

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Možnosti realizace dozvuku v nahrávkách pomocí
dozvukové komory**

vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček Ph.D.
autor: Bc. Martin Adamovský

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ADAMOVSKÝ**
Osobní číslo: **E10N0085P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Možnosti realizace dozvuku v nahrávkách pomocí dozvukové komory**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte parametry dozvukové komory ZČU FEL.
2. Zmapujte rozložení zvukového pole v dozvukové komoře.
3. Realizujte algoritmus dozvuku v nahrávkách pomocí vhodné stereofonní techniky snímání zvuku v dozvukové komoře.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce zkoumá možnosti využití dozvukové komory jako nástroje pro efektové úpravy zvuku v hudebních nahrávkách. Cílem je nastínit možnosti využití dozvukové komory v oblasti zvukové a nahrávací techniky.

Práce obsahuje kromě shrnutí základních principů prostorové akustiky i pohled na metody realizace dozvuku v minulosti a současnosti. Jádrem práce je pak realizace algoritmu dozvuku pomocí dvou typů stereofonní techniky snímání prostřednictvím výsledků měření dozvuku a vlastních frekvencí dozvukové místnosti.

Klíčová slova

Prostorová akustika, dozvuk, dozvuková komora, doba dozvuku, činitel zvukové pohltivosti, difúznost, vlastní kmity, akustické materiály.

Abstract

This dissertation explores the possibility of using reverberation chamber as an element for effect modification of musical recordings. The main objective is to outline the possibilities of a reverberation chamber for sound and recording techniques.

The work also contains a summary of the basic principles of architectural acoustics view of the methods of implementation of reverberation in the past and present. The main core of the work is to implement of the algorithm of reverb using two different types of stereo recording techniques through the results of measurement of self oscillations and reverberation time.

Keywords

Architectural acoustics, reverb, reverberation chamber, reverberation time, sound absorption coefficient, diffusion, self oscillations, acoustic materials.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 11.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za řadu cenných rad v průběhu tvorby práce a za pomoc při realizaci měření.

Úvod	8
1 Prostorová akustika	10
1.1 Vznik dozvuku v uzavřených prostorech	10
1.1.1 Činitel zvukové pohltivosti	11
1.1.2 Objem místnosti	13
1.2 Doba dozvuku	14
1.3 Difúznost	17
1.4 Vlastní kmity	17
1.5 Princip pohlcování zvuku	19
1.6 Typy akustických obkladů	20
1.6.1 Porézní materiály	20
1.6.2 Membrány	21
1.6.3 Kmitající desky	22
1.6.4 Helmholtzovy rezonátory a děrované desky	22
1.7 Dozvukové komory	24
1.7.1 Konstrukce dozvukových komor	25
1.7.2 Difúzní prvky	25
1.7.3 Měření doby dozvuku	26
1.7.4 Měření činitele zvukové pohltivosti	27
1.7.5 Dozvuková komora FEL	28
2 Realizace dozvuku v nahrávkách	29
2.1 Využití přirozeného dozvuku	30
2.2 Umělá dozvuková zařízení	32
2.2.1 Elektromechanická dozvuková zařízení	32
2.2.2 Elektronická dozvuková zařízení	33
3 Měření vlastních kmitů	34
3.1 Metodika měření	34
3.2 Použité přístroje	36
3.3 Výsledky měření	36
4 Měření dozvuku	38
4.1 Metodika měření	38
4.2 Použité přístroje	41
4.3 Výsledky měření	41
5 Realizace dozvuku	45
5.1 Metodika	45
5.2 Použité přístroje	46
5.3 Nahrávací řetězec	46
5.3.1 Konfigurace XY	47
5.3.2 Konfigurace AB	48
5.4 Zpracování a výsledky	49
6 Závěr	52

Úvod

Dozvuk je stejně jako například světlo velmi úzce svázán s prostorem. Určuje jeho tvar, zdůrazňuje jeho velikost a členitost a co především, kombinace mnoha těchto zákonitostí má rozhodující vliv na míru pocitového prožitku člověka, jenž se v něm nachází. Znalost tohoto neoddelitelného propojení je člověku známa již tisíce let a historický vývoj především evropské hudby je velmi úzce spjatý právě s prostorem, ve kterém byla interpretována. Důkazem může být například řada barokních skladeb, které byly komponovány nejen pro určité typy prostor, ale dokonce i pro konkrétní církevní stavby, ve kterých měla být díla později prezentována.

Současná moderní doba a především rozvoj a znalost měřicí techniky v akustice dovoluje již mnoho zvukových vlastností prostoru popsat kvalitativně a kvantitativně. V mnoha případech tedy dokážeme pomocí fyzikálních principů a měření převést estetický vjem posluchače do vědecké roviny a najít jeho reálné fyzikální příčiny a zákonitosti.

Počátky prvních vědeckých pohledů na dozvuk a jeho propojení s prostorem spadají do počátku 20. století. Tehdy začaly vznikat první dozvukové komory, které jsou až do současnosti nejpoužívanějším nástrojem k měření akustické pohltivosti celé řady materiálů. Myšlenka jejich využití v oblasti hudby na sebe nenechala dlouho čekat, obzvláště v důsledku tehdejšího rychlého rozvoje nahrávací techniky.

Cílem diplomové práce je subjektivně zhodnotit na základě kvantitativních měření zvukového pole v dozvukové komoře FEL využití dozvukových komor v oblasti nahrávací techniky. O tom, že se jedná o téma velmi neobvyklé a svým způsobem jedinečné svědčí i fakt, že se zřejmě jedná, dle poznatků autora, o vůbec první pokus v České republice využít dozvukovou komoru právě v této oblasti.

Seznam symbolů

I [$\text{W}\cdot\text{m}^2$].....	Intenzita zvuku
α [-].....	Činitel zvukové pohltivosti
f_0 [Hz].....	Rezonanční frekvence
T_s [s].....	Doba dozvuku dle Sabina
T_e [s].....	Doba dozvuku dle Eyringa
T_m [s].....	Doba dozvuku dle Millingtona
R_d [m].....	Poloměr doznívání
L_p [dB].....	Hladina akustického tlaku

1 Prostorová akustika

1.1 Vznik dozvuku v uzavřených prostorech

Dozvuk je z akustického pohledu nejvýraznější vlastností každého uzavřeného prostoru. Jeho vznik souvisí jednak s vlastnostmi šíření zvuku v daném prostředí a také s interakcí zvukových vln s materiály, které se v jejich dráze nachází. Tvar a rozložení těchto vln jsou závislé na rozměrech a vyzařovacích vlastnostech zdroje zvuku a v prostoru se šíří rychlostí rovnou rychlosti šíření zvuku v daném prostředí až do okamžiku, než se střetnou s překážkou. Tou může být například plocha zdi, stropu či podlahy, nebo předmět, který se nachází uvnitř prostoru, jako je židle, stůl či sedící divák v koncertním sále. Pokud budeme uvažovat rozměry těchto překážek dostatečně velké ve vztahu k vlnové délce generovaného zvuku, nastane v okamžiku střetu vln s plochou této překážky k odrazu zvukového vlnění (v opačném případě se uplatní více či méně difrakční jevy). Z energetického hlediska však není možné, aby energie zvukové vlny dopadající na plochu překážky byla zcela shodná s energií vlny od plochy odražené. Určitá část se tedy vždy pohltí a přemění na jinou formu energie, nejčastěji na energii tepelnou. Míra ztráty této energie je charakterizována fyzikální veličinou, kterou označujeme jako činitel zvukové pohltivosti. V praxi se tedy po vypnutí zdroje zvuk šíří prostorem až do okamžiku, než je všechna jeho energie pohlcena (útlum zvukových vln ve vzduchu můžeme v tento okamžik zanedbat). Zvuk, jenž se šíří prostorem po vypnutí zdroje, pak označujeme jako dozvuk a doba, za kterou dojde k pohlcení veškeré zvukové energie, pak dobou dozvuku.

Z těchto faktů vyplývá, že dobu dozvuku je možné ovlivnit (například při konstrukci nebo úpravě jakéhokoli uzavřeného prostoru) pouze dvěma způsoby. První z nich je založen na změně činitele zvukové pohltivosti materiálů, které se v daném prostoru nachází. V praxi je tedy nutné upravit interiér dostatečně velkou plochou materiálů, které vykazují podle potřeby vyšší nebo nižší pohltivost zvukové energie. Druhým způsobem je změna objemu prostoru. Objem je však prakticky nemožné měnit bez výraznějšího narušení konstrukce a funkčnosti prostoru v takové míře, aby měla jeho změna na dobu dozvuku postačující vliv. V praxi je tedy nejefektivnější a často jedinou možností, jak regulovat dobu dozvuku, změna činitele zvukové pohltivosti.

1.1.1 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti je definován jako poměr energie zvukové vlny odražené od povrchu materiálu a energie dopadající na jeho povrch pod určitým úhlem. Vzorec níže respektuje kolmý dopad zvukových vln:

$$\alpha = \frac{I_{odr.}}{I_{dop.}} \quad (1)$$

Velikost činitele zvukové pohltivosti se pohybuje v intervalu od 0 (ideálně odrazivý materiál) do 1 (ideálně pohltivý materiál). Ideálně odrazivým materiálům se v praxi přibližují především hladké nebo leštěné povrchy jako například hlazený beton, sklo či mramor, ideálně pohltivým materiálům pak celá řada akustických obkladů. U odlišné definice činitele zvukové pohltivosti, která je založena na měření doby dozvuku v dozvukové místnosti, může například v důsledku ohybových jevů nabývat i hodnot vyšších než 1 a v takovém případě ho označujeme s indexem α_s . Více bude o této problematice zmíněno v části týkající se dozvukových komor.

Činitel zvukové pohltivosti je veličina závislá na frekvenci dopadajících zvukových vln. U každého materiálu můžeme najít jednu či více rezonančních frekvencí, při kterých dosahuje maximálních hodnot a naopak oblasti zvukového spektra, ve kterých je jeho velikost malá a pohltivé účinky jsou minimální. Frekvenční závislost charakterizuje vzorec vycházející z vlnové rovnice zvukového pole pro rovinné vlny:

$$\alpha_N = \frac{4RZ_0}{(R + Z_0)^2 + X^2} \quad (2)$$

Tento vztah popisuje závislost činitele zvukové pohltivosti při kolmém dopadu zvukových vln na jednotlivých složkách akustické impedance. Reálná složka akustické impedance R je závislá na odporu vznikajícím v porézním materiálu akustického obkladu a imaginární složka X na vzájemném působení hmotové reaktance (tu charakterizují například otvory děrovaného panelu) a poddajnostní reaktance (poddajnost vzduchového polštáře mezi obkladem a stěnou

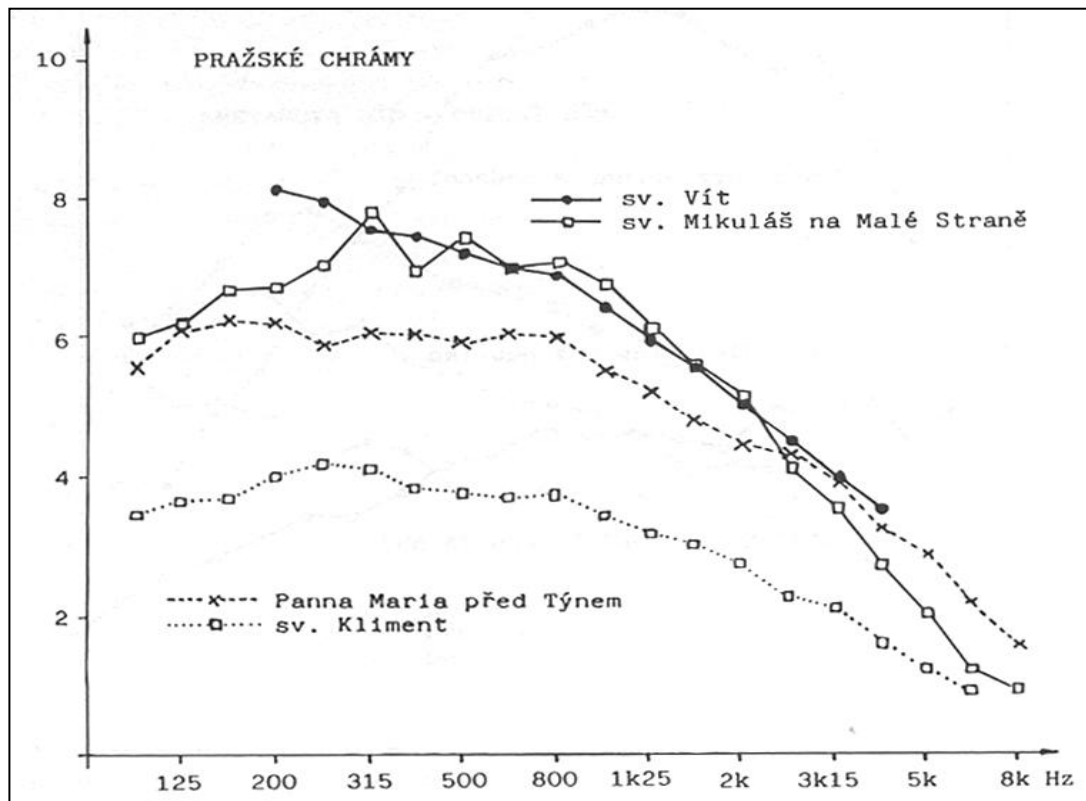
místnosti). Veličina Z_0 udává vlnový odpor prostředí, který je pro vzduch za běžných atmosférických podmínek konstantou rovnou $420 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$.

Důvodem frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti je fakt, že obě složky akustické impedance, především pak složka imaginární reprezentovaná hmotovou a poddajnostní reaktancí, jsou také frekvenčně závislé. Mezní situace nastane, pokud je velikost obou reaktancí stejná. V takovém případě imaginární složka zcela vymizí a hodnota činitele zvukové pohltivosti dosáhne svého maxima. Frekvence, při níž je této maximální hodnoty dosaženo, je rovna již zmíněné rezonanční frekvenci f_0 . O tom, jak vysoká bude při této frekvenci hodnota činitele zvukové pohltivosti, rozhoduje pak velikost zbylé reálné složky akustické impedance. Čím větší bude ve vztahu k hodnotě vlnového odporu, tím bude vyšší. V případě rovnosti $R=Z_0$ bude $\alpha_N = 1$.

V praxi se snažíme dosáhnout v okamžiku rezonanční frekvence co nejvyšších hodnot činitele akustické pohltivosti. Je tedy nutné přizpůsobit hodnotu reálné složky akustické impedance co nejvíce hodnotě vlnového odporu vzduchu. Znalost závislosti akustické impedance na konstrukci pohltivých materiálů je tedy v praxi při řešení změny doby dozvuku zcela zásadní. Při řešení akustických úprav prostorů se snažíme, aby tvar frekvenční charakteristiky činitele zvukové pohltivosti byl co nejvíce podobný tvaru frekvenční charakteristiky doby dozvuku prázdné místnosti před instalací akustického obkladu. V případě ideální shody by byla výsledná charakteristika doby dozvuku přímková, nezávislá na frekvenci a bylo by potřeba nejmenší plochy akustického obkladu.

1.1.2 Objem místnosti

Druhý parametr, který ve velké míře ovlivňuje dobu dozvuku, je objem prostoru. Čím větší je totiž jeho objem, tím větší je volná dráha¹ zvukových paprsků. V objemnějším prostoru jsou volné dráhy zvukových vln delší, a proto je delší i čas potřebný k utlumení zvuku. Doba dozvuku se tedy prodlužuje. Na velikost volné dráhy zvukových vln má do určité míry vliv i tvar prostoru, ale v praxi je tento rozdíl zanedbatelný.



Obr. 1.1 Doba dozvuku vybraných pražských chrámů [1]

Velikost objemu místnosti souvisí také s útlumem zvukových vln. Ten je závislý na třech veličinách a to na činiteli útlumu, velikosti intenzity šířících se vln a délce dráhy zvuku. Činitel útlumu je pak závislý na viskozitě, tepelné vodivosti, absorpci a disperzi ve víceatomových molekulách, relativní vlhkosti, teplotě a kmitočtu. V praxi je útlum intenzity zvuku výrazněji patrný jen u větších prostor a na frekvencích vyšších než 2 kHz.

¹ Jako volnou dráhu označujeme vzdálenost, kterou musí zvukový paprsek urazit mezi dvěma po sobě následujícími odrazy.

1.2 Doba dozvuku

Standardní doba dozvuku je definována jako doba, potřebná k poklesu ustálené hodnoty zvukové energie po vypnutí zdroje zvuku na 10^{-6} původní hodnoty. V logaritmické škále se jedná o pokles intenzity zvukové energie o 60 dB. S ohledem na objem místnosti a činitele zvukové pohltivosti je standardní doba dozvuku definována pomocí několika vztahů, přičemž každý je v praxi vhodný pro výpočet jiného typu prostor. Doba dozvuku podle Sabina je definována vzorcem:

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad (3)$$

kde V je objem místnosti, α činitel zvukové pohltivosti plochy o obsahu S . Součin předchozích dvou veličin je možné také vyjádřit jako pohltivost materiálu a označujeme ho A . Za předpokladu, že ohraničující plochy nemají konstantní činitel zvukové pohltivosti, dosazuje se do vzorce průměrná hodnota daná vztahem:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (4)$$

kde S je celková plocha všech ohraničujících ploch a součiny $\alpha_n S_n$ udávají pohltivost jednotlivých ploch s rozdílnou hodnotou α . Sabinův vzorec však v praxi vyhovuje pouze pro prostory s velmi dobře odrazivými plochami (tedy s nízkými hodnotami α). To je způsobeno předpokladem lineárního pohlcování zvukové energie.

Modifikovaný Eyringův vzorec předpokládá při interakci s plochami skokové zeslabení zvukových paprsků a vyhovuje i prostorám s vyšším činitelem zvukové pohltivosti:

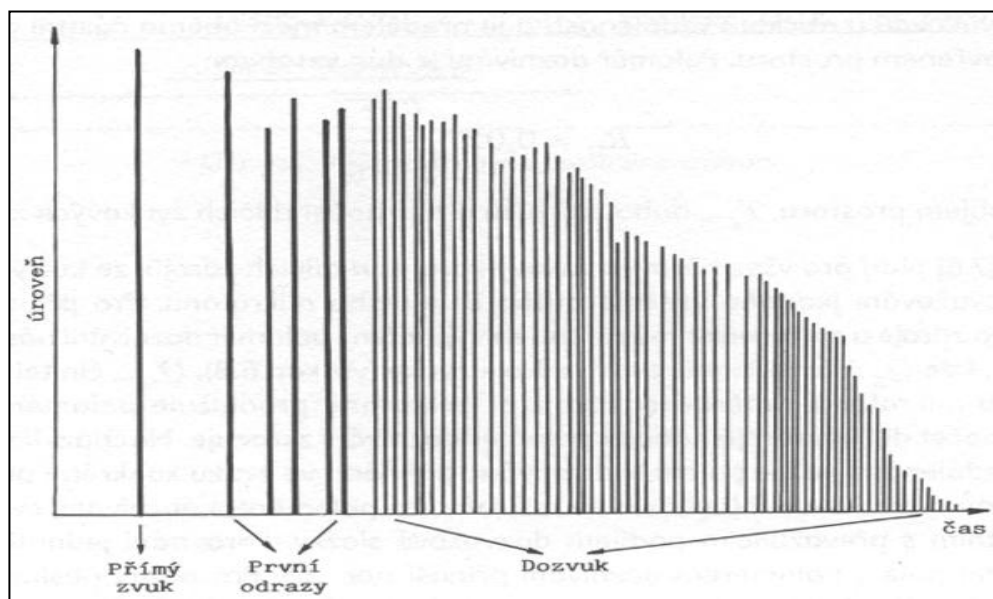
$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (5)$$

Z měření, provedených v praxi se však ukázalo, že ani tento vzorec není dostatečně přesný a to především pro prostory s činitelem zvukové pohltivosti vyšším než 0,8. Proto byl

stanoven jako nejuniverzálnější vzorec Millingtonův, který předpokládá snížení intenzity zvuku odrazem od jednotlivých ploch s obsahem S_i a činitelem zvukové pohltivosti α_i :

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (6)$$

Obecně je za dozvuk považována veškerá zvuková energie, která se šíří prostorem po vypnutí zdroje zvuku. V praxi je však nutné rozlišovat zvuk, který posluchač vnímá v prostoru jako přímý a zvuk odražený, který je v jeho sluchovém orgánu zaznamenán později. Přímý zvuk je zaznamenán jako první a jeho intenzita je závislá pouze na vzdálenosti posluchače od zdroje a na útlumu zvuku. Přímý zvuk má také důležitý vliv na lokalizaci zdroje zvuku. Po přímém zvuku následuje sled prvních odrazů, které vznikají odrazy od stěn, stropu a částečně i od podlahy. Ty již vykazují rozdílné intenzitní a spektrální vlastnosti, které jsou způsobené především charakterem odrazných ploch. Teprve až po sérii prvotních odrazů následuje vlastní dozvuk jako sled mnoha hustě za sebou jdoucích odrazů, které ale již lidské ucho není schopno rozlišovat jednotlivě. Z hlediska posouzení akustické kvality prostor má důležitý vliv počáteční doba dozvuku, která se vyhodnocuje z prvních 10 dB poklesové křivky. Nejdůležitější kritéria jsou pak především časový odstup prvotních odrazů od přímého zvuku, jejich úroveň, intenzita a dále pak samotný průběh a hustota vlastního dozvuku.



Obr. 1.2 Dozvuk jako sled po sobě následujících odrazů [1]

Důležitou vlastností uzavřených prostor je i poloměr doznívání. Ten tvoří vzdálenost od zdroje zvuku, ve které je energie přímých vln rovna energii vln odražených. V menší vzdálenosti, než je poloměr doznívání, blíže ke zdroji zvuku, se akustické pole více blíží poli volnému a naopak ve vzdálenosti větší poli dozvukovému. Poloměr doznívání je vyjádřen vztahem:

$$R_D = 0,057 \sqrt{\frac{V}{nT_D}} \quad (7)$$

Ze vzorce je patrné, že poloměr doznívání je závislý pouze na objemu místnosti a době dozvuku. Jelikož je však doba dozvuku frekvenčně závislá, mění se v závislosti na frekvenci i poloměr doznívání. Index n respektuje použití většího počtu zvukových zdrojů.

1.3 Difúznost

Důležitou vlastností zvukového pole každé uzavřené místnosti je míra jeho difúznosti. Nejčastěji se charakterizuje jako jakési „obklopení hudbou“ a pro kvalitní estetický vjem produkovaného zvuku je zcela zásadní. Prostor, který můžeme označit za dokonale difúzní má tu vlastnost, že v každém jeho bodě je střední úroveň akustické energie stejná. Všechny body prostoru jsou si tedy z akustického hlediska rovnocenné a v každém z nich má počet odražených zvukových vln náhodný charakter. Vlastnosti takového prostoru lze popsat pouze jedním parametrem - dobou dozvuku a zvukové pole takového prostoru lze označit za izotropní.

Z praktického hlediska je míra difúznosti společně s dobou dozvuku rozhodující pro vjem prostorovosti a má zásadní vliv na kvalitu poslechu hudby a řeči. Dosažení vysoké míry difúznosti prostorů je tedy nejdůležitějším úkolem při konstrukci a akustických úpravách koncertních sálů, divadel, nahrávacích studií, poslucháren, atd. O rozptylujících akustických prvcích, kterými je možné difúznosti dosáhnout, bude více zmíněno v části věnované dozvukovým komorám.

1.4 Vlastní kmity

S difúzností prostoru úzce souvisí rozložení vlastních kmitů. Každý prostor totiž vykazuje na základě svých rozměrů a objemu výskyt velkého množství frekvencí, které označujeme jako vlastní kmity nebo také vlastní frekvence. Při shodě s budícím signálem na nich dochází v důsledku stojatého vlnění k rezonancím, které narušují celkovou difúznost prostoru a mají i nepříznivý vliv na tvar dozvukové křivky. Stojaté vlnění vzniká v prostoru složením přímé a odražené zvukové vlny od vzájemně rovnoběžných stěn, a proto je při konstrukci nebo úpravách prostorů důležité zajistit alespoň částečně jejich různoběžnost. Dále je doporučováno, aby rozměry prostoru nebyly navzájem v poměru celočíselných násobků (nevhodný je tedy např. poměr 1:2:4). Vliv na rozložení vlastních kmitů má v neposlední řadě také jeho objem.

Důležitou akustickou podmínkou při návrhu prostorů je zajistit dostatečně husté rozložení vlastních kmitů v co nejširším kmitočtovém pásmu. Od jisté frekvence f_k , kterou označujeme jako kritická frekvence a byla stanovena experimentálně, je totiž hustota vlastních kmitů již

dostatečně velká (rezonanční maxima jednotlivých vlastních kmitů se již vzájemně překrývají) a nad touto frekvencí je již splněno kritérium difúznosti prostoru:

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (8)$$

kde T je doba dozvuku v sekundách a V objem místnosti v m^3 .

Jednoduše je také možné stanovit nejnižší frekvenci vlastního kmitu. Její velikost je nepřímo úměrná největšímu rozměru daného prostoru:

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2l_x} \quad (9)$$

Kde c je rychlost zvuku v daném prostředí a l_x reprezentuje největší rozměr uvažovaného prostoru.

1.5 Princip pohlcování zvuku

Mechanika pohlcování zvuku je vždy založena na principu přeměny zvukové energie v energii jinou. Rozlišujeme tři základní způsoby přeměny zvukové energie:

- a) přeměna založená na principu tření v porézních materiálech (přeměna v teplo)
- b) přeměna založená na principu relaxačních změn akustického tlaku
- c) přeměna založená na principu nepružné deformace těles

K přeměně zvukové energie v tepelnou dochází vlivem viskózních sil u materiálů s vláknitou nebo kanálkovou strukturou. Samotná přeměna akustické energie probíhá v těsné blízkosti vláken v mezní vrstvě na jejich povrchu, která je v klidu. Nad touto mezní vrstvou se nachází další vzduchová vrstva, která koná pohyb v závislosti na akustické rychlosti. Třením těchto dvou vrstev dochází ke vzniku tepla a tak i ztrátě akustické energie.

Relaxační přeměna zvukové energie vzniká jako následek poklesu akustického tlaku. V místech látky, kde dochází ke zhuštění částic vzduchu, zároveň stoupá celkový tlak. Akustický tlak zde tedy dosahuje kladných hodnot. Pokud dojde ke zmenšení (relaxaci tlaku) v tomto místě, zmenší se tak i celková potenciální energie a energie zvukové vlny se zmenší. Tento způsob přeměny nastává především u materiálů s dobrou tepelnou vodivostí. V místech výrazného zhuštění částic dochází totiž k nárůstu teploty a pokud je látka schopna část tohoto tepla rychle odvést, dojde k vyrovnání teploty s okolím a tedy k relaxaci tlaku.

Třetím typem přeměny zvukové energie je přeměna založená na základě nepružné deformace těles. Toho principu je využito především u rezonátorů, kde se vzduch v otvoru rezonátoru chová jako hmotný píst na poddajném vzduchovém polštáři, který se pohybuje v závislosti na dopadajících zvukových vlnách. Vzduchová hmota se při dopadu zvukové vlny deformuje, avšak nenavrátil se zpět do původního stavu v okamžiku, kdy síla na něj přestane působit. Tento rozdíl pak představuje úbytek zvukové energie.

1.6 Typy akustických obkladů

1.6.1 Porézní materiály

Nejdůležitějším typem akustických obkladů, jsou porézní materiály. Jedná se o materiály vláknité (např. různé typy skelných nebo minerálních vat), kanálkovité nebo pěněné. Obecně se vyznačují vysokým stupněm poréznosti (např. u vláknitých materiálů dosahuje objem samotných vláken často jen několik procent objemu celkového). Dalšími požadavky jsou především nehořlavost, soudržnost, dobrá opracovatelnost, nízká měrná hmotnost, časová stálost a nízká cena. Co se týče akustické pohltivosti těchto materiálů, významně závisí na velikosti akustické impedance, především na velikosti její reálné složky. Ta je závislá u vláknitých materiálů na povrchu vláken a u kanálkovitých a pěněných materiálů na velikosti vzduchových kanálků v materiálu. Například u vláknitých materiálů je míra pohltivosti závislá na průměru jednotlivých vláken a jejich počtu ve vrstvě dané tloušťky. Čím bude vláken více a budou tenčí, tím bude větší i pohltivost materiálu. Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti je pak u vláknitých materiálů závislá na jeho tloušťce. Se zvyšující se tloušťkou se zvyšuje i pohltivost na nižších frekvencích. To je způsobeno faktem, že velikost energie, která se přeměňuje u porézních materiálů v teplo, je závislá na amplitudě akustické rychlosti. Ta je u zadní stěny rovna nule, jelikož se nachází v tomto místě uzel akustické rychlosti, ale s rostoucí vzdáleností od stěny se amplituda zvyšuje a maxima dosahuje v kmitně akustické rychlosti ve vzdálenosti $\frac{1}{4}$ vlnové délky. Proto nejvyšších hodnot činitele akustické pohltivosti dosahujeme vždy pro liché násobky vlnové délky ($\frac{1}{4} \lambda, \frac{3}{4} \lambda, \dots$) a naopak minima pro násobky sudé.

Porézní materiály se málokdy vyskytují samostatně díky tomu, že se v nich velmi snadno usazuje prach a nečistoty. V praxi se tedy pokrývají velmi tenkými (řádově desítky μm) fóliemi z plastických hmot. Velmi často se porézní materiály vyskytují také v kombinaci s Helmholtzovými rezonátory a kmitajícími membránami, jak bude zmíněno níže.



Obr. 1.3 Provedení porézního materiálu a příklad jeho využití v praxi [2]

1.6.2 Membrány

Prvním typem akustických obkladů, který pracuje na rezonančním principu kmitavého obvodu, je membrána. Ta je tvořena nejčastěji tenkou folií (řádově desetiny cm), umístěnou v nosném kazetování v určité vzdálenosti od stěny prostoru. Základními vlastnostmi membrán jsou její plošná hmotnost reprezentovaná hmotností membrány a akustická poddajnost, která je závislá na výšce vzduchového polštáře. Změnou těchto dvou veličin můžeme regulovat základní rezonanční kmitočet, který je u membrán dán vztahem:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1}{M_s \cdot d}} \quad (10)$$

přičemž M_s je plošná hmotnost membrány, d je průměr vzduchového polštáře. Výskyt dalších možných rezonancí pak nezávisí již na akustické poddajnosti, ale na poddajnosti a rozměrech membrány samotné.

Stejně jako u porézních materiálů, i u membrán platí, že jejich akustickou impedanci přizpůsobujeme pro dosažení vhodných pohltivých účinků vlnovému odporu vzduchu. To je také důvod, proč se do prostoru mezi membránou a zadní stěnu do vzdálenosti asi 0,5 cm až

1 cm od membrány vkládá pohltivý porézní materiál. V závislosti na vlastnostech vloženého porézního materiálu se pak mění i celkový průběh činitele zvukové pohltivosti.

1.6.3 Kmitající desky

Kmitající desky se od membrán odlišují větší tuhostí a hmotností kmitajícího tělesa. Místo membrány se využívá tuhých desek, které jsou na okrajích v nosném kazetování buď přilepeny, nebo měkce uloženy například v pěnové gumě. Tlumení kmitajících desek je zajišťováno stejně jako u membrán pohltivým porézním materiálem, který se opět vkládá do dutiny mezi deskou a stěnou. Přizpůsobení je však v tomto případě složitější, neboť akustickou impedanci vložený porézní materiál neovlivňuje tak výrazně jako v případě membrán.

1.6.4 Helmholtzovy rezonátory a děrované desky

Posledním druhem akustických obkladů pracujících na rezonančním principu jsou Helmholtzovy rezonátory. Ty mohou být uspořádány buď jednotlivě a nebo ve větším množství. V takovém případě hovoříme pak o děrovaných deskách.

Helmholtzův rezonátor se skládá z několika částí. Především je tvořen dutinou o objemu V , která je s prostorem vnějšího zvukového pole propojena prostřednictvím hrdla a vstupního otvoru o určitých rozměrech, tvaru a ploše. Dutina rezonátoru představuje akustickou poddajnost c_a a vzduch nacházející se ve vstupním otvoru akustickou hmotnost m_a . Vzduch ve vstupním otvoru si tedy můžeme představit jako hmotný píst, který je bržděn odporem R_a . U každého Helmholtzova rezonátoru je nejdůležitější vlastností jeho rezonanční kmitočet, který závisí na jednotlivých rozměrech jeho částí, ploše a tvaru vstupního otvoru a korekci délky, která zohledňuje plynulý přechod vzduchové hmoty mezi dutinou rezonátoru a jeho otvorem. V praxi se jednotlivých rezonátorů používá velmi zřídka. Nejčastěji se sdružují do většího množství v podobě tuhých děrovaných desek a panelů, které se umísťují v určité vzdálenosti od stěn. Rozměr dutiny rezonátoru je pak dán touto vzdáleností. I v případě rezonátorů závisí velikost činitele akustické pohltivosti na míře přizpůsobení. V tomto případě je jeho velikost, ale i šířka kmitočtového pásma, ve které panel absorbuje, dána přizpůsobení útlumu panelu r k vlnovému odporu vzduchu Z_0 . I v tomto případě platí, že maximální pohltivosti dosahujeme při rovnosti obou veličin, ale šířka absorpčního pásma je v tomto případě úzká. Čím je útlum

panelu vyšší než vlnový odpor vzduchu, tím sice klesá pohltivost, ale naopak se zvyšuje šířka absorpčního pásma. Všechny tyto předpoklady jsou však vztaženy pro rezonátory se stejným poměrem průměru panelu a jeho vzdálenosti od stěny. Pro jiný poměr se pohltivost a šířka pásma mění. Z těchto skutečností je patrné, že stanovení celkové pohltivé schopnosti je závislé na mnoha parametrech a často je velmi složité ji stanovit výpočtem. Pro reálné zjištění výsledné pohltivosti se tedy využívá především měření v dozvukových komorách. Často se také do dutiny rezonátorů vkládají porézní materiály, kterými dosáhneme lepšího přizpůsobení k vlnovému odporu vzduchu.



Obr. 1.4 Možné provedení děrovaných desek a příklad jejich použití v praxi [2]

1.7 Dozvukové komory

Jedním z nejdůležitějších akustických měření je stanovení činitele zvukové pohltivosti pro celou řadu materiálů a pohltivých konstrukcí. Tato měření provádíme ve speciálně navržených prostorech, dozvukových komorách, které jsou upraveny takovým způsobem, aby v nich bylo dosaženo dlouhé doby dozvuku a maximální difúznosti. V praxi se tedy jedná o přesný opak komor bezodrazových, ve kterých se naopak snažíme pro celou řadu jiných akustických měření dosáhnout vlastností volného pole. Princip měření činitele zvukové pohltivosti spočívá ve zjištění rozdílu doby dozvuku prázdné komory a komory s měřeným vzorkem, přičemž specifických vlastností dozvukových komor je dosaženo úpravou ohraničujících ploch tak, aby měly co nejlepší odrazivé vlastnosti. Toho je dosaženo použitím tvrdých a hladkých materiálů s vysokou odrazivostí, jako jsou například mramorové desky nebo hladký beton. Pro dostatečně přesné měření činitele zvukové pohltivosti je však nutné upravit dozvukovou komoru ještě takovým způsobem, aby se zvukové pole v ní co nejvíce přiblížilo poli ideálně difúznímu. Pouze v takovém případě je totiž zajištěn všesměrový dopad zvukových vln ve všech jeho bodech a tedy i na plochu měřeného vzorku. Pouze za těchto podmínek je pak možné hodnotu činitele zvukové pohltivosti stanovit dostatečně přesně. Aby byla splněna podmínka difúznosti, je nutné dozvukovou komoru navrhnout takovým způsobem, aby nedocházelo ke vzniku vlastních kmitů v měřeném frekvenčním pásmu na nízkých frekvencích. Je tedy nutné prostor navrhnout tak, aby na nízkých frekvencích docházelo co nejméně ke vzniku stojatého vlnění, a vybavit ho také difúzními prvky.

1.7.1 Konstrukce dozvukových komor

Důležitou konstrukční podmínkou dozvukové komory je její dostatečný objem a správný tvar. V současnosti je dle normy ČSN EN ISO 354 nezbytné, aby objem dozvukových komor dosahoval minimálně 150 m^3 a u nových staveb alespoň 200 m^3 . Neměl by ale přesahovat 500 m^3 , jelikož v takovém případě dochází již k útlumu zvuku na vysokých frekvencích a měření zvukové pohltivosti se tak v tomto pásmu stává nepřesné. Podmínka minimálního objemu místnosti se stanovuje za účelem dosažení hustého rozložení vlastních kmitů na nízkých frekvencích. Toho je dosaženo pro prostory s objemem větším, než asi 200 m^3 . Důležitým faktorem je i tvar dozvukové místnosti, který musí být takový, aby byla splněna podmínka:

$$l_{\max} < 1.9V^{1/3} \quad (11)$$

Příčemž vzdálenost l_{\max} určuje nejdelší možnou vzdálenost dvou bodů na kraji místnosti (v pravoúhlém prostoru se jedná o tělesovou úhlopříčku) a V udává objem dané místnosti. Dalším požadavkem na tvar je to, aby poměry stran místnosti nebyly v poměru malých celých čísel a aby vždy dvě protější stěny včetně stropu a podlahy nebyly rovnoběžné. Všechny tyto podmínky jsou důležité pro to, aby bylo dosaženo vhodného rozložení vlastních kmitů na nízkých frekvencích.

1.7.2 Difúzní prvky

Druhým důležitým kritériem, který zajišťuje všesměrový dopad zvukových vln na plochu měřeného vzorku, je přítomnost rozptylujících difuzních prvků, tzv. difuzorů. Difuzory jsou nejčastěji tvořeny deskami z plexiskla či překližky o tloušťce několika milimetrů, které jsou mírně zakřiveny a rozmístěny v různých polohách v celém objemu místnosti. Standardní plocha difuzorů se pohybuje přibližně v rozmezí $0,8 \text{ m}^3 - 2 \text{ m}^3$ a pro správně rozptylující vlastnosti musí být úhly jejich sklonu různé. Celková jednostranná plocha difuzorů by se měla přibližně rovnat ploše podlahy dozvukové místnosti.

V případě, že chceme v dozvukové místnosti měřit činitele zvukové pohltivosti s dostatečnou přesností, je umístění difuzních prvků v ní zcela nezbytné. Pouze v tomto případě může být totiž splněna podmínka všesměrového dopadu zvukových vln na měřený

vzorek. Jelikož je toto měření úzce spjato s měřením doby dozvuku, je nutné se nejprve zmínit o této problematice.



Obr. 1.5 Jeden z difuzorů dozvukové komory FEL [autor]

1.7.3 Měření doby dozvuku

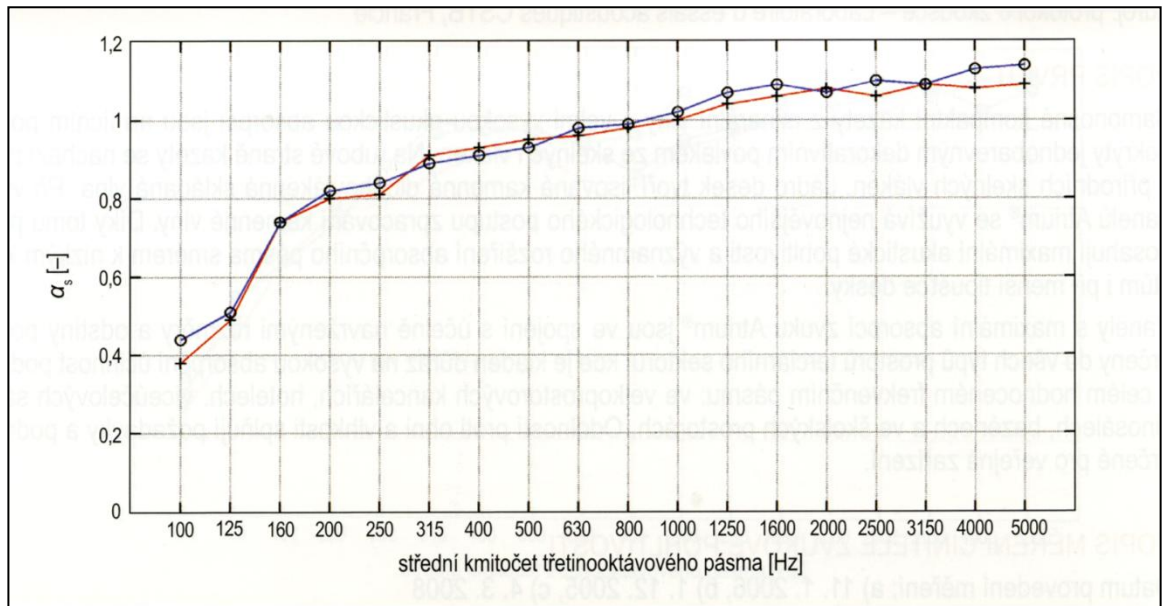
Metodika měření doby dozvuku v běžných prostorech je stanovena podrobně v normě ČSN EN ISO 3382-2. Měření doby dozvuku je možné provádět pomocí dvou metod. První z nich je metoda přerušovaného šumu, druhá je metoda integrované implusové odezvy. Dle přesnosti můžeme každou metodu rozdělit na orientační, inženýrskou a přesnou. V rámci této diplomové práce bude měřena doba dozvuku dozvukové místnosti FEL pomocí přesné metody přerušovaného šumu a proto bude o ní podrobněji zmíněno v příslušné části. Cílem každého měření je zjištění poklesové křivky akustického tlaku naměřené po vybuzení prostoru širokospektrálním šumem. Standardní doba dozvuku je definována poklesem akustického tlaku o 60 dB od okamžiku vypnutí zdroje zvuku. V praxi se však kvůli dosažení podmínky dostatečného odstupu (alespoň 15 dB) užitečného signálu od pozadí vyhodnocuje

doba dozvuku na základě menšího dynamického rozsahu, nejčastěji T_{30} (pokles o 30 dB). Výslednou dobu dozvuku pak dostaneme extrapolací na hodnotu 60 dB, přičemž při měření T_{30} je nutné dosáhnout počáteční hodnotu zvukové intenzity minimálně 45 dB nad hladinou pozadí. Standardní doba dozvuku T_{30} je pak definována jako pokles v rozsahu -5dB až -35 dB pod počáteční úroveň.

Pomocí metody integrované impulsové odezvy získáme dozvukové poklesy integrací kvadrátu impulsových odezev pozpátku. Impulsová odezva je nejčastěji provedena krátkými tranzientními impulsy dostatečné intenzity jako jsou výstřely z pistole, impulsy jiskrových výbojů, šumové pulsy, atd. Měření dozvukových křivek probíhá ve standardní řadě oktávových nebo třetinooktávových filtrů dle ISO 266.

1.7.4 Měření činitele zvukové pohltivosti

Měření zvukové pohltivosti je podrobně popsáno v normě ČSN ISO EN 354. Podstata metody měření spočívá ve zjištění rozdílu doby dozvuku prázdné dozvukové místnosti a místnosti s měřeným vzorkem. Vzorek bývá nejčastěji umístěn na podlaze místnosti a jeho plocha je závislá na objemu místnosti. Pro dozvukové místnosti běžných objemů (okolo 200 m³) se plocha vzorku pohybuje v rozmezí 10 m³ – 12 m³. Z obou hodnot dob dozvuku je vypočtena ekvivalentní pohltivá plocha zkušebního vzorku. Ta je charakterizována jako rozdíl mezi ekvivalentní pohltivou plochou dozvukové místnosti se vzorkem a bez vzorku (ekvivalentní pohltivá plocha místnosti je charakterizována jako hypotetická plocha dokonale pohltivého povrchu bez ohybových jevů, která by jako jediný pohltivý objekt v jinak dokonale odrazivé místnosti vedla k téže době dozvuku jako v dané místnosti). Činitel zvukové pohltivosti zkušebního vzorku α_s je pak dán jako poměr ekvivalentní pohltivé plochy zkušebního vzorku a jeho plochy. Měření je opět prováděno ve standardní řadě třetinooktávových nebo oktávových pásem. V důsledku difrakcí na hranách zkušebního vzorku může na některých frekvencích dosahovat činitel i hodnot vyšších než 1.



Obr. 1.6 Příklad vyhodnoceného měření činitele zvukové pohltivosti porézního materiálu z dozvukové komory [2]

1.7.5 Dozvuková komora FEL

Součástí akustických laboratoří Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity je i dozvuková místnost. Místnost má v podstatě pravoúhlý tvar kromě dvou protilehlých hran, z nichž každá je oddělena příčkou s otevíratelnými otvory vzduchotechniky. Rozměry dozvukové místnosti jsou:

délka 6,8 m
 šířka 5,3 m
 výška..... 6,1 m

Objem dozvukové místnosti včetně započítání ztrátového objemu vzniklého vzduchotechnikou je 214,9 m³. Místnost je navržena tak, aby splňovala podmínky pro měření s ohledem na dostatečnou hustotu vlastních kmitů na nízkých frekvencích. Dále je v místnosti zavěšeno celkem 14 difuzorů o následujících rozměrech:

1,0 m x 1,0 m 3 ks
 1,2 m x 1,2 m 4 ks
 1,4 m x 1,4 m 4 ks

1,6 m x 1,6 m 3 ks

Difuzory jsou vyrobeny z plexiskla o tloušťce 6 mm a jsou mírně prohnuty vlastní vahou. Uchycení do stropu je řešeno za pomoci úchyťů a tenkých ocelových lan. Ve vztahu k objemu místnosti musí být plocha zkušební vzorku v rozmezí $10 \text{ m}^2 - 12,6 \text{ m}^2$.



Obr. 1.7 Pohled do dozvukové komory FEL [x]

2 Realizace dozvuku v nahrávkách

2.1 Využití přirozeného dozvuku

S rozvojem zvukové techniky a vznikem prvních nahrávacích studií na počátku 20. století přišla na řadu i otázka efektových úprav zaznamenaného zvukového signálu. Jednou z prvních byla bezesporu i úprava spočívající ve vytvoření dozvukového efektu a navození tak dojmu prostorovosti. Nejpřirozenějším způsobem, jak je možné tohoto cíle dosáhnout, je umístit zdroj zvuku do prostoru s přirozeným dozvukem a výsledný zvukový signál zaznamenat. Sice se u této metody nejedná ve své podstatě o úpravu zvukového signálu, neboť dozvuk je s ním v tomto případě neoddělitelně spjat, ale již z principu je výsledný dojem při použití této metody nejpřirozenější. K sejmutí výsledného zvuku je zapotřebí pouze vhodného mikrofonu či soustavy mikrofonů s vhodnou směrovou charakteristikou. Nejdůležitějším úkolem zvukové technika je pak nalezení vhodné vzdálenosti a polohy snímacích mikrofonů, ze které bude zvukový obraz snímán v co nejvěrnější podobě. Obecně lze říci, že čím blíže bude mikrofon umístěn ke zdroji, tím více bude v nahrávce převažovat složka přímého zvuku.

Ve studiové praxi byly první experimenty s obohacením zvukového signálu o dozvukovou složku prováděny pomocí dozvukových komor. V tomto případě se však nejednalo pouze o typicky upravenou dozvukovou místnost, ale v podstatě o jakýkoli prostor se zajímavým dozvukem. To, že se zvukoví inženýři nebáli v tomto směru experimentovat, dokazuje i fakt, že jako dozvukové místnosti byl například použit i prostor domovního schodiště, koupelnové sprchy, výtahu nebo studny. Historicky byla stavba prvních dozvukových místností spjata s překotným rozvojem elektroniky na počátku 20. století, především pak mikrofonů, zesilovačů, mixážních pultů a reproduktorů. Jedny z prvních nahrávacích studií se pak objevily okolo roku 1930 (např. v roce 1931 světoznámá studia Abbey Road v Londýně) a právě v těchto letech se poprvé začínají využívat i dozvukové místnosti, které jsou až do roku 1950 jedinou metodou, jak je možné uměle vytvořit ve zvukových nahrávkách dozvuk. Po roce 1950 se začaly v hojně míře využívat i dozvukové jednotky pracující na principu pružin, desek a magnetofonových pásků a v poslední řadě i digitálních dozvukových efektů. Dozvukových komor se však až do současnosti nepřestalo používat, i když zcela výsadní roli mají v dnešní době již jednotky pracující na digitální bázi. Důkazem jejich popularity i po roce 1950 jsou například nahrávky kapel The Beatles, The Doors a řady amerických popových kapel 60.let. Faktem také zůstává, že prakticky každé velké nahrávací studio ve

Spojených Státech má i v současnosti k dispozici jednu či více dozvukových komor, které je možné použít při nahrávání. Postup nahrávací metody je od svých počátků prakticky neměnný. Do prostoru komory je umístěna reproduktorová soustava, která generuje zvukový signál, jehož vzniklá dozvuková složka je pak zaznamenána pomocí mikrofону či soustavy mikrofónů. Získaný signál se pak smíchá ve vhodném poměru s původním „suchým“ signálem. Míra přimíchání dozvukové složky pak závisí na potřebách a požadovaném dojmu celkové nahrávky. Je pochopitelné, že z hlediska nahrávacího procesu je v neposlední řadě důležité také umístění snímacích mikrofónů v prostoru a typ použité snímací techniky.



Obr. 2.1 Jedna z dozvukových komor nahrávacích studií Capitol Records ve Spojených Státech [x]

Použití dozvukových komor však v praxi vykazuje řadu nevýhod. Největší z nich je skutečnost, že pracujeme při použití jedné dozvukové komory s víceméně neměnným dozvukem ať už z hlediska jeho délky, průběhu či frekvenční závislosti. Tyto parametry (především dobu dozvuku) však potřebujeme v praxi velmi často měnit v závislosti na požadavcích celkového vjemu nahrávky a na charakteru vstupního signálu. Částečným řešením je v tomto případě výstavba většího množství dozvukových komor s různými objemy

a členěním, avšak jen málokteré nahrávací studio si to může z ekonomického hlediska dovolit.

Přestože právě použití umělých dozvukových jednotek je v dnešní době zdaleka nejrozšířenější metodou, jak docílit dozvuku při nahrávání, stále se (především ve Spojených Státech) dozvukových komor v nahrávací praxi používá. Důvodem je právě velmi přirozený vjem prostorovosti, kterého není ani v dnešní době u digitálních dozvukových jednotek snadné dosáhnout a pokud ano, pak za cenu velkých finančních nákladů. Faktem také zůstává, že konkrétní posouzení kvality a přirozenosti dozvuku vždy bylo a stále je značně subjektivní záležitostí.

2.2 Umělá dozvuková zařízení

V současné době se v oblasti umělých dozvukových zařízení používají v podstatě pouze dva typy. První z nich je založen na elektromechanickém principu zpoždování, druhý, nejpoužívanější, již pracuje na principu čistě elektronickém.

2.2.1 Elektromechanická dozvuková zařízení

Stejně jako v případě ozvukových komor i každá umělá dozvuková jednotka pracuje na principu smíchání původního vstupního nezpožděného signálu se signálem zpožděným. Na výstupu se pak objeví původní vstupní signál obohacen o dozvukovou složku. Vzájemný poměr signálů lze pochopitelně měnit a tím i regulovat míru dozvuku.

Elektromechanické dozvukové zařízení pracuje na principu zpoždovacího vedení, které je nejčastěji tvořeno pružinou, deskou, pohybujícím se magnetofonovým páskem atd. V současné praxi se však nejvíce používá pružin. Princip zpoždění signálu je zde založen na přítomnosti dlouhé pružiny, na jejíchž koncích jsou umístěny dva permanentní magnety, a dvou cívek (budící a snímací). Permanentní magnety se nachází mezi pólovými nástavci obou cívek. Zesílený vstupní signál vytváří průchodem proudu budící cívkou střídavé magnetické pole, které natáčí permanentní magnet okolo podélné osy. Signál je tedy za pomoci cívky a permanentního magnetu převeden na mechanické kmity, které se šíří určitou rychlostí na konec pružiny. Tam dochází k opačnému jevu než na začátku a prostřednictvím snímací cívky se kmity opět mění na výstupní signál. Ten je zde smíchán s částí vstupního nezpožděného

signálu a vzniká zde výsledný signál s dozvukem. Délka dozvuku pak závisí především na délce pružiny a na rychlosti šířících se mechanických kmitů. Co se týče výsledného vjemu, je jeho kvalita značně závislá na kvalitě mechanického provedení pružin, kterých se často používá větší množství pro zlepšení přenosové charakteristiky a utlumení vlastních rezonancí.

2.2.2 Elektronická dozvuková zařízení

Nejpoužívanějšími dozvukovými jednotkami současnosti jsou ty, které pracují na digitálním principu zpoždění signálu. Jejich ovládání je jednoduché, a umožňují velké množství nastavení dozvukových parametrů. I na poměrně levných digitálních dozvukových procesorech je možné nastavit kromě doby dozvuku i počáteční zpoždění (časový odstup přímého zvuku a prvotních odrazů), hustotu počátečních odrazů a různé další parametry, kterými je možné ovlivňovat především dozvukový průběh. U dražších efektů můžeme nalézt dokonce speciálně vytvořené algoritmy, které velmi věrně napodobují dozvukové podmínky celé řady známých světových sálů, koncertních místností, církevních staveb či nahrávacích studií.



Obr. 2.2 Jeden z nejnovějších dozvukových procesorů firmy Lexicon [x]

3 Měření vlastních kmitů

3.1 Metodika měření

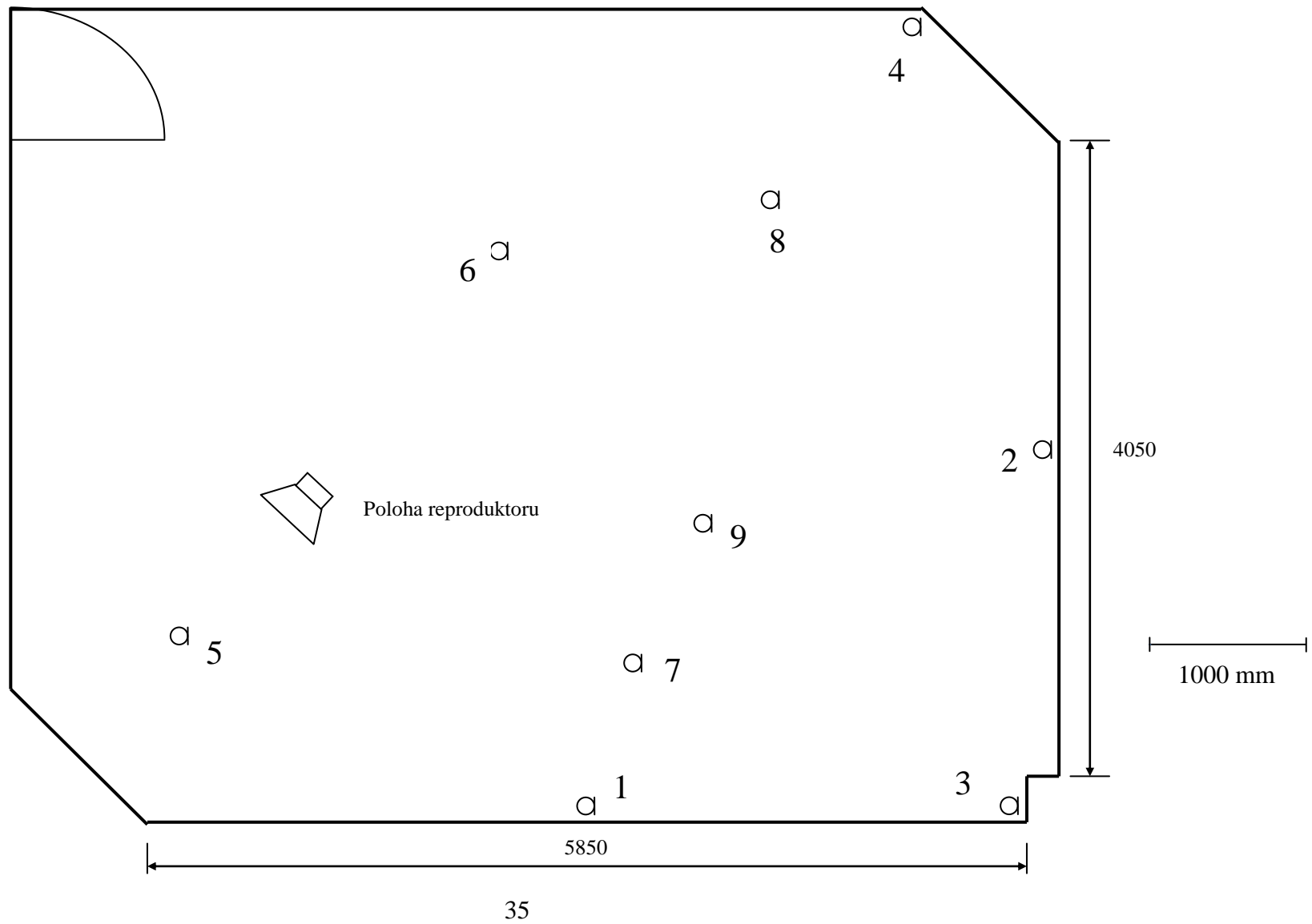
Měření vlastních kmitů dozvukové místnosti FEL bylo provedeno za účelem zjištění míry difúznosti zvukového pole na nízkých frekvencích. Měření probíhalo v uzavřené dozvukové komoře za pomoci čtveřice měřících mikrofónů, které byly postupně umístěny v celkem devíti vybraných měřících bodech (*Obr. 3.1*). Podrobnější údaje o jednotlivých měřících stanovištích jsou uvedeny v následující tabulce:

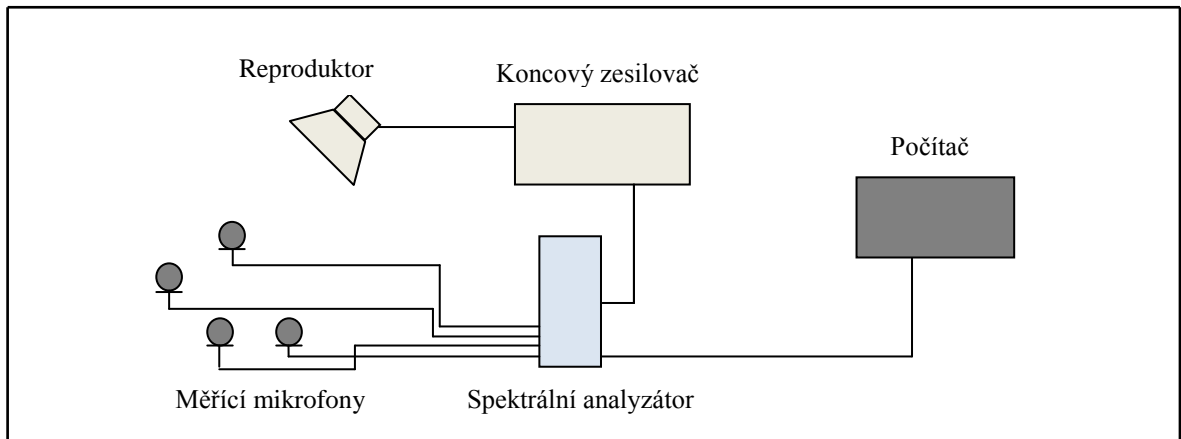
Tab. 3.1 Rozložení měřících bodů

Měřící bod	Výška nad podlahou [mm]	Umístění
1	2000	Polovina délky strany prostoru, 50 mm od stěny
2	2000	Polovina délky strany prostoru, 50 mm od stěny
3	220	Roh místnosti, 200 mm od spodního rohu
4	170	Roh místnosti, 200 mm od spodního rohu
5	640	1000 mm před reproduktorem
6	1300	V prostoru
7	1600	V prostoru
8	1300	V prostoru
9	1900	V prostoru

Měřící řetězec (*Obr. 3.2*) byl sestaven ze čtyř měřících mikrofónů, spektrálního analyzátoru a zobrazovacího zařízení, které v tomto případě zajišťoval počítač s nainstalovaným programem PULSE, kterým byla zajišťována také komunikace s analyzátozem a byly v něm zobrazovány a ukládány naměřené hodnoty. Signál z měřícího mikrofónu byl mikrofonním kabelem vyveden ven z dozvukové místnosti do spektrálního analyzátoru, ve kterém byla provedena jeho frekvenční analýza (FFT). Výsledné spektrum signálu bylo poté zobrazeno na monitoru počítače. K vybuzení prostoru širokospektrálním bílým šumem byl použit k analyzátoru paralelně připojený zesilovač s reproduktorem, který byl v místnosti orientován na jeden z jejích rohů, od něhož byl vzdálen 2 metry. Po vybuzení prostoru byl na obrazovce počítače registrován průběh akustického tlaku do frekvence 1,6 kHz a po jeho ustálení přibližně po deseti vteřinách byl výsledný graf zaznamenán.

Obr. 3.1 Rozmístění měřících bodů měření vlastních kmitů v prostoru





Obr. 3.2 Měřící řetězec vlastních frekvencí

3.2 Použité přístroje

Seznam použitých přístrojů včetně evidenčních a sériových čísel shrnuje následující tabulka:

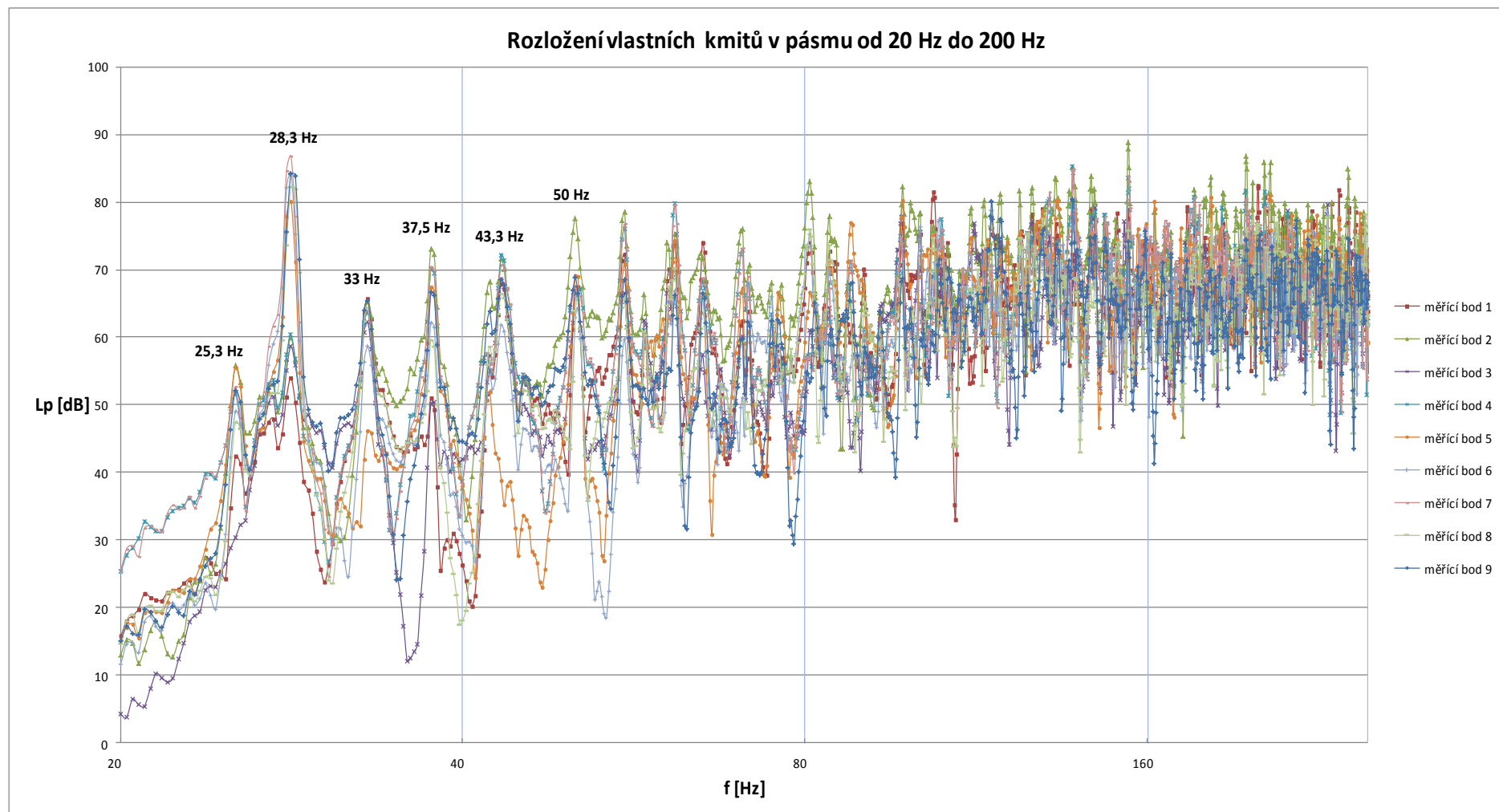
Tab. 3.2 Použité přístroje pro měření vlastních frekvencí

Přístroj	Evidenční číslo	Sériové číslo
Mikrofon Brüel&Kjaer, typ 4943-C001	500021	2517058
Mikrofon Brüel&Kjaer, typ 4943-C001	176812	2517032
Mikrofon Brüel&Kjaer, typ 4943-C001	x	2517060
Mikrofon Brüel&Kjaer, typ 4943-C001	500020	2517059
Analyzátor Brüel&Kjaer, typ 2827--002	21354	2241811
Koncový zesilovač Yamaha P7000S	183127	MCFI 01037
Počítač Dell Optiplex 788	x	x

3.3 Výsledky měření

Naměřená data z měření byla zpracována v programu Microsoft Office Excel 2007 a jsou znázorněna v podobě grafu. Na Obr. 3.3 je vyobrazen graf znázorňující rozložení vlastních frekvencí. Z grafu je patrné, že pole v dozvukové místnosti je dostatečně difúzní už od frekvence okolo 120 Hz, přičemž nejnižší kmit místnosti byl zaznamenán na frekvenci 25,3 Hz, což velmi dobře odpovídá teoretickým předpokladům daných vzorcem (9). Kmit s nejvyšší amplitudou byl registrován na frekvenci 28,3 Hz.

Obr. 3.3 Rozložení vlastních kmitů



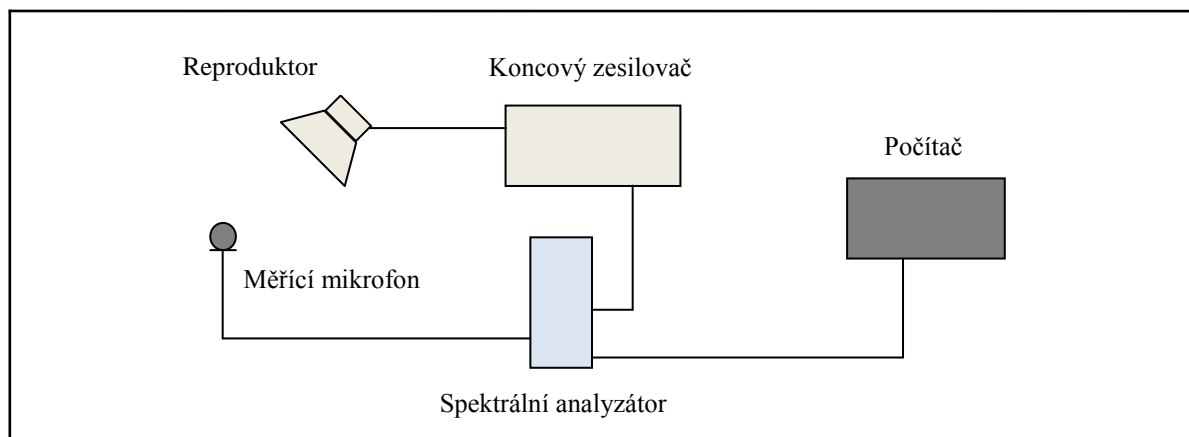
4 Měření dozvuku

4.1 Metodika měření

Cílem tohoto měření bylo přesné zjištění doby dozvuku místnosti v třetinooktávových pásmech v rozmezí od 20 Hz do 4 kHz. Pro dosažení co nepřesnějších výsledků byla zvolena přesná měřicí metoda, která předpokládá dle normy ČSN EN ISO 2282-2 maximální jmenovitou odchylku do 5% v každém pásmu. Bylo zvoleno celkem 14 měřících bodů co nejrovnoměrněji (s ohledem na rozmístění difuzorů) rozmístěných v prostoru místnosti a poloha měřícího mikrofonu byla stanovena tak, aby jeho vzdálenost k nejbližšímu odrazujícímu povrchu nebyla menší než 1 m. Bylo také nutné pozici mikrofonu zvolit dostatečně daleko (minimálně 1m) od zdroje zvuku, aby nedošlo ke zkreslení měření v důsledku přímého zvuku z reproduktorů. V každém ze 14 měřících bodů byly pak změřeny 4 poklesové křivky, které byly za pomoci spektrálního analyzátoru a programu PULSE zprůměrovány. Měření bylo provedeno pro dvě polohy zdroje zvuku.

Kromě 14 měřících bodů byly v úvodní části měření zvoleny také 4 body, které nerespektovaly dostatečnou vzdálenost mikrofonů od odrazujícího povrchu a předpokládal se v těchto místech výraznější vliv vlastních frekvencí na průběh doby dozvuku. Celkově bylo tedy měření poklesových křivek prováděno v celkem 18 měřících bodech. Jejich rozmístění v prostoru místnosti je zobrazeno na *Obr. 4.2*, celkový výčet je pak uveden v *Tab. 4.1*.

Měření probíhalo podobným způsobem jako v případě měření vlastních frekvencí. Měřicí řetězec je znázorněn na *Obr. 4.1*. Signál z mikrofonu byl veden do spektrálního analyzátoru, kde v reálném čase probíhala jeho třetinooktávová CPB analýza. K analyzátoru byl opět připojen koncový zesilovač s reproduktorem, kterým byl prostor místnosti buzen širokospektrálním růžovým šumem. Celé měření pak bylo ovládáno z programu PULSE umístěného na řídicím počítači. Před okamžikem spuštění měření bylo nutné vyčkat asi deset vteřin na dosažení konstantní úrovně vybuzení prostoru, poté byl šumový signál přerušen a pokles akustického tlaku byl zaznamenáván. V každém bodě byly změřeny a aproximovány čtyři poklesové křivky, jejichž skupinovým zprůměrováním byla zjištěna hodnota doby dozvuku T_{30} , která byla poté extrapolována na výslednou hodnotu T_{60} .



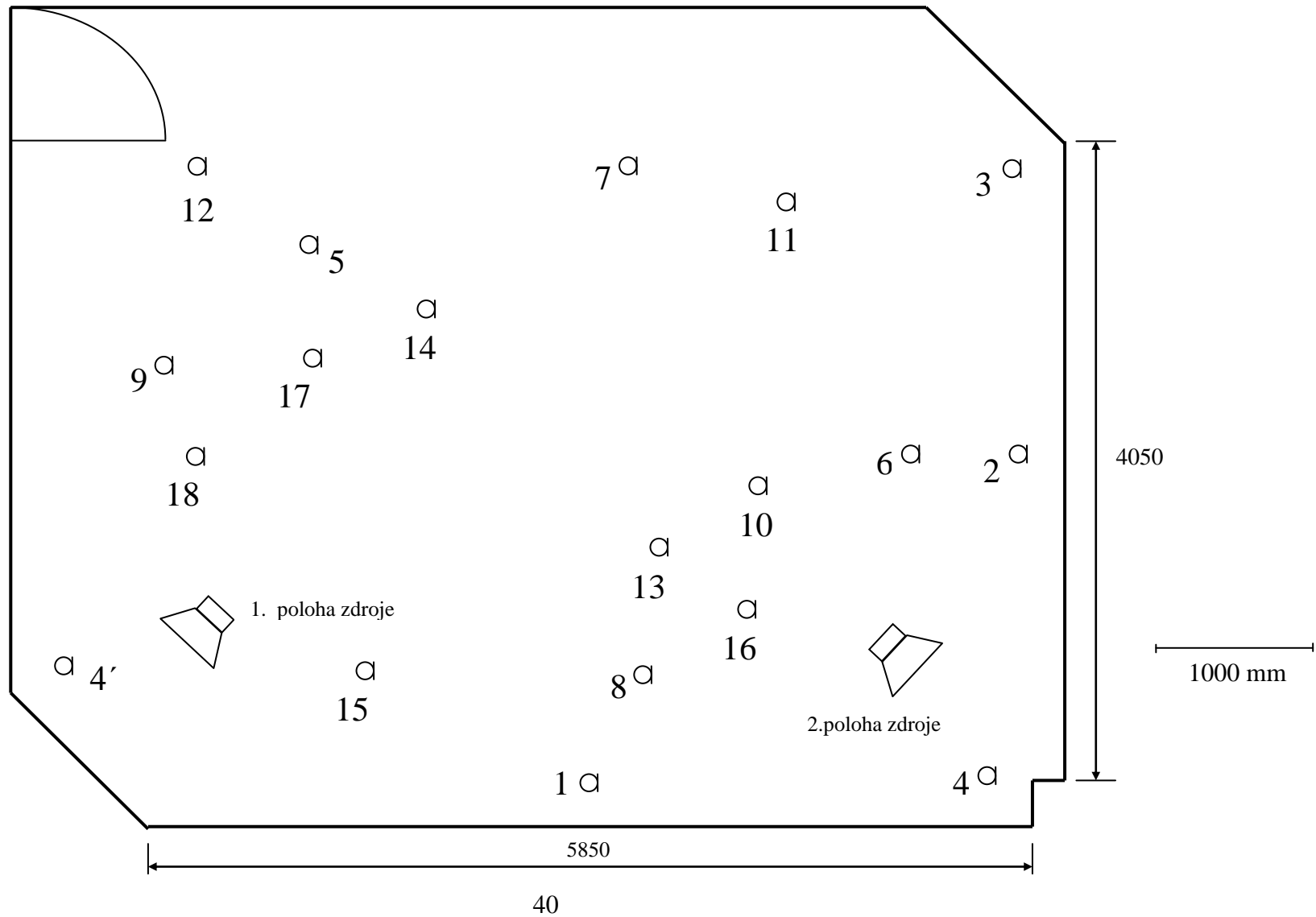
Obr. 4.1 Měřící řetězec doby dozvuku

Tab. 4.1 Měřící body pro měření dozvuku

Měřící bod	Výška nad podlahou [mm]	Umístění
1	1500	Polovina délky strany prostoru, 300 mm od stěny
2	1500	Polovina délky strany prostoru, 300 mm od stěny
3	1300	Roh místnosti, 400 mm od rohu
4	1300	Roh místnosti, 400 mm od rohu
4' ²	1300	Roh místnosti, 400 mm od rohu
5	1500	V prostoru
6	1500	V prostoru
7	1300	V prostoru
8	1300	V prostoru
9	1500	V prostoru
10	1500	V prostoru
11	1300	V prostoru
12	1500	V prostoru
13	2200	V prostoru
14	1300	V prostoru
15	2000	V prostoru
16	2100	V prostoru
17	2200	V prostoru
18	2100	V prostoru

² Poloha 4' byla zvolena místo polohy 4 při konfiguraci s druhou polohou zdroje z důvodu vlivu přímého zvuku.

Obr. 4.1 Prostorové rozmístění měřících bodů doby dozvuku



4.2 Použité přístroje

Tab. 4.2 Přístroje použité při měření doby dozvuku

Přístroj	Evidenční číslo	Sériové číslo
Mikrofon Brüel&Kjaer, typ 4943-C001	500021	2517058
Analyzátor Brüel&Kjaer, typ 2827--002	21354	2241811
Koncový zesilovač Yamaha P7000S	183127	MCFI 01037
Počítač Dell Optiplex 755		

4.3 Výsledky měření

Naměřené doby dozvuku vzešlé zprůměrováním 4 vypočtených měření a extrapolovaných na hodnotu T_{60} v každém měřicím bodě jsou zaneseny v *Tab. 4.2* (první poloha zdroje) a v *Tab. 4.3* (druhá poloha zdroje). V posledním sloupci každé tabulky je dále uveden aritmetický průměr ze všech měřicích bodů pro každé kmitočtové pásmo. V *Tab. 4.4* je pak uvedena konečná doba dozvuku jako aritmetický průměr obou průměrů z předchozích dvou tabulek. Pod tabulkou je dále grafické znázornění doby dozvuku v závislosti na frekvenci. Z grafu je patrné, že na nízkých frekvencích v pásmu od 20 Hz do 50 Hz je doba dozvuku zvlněná v důsledku výrazného vlivu vlastních frekvencí a Dále je také patrné minimum v oblasti od 50 Hz do 160 Hz. To je zřejmě způsobeno dřevěnými děrovanými deskami, které byly v počtu asi 20 ks naskládány na sobě v prostoru dozvukové místnosti a v průběhu měření je nebylo možné přesunout mimo ni.

Tab. 4.2 Doba dozvuku pro první polohu zdroje

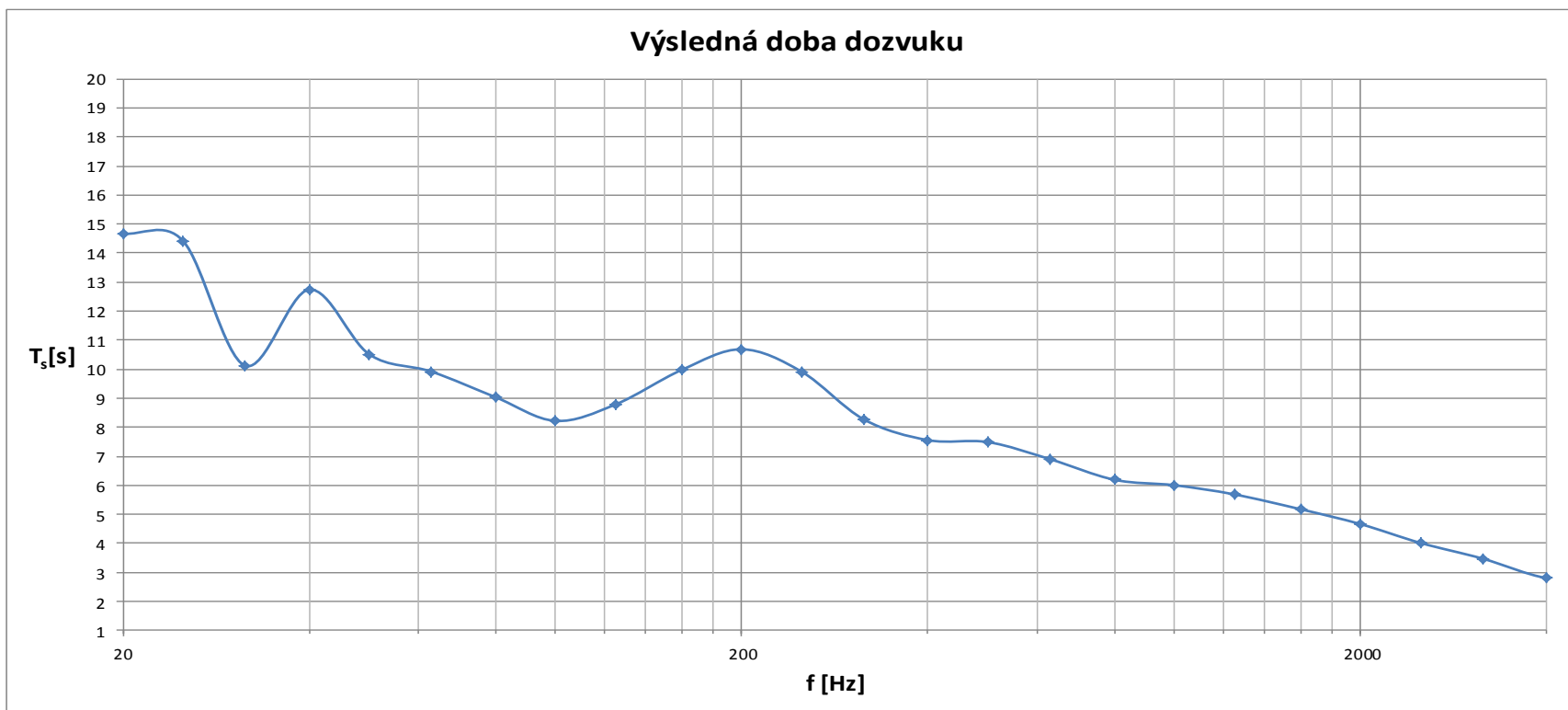
Doba dozvuku - 1. poloha zdroje															
f [Hz]	T ₁ [s]	T ₂ [s]	T ₃ [s]	T ₄ [s]	T ₅ [s]	T ₆ [s]	T ₇ [s]	T ₈ [s]	T ₉ [s]	T ₁₀ [s]	T ₁₁ [s]	T ₁₂ [s]	T ₁₃ [s]	T ₁₄ [s]	T _{prům.1} [s]
20	15.3	15.3	15.6	18.7	17.5	13.6	14.7	15.4	14.6	15.8	14.6	15.4	17.0	12.1	15.4
25	16.0	15.2	15.4	15.0	15.4	13.4	14.7	15.7	14.7	15.9	15.0	15.0	14.6	12.3	14.9
31.5	10.6	11.9	11.0	9.0	11.6	11.1	10.2	10.5	8.7	10.4	8.5	9.1	11.6	11.2	10.4
40	13.1	12.9	12.9	13.0	13.0	13.3	13.2	13.0	13.2	13.1	13.2	13.3	13.2	13.1	13.1
50	7.2	10.7	8.3	7.6	7.6	11.8	8.3	7.0	13.6	9.7	12.9	13.7	13.7	12.4	10.3
63	9.1	10.2	10.1	8.7	9.4	10.1	10.0	8.7	11.6	9.1	9.0	10.2	10.2	9.7	9.7
80	8.7	8.6	8.5	8.6	8.3	8.7	8.5	8.5	8.6	8.5	8.6	8.6	8.6	8.7	8.6
100	8.5	8.7	8.0	8.3	8.5	8.6	8.1	8.6	8.4	8.6	7.6	8.6	7.8	8.0	8.3
125	7.9	8.7	8.5	8.6	8.6	8.5	8.7	8.4	8.8	9.0	8.3	8.9	8.1	8.6	8.5
160	9.9	9.6	9.6	9.4	10.1	9.7	9.6	9.0	9.7	9.7	9.4	9.3	9.7	9.3	9.6
200	10.4	10.2	9.6	10.5	10.9	10.8	9.7	9.8	10.4	10.3	10.6	10.6	11.4	10.9	10.4
250	10.0	10.8	9.6	10.0	9.8	10.1	9.6	9.3	9.8	10.2	10.1	10.1	10.2	10.6	10.0
315	8.2	8.8	8.3	8.2	7.8	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.6	8.2	8.5	8.5	8.3
400	7.3	7.8	7.7	7.2	7.6	7.7	7.7	7.4	7.3	7.3	7.3	7.7	7.4	7.6	7.5
500	7.4	7.4	7.4	7.8	7.5	7.7	7.5	7.7	7.5	7.3	7.3	7.5	7.9	7.4	7.5
630	7.0	7.0	6.9	6.9	6.6	6.9	6.8	7.0	6.9	6.6	6.5	7.1	6.9	7.0	6.9
800	6.1	6.2	6.1	6.3	6.1	6.1	6.0	6.2	6.1	6.1	6.1	6.4	6.2	6.1	6.2
1000	6.0	6.0	6.1	6.0	5.7	5.8	6.1	6.1	6.0	6.0	6.1	5.9	6.0	5.9	6.0
1250	5.6	5.8	5.7	5.8	5.6	5.7	5.7	5.6	5.5	5.7	5.8	5.7	5.7	5.7	5.7
1600	5.1	5.2	5.3	5.1	5.2	5.1	5.2	5.1	5.2	5.1	5.3	5.1	5.2	5.2	5.2
2000	4.6	4.6	4.6	4.6	4.7	4.6	4.6	4.6	4.8	4.7	4.6	4.7	4.5	4.6	4.6
2500	4.0	4.1	4.0	3.9	3.9	4.0	4.0	4.1	3.9	3.9	4.0	4.0	3.9	4.0	4.0
3150	3.4	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.5	3.3	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.4	3.4
4000	2.7	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8

Tab. 4.3 Doba dozvuku pro druhou polohu zdroje

Doba dozvuku - 2. poloha zdroje															
f [Hz]	T ₁ [s]	T ₂ [s]	T ₃ [s]	T ₄ [s]	T ₅ [s]	T ₆ [s]	T ₇ [s]	T ₈ [s]	T ₉ [s]	T ₁₀ [s]	T ₁₁ [s]	T ₁₂ [s]	T ₁₃ [s]	T ₁₄ [s]	T _{prům.2} [s]
20	14.1	14.3	14.7	11.8	14.2	11.9	12.9	14.4	14.2	14.0	14.3	16.2	14.2	13.8	13.9
25	14.2	15.2	14.5	11.9	14.4	12.2	13.0	14.4	14.5	14.1	14.6	14.3	14.4	14.0	14.0
31.5	10.3	10.9	8.6	8.2	10.7	10.7	9.5	10.7	9.0	10.4	9.9	9.2	11.2	8.8	9.9
40	12.5	12.4	12.0	12.4	12.5	12.6	12.4	12.4	12.5	12.5	12.6	12.5	12.2	12.1	12.4
50	9.0	10.3	9.7	10.0	9.5	10.1	8.8	7.6	13.3	10.4	13.4	13.2	13.5	11.1	10.7
63	10.2	10.2	8.6	9.7	11.1	10.4	10.9	9.9	10.2	9.9	10.4	10.1	11.2	8.8	10.1
80	9.5	9.5	9.5	9.4	9.5	9.8	9.4	9.4	9.5	9.5	9.5	9.4	9.5	9.1	9.5
100	8.7	8.6	8.1	8.3	8.4	8.2	7.2	7.4	8.8	8.8	7.3	7.7	7.6	8.5	8.1
125	9.7	10.5	7.2	8.4	9.8	9.4	8.7	8.6	10.1	9.3	9.0	9.5	9.0	7.3	9.0
160	10.5	10.5	9.8	10.8	10.1	10.3	10.4	10.0	11.0	10.5	10.7	10.6	10.6	9.6	10.4
200	11.7	10.3	10.9	11.6	11.4	10.4	10.2	11.1	10.7	11.3	10.7	10.8	11.2	11.1	10.9
250	10.4	10.0	10.3	9.7	9.2	9.6	9.5	10.4	10.1	9.4	9.4	9.9	9.3	10.3	9.8
315	8.2	8.3	7.8	8.1	8.0	8.0	8.6	8.0	8.4	8.6	8.5	8.2	8.3	7.8	8.2
400	7.4	7.8	7.4	7.6	7.4	7.4	7.8	7.5	7.7	7.8	7.5	7.6	7.7	7.8	7.6
500	7.3	7.6	7.3	7.4	7.7	7.7	7.4	7.6	7.0	7.4	7.2	7.5	7.5	7.5	7.4
630	6.7	6.8	6.9	7.2	6.9	6.8	7.0	6.9	6.9	7.0	6.9	7.0	7.1	7.1	6.9
800	6.3	6.2	6.1	6.3	6.3	5.9	6.2	5.9	6.3	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2	6.2
1000	6.0	6.0	6.2	6.0	6.1	6.2	6.0	6.0	5.9	6.0	6.0	5.9	6.1	6.2	6.0
1250	5.8	5.6	5.8	5.4	5.7	5.8	5.5	5.7	5.9	5.5	5.8	5.6	5.8	5.7	5.7
1600	5.2	5.1	5.1	5.3	5.1	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3	5.1	5.1	5.2	5.2	5.2
2000	4.6	4.6	4.7	4.7	4.7	4.9	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.6	4.7	4.8	4.7
2500	4.1	4.0	4.1	4.0	4.0	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.0	4.1	4.0	4.0
3150	3.5	3.5	3.5	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.5	3.5
4000	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8	2.9	2.8	2.9	2.8	2.8

Tab. 4.4 Výsledná doba dozvuku

f [Hz]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
$T_{prům.1}$ [s]	15,4	14,9	10,4	13,1	10,3	9,7	8,6	8,3	8,5	9,6	10,4	10,0	8,3	7,5	7,5	6,9	6,2	6,0	5,7	5,2	4,6	4,0	3,4	2,8
$T_{prům.2}$ [s]	13,9	14,0	9,9	12,4	10,7	10,1	9,5	8,1	9,0	10,4	10,9	9,8	8,2	7,6	7,4	6,9	6,2	6,0	5,7	5,2	4,7	4,0	3,5	2,8
T_s [s]	14,7	14,4	10,1	12,7	10,5	9,9	9,0	8,2	8,8	10,0	10,7	9,9	8,3	7,6	7,5	6,9	6,2	6,0	5,7	5,2	4,7	4,0	3,5	2,8



5 Realizace dozvuku

5.1 Metodika

Prvním krokem v realizaci dozvuku pomocí dozvukové komory bylo získání vzorku zvukového signálu, jenž byl posléze použit jako signál pro efektovou úpravu. Jako efektovaný signál byl zvolen záznam akustické kytary pořízený v prostoru bezodrazové komory FEL (Obr. 5.1). Nahrávání bylo realizováno za pomoci páru snímacích kardioidních mikrofonů Rode NT-5, mixážního pultu Tascam DM-3200 a nahrávacího programu Nuendo. Za účelem co nejuvěrnější podoby sejmutého signálu byla zvolena stereofonní konfigurace mikrofonů XY. Výsledná nahrávka byla v programu Nuendo rozdělena na čtyři ilustrativní části, které byly posléze využity jako vstupní signál.



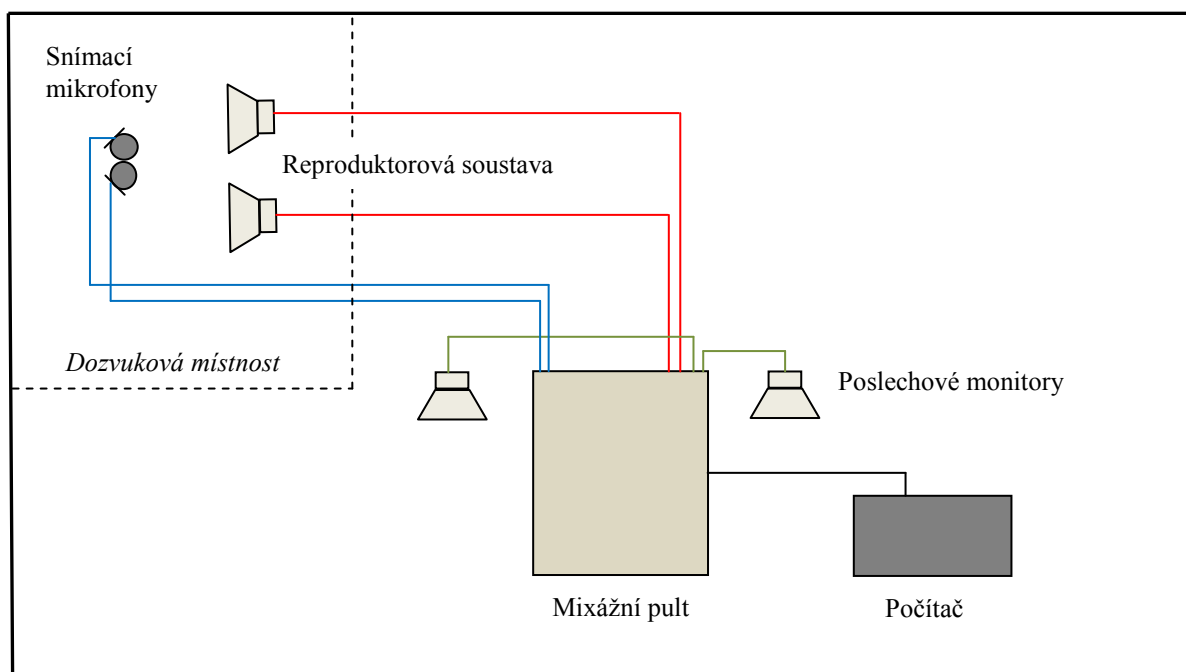
Obr. 5.1 Nahrávání v bezodrazové komoře [x]

5.2 Použité přístroje

Přístroj	Evidenční číslo	Sériové číslo
Mikrofon Rode NT-5	x	x
Mikrofon Rode NT-5	x	x
Monitor Krk VXT8	x	HACJ002775
Monitor Krk VXT8	x	HACJ002898
Monitor Event 20/20 bas V3	x	x
Monitor Event 20/20 bas V3	x	x
Mixážní pult Tascam DM-3200	x	0300056
Studiová sluchátka AKG K 240	x	x
Počítač	x	x

5.3 Nahrávací řetězec

Schématicky je nahrávací řetězec znázorněn na následujícím obrázku:



Obr. 5.2 Nahrávací řetězec

Celý řetězec byl ovládán programem Nuendo a prostřednictvím digitálního mixážního pultu Tascam DM-3200. Ten v našem případě zastupoval úlohu zvukové karty a ovladače úrovně jednotlivých signálů (zdrojového a nahrávaného). K výslednému mixu obou stop poté sloužil program Nuendo nainstalovaný na ovládacím počítači. Zdrojový signál uložený v podobě nahrané stopy byl prostřednictvím pomocných výstupů mixážního pultu odesílán do

dvojice dvoupásmových studiových reproduktorů Event 20/20 bas V 3, které byly umístěny uvnitř dozvukové místnosti na stole ve výšce asi 80 cm nad podlahou. Signál, tedy konkrétně jeho dozvuková složka, byl v reálném čase snímán dvojicí mikrofonů Rode NT-5 v jedné ze zvolených stereofonních konfiguracích XY nebo AB. Jelikož mikrofony vyžadovaly phantomové napájení, bylo nutné tento fakt respektovat jeho předchozím zapnutím na mixážním pultu. Z mikrofonů byl nahrávaný signál směřován do mikrofonních vstupů mixážní pultu a zobrazoval se v reálném čase souběžně s původním signálem do druhé stopy v programu Nuendo. Tyto dva signály, zdrojový signál a jeho dozvuková složka, byly poté ve vhodném poměru smíchány (Obr. 5.3). K poslechu výsledného mixu sloužila dvojice poslechových monitorů KRK VXT 8 a pro pozdější frekvenční úpravy byla použita studiová sluchátka AKG K 240.



Obr.5.3 Řídící stanoviště nahrávacího procesu

5.3.1 Konfigurace XY

Prvním typem stereofonního snímání, které bylo použito, bylo snímání typu XY (Obr. 5.4). Mikrofonní pár byl sestaven z dvojice kardioidních mikrofonů Rode NT-5, který byl v tomto případě umístěn tak, aby oba mikrofony vůči sobě svíraly úhel přibližně 90°. Osa každého

mikrofonu byla pak nasměrována na výškový reproduktor reproduktorové soustavy. Díky velmi blízké vzájemné vzdálenosti mikrofonů byly potlačeny fázové problémy, které by se jinak projevily nepříjemnou degradací barvy výsledného zvuku. Konfigurace XY byla zvolena pro tři různé vzdálenosti od reproduktorů (1750 mm, 1000 mm a 500 mm). V jednom případě byl také učiněn pokus s vložením asi 40 cm tlusté vrstvy pohltivého materiálu (skelné vaty) do oblasti za mikrofonní pár za účelem snížení doby dozvuku ve výsledné nahrávce.



Obr. 5.4 Stereofonní pár XY

5.3.2 Konfigurace AB

Druhým zvoleným typem byla konfigurace AB (*Obr. 5.5*). V tomto případě byla vzájemná vzdálenost mnohem větší, než v případě předchozím. Kvůli potlačení fázových problémů (hřebenového filtru) se u tohoto systému doporučuje, aby vzdálenost mikrofonů mezi sebou byla minimálně trojnásobná, oproti vzdálenosti mikrofonů od zdroje zvuku. V našem případě byly mikrofony umístěny ve vzájemné vzdálenosti 5,6 metru, přičemž každý z nich byl od

zdroje zvuku vzdálen 2,5 metru. U tohoto typu konfigurace se používají nejčastěji mikrofony s kulovou charakteristikou, ale jelikož ke snímání nahrávky docházelo v silně difuzním dozvukovém poli, nemělo použití kardioidních mikrofonů na výsledek zásadní vliv.



Obr. 5.5 Stereofonní konfigurace AB

5.4 Zpracování a výsledky

Na Obr. 5.6 je znázorněn pohled na pracovní okno programu Nuendo, ve kterém byl smícháním zdrojového a nahraného signálu vytvořen konečný zvukový obraz. Přidáním úrovně nahraného signálu se výsledný zvuk obohacoval o dozvukovou složku a stával se tak méně zřetelným a dostával větší prostorový dojem. Před konečným smícháním obou signálů je však bylo nutné nejprve podrobit frekvenční úpravě. V prvním kroku bylo ve zdrojovém i nahraném signálu potlačeno pásmo frekvencí pod 150 Hz filtrem horní propust' se strmostí 6dB/okt. Tím byla odstraněna nesrozumitelnost v této frekvenční oblasti a u dozvukového signálu byl potlačen vliv vlastních frekvencí. U zdrojového signálu byly poté potlačeny pásmovou propustí frekvence okolo 127 Hz o -6,5 dB při jakosti filtru $Q=14,4$ a 248 Hz o -4dB při jakosti $Q=9$. Touto úpravou byly částečně potlačeny nevyrovnanosti zvukového

spektra akustické kytary. U dozvukového signálu byly upraveny obdobným způsobem frekvence okolo 129 Hz o -4 dB s $Q=14,4$ a okolo 249 Hz o -3dB s $Q=5,7$.



Obr. 5.6 Mix a frekvenční úpravy v programu Nuendo

Subjektivně lze celkový charakter dozvuku ve všech nahrávkách označit jako velmi přirozený. Po provedení frekvenčních úprav se výrazně zlepšila jeho čitelnost v oblasti nízkých frekvencí a výsledný dojem se tak ještě zlepšil. Co se týče použitých stereofonních konfigurací, u snímací techniky XY míra dozvuku silně závisela na vzdálenosti od reproduktorů. Čím blíže se nacházelo snímací místo ke zdroji zvuku, tím více převažovala v dozvukové složce složka přímého zvuku. Všechny tři snímací pozice lze ale označit jako vhodné a jejich použití by mělo záviset na požadované míře dozvukové složky ve výsledné nahrávce a na míře celkové „konkrétnosti“. Konfigurace AB vykazovala mírně odlišné vlastnosti od předchozí techniky, ale i zde byl výsledek velmi dobrý. Vzhledem k velké vzdálenosti (2,5 m) od zdroje zvuku byla dozvuková složka v nahrávce zastoupena ve velké míře, na druhou stranu nahrávka vykazovala silnější stereofonní efekt.

Zajímavá situace nastala po umístění pohltivé vaty do prostoru za mikrofónový pár XY. Doba dozvuku se tak zřetelně zkrátila. Ač se jednalo v tomto případě pouze o zkušební pokus, ukázalo se, že by tato metoda mohla být vhodným nástrojem ke snížení doby dozvuku.



Obr. 5.7 Experiment s vložením pohltivého materiálu

6 Závěr

Z výsledků provedených měření můžeme shrnout řadu závěrů. Z měření doby dozvuku vyplývá, že umístěním difuzorů do prostoru komory došlo ke zkrácení doby dozvuku oproti situaci před jejich instalací přibližně o třetinu. Výsledné měření bylo sice zatíženo chybou způsobenou zřejmě přítomností děrovaných desek v prostoru komory, ale i tak s vyloučením této chyby lze konstatovat, že dozvuková křivka nevykazuje, kromě pásma nejnižších frekvencí, výraznější nerovnosti. V pásmu nejnižších frekvencí jsou naměřené výkyvy způsobeny vlivem vlastních frekvencí.

Z měření vlastních kmitů místnosti bylo zjištěno, že se zvukové pole v komoře nabývá difúzního charakteru přibližně od frekvence 120 Hz, kde je již z grafů patrné, že je hustota vlastních kmitů dostatečná. První vlastní kmit místnosti byl detekován na frekvenci 25,3 Hz.

Co se týče vlastní realizace dozvukového algoritmu, bylo dosaženo velmi zajímavých výsledků. Obě stereofonní konfigurace, tedy konfigurace AB a XY, se ukázaly pro snímání v dozvukové komoře jako vhodné. Výsledná čitelnost a podíl dozvukové složky v nahraném signálu silně závisí na snímací poloze vzhledem k poloměru doznívání. Čím blíže se snímací místo nacházelo ke zdroji zvuku, tím více převažovala v nahrávce složka přímého zvuku.

Celkově působí výsledný vjem prostorovosti z celkové nahrávky velmi přirozeně a dle subjektivního hodnocení svou kvalitou překonává většinu běžně dostupných digitálních efektových jednotek, především díky velmi přirozenému průběhu doznívání.

Zajímavým námětem pro další experimenty v této oblasti by jistě bylo také vytvoření pohltivé konstrukce, jejímž vložením by do prostoru komory došlo ke zkrácení doby dozvuku na potřebnou úroveň. Výsledný akustický materiál by měl být dostatečně pohltivý především v pásmu do 250 Hz, ve kterém docházelo ve výsledné nahrávce k největším problémům s celkovou srozumitelností.

7 Použitá literatura

- [1] Syrový, V.: Hudební akustika, Akademie múzických umění, Praha 2008
- [2] Hrádek, T.; Tuček, J.: Katalog akustických prvků, Akademie múzických umění, Praha 2011
- [3] Krňák, M.: Akustické obklady, STK, Praha 1971
- [4] Kolmer, F.; Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL, Praha 1980
- [5] Vlachý, V.: Praxe zvukové techniky, Muzikus, Praha 2000
- [6] Sýkora, R.; Krutílek, F.; Včelař, J.: Elektronické hudební nástroje a jejich obvody, SNTL, Praha 1981
- [7] ČSN EN ISO 3382-2, Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2009
- [8] ČSN EN ISO 354, Český normalizační institut, 2003
- [9] Závěrečná zpráva č. 134/04.: Měření akustických vlastností dozvukové místnosti FEL, Akustika Praha, 2004
- [10] Zpráva č. 134D/04.: Doklad o úředním měření č. 03/2004 – Dozvuková místnost FEL, Akustika Praha, 2004
- [11] <http://dev.agilitesoftware.com/capstudios/recordingmixing/echochambers>
- [12] <http://www.lexiconpro.com/images/products/147/large/198.jpg>
- [13] <http://www.sengpielaudio.com/calculator-bandwidth.htm>
- [14] foto: autor
- [15] foto: Ing. Oldřich Tureček Ph.D.

