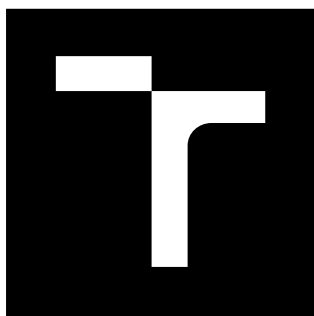


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

AKUSTIKA MALÝCH PROSTORŮ

SMALL ROOM ACOUSTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Martin

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Martin Martin

ID: 165029

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Akustika malých prostorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte měření impulsních odezev malých prostorů určených k produkci hudby. Měření provedte v několika pozicích odpovídajících pozicím jednotlivých hráčů. V prostředí Matlab realizujte funkce, které budou z těchto odezev počítat kmitočtovou odezvu a všechna používaná objektivní kritéria kvality poslechových prostorů. Porovnejte hodnoty objektivních kritérií získaných měřením s hodnotami získanými simulací daných prostorů v programu EASE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s., ISBN 0451480

[2] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. „Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů“. Akustické listy, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18.

[3] ČSN EN ISO 3382: Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky. Česká technická norma, Český normalizační institut, únor 2009.

[4] ČSN EN ISO 18233: Akustika – Aplikace nových akustických metod měření stavebních konstrukcí, v budovách a v místnostech. Česká technická norma, Český normalizační institut, listopad 2006.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá objektivními kritérii kvality malých prostor určených k produkci hudby. Konkrétně akustikou malých hudebních klubů v Brně a jejich vlivem na hudební produkci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akustika, malé prostory, objektivní kritéria kvality.

ABSTRACT

This semestral paper deals with an objective quality criteria of small rooms intended for music performance.

KEYWORDS

Acoustics, small room, objective quality criteria.

MARTIN, Martin *Akustika malých prostorů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 69 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Akustika malých prostorů“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D., za odborné vedení, trpělivost, konzultace a jeho velmi vstřícný přístup ke studentům.

Největší díky pak patří mé manželce Martě, bez které by nic z mé práce nemělo smysl.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Teoretický úvod	15
1.1 Šíření zvuku	15
1.1.1 Veličiny zvukového pole	15
1.1.2 Hladiny akustických veličin	19
1.1.3 Způsoby šíření zvuku	20
1.2 Akustika uzavřených prostorů	25
1.2.1 Metody teoretické akustiky	26
1.2.2 Vlastní kmity uzavřeného prostoru	27
1.2.3 Schröderův (kritický) kmitočet	30
1.2.4 Impulsová charakteristika	30
1.2.5 Frekvenční odezva	31
1.3 Akustické parametry místností	32
1.3.1 Objektivní akustické parametry malých prostor	33
1.3.2 Časová a frekvenční kritéria	33
1.3.3 Energetická kritéria	37
1.3.4 Další kritéria	41
2 Měření prostor a zpracování dat	44
2.1 Metoda integrované impulsové odezvy	44
2.1.1 Popis metody	44
2.1.2 Požadavky na měření	45
2.1.3 Měřené pozice	46
2.2 Měřicí řetězec	47
2.2.1 Kompenzace vlastností měřícího řetězce	47
2.2.2 Charakteristiky prvků řetězce	49
2.3 Zpracování dat	51
2.3.1 Kontrola naměřených dat	51
2.3.2 Postup při zpracování signálů	53
3 Závěr	55
Literatura	56
Seznam symbolů, veličin a zkratk	60
Seznam příloh	64

A Přílohy k teoretické části	65
B Dokumentace měřených prostor	67
B.1 Výkresy půdorysů	67
B.1.1 Výkres rozmístění poloh	67
B.1.2 Výkres půdorysu	68
C Obsah přiloženého CD	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření zvuku kulovým vlněním v plynném prostředí.	16
1.2	Typy akustických polí v uzavřeném prostoru.	21
1.3	Střet zvukové vlny s překážkou.	23
1.4	Hodnoty součinitele zvukové pohltivosti plat na vejce v $1/3$ -oktávových pásmech (na ilustraci jsou vyznačena pouze oktávová).	23
1.5	Difrakce zvukového vlnění při šíření prostorem s překážkou.	24
1.6	Hustota kmitů v malém uzavřeném prostoru.	29
1.7	Aproximace impulsové odezvy uzavřeného prostoru.	31
1.8	Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T_d/T_O obsazeného prostoru určeného k přednesu <i>hudby i řeči</i>	35
2.1	Blokové schéma měřicího řetězce.	47
2.2	Blokové schéma LTI systému měřicího řetězce.	48
2.3	Frekvenční charakteristika všesměrového zdroje (průměrovaná), získaná měřením pomocí přeladovaného harmonického signálu.	50
2.4	Normalizovaná modulová frekvenční charakteristika rozdílu měření.	50
2.5	Pokles energie nekompensované impulsní odezvy malého prostoru.	51
2.6	Pokles energie kompenzované impulsní odezvy malého prostoru.	52
B.1	Výkres poloh zdroje zvuku a mikrofonu	67
B.2	Půdorysný výkres místnosti Sklepní scény	68

SEZNAM TABULEK

A.1	Vlnové délky slyšitelných frekvencí v závislosti na teplotě okolí	65
A.2	Poloměr šířky blízkého pole v závislosti na frekvenci	65
A.3	Součinitele zvukové pohltivosti v oktávových pásmech pro vybrané materiály [16]	66
A.4	Doporučený objem a optimální doba dozvuku vybraných skupin pro- storů dle platných norem [10] [31]	66

SEZNAM VÝPISŮ

ÚVOD

Prostor podstatně ovlivňuje zvuk hudby. Je to jeden z důvodů, proč je tak pevně spjatá s prostředím, ve kterém se provozuje. Vývoj společnosti a techniky mění způsob života člověka, prostory, kde pobývá, a nástroje, které používá, zatím však zůstává stejným princip, na jehož základě se informace zpracovávaná v mozku získá. Je do něj přivedena systémem, skrze který je přenesena vibrace například z rozezněné struny díky změnám tlaku vzduchu až do sluchového ústrojí, kde pak rozruchem podrážděné buňky sluchového nervu dále předají zvukovou informaci do mozku. Prostor, v kterém se posluchač právě nachází, je nedílnou součástí tohoto (elektro)akustického řetězce a může i naprosto zásadně změnit obsah informace, která jím prochází. Fakt, že během přenosu může být informace elektroakustickými měniči dočasně transformována na změny elektrického napětí či hodnoty číselných posloupností, na tom nic nemění. Každý další fyzický prostor, kterým reprodukováná zvuková informace prochází, ji podrobuje i dalším změnám, nehledě na přenosové charakteristiky reprodukčních zařízení samotných. Původní zvukový signál potom může dokonce i zcela pozbyť původní informaci: dlouhá ozvěna znemožňuje srozumitelnost řeči, v nevhodně zatlumené místnosti spoluhráči navzájem neslyší rejstříky svých nástrojů potřebné k rozeznání artikulace, v příliš malé místnosti se energie v prostoru rozděluje nerovnoměrně a každý posluchač slyší něco jiného – vlastnosti prostoru mění barvu a dobu trvání zvuku.

Tomuto vlivu pak samozřejmě podléhá i vývoj hudebních nástrojů – například varhany v katedrále musí vyzařovat se značně vyšší hladinou intenzity zvuku než cembalo v útulném aristokratickém pokoji. Konkrétní konstrukce hudebních nástrojů se sice napříč kulturami a civilizacemi liší, základní koncepty jsou ovšem totožné – jde o různé využití základních prvků: kámen nebo tyč, trubice, vlákno, blána a plátek. Vývoj nástroje však sleduje vždy nejprve zvýšení hlasitosti a až poté možnosti ovládnání či tónový rozsah. Teprve po dosažení určité úrovně konstrukce pak následuje požadavek na novou barvu zvuku, což může vést k zásadní změně konstrukce až k novému nástroji [21].

Při produkci nekomerčních žánrů v malých prostorech se nyní běžně dosahuje hladiny akustického tlaku kolem $110 \text{ dB}_{\text{SPL}}$. Estetika mnoha hudebních subžánrů vyžaduje vysokou hlasitost zvuku, ať už při hudební produkci či reprodukci nahrávek, a z tohoto důvodu také vyplývá velmi nízký dynamický rozsah hudebního materiálu v řádu jednotek decibel.

Obecně zde lze sledovat paralelu s vývojem historických hudebních forem – po dosažení dokonalosti formy se stane mistrem ten, kdo formu naopak záměrně porušuje, a přináší tak zvuk nový. Právě z tohoto důvodu si pamatujeme jména jako Beethoven a Mozart. Je také známo, že skladatelé vždy rádi komponovali v prosto-

rech, ve kterých se měla jejich hudba následně produkovat – vývoj architektury jde ruku v ruce s vývojem hudebních forem [5].

Ať už církevní či světská, umělé či nonumělé, komerční střední proud či nepřístupné undergroundové subžánry, hudba se vždy hraje a poslouchá v nějakých, pro ni typických, prostorech. Základní způsoby využití prostor, ať už přirozených nebo umělých, se sice během historie až tak nezměnili technologie používaných stavebních konstrukcí však ano, což vždy značně ovlivnilo jejich zvukový charakter, a to jak samotnými rozměry budov, tak i například zvukově pohltivými vlastnostmi stavebních konstrukcí či vybavení budov.

Spolu s prostory pro produkci hudby vyloženě určenými, jako různé obřadní síně či koncertní sály, se však k amatérské produkci vždy využívaly ty prostory, které jednoduše byly po ruce. Právě tam se vyvíjí nekomerční nonumělé, takzvaná „lidová“ hudba, ať už jde o jazz v neworleanských „hudebních místnostech“, punk v anglické garáži, „lidovky“ v moravském vinném sklípku, či autistické one-man-band projekty provozované v sedě u PC [32].

Právě tato, lidová, hudba, která je odborníky neusměrňovaným projevem situace společnosti, je zdrojem inspirace pro skladatele umělé hudby a zdrojem inovací pro hudební průmysl [32], [29]. Až do minulého století nebyvalý rozmach finančně dostupných technologií určených k produkci, zpracování a reprodukci zvuku neustále posouvá normy estetiky. Jak je to jen dlouho, co byl rock'n'roll považován za neposlouchatelnou kakofonii? Ruchové složky tónů hudebních nástrojů jsou na konzervatořích obvykle popisovány jako nežádoucí. Přitom samotný hluk, zcela nahodilý zvuk bez rytmu, určité výšky či harmonické struktury je používán v hudební tvorbě již déle jak 70 let – dobu, za kterou je již možno objektivně hodnotit kvalitu hudby – a to jak laiky, tak akademiky [29] jednoduše podle toho, jestli se na ní nezapomnělo. Vývoj hudby prošel uctíváním základních tónů přirozené harmonické řady, přes mikrotonální harmonie, minimalismus a stěny hluku na úrovních poškozujících sluch. Hudebním signálem může nyní být signál jakéhokoli charakteru.

V této práci jsem se zaměřil na prostory hudebních klubů, v kterých se produkuje nonumělé hudba převážně rockového okruhu. Kromě bohatých osobních zkušeností z návštěv produkcí mi k výběru posloužila například i magisterská diplomová práce Hudební podniky v Brně od Jany Ondrákové [27].

Na každý z prostorů, ať veřejný (kulturní centra, divadelní sály, kina, kluby, sportovní haly, přednáškové místnosti, atd.) nebo specializovaný (nahrávací studia, rozhlasová a televizní studia, akustické laboratoře atd.), jsou kladeny určité požadavky. Tyto požadavky bývají přesně definovány technickými normami. U nás to je například ČSN 73 0527 [10].

Hudební kluby, kterými se zabývám v této práci, ovšem nebyly pro hudební produkci projektovány, tak jako naprostá většina prostor, kde se provozuje lidová hudba. Vzhledem k nekomerční povaze hudební produkce, která se v nich odehrává, a finanční náročnosti úprav jejich akustiky, tak aby zároveň splňovaly požadavky hygienického úřadu a požárních směrnic, nelze s úpravami ani do budoucna počítat. Nesplňují tak požadavky na „dobrou akustiku“. Tato situace je, minimálně v prostředí České republiky, naprosto běžná již desítky let, a to i co se týče amatérských hudebních zkušeben. Domnívám se, že tento fakt má zásadní vliv na vývoj estetiky hudebních žánrů. Z tohoto důvodu hodlám tyto prostory z akustického hlediska, pokud možno objektivně, popsat.

Touto prací bych rád přispěl k popsání podmínek, za jakých hudba vzniká, a doufám, že získaných informací bude možno použít k dalšímu výzkumu, či přímo hudební tvorbě.

Ve vybraných prostorech budou za pomoci softwaru EASERA změřeny impulsní charakteristiky prostorů. Zároveň v nich bude pořízena fotodokumentace a změřeny jejich fyzické rozměry, které poslouží k vytvoření virtuálních 3D modulů v softwaru, na jejichž základě budou vytvořeny simulace impulsních charakteristik v softwaru EASE. Tato data budou následně zpracována pomocí softwaru MATLAB, čímž získáme hodnoty objektivních akustických parametrů prostor a půjde porovnat výsledky měření a simulací. Pokusím se taktéž o srovnání jednotlivých pozic hráčů a publika.

V rámci této práce vznikne jakási brněnská undergroundová obdoba publikace Akustika hudebních prostorů v České republice [39], ve formě elektronického dokumentu s plánky jednotlivých místností a seznamem jejich objektivních vlastností.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Šíření zvuku

Říká se, že zvuk existuje, když rozruch šířený skrze pružné prostředí způsobuje změnu v tlaku, nebo vychýlení částic materiálu, které může být zaznamenáno osobou, či přístrojem [2]. Zvuk je tedy přenos energie pomocí kmitajících částic, který jsme schopni slyšet. V této práci uvažuji pouze částice plynů.

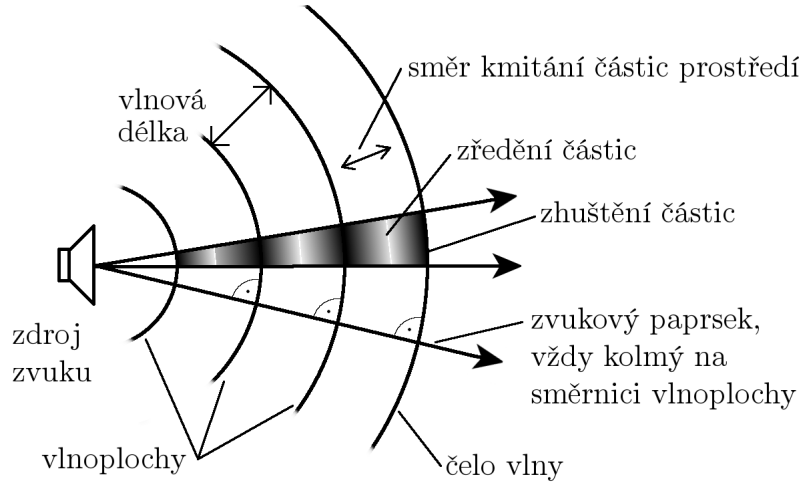
To, že částice kmitají, znamená, že se po vychýlení z tzv. *rovnovážné polohy* (představme si např. drnknutí do rovné, naplé struny) přechýlí na opačnou stranu od rovnovážné polohy a celý proces se potom opakuje s čím dál menší výchytkou, což je způsobeno postupnou přeměnou kinetické energie na energii tepelnou (tlumením). Princip tohoto procesu je identický pro částici vzduchu, blánu reproduktoru i ušní bubínek, nebo také například pro pružně upevněný kmitající panel, určený k tlumení zvuku. Přesouvá se tedy energie, hmota pouze kmitá.

Nádoba se vzduchem se chová jako pružina. Pružnost vzduchu je však různá pro různé rychlosti, v jakých dochází ke stlačení vzduchu. Změny tlaku vzduchu, které jsou mnohem pomalejší, než zvukové kmitočty se označují jako *isotermické*, teplo vzniklé stlačením vzduchu se při nich stačí rozprostřít (např. do uvažované nádoby) a teplotu plynu pak při změnách tlaku považujeme za konstantní. Při rychlejších změnách stlačení vzduchu se však teplo nestačí předat a takové procesy označujeme jako *adiabatické*. Molekuly vzduchu jsou při nich teplejší, pohybují se rychleji a vzduch je potom tužší. Pokud známe vlastnosti plynu, jako jsou tuhost nebo hustota, a víme, že respektují základní zákony fyziky, jsme schopni plně předpovídat šíření zvuku tímto plynem. V takovémto adiabatickém prostředí pak můžeme pro vyskytující se jevy uplatnit *princip superpozice*, který tvrdí, že výsledný jev je součtem jevů, vyvolaných individuálně jednotlivými vlivy [13].

1.1.1 Veličiny zvukového pole

Prostor, kterým se šíří zvuk, se nazývá zvukovým polem. V plynném prostředí nejsou smyková napětí a částice tedy kmitají kolem své rovnovážné polohy pouze ve směru šíření zvuku. Ve většině případů ho můžeme považovat za *homogenní* a *isotropní*, což znamená, že v každém bodě prostoru bude mít stejnou hustotu a rozruch se v něm bude šířit všemi směry stejnou rychlostí.

V důsledku pružnosti prostředí se při kmitání částic prostředí vytvářejí místa s relativním zhuštěním, či zředěním těchto částic. Takové místo se nazývá *zvuková vlna*. Geometrické místo bodů, do kterých dospělo vlnění ze zdroje za stejnou dobu se pak nazývá *vlnoplocha* a všechny částice zde kmitají se stejnou fází.



Obr. 1.1: Šíření zvuku kulovým vlněním v plynném prostředí.

Vzdálenost jednotlivých vlnoploch se nazývá *vlnová délka* [31]:

$$\lambda = c_0 T = \frac{c_0}{f} = 2\pi \frac{c_0}{\omega}, \quad (1.1)$$

kde c_0 je rychlost zvuku ve vzduchu [$m \cdot s^{-1}$], T je perioda zvukového vlnění, f je frekvence [Hz] vlnění, přičemž $f = 1/T$ a ω je úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$].

Rozsah kmitočtů, které je člověk schopen vnímat, je přibližně 20Hz až 20kHz a těmto frekvencím odpovídají vlnové délky přibližně od 17 m do 17 mm.

Pro výpočty při řešení rovnic šíření zvuku v různých aplikacích se také používá tzv. vlnové číslo [m^{-1}] [31]:

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Rychlost šíření zvuku

Zmíněná *rychlost šíření zvuku* c_0 popisuje postup těchto vlnoploch od zdroje zvuku (kmitání) a při adiabatických dějích je závislá na teplotě [24]:

$$c_0 = \sqrt{\left(\frac{\chi P_{00}}{\rho_0}\right) (1 + \gamma C)} \approx 331,4 + 0,607C \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (1.3)$$

kde χ je Poissonova konstanta (poměr měrné kapacity plynu při stálém tlaku a objemu; cca 1,4 pro suchý vzduch), p_{00} je atmosférický (barometrický) tlak při teplotě 0°C (101325 Pa), ρ_0 je hustota vzduchu při teplotě 0°C ($1,29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), γ je součinitel objemové roztažnosti plynů ($\gamma = 1/273,15\text{ [K}^{-1}\text{]}$) a C je teplota okolí [$^\circ\text{C}$].

Při teplotách mimo interval -30°C až $+30^\circ\text{C}$ je však přibližný tvar rovnice nedostatečný a je potřeba použít přesný vzorec [2]. Je vidět, že rychlost zvuku ve vzduchu roste v závislosti především na teplotě, ale nepatrně také na vlhkosti vzduchu a vliv nadmořské výšky (případně počasí) v rozmezí hodnot barometrického tlaku 95 až 104 kPa je z hlediska hudby zcela zanedbatelný [30]. V přílohách je tabulka A.1 s výpisem změn akustické rychlosti, a s tím souvisejících změn vlnových délek vybraných slyšitelných frekvencí pro vybrané teploty.

Akustický tlak

Akustickým tlakem rozumíme rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě zvukového pole za přítomnosti zvuku a statickou hodnotou atmosférického tlaku p_{00} . Je to superponovaná střídavá složka tlaku a za přítomnosti zvuku se tedy v každém bodě zvukového pole hodnota celkového tlaku bude měnit v čase [31]:

$$p(t) = \frac{F(t)}{S} \quad (1.4)$$

Je to skalární veličina, definovaná jako síla působící na jednotku plochy a v přírodě běžně nepřesahující hodnotu amplitudy 100 Pa. Pro srovnání například práh slyšení pro okolí kmitočtu 1 kHz je 0,00002 Pa. Hodnotě přibližně 200 Pa pak odpovídá tryskový motor z 10 m, přičemž dochází k okamžitému a nevratnému poškození sluchu.

Akustická výchylka

Při rozdílných hodnotách akustického tlaku v sousedních bodech prostoru se hmotné částice přesouvají do míst s tlakem nižším a vzniká tak kmitavý pohyb kolem jejich rovnovážné polohy. Vzdálenost od rovnovážné polohy se nazývá *akustická výchylka* [31]:

$$y = y(t) \quad (1.5)$$

Akustická rychlost

Akustická rychlost v kmitání částic kolem rovnovážné polohy je vektorová veličina, a s časem se tedy mění nejen její velikost, ale i směr. Získáme ji derivací akustické

výchylky podle času [31]:

$$v = \frac{dy}{dt} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] , \quad (1.6)$$

a derivací akustické rychlosti pak zase získáme *akustické zrychlení* [31]:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] . \quad (1.7)$$

Při určitém stavu plynného prostředí je možné charakterizovat jej například pomocí změny jeho hustoty ρ , která je vázaná právě na změnu veličin akustického tlaku a akustické rychlosti. Podobně jako u akustického tlaku je pak změna hustoty prostředí střídavá složka.

Akustický výkon

Okamžitá hodnota akustického výkonu je dána skalárním součinem vektoru síly a rychlosti [31]:

$$P = Fv = pSv \cos \psi , \quad (1.8)$$

kde ψ je úhel, který svírá normála k ploše S s vektorem akustické rychlosti v .

Intenzita zvuku

Jako *intenzita zvuku* se chápe střední hodnota toku zvukové energie, která projde za jednotku času přes jednotkovou plochu kolmou na směr šíření zvukového vlnění. V podstatě vyjadřuje činnou složku měrného akustického výkonu připadajícího na jednotku plochy a pro složené zvuky (tedy složitější než pouhé harmonické vlnění o jedné diskrétní frekvenci) ji lze vyjádřit vztahem [31]:

$$I = \frac{1}{T_{\text{MAX}}} \int_0^{T_{\text{MAX}}} pvd t \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] . \quad (1.9)$$

kde $T_{\text{MAX}} \gg 1/f_n$ a f_n je kmitočet nejnižší spektrální složky složeného zvuku. Střední hodnota jalové složky výkonu zvukového vlnění je nulová.

Akustická impedance

V elektrickém poli rozdíl elektrických potenciálů způsobuje časovou změnu pohybu nábojů, která se projevuje jako elektrický proud. Analogicky se akustická rychlost hmotných částic prostředí mění v závislosti na potenciálním rozdílu akustických tlaků p . Formální podobnost chování částic zvukového pole a elementárních částic elektrického pole umožnila zavést pojem *akustická impedance*, analogický k elektrické

impedanci [31]:

$$Z_a = \frac{p}{vS}. \quad (1.10)$$

Obecně jde o komplexní veličinu a lze jí tak zapsat ve složkovém či fázorovém tvaru. V bodě zvukového pole na jednotkové ploše je potom *specifická akustická impedance* definována takto [31]:

$$z_a = \frac{p}{v}. \quad (1.11)$$

Přiřazením mechanických veličin a pojmů veličinám a pojmům elektrickým můžeme pro řešení mechanických obvodů použít teorii elektrických soustav. Mluvíme potom o elektroakustické analogii.

1.1.2 Hladiny akustických veličin

Zjednodušeně lze říci, že lidské ucho vnímá řadou aritmetickou akustické veličiny, které se mění řadou geometrickou. To znamená, že násobky akustických veličin jsou vnímány jako přírůstky. Pro vyjádření akustických veličin proto používáme jejich logaritmické hladiny. Obecným vztahem pro hladinu energetické veličiny je vztah [31]:

$$L = 10 \log \frac{x}{x_0} \quad [\text{dB}], \quad (1.12)$$

kde x_0 je vztažná hodnota veličiny x . Velikost dané veličiny z její známé hladiny v dB lze získat takto [31]:

$$x = x_0 10^{\frac{L}{10}}. \quad (1.13)$$

Hladina akustického tlaku a rychlosti

Hladina akustického tlaku L (Sound Pressure Level, SPL) se odvozuje z efektivní hodnoty (Root Mean Square) akustického tlaku p_{RMS} , kterou získáme z jeho časového průběhu pomocí vztahu [31]:

$$p_{\text{RMS}} = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad [\text{Pa}]. \quad (1.14)$$

V této práci je hodnotou akustického tlaku vždy myšlena jeho efektivní hodnota.

Po dosazení efektivních hodnot a ekvivalentních úpravách rovnice dostaneme vztah [31]:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}], \quad (1.15)$$

kde p_0 je vztažná hodnota pro 0 dB L_p ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa), která odpovídá, jak již bylo jednou uvedeno, prahu slyšení v okolí jednoho kmitočtu. Jednotka hladiny akustického

tlaku se často zapisuje ve tvarech jako dB(SPL), dB_(SPL), či dB_{SPL}, pro lepší orientaci v textu, avšak takové značení neodpovídá mezinárodnímu systému jednotek SI. Akustickému tlaku 1 Pa odpovídá hladina 94 dB_{SPL}.

Obdobně je definována *hladina akustické rychlosti* L_V [31]:

$$L_V = 10 \log \frac{v^2}{v_0^2} = 20 \log \frac{v}{v_0} \quad [\text{dB}] , \quad (1.16)$$

kde v_0 je vztažná hodnota $5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Hladina intenzity zvuku a akustického výkonu

Hladina intenzity zvuku L_I je dána vztahem [31]:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] , \quad (1.17)$$

kde I_0 je vztažná hodnota $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a podobným způsobem je vyjádřena *Hladina akustického výkonu* L_P , která je dána vztahem [31]:

$$L_P = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}] , \quad (1.18)$$

kde P_0 je vztažná hodnota 10^{-12} W .

1.1.3 Způsoby šíření zvuku

Odvozením vztahů základních proměnných veličin zvukového pole získáme takzvanou *vlnovou rovnici*, která je základním nástrojem pro řešení úloh v akustice a elektroakustice. Je matematickým vyjádřením fyzikálního procesu šíření vlnění v prostoru a platí obecně pro každý druh vlnění.

Druhy vlnění rozlišujeme podle změny obsahu povrchu vlnoploch vůči vzdálenosti od zdroje zvuku na kulové a rovinné (případně se ještě používají válcové, například pro posuzování hluku provozu na dálnicích apod.), a to dle $r \gg \lambda$. Kulová zvuková vlna s velkým poloměrem se chová stejně jako rovinná zvuková vlna, kde se intenzita zvuku se vzdáleností od zdroje již prakticky nemění.

Amplituda akustického tlaku je ovšem pro kulové vlnění nepřímo úměrná vzdálenosti [31]:

$$p = \frac{p_1}{r} e^{j\omega(t - \frac{r}{c_0})} , \quad (1.19)$$

kde p_1 je amplituda efektivní hodnoty akustického tlaku v jednotkové vzdálenosti $r = 1 \text{ m}$, a tak se při každém zdvojnásobení vzdálenosti její úroveň zmenšuje o přibližně 6dB, neboli intenzita zvuku u kulové vlny klesá se čtvercem vzdálenosti.

Toto ovšem platí, pouze když uvažujeme jen jeden, všesměrový zdroj zvuku ve *volném poli* (viz dále). V praxi je samozřejmě šíření zvuku různými způsoby omezeno.

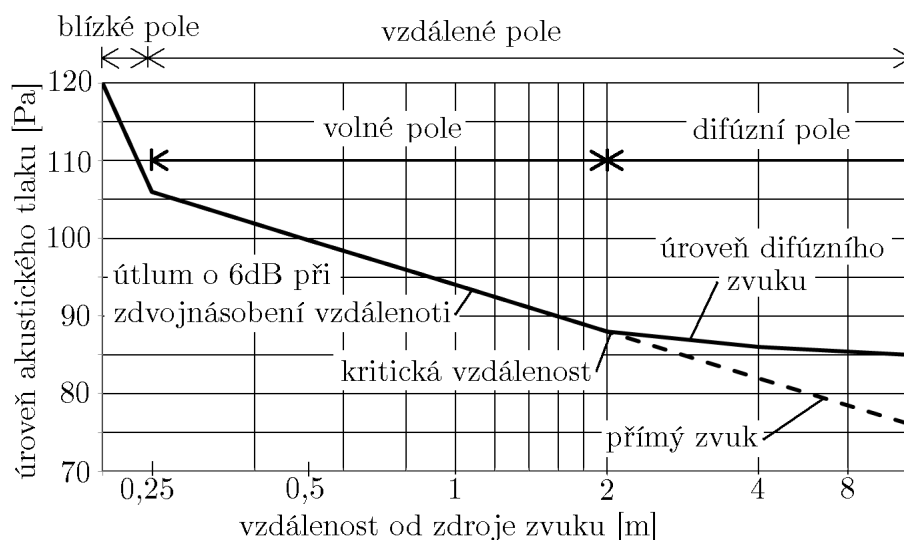
Typy zvukových polí

Když se zvuková vlna šíří prostorem nerušeně, tj. bez odrazů, nazýváme takové zvukové pole volným a takováto „neovlivněná“ vlna se nazývá *primární*. V reálných situacích se bude jednat o tzv. *přímý zvuk*. Při existenci překážky v cestě zvukové vlny, však může v různé míře dojít k odrazům, pohlcení či ohybu vlny. Odražené, nebo také *sekundární* vlny pak mohou s primárními interferovat. Dalším postupem vlny v uzavřeném prostoru pak vznikají tzv. *mnohonásobné odrazy*.

Všechny tyto druhy zvukových vln jsou vždy přítomny v uzavřeném prostoru. V případě, že je akustické pole tvořeno mnohonásobnými odrazy, je směr šíření zvukové energie náhodný a stále se měnící nejsme schopni určit směr, odkud zvuk přichází, nelze definovat žádnou vlnoplochu a takové pole nazýváme *difúzním*. Za hranici mezi volným a difúzním polem v uzavřeném prostoru označujeme vzdálenost, ve které se hustota akustické energie primárních vln rovná hustotě akustické energie vln sekundárních, a nazýváme ji *dozvuková vzdálenost* [12].

$$r_d = 0,14\sqrt{A}, \quad (1.20)$$

kde A je *pohltivost prostoru* (viz dále).



Obr. 1.2: Typy akustických polí v uzavřeném prostoru.

V blízkosti rozměrnějších zdrojů zvuku (například reproduktorů) vzniká v důsledku interference nehomogenní, tzv. *blízké pole* (jinak také Fresnelův prostor),

které je definováno jako [31]:

$$kr \ll 1, \quad (1.21)$$

při hodnotách kr větších než 1 mluvíme o poli *vzdáleném*.

V blízkém a difúzním poli neplatí rovnice 1.11. Například snímání reproduktoru mikrofonom je tak značně závislé na pozici vůči reproduktoru v prostoru, byť má mikrofón všesměrovou charakteristiku. Z rovnice je vidět, že vzdálenost budeme určovat podle nejvyšší frekvenční složky zaznamenávaného signálu. Z tabulky A.2 je zase vidět, že se nás bude týkat vzdálenost přibližně 20 cm.

V uzavřeném prostoru může teoreticky existovat volné pole v určité, relativně malé, vzdálenosti od zdroje. V případě malé místnosti jako je například menší hudební klub nebo zkušebna, kde zároveň působí několik zvukových zdrojů o srovnatelné intenzitě zvuku, je pak rozdíl úrovní hustoty zvukové energie zanedbatelný a volné pole prakticky neexistuje. O rozeznávání směru vyzařování jednotlivých zdrojů nemůže být řeč a posluchač rozeznává jednotlivé zdroje spíše podle jejich frekvenčních charakteristik, a to pouze pokud si nejsou podobné a nedochází tak k vzájemnému frekvenčnímu maskování.

Tuto situaci ovšem ještě komplikují vlastnosti samotné místnosti jako například její rozměry, geometrické uspořádání ploch a jejich pohltivost (viz dále).

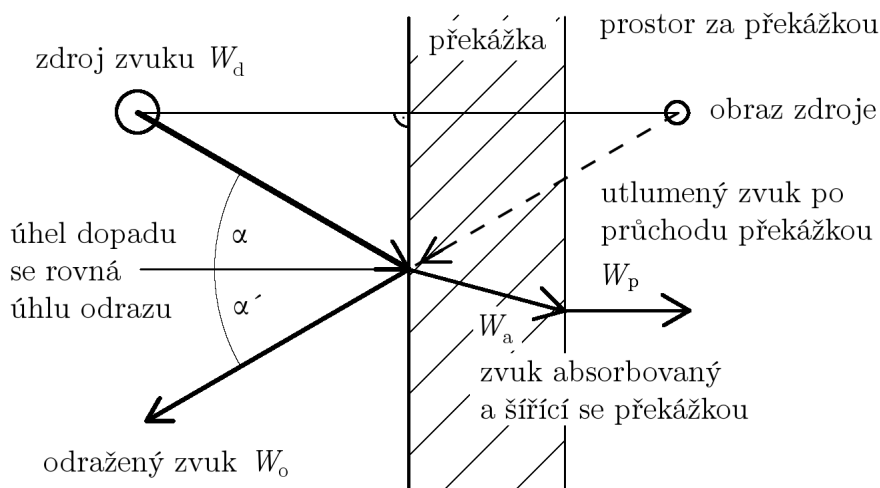
Absorbce zvuku

Žádný povrch není absolutně odrazivý a při střetu zvukové vlny s překážkou vždy dojde k pohlcení části její energie. V relativně malé vzdálenosti od zdroje zvuku (v malých prostorech) sice bude vlnění kulové, nicméně pro účely simulací o něm v *geometrické akustice* uvažujeme jako o množství diskrétních paprsků.

Část energie (W_o) se tedy od překážky odrazí a část se pohltí (W_a) (příčemž na rozhraní materiálů dojde k *refrakci*). Pohlcená energie se dále z části přemění v překážce na energii tepelnou a z části může i překážkou prostoupit (W_p), jak je znázorněno na obrázku 1.3. Vlastnost materiálů pohlcovat zvukovou energii je frekvenčně závislá a popisuje se pomocí *součinitele zvukové pohltivosti* α , jehož hodnoty se běžně uvádí v třetino-oktávových pásmech a je definován jako poměr absorbované energie k energii dopadající v rámci určité plochy povrchu daného materiálu [12]:

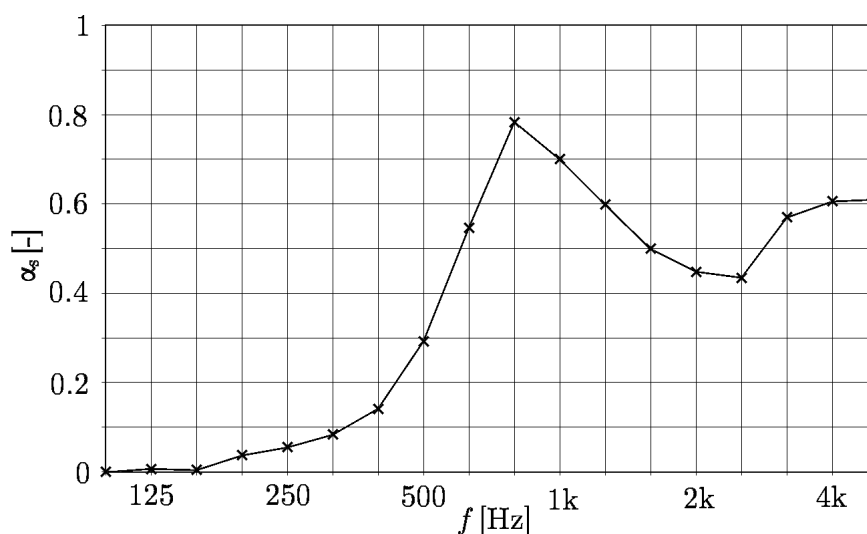
$$\alpha = \frac{W_a}{W_d}, \quad (1.22)$$

Měkčí materiály, jako jsou například pokojové závěsy, obecně vykazují pohltivost na vyšších frekvencích a tvrdší materiály s hladkým povrchem lépe absorbují na nižších kmitočtech. Příklad takovéto závislosti je na obrázku 1.4.



Obr. 1.3: Střet zvukové vlny s překážkou.

Součinitele pohltivosti se určují měřením v takzvaných dozvukových komorách, porovnáváním doby dozvuku prázdné místnosti s dobou dozvuku místnosti s měřeným vzorkem. Měření se provádí pro různé polohy vzorků – například pro různou hustotu zřasení závěsu či různé vzdálenosti odsazení závěsu od zdi.



Obr. 1.4: Hodnoty součinitele zvukové pohltivosti plat na vejce v $1/3$ -oktávových pásmech (na ilustraci jsou vyznačena pouze oktávová).

V České republice se nachází pouze jedna taková komora a podařilo se mi pro účely této práce v ní změřit součinitel pro materiál hojně využívaný laiky pro akustické úpravy hudebních zkušeben a klubů: plata na vejce z papírových vláken. Protokoly z měření jsou součástí příloh na CD k této práci. a jsou provedeny dle aktuální zkušební metody revidované v ČSN EN 1793-1 z července 2013, odvozené z

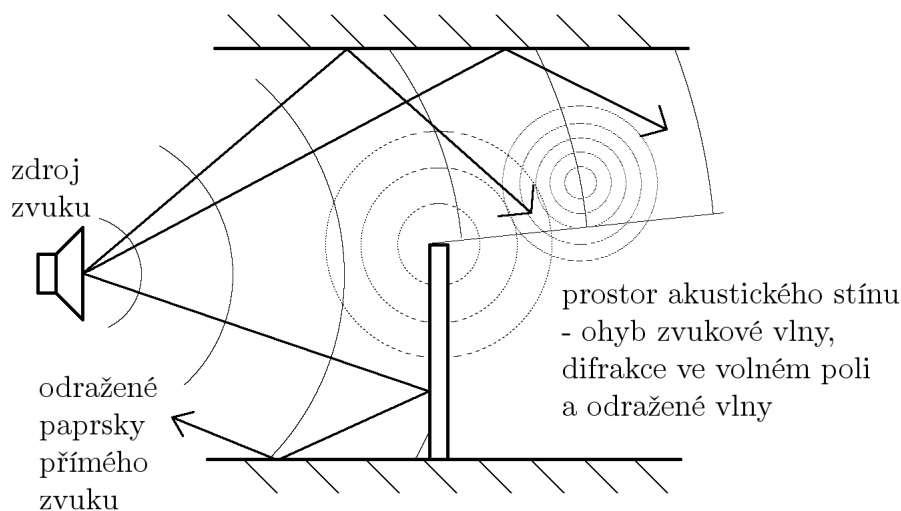
EN ISO 354:2003.

Součinitele běžných stavebních materiálů i akustických prvků jsou uvedeny v řadě publikací (např.: [15]) a některé z nich jsou uvedeny v příložené tabulce A.3.

Difrakce zvuku a akustický stín

Prozatím jsme uvažovali o odrazu vlnění od překážky ve formátu plochy o nekonečných rozměrech. Většina překážek, se kterými se můžeme setkat v malých prostorech, však bude mít rozměry řekněme jako člověk, nebo třeba stůl.

Vlnění o vlnové délce větší, nežli jsou rozměry překážky, se kolem takovéto překážky ohne – „obteče ji“. Uplatní se zde *Huygenův princip*, kdy se jednak každý bod vlnoplochy záření opět stává všesměrovým zdrojem, a v případě překážky se stává novým všesměrovým zdrojem i její hrana. Tento fenomén je totožný pro všechny druhy vlnění a je způsoben fázovou interferencí [12]. *Difrakce* zvuku je frekvenčně závislá.



Obr. 1.5: Difrakce zvukového vlnění při šíření prostorem s překážkou.

Překážka v cestě zvukové vlny bude odrážet pouze vlnění o menších vlnových délkách, než jsou její rozměry, a vznikne za ní tzv. *akustický stín*, v jehož rozmezí bude zvuk v závislosti na frekvenci utlumen.

Tento princip se, spolu s odrazy od ramen a torza lidské postavy, uplatňuje také při lokalizaci zvukového zdroje v prostoru člověkem. Schopnost lokalizace je odpovídajícím způsobem frekvenčně závislá a nejpresnější je pro frekvence, jejichž vlnová délka se blíží rozměrům hlavy (2–3 kHz).

Difrakce zvuku o hrany beden reproduktorů je dobře známá. Postavíme-li reproduktory ke stěně a namíříme je do prostoru, stejně se pak zvuk odráží i od stěny, ke

které se dostal difrakcí od hrany reproduktoru. V místě posluchače pak dochází k interferenci přímého a odraženého zvuku a vzniku tzv. *hřebenového filtru*, přičemž dle experimentu ([12]) může být frekvenční odezva takového systému změněna na vícero kmitočtech až o ± 5 dB (!). Z tohoto důvodu je dobré umísťovat reproduktory dál od stěny, nebo je do ní rovnou zabudovat. Ze stejného důvodu jsou mikrofony měřících zařízení malých rozměrů a vzdáleny od rozměrnější přístrojové krabice.

Podobně se pak stěna zkušebny, pokrytá platy od vajec, na kterých jsou Jehlany s délkou hrany cca 5 cm, jeví pro zvukové vlny o frekvencích menších než cca 6900 Hz, jako naprosto rovná.

Poznámka k odrazům

Uvažování o zvuku jako o paprscích je velmi zjednodušené a měli bychom o něm vždy uvažovat jako o sférické vlnoploše. Ty se stávají vlnoplochami rovinnými až v dostatečné vzdálenosti od bodového zdroje. Pro rovinnou vlnu pak tvar plochy, od které se odrazí, může, vzhledem k její vlnové délce, zásadně měnit směr odražených vln.

Konkrétně jde o to, že plocha konkávního tvaru (vydutá) může odražené vlny soustřeďovat do jednoho bodu a plocha konvexní (vypouklá) je rovnoměrně rozptylovat a působit tak značně difúzně. Toto ovšem bude takto jednoznačně platit pouze pro rovinnou vlnu o vlnové délce menší nebo srovnatelné s rozměry takového útvaru. Tohoto jevu lze využít například pro parabolický mikrofon ve volném poli, kde se, opět v závislosti na frekvenci, může značně zlepšit jeho směrovost. V malých prostorech je však situace mnohem složitější a definující pro jejich charakter budou, z akustického hlediska, spíše mnohočetné odrazy, *vlastní kmitů prostoru* a podobně.

1.2 Akustika uzavřených prostorů

Uzavřený prostor je definován jako prostor obklopený hraničními plochami vykazujícími akustické vlastnosti [6], přičemž akustickými vlastnostmi hraničních ploch se rozumí jejich schopnost zvuk odrážet, pohlcovat, koncentrovat a rozptylovat.

Malé prostory nejsou pojmem, který by byl definován v české státní normě ČSN 01 1600 Akustika – Terminologie, nicméně česky psaná odborná literatura [20] [37] je popisuje jako prostory s objemem menším než 200 m^3 .

Z akustického hlediska by mohla lépe jako definice posloužit nutnost brát ohledy na individuální rezonance těchto prostorů na nízkých frekvencích, a nebo nízká doba v řádu milisekund, v které k posluchači dorazí prvotní odrazy od stropu, stěn či objektů v místnosti [19].

„Malé prostory mají rozměry srovnatelné s vlnovou délkou zvukových signálů [31].“

1.2.1 Metody teoretické akustiky

Akustika uzavřeného prostoru, neboli soubor akustických vlastností prostoru vyjádřených hodnotami veličin prostorové akustiky určujících kvalitu poslechu hudby nebo řeči v daném uzavřeném prostoru, lze analyzovat více postupy. Každý z nich má určité využití a určitou obtížnost při výpočtu. Základními metodami analýzy jsou vlnová akustika, statistická akustika a geometrická akustika.

Geometrická akustika

Pomocí geometrické akustiky zkoumáme základní fyzikální vlastnosti prostorů. Používá se spíše při stavebním návrhu místnosti, avšak je velice výpočetně náročná – složitost výpočtů roste exponenciálně se složitostí prostoru. Geometrické modely zanedbávají jevy jako interference a ohyb vln a jen nesnadno se používají pro prostory složitějších tvarů.

Statistická akustika

Statistická akustika k charakterizaci zvukového pole používá veličiny energetického rázu jako hustota zvukové energie a intenzita zvuku. Nalézá jejich průměrné hodnoty a s jejich pomocí umožňuje poskytovat kvalitativní obraz o základních vlastnostech uzavřených prostorů. Pro statistické modely je zavedeno několik předpokladů:

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

Základním předpokladem pro splnění těchto podmínek je dostatečná hustota vlastních kmitů při buzení prostoru stacionárním signálem. S rostoucím kmitočtem se průměrná vzdálenost na kmitočtové ose mezi jednotlivými vlastními kmity zkracuje natolik, že se jednotlivé rezonanční křivky začnou soustavně překrývat a nelze je už rozlišit. Rozložení vlastních kmitů na kmitočtové ose nabývá náhodného charakteru, a tím má reálná a imaginární část okamžitých hodnot akustického tlaku v dostatečné vzdálenosti od zdroje zvuku Gaussovo (normální) rozložení. Toto však platí pouze pro kmitočty vyšší, než je *Schröderův (kritický) kmitočet* (viz dále).

Vlnová akustika

„Vlnová teorie akustického pole uzavřených prostorů vychází ze základních zákonů mechaniky prostředí, v němž se šíří zvuk (pohybové rovnice, stavové rovnice a rovnice kontinuity), a formuluje vlnovou rovnici a příslušné hraniční a okrajové podmínky. Analytické řešení je ale možné jen pro geometricky jednoduché tvary prostorů.“ [31]

Řešením vlnové rovnice pro rychlostní potenciál, zobecněný na tvar udávající šíření rovinné postupné vlny v obecném směru vůči kartézským osám, můžeme po dosazení okrajových podmínek obdržet frekvence vlastních kmitů prostoru a jejich počet.

Vlnové číslo pro pravoúhlý netlumený prostor (dutý kvádr) [34]:

$$k = \sqrt{\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right)^2} \quad (1.23)$$

kde n_x , n_y a n_z jsou nezáporná celá čísla a l_x , l_y a l_z jsou délky hran uvažovaného prostoru v metrech.

Řešením rovnice 1.23 jsou *vlastní kmity* prostoru nebo tzv. *módy prostoru* (v anglické literatuře se užívá výrazů „normal modes, room resonance frequencies, či eigenfrequencies“). Řešení vlnových dějů s obecnými vlnoplochami je početně obtížné. Pro stanovení intensity je vyžadována nejen znalost akustického tlaku, ale i fázový posun mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí při určité frekvenci, což je obzvláště v difúzním poli obtížné určit.

1.2.2 Vlastní kmity uzavřeného prostoru

Vlastní kmity, nebo módy prostoru jsou výsledkem zvukových vln pohybujících se v opačném směru na uzavřené trajektorii. Čím tužší jsou povrchy a menší zvuková absorpce, tím rezonantnější bude prostor a tím výraznější budou jeho vlastní kmity a jeho prostorová charakteristika. Pro rezonanční systémy obecně je charakteristická frekvenčně závislá odezva systému na vybuzení na rezonančních kmitočtech systému a dlouhé časy náběhu a dozvuku.

Toto lze chápat tak, že pro každou pozici posluchače existuje jiné „nastavení equalizéru“, dané místností samotnou.

Při dopadu zvukového vlnění na stěnu dojde k jejímu odrazu. V místnosti se vlny postupující opačnými směry v místě styku sečtou a dojde tak k *interferenci*. Fázový rozdíl těchto vln bude záviset na vlnové délce a rozměrech místnosti ve směru, kterým se vlna šíří. Dle principu superpozice, při ideálně odrazivých stěnách, může

v závislosti na tomto fázovém rozdílu v určitých místech energie součtu přímé a odražené vlny nabývat nulové až dvojnásobné hodnoty podle toho, zda se vlny v daném místě potkají ve fázi nebo v protifázi.

Vlastní kmity mají význam i pro přechodné jevy, které se vyskytují hlavně na začátku působení zvukového zdroje, jako například nasazení smyčce, drnknutí do struny, či úder do bicího nástroje apod.

Každý harmonický signál reprodukováný v takovéto místnosti vybudí v prostoru celou řadu módů, které budou mít kmitočet blízký kmitočtu budicího signálu.

Akustické vlastnosti uzavřeného prostoru z hlediska přenosu zvuku ze zdroje k posluchači jsou tedy značně závislé na kmitočtu.

Po úpravě lze z vlnového čísla stanovit frekvenci módu f_N pro danou kombinaci hodnot indexů n_x , n_y a n_z [34]:

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1.24)$$

Z této rovnice vyplývá, že spektrum módů pravoúhlého prostoru není spojité, ale diskrétní. V případě, že jedno z čísel n_x , n_y , n_z je rovno nule, dostaneme frekvenci *tangenciálního kmitu*, pokud jsou nulová dvě, tak frekvenci *osového (tangenciálního) kmitu*, a pokud jsou všechna čísla různá od nuly, tak dostaneme kmitočet *šikmého (kosého) kmitu*. Frekvenci f_N lze formálně považovat za vektor \mathbf{f}_N a čísla n_x , n_y , n_z za jednotkové vektory \mathbf{n}_x , \mathbf{n}_y , \mathbf{n}_z ve směru jednotlivých kartézských os.

Počet vlastních kmitů prostoru N ležících v kmitočtovém intervalu od 0 Hz do kmitočtu f je [36]:

$$N(f_N) = \frac{4\pi V}{3c_0^3} f_N^3 + \frac{\pi S}{4c_0^2} f_N^2 + \frac{L}{8c_0} f_N \quad (1.25)$$

kde V je objem místnosti, S je plocha stěn místnosti a L je celková délka všech hran místnosti. Derivací rovnice 1.25 podle f_N získáme hustotu spektra kmitů. První člen značí celkový počet šikmých módů, druhý člen celkový počet tangenciálních módů a třetí člen celkový počet axiálních módů v uvažovaném kmitočtovém intervalu.

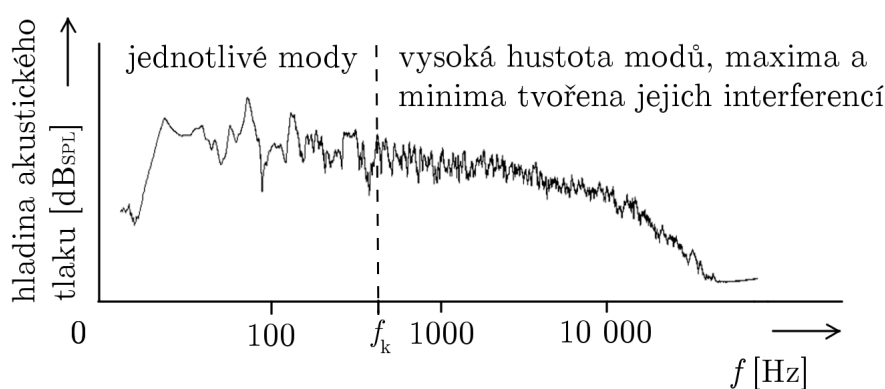
Lze také použít zjednodušený vzorec pro jejich přibližný počet[20]:

$$N \approx \frac{4}{3} \pi V \frac{f^3}{c_0^3} \quad (1.26)$$

Nemá-li být přenos zvuku příliš ovlivněn prostorem, je důležité, aby v poslecho-
vém kmitočtovém pásmu byl co největší počet vlastních kmitů. Z toho také vyplývá,

že nejnižší vlastní kmitočet by měl být hluboko pod uvažovaným kmitočtovým pásmem. Tato podmínka je splněna jen pro větší místnosti (větší než 200 m^3).

Pro posuzování vlastností akustického prostoru z hlediska přenosu signálu je důležité znát počet vlastních kmitů N pod určitým kmitočtem f_k (Schröderův), tento počet je nezávislý na tvaru prostoru, pouze na velikosti jeho objemu [20]. Celkový počet vlastních kmitů se s tvarem prostoru v podstatě nemění, dochází pouze ke vzájemným posunům v jejich spektru. U pravoúhlých prostorů tvoří určité vlastní kmitů harmonické řady, u nepravoúhlých již nejsou tyto kmitů celistvými násobky základních kmitů, a proto je možnost vzniku ozvěn v tomto případě podstatně menší. Počet vlastních kmitů v konstantním kmitočtovém intervalu roste kvadraticky s kmitočtem a je úměrný objemu místnosti.



Obr. 1.6: Hustota kmitů v malém uzavřeném prostoru.

Jestliže mají dva nebo více módů vlastních kmitů (pro dvě nebo více kombinací hodnot indexů n_x , n_y , n_z) totožnou vlastní frekvenci, nazývají se *degenerovanými módy*. Výsledkem degenerovaných módů je koncentrace a zesilování akustické energie na těchto frekvencích. Modulová kmitočtová charakteristika místnosti je v okolí těchto frekvencí silně zdůrazněná. Největší počet těchto vícenásobných módů je v místnostech s velkou geometrickou symetrií. Například v místnostech tvaru krychle nebo kvádrů s poměry hran rovnými celistvým sudým číslům.

Takovéto geometrické uspořádání tvaru místností je však pro stavbu budov nejpraktičtější a tedy i nejlevnější, obzvláště používá-li se prefabrikovaných stavebních konstrukcí. U produkce lidové hudby se s ním dnes setkáme prakticky všude, kromě výjimek, jako jsou klenuté stropy sklepů v historických centrech větších měst, které jsou zase poměrně hojně zastoupeny mezi hudebními kluby, což ve výběru prostor k měření a simulaci respektují.

1.2.3 Schröderův (kritický) kmitočet

Schröderův (kritický) kmitočet je často používán jako kritérium pro rozdělení frekvenčních oblastí akustiky místností na nízké a vysoké. Jeho hodnota závisí na objemu a tlumení místnosti. Typicky se pohybuje v rozmezí 150 až 300 Hz pro obytné místnosti.

Je hranicí mezi oblastmi, kdy je nezbytné k popisu vlastností akustického pole uzavřeného prostoru použít metody vlnové akustiky (pro oblast pod kritickým kmitočtem) a kdy můžeme použít metod geometrické či statistické akustiky (pro oblast nad kritickým kmitočtem).

Od tohoto kmitočtu budícího signálu budou amplitudy a fáze módů místnosti vykazovat náhodné rozložení. Taktéž se ukázalo, že i prostorové rozložení okamžitých hodnot akustického tlaku lze nad tímto kmitočtem považovat za normální (Gaussovo).

Pro tento kmitočet platí [36]:

$$f_k = \frac{5000}{\sqrt{V\delta}} \quad (1.27)$$

kde V je objem místnosti a $\delta = \sqrt{3}\Delta f_N$ je konstanta tlumení (Δf_N je šířka pásma daného módu). Od kmitočtu f_k lze konstanty tlumení módů s blízkým kmitočtem vyjádřit jejich průměrnou velikostí, přičemž lze také použít vzorec [19]:

$$f_k = 2000\sqrt{\frac{T_d}{V}} \quad (1.28)$$

kde $T_d = 6,91\delta$ je *doba dozvuku* v dané místnosti (viz dále) a V vnitřní objem prostoru.

1.2.4 Impulsová charakteristika

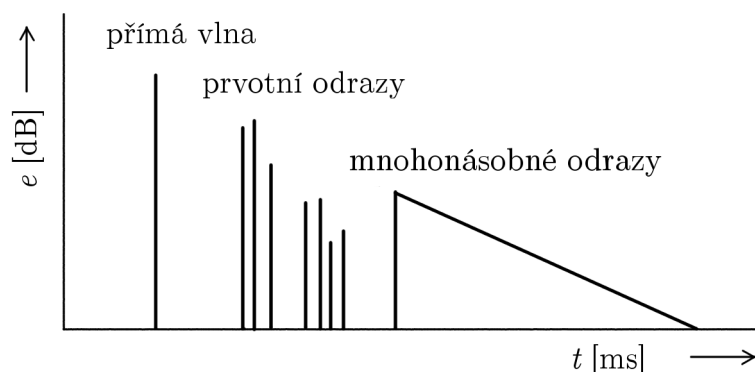
Uzavřený prostor, ve kterém se šíří zvuková vlna a dochází k jejím odrazům a ohybu, lze z hlediska zpracování signálu považovat za systém s několika vstupy a výstupy. Vstupy tohoto systému jsou zdroje zvukového signálu a výstupy jsou přijímače zvukového signálu, tj. mikrofony nebo uši posluchače. V případě snímání monofonního zdroje zvuku jedním mikrofonom půjde o systém s jedním vstupem a jedním výstupem.

Pro analýzu akustického prostoru tedy můžeme využít metod analýzy lineárních časově invariantních systémů, jako je kmitočtová nebo přechodová charakteristika, přenosová funkce, atd. Nejčastěji se používá *impulsová charakteristika* akustického prostoru, což je impulsová charakteristika systému, který simuluje šíření zvukových

vln v akustickém prostoru s daným počtem vstupů a výstupů. Tvar impulsové charakteristiky akustického prostoru byl na základě poznatků prostorové akustiky a subjektivních sluchových vjemů popisuje *logaritmická obálka impulsní odezvy* E [dB]. Typický tvar impulsní charakteristiky prostoru se skládá z (viz obr. 1.7)[31]:

- *přímé vlny* (*direct sound*), která dorazí k posluchači přímo od zdroje zvukového signálu,
- *prvotních odrazů* (*early reflections*), což jsou jasně slyšitelné a dobře lokalizovatelné odrazy zvuku přicházející k posluchači přímo po prvním odrazu od stěn akustického prostoru (při simulaci se využívá geometrického modelu),
- *mnohonásobné odrazy* (*late reverberation*), což je směs zvukových signálů přicházejících do místa poslechu po mnohonásobných odrazech od stěn akustického prostoru (při simulaci se využívá statistického modelu).

Doba, za kterou dojde k přechodu mezi prvotními a mnohonásobnými odrazy, se v anglické literatuře nazývá *doba směšování* [28].



Obr. 1.7: Aproximace impulsové odezvy uzavřeného prostoru.

„Místnost může být považována za fyzický filtr, který mění průběh zdrojového signálu tím, že mu vnutí svou impulsní odezvu“ [19].

1.2.5 Frekvenční odezva

Harmonický signál (tzv. sinusoida) má zvláštní místo v teorii signálů a lineárních časově-invariantních systémů. Zanedbáme-li přechodové jevy vznikající při zapnutí a vypnutí zdroje, pak odezva takového systému bude vždy opět harmonický signál o stejné frekvenci, přičemž jeho amplituda a fáze se může změnit. Informace o změně amplitudy a fáze mezi vstupem a výstupem jako funkce závislá na frekvenci se nazývá *frekvenční odezva* systému. Frekvenční odezva nám, stejně jako impulsní

odezva, dá vždy všechny informace o odezvě na jakýkoli vstupní signál. Frekvenční odezvu můžeme získat z impulsní odezvy pomocí *Fourierovy transformace*.

$H(\omega)$ je funkcí frekvenční odezvy získaná Fourierovou transformací impulsní odezvy $h(t)$ [9]:

$$H(\omega) = \mathcal{F}\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.29)$$

kde $j = \sqrt{-1}$

pozn.: předpokládá se, že $h(t) = 0$ pro $t < 0$, což bude platit pro fyzický kauzální systém – to je takový systém, v kterém můžeme celkem bezpečně předpokládat, že se ozve zvuk až poté, co udeříme například do činelu.

U *lineárního časově invariantního diskrétního systému* (LTI) se používá diskrétní Fourierova transformace, pomocí které získáme aproximované vzorky skutečného spektra a která má pro diskrétní signál tvar [26]:

$$H\left[k\frac{2\pi}{N}\right] = \sum_{n=0}^{N-1} h[n] \cdot e^{-jk\frac{2\pi}{N}n}, \quad (1.30)$$

kde n je index vzorku, N je počet vzorků, a $k = 0, 1, \dots, N-1$

1.3 Akustické parametry místností

Dlouhodobým výzkumem vztahů mezi hudbou, prostorem a sluchovým vjemem posluchače vznikla celá řada subjektivních a posléze i objektivních kritérií akustiky prostorů. Předmětem zájmu byly ovšem především velké sály určené k interpretaci artificiální hudby. Velké prostory komerčního charakteru, jako jsou stadiony, či tzv. arény jsou řešeny spíše instalací aktivních prvků ozvučení. Výzkum těchto prostor započal už před rokem 1970 Leo Leroy Beranek a výsledky spolu s doporučenými hodnotami parametrů publikoval [4]. Dnes je již literatury na toto téma relativně velké množství ale zdá se, že objektivní parametry vykazují stále ještě poměrně malou korelaci s parametry subjektivními, obzvláště u malých prostor [17].

Jak už to tak bývá, existuje snaha hodnotit kvalitu akustiky prostor, a to nejlépe pomocí poměrové škály. Zjišťováním kvantitativních vztahů mezi akustickými podněty a sluchovými vjemy, respektive vyšetřování veškerých účinků zvukových dějů na psychiku člověka se zabývá mezioborová vědní disciplína psychoakustika [23].

V této práci se zabývám parametry objektivními, které získám zpracováním dat z měření a simulací v projekčním softwaru. Snad je zřejmé, že objektivní kvalita akustického prostoru není v žádném případě určujícím parametrem pro subjektivní (a člověk je schopen pouze subjektivních) dojem z hudebního představení, podobně

tak jako objektivní kvalita záznamového média pro hudební signál zjevně není určujícím parametrem pro subjektivní dojem z poslechu reprodukované hudby. Nicméně definování těchto objektivních parametrů umožňuje pochopit za jakých podmínek hudba vzniká, a následně je pak například synteticky duplikovat v jiném fyzickém, či virtuálním prostoru.

1.3.1 Objektivní akustické parametry malých prostor

Akustika malého prostoru je charakteristická značným vlivem vlastních kmitů prostoru, které jsou dominantní na mnohem vyšších frekvencích než u velkých místností. Z tohoto důvodu nelze použít odhadů statistické akustiky. Nelze zanedbat jevy jako ohyb zvukových vln (difrakce) a tak nelze použít ani geometrickou akustiku. Navíc se brzké odrazy dostanou k přijímači v mnohem menším časovém odstupu od přímé vlny a celý systém odrazů je tak oproti větším místnostem časově komprimovaný. Kombinace všech těchto faktorů znemožňuje použití většiny objektivních akustických parametrů, běžně používaných pro velké místnosti.

Na velmi nízkých frekvencích se doba dozvuku značně liší v různých místech měřeného prostoru, a jeho jednotlivá měření znázorňují spíše jen některé dominantní módy, než průměr jejich většího počtu. Zdá se však, že ať už doba dozvuku reprezentuje přesný statistický průměr difúzního pole, či hrubější průměr lokálních dob dozvuku jde stále o platné měření, které úzce souvisí s různými poslechovými vjemy v místnosti [40].

Uvedu nyní částečný výčet objektivních akustických parametrů včetně několika nových, které dle testů lépe korelují se subjektivním hodnocením malých místností [40]. Existuje celá řada objektivních parametrů a ne všechny popisují takové vlastnosti prostoru, které přímo souvisí s kvalitou poslechu hudby. V některých případech nemají pro malé prostory fyzikální význam a tak dle tohoto hlediska jejich výčet omezím.

1.3.2 Časová a frekvenční kritéria

Doba dozvuku RT60 (*Reverberation time*)

Zvuk, který se díky odrazům od stěn a konečné rychlosti zvuku šíří prostorem po vypnutí zdroje zvuku, nazýváme *dozvuk*.

Základní charakteristikou, popisující vlastnosti uzavřených prostorů z hlediska prostorové akustiky, je *doba dozvuku*. Ta je ve statistické teorii definována jako doba, za kterou klesne hustota zvukové energie nebo intenzita po vypnutí zdroje zvuku na 10^{-6} (tj. o 60 dB) původní velikosti. K tomu dochází vlivem útlumu zvuku při šíření prostředím, zejména díky útlumu překážek. Protože je však činitel zvukové

pohltivosti materiálů kmitočtově závislý a protože na nízkých kmitočtech dochází k ohybu zvukového vlnění kolem menších překážek, je i doba dozvuku frekvenčně závislá. Tento fakt je zohledněn v nejspíše nejpoužívanějším, Eyringově vzorci pro její výpočet [24]:

$$T_d = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{str}}) + 4mV}, \quad (1.31)$$

kde T_d je doba dozvuku, V je objem místnosti, S je plocha místnosti, α_{str} je střední hodnota činitele zvukové pohltivosti stěn a konstanta m je činitel útlumu zvuku ve vzduchu (m) závislý na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu a na kmitočtu zvuku. Jeho hodnota se při teplotě 20 °C, atmosférickém tlaku 101,325 kPa a relativní vlhkosti vzduchu 10 % pohybuje od $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ na nízkých kmitočtech do $30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ na vyšších kmitočtech a s rostoucí vlhkostí rychle klesá [10]. Postup pro stanovení hodnoty konstanty m grafickou cestou podle Beranka je uveden například ve vynikající Příručce elektroakustiky [24].

Ukazuje se však [3], že zvláště pro velmi malé (vzhledem k operním sálům) místnosti nejsou běžně užívané standardní hodnoty koeficientů vhodné a například činitel zvukové pohltivosti (α) může v takovýchto případech nabývat hodnot i vyšších než 1.

Pro standardní dobu dozvuku, kde se jedná o pokles o 60 dB (viz 2.3) se používá značení RT_{60} . Pro měření takového poklesu by bylo třeba, aby hladina akustického tlaku před vypnutím zdroje byla o více než 60 dB vyšší než hladina hluku pozadí, což nelze vždy splnit. Proto norma předpokládá, že se vyhodnocuje doba poklesu hladiny akustického tlaku o 30 dB (označovaná RT_{30}) a poté se vypočítá její dvojnásobek.

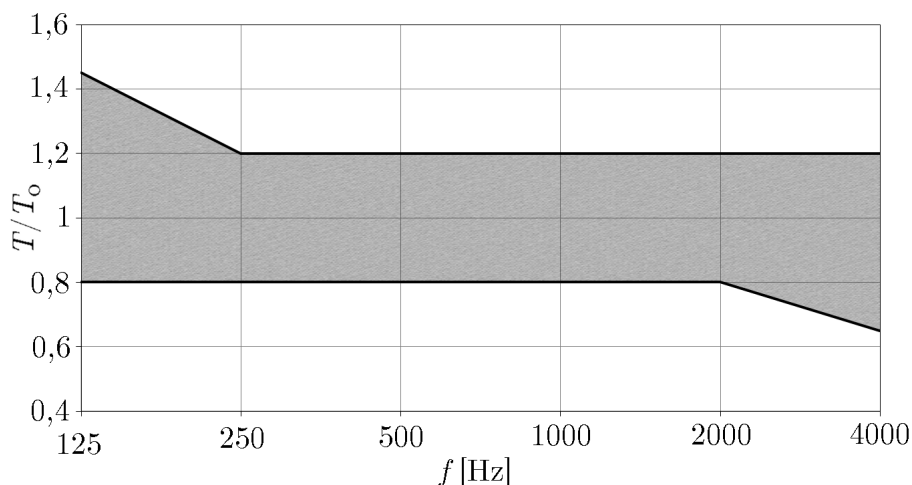
Doba dozvuku RT_{30} se používá nejčastěji, dalšími užívanými jsou doby dozvuku RT_{20} a RT_{10} (RT_{20} vyhodnocena z poklesu o 20 dB, RT_{10} vyhodnocena z poklesu o 10 dB).

Optimální doba dozvuku T_O

Pro velké místnosti je doba dozvuku považována za nejvýznačnější akustickou vlastnost hned po hlasitosti hluku pozadí a existuje řada doporučení pro doby dozvuku místností rozličných rozměrů a účelů [10].

V tabulkách doporučených hodnot však chybí kolonka „hudební klub“. Z tohoto hlediska se jako nejbližší informace jeví rozmezí hodnot 0,8 až 1,2 sekundy, uváděné jako „Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T_d / T_O obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby i řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma“ (viz obr 1.8), kde T_d je vypočítaná doba dozvuku a T_O je optimální doba dozvuku (T_O). Tyto požadavky jsou postaveny na subjektivním hodnocení hudební interpretace a srozumitelnosti mluveného slova a tato závislost je zde uvedena pouze pro ilustraci.

Zmíněná optimální doba dozvuku obsazeného prostoru pro kmitočet 1 kHz daného účelu se dle normy [10] uvádí stanovit pro objem prostoru, k němuž se dospěje na základě uvažovaného počtu účastníků a doporučeného objemu připadajícího na jednu osobu. Velikost prostoru pak vyplývá z dosažitelného akustického výkonu příslušného zdroje zvuku a tedy jeho schopnosti docílit v prostoru přijatelné hustoty zvukové energie.



Obr. 1.8: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T_d/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu *hudby i řeči*.

Je třeba uvést, že tabulka „Požadavky na prostory pro kulturní účely“, která je součástí citované normy počítá s objemy alespoň o řád vyššími, než jsou objemy malých prostor, a „optimální“ doba dozvuku malých prostor pro kulturní účely není nijak definována. V příloze přikládám tabulky s vybranými doporučenými hodnotami uvedenými v normách A.4.

Počáteční doba dozvuku EDT (*Early Decay Time*)

Hodnoty *EDT* nejlépe odpovídají subjektivnímu *vnímání doby dozvuku* prostoru. Jedno-číselně se vyjadřuje nejčastěji jako EDT_{mid} , což je průměr hodnot *EDT* v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz a získává se stejným způsobem jako RT_{60} , ovšem z pouze z počátečních 10-ti dB. V praxi se z důvodu lepší implementace algoritmizace pro její určení užívá interval -1 dB až -10 dB [38].

Doba dozvuku RT_{10}

U parametru RT_{10} se začíná na hladině -5 dB, kvůli odstranění jakýchkoli fluktuací a jako spodním limitem je hladina -15 dB. Spodní limit však musí být vždy alespoň

10 dB nad hladinou hluku pozadí, takže ve skutečnosti je k měření tohoto parametru potřeba dynamický rozsah celkem 25 dB [38].

Doba dozvuku RT_{20}

Hodnota RT_{20} se jednočíselně se vyjadřuje nejčastěji jako $RT_{20\text{mid,což}}$ je průměr hodnot v oktákových pásmech 500 Hz a 1 kHz a získává se stejným způsobem jako RT_{60} , ovšem z rozsahu -5 dB až -25 dB [38].

Doba dozvuku RT_{30}

Hodnota RT_{30} se získává z poklesu v rozahu -5 dB až -35 dB a jedná se o nej-používanější způsob vyhodnocování doby dozvuku. Jednočíselně se vyjadřuje jako $RT_{30\text{mid}}$ a jedná se o průměr hodnot v oktákových pásmech 500 Hz a 1 kHz [38].

Míra hlubokých tónů BR (*Bass Ratio*)

Je míra podpory hlubokých tónů doznívání sálu. Určí se z poměrů dob dozvuku v oktákových pásmech 125 a 250 Hz k době dozvuku v oktákových pásmech 500 a 1000 Hz [39]:

$$BR = \frac{RT_{60(125\text{ Hz})} + RT_{60(250\text{ Hz})}}{RT_{60(500\text{ Hz})} + RT_{60(1000\text{ Hz})}}, \quad (1.32)$$

kde $RT_{60(125\text{ Hz})}$ je doba dozvuku v oktákovém pásmu 125 Hz

$RT_{60(250\text{ Hz})}$ je doba dozvuku v oktákovém pásmu 250 Hz

$RT_{60(500\text{ Hz})}$ je doba dozvuku v oktákovém pásmu 500 Hz

$RT_{60(1000\text{ Hz})}$ je doba dozvuku v oktákovém pásmu 1000 Hz.

Uvádí se, že hodnoty BR by se měli blížit od shora 1, neměly by však klesnout pod tuto hodnotu.

Míra hlubokých tónů v malých místnostech SBR (*Small room Bass Ratio*)

Tato míra vykazuje lepší korelaci se subjektivními parametry „*Zvuková kvalita, Krabicovost a Dunivost (Sound Quality, Boxiness and Boominess)*“. Určí se z poměrů dob dozvuku v třetino-oktákových pásmech 63 a 80 Hz k době dozvuku v třetino-oktákových pásmech 250 a 315 Hz [40]:

$$SBR = 10 \log \left[\frac{RT_{30(63\text{ Hz})} + RT_{30(80\text{ Hz})}}{RT_{30(250\text{ Hz})} + RT_{30(315\text{ Hz})}} \right] \quad (1.33)$$

kde $RT_{30(63\text{Hz})}$ je doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 63 Hz
 $RT_{30(80\text{Hz})}$ je doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 80 Hz
 $RT_{30(250\text{Hz})}$ je doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 250 Hz
 $RT_{30(315\text{Hz})}$ je doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 315 Hz

Míra hlubokých tónů v počáteční době dozvuku v malých místnostech **SEBR** (*Small-room EDT bass ratio*)

Hodnota parametru se získá jako poměr počátečních dob dozvuku v třetino-oktávových pásmech [40]:

$$SEBR = 10 \log \left[\frac{EDT_{(80\text{Hz})} + EDT_{(100\text{Hz})}}{EDT_{(250\text{Hz})} + EDT_{(315\text{Hz})}} \right] \quad (1.34)$$

kde $EDT_{(80\text{Hz})}$ je střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 80 Hz
 $EDT_{(100\text{Hz})}$ je střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 100 Hz
 $EDT_{(250\text{Hz})}$ je střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 250 Hz
 $EDT_{(315\text{Hz})}$ je střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 315 Hz

1.3.3 Energetická kritéria

Tato kritéria vychází z energetických poměrů signálů pro definované časové úseky průběhů získané z impulsové odezvy prostoru.

Míra přímého zvuku C_7

Je definována poměrem energií přicházejících do 7 ms k energii od 7 ms a používá se k predikci síly (lokalizaci) přímého zvuku zdroje. Za přímý zvuk je považován takový, který dorazí od zdroje k přijímači do 5 ms [39]:

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{7\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7}, \quad (1.35)$$

kde E_t Jako hranice připouštějící dobrou lokalizaci zvuku se považuje hodnota -15 dB. Vyšší hodnoty značí lepší schopnost lokalizace.

Míra zřetelnosti C_{50} (*Speech Clarity*)

Udává akustické kritérium srozumitelnosti pro řeč. Je definována poměrem energie přicházející do 50 ms k energii přicházející po 50 ms a udává se v [dB] [39]:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \quad (1.36)$$

Každá hodnota nad 0 dB ve standardní místnosti ukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova. Hodnoty pod -5 dB ukazují na více odraznou místnost, než je vhodné pro přednes mluveného slova.

Míra jasnosti C_{80} (*Music Clarity*)

Udává akustické kritérium pro hudbu (v oktávovém pásmu 1000 Hz) a je definována 10-ti násobkem dekadického logaritmu poměru zvukové energie do 80 ms a po 80 ms [39]:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \quad (1.37)$$

V současné době představuje zatím nejlepší korelát poslechového atributu *vnímaná jasnost* popisující schopnost rozlišovat tóny v rychlých hudebních pasážích. Optimální hodnoty C_{80} silně záleží na hudebním žánru, obecně lze považovat za optimální hodnoty v rozmezí 1 ± 2 dB. Pro romantickou hudbu by měly ležet v rozsahu hodnot -2 dB až $+4$ dB, zatímco pro klasicistní a moderní hudbu je rozsah hodnot 0 dB až $+6$ dB. Podle [14] je hodnota maximální odchylky ΔC_{80} pro příslušný styl hudby rovna ± 3 dB. Bližší optimální hodnoty C_{80} jsou:

- 0 ± 2 dB je ideální pro varhanní hudbu nebo dechové nástroje při pomalejším tempu. Je ideální pro sály určené pro varhanní recitály.
- 2 ± 2 dB je ideální pro smyčcové nástroje a nejlépe je prezentována v sálech určených pro instrumentální hudbu, tempo hudby je rychlejší. Je vhodné pro sborový zpěv.
- 4 ± 2 dB je ideální pro drnkací a trscací nástroje, rychlejší tempo hudby. Vhodná pro folkovou a lehkou populární hudbu.

- 6 ± 2 dB je ideální pro hudbu nástrojů s perkusním průběhem, rock and roll a současnou moderní hudbu.
- Hodnota 8 dB a více by neměla být překročena v žádném místě.

Zřetelnost D_{50} (*Definition*)

Udává kritérium srozumitelnosti pro řeč. Hodnoty pod -5 dB ukazují na místnost nevhodnou pro přednes mluveného slova [39]:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}} \quad (1.38)$$

Hodnoty zřetelnosti D_{50} jsou svou hodnotou ekvivalentem parametru srozumitelnost řeči C_{50} , a lten lze definovat vztahem:

$$D_{50} = 10 \log \frac{10^{0,1} \cdot C_{50}}{1 + 10^{0,1} \cdot C_{50}} \quad (1.39)$$

Čas těžiště impulsové odezvy t_s (*Center Time*)

Tato veličina má vypovídající hodnotu prostorového dojmu a *vnímané jasnosti* pro hudbu a mluvené slovo. Je kmitočtově závislá a pro snažší porovnávání mezi jednotlivými prostory se uvádějí hodnoty v oktávových pásmech 500 Hz až 4 kHz. Pro hudbu jsou doporučovány hodnoty 70 až 150 ms v oktávovém pásmu se středním kmitočtem 1 kHz [39]:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{E_{\infty}} \quad (1.40)$$

Míra doznívání H (*Reverbarence measure*)

Míra doznívání popisuje dozvukový prostorový dojem hudebního výkonu. Můžeme vyjádřit vzájemnou souvislost mezi mírou doznívání H a mírou zřetelnosti C_{50} [39]:

$$H = -C_{50} \quad (1.41)$$

Síla zvuku G (*Strength of arriving energy*)

Udává míru hlasitosti v decibelech a nejvíce odpovídá subjektivnímu *vnímání úrovně hlasitosti* [39]:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{\infty}}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \quad (1.42)$$

Kde p je impulsová odezva prostoru, p_A je impulsová odezva snímaná ve volném poli v referenční vzdálenosti 10 m od všesměrového zdroje zvuku, t je čas a E_{∞} je zvuková energie během doby dozvuku.

Síla zvuku je však kmitočtově závislá a jednočíselný údaj míry hlasitosti je zcela nedostatečný. Pro snazší porovnávání mezi jednotlivými prostory se uvádí různé míry hlasitosti s indexy [39]:

- **L (low)** značí prostý průměr pro oktávová pásma se středními kmitočty 125 Hz a 250 Hz
- **M (mid)** značí prostý průměr pro oktávová pásma se středními kmitočty 500 Hz a 1000 Hz
- **H** značí prostý průměr pro oktávová pásma se středními kmitočty 500 Hz a 4000 Hz
- **W** integrační meze $t_1 = \infty$ a $t_2 = 80$ ms

$$G_{index} = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} p^2(t) dt}{\int_0^{t_2} p_A^2(t) dt} \quad (1.43)$$

Kde se jako optimální rozmezí pro G_M se uvádí +4,0 až +5,5 dB.

Pro rychlé zjištění hodnoty míry hlasitosti lze použít zjednodušený vztah [39]:

$$G_{zjedn} = 10 \log \left(\frac{RT_{60}}{V} + 45 \right) \quad (1.44)$$

Echo Criterion EK

Je parametr udávající podíl posluchačů v procentech, kteří jsou rušeni některým z odrazů. Vychází ze sledování průběhu náběhu času těžiště váženého kvadrátu im-

pulsové odezvy [39]. Pro řeč má váhový exponent $n = 0,67$ a pro hudbu $n = 1,00$.

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau |p^2(t)| t dt}{\int_0^\tau |p^2(t)| dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_\infty - E_{50}} \quad (1.45)$$

Echokritérium $EK(\tau)$ je potom definováno vztahem [39]:

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau_E} \quad (1.46)$$

kde pro řeč je $\Delta \tau_E = 9 \text{ ms}$ a $\Delta \tau_E = 14 \text{ ms}$ pro hudbu.

Meze pro takto definované kritérium jsou:

- pro řeč EK_{09} $EK_{10\%} > 0,9$ a $EK_{50\%} > 1,0$,
- pro hudbu EK_{14} $EK_{10\%} > 1,5$ a $EK_{50\%} > 1,8$.

Akustická podpora pódia *Stage Support Factor ST*

Akustická podpora pódia ST je definována jako poměr energií zvuku v intervalech 0 až 10 ms a 20 až 100 ms, vyjádřený v logaritmickém měřítku. Charakterizuje vzájemný přenos zvuku mezi hudebníky. Je určována z kvadrátu časového průběhu akustického tlaku $p^2(t)$ monaurální impulsové odezvy $p(t)$ snímané všesměrovým mikrofonem ve vzdálenosti 1 m od všesměrového zdroje jako [39]:

$$ST = 10 \log \frac{\int_{t_2}^{t_1} p^2(t) dt}{\int_0^{t_3} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{t1} - E_{t2}}{E_{t3}} \quad (1.47)$$

Rozlišujeme:

- ST_{early} (early support) $t_1 = 100 \text{ ms}$, $t_2 = 20 \text{ ms}$, $t_3 = 10 \text{ ms}$,
- ST_{late} (late support) $t_1 = 1000 \text{ ms}$, $t_2 = 100 \text{ ms}$, $t_3 = 10 \text{ ms}$,
- ST_{total} (total support) $t_1 = 1000 \text{ ms}$, $t_2 = 20 \text{ ms}$, $t_3 = 10 \text{ ms}$.

1.3.4 Další kritéria

Existuje řada dalších parametrů, které z různých důvodů nebylo možné změřit jako například *Initial Time Delay Gap* ve středu podélné osy pódia, *Texture* porovnávací

impulsové odezvy vysoce hodnocených sálů, nebo *Lateral Energy Fraction* získávaný pomocí „bi-directional“ mikrofonů apod.

Činitel interaurální vzájemné korelace (**InterAural cross Correlation Coefficient**)

Proces slyšení je binaurální. Tato charakteristika vypovídá o tom, do jaké míry se navzájem liší akustické signály přicházející k jednotlivým uším posluchače a je jí tedy potřeba měřit pomocí buď umělé, nebo skutečné hlavy. Dle [7] je možné použít skutečnou hlavu, pokud s její pomocí změřené hodnoty IACC korelují s hodnotami IACC umělé hlavy s hodnotou koeficientu $r = 0,85$, nebo lépe. Činitel IACC je kmitočtově závislý, uvádí se v oktávových pásmech a pro jeho výpočet se používá integračních hodnot od 0, 80 a 1000 ms. Dobře koreluje se subjektivním vjemem *prostorovosti zvuku* – čím menší je jeho hodnota, tím větší je vnímaná prostorovost [39]:

Normalizovaná funkce interaurální vzájemné korelace ($IACF_{t_1,t_2}(\tau)$) je definována vzorcem [39]:

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, \quad (1.48)$$

kde p_l je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a p_r je impulsová odezva na vstupu do pravého ušního kanálu.

Činitel interaurální vzájemné korelace ($IACC_{t_1,t_2}$) je pak dán rovnicí [39]:

$$IACC_{t_1,t_2} = \max |IACF_{t_1,t_2}(\tau)| \quad (1.49)$$

kde $-1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}$. Hodnota 1 získaná z $1 - IACC_{t_1,t_2}$ pro $t_1 = 0 \text{ ms}$ a $t_2 = 80 \text{ ms}$ odpovídá maximálně difuznímu zvukovému poli.

Naneštěstí jsem neměl k dispozici přípravek odpovídající umělé hlavě a měření parametru $IACF_{t_1,t_2}(\tau)$ tak nemohlo proběhnout.

Koeficient difuzity povrchů (*Surface Diffusivity Index*) SDI

Tato charakteristika se jako jediná nevyhodnocuje z dat získaných akustickým měřením. Stanoví se na základě tvarování a materiálového složení bočních stěn a stropu

prostoru. Každému stupni rozptylnosti je přiřazen váhový koeficient: „vysoce rozptylné“ = 1, „středně rozptylné“ = 0,5, „nízká rozptylnost“ = 0. Součet takto váhovaných ploch je následně vydělen úhrnnou plochou stropu a obou bočních stěn. Hodnoty rozptylnosti povrchu úzce korelují se stupněm difuzivity a mohou tak být jeho mírou [38].

2 MĚŘENÍ PROSTOR A ZPRACOVÁNÍ DAT

2.1 Metoda integrované impulsové odezvy

K měření impulsových charakteristik prostorů bude použita metoda integrované impulsové odezvy s logaritmicky přeladovaným sinusovým signálem (ISO 18233-SS) dle platné normy [9].

2.1.1 Popis metody

Doba dozvuku souvisí s odrazy v uzavřeném prostoru, a proto lze předpokládat, že bude souviset i s odezvou na Diracův impuls. Tuto myšlenku rozvinul Schröder v šedesátých letech minulého století a zavedl další definici doby dozvuku vypočtené na základě impulsové odezvy. Je-li uzavřený prostor vybuzen akustickým Diracovým impulsem, potom z časového průběhu akustického tlaku p (impulsové odezvy) v daném bodě určíme pokles energie dozvuku E_t podle vztahu [8]:

$$E = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau . \quad (2.1)$$

Zavedeme-li označení

$$E_t = \int_0^{infty} p^2(\tau) d\tau , \quad (2.2)$$

můžeme pro pokles hladiny akustického tlaku odpovídající poklesu energie dozvuku odvodit vztah 2.4, přičemž předpokládáme, že vybuzenému stavu odpovídá hladina 0 dB.

Doba dozvuku je potom určena přímkou se směrnici b , proloženou *dozvukovým poklesem* $D(t)$ (známým také jako „Schröderův integrál“) v úseku mezi hladinami $D = -5$ dB až $D = -65$ dB s tou podmínkou, že dolní hladina musí být minimálně 10 dB nad úrovní hladiny hluku pozadí [31]:

$$RT_{60} = \frac{-60}{b} \quad (2.3)$$

Dozvukový pokles $D(t)$ je definován takto [31]:

$$D(t) = 10 \log \left(1 - \frac{E_t}{E_{\infty}} \right) \quad (2.4)$$

Realizace dostatečně úzkého a zároveň vysokého akustického impulsu je v praxi obtížná. Jako jeho aproximace se často používají výstřely ze signální pistole. Spektrum takových impulsů je tím plošší, čím je impuls užší. Lze ale využít i jiné signály a impulsovou charakteristiku prostoru lze potom získat dekorelací změřené odezvy a budicího signálu. Požadavkem ovšem je, aby měl budicí signál co nejplošší spektrum, dostatečnou energii, aby byl málo náchylný na zkreslení v reprodukčním řetězci (zejména v reproduktorové soustavě) a byl pokud možno deterministický. Používají se přeladované harmonické signály, bílý a růžový šum nebo signál MLS (Maximum Length Sequence).

Z takto změřené impulsové odezvy lze pomocí rovnice 2.4 získat graf poklesu energie dozvuku a pomocí číslicové filtrace i grafy pro jednotlivá oktávová resp. třetino-oktávová pásma [31].

2.1.2 Požadavky na měření

Tato podsekcce přebírá informace z norem ČSN EN ISO 3382-1 [7], ČSN EN ISO 3382-2 [8] a ČSN EN ISO 18233 [9].

Směrnost zdroje i počet poloh zdroje odpovídá požadavkům v klasické metodě [9]. Pro tzv. *inženýrskou metodu* to znamená minimálně 6 kombinací zdroj – mikrofon, alespoň 2 různé pozice zdroje a 2 různé pozice mikrofonu. Zdroj by měl být co nejvíce všesměrový, přičemž u inženýrské metody nejsou žádné specifické požadavky na směrnost zdroje [8].

Teoreticky odpovídá integrovaná impulsová odezva průměrování nekonečného počtu buzení přerušovaného šumu [12]. V praxi lze při vyhodnocování nejistoty měření u metody integrované impulsové odezvy uvažovat, že je stejného řádu jako při použití průměru $n = 10$ měření v každém místě pomocí metody přerušovaného šumu. Není tak nutné žádné dodatečné průměrování, aby se zvýšila statistická přesnost měření pro každé místo.

Výsledky, změřené pro skupinu míst zdroje a mikrofonu, mohou být při určování prostorových průměrů kombinovány buď pro oddělené zvolené oblasti, nebo pro uzavřený prostor jako celek. Prostorového průměrování se dosáhne aritmetickým průměrováním dob dozvuku. Prostorový průměr je dán střední hodnotou jednotlivých dob dozvuku pro všechna nezávislá místa zdroje a mikrofonu. Lze určit směrodatnou odchylku a získat tak míru přesnosti a prostorového rozptylu doby dozvuku.

V malých místnostech jako jsou obytné místnosti nebo když žádné obvyklé pozice pro umístění přípravků neexistují, mělo by být jedno místo zdroje v rohu místnosti. Mikrofonní místa by měla být od sebe vzdálena pokud možno nejméně na polovinu vlnové délky, tj. na minimální vzdálenost kolem 2 m pro obvyklý kmitočtový rozsah.

Vzdálenost kteréhokoliv místa mikrofonu k nejbližšímu odrazujícímu povrchu, včetně podlahy, by měla být pokud možno alespoň čtvrtina vlnové délky, tj. normálně kolem 1 m. Symetrické pozice by se měly vyloučit.

Po měření logaritmicky přeladovaným sinusovým signálem je požadována doba ticha, běžně daná dobou dozvuku vyšších frekvencí. Je třeba zajistit dostatečnou sílu budícího signálu k získání dostatečného odstupu signálu od šumu, daného mezinárodním standardem.

Reproduktory jsou nelineárním prvkem, který zkresluje signál s mírou zvětšující se s jejich vybuzením, což je v rozporu s požadavky na měřící metodu. Je třeba experimentovat při měření s mírou vybuzení, aby se dosáhlo co největšího odstupu signálu od šumu. Metoda přeladovaného sinu umožňuje při správném provedení eliminovat artefakty způsobené harmonickým zkreslením.

2.1.3 Měřené pozice

Pozice zdrojů zvuku a mikrofonů byly voleny tak, aby simulovaly skutečné pozice aktivního ozvučení klubů, zvukového aparátu, interpretů, posluchačů a zvukového technika. Takto by mělo být možno dosáhnout vypovídajících výsledků.

Pro zdroj to byly:

- mimo jiné střed místnosti, dle požadavků klasické metody
- pozice středovýškového reproduktoru, pod kterým je běžně umístěn subwoofer (liší se dle jednotlivých klubů)
- typická pozice zvukového aparátu kytaristy

Pro mikrofon to byly:

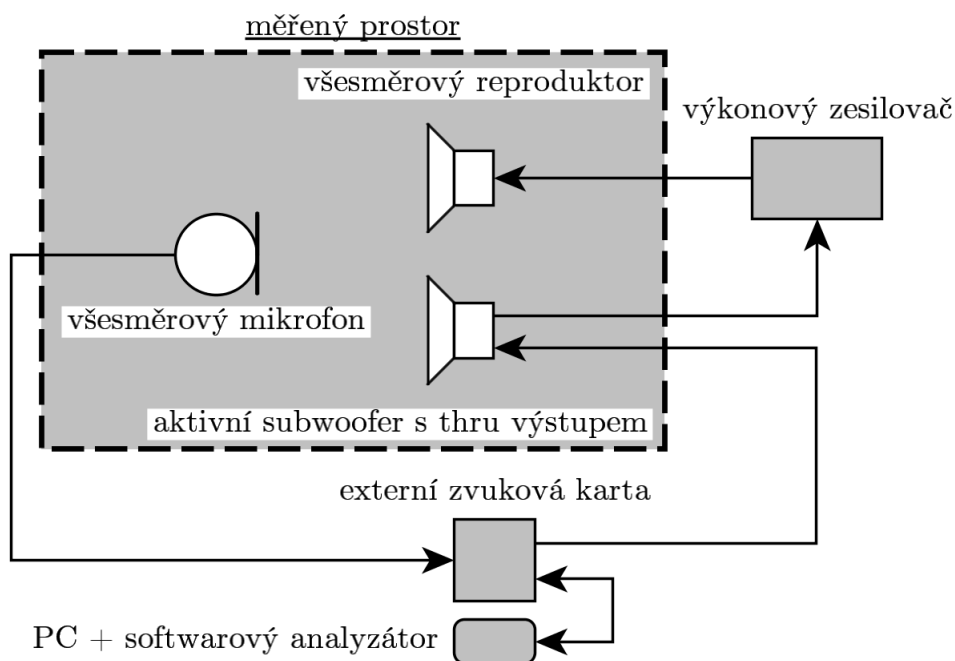
- různé pozice posluchačů
- typická pozice zvukového technika (liší se dle jednotlivých klubů)
- pozice na stage:
 - * zpěvák/kytarista v čele stage
 - * kytarista u zdroje kytarového aparátu
 - * basista / další kytarista
 - * bubeník

Seznam všech poloh zdroje a mikrofonu a jejich souřadnice v měřeném prostoru spolu s odpovídajícím označením souboru impulsní odezvy je uveden v externí příloze „Seznam_pozic_mereni.pdf“.

2.2 Měřicí řetězec

Nároky na měřicí řetězec byly popsány v minulých kapitolách. Zde uvedu jeho blokové schéma a výčet jeho jednotlivých prvků:

- *všesměrový mikrofon* NTi M2010
- *externí zvuková karta* MOTU Audio Express
- *aktivní subwoofer* Event 20/20 S250
- *výkonový zesilovač* Bittner Basic 800
- *všesměrový reproduktor* SLM DH2 model 600W, 12 Ω
- *PC* osobní počítač Acer E3-111 s Windows 7 x64
- *softwarový analyzátor* EASERA verze PRO 1.1.3



Obr. 2.1: Blokové schéma měřícího řetězce.

Jednotlivé změřené impulsní odezvy byly zaznamenány ve formátu PCM wav, při rozlišení 16bit/96 kHz.

2.2.1 Kompenzace vlastností měřícího řetězce

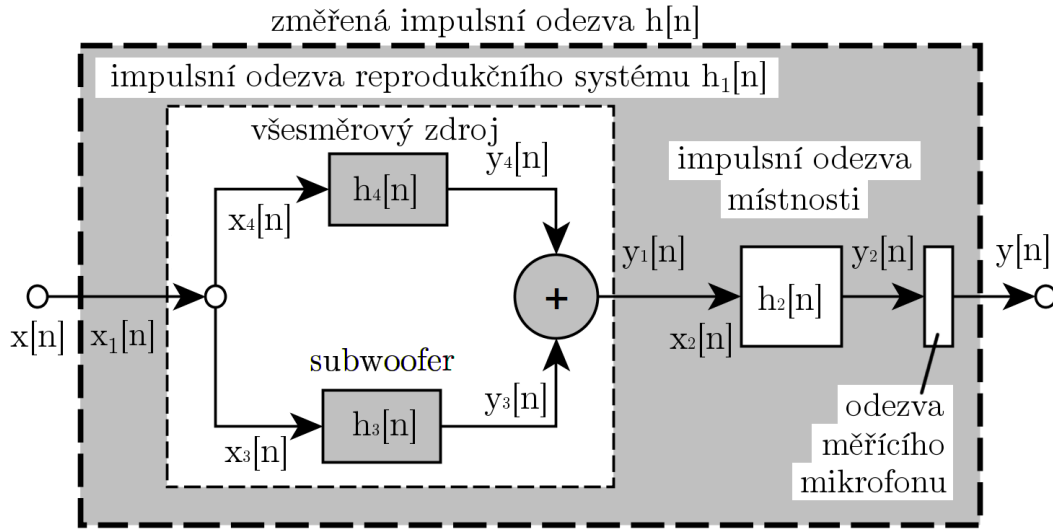
Změřená impulsová odezva by teoreticky měla obsahovat všechny informace potřebné k charakterizaci místnosti jako filtru mezi zdrojem zvuku a přijímačem, pokud nedošlo k nelineárnímu zkreslení.

Komplexní funkce frekvenční odezvy lze získat přímou dekonvolucí, což obnáší konvoluci přijatého signálu s invertovaným budícím signálem, či dělením spektrální

funkce odezvy spektrální funkcí budícího signálu [35].

$$h[n] = y[n] *^{-1} x[n] \quad (2.5)$$

Nicméně, reálné prvky řetězce nejsou ideálně lineární. Mají svou vlastní impulsní charakteristiku a působí tedy také jako filtr a můžou výsledky měření zkreslit. Toto je třeba při zpracování dat zohlednit. Uvedené blokové schéma popisuje řetězec použitý při měření:



Obr. 2.2: Blokové schéma LTI systému měřicího řetězce.

Pro uvedené sériovo-paralelní spojení několika dílčích LTI systémů platí tyto vztahy impulsních odezvy jednotlivých prvků řetězce [35]:

$$h[n] = h_1[n] * h_2[n] \quad , \quad h_1[n] = h_3[n] + h_4[n] . \quad (2.6, 2.7)$$

Vliv impulsní charakteristiky měřicího všesměrového mikrofónu lze díky jeho vlastnostem zanedbat a nebude na ni brán zřetel.

Konvoluci impulsních odezvy odpovídá po transformaci na frekvenční odezvy prosté násobení. Platí-li $h[n] \Leftrightarrow H[k]$, potom frekvenční charakteristiku místnosti získáme, po použití jednostranné transformace \mathcal{Z} , pomocí vztahu [35]:

$$H[k] = \frac{Y[k]}{X[k]} = H_1[k] \cdot H_2[k] = H_3[k] \cdot H_2[k] + H_4[k] \cdot H_2[k] \quad (2.8)$$

po úpravě:

$$H_2[k] = \frac{H[k]}{H_3[k] + H_4[k]} \quad (2.9)$$

2.2.2 Charakteristiky prvků řetězce

K získání charakteristik jednotlivých prvků je třeba provést měření jejich impulsních odezev, pokud je nemůžeme považovat za lineární. Podmínka linearity je splněna u měřícího mikrofону, a digitálního záznamového systému (požadavky dle [7]) dále je zanedbána charakteristika výkonového zesilovače, budícího všesměrový zdroj.

Prostory hudebních klubů byly před vlastním měřením vždy upraveny do podoby typické pro koncert – rozmístění vybavení a nábytku odpovídalo provozu při hudební produkci. To bude mít zajisté vliv na získanou charakteristiku, která by tak měla být autentická. Bude provedeno srovnání s charakteristikou získanou simulací.

Všesměrový zdroj zvuku

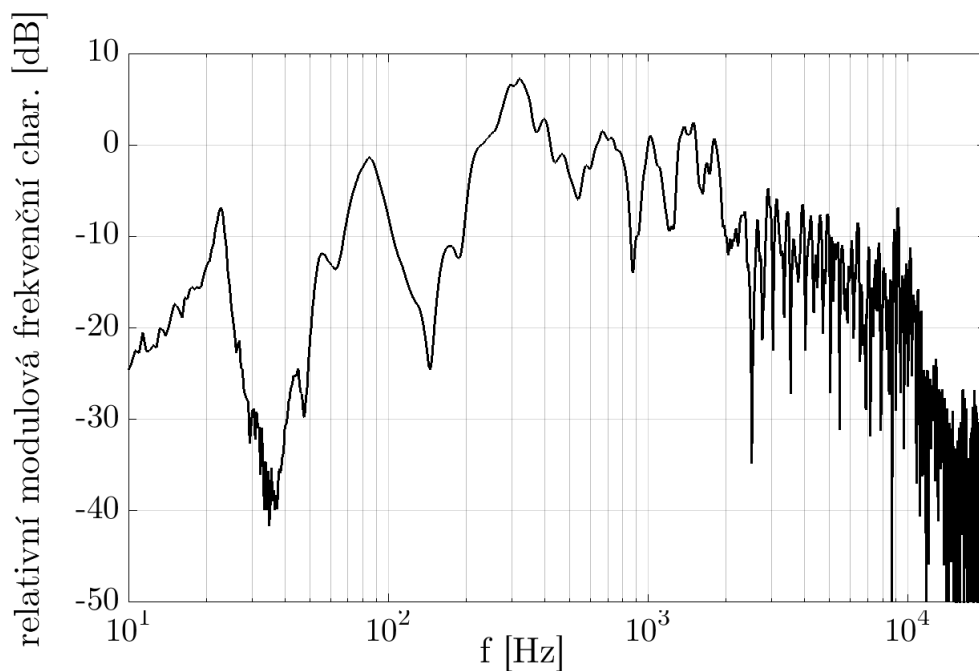
Frekvenční charakteristika všesměrového zdroje byla změřena v bezodrazové komoře laboratoře Elektroakustiky a Studiové a hudební elektroniky dne 30.9.2015. Výsledek měření je aritmetickým průměrem celkem 9-ti měření ve třech různých výškových rovinách a třech stejných úhlech natočení zdroje. Půdorysné kvadranty zdroje jsou osově symetrické a stačilo tedy zprůměrovat jen jeden z nich. Tímto byla kompenzována jeho větší směrovost na vyšších frekvencích. Výsledkem měření je soubor s impulsní odezvou připravený pro dekonvoluci se souborem s naměřenými impulsními odezvami. Graf relativní modulové frekvenční charakteristiky je uveden na obrázku 2.3. Hodnoty amplitudy jsou relativní k hodnotě v 1 kHz a na grafu lze sledovat nedostatků zdroje při frekvencích pod cca 200 Hz. Měřící komora má kritický kmitočet cca 100 Hz a hodnoty nacházející se pod ním jsou tedy neplatné.

Měření bylo provedeno pomocí metody integrované impulsní odezvy. Byly provedeny dvě varianty a to pomocí přeladovaného harmonického signálu a pomocí různového šumu. Zde uvádím pro zajímavost graf s normalizovanou modulovou frekvenční charakteristikou rozdílů výsledků těchto měření 2.4. Obě měření byla provedena za naprosto stejných podmínek. Pro dekonvoluci byla vždy použita charakteristika získaná za pomoci přeladovaného harmonického signálu.

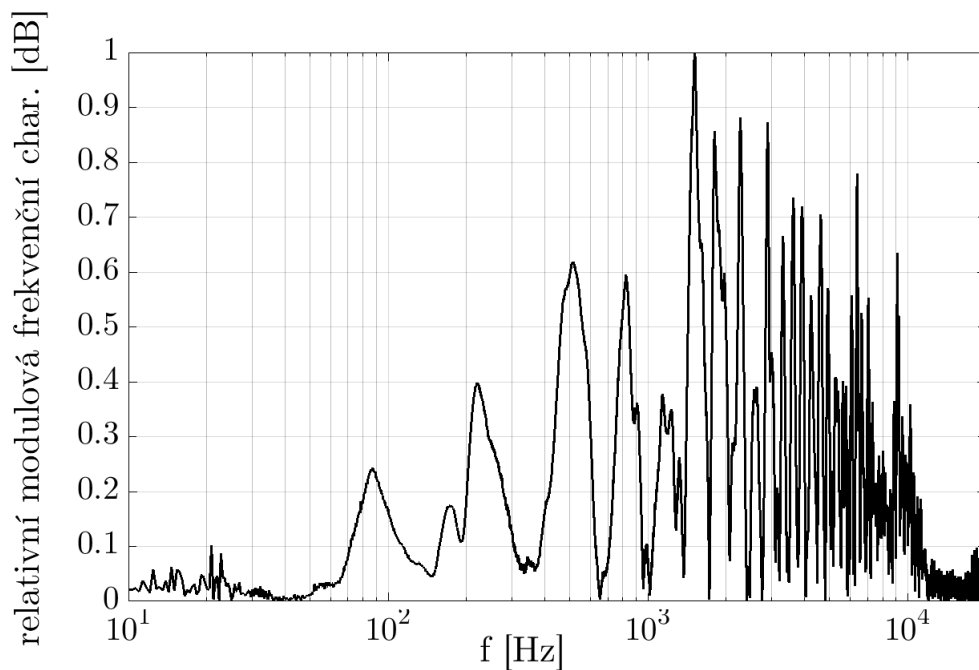
Všechny soubory z měření a zpracování v Matlabu jsou součástí přílohy na DVD, elektronická verze má přiloženy pouze nezbytně nutné soubory.

Subwoofer

Měření subwooferu zatím nebylo kvůli organizačním důvodům provedeno. Jeho odezvu je potřeba měřit nejlépe ve volném poli, což předpokládá využití lokality typu sportovního stadionu Centra Sportovních Aktivit Vysokého Učení Technického v Brně. Měření bude provedeno stejnou metodou jako u všesměrového zdroje, a stejným způsobem bude připraven soubor pro kompenzaci, ale nebude průměrován.



Obr. 2.3: Frekvenční charakteristika všesměrového zdroje (průměrovaná), získaná měřením pomocí přeladovaného harmonického signálu.



Obr. 2.4: Normalizovaná modulová frekvenční charakteristika rozdílu měření.

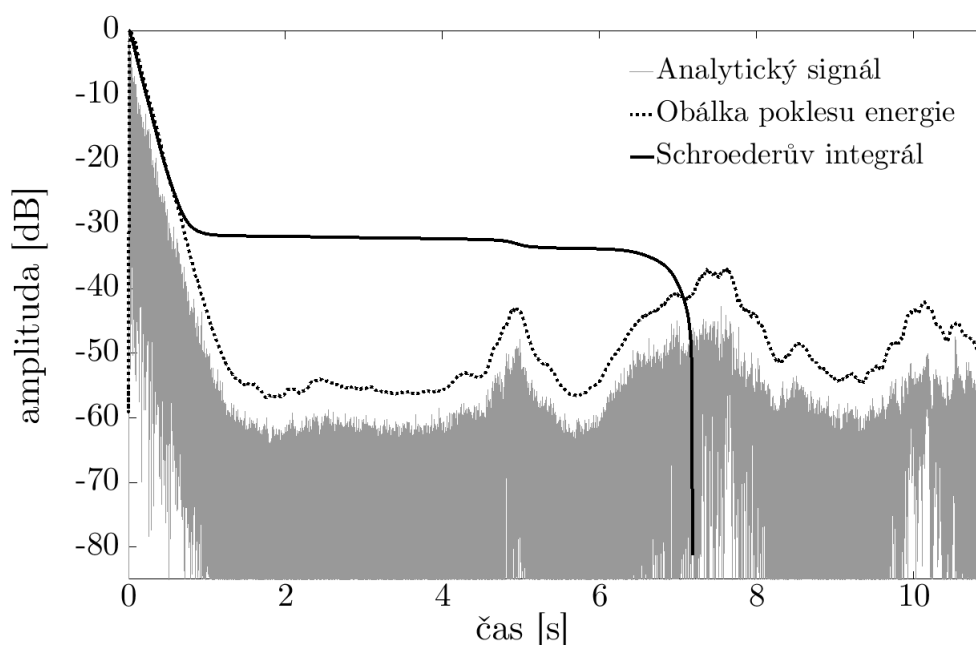
2.3 Zpracování dat

2.3.1 Kontrola naměřených dat

Nelineární zkreslení

V naprosto všech změřených odezvách se objevilo nelineární zkreslení, což jsem zjistil naneštěstí až při pokusu o jejich hromadné zpracování.

To lze rozeznat tak, že jsou po vykreslení analytického signálu impulzní odezvy na jeho konci viditelné artefakty. Obrázek 2.5 jedné ze změřených odezev toto ilustruje. Lze na něm sledovat pokles energie dozvuku nořící se v čase přibližně 1, 3 s do hladiny okolního hluku.



Obr. 2.5: Pokles energie nekompensované impulzní odezvy malého prostoru.

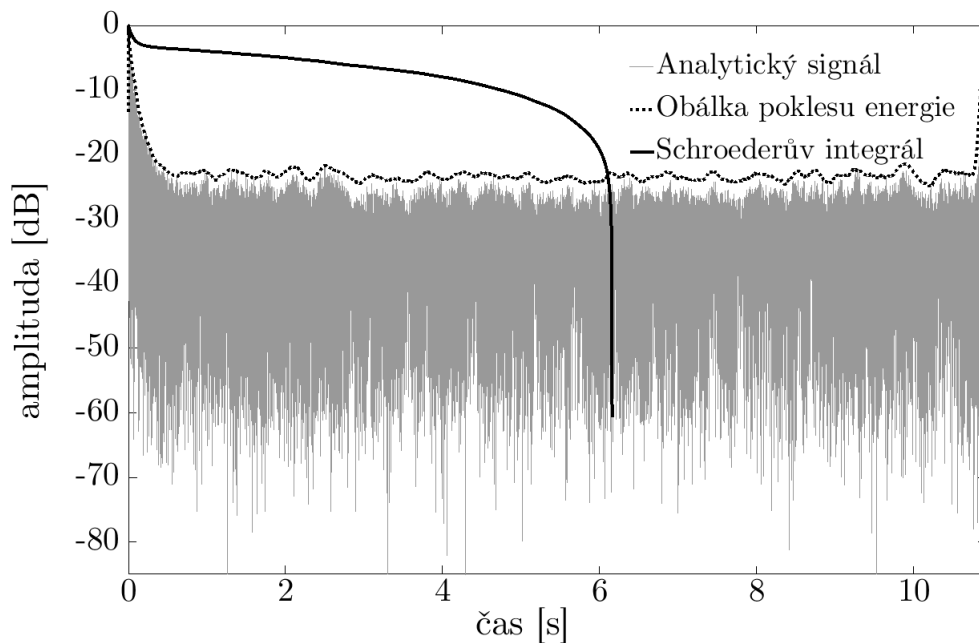
Takováto odezva poukazuje na nesprávně provedené měření. Nelineární zkreslení typicky vzniká především při přebuzení reproduktoru. Artefakty jsou viditelné na odezvách měřených s využitím subwooferu i bez něj a subwoofer tedy jako zdroj zkreslení mohou vyloučit. Při měření jsem experimentoval s mírou vybuzení a sledoval indikátory přebuzení na zvukové kartě a indikaci přebuzení v měřícím softwaru (dle [1]) a mohu tak vyloučit i přebuzení mikrofonu. Dostatečně vybuzený všesměrový reproduktor přehrával signál s takovou hlasitostí, že vedle něj šlo bez problémů stát bez ochranných sluchových pomůcek. Odvážuji se tvrdit, že hladina akustického tlaku nepřesáhla v 1 m od zdroje 95 dB a byť to nemohu tvrdit zcela jistě, tak ani ten nepovažuji za zdroj zkreslení. Při zpětném prohlížení charakteristik impulsních

odezvy, jejichž zobrazení generoval měřicí software a které jsem ukládal, jsem však u některých zaznamenal indikované hodnoty akustického tlaku až 140 dB(!). Tento fakt může poukazovat na nesprávné nastavení softwaru, ke kterému teoreticky mohlo dojít. Veškeré soubory z měření jsou součástí externích příloh na DVD.

Zarušení při dekonvoluci

Při kompenzaci charakteristik prvků měřicího řetězce jsem se střetl s dalším problémem. Přímá dekonvoluce reálných zvukových signálů je problematická pro hodnoty amplitud koeficientů spektra, které mají malý odstup od šumu. Matice se může stát nestabilní a doba výpočtu se pak začíná blížit nekonečnu. Dekonvoluce se obecně chová jako filtr horní propusti, a zvětšuje úroveň šumu.

Na obrázku 2.6 je charakteristika odezvy z obrázku 2.5 po kompenzaci. Když



Obr. 2.6: Pokles energie kompenzované impulsní odezvy malého prostoru.

provedu „rychlou Fourierovu transformaci“ (FFT) změřené odezvy prostoru a všesměrového zdroje a následně provedu dělení ve spektrální oblasti a výsledek převedu nazpět za pomoci zpětné Fourierovy transformace, pak vlastně provádím „kruhovou konvoluci“. Zde dochází k tzv. „prosakování spektra (leakage)“, kdy konečný počet členů algoritmu zkrátí délku skutečného signálu a část spektrálních složek prosákne na začátek filtrovaného vektoru. Ještě větším problémem se však ukázalo, že mnou změřená impulsní odezva všesměrového zdroje naneštěstí není dlouhá stejně jako odezvy prostorů. K dělení ve spektrální oblasti musí mít vektory stejnou délku a po

prodloužení kratšího vektoru, kterým je potřeba dělit a doplněním vzorků nulami jsem získal velmi zarušenou odezvu, z které pak nelze vypočítávat žádné parametry.

K odstranění tohoto rušení jsem se pokusil použít filtru dolní propusti s nulovým fázovým posunem, což šum snížilo jen o několik decibel a vytvoření např. Gaussovského hladicího filtru je již mimo rámec této práce a mých současných schopností.

2.3.2 Postup při zpracování signálů

Při algoritimizaci výpočtu akustických parametrů jsem postupoval dle doporučení norem [8] a [11] a použil jsem i veřejně dostupný kód stažený z oficiálních webových stránek výrobce programu Matlab.

Nejdříve je potřeba získanou impulsní odezvu dle potřeby filtrovat, pokud možno filtrem s nulovým fázovým posunem, nicméně na většinu výpočtů postačí i Butterworthův, a to třetího řádu. Každopádně ten by mohl působit problémy u frekvencí pod kmitočtem 125 Hz.

Dále je třeba co nejvíce odezvu před převodem do logaritmického měřítko vyhladit. K tomu se používá Hilbertova Transformace, jejíž pomocí se vytvoří tzv. analytický signál, který je vlastně amplitudovou obálkou. V Matlabu je zabudována funkce `abs(hilbert(h))` která nám práci usnadní.

Dále pak pokračujeme v hlazení odezvy, a to klouzavým průměrovacím filtrem, což je filtr dolní propust s frekvenční odezvou [25]:

$$H(f) = \frac{\sin(\pi f M)}{M \sin(\pi f)}, \quad (2.10)$$

kde M je délka ve vzorcích. Pro vzorkovací frekvenci 96 kHz jsem použil velikost $M = 15001$. V Matlabu slouží pro návrh filtrů pomůcka `fdatool`.

Po vyhlazení, převedení na decibely a v logaritmickém měřítku pak mluvíme o obálce poklesu energie E_t :

$$E(t) = 20 \log \left(\frac{A(t)}{\max A(t)} \right), \quad (2.11)$$

kde $A(t)$ je analytický signál.

Pro další výpočty se obálka ještě více vyhladí pomocí tzv. „Schröderovy metody zpětné integrace“, která lze z výše uvedeného vztahu 2.4 vyjádřit takto:

$$D(t) = 10 \log \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} p^2(\tau) d\tau}{\int_0^t p^2(\tau) d\tau} \right). \quad (2.12)$$

v Matlabu lze vztah 2.12 zapsat jako $L(\tau d:-1:1)=(\text{cumsum}(hA(\tau d:-1:1)))/\text{sum}(hA(1:\tau d))$; . Hodnota τd je integrační mez a má zde význam konce vektoru. V podstatě jde o to získat vektor o rozměrech od počátku odezvy až do doby dozvuku, přičemž hodnoty reprezentují přímku klesající od 0 po -60 dB. Nesprávně zvolená hodnota křivku zalomí buď příliš brzo, nebo jako v případě obrázku 2.5 příliš pozdě.

Metod pro odhad integrační meze Schröderova integrálu je celá řada ([18]), a jako nejlehčí na implementaci se označuje *Lundebjho metoda* [22]. Tu jsem vybral i pro svoji práci, ovšem nakonec se ukázalo, že to nebyla nejlepší volba z toho důvodu, že je její výpočet značně závislý na hladině šumu v odezvě, což je v mém případě velmi nežádoucí. Integrační mez pro Schröderovu křivku určím graficky.

Pro výpočty dob dozvuku je zásadní směrnice křivky poklesu. Tu získám pomocí lineární regrese z vektoru

Algoritmizovat výpočet samotných parametrů není, za předpokladu dobře změřené impulsní odezvy, zas takový problém. V přílohách jsou soubory s výpočty parametrů.

3 ZÁVĚR

Zpracoval jsem přehled současného stavu teoretického řešení měření akustických parametrů malých prostorů na základě přístupné literatury. Během října a listopadu roku 2015 jsem provedl celkem 113 měření impulsové odezvy v sedmi různých hudebních klubech v Brně. Měřením jsem strávil celkem šest pracovních dní. Provedl jsem během tří dní měření součinitele pohltivosti amatéry hojně používaného prvku - plat od vajec, který teď bude veřejně dostupný. Změřil jsem a v softwaru Matlab zpracoval frekvenční charakteristiku všesměrového zdroje pro kompenzaci měřených hodnot. Vytvořil jsem v prostředí Matlab funkce pro výpočet objektivních akustických parametrů malých prostorů.

Měření akustiky obecně je dnes už poměrně dobře prozkoumaná oblast. Malé prostory však stále představují neznámou. Odborná literatura pojednává o malých prostorech speciálně upravovaných a určených pro jen velmi malý počet posluchačů a pro nedostatek financí není o malé hudební kluby odborný zájem.

Specifika malých prostor si vyžadují zvláštní pozornost, protože jde o zdaleka nejsložitější akustické prostory. Většina běžně používaných postupů zde nelze použít a je nutno vytvořit dodatečné pomůcky pro jejich posuzování. Řešení těchto problémů zatím existují spíše jako vědecké zprávy, než v praxi běžné prostředky a postupy. Pro dosažení mého záměru vytvoření odborného dokumentu popisující akustiku malých hudebních klubů jsou tedy potřeba hlubší odborné znalosti. Audio inženýrství je koneckonců meziobor a tomu odpovídá široká paleta potřebných schopností od hudebních věd až po zpracování signálů.

Tato práce tedy bude sloužit spíše jako úvod do problematiky a pro skutečný přínos je potřeba ji značně rozšířit. Jednou by snad mohla sloužit jako teoretická část malé publikace.

LITERATURA

- [1] AFMG Technologies GmbH. *EASERA Tutorial*. User's manual, Berlin, October 2012. Web. Dostupné z URL: <http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/EASERA12/EASERATutorial_EN.pdf>.
- [2] BERANEK, Leo and MELLOW, Tim (Eds.) *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-391421-7.
- [3] BERANEK, Leo. *Concert Hall Acoustics-2008**. Journal of the Audio Engineering Society, 56(7-8), July-August 2008, s. 532-544. Dostupné z URL: <http://www.aes.org/journal/online/JAES_V56/jaes.cfm?file=JAES_V56_7_8/JAES_V56_7_8_PG532hirez.pdf>.
- [4] BERANEK, Leo. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Springer, NY: Springer, 2nd edition, 2004. ISBN 0-387-95524-0.
- [5] BYRNE, David. *How Architecture Helped Music Evolve*. TED Talks. TED, Feb. 2010. Web. Dostupné z URL: <https://www.ted.com/talks/david_byrne_how_architecture_helped_music_evolve>.
- [6] ČSN 01 1600 *Akustika – Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [7] ČSN EN ISO 3382-1 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 20 s.
- [8] ČSN EN ISO 3382-2 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 20 s.
- [9] ČSN EN ISO 18233 *Akustika – Aplikace nových akustických metod měření stavebních konstrukcí, v budovách a v místnostech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [10] ČSN 73 0527 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. Česká technická norma, Český normalizační institut, březen 2005.
- [11] ČSN EN 61260 *Elektroakustika – Oktávové a zlomkooktávové filtry*. Česká technická norma, Český normalizační institut, červenec 1997. 20 s.

- [12] EVEREST, Frederick Alton and POHLMAN, Ken C. *Master handbook of acoustics*. 6th ed. McGraw-Hill Education, 2014. 622 s. ISBN 978-0-07-184104-7.
- [13] HALLIDAY, David, WALKER, Jearl a RESNICK, Robert. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 5 sv. ISBN 80-214-1868-0.
- [14] HOEHNE, R., SCHROTH, G. *Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersalen*. *Acustica* 81, 1995, pp. 309–319.
- [15] HRÁDEK, Tomáš. a TUČEK, Jan. *Katalog akustických prvků*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2011. 147 s. ISBN 978-80-7331-316-6.
- [16] KAŇKA, Jan. *Akustika staveb – Konstrukce na pohlcování zvuku*. Hodnoty činitele pohltivosti zvuku α vybraných povrchů a konstrukcí Dostupné z URL: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/228-konstrukce-na-pohlcovani-zvuku>.
- [17] KAPLANIS, N. and BECH, S. and JENSEN, S.H. and van WATERSCHOOT, T. *Perception of Reverberation in Small Rooms: A Literature Study*. Audio Engineering Society Conference: 55th International Conference: Spatial Audio, August 2014, Web. Dostupné z URL: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17348>.
- [18] KARJALAINEN, M. and ANTSALO, p. and MÄKIVIRTA, A. and PELTONEN, T. and VÄLIMÄKI, V. *Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements*. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50(11), November 2002, s. 867-878. Dostupné z URL: http://www.aes.org/journal/online/jaes.cfm?file=JAES_V50_11/JAES_V50_11_ALL.pdf.
- [19] KLEINER, Mendel. and TICHY, Jiri. *Acoustics of Small Rooms*. 1st ed. Florida: CRC Press, 2014. 491 s. ISBN 978-0415779302.
- [20] KOLMER, Felix a KYNCL, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 242, [1] s.
- [21] KURFÜRST, Pavel. *Hudební nástroje*. Vyd. 1. Praha: Togga, 2002. 1168 s. ISBN 80-902912-1-X.
- [22] LUNDEBY, A. and VIGRAN, T. E. and BIETZ, H. and VORLÄNDER, M. *Uncertainties of Measurements in Room Acoustics*. *Acta Acustica united with Acustica*, Volume 81, Number 4, 1 July 1995, pp. 344-355(12).

Dostupné z URL: <<http://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaua/1995/00000081/00000004/art00009>>.

- [23] MELKA, Alois. *Základy experimentální psychoakustiky*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. 327 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU; 5. ISBN 80-7331-043-0.
- [24] MERHAUT, Josef. *Příručka elektroakustiky*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. 327 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU; 5. ISBN 80-7331-043-0.
- [25] MITRA, Sanjit K.. *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*. International 4th ed. Singapore: CRC McGraw-Hill, 2011. 940 s. ISBN 978-007-128946-7.
- [26] MIŠUREC, J., SMÉKAL, Z. *Číslíkové zpracování signálů*. Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 1-186. ISBN: 978-80-214-4448-5.
- [27] ONDRÁKOVÁ, Jana. *Hudební podniky v Brně*. Brno, 2012 [cit. 2015-12-06]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Viktor Pantůček Dostupné z URL: <https://is.muni.cz/th/42391/ff_m/Hudebni_podniky_v_Brne.pdf>.
- [28] RIZZI, Lorenzo and GHELFI, Gabriele. *Measuring Mixing Time in non-Sabinian Rooms: how scattering influences small-room responses*. Audio Engineering Society Convention 132, April 2012, Web. Dostupné z URL: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16270>>.
- [29] ROSS, Alex. *Zbývá jen hluk: naslouchání dvacátému století*. Vyd. 1. Praha: Argo, 2011. 578 s. Zip; sv. 25. ISBN 978-80-257-0558-2.
- [30] SENGPIEL, Eberhard. *Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudio-technik*. Audio-Tutorials, Fragen und Unterlagen zur Tonaufnahme, Studio-technik, Aufnahmetechnik und Tontechnik, Web. Dostupné z URL: <<http://www.sengpielaudio.com/calculator-airpressure.htm>>.
- [31] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika*. Vysoké učení technické v Brně, 2014. s. 1-167. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [32] SCHNIERER, Miloš. *Přehled vývoje populární hudby*. Vyd. 1. Brno: Janáčkova akademie múzických umění v Brně, 2013. 130 s. ISBN 978-80-7460-047-0.
- [33] SCHRÖEDER, L. R. *New Method of Measuring Reverbation Time*. Bell Telephone Laboratories, Inc., Murray Hill, New Jersey, 14th December

1964. Dostupné z URL: <<http://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/Schro65-reverb.pdf>>.
- [34] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. 574 s. ISBN 978-80-01-05034-7.
- [35] SMÉKAL, Zdeněk. *Systémy a signály: 1D a 2D diskrétní a číslicové zpracování*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2013. 254 s. ISBN 978-80-86645-23-0.
- [36] SMETANA, Ctirad a kol. *Praktická elektroakustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 692, [1] s.
- [37] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. 440 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU; 2. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [38] VONDRÁŠEK, Martin et al. *Akustika hudebních prostorů v České republice = Acoustic of music spaces in the Czech Republic*. 1. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2008- . sv. ISBN 978-80-7331-141-4.
- [39] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. *Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů*. Akustické listy, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18. Web. Dostupné z URL: <<http://www.czakustika.cz/listy/casopis/11-3.pdf>>.
- [40] WEISSER, A. and RINDEL, J.H. *Evaluation of sound quality, boominess, and boxiness in small rooms*. Journal of the Audio Engineering Society, 54(6), June 2006, s. 495–511. Web. Dostupné z URL: <http://www.aes.org/journal/online/JAES_V54/jaes.cfm?file=JAES_V54_6/JAES_V54_6_PG495hirez.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

α	činitel zvukové pohltivosti
α_{str}	střední hodnota činitele zvukové pohltivosti
a	akustické zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
A	celková pohltivost prostoru
BR	míra hlubokých tónů (<i>Bass Ratio</i>)
c_0	rychlost zvuku ve vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
C	teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]
C_7	míra přímého zvuku [dB]
C_{50}	míra zřetelnosti [dB]
C_{80}	míra jasnosti (<i>Clarity</i>) [dB]
δ	konstanta tlumení
Δf_N	šířka pásma daného módu
D_{50}	Zřetelnost (<i>Objective Clarity</i>)
$D(t)$	dozvukový pokles
E	logaritmická obálka poklesu energie
E_t	zvuková energie během doby dozvuku
E_{∞}	úhrnná energie impulsové odezvy
E_7	zvuková energie doby dozvuku během prvních 7 ms
E_{50}	zvuková energie doby dozvuku během prvních 50 ms
E_{80}	zvuková energie doby dozvuku během prvních 80 ms
EASE	Enhanced Acoustic Simulation Software for Integrators, Engineers & Acoustical Consultants http://ease.afmg.eu/
EASERA	Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis http://easera.afmg.eu/
EDT	počáteční doba dozvuku (<i>Early Decay Time</i>)
EDT_{mid}	průměr hodnot EDT v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz
$EDT_{(80\text{ Hz})}$	střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 80 Hz
$EDT_{(100\text{ Hz})}$	střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 100 Hz
$EDT_{(250\text{ Hz})}$	střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 250 Hz
$EDT_{(315\text{ Hz})}$	střední hodnota EDT v $1/3$ -oktávovém pásmu 315 Hz

EK	Echo Criterion
f	frekvence [Hz]
f_k	Schröderův (kritický) kmitočet
f_N	frekvence módu
\mathbf{f}_N	vektor \mathbf{f}_N
F	síla [N]
$\mathcal{F}\{h(t)\}$	Fourierovy transformace impulsní odezvy
G	síla zvuku (<i>Strength of arriving energy</i>)
γ	součinitel objemové roztažnosti plynů ($\gamma = 1/273,15$ [K ⁻¹])
$h(t)$	impulsová odezva
$h[n]$	impulsová charakteristika diskrétního systému
H	míra doznívání (<i>Reverberance measure</i>)
HFR	míra vysokých tónů (<i>High Frequency Ratio</i>)
$H(\omega)$	funkce frekvenční odezvy
$H[k]$	kmitočtová charakteristika LTI diskrétního systému
I	intenzita zvuku [W·m ⁻²]
I_0	vztažná hodnota 10 ⁻¹² W·m ⁻²
$IACC_{t_1,t_2}$	Činitel interaurální vzájemné korelace
$IACF_{t_1,t_2}(\tau)$	Normalizovaná funkce interaurální vzájemné korelace
k	vlnové číslo [m ⁻¹]
λ	vlnová délka [m]
l_x	délka ve směru osy x [m]
l_y	délka ve směru osy y [m]
l_z	délka ve směru osy z [m]
L	celková délka všech hran místnosti [m]
L_I	hladina intenzity zvuku [dB]
L_p	hladina akustického tlaku [dB]
L_P	hladina akustického výkonu [dB]
L_V	hladina akustického rychlosti [dB]
LTI	lineární časově invariantní diskrétní systém

m	činitel útlumu zvuku ve vzduchu
MATLAB	MAtrix LABoratory je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. http://www.mathworks.com
n_x	proměnná nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3, ...
n_y	proměnná nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3, ...
n_z	proměnná nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3, ...
\mathbf{n}_x	jednotkový vektor ve směru kartézské osy x
\mathbf{n}_y	jednotkový vektor ve směru kartézské osy y
\mathbf{n}_z	jednotkový vektor ve směru kartézské osy z
N	počet vlastních kmitů prostoru
p	akustický tlak [Pa]
p_{RMS}	efektivní hodnota akustického tlaku [Pa]
p_0	vztažná hodnota pro 0 dB L_p ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
p_{00}	atmosférický (barometrický) tlak při teplotě 0 °C (101325 Pa)
P	<i>akustický výkon</i> [W]
P_0	vztažná hodnota 10^{-12} W
ρ_0	hustota vzduchu při teplotě 0 °C ($1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
r	souřadnice od počátku sférické souřadné soustavy [m]
r_d	dozvuková vzdálenost [m]
RT_{10}	doba dozvuku určena z poklesu o 10 dB
RT_{20}	doba dozvuku určena z poklesu o 20 dB
RT_{30}	doba dozvuku určena z poklesu o 30 dB
RT_{60}	standardní doba dozvuku (<i>Reverbatation time</i>)
$RT_{60(125 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v oktávovém pásmu 125 Hz
$RT_{60(250 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v oktávovém pásmu 250 Hz
$RT_{60(500 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v oktávovém pásmu 500 Hz
$RT_{60(1000 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v oktávovém pásmu 1000 Hz
$RT_{60(2000 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v oktávovém pásmu 2000 Hz
$RT_{60(4000 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v oktávovém pásmu 4000 Hz
$RT_{30(63 \text{ Hz})}$	doba dozvuku v 1/3-oktávovém pásmu 63 Hz

$RT_{30(80\text{ Hz})}$	doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 80 Hz
$RT_{30(250\text{ Hz})}$	doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 250 Hz
$RT_{30(315\text{ Hz})}$	doba dozvuku v $1/3$ -oktávovém pásmu 315 Hz
S	plocha [m^2]
SBR	míra hlubokých tónů v malých místnostech (<i>Small-room Bass Ratio</i>) [SEBR]
$SEBR$	míra hlubokých tónů během počáteční doby dozvuku v malých místnostech (<i>Small-room EDT Bass Ratio</i>) [dB]
ST	Akustická podpora pódia (<i>Stage Support Factor</i>) [dB]
SPL	hladina akustického tlaku (Sound Pressure Level)
t	čas [s]
t_s	čas těžiště impulsové odezvy (<i>Center Time</i>)
t_{mix}	doba směšování (Mixing Time) [s]
T	perioda zvukového vlnění
T_d	doba dozvuku
T_O	optimální doba dozvuku
v	akustická rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_0	vztažná hodnota $5\cdot 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
V	objem [m^3]
χ	Poissonova konstanta (poměr měrné kapacity plynu při stálém tlaku a objemu; cca 1,4 pro suchý vzduch)
$x[n]$	vstupní signál diskrétního systému
$X[k]$	frekvenční charakteristika vstupního signálu
y	akustická výchylka [m]
$y[n]$	výstupní signál diskrétního systému
$Y[k]$	frekvenční charakteristika výstupního signálu
ω	úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
Z_a	akustická impedance
z_a	specifická akustická impedance

SEZNAM PŘÍLOH

A Přílohy k teoretické části	65
B Dokumentace měřených prostor	67
B.1 Výkresy půdorysů	67
B.1.1 Výkres rozmístění poloh	67
B.1.2 Výkres půdorysu	68
C Obsah přiloženého CD	69

A PŘÍLOHY K TEORETICKÉ ČÁSTI

C [°C]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	40
c_0 [m.s ⁻¹]	325,33	328,365	331,4	334,435	337,47	340,505	343,54	346,575	349,61	355,68
f [Hz]	λ [m]									
20	16,267	16,418	16,570	16,722	16,874	17,025	17,177	17,329	17,481	17,784
50	6,895	6,895	6,628	6,689	6,749	6,810	6,871	6,932	6,992	7,114
100	3,448	3,448	3,314	3,344	3,375	3,405	3,435	3,466	3,496	3,557
200	1,724	1,724	1,657	1,672	1,687	1,703	1,718	1,733	1,748	1,778
300	1,149	1,149	1,105	1,115	1,125	1,135	1,145	1,155	1,165	1,186
500	0,690	0,690	0,663	0,669	0,675	0,681	0,687	0,693	0,699	0,711
700	0,493	0,493	0,473	0,478	0,482	0,486	0,491	0,495	0,499	0,508
1000	0,345	0,345	0,331	0,334	0,337	0,341	0,344	0,347	0,350	0,356
2000	0,172	0,172	0,166	0,167	0,169	0,170	0,172	0,173	0,175	0,178
3000	0,115	0,115	0,110	0,111	0,112	0,114	0,115	0,116	0,117	0,119
5000	0,069	0,069	0,066	0,067	0,067	0,068	0,069	0,069	0,070	0,071
7000	0,049	0,049	0,047	0,048	0,048	0,049	0,049	0,050	0,050	0,051
10000	0,034	0,034	0,033	0,033	0,034	0,034	0,034	0,035	0,035	0,036
15000	0,023	0,023	0,022	0,022	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023	0,024
20000	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,018

Tab. A.1: Vlnové délky slyšitelných frekvencí v závislosti na teplotě okolí

c_0 [m.s ⁻¹]	344	r [m]				
f [Hz]	k [m ⁻¹]	0,050	0,100	0,200	0,500	1,000
20	0,365	0,02	0,04	0,07	0,18	0,37
30	0,548	0,03	0,05	0,11	0,27	0,55
50	0,913	0,05	0,09	0,18	0,46	0,91
70	1,279	0,06	0,13	0,26	0,64	1,28
100	1,827	0,09	0,18	0,37	0,91	1,83
200	3,653	0,18	0,37	0,73	1,83	3,65
300	5,480	0,27	0,55	1,10	2,74	5,48
500	9,133	0,46	0,91	1,83	4,57	9,13
600	10,959	0,55	1,10	2,19	5,48	10,96
700	12,786	0,64	1,28	2,56	6,39	12,79
1000	18,265	0,91	1,83	3,65	9,13	18,27
2000	36,530	1,83	3,65	7,31	18,27	36,53
3000	54,795	2,74	5,48	10,96	27,40	54,80
5000	91,325	4,57	9,13	18,27	45,66	91,33
7000	127,856	6,39	12,79	25,57	63,93	127,86
10000	182,651	9,13	18,27	36,53	91,33	182,65
15000	273,976	13,70	27,40	54,80	136,99	273,98
20000	365,301	18,27	36,53	73,06	182,65	365,30

Tab. A.2: Poloměr šířky blízkého pole v závislosti na frekvenci

konstrukce (tloušťka [mm] / odsazení [mm])	kmitočet f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
beton hutný	0,010	0,016	0,019	0,023	0,035	0,050
beton vylehčený	0,200	0,220	0,230	0,250	0,210	0,260
beton s olejovým nátěrem	0,010	0,014	0,016	0,017	0,018	0,020
čalouněné křeslo (v m ² na 1ks)	0,150	0,200	0,200	0,250	0,300	0,300
čalouněné křeslo obsazené	0,250	0,300	0,400	0,450	0,450	0,400
dřevěné křeslo (v m ² na 1ks)	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050
dřevěné křeslo obsazené	0,200	0,250	0,300	0,350	0,350	0,350
dřevotřísková deska (20/50 až 150)	0,300	0,250	0,100	0,080	0,050	0,040
dřevotřísková deska (odsazení = 0mm)	0,080	0,080	0,090	0,100	0,100	0,100
Dřevovláknitá měkká deska (15/0)	0,100	0,150	0,550	0,520	0,500	0,450
Deska z pěnového polystyrénu (18 až 32/0)	0,020	0,020	0,030	0,080	0,140	0,290
Koberec bouclé (5/0)	0,080	0,100	0,100	0,210	0,430	0,780
Koberec kokosový (6/0)	0,170	0,060	0,110	0,190	0,370	0,800
Koberec plyšový (10/0)	0,130	0,110	0,150	0,300	0,630	0,900
Linoleum (-/0)	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,040
Okenní otvor zasklený	0,300	0,200	0,150	0,100	0,060	0,040
Omítka s olejovým nátěrem (-/0)	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020
Otvor jeviště s dekoracemi	0,200	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Publikum v hledišti (obsazená plocha)	0,410	0,480	0,540	0,570	0,560	0,530
Překližka laťová (18/70)	0,270	0,080	0,110	0,090	0,090	0,200
Sádrokartonová deska (9,5/100)	0,110	0,130	0,050	0,020	0,020	0,030
Vlysy dřevěné (-/0)	0,030	0,040	0,060	0,120	0,100	0,170
Vodní hladina	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020
Zdivo cihelné režné (-/0)	0,024	0,025	0,032	0,042	0,049	0,070
Plata od vajec (-/0)	0,000	0,050	0,35	0,700	0,450	0,600

Tab. A.3: Součinitele zvukové pohltivosti v oktákových pásmech pro vybrané materiály [16]

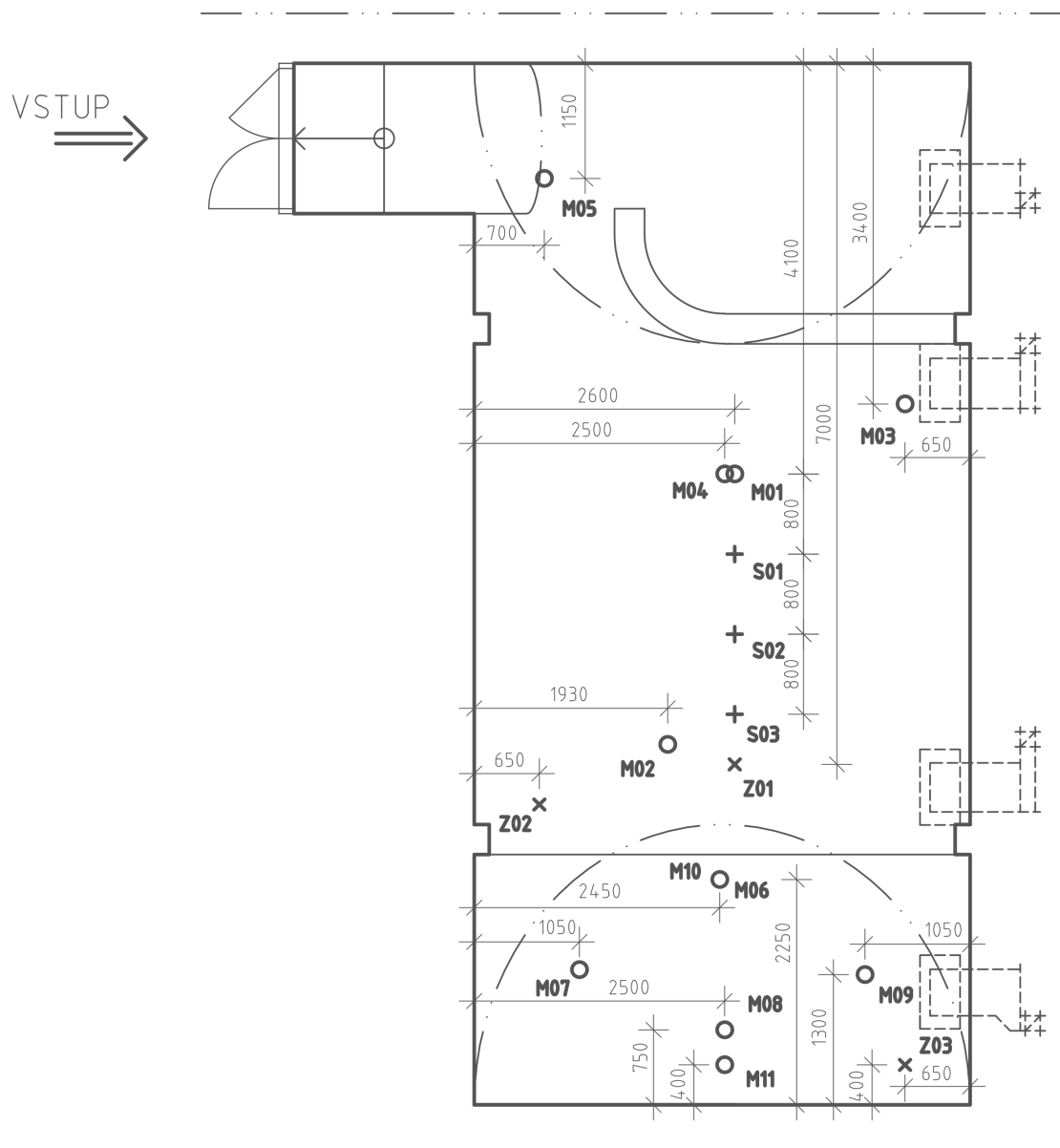
druh místnosti	V_0 [m ³]	T_0 [s]
učebna hry na individuální nástroje a sólového zpěvu	80 až 120	0,7
režijní místnost	130	0,3
audiovizuální učebna	200	0,6
učebna hudební výchovy	200	0,9
malá posluchárna	do 250	0,7
mixážní hala	700	0,7
mixážní hala pro vícekanálový záznam zvuku	700	0,5
malé hudební studio	1500	1
koncertní sál	500 až 4000	0,9 až 1,2
střední televizní / filmové studio	10000	1,1
zkušebna orchestru	2000 až 20000	1,1 až 1,5

Tab. A.4: Doporučený objem a optimální doba dozvuku vybraných skupin prostorů dle platných norem [10] [31]

B DOKUMENTACE MĚŘENÝCH PROSTOR

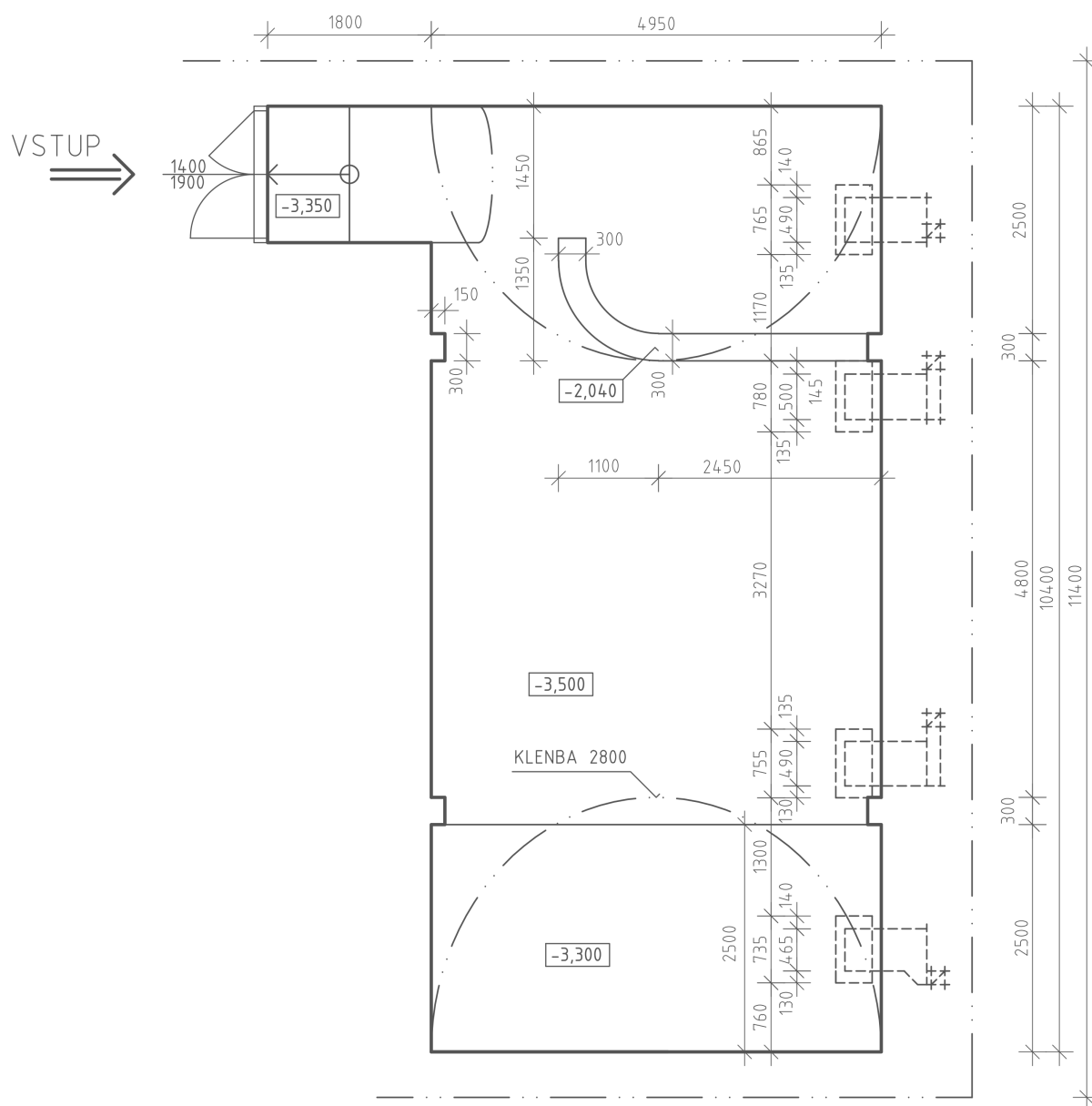
B.1 Výkresy půdorysů

B.1.1 Výkres rozmístění poloh



Obr. B.1: Výkres poloh zdroje zvuku a mikrofону

B.1.2 Výkres půdorysu



Obr. B.2: Půdorysný výkres místnosti Sklepní scény

C OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Kromě materiálů, které jsou součástí tohoto dokumentu se v příloze nachází:

/	kořenový adresář přiloženého DVD
_ dekonvoluce prvků řetězce	soubory matlabu a jejich výstupy
_ měření hudebních klubů	soubory wav a eps a fotodokumentace
_ měření plat v dozvukové komoře	soubory pdf, xls a eps
_ měření všesměrového zdroje	soubory wav, eps a m
_ parametry	soubory Matlabu
_ výkresy	několik výkresů pdf a dwg
_ Seznam_pozic_mereni.pdf	