou izolaci a z hlediska požadavků na kvalitu podmínek pro snímání a poslech zvuku. Jsou uvedeny měřicí postupy, jimiž lze dodržení potřebných akustických vlastností kontrolovat [5].

Norma ČSN 73 0527 stanovuje hlavní zásady pro projektování a realizaci uzavřených prostorů pro kulturní účely, prostorů ve školách a veřejných účelů. Platí jak pro nové tak i pro adaptované prostory, kde akustika hraje významnou roli [6].

2.1 Hluk pozadí a zvuková izolace

Nejvyšší přípustné maximální hladiny akustického tlaku pozadí ve studiích a v režiiích $L_{p\ max}$ jsou závislé na způsobu využití místností. Hluk pozadí nepříznivě ovlivňuje poslechové podmínky pro srozumitelnost řeči a hudbu. Souhrnně jsou nejvyšší přípustné hladiny akustického tlaku v oktákových kmitočtových pásmech pro jednotlivé typy místností, rozdělených do skupin 1 až 4, uvedeny v tabulce 1 [5].

Tabulka 1: Rozdělení studií a režii do skupin podle nejvyšší přípustné maximální hladiny akustického tlaku pozadí $L_{p\max}$ (dB), převzato z [5].

Střední kmitočet okt. pásma (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1 (hlasatelny, činoherní studia)	37	24	16	12	10	10	10	10
2 (hudební a diskusní studia)	41	29	21	16	12	10	10	10
3 (televizní a filmová studia, režie)	45	34	26	20	16	13	12	12
4 (místnosti pro střih, přepis apod.)	48	38	31	24	20	17	15	15

Požadavky na zvukovou izolaci místností a na neprůzvučnost obvodových stěn, vyplývají z požadované nejvyšší přípustné maximální hladiny akustického tlaku pozadí v místnosti a zjištěných či předpokládaných hladin akustického tlaku hlukového pozadí v daném místě.

2.2 Poslechové místo

U místnosti určené pro zpracování zvuku a kritický poslech je třeba se zaměřit na kvalitu poslechových podmínek v předpokládaném poslechovém místě. Aby odrazy zvukových vln od hraničních ploch neovlivňovaly barvu zvuku či lokalizaci zdrojů reprodukováného originálu. Většinou jsou rozměry místnosti pro poslech menší, než rozměry místnosti, ve které byl zvuk snímán, a proto je potřeba vhodně ošetřit blízké plochy v poslechové místnosti. Na základě požadovaného zatlumení místnosti je třeba upravit strop a stěny přidáním vhodné kombinace obkladů, které pohlcují nebo rozptylují zvuk [4].

Ideálně by poslechová místnost měla mít symetrické zvukového pole podle svislé osy roviny procházející místem poslechu a kolmé ke spojnici reproduktorových sestav. V případě nesymetrie vzniká zkreslení poslechu především z hlediska lokalizace jednotlivých zdrojů zvuku originálu a je tedy nutné věnovat úpravě omezujících ploch zvýšenou pozornost.

Stropní plocha by měla být tvarována tak, aby stropní odrazy pomáhaly vytvořit rovnoměrné rozložení hustoty zvukové energie po poslechové ploše. Je nutné zejména vyšetřit oblast nad předpokládanými polohami zdroje zvuku a v oblasti před zadní stěnou, odkud by se při nevhodném řešení mohly vracet rušivé odrazy zpět k poslechovému místu [4].

2.3 Doba dozvuku

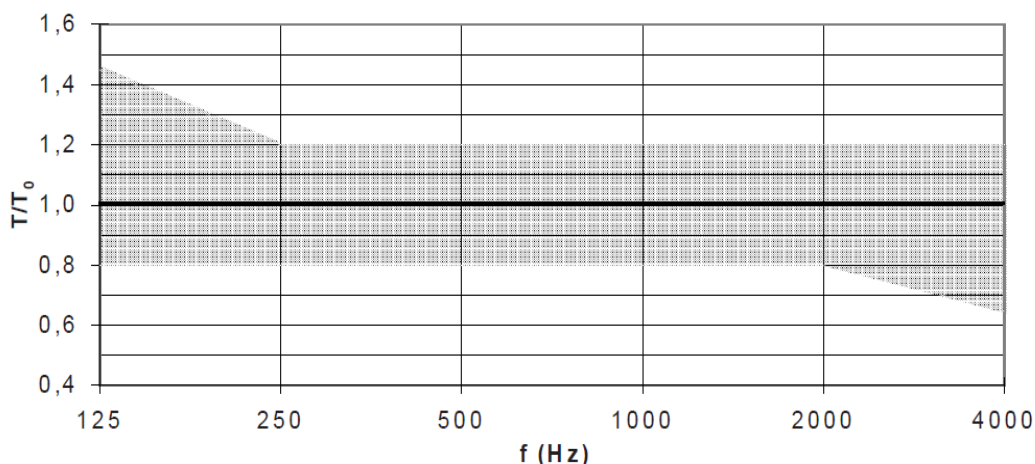
Optimální doba dozvuku v závislosti na objemu pro uzavřený prostor určený ke snímání, poslech a zpracování zvuku je vyobrazena v tabulce níže.

Tabulka 2: Rozdělení místností pro snímání, poslech a zpracování zvuku podle optimální doby dozvuku a doporučeného objemu [5].

Typ místnosti	V_0 (m ³)	T_0 (s)	Hluk pozadí (tabulka 1)
Hlasatelna kabina, hlasatelna mimo obraz	30	0,3	1
Hlasatelna, dabingové studio	90	0,3	1
Režijní místnost	130	0,3	3
Malé činoherní studio, televizní obrazová hlasatelna	180	0,4	1
Střední činoherní studio	500	0,5	1

V malých místnostech v oblasti nízkých kmitočtů je zvukové pole značně nevyrovnané a nelze ho popisovat integrálně. Doba dozvuku se proto měří v různých místech a typicky v bodech mezi zdrojem zvuku a posluchačem. Není-li uvedeno jinak, je v třenoctávových kmitočtových pásmech se středními kmitočty 100 Hz až 10 000 Hz doporučená vyrovnaná doba dozvuku. Přípustná toleranční pásma pro odchylky doby dozvuku od optimální hodnoty jsou na obrázku 2-2 [6].

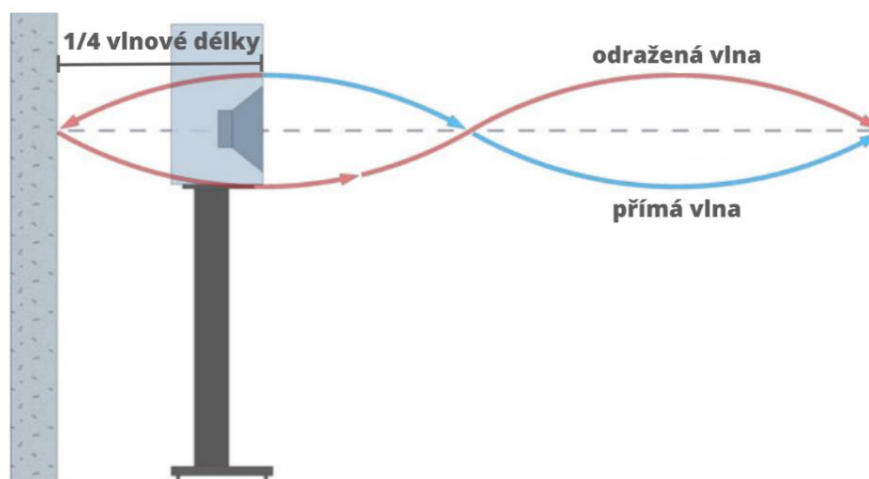
Pro posouzení akustické kvality prostoru je rozhodující porovnání výsledků měření s optimální dobou dozvuku dle normy. Posuzuje se i hladkost průběhu závislosti doby dozvuku na kmitočtu. Velkých změny doby dozvuku mezi sousedními třetinoctávovými kmitočtovými pásmy je způsobeno nerovnoměrným rozložením zvukových vln a je to pravděpodobnou příčinou zhoršení kvality poslechových podmínek [6].



Obrázek 2-1: přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 prostoru určeného především pro hudbu v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma [Převzato z [6]].

2.4 Vliv vzdálenosti reproduktorů od stěn a odražené vlny

Vzdálenost reproduktoru od stěny má velký vliv na poslechový vjem příjemce, zejména v nízkých frekvencích (bass). Vlny na nízkých frekvencích vyzařují u běžných reproduktorů všesměrově, na rozdíl od vysokých frekvencí, které vyzařují prakticky pouze dopředu před reproduktor. Při umístění reprosoustavy před stěnu (nebo do rohu) místnosti pak v poslechovém místě dochází k nárůstu zvukové energie na nízkých frekvencích právě vinou sečtení přímého zvuku se zvukem odraženým zpoza reprosoustavy. Kromě toho ale dojde na určité frekvenci k výraznému propadu ve frekvenční charakteristice (viz obr. 2-3). Frekvence je dána vzdáleností reprosoustavy od stěny. Když vzdálenost odpovídá $\frac{1}{4}$ vlnové délky, dojde k fázovému posunutí odražené vlny o 180° vůči přímé vlně a dojde k vzájemnému vyrušení. Tento jev se nazývá interferenční odezva na hranici reproduktoru (speaker - boundary interference response - SBIR) [7].



Obrázek 2-2: Grafická ukázka vlivu umístění reproduktoru od stěny [Převzato z [7]].



Obrázek 2-3: Měření frekvenční odezvy v místě poslechu ukazující pokles způsobený efektem SBIR Převzato z [7].

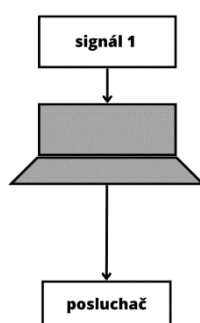
Efekt SBIR nejde vyřešit ekvalizací zvuku, pokud by se zesílil signál na rušivé frekvenci, zesílili bychom tím i odraz, který toto rušení způsobuje. Řešení tohoto problému je pouze v jiném umístění reproduktoru nebo použití akustických obkladů [7].

3 Reproduktorové sestavy

Většina posluchačů/uživatelů vybírá reprosoustavu v poměru cena/kvalita. Na co se ale velmi často zapomíná, a co hraje pro výsledný zvukový vjem velmi zásadní roli, je rozmístění reproduktorů v prostoru a prostor samotný. Pokud zvolíme špatné pozice reprosoustavy, může i dobrá soustava ztratit své přednosti, jelikož se její zvuk v rámci akustiky místnosti v určitých frekvenčních pásmech zesílí, utlumí nebo jinak zkreslí. Existuje několik typů konfigurace reproduktorů a výběr vhodné soustavy záleží na účelu.

3.1 Mono

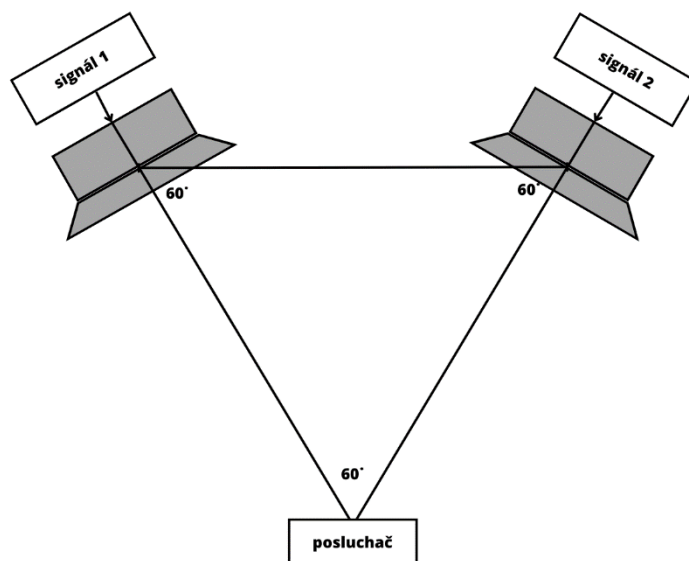
Mono audio, zkratka pro monofonní reprodukci zvuku, je označení pro jednokanálový zvukový systém. Zvuk z pohledu posluchače vychází z jedné pozice. Obvykle stačí pouze jeden reproduktor. Jedná se např. o vokál, který byl nahrán jedním mikrofonom. V případě, že bychom si nahrávku pustili na dvou reproduktorech bude stejný signál vycházet z levého i pravého kanálu.



Obrázek 3-1: Konfigurace mono.

3.2 Stereo

Stereo (značení 2.0) znamená, že záznam je dvoukanálový neboli se jedná o dvě od sebe oddělené samostatné zvukové stopy. Následně pak v každé z nich může být jiný signál. Tím pádem každý z reproduktorů hraje něco jiného a vytváří se tzv. stereo efekt = prostorový zvuk. V dnešní době se stále jedná o nejpoužívanější sestavu reproduktorů. V optimálním případě by reproduktory a posluchač měli být umístěni na vrcholech rovnostranného trojúhelníka. Úhel mezi reproduktory z pohledu posluchače by pak měl být 60°.

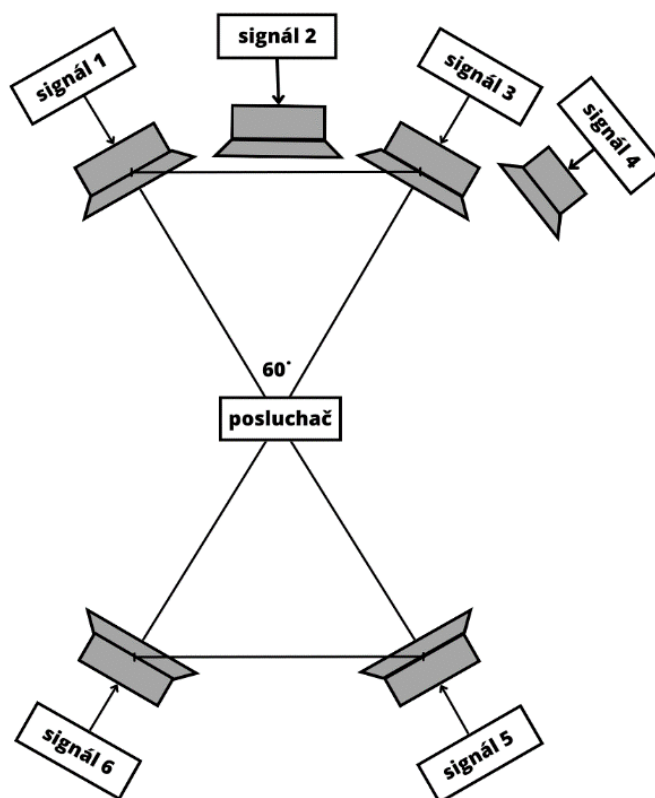


Obrázek 3-2: Konfigurace stereo.

3.3 Prostorový zvuk

Prostorový zvuk nám obohacuje věrnost a hloubku reprodukce zvuku pomocí více zvukových kanálů z reproduktorů, které obklopují posluchače. Posluchač je schopen určit směr a vzdálenost vnímaného zvuku. Tento systém byl nejprve určen pro kina, kde nabídl divákům silnější zvukový zážitek.

Každá konfigurace má typický střed, kde posluchač vnímá zvukové efekty nejlépe. Nejvíce používanou prostorovou konfigurací je 5.1 (5 reproduktorů + 1 subwoofer), která se skládá z 5 reproduktorů; tři vpředu (left, center, right), dva vzadu (left, right) a subwooferu (samostatného reproduktoru pro pásmo nejnižších frekvencí obsahující frekvence 5–125 Hz). Levé a pravé reproduktory jsou typicky umístěné pod úhlem 60°.



Obrázek 3-3: Prostorová konfigurace.

3.4 Dolby Surround, Dolby Atmos

Zatímco předchozí odstavec popisoval prostorový zvuk, který využíval kanály zvuku umístěné v prostoru jen kolem posluchače v rovinné ploše. Dolby Atmos rozšiřuje tuto koncepci o využití objektivě orientovaného zvuku, přidává i způsob míchání a definice prostorového rozložení zvuku pomocí metadat. Metadata nesou informaci o umístění zvuku v prostoru. Přehrávací systém podle konkrétní konfigurace dekóduje metadata a řeší přehrávání zvuku v konkrétním místě prostoru. Umožňuje umístit zvukové efekty přesně do konkrétního bodu v prostoru. To znamená, že zvuk může přicházet z jakéhokoli směru, včetně shora a ze stran.

Na obrázku 3-4 je zobrazena konfigurace 5.1.4. To znamená, že k běžným šesti kanálům 5.1 se přidává ještě řada horních kanálů, jejich počet označuje v konfiguraci poslední číslo za tečkou. Například v kinech s Dolby Atmos může být až 128 zvukových kanálů [8].



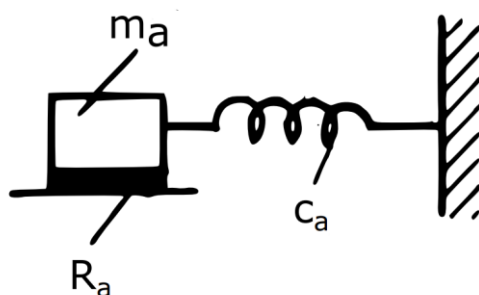
Obrázek 3-4: zobrazení konfigurace 5.1.4 |Převzato z [8]|

4 Možnosti akustických úprav

Porézní tlumicí materiály v běžně používaných tloušťkách (jednotky centimetrů) pohlcují zvuk převážně na středních a vysokých frekvenčních oblastech. V případě, kdy je potřebné tlumit zvuk o nižších frekvencích (pod 300 Hz), použijí se akustické tlumicí prvky založené na principu rezonance. Dobu dozvuku zvuku v uzavřeném prostoru zkracujeme tlumícími rezonátory, kdy dochází k přeměně zvukové energie v jinou [1]. Aby byla soustava co nejúčinnější, musí být dostatečně tlumena tak, aby co nejvíce zvukové energie nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v teplo. Níže bude popsán hlavně princip Helmholtzova rezonátoru, který bude v námi řešené místnosti realizován a porézní materiály používané pro pohlcování zvuku. Dalšími obklady založeným na rezonančním principu jsou kmitající panely a membrány, které jsou podrobněji popsány v mé bakalářské práci viz odkaz [9]

4.1 Helmholtzův rezonátor a děrované desky

Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu, která je s okolním prostředím spojena hrdlem. Vzduch v otvoru se chová jako nestlačitelný píst (tuhé těleso) a vzduchový polštář v dutině za otvorem jako pružina viz obrázek 4-1.



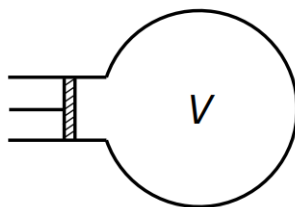
Obrázek 4-1: Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy [Převzato z [1]].

Tuhost pružiny je v tomto případě dána akustickou poddajností c_a , hmotnost závaží akustickou hmotností m_a a pohyb je tlumen akustickým odporem R_a [1, 10]. Po dopadu akustické vlny, soustava začne nuceně kmitat, kdy maximální amplituda kmitání je ve stavu rezonance. Po ukončení buzení soustava ještě nějakou dobu dozívá vlastním rezonančním kmitočtem [1]. Doba dozívání je závislá na tlumení rezonátoru. V rezonátoru se část zvukové energie přeměňuje vlivem tření na energii tepelnou. Používaly se i ve starověku, jak o tom svědčí nálezy amfor zabudovaných ve stěnách antických chrámů a amfiteátrů [11].

Aby se Helmholtzův rezonátor dal považovat z akustický rezonanční obvod se soustředěnými parametry musí splňovat následující podmínky:

- Všechny rozměry rezonátoru musí být menší než polovina vlnové délky dopadajícího zvuku.
- Plocha otvoru je menší než plocha vzduchového polštáře.

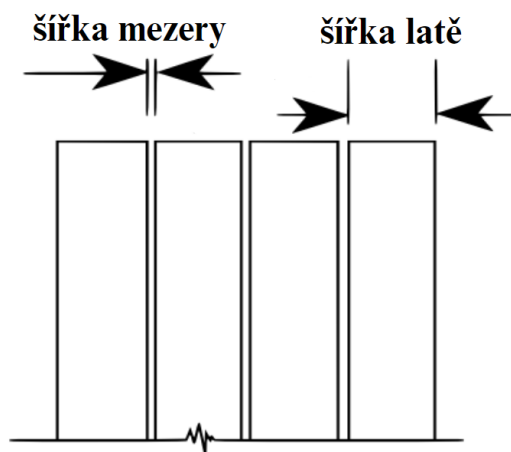
Na obrázku 4-2 je vidět dutina o objemu V s hrdlem naplněným vzduchem s určitou poddajností, píšť představuje akustickou hmotnost. Akustické pole za otvorem nemá charakter rovinné vlny, která na rezonátor dopadla. Kromě vzduchu v otvoru kmitá i vzduch před otvorem a za otvorem ve stejné fázi, jako v otvoru[12].



Obrázek 4-2: Znárodnění Helmholtzova rezonátoru |Převzato z [1]| .

Helmholtzův rezonátor může být použit jak samostatně nebo tvořit tzv. děrovanou desku. Děrované desky jsou desky tvořené kombinací jednoduchých Helmholtzových rezonátorů a jsou připevněné na pevné konstrukci. Každému otvoru patří příslušná dutina, která tvoří dílčí rezonátor. Rezonanční kmitočet se reguluje plochou a hloubkou otvoru a objemem dutiny.

Zvláštním případem Helmholtzova rezonátoru je **lat'ový rezonátor**, kde latě mají určitou šířku a jsou umístěny od sebe v daných mezerách viz obrázek 4-3. Za latěmi je určitá vzdálenost od stěny, do které se pro zvýšení absorpce přidává porézní materiál. Princip je stejný jako uvedeno výše, hmotnost vzduchu ve štěrbinách tak funguje jako hmotné těleso a vzduchu za latěmi jako pružina.



Obrázek 4-3: Schéma laťového rezonátoru [Převzato z [13]].

Pro výpočet rezonančního kmitočtu, při kterém dochází k maximálnímu pohlcování akustické energie platí vztah (4.1) [14]. Výsledek lze ovlivnit konstrukcí rezonátoru – plochou otvorů, tloušťkou přední desky a objemem dutiny za otvorem. Pro dostatečnou účinnost rezonátoru je opět nutné prostor v dutině tlumit vhodným porézním materiálem.

$$f_r = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi D^2}{dlS_1}} \quad [\text{Hz}]. \quad (4.1)$$

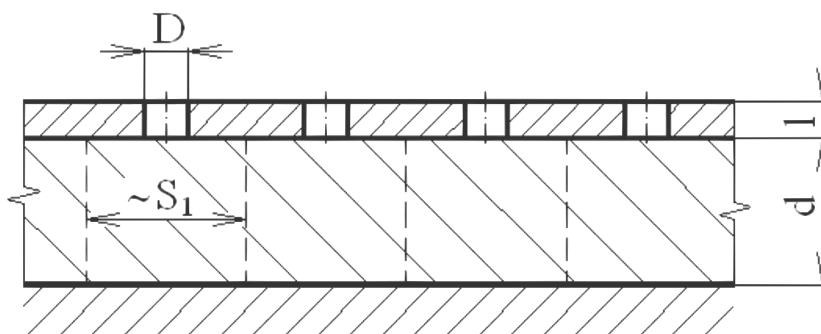
c – Rychlost zvuku ve vzduchu v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

D – Průměr otvoru v mm.

d – Tloušťka vzduchového polštáře v mm.

l – Tloušťka desky v mm.

S_1 – Plocha dutiny připadající na jeden rezonátor v mm^2 .



Obrázek 4-4: konstrukce děrované desky [Převzato z [15]].

4.2 Porézní materiály používané pro pohlcování zvuku

Porézní materiály hrají klíčovou roli v oblasti akustického inženýrství a designu, neboť slouží k pohlcování zvuku a snižování hladiny hluku v různých prostředích. Používají se v širokém spektru aplikací jako stavebnictví (divadla, kina, sály, školy), automobilový průmysl (snížení hluku v interiéru vozu) či průmyslovém sektoru (výrobní haly, strojovery). Pro tlumení pomocí porézních materiálů je rozhodující jejich struktura a dále tloušťka materiálu, případně výška vzduchového polštáře, o který je materiál umístěn před pevnou překážkou. Obecně platí, že čím je materiál tlustší a hustší, tím je jeho schopnost pohlcovat zvuk větší. Pomocí vztahu 4.2 lze určit od jaké frekvence bude pohltivost α materiálu umístěného přímo na stěnu vyšší než 0,6 [16].

$$f_r = \frac{1}{10} \cdot \frac{c}{h} \quad [Hz], \quad (4.2)$$

kde

c – Rychlost zvuku ve vzduchu v $m \cdot s^{-1}$.

h – Tloušťka vrstvy v m.

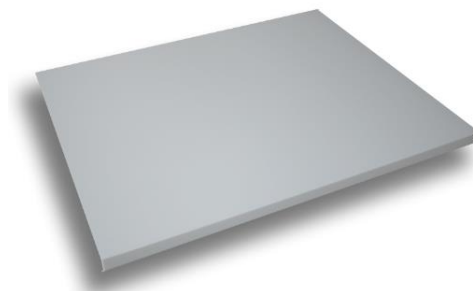
Tyto materiály mají velmi pórovitou strukturu, ve které dochází k nevratné změně zvukové energie na tepelnou prostřednictvím tření, relaxací akustického tlaku nebo nepružnou deformací. Tření vzniká při pohybu částic vzduchu v navzájem propojených pórech materiálu. Mezi tuto skupinu materiálů patří například výrobky ze skelných a minerálních vláken a různé textilie.

Pro zlepšení efektivity tlumení je lepší umístit materiál do určité vzdálenosti od stěny, protože u stěny dochází pouze k malé přeměně akustické energie na teplo kvůli nulové akustické rychlosti na stěně. Největší akustická rychlost, a tedy nejvýhodnější umístění pohltivého materiálu, odpovídá vzdálenost $\lambda/4$ od stěny [17].

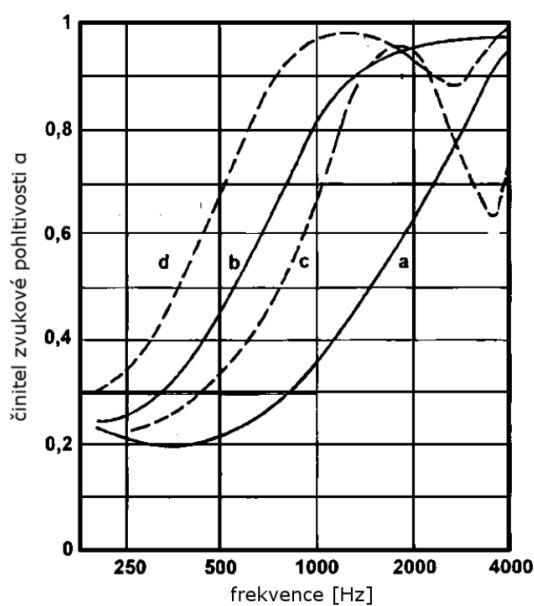
Dále je velmi důležitá odolnost vůči vlhkosti, plísním a ohni.



Obrázek 4-5: Ukázka minerální kamenné vaty
|Převzato z [18]|.



Obrázek 4-6: Ukázka melaminové pěny
Basotect |Převzato z [19]|.



Obrázek 4-7: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci porézních materiálů |Převzato z [16]|.

Na obrázku výše je vidět závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci při použití různé tloušťky porézního materiálu a vzduchového polštáře – a) tloušťka materiálu 25 mm, b) tloušťka materiálu 50 mm, c) tloušťka materiálu 25 mm, vzduchový polštář 30 mm, d) tloušťka materiálu 50 mm, vzduchový polštář 30 mm.

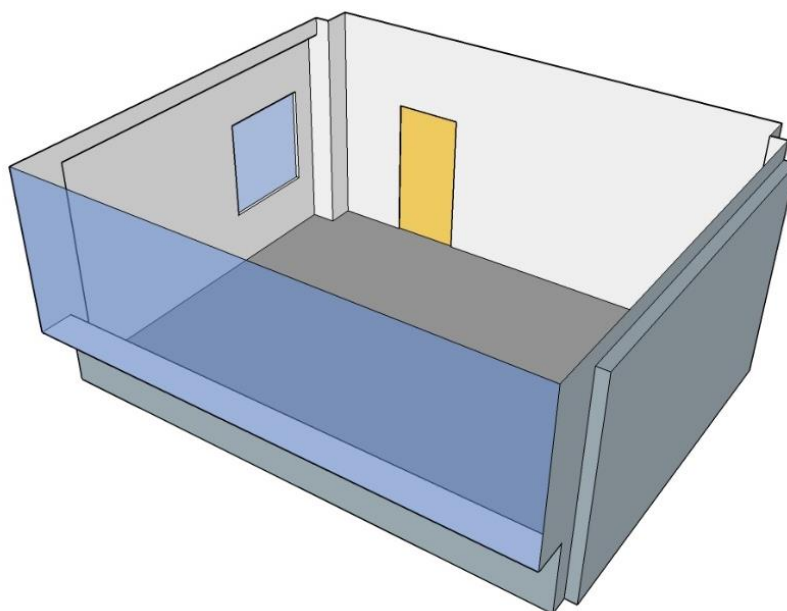
5 Poslechová místnost EK708

Zadání diplomové práce vymezilo tři základní úkoly, kterými jsem se zabýval. Prvním úkolem bylo prostudovat úpravy poslechového prostoru pro reprosoustavy formátu 2.0 a 5.1. Druhým úkolem byl samotný návrh úpravy místnosti EK708 tak, aby splňoval požadavky normy ČSN 73 0526 pro zvukovou režii. Posledním úkolem byla realizace akustických úprav a vyhodnocení výsledných parametrů.

5.1 Současný stav místnosti EK708

Návrhem akustických úprav se již dříve zabývalo několik studentů a vznikly 2 diplomové práce. Akustické úpravy však zatím nebyly realizovány a částečně se také změnila požadavky na využití prostoru.

Učebna EK708, která je předmětem akustických úprav, je místnost o rozměrech – délka 7,10 m, šířka 5,60 m a výška 3,24 m, nacházející se v sedmém patře katedrálního objektu Elektrotechnické fakulty v Plzni. Prostor je specifický tím, že má po celé jedné (nejdelší) straně umístěná okna, rozdělená do dvou sekcí, každá sekce po třech oknech. Vstup do místnosti je možný dveřmi na protější straně, než jsou okna. Po pravé stěně od vstupních dveří je umístěno okno zasazené do dřevěného rámu, opticky propojující tuto místnost s místností vedlejší. Protější (kratší) stěna neobsahuje žádný výrazný stavební prvek, jde o čistou holou zeď.



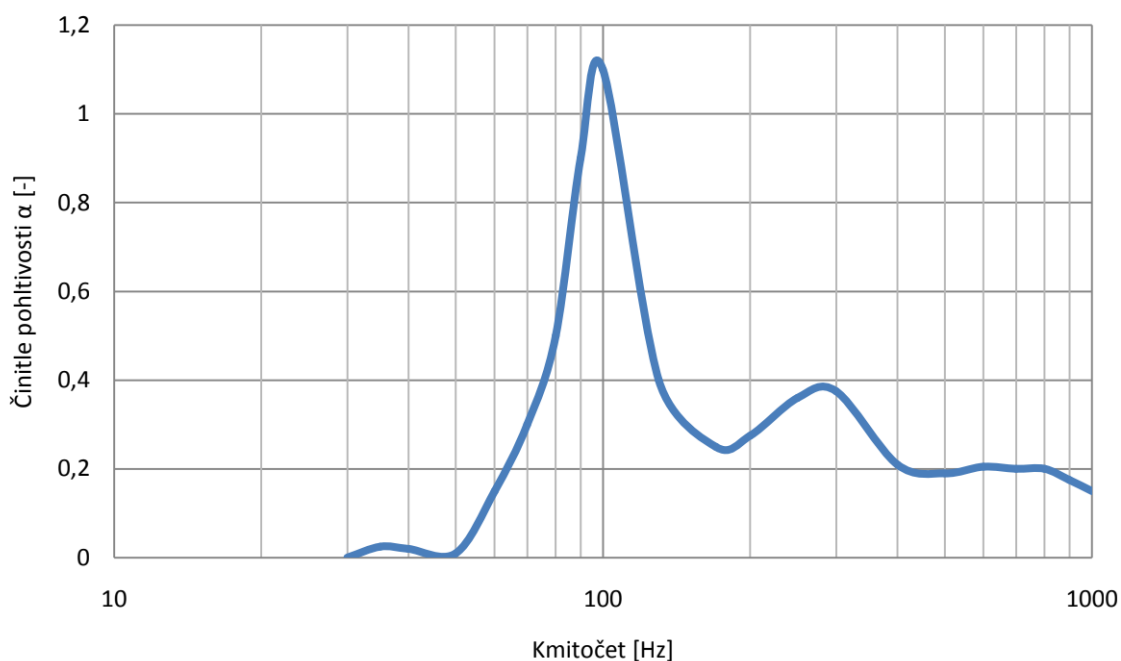
Obrázek 5-1: Grafický náčrt místnosti EK708.

Prostor není zrovna ideální pro audiovizuální účely, neboť poslechová symetrie je narušena umístěním okenních tabulí pouze na jedné straně místnosti. V místnosti je umístěno velké množství vybavení, které je z pohledu akustiky blíže nedefinovatelné.

Místnost bude používána pro referenční poslech na dvou stereo audio systémech a jednom vícekanálovém 5.1 systému s možností budoucího rozšíření na Dolby Atmos. Požadavky dle normy na dobu dozvuku v tomto objemu místnosti jsou v případě zvukové režie 0,3 s, vícekanálové kino cca 0,3 s. Prostor bude i dále fungovat jako učebna, takže doba dozvuku nemůže být takto nízká, aby akustické podmínky nebyly nepřirozené. Kompromisní hodnoty by tedy mohly být kolem doby dozvuku 0,5 až 0,6 s.

5.2 Předešlá řešení poslechové místnosti EK708

Kolega Bálkovský se ve své diplomové práci [20] pokusil navrhnout vhodné akustické úpravy a spočítat jejich vliv na dobu dozvuku. Z dříve uvažovaných úprav budou dále použity jen speciální Helmholtzovy štěrbínové rezonátory navržené a vyrobené na míru tohoto prostoru. 36 kusů těchto rezonátorů bude umístěno na strop místnosti. Jejich činitel zvukové pohltivosti naměřený v dozvukové komoře FEL můžeme vidět na obrázku níže.



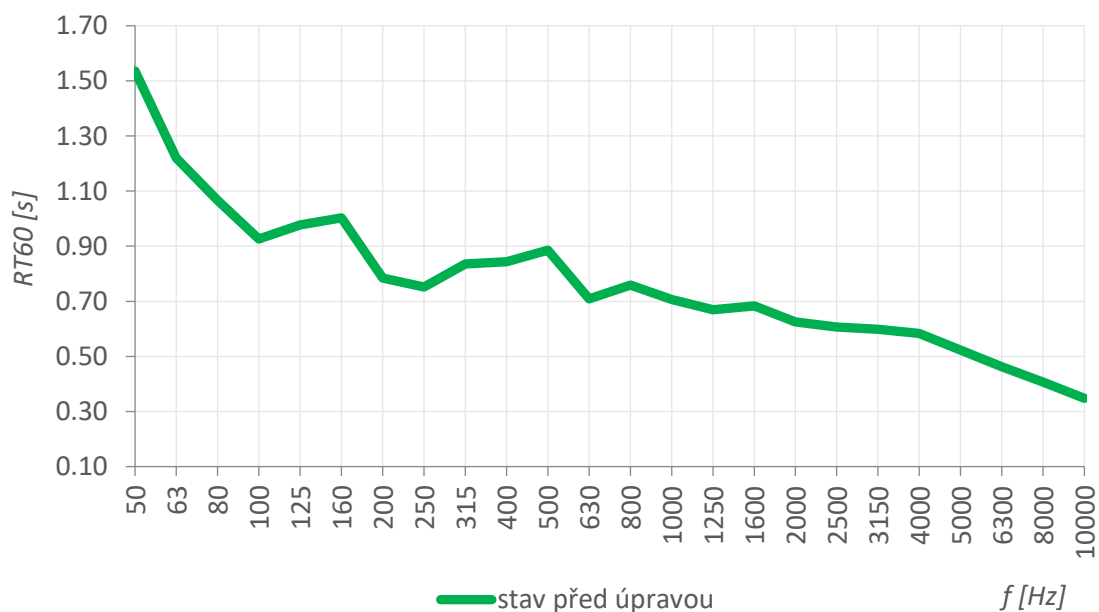
Obrázek 5-2: Činitel pohltivosti speciálně navržených Helmholtzových štěrbínových rezonátorů.

Vidíme, že maximum zvukové pohltivosti je okolo frekvence 100 Hz. Zkosený tvar předních desek rezonátoru (viz obrázek 5-3) navíc zvyšuje difuzitu v prostoru a napomáhá v rovnoměrnějším rozložení akustického pole. Ukázka nízkofrekvenčních pohltivých rezonátorů je na obrázku 5-3.



Obrázek 5-3: Foto pohltivých nízkofrekvenčních prvků

5.3 Výchozí stav místnosti



Obrázek 5-4: Doba dozvuku místnosti EK708 změřená před akustickými úpravami.

Na grafu výše je vidět změřená doba dozvuku v námi řešené místnosti před navrhovanými akustickými úpravami. Doba dozvuku je dle očekávání vyšší na nízkých frekvencích, a i průměrná hodnota (cca 0,7 s) je vyšší než hodnota doporučená normou. Kritická frekvence spočítaná podle vzorce 1.4 je 123 Hz.

5.4 Důvod stavby rezonátoru

Protože v každém poslechovém prostoru je vždy nutné řešit nejprve dobu dozvuku a rozložení akustického pole na problematických nízkých frekvencích, v první fázi byl navržen a realizován nízkofrekvenční rezonátor na čelní stěnu místnosti. Kromě snížení doby dozvuku na nízkých frekvencích bude tento rezonátor předcházet výše popsanému jevu SBIR (viz odstavec 2.4), vznikajícímu při umístění reprosoustavy před holou stěnu. Zároveň rezonátor pohltí zvukovou energii vyzářenou reproduktory za sebe, takže nedojde ke zvýšení hladiny akustického tlaku v místě poslechu vlivem součtu odrazů a přímého zvuku.

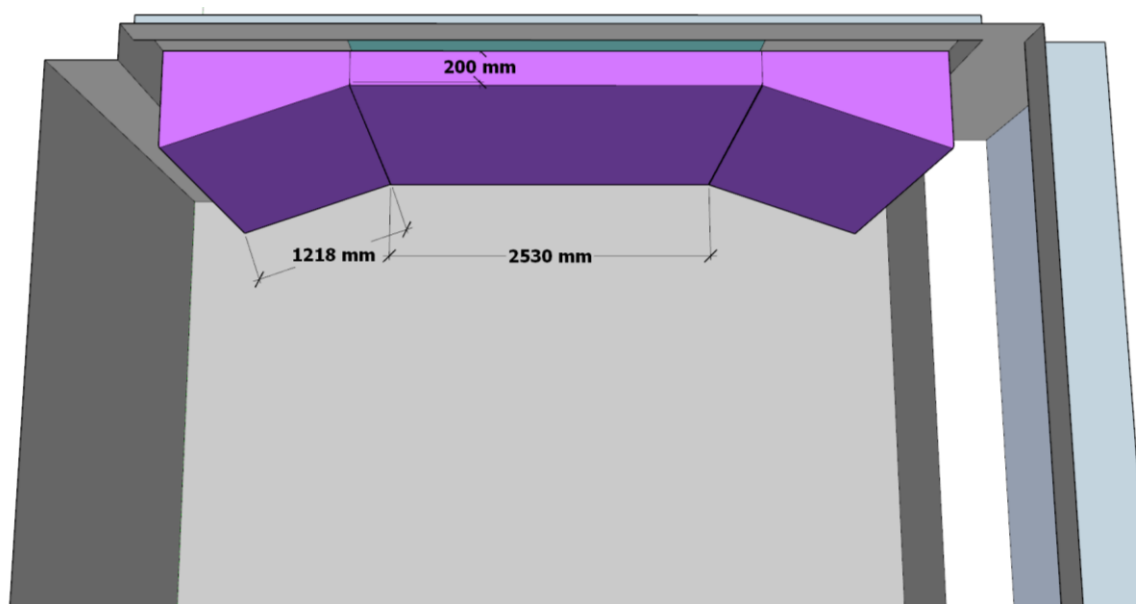
5.4.1 Návrh

Maximální rozměry rezonátoru byly dány velikostí čelní stěny místnosti. Využitelná plocha je cca 12 m². Předpokládáme, že reproduktory budou umístěny ve vzdálenosti cca 600 až 1000 mm od stěny. Tím bylo dáno právě požadované frekvenční pásmo nejvyšší zvukové pohltivosti rezonátoru v rozsahu cca 80 – 150 Hz. Pro teoretický návrh potřebné rezonanční frekvence rezonátoru byl použit program Acousticmodelling, kde se počítal vliv mezery mezi deskami, tloušťky a šířky desek, vliv odsazení rezonátoru od stěny na výsledné tlumení a odsazení desek od konstrukce. Teoretických výsledků se dosáhlo při použití desek o šířce 210 mm a 150 mm, tloušťky 16 mm, mezery mezi deskami 10 mm a hloubky obkladu 220 mm ve středu konstrukce. Okraje rezonátoru o délce cca 1200 mm bylo možné natočit směrem do středu místnosti, čímž se zvýšila efektivní hloubka vzduchové dutiny a rezonátor je tak částečně naladěn ještě na nižší frekvenci.

K návrhu přesných rozměrů se využil program SketchUp, kde se namodelovala zkoumaná oblast místnosti EK708 (viz obrázek 5-5). Model posloužil i k výpočtu potřebného materiálu ke stavbě rezonátoru. Soupis materiálu je uveden v tabulce níže.

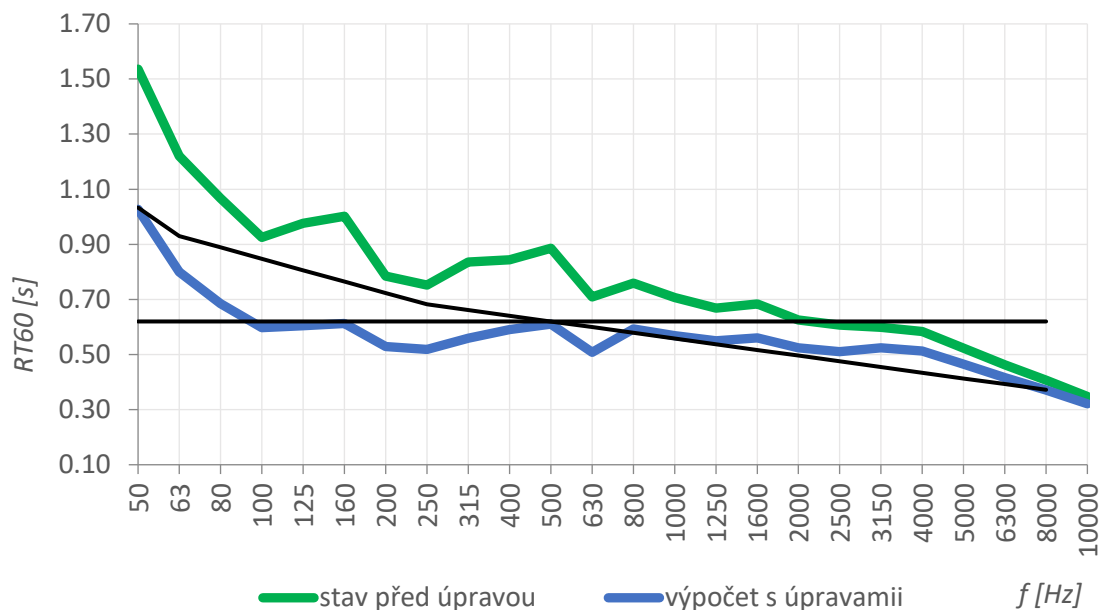
Tabulka 3: Soupis použitého materiálu na stavbu rezonátoru – rozměry.

Materiál	tloušťka (mm)	délka (mm)	šířka (mm)	počet kusů
MDF	16	2600	150	14
MDF	16	2600	210	15
MDF	16	2600	600	2
lať	40	2600	60	28
hranol podkladový 4218	18	2400	42	12
kamenná vata Rockmin+				25 m ²
netkaná textilie - 50 g/m ²				13 m ²



Obrázek 5-5: Grafický model znázorňující rozměry rezonátoru.

V grafu níže je vidět naměřená doba dozvuku v místnosti EK708 před akustickými úpravami s porovnáním s doporučenou dobou dozvuku v normě pro provoz vícekanálového kina. Výpočet doby dozvuku byl proveden s parametry rezonátoru v programu Acousticmodelling. Vzorce a postupy použité v tomto programu byly převzaty z následujících zdrojů [21, 22].



Obrázek 5-6: Porovnání požadavku normy s naměřenou a vypočtenou dobou zvuku v místnosti EK708.

5.4.2 Realizace

Nejprve byla z latí 60x40 mm sestavena nosná konstrukce a příčky, tvořící kostru rezonátoru. Tato konstrukce byla připevněna ke stěně místnosti a vyplněna lehkou kamennou vatou. Na podlahu byly umístěny trubky sloužící jako kabelový průchod po obvodu místnosti.

Tabulka 4: Soupis použitého materiálu na stavbu rezonátoru – cena.

Materiál	Cena (Kč)
Dřevěné prkna, hranoly	3 000
Kamenná vata	4 000
MDF desky	10 000
Trubky, šrouby	3 000
Ostatní	1 000



Obrázek 5-7: Foto dřevěné konstrukce rezonátoru.

Kamenná vata se následně zakryla černou netkanou tkaninou o hmotnosti 50 g/m^2 , která byla k nosné konstrukci připevněna sponkovačkou. Přes netkanou textilií se vodorovně přivrtyaly menší dřevěné latě, které se z estetického důvodu obalily také černou netkanou textilií..



Obrázek 5-8: Foto rezonátoru vyplněného kamennou vatou a zakrytého netkanou textilií.



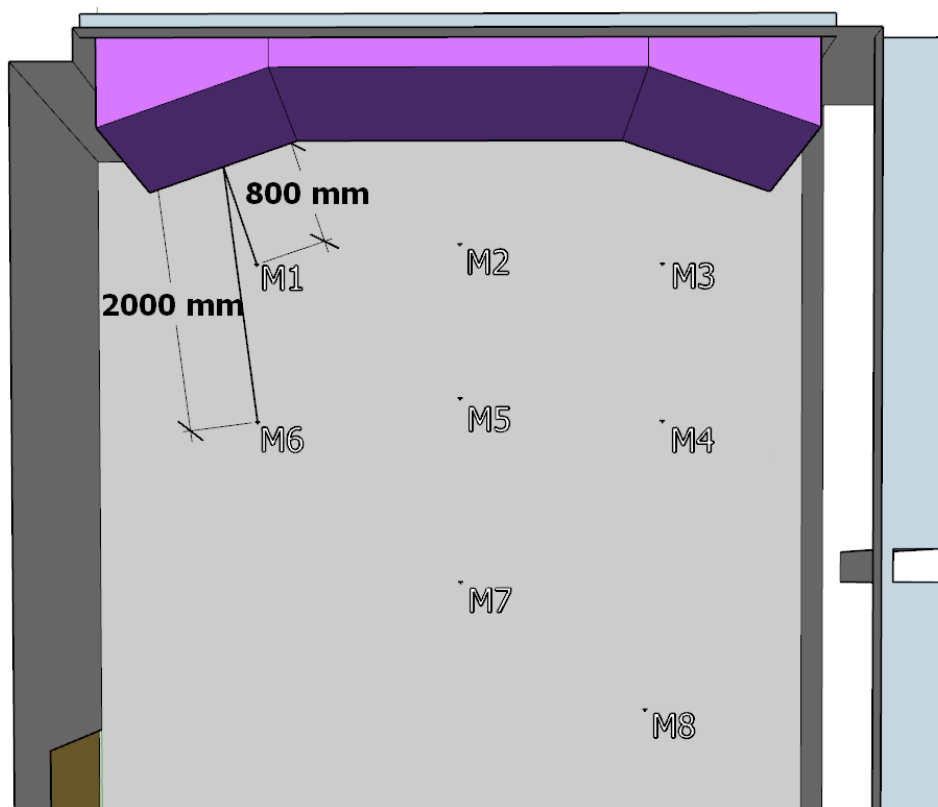
Obrázek 5-9: Foto hotového rezonátoru.

Vrchní desky rezonátoru se upevňovaly vruty k vodorovným černým latím, a to ve 4 výškách. Desky tvořící prostřední rovnou plochu rezonátoru jsou od sebe umístěné v mezerách 10 mm, desky umístěné po bocích rezonátoru jsou od sebe v mezerách od střední plochy 18; 27; 38 a 38 mm.

6 Měření parametrů místnosti po instalaci rezonátoru

Měření akustických parametrů místnosti EK708 probíhalo v 8 bodech. Body M1, M2, M3 byly umístěny ve vzdálenosti 800 mm od rezonátoru, body M4, M5, M6 ve vzdálenosti 2000 mm od rezonátoru. Bod M7 byl ve středu místnosti a bod M8 byl umístěn v zadní polovině místnosti.

Akustické parametry místnosti byly měřeny před dokončením rezonátoru (pouze konstrukce vyplněná vatou, překrytá textilií) a pak také po montáži čelních prken. V místnosti se měřila doba dozvuku a hladina akustického tlaku L_{zeq} . Měření dozvuku probíhalo na bodech M3, M6, M7, M8. Hladina akustického tlaku byla měřena v bodech M1 – M6.

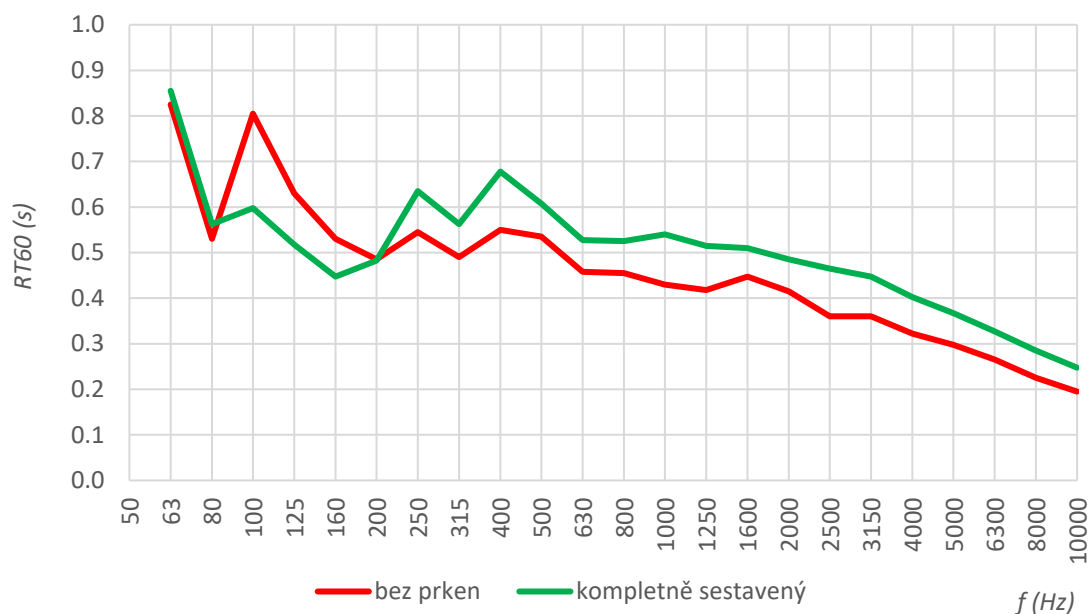


Obrázek 6-1: Schéma rozmístění měřicích bodů v místnosti EK708.

K měření bylo použito zařízení od švýcarské firmy NTi audio, zvukoměr XL2, který byl upevněn na stativu a namířen kolmo k rezonátoru. Byl použit mikrofon M2210 odpovídající svými parametry třídě 1. Měření probíhalo ve výšce 130 cm nad zemí.

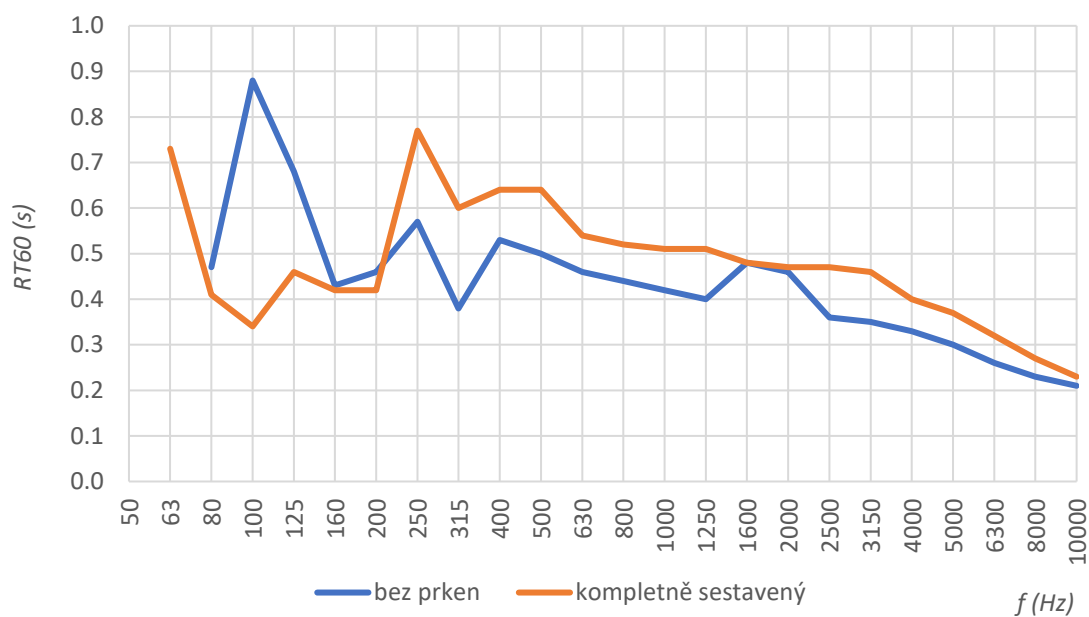
6.1 Výsledky – doba dozvuku prostoru

V prvním grafu (obrázek 6-2) je zobrazena červenou křivkou průměrná doba dozvuku celého prostoru s konstrukcí vyplněnou kamennou vatou bez vrchních prken. Zelená křivka znázorňuje frekvenční závislost doby dozvuku již kompletně sestaveného rezonátoru



Obrázek 6-2: Graf porovnání průměrné doby dozvuku prostoru s rezonátorem bez prken a po kompletním sestavení.

Na grafu (obrázek 6-2) vidíme, že v případě kompletně sestaveného rezonátoru se doba dozvuku v oblasti 100 Hz zkrátila přibližně o 0,2 s, a naopak v pásmu od 250 Hz výše se vlivem překrytí vaty prkny prodloužila o cca 0,1 s. Ve vyšších frekvencích se pak projevují odrazy od předních desek rezonátoru.



Obrázek 6-3: Graf porovnání doby dozvuku prostoru z měřicího bodu M3 s rezonátorem bez prken a po kompletním sestavení.

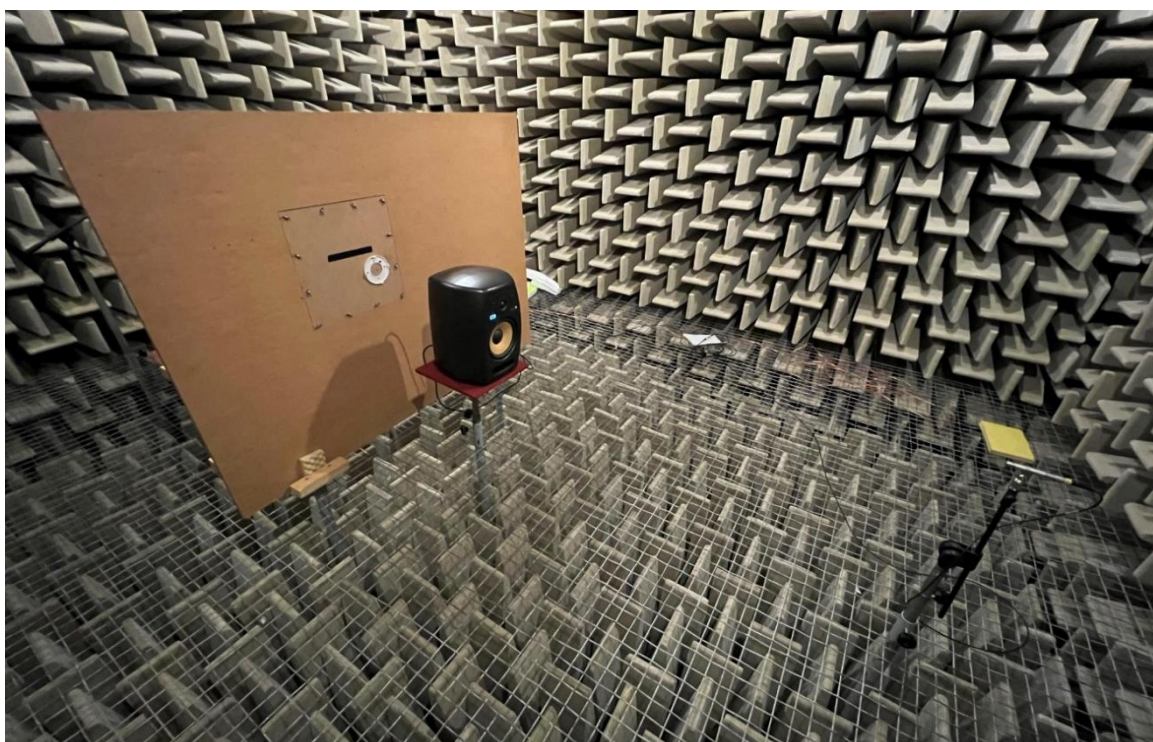
V dalším grafu (obrázek 6-3) jsou porovnány naměřené hodnoty pouze z měřicího bodu M3, který byl umístěn nejblíže rezonátoru, a to ve vzdálenosti 800 mm. Největší rozdíl v době dozvuku vidíme na frekvenci 100 Hz a to o 0,55 sekundy. V pásmu 125 Hz pak došlo k snížení doby dozvuku o cca 0,25 s. Rezonátor lze tedy po realizaci a ověření jeho parametrů považovat za dostatečně pohltivý v potřebném frekvenčním pásmu.

7 Měření parametrů reprosoustavy

Další část měření se zabývala ověřením vlivu umístění reproduktoru před holou stěnou a před rezonátorem. Projev jevu SBIR na amplitudovou frekvenční charakteristiku reproduktoru byl nejdříve ověřen experimentem v bezodrazové komoře. K měření byla použita technika firmy Brüel & Kjær a jako zdroj zvuku byl použit reproduktor KRK VXT8, který bude do budoucna použit i v řešené poslechové místnosti.

7.1 Experiment k ověření vlivu vzdálenosti reproduktoru od stěny

V bezodrazové místnosti se měřil vliv vzdálenosti reproduktoru od stěny na amplitudovou frekvenční charakteristiku v ose reproduktoru. Vliv stěny byl simulován pomocí MDF desky vyztužené žebrováním na zadní stěně o velikosti 1,37 x 1,83 m.

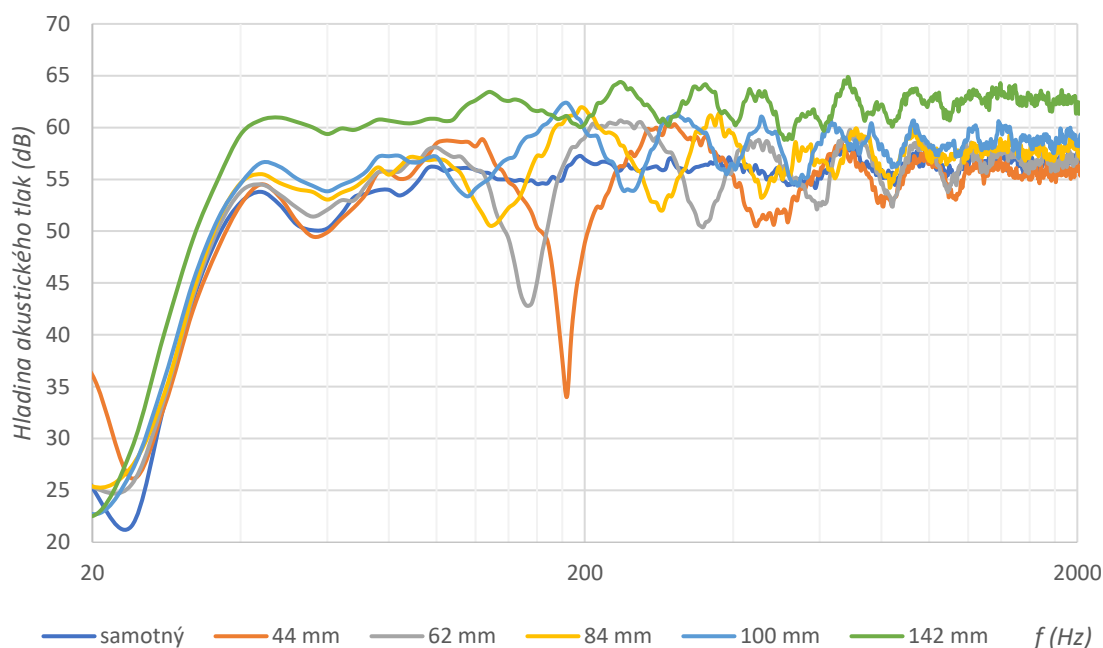


Obrázek 7-1: Foto z měření vlivu desky za reproduktorem v bezodrazové komoře.

Reproduktor byl postupně posouván směrem od desky a v každé pozici byla změřena hladina akustického tlaku. Vzdálenost mikrofону od desky byla stále 2,2 m. V tabulce níže jsou uvedeny předpokládané frekvence, na kterých by mělo teoreticky dojít k útlumu (v souvislosti s $\frac{1}{4} \lambda$) a reálně naměřené frekvence odečtené z grafu na obr. 7-2.

Tabulka 5: Výsledky vlivu vzdálenosti přední hrany reproduktoru od desky..

Vzdálenost od přední hrany reproduktoru (mm)	Změřená f-rezonanční (Hz)	Výpočet f-rezonanční
440	184	193
620	152	137
840	132	101
1000	116	85
1420	žádná	59



Obrázek 7-2: Vliv vzdálenosti reproduktoru od desky v bezodrazové komoře ve všech měřicích bodech.

Z grafu výše pozorujeme, že vliv odrazivé desky za reproduktorem je nejvýraznější ve vzdálenosti 440 mm. Na frekvenci 184 Hz dochází k propadu až o 25 dB. Dobře viditelný je také vliv ještě ve vzdálenosti 620 mm (156 Hz, 14 dB). Protože použitá deska netvoří celou jednu stěnu bezodrazové komory (viz foto na obr. 7-1), ale má konečné rozměry, při dalším posunutí reproduktoru směrem od ní, už je viditelný propad na frekvenci 132 Hz pouze 7 dB. Pro vzdálenosti vyšší než 0,84 m se tento vliv stále snižoval. Jednotlivé detailnější průběhy jsou znázorněné v příloze.

7.2 Měření vlivu rozestavení reproduktoru vůči poslechovému místu

Obecně lze říci, že po umístění reproduktoru do uzavřeného prostoru, má tento prostor výrazný vliv na zvukový projev reproduktoru. Je to dáno vlastními kmity prostoru, které ovlivňují rozložení akustického pole a také např. odrazy od obklopujících stěn, které se v poslechovém místě přidávají k přímému zvuku z reproduktoru. Proto byla provedena série dalších měření přímo v řešené místnosti. První z dvojice měřících mikrofonů byl umístěn v plánovaném poslechovém místě v ose místnosti ve vzdálenosti 2,8 m od rezonátoru. Druhý mikrofon v téže ose ve vzdálenosti 2,3 m (viz obr. 7-3). Oba mikrofony byly umístěny v akustickém středu reproduktoru ve výšce 1,6 m.

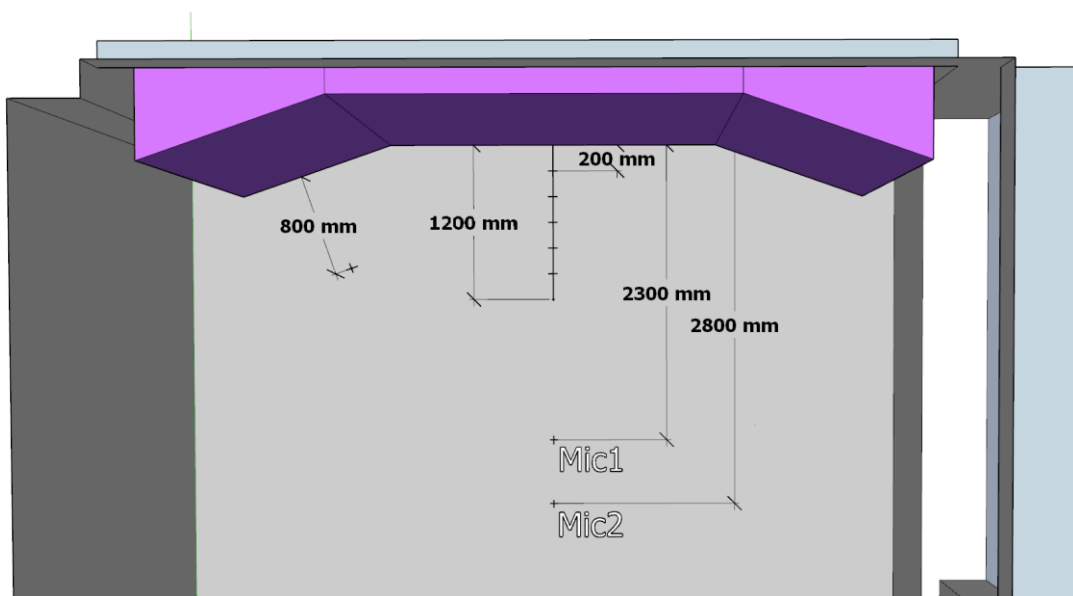
Reproduktor, umístěný nejprve v pozici centrálního reproduktoru vícekanálového audiosystému, v ose místnosti ve vzdálenosti čelní plochy reproduktoru 400 mm od rezonátoru, byl postupně posouván směrem ke středu místnosti v 200mm krocích. Dále se zkoumal vliv umístění reproduktoru v případě přesunutí do pozice levého předního kanálu do vzdálenosti 800 mm před levou šikmou částí rezonátoru při stejné pozici mikrofonu. A na závěr byl reproduktor umístěn přímo na podlahu v ose místnosti a rovněž se postupně posouval od rezonátoru v 200mm krocích. Měřeno bylo s rozlišením 1/12-oktávy a jako budící signál byl použit růžový šum.

V grafu na obrázku 7-4 jsou pro přehlednost uvedeny pouze naměřené frekvenční charakteristiky pro vzdálenost 400, 800 a 1200 mm. L_{ze} pozorovat výrazný pokles hladiny akustického tlaku v pásmu cca 90 až 110 Hz. Pokles se zmenšuje při posouvání reproduktoru směrem do středu místnosti.

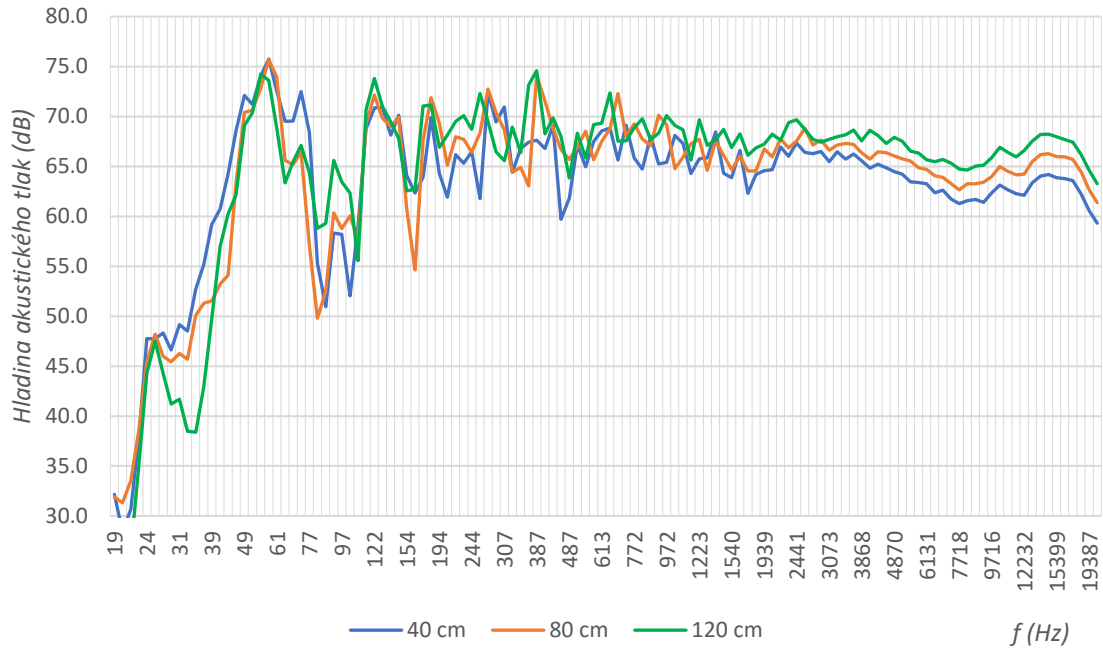
V dalším grafu na obrázku 7-5 jsou společně zobrazeny frekvenční charakteristiky naměřené ve 3 různých pozicích reproduktoru (centrální, levý přední a centrální na zemi) ve vzdálenosti 800 mm od rezonátoru. Zde můžeme vidět, že při přemístění reproduktoru na podlahu místnosti je propad stále ve stejném frekvenčním pásmu, ale již není tak výrazný jako při umístění ve výšce 1,6 m. Naopak výsledky měření s reproduktorem před levým okrajem rezonátoru ukazují zcela jiný průběh v oblasti velmi nízkých frekvencí. To je nejspíš způsobeno blízkou levou stěnou místnosti, která je zatím holá a velmi odrazivá. Pokles akustického tlaku v uvedeném pásmu 90–110 Hz by mohl být způsoben stojatým

vlněním vznikajícím mezi podlahou a stropem, protože tyto dvě plochy jsou zatím vůči sobě rovnoběžné a odrazivé. Vzdálenost ploch stropu a podlahy je 3,24 m, tato vlnová délka by odpovídala frekvenci 105 Hz. Reproductor byl tedy při prvním měření umístěn téměř přesně v polovině této vzdálenosti. Tento jev nepozorujeme v takové míře, když je reproductor umístěn na zemi, protože odraz od země je stejný, ale odražená vlna dříve narazí na rezonátor než na strop. Tento jev potvrzuje i měření se subwooferem umístěným na podlaze místnosti, jehož výsledky můžeme vidět v grafu na obr 7-6. V tomto případě není v problematickém pásmu 90-110 Hz žádný znatelný pokles. Zadní stěna subwooferu byla umístěna 200, 400 a 600 mm od rezonátoru.

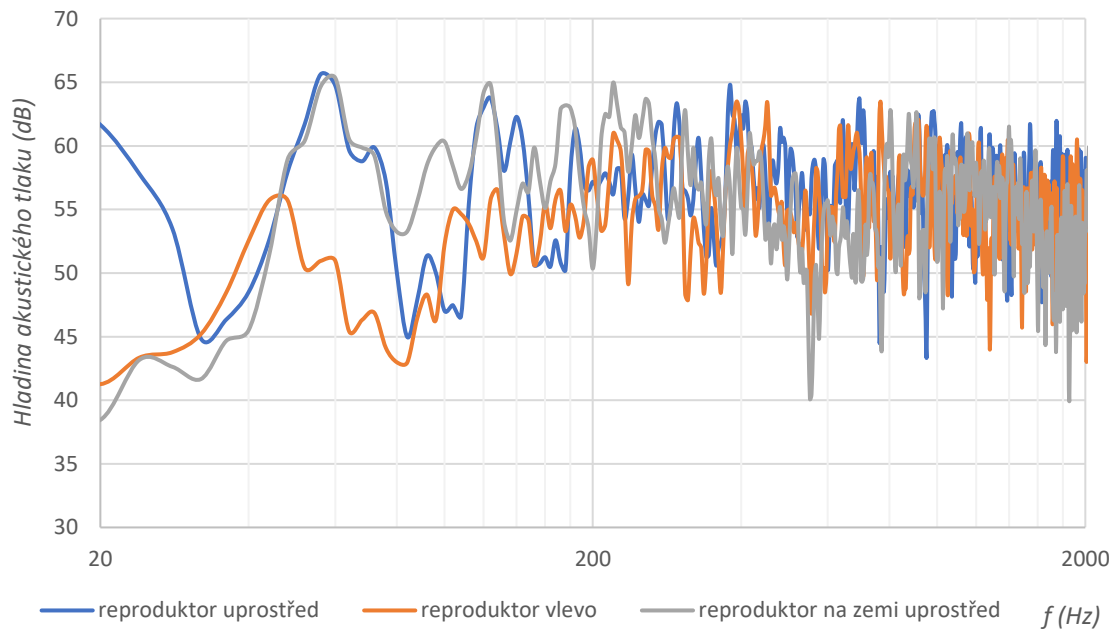
Reproduktory budou při finálním umístění ve výšce 1,3 – 1,5 m, tady těsně pod polovinou výšky místnosti. Výše zmíněný efekt by měla vyřešit instalace dříve zmiňovaných štěrbinových rezonátorů na strop místnosti. Tyto rezonátory jsou naladěné právě na úzké frekvenční pásmo v okolí 100 Hz.



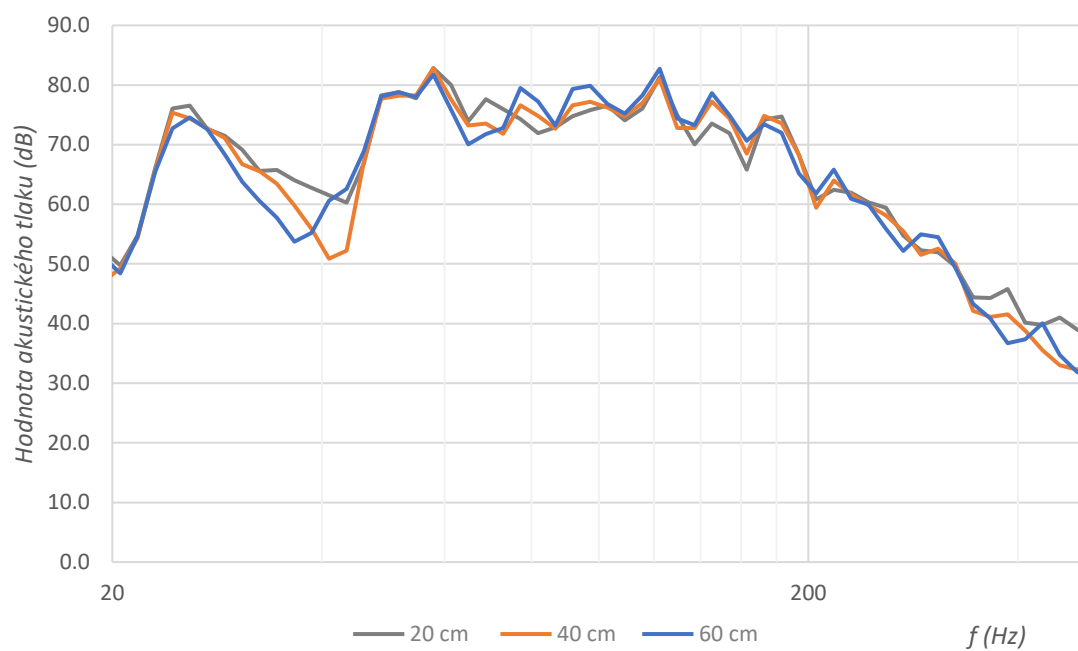
Obrázek 7-3: Rozmístění měřicích bodů a reproduktoru v místnosti EK708.



Obrázek 7-4: Vliv vzdálenosti reproduktoru od rezonátoru v 40, 80 a 120 cm ve výšce reproduktoru 160 cm uprostřed.



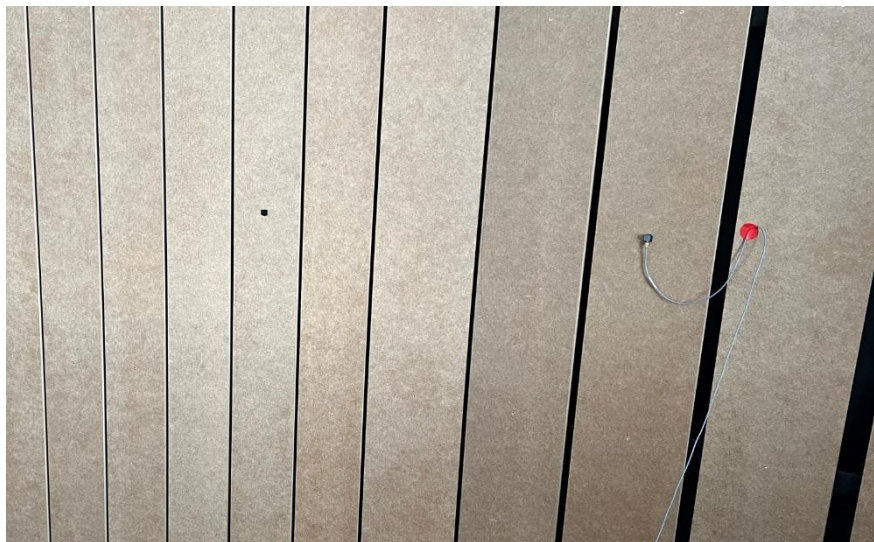
Obrázek 7-5: Vliv vzdálenosti reproduktoru před rezonátorem ve vzdálenosti 80 cm.



Obrázek 7-6: Měření se subwooferem umístěný na zemi.

7.3 Měření vibrací na čelních plochách rezonátoru

Na realizovaném rezonátoru bylo dále změřeno kmitání čelních desek, aby bylo ověřeno, že zjištěná pohltivost je opravdu dána principem Helmholtzova rezonátoru, a ne právě mechanickým kmitáním čelních desek.



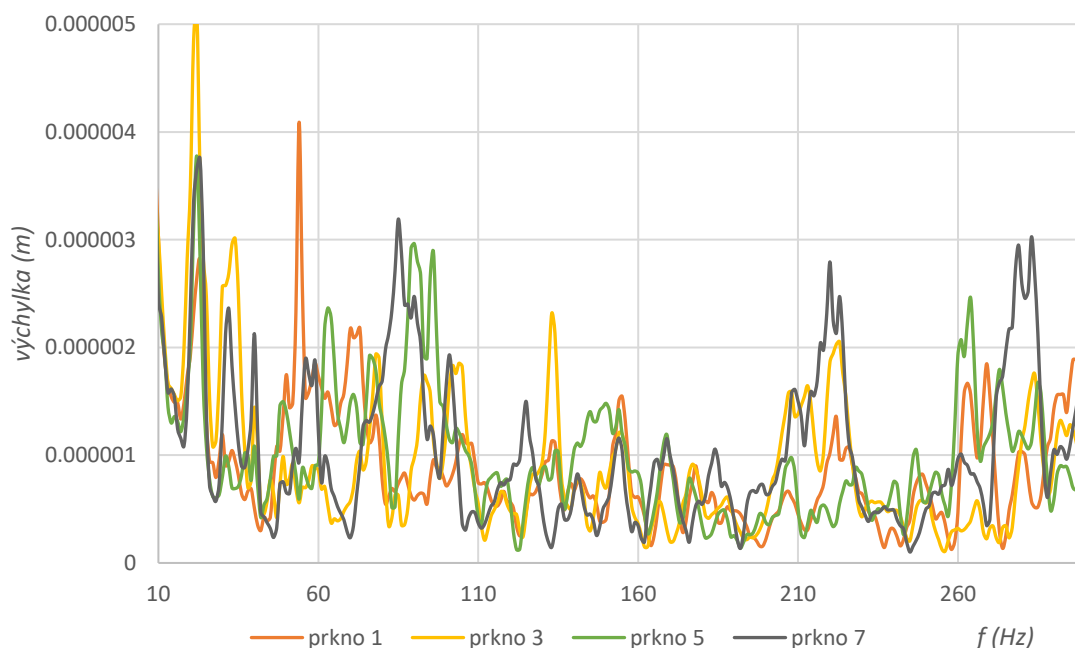
Obrázek 7-7: Foto z měření vibrací.

Na generátoru se nastavil bílý šum, reproduktor byl umístěn ve vzdálenosti 3 m od rezonátoru a vibrace se měřily pomocí piezoelektrického akcelerometru Brüel & Kjær 4507 zasunutého v plastových lůžkách, které byly přilepené oboustrannou lepicí páskou. Měřilo se kmitání pravé poloviny užších desek v polovině jejich výšky, dále v polovině výšky širších desek na pravém okraji rezonátoru, a nakonec ještě ve 3 různých výškách úzké desky, aby se porovnal vliv kmitání v prostřední sekci, spodní sekci a dole mezi vruty.

Přestože se jednalo o stejný materiál upevněný stejným způsobem, tak výsledky z každého měřicího bodu jsou lehce rozdílné. Kmitání na širších deskách mají vyšší výchylku oproti úzkým z důvodu jejich větší volné plochy a vyšší hmotnosti. Nicméně charakter výsledků na všech deskách je podobný.

7.3.1 Na úzkých deskách

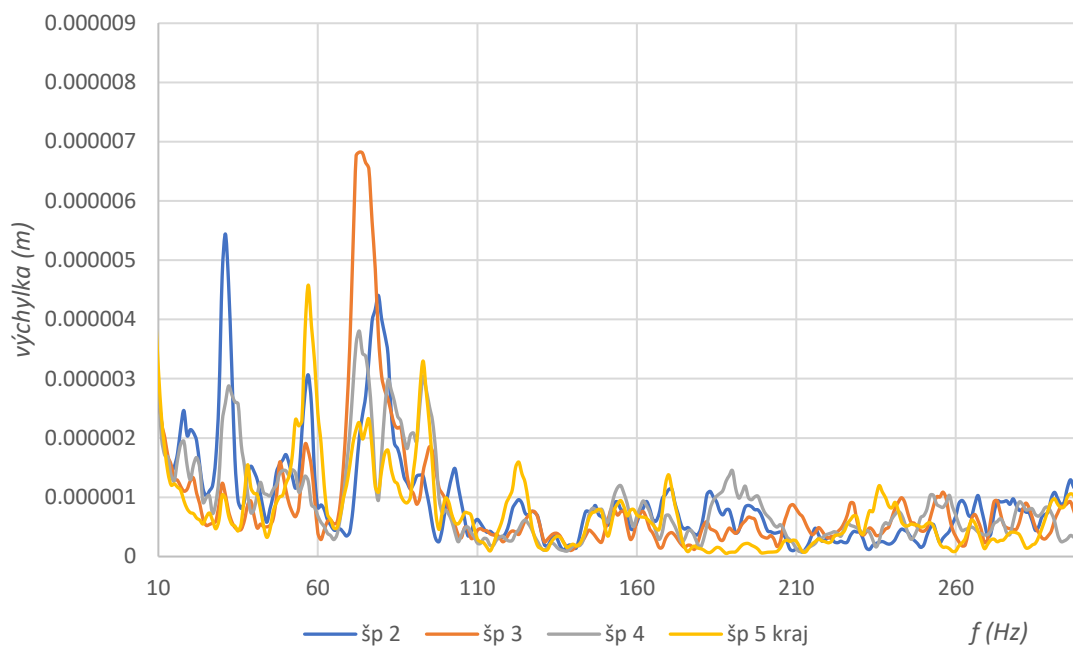
Deska 1 měla svou nejvýznamnější rezonanční frekvenci v 54 Hz, prkno 5 a 7 dosahovalo rezonance v podobných frekvencích a to ve 85 a 90 Hz. Prkno 7 pak zaznamenalo ještě významné rezonance v 220 a 280 Hz. Deska 3 má lehce odlišný průběh oproti ostatním, v zobrazovaném frekvenčním pásmu významnější rezonance byly zaznamenány na 133 a 218 Hz.



Obrázek 7-8: Měření výchylky úzkých desek v závislosti na frekvenci.

7.3.2 Na širokých deskách

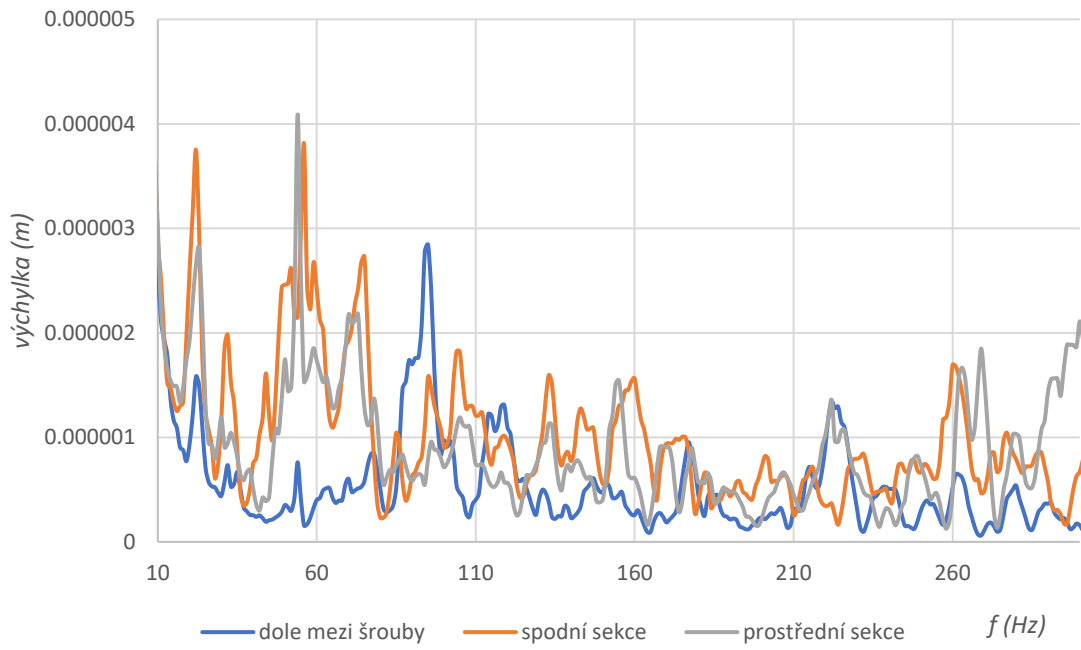
Na širokých deskách lze vidět podobnosti ve významných frekvencích 31, 57, 74 a 93 Hz. Široká deska 2 zaznamenala tři značné rezonance v 31, 57 a 74 Hz. Oproti tomu deska 3 měla pouze jednu, a to velmi značnou rezonanci na hodnotě 74 Hz.



Obrázek 7-9: Měření výchylky širokých desek v závislosti na frekvenci.

7.3.3 Jedna deska měřená ve třech bodech

Na grafu níže lze vidět vliv umístění měřicího místa akcelerometrů na desce. První měřicí bod byl umístěn v prostřední sekci desky, druhý se umístil ve spodní sekci a poslední mezi nejtuzší částí mezi upevňovací šrouby desky. Vidíme, že deska kmitala s daleko nižší výchylkou a maximální hodnota se zaznamenala ve frekvenci 95 Hz.



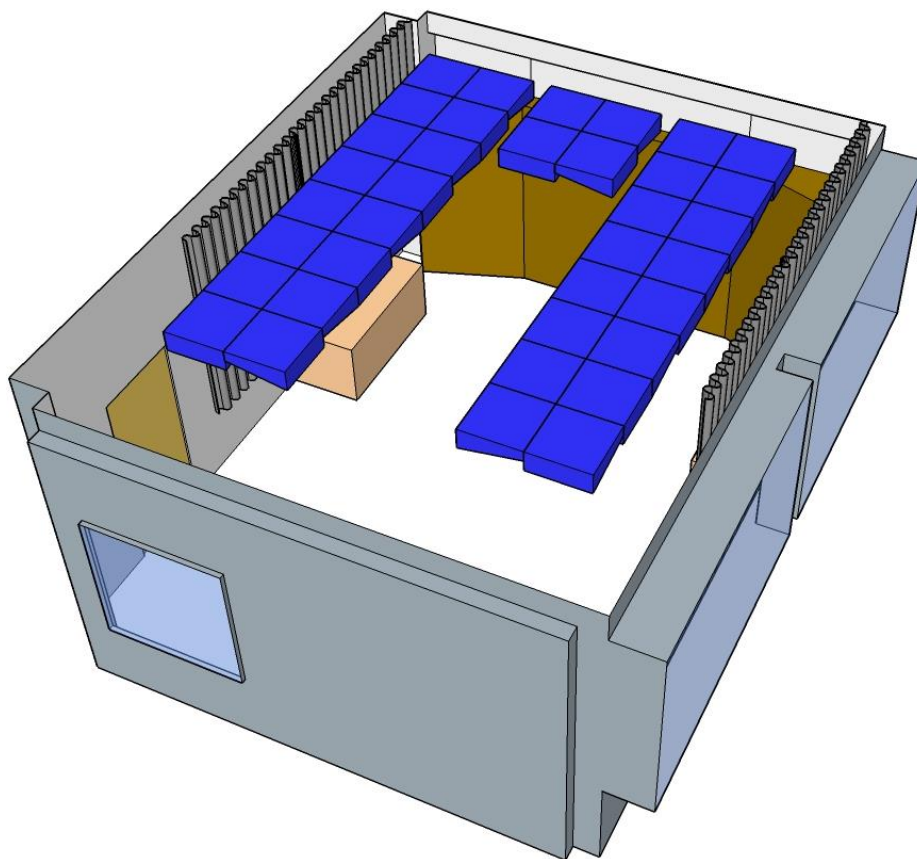
Obrázek 7-10: Měření vlivu umístění akcelerometru na jedné desce.

8 Další potřebné akustické úpravy

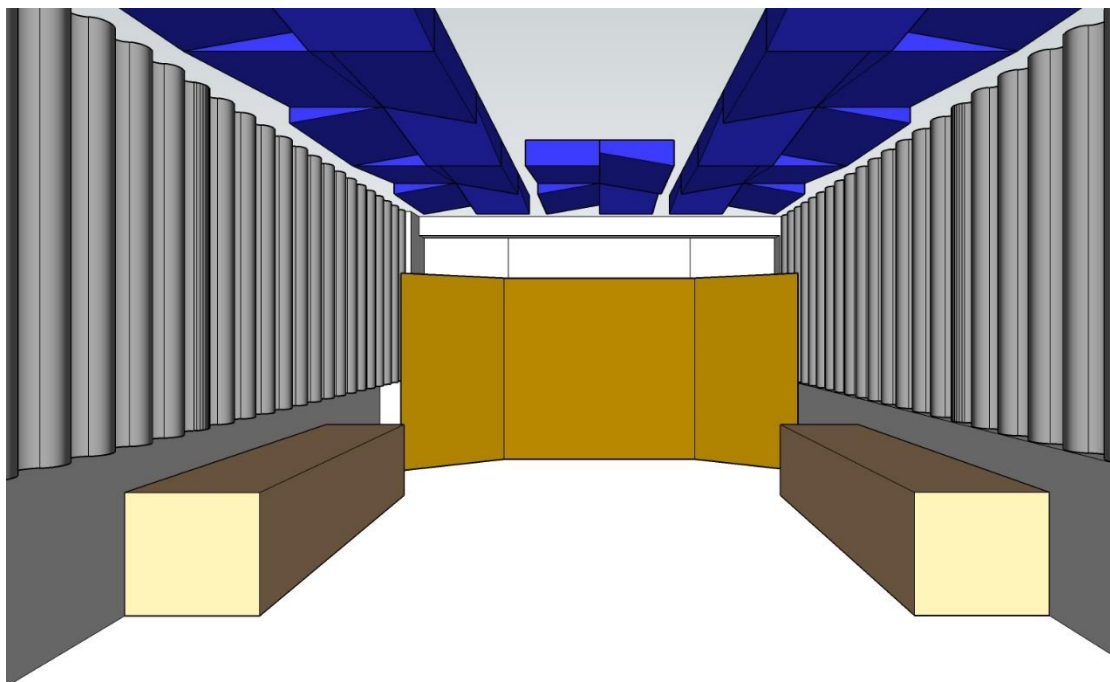
Aby bylo dosaženo symetrie poslechového prostoru a zamezeno odrazům od bočních stěn alespoň v pásmu středních a vysokých frekvencí, musí se přes okna na pravé straně umístit těžké akustické závěsy o hmotnosti 330 g/m^2 . Jejich vzdálenost od oken musí být cca 200 mm, čímž dojde k zvýšení jejich zvukové pohltivosti na nízkých frekvencích. Stejný závěs je nutné umístit také na levé straně místnosti.

Již dříve navržené a vyrobené Helmholtzovy rezonátory se šikmým horním víkem budou kazetově uspořádány na stropě prostoru. Otočením jednotlivých rezonátorů o 90° , by měla vzniknout členitá plocha chovající se jako difuzor. Každý samostatný prvek se ale bude chovat jako klasický Helmholtzův rezonátor, který má za úkol potlačit vlastní frekvence místnosti.

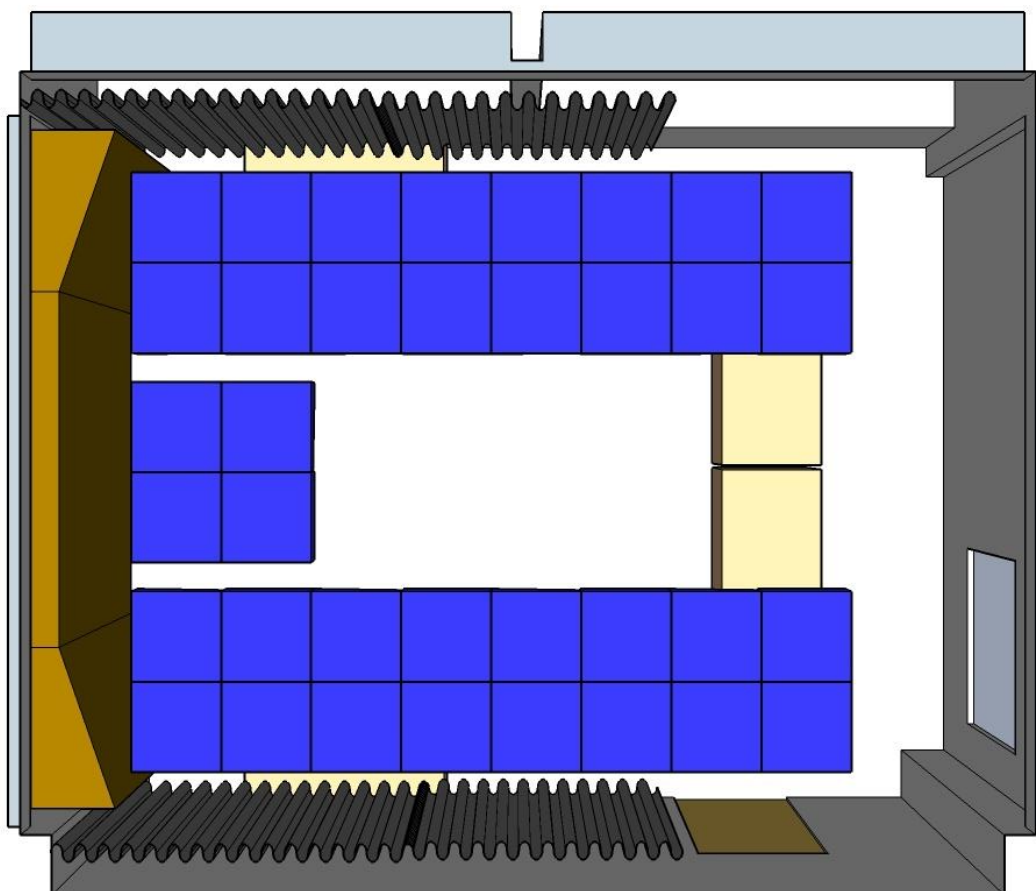
Model řešené místnosti s potřebnými akustickými úpravami je zobrazen níže.



Obrázek 8-1: Model finální podoby místnosti



Obrázek 8-2: Model finální podoby místnosti – pohled do interiéru.



Obrázek 8-3: Model finální podoby místnosti – pohled shora.

9 Závěr

Výsledkem práce byla realizace nízkofrekvenčního rezonátoru na čelní stěnu místnosti, který kromě snížení doby dozvuku na nízkých frekvencích předchází i jevu SBIR. Stavba zabrala cca 40 hodin a použitý materiál vyšel na cca 21 000 Kč.

Nejprve proběhlo měření parametrů doby dozvuku, kde se porovnalý výsledky před dokončením rezonátoru (pouze konstrukce vyplněná vatou, překrytá textilií) a pak také po montáži čelních desek. Rezonátor lze tedy po realizaci a ověření jeho parametrů považovat za dostatečně pohltivý v potřebném frekvenčním pásmu.

V dalším měření byl zkoumán vliv vzdálenosti reproduktoru od odrazivé stěny. Tento vliv byl nejdříve zkoumán ve známých podmínkách bezodrazové komory. Z naměřených dat lze vyzorovat, že s vyšší vzdáleností reproduktoru od stěny se snižuje frekvence, na které dochází k propadu v naměřené hladině akustického tlaku.

Další série měření proběhla v řešené místnosti EK708. Při měření s reproduktorem ve výšce 1,6 m jsme rovněž zaznamenali pokles hladiny akustického tlaku, nebyl ale tak úzký jako při měření v bezodrazové komoře. Tento jev se měnil s umístěním reproduktoru na podlahu místnosti i jinam mimo osu místnosti v poslechové výšce.

Poslední měření bylo věnováno vibracím čelních ploch rezonátoru. Přestože se jednalo o stejný materiál upevněný stejným způsobem, tak výsledky z každého měřicího bodu byly lehce rozdílné.

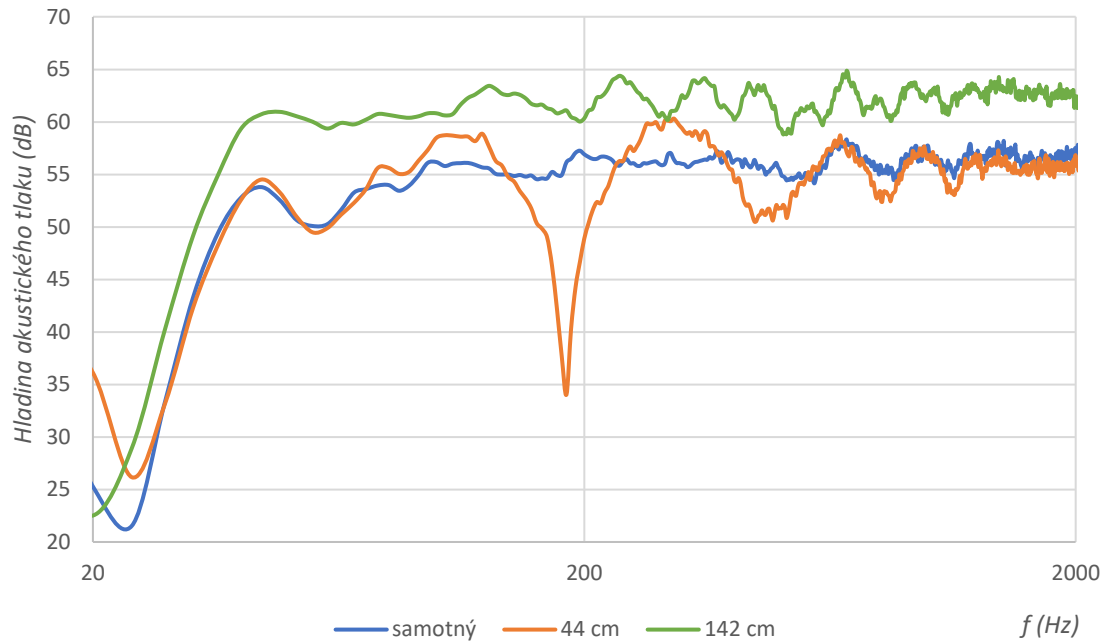
Projekt akustických úprav poslechové místnosti EK708 není zatím kompletně realizován. Pro splnění požadavků na dobu dozvuku místnosti a na rovnoměrné rozložení akustického pole v okolí hlavního poslechového místa budou potřebné ještě další akustické úpravy. Ty jsou konkrétně popsány v poslední kapitole práce a jejich umístění ukazují vytvořené vizualizace. Po instalaci všech zmíněných prvků poskytne prostor adekvátní podmínky pro subjektivní testování reprosoustav a výuku předmětů, které se věnují zpracování zvuku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha. 1982.
- [2] Akustika staveb. *TZB-info* [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb>
- [3] SMETANA, Ctirad. *Ozvučování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [4] ČSN 73 0525. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*. 1998.
- [5] ČSN 73 0526. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku*. 1998.
- [6] ČSN 73 0527. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely*. 2005.
- [7] Speaker Placement 101: Is Speaker-Boundary Interference Killing Your Bass? *Arqen.com* [online]. 11. listopad 2014 Dostupné z: <http://arqen.com/acoustics-101/speaker-placement-boundary-interference/>
- [8] *atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf* [online]. Dostupné z: https://www.dolby.com/siteassets/technologies/dolby-atmos/atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf
- [9] *Landgráf - 2021 - Bakalářská práce.pdf* [online]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/44506/1/BP_Landgraf_Martin.pdf
- [10] KALINOVÁ, Klára. *Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury* [online]. Technická Univerzita v Liberci, 2005. Thesis. b.n. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38927>
- [11] Akustika staveb. *TZB-info* [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb>
- [12] ČSN EN ISO 354. *Akustika – Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. Praha: Český normalizační institut 2003
- [13] *Everest and Pohlmann - Master Handbook of Acoustics.pdf* [online]. Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/arena-attachments/559608/dd2eece63c4d53a0d1175925afdf17c4.pdf>
- [14] VAŠINA, Martin. *Studium materiálů z hlediska tlumení zvuku a vibrací* [online]. 2010. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20428789-Vysoke-uceni-technicke-v-brne-fakulta-stavebni-ustav-fyziky.html>
- [15] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Praha: Skriptum ČVUT, 1995.

- [16] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika I. Brno: VUTIUM*. 1998. ISBN 80-214-1283-6.
- [17] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace (Měření a hodnocení)*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 2008. ISBN 80-901936-2-5.
- [18] AKUSTICKÉ IZOLACE V PŘÍČKÁCH. Dostupné z: <https://www.isover.cz/blog/akusticke-izolace-v-prickach>
- [19] STAVEBNIPASKY.CZ. Basotect® Akustická pěna Deska šedá 500mm x 1000mm x 30mm. *StavebniPasky.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.stavebnipasky.cz/basotect-akusticka-pena-deska-seda-500mm-x-1000mm-x-30mm>
- [20] BALKOVSKÝ, Bronislav. *Návrh akustických úprav poslechové místnosti*. Plzeň: Dostupné z: <https://theses.cz/id/8n69op/>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček, Ph.D, 2011.
- [21] UMNOVA, O. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling of Sound Absorbing Materials, 2nd edition, J.F. Allard, N. Atalla, John Wiley & Sons, Ltd. (2009), ISBN: 978-0-470-74661-5. *Journal of Sound and Vibration - J SOUND VIB* [online]. 2010, **329**, 4333–4334. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2010.04.019
- [22] BARRON, Mike. Trevor J. Cox, Peter D'Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application, Spon Press, London, New York. 432pp, £=95.00 ISBN 0-415-29649-8 . *Journal of Sound Vibration* [online]. 2006, **295**, 1105–1106. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2006.01.055

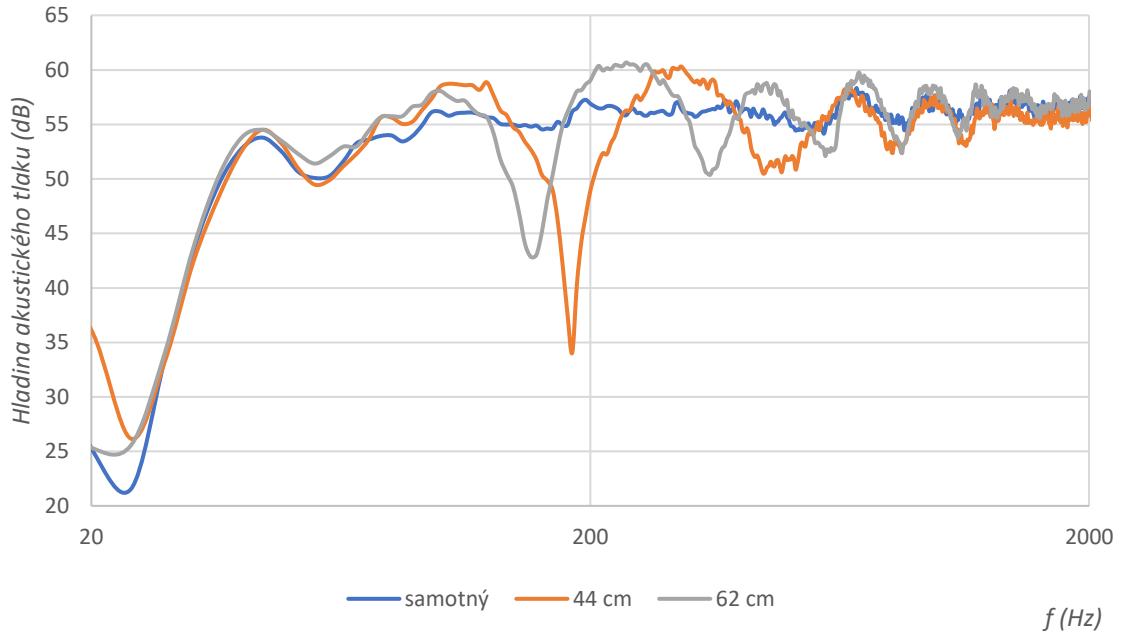
Přílohy



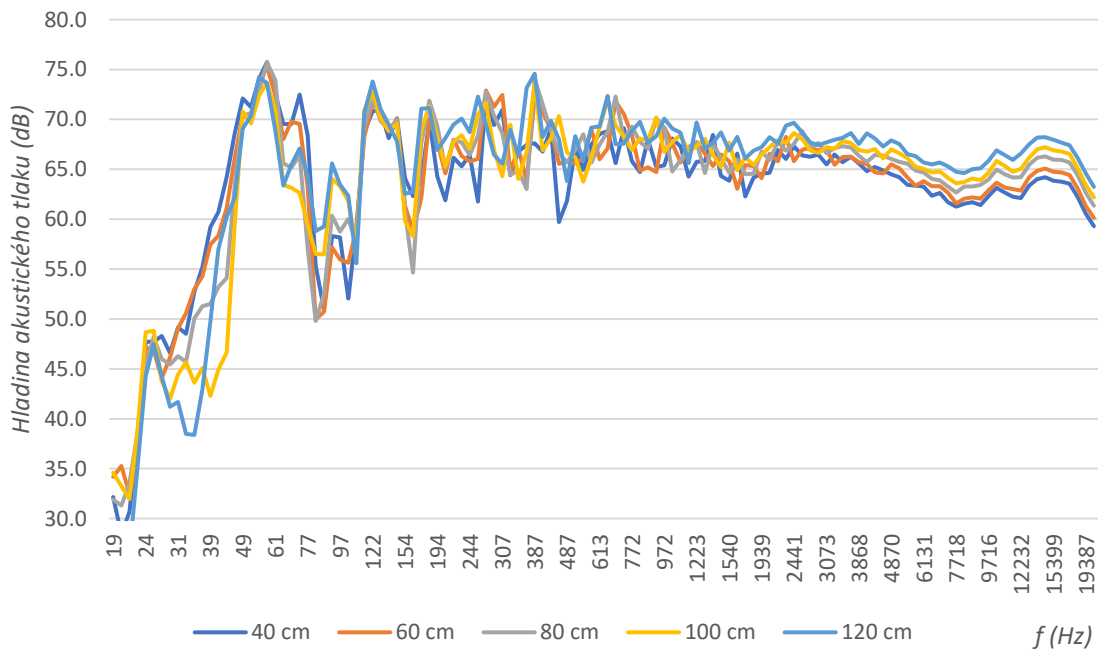
Obrázek 0-1: Vliv vzdálenosti reproduktoru od desky v bezodrazové komoře v 44 cm 142 cm v porovnání s průběhem samotného reproduktoru bez desky.



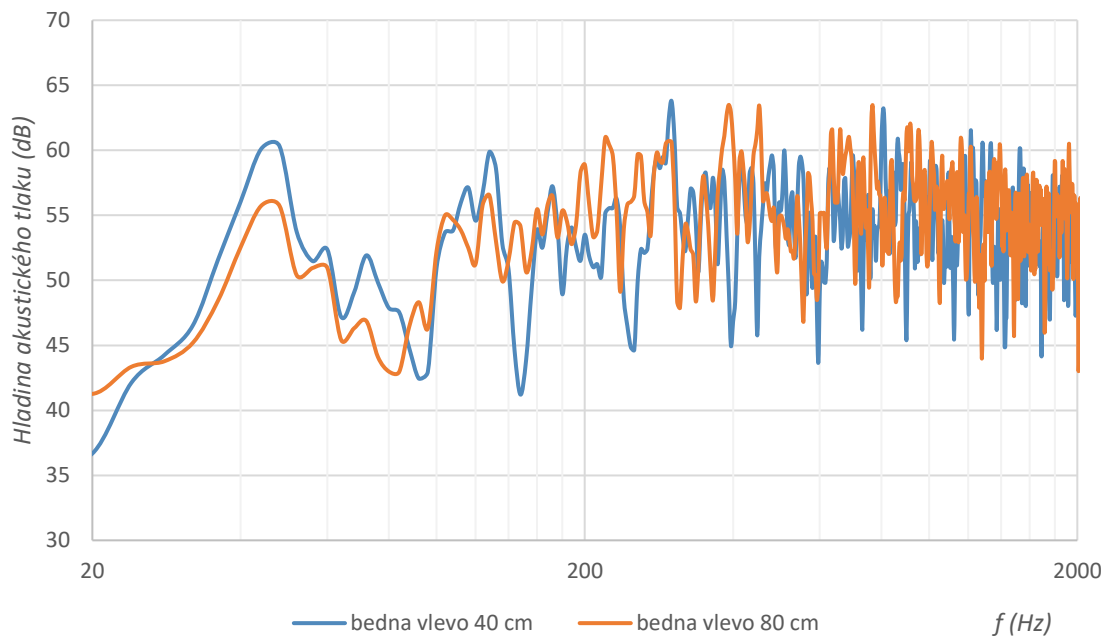
Obrázek 0-2: Vliv vzdálenosti reproduktoru od desky v bezodrazové komoře v 84 cm a 100 cm v porovnání s průběhem samotného reproduktoru bez desky.



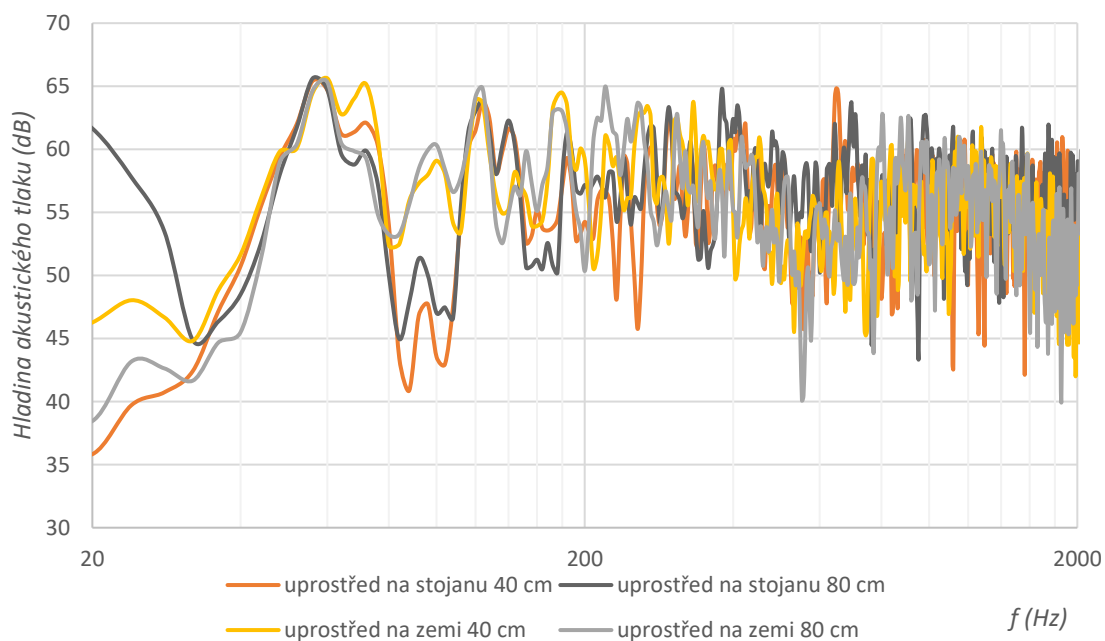
Obrázek 0-3: Vliv vzdálenosti reproduktoru od desky v bezodrazové komoře v 44 cm a 62 cm v porovnání s průběhem samotného reproduktoru bez desky.



Obrázek 0-4: Vliv vzdálenosti reproduktoru od rezonátoru ve všech měřících bodech ve výšce 160 cm.



Obrázek 0-5: Vliv vzdálenosti reproduktoru od rezonátoru v 40 cm a 80 cm na zemi a na stojanu.



Obrázek 0-6: Vliv vzdálenosti reproduktoru od rezonátoru v 40 cm a 80 cm na zemi a na stojanu.