

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

STANOVENÍ DIFUZNÍHO KOEFICIENTU

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR MIKEŠ



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## STANOVENÍ DIFUZNÍHO KOEFICIENTU ASSESSMENT OF DIFFUSION COEFFICIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR MIKEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. IVAN MÍČA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Petr Mikeš

**ID:** 106639

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2011/2012

**NÁZEV TÉMATU:**

## Stanovení difuzního koeficientu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte v Octave aplikaci pro výpočet koeficientu difuzity pro třetinooktávová pásma na základě impulsových charakteristik vypočtených buď pomocí softwaru pro akustická měření, nebo pomocí vlastní implementace metody MLS či Sweep. Navrženou metodu vyhodnocení popište a zdůvodněte, a to včetně teoretických východisek. Ověřte funkčnost metody v akusticky vyhovujících podmínkách.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] D'ANTONIO, P., COX, T. J. Acoustic absorbers and diffusers; theory, design and application. Taylor & Francis, 2009, 2nd edition. ISBN 0-203-89305-0.

[2] LONG, M. Architectural acoustics. Elsevier academic press, 2006. ISBN 0-12-455551-9.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 24.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Ivan Míča

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Většina akustických měření a parametrů udávaných výrobcí akustických prvků, jak pro dodatečné řešení prostorové akustiky, tak i pro řešení stavebních akustických úprav, se z větší části omezuje pouze na parametry související s pohltivostí jednotlivých prvků. Těmto rozptylovým prvkům doposud nebyla věnována patřičná pozornost. Rozptylové prvky se používají například k omezení přímých odrazů k posluchači nebo odrazů soustředěných pouze do jednoho místa. Kombinací pohltivých akustických panelů a prvků, které zvuk rozptylují, lze dospět k úpravě prostoru pro účel daný zadavatelem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Difuzní koeficient, koeficient difuzity pro všesměrový dopad, metoda hraniční roviny, MLS signál, difuzor, prostorová akustika

## **ABSTRACT**

Most acoustic measurements and parameters provided by a manufacturer of acoustic elements, which are offering additional solutions to room acoustics as well as acoustic construction works, are mainly limited to the parameters associated with absorption of individual elements. Until now, these diffusional elements have been neglected. Diffusional panels are used to e.g. eliminate direct reflection of sound waves to the listener or reflection of sound waves concentrated at one point. Combination of absorptive acoustic panels and diffusion elements results in a space that is customised to the submitter's needs.

## **KEYWORDS**

Diffusion coefficient, diffusion coefficient for random incidence, boundary layer technique, MLS signal, diffuser, room acoustics



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Stanovení difuzního koeficientu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ivanu Míčovi za velmi užitečnou metodickou, odbornou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný v této diplomové 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.

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod do problematiky</b>	<b>13</b>
1.1 Historie a současný stav problematiky . . . . .	13
1.2 Šíření zvuku, odraz zvuku v reálném i bezodrazovém prostředí a akustické parametry. . . . .	13
1.2.1 Druhy prostředí . . . . .	14
1.2.2 Fyzikální podstata akustických jevů . . . . .	16
1.2.3 Prostorová akustika . . . . .	20
1.3 Typy akustických prvků . . . . .	24
<b>2 Měření koeficientu difuzity</b>	<b>27</b>
2.1 Difuzory . . . . .	27
2.1.1 MLS difuzory . . . . .	27
2.1.2 1D QRD difuzory . . . . .	28
2.1.3 2D QRD difuzory . . . . .	28
2.2 Měření koeficientu difuzity technikou hraniční roviny . . . . .	28
2.2.1 Uvažovaná polorovina odrazu . . . . .	29
2.2.2 Zóna zrcadlového odrazu . . . . .	29
2.2.3 Velikost měřeného prostoru . . . . .	31
2.2.4 Tvar měřeného vzorku . . . . .	32
2.2.5 Rozlišení metody a požadavky na senzory . . . . .	33
2.2.6 Typy impulsových odezev . . . . .	33
2.2.7 Výpočet koeficientu difuzity . . . . .	35
2.2.8 Normalizace koeficientu difuzity . . . . .	36
2.2.9 Koeficient difuzity pro všesměrový dopad . . . . .	36
2.3 Měření impulsové odezvy metodou MLS . . . . .	37
2.4 Návrh 1D QRD difuzního panelu . . . . .	38
2.5 Simulace směrových charakteristik difúzních panelů . . . . .	39
<b>3 Dosažené výsledky při měření koeficientu difuzity metodou hraniční roviny</b>	<b>41</b>
3.1 Měřicí aparatura . . . . .	41
3.2 Směrové charakteristiky mikrofonů . . . . .	42
3.3 Kalibrace měřicí aparatury . . . . .	43
3.4 Vliv kroku metody na výsledný koeficient difuzity a směrové charakteristiky . . . . .	44

3.5	Modifikace měřicí aparatury . . . . .	45
3.6	Měření impulsové charakteristiky . . . . .	46
3.7	Opakovatelnost, stabilita a vlivy vzorku na měření . . . . .	47
3.7.1	Stabilita měření . . . . .	47
3.7.2	Vliv referenční desky na měření koeficientu difuzity . . . . .	48
3.7.3	Vliv velikosti vzorku na měření koeficientu difuzity . . . . .	48
3.8	Zpracování dat . . . . .	51
3.9	Shrnutí výsledků měření koeficientu difuzity . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>54</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam symbolů a veličin</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>61</b>
	<b>A Měřicí aparatura</b>	<b>62</b>
	<b>B Modifikovaná měřicí aparatura</b>	<b>63</b>
	<b>C Záznam o měření koeficientu difuzity</b>	<b>64</b>
	<b>D Model měřicí haly</b>	<b>72</b>
	<b>E Obsah přiloženého DVD</b>	<b>73</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Detail dutého hranolu bezodrazové komory. . . . .	15
1.2	Dozvuková komora firmy SONING Praha a.s. . . . .	16
1.3	Porovnání směrových a impulsových charakteristik absorpce, difúze a reflexe. . . . .	18
1.4	Odraz zvuku s dopadající vlnou pod úhly a) 40°, b) 45°, c) 50°, d) 60°. . . . .	19
1.5	Odraz zvuku vlny z různých pozic na konkávní překážku. . . . .	19
1.6	Typizované akustické prvky. Zleva děrovaný absorbér, šterbinový rezonátor, nízkotónový rezonátor. . . . .	24
1.7	Typy akustických difuzních prvků. . . . .	25
2.1	a)-b) Difuzory založené na geometrickém principu, c) MLS difuzor, d) 1D QRD difuzor, e) 2D QRD difuzor . . . . .	28
2.2	Určování zóny zrcadlového odrazu: a) pomocí odražených signálů, b) pomocí imaginárního zdroje zvuku. . . . .	30
2.3	Rozmístění měřicí aparatury a vymezení daného prostoru. . . . .	31
2.4	Schéma vzdáleností mezi měřeným vzorkem, senzory a zdrojem zvuku ve výšce $h$ . . . . .	32
2.5	Vliv zrcadlení na tvar vzorku. . . . .	32
2.6	Impulsové odezvy využívané k výpočtům, kde $h_1(t)$ - impulsová odezva pozadí s měřeným vzorkem, $h_2(t)$ - impulsová odezva pozadí bez vzorku, $h_3(t)$ - impulsová odezva zdroj-mikrofon, $h_4(t)$ - dekonvulovaná odezva vzorku, $h_1(t) - h_2(t)$ - odezva po odečtení pozadí, $h_4(t)$ zoom - výsledná dekonvoluovaná odezva po aplikaci časového rámce. . . . .	35
2.7	Zobrazení výsledných rozměrů difuzoru. . . . .	39
3.1	Měřicí přístroje: a) Countryman MEMWP4FF05B, b) RME FireFace 400, c) RME Octamic II, d) Behringer Ultragain PRO-8 DIGITAL ADA8000. . . . .	41
3.2	Směrové charakteristiky mikrofónů Countryman MEMWP4FFF05B. . . . .	43
3.3	Velikost zrcadlových zón pro $l_s = 1,2$ m. . . . .	43
3.4	Zobrazení normalizovaného koeficientu difuzity pro všesměrový dopad s modifikovanými kroky metody. . . . .	45
3.5	Rozložení sensorů, zdrojů zvuku a jejich značení v poli. . . . .	46
3.6	Porovnání stability měření difuzoru s 1D QRD strukturou o rozměrech: a) 600 × 600 mm, b) 600 × 1 200 mm, c) 600 × 1 800 mm. . . . .	49
3.7	Porovnání různých typů referenčních desek 1D QRD struktury na všesměrový koeficient difuzity $d_{00}$ : a) 600 × 600 mm, b) 600 × 1 200 mm, c) 600 × 1 800 mm. . . . .	50

3.8	Porovnání vlivu velikosti 1D QRD vzorku na všesměrový koeficient difuzity $d_{00}$ pro typy referenčních desek: a) tenká deska MDF 12 mm, b) zadní strana vzorku. . . . .	51
A.1	Zapojení měřicí aparatury. . . . .	62
B.1	Modifikovaná měřicí aparatura. . . . .	63
D.1	Model sportovní haly Roudnice nad Labem. . . . .	72

## SEZNAM TABULEK

- 1.1 Závislost doby dozvuku na frekvenci v dozvukové komoře SONING Praha a.s.  
při teplotě  $\Theta = 20$  °C a relativní vlhkostí vzduchu  $\phi = 60$  % . . . . . 15
- 2.1 Závislost hloubky šachet na posloupnosti  $a_n$  . . . . . 39



# ÚVOD

Řešením problematiky prostorové akustiky se specializovaná pracoviště zabývají již řadu let. Cílem jejich snažení je ve velké části případů upravit daný prostor takovým způsobem, aby posluchač dosáhl co nejvěrohodnějšího sluchového vjemu. Parametry, kterými se daná pracoviště řídí, jsou podloženy fyzikálními principy, ale v neposlední řadě se klade důraz také na subjektivní pocity zadavatele. Na základě mnoha fyzikálně-akustických měření a výsledků subjektivních psychoakustických metod se snaží nalézt spojitost mezi těmito výsledky a nalézt do jisté míry „objektivní“ parametry vnímání daného prostoru a tím co nejlépe nastavit vstupní parametry pro řešenou problematiku.

Většina akustických měření a parametrů udávaných výrobcí akustických prvků, jak pro dodatečné řešení prostorové akustiky, tak i pro řešení stavebních akustických úprav, se z větší části omezuje pouze na parametry související s pohltivostí jednotlivých prvků. Rozptylové prvky se používají například k omezení tzv. „ostrých“ přímých odrazů k posluchači nebo odrazů soustředěných pouze do jednoho místa. Kombinací pohltivých akustických panelů a prvků, které zvuk rozptylují, lze dospět k úpravě prostoru pro účel daný zadavatelem.

Tato práce se zabývá metodikou měření parametrů souvisejících s rozptylem akustické energie do prostoru, tzn. kroky, které jsou potřebné k získání těchto parametrů a předpokladů: požadavky na rozmístění měřicí aparatury, volba velikosti vzorku, volba daného prostoru, popis záznamu dat, výpočet daných koeficientů a jejich interpretace. V současné době neexistuje norma, která výslovně specifikuje měření těchto parametrů, ale pouze doporučení mezinárodní asociace standardů.

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

## 1.1 Historie a současný stav problematiky

Prostorová akustika hraje již od nepaměti významnou roli v mnoha odvětvích života. Stavby, které vznikaly ve starověkém Římě, chrámy, kostely, sportovní stadiony, železniční stanice, produkční a postprodukční pracoviště pro zpracování audiovizuálního díla, zde všude hrají prostorová akustika a další parametry zabývající se srozumitelností významnou roli. Při výstavbě chrámů, církevních staveb a dalších sakrálních prostor se problém řešil pouze geometrickým uspořádáním daného objektu. I při návrhu stadionů a dalších převážně sportovních zařízení se využívá právě aplikace vhodné geometrie objektu. Pokud se ale dostaneme ke specializovaným zařízením, jako jsou pracoviště pro tvorbu audiovizuálních děl, měřicí komory, kinosály, divadla nebo kongresová centra, zde je situace diametrálně odlišná.

Tato specializovaná zařízení je potřeba upravit tak, aby správně sloužila pro daný účel a omezila co nejvíce nežádoucích jevů. To ale neznamená, že musejí sloužit jako jednoúčelová. V mnoha případech koncertních sálů je tento problém řešen. Málokterý koncertní sál je používán například pouze pro symfonické orchestry, ale využívá ho několik těles či jednotlivců diametrálně odlišných, a to žánrově i nástrojově. Právě za takovýchto podmínek je nutné řešit proměnnou prostorovou akustiku a nastavit parametry místnosti tak, aby co nejlépe odpovídaly prostoru pro dané seskupení. Zde se samozřejmě v prvotním předpokladu vychází také z geometrie daného objektu, ale dalším krokem je úprava daného prostoru dalšími akustickými prvky, které budou řešit nežádoucí vlivy. Tyto akustické prvky jsou na základě simulačních modelů rozmístěny po daném objektu a na základě svého účelu např. odstraňují stojaté vlnění, absorbují nežádoucí odrazy, rozptylují zvuk, absorbují pouze nízké kmitočty a vysoké odrážejí, absorbují kmitočty, na které jsou naladěny, využívají ke korekci středních či vysokých kmitočtů nebo k odhlučnění dvou objektů mezi sebou.

## 1.2 Šíření zvuku, odraz zvuku v reálném i bezodrazovém prostředí a akustické parametry.

Zvuk chápeme z fyzikálního hlediska jako mechanické vlnění v hmotném prostředí. Dále ho lze chápat také jako soustavu, která zahrnuje zdroj mechanického vlnění (zdroj kinetické energie), látkové prostředí, jímž se energie přenáší v podobě podélného vlnění a detektor kmitů (vlnění). Významnou roli rychlosti vlny hraje právě látkové prostředí (přenosové prostředí). V každém prostředí se zvuková vlna bude šířit jinou rychlostí z důvodu různé hustoty látky. Vezmeme-li v úvahu pouze šíření

zvuku ve vzduchu, tj. přenosovým prostředím bude právě vzduch, i zde je nutné počítat s různou hustotou vzduchu, která je závislá na atmosferických podmínkách a výsledná rychlost zvuku  $c$  se bude lišit [4].

### 1.2.1 Druhy prostředí

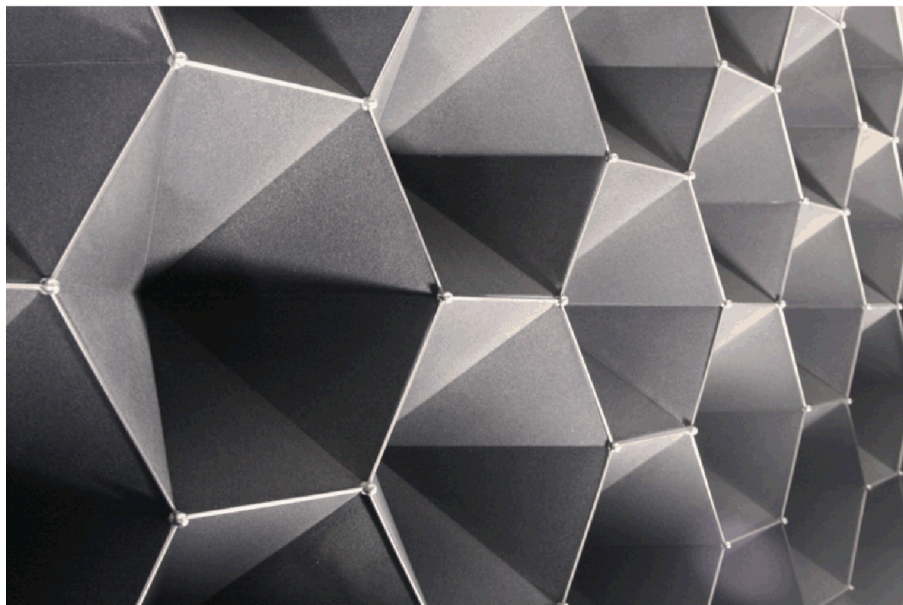
Je nutné také definovat několik typů prostředí, které se využívají v akustice. Pro měření v akustice je nutné dodržovat typy prostor, ve kterých se dané parametry mají měřit. Při nedodržení této zásady není možné brát naměřené výsledky za správné.

#### Bezodrazová komora

Termínem bezodrazová komora, označována také ACH z anglického „Anechoic Chamber“ či „mrtvá komora“, rozumíme takový typ prostoru, u kterého je zamezeno vzniku nežádoucích odrazů. Pokud se tedy od zdroje zvuku šíří kulové vlnoplochy, k jakémukoli místu v této komoře by se měla dostat pouze vlna přímá. Tyto komory se nadále vyznačují velkým útlumem zvuku od prostředí mimo komoru a nízkou hladinou hluku v komoře, typicky 10–20 dB. Těchto parametrů je dosaženo speciálně navrženou konstrukcí těchto komor a jejich plovoucím zavěšením pro odstranění vibrací okolí. Veškeré okolní stěny, strop i podlaha jsou pokryty širokospektrálním absorpčním materiálem s velkým koeficientem pohltivosti  $\alpha$ , který je tvarován do čtyřbokých či vícebokých jehlanů nebo tzv. akustických klínů, které vystupují do prostoru. Jelikož je tato konstrukce jehlanů velice náchylná k mechanickému poškození, je možné využít jehlany duté, otočené o 180°, přičemž jehlany budou zapuštěny do stěny a vznikne rovná plocha méně náchylná k mechanickým poškozením (obr. 1.1). Aby bylo možné na podlahu umístit měřicí aparát a osoby mohly s tímto aparátem manipulovat, instaluje se nad podlahové prvky kovová či plastová mříž s velkou perforací.

#### Semi-bezodrazová komora

Tento typ komory je velice podobný komoře bezodrazové. Výjimku tvoří konstrukce podlahy, kde není použit materiál stejný jako na stěnách, ale pouze zvukoabsorbční koberce či zvukoabsorbční deskové rastry. Důvodem tohoto provedení je možnost umístění větších hmotností do prostoru komory. Provedení uložení komory je opět pružné, aby se eliminovala většina otřesů. Z důvodu zjednodušené konstrukce je tento typ komor méně finančně náročný. Jak semi-bezodrazové, tak komory plně bezodrazové jsou stavěny ve velikostech několika metrů až do velikostí v řádu dvou desítek metrů. Typická hladina hluku v semi-bezodrazové komoře je 15–25 dB.



Obr. 1.1: Detail dutého hranolu bezodrazové komory.

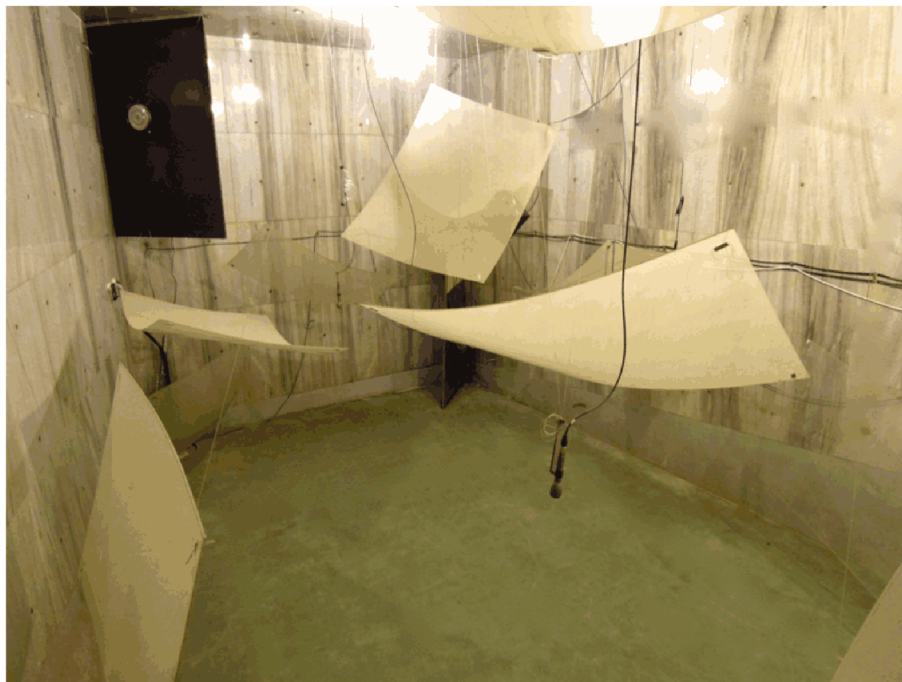
### Dozvuková komora

Některá měření (např. měření akustického výkonu) vyžadují naopak prostředí, ve kterých je nutné udržet difuzní pole. Takové komory jsou nazývány komory dozvukové či komory reverberační. Uvedený typ komor se vyznačuje nízkým koeficientem pohltivosti  $\alpha$ . Stěny a strop komor pokrývá nejčastěji mramor či obdobný materiál. Pokud je komora nepravidelného geometrického tvaru, vytvoření homogenního difuz-

Tab. 1.1: Závislost doby dozvuku na frekvenci v dozvukové komoře SONING Praha a.s. při teplotě  $\Theta = 20\text{ °C}$  a relativní vlhkostí vzduchu  $\phi = 60\%$

$f_s$ [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$R_T$ [s]	7,3	7,6	7,1	5,1	4,0	3,0

ního pole je dosaženo vhodným umístěním odrazivých ploch (difuzorů) do prostoru. Rozmístění s použitím odrazivých ploch je zobrazeno na obr. 1.2. Pomyslnou nevýhodou těchto komor je ztráta informací o směrovosti zdroje zvuku, čehož se ale může do jisté míry i využívat. V těchto komorách se také nejvíce projevuje vliv atmosférických podmínek. Proto je nutné udržovat při měření konstantní teplotu a vlhkost. Typická doba dozvuku pro oktávová kmitočtová pásma je zobrazena v tab. 1.1.



Obr. 1.2: Dozvuková komora firmy SONING Praha a.s.

### **Volné prostředí**

Za volné prostředí označujeme takové prostředí, ve kterém se nevyskytují v blízké vzdálenosti zdroje zvuku, rozměrné překážky nebo jejich vliv můžeme zanedbat (odraz od země). V takovém prostředí není nutné zabývat se problematikou odrazů a dominantní vlnou je vždy vlna přímá. Dle velikosti zdroje zvuku se zvuk šíří vlnoplochy ve tvaru koule pro malé zdroje (bodové zdroje), pro velké zdroje či vlnoplochy ve velké vzdálenosti jsou vlnoplochy rovinné.

### **Uzavřený prostor**

V takovém prostoru do sledovaného místa dorazí vlna přímá. K této vlně se ale se zpožděním, které je dané tvarem místnosti, umístěním zdroje zvuku, typem zdroje zvuku, počtem zdrojů zvuku, použitými materiály a překážkami, přidávají vlny nepřímé (odražené). K vlně přímé pak interferují (sčítají se) vlny odražené a charakter přijímaného zvuku je odlišný od vysílaného.

## **1.2.2 Fyzikální podstata akustických jevů**

### **Akustické pole**

Jak již bylo řešeno výše, zdroj zvuku vytváří ve svém okolí akustické pole, které je závislé například na faktorech:

- umístění zdroje zvuku,
- počet zdrojů zvuku,
- typ zdroje zvuku,
- geometrický tvaru prostoru,
- velikost prostoru,
- použitý materiál stěn,
- použitý materiál překážek,
- tvar a prostorové rozmístění překážek.

Pokud tedy vezmeme v potaz pouze uzavřený prostor, je možné, aby vlivem zdroje zvuku vznikly tři typy akustických polí:

- blízké (Fresnelovo),
- volné - pole přímých vln,
- difuzní - pole odražených vln.

Pokud předpokládáme, že je prostor dostatečně velký, vznik akustických polí probíhá následovně: v blízkosti zdroje vzniká pole blízké, na pole blízké navazuje pole volné. V tomto poli dochází k volnému šíření přímých akustických vln ve tvaru vlnoploch. Postupným narážáním přímých vln na překážky (stěny prostoru, vnitřní vybavení) se část akustické energie pohltí a část odrazí. Tím vznikne pole odražených vln. Odražené vlny mezi sebou interferují a pokud dojde k dostatečně velkému nashromáždění odražených vln, vzniká pole difuzní.

V malých prostorách je situace poněkud odlišná. V okolí zdroje opět vznikne pole blízké, ale navazuje na něj přímo pole difuzní z důvodu brzkých odrazů.

## Odras zvuku

Základní charakteristickou veličinou zvukové vlny je vlnová délka  $\lambda$ , kterou můžeme definovat jako poměr fázové rychlosti šíření vlnění  $v_{\text{faz}}$  ku frekvenci vlnění  $f$ , tj.

$$\lambda = \frac{v_{\text{faz}}}{f} = v_{\text{faz}} T. \quad (1.1)$$

Intenzitu zvuku můžeme definovat jako akustický výkon na jednotku plochy, tj.

$$I = \frac{E}{St}, \quad (1.2)$$

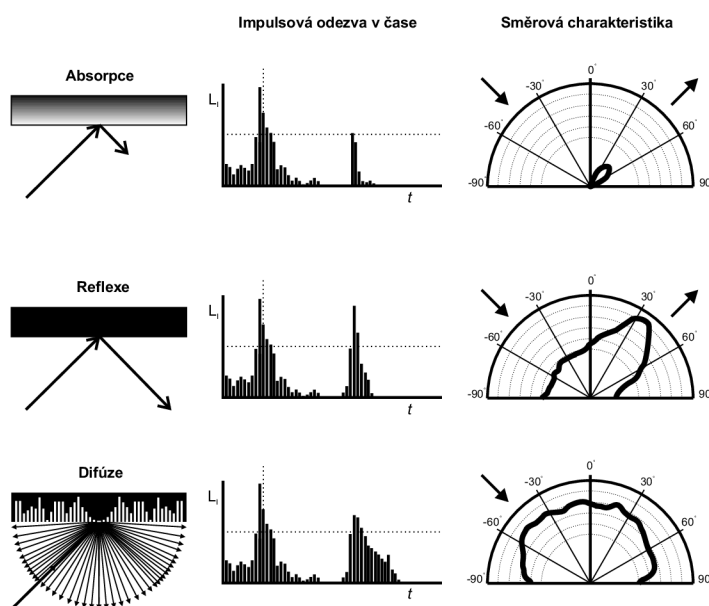
kde  $E$  je zvuková energie,  $S$  jednotka plochy, na kterou energie dopadá a  $t$  odpovídá času.

Ve volném prostředí se vlnoplochy šíří všesměrově a mají tvar koule, které v dostatečně velké vzdálenosti můžeme aproximovat na vlnoplochy rovinné. V reálném uzavřeném prostoru ale musíme počítat s omezeným objemem místnosti  $V$  a z toho vycházejících rozměrů prostoru. Nejprve definujeme rozložení intenzit při dopadu paprsku na materiál:

$$I_R = I_0 - I_A, \quad (1.3)$$

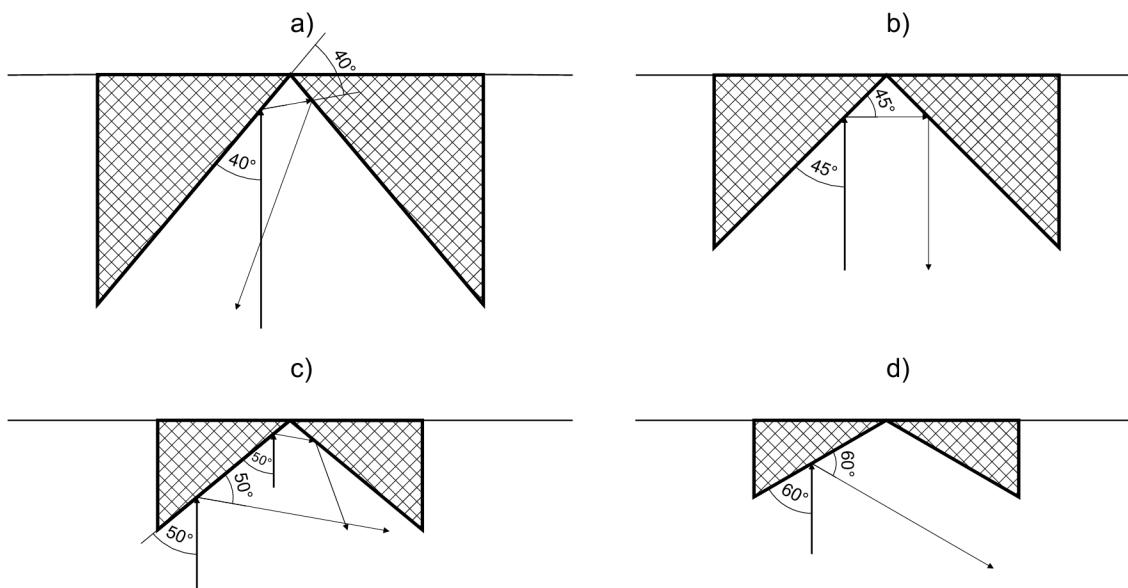
$$I_A = I_T + I_P, \quad (1.4)$$

kde  $I_0$  je intenzita zvuku dopadající na materiál,  $I_R$  intenzita odraženého zvuku,  $I_T$  intenzita zvuku přeměněná v tepelnou energii,  $I_A$  intenzita zvuku vstupujícího do materiálu a  $I_P$  definuje intenzitu zvuku, která vstoupila do druhého prostředí.



Obr. 1.3: Porovnání směrových a impulsových charakteristik absorpce, difúze a reflexe.

Odražené vlny mohou způsobit problémy s lokalizací směru zdroje zvuku. Z jevu priority (Haasova efektu) vyplývá, že pokud dorazí odražená vlna k posluchači se zpožděním rovném či menším než 30 ms, není posluchači zřetelná změna pozice zdroje zvuku. Tato vlastnost vychází z fyziologické vlastnosti sluchového systému. Pokud je ale časový rozdíl vln větší než hodnota 30 ms, posluchači se jeví zdroj méně zřetelný (u mluvené řeči se projevuje horší srozumitelností) a zapříčiňuje špatnou lokalizaci zdroje.

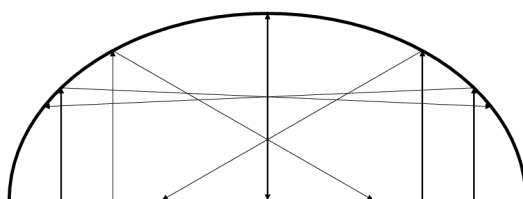


Obr. 1.4: Odraz zvuku s dopadající vlnou pod úhly a) 40°, b) 45°, c) 50°, d) 60°.

Pro odraženou vlnu platí tzv. *zákon odrazu*:

$$\beta' = \beta, \text{ přičemž } \beta' \wedge \beta \in \chi. \quad (1.5)$$

Z 1.5 vyplývá, že pokud polorovina, definovaná zdrojem zvuku a překážkou, na kterou dopadá paprsek, se nachází v holomorfním prostředí, poté se úhel dopadu paprsku  $\beta$  rovná úhlu odraženému  $\beta'$ . Frekvenční závislost na úhel odrazu přímo vliv nemá, ale vliv frekvence se projeví na intenzitě odraženého paprsku. Na obr. 1.4 a 1.5 je zobrazen princip odrazu vlny od překážek pod různými úhly a rozložení intenzit s impulsovou odezvou je zobrazeno na obr. 1.3



Obr. 1.5: Odraz zvuku vlny z různých pozic na konkávní překážku.

## Ohyb zvuku

Tento jev nastává, jestliže se v prostoru vyskytují předměty či překážky, které mají podobné rozměry jako vlnová délka  $\lambda$ . Velikost vlnové délky slyšitelných signálů je v rozmezí 15 cm až 20 m, tudíž pokud se v okolí vyskytuje takový objekt, dojde k ohybu zvuku, což bude mít za následek, že zdroj zvuku bude možné slyšet i za tímto



objektem. Obdobný jev nastane, pokud vlna dorazí na překážku, ve které je otvor. Pokud bude překážka dostatečně velká a otvor dostatečně malý (ve vztahu k vlnové délce  $\lambda$ ), poté se bude otvor jevit na druhé straně jako zdroj vlnění s kulovým tvarem vlnoploch i v případě, že před přepážkou bylo možné vlnoplochy aproximovat přímkou. Energie vyzářeného vlnění poté bude úměrná energii vlnění, která dopadla na plochu tohoto otvoru.

### 1.2.3 Prostorová akustika

Samotné odvětví prostorové akustiky se zabývá úpravou vnitřních prostor dle funkce objektu či potřeb zadavatele. Nejčastěji se jedná o úpravu k reprodukci hudby či mluveného slova. Výsledný dojem je ale opět subjektivní. Abychom byli schopni definovat, jakých výsledných úprav chceme dosáhnout, je zapotřebí definovat několik parametrů souvisejících s prostorovou akustikou.

#### Kritický kmitočet

V reálných prostorech bez akustických úprav je přenosová charakteristika nepravidelná a závislá jak na poloze zdroje zvuku v prostoru, tak i na umístění sledovaného místa. Od středních kmitočtů je vzdálenost mezi sousedními kmitočky tak malá, že každý diskrétní budící signál vybudí řadu blízkých kmitů vlastních. Jejich vzdálenost je pak dána Gaussovským rozložením. Od určitého kmitočtu budou fáze a moduly těchto signálů rozloženy náhodně. Tento kmitočet je nazýván kmitočtem kritickým a je definován jako:

$$f_k = \sqrt{\frac{R_T}{V}}, \quad (1.6)$$

kde  $R_T$  je doba dozvuku a  $V$  je objem prostoru.

#### Doba dozvuku a parametry související s prostorovou akustikou

Důležitým parametrem, který vyjadřuje stav, kdy zdroj zvuku přechází ze stavu reprodukce na vypnutý stav je právě doba dozvuku. Po skončení reprodukce dochází díky odrazům ještě k určitému šíření akustických vln. Tento jev nazýváme dozvuk. Aby bylo možné tento jev popsat, zavádíme parametr *doba dozvuku*. Pro správné definování doby dozvuku musíme zavést určitá omezení (zjednodušení), týkající se koeficientu zvukové pohltivosti  $\alpha$ , která výpočet zpřesňují.

$$R_{TS} = 0,164 \frac{V}{\alpha S}, \quad (1.7)$$

$$R_{TE} = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{MID})}, \quad (1.8)$$

$$R_{\text{TM}} = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}, \quad (1.9)$$

Můžeme tedy definovat následující doby dozvuku:

- $R_{\text{TS}}$  (Doba dozvuku dle Sabina) - Vzorec je nejčastěji spjat s použitím v prostorech s nízkým koeficientem zvukové pohltivosti, tudíž se hodí pro malé místnosti bez akustických uprav. Vzorec 1.7 definuje tuto dobu dozvuku  $R_{\text{TS}}$ , kde  $V$  je objem místnosti,  $\alpha$  je koeficient pohltivosti materiálu a  $S$  je obsah plochy.
- $R_{\text{TE}}$  (Doba dozvuku dle Eyringa) - Předcházející doba dozvuku  $R_{\text{TS}}$  předpokládá exponenciální pokles hustoty zvukové energie, což neplatí pro velké hodnoty koeficientu pohltivosti. Proto byl odvozen tzv. Eyringův činitel pohltivosti  $\alpha_{\text{E}} = -\ln(1 - \alpha_{\text{MID}})$ , který do svého výpočtu zahrnul tuto problematiku. Vzorec 1.8 je vhodný pro velikost středního koeficientu pohltivosti  $\alpha_{\text{MID}}$  v rozsahu 0,2–0,8. Tento vztah je využíván ve většině norem.
- $R_{\text{TM}}$  (Doba dozvuku dle Millingtona) - Jedná se o obdobu Eyringovy doby dozvuku, která ve výsledném použití vykazuje přesnější výsledky pro  $\alpha_{\text{MID}} > 0,8$ . V praxi se však pro svou složitost obvykle nepoužívá.

Ve vzorcích 1.7, 1.8 a 1.9 je vždy uvažován prostor, kde dochází k útlumu zvukové energie pouze na stěnách prostoru a neuvažujeme útlum způsobený šířením v prostředí. Pokud vezmeme v úvahu i tuto skutečnost, můžeme upravit Eyringovu dobu dozvuku  $R_{\text{TE}}$ , jak je uvedeno v 1.10, kde  $m$  je konstanta závislá na relativní vlhkosti vzduchu, teplotě vzduchu a na kmitočtu zvuku.

$$R_{\text{TE}} = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{MID}}) + 4mV} \quad (1.10)$$

V předchozích vzorcích jsme se zabývali teorií a výpočtem doby dozvuku. Pokud ale potřebujeme zjistit přesnou dobu dozvuku, je nutné ji změřit a z grafu poté můžeme vyčíst následující hodnoty:

- $R_{\text{T20}}$  (Reverberation Time) - Vychází z času poklesu zvukové hladiny  $\Delta t_{20\text{dB}}$ , tj. z hladiny  $-5$  dB na  $-25$  dB. Poté je možné určit  $R_{\text{T20}} = 3\Delta t_{20\text{dB}}$ .
- $R_{\text{T30}}$  (Reverberation Time) - Obdobně je vyjádřena doba dozvuku  $R_{\text{T30}}$  jako  $R_{\text{T30}} = 2\Delta t_{30\text{dB}}$ , kde  $\Delta t_{30\text{dB}}$  je doba poklesu o 30 dB (z  $-5$  dB na  $-35$  dB).
- $E_{\text{DT}}$  (Early Decay Time) -  $E_{\text{DT}}$  představuje počáteční dobu dozvuku. Tato doba je získána dle normy ISO 3382 jako počáteční deseti-decibelový pokles (z hladiny 0 dB na  $-10$  dB). Veličina  $E_{\text{DT}}$  byla zavedena pro lepší vyjádření

subjektivního vnímání dozvuku než vyjadřují veličiny  $R_{T20}$  a  $R_{T30}$ .  $E_{DT}$  je tedy vyjádřena jako  $E_{DT} = 6\Delta t_{10dB}$ .

- $C_{50}$  - (Clarity) - Tento parametr patří do tzv. energetických kritérií, které vycházejí z energetických poměrů signálů pro časové úseky impulzní odezvy prostoru. Parametr  $C_{50}$  definuje míru zřetelnosti a udává kritérium akustické srozumitelnosti pro mluvené slovo. Je definován jako poměr energie přicházející do času 50 ms ku energii přicházející po čase 50 ms. Tento vztah je definován v 1.11. Hodnoty, které jsou větší než 0 dB interpretují dobrou srozumitelnost v malém prostoru. Pokud hodnota klesne pod  $-5$  dB, místnost se jeví více odraznou, a proto je méně vhodná pro interpretaci mluveného slova [6].
- $C_{80}$  - (Míra jasnosti) - Nejlepší souvztažnost poslechového kritéria „jasnost“. Optimální hodnoty souvisejí silně s typem (žánrem) hudby, ale obecně lze brát v úvahu optimální hodnoty v rozmezí  $1 \pm 2$  dB. Míra jasnosti je definována normou ČSN 73 0525 a je vztažena k oktávovému kmitočtovému pásmu se středním kmitočtem  $f_s = 1000$  Hz. Vychází ze vzorce 1.12.
- $D_{50}$  - (Objective Clarity) - Zřetelnost je dalším parametrem hodnocení. Je definována poměrem energií v daném časovém úseku viz 1.14. Parametr  $D_{50}$  je ekvivalentem  $C_{50}$ , tj. parametru srozumitelnosti mluveného slova.
- $t_s$  - (Center Time) - Veličina  $t_s$ , definována v 1.13, je úzce spjata s  $C_{80}$  a má podobné využití. Tímto parametrem se nejčastěji hodnotí koncertní sály a určuje prostorový dojem a jasnost hudebního přednesu. Pro mluvené slovo se určuje pro oktávová pásma s  $f_s = 500\text{--}4000$  Hz s oknem  $t = 60\text{--}80$  ms a pro hudbu v oktávovému pásmu  $f_s = 1000$  Hz s oknem  $t = 70\text{--}150$  ms.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{p_{\infty} - E_{50}} = 10 \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \quad [\text{dB}] \quad (1.11)$$

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{p_{\infty} - E_{80}} \quad [\text{dB}] \quad (1.12)$$

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t) dt}{E_{\infty}} \quad (1.13)$$

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}} = \frac{10^{0,1C_{50}}}{1 + 10^{0,1C_{50}}} \quad [\text{dB}] \quad (1.14)$$

- Činitel (koeficient) zvukové pohltivosti - Označován také jako koeficient absorpce, je parametr, jímž vyjadřujeme vlastnost materiálu pohltit daný zvuk. Je označován jako  $\alpha$  a dosahuje hodnot v rozmezí 0–1, kde 0 znamená úplný odraz bez utlumení a 1 vyjadřuje plné absorbování. Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  můžeme také rozdělit do tzv. absorpčních tříd A–E, kde třída A se vyznačuje nejvyšší úrovní absorpce. Činitel zvukové pohltivosti je funkcí frekvence, tudíž je frekvenčně závislý. Veškerá měření tohoto koeficientu se ve většině případů měří pro třetinooktávová či oktávová pásma. Ve vztahu 1.15 je zobrazen výpočet tohoto koeficientu, kde  $I_A$  je intenzita zvuku přicházejícího do materiálu a  $I_0$  představuje intenzitu zvuku dopadající na materiál. Měření koeficientu pohltivosti je možné provést několika metodami, např. měřením pomocí impedanční trubice či měřením v dozvukové komoře. Z tohoto koeficientu také vychází tzv. střední koeficient pohltivosti  $\alpha_{\text{MID}}$ , vztažený ke všem plochám v prostoru 1.18.
- Činitel (koeficient) zvukové odrazivosti - Označován také jako koeficient reflexe  $r$ . Obdobně jako u koeficientu zvukové pohltivosti se jeho hodnoty pohybují v intervalu  $r \in \langle 0,1 \rangle$  a je dán poměrem odražené intenzity akustické energie od dané plochy k dopadající intenzitě akustické energie na tuto plochu 1.16.
- Činitel (koeficient) zvukové průzvučnosti - Aby bylo možné definovat všechny parametry, které se vztahují k odrazům, je nutné definovat také koeficient průzvučnosti  $\varsigma$ , který je také označován jako koeficient propustnosti. Je to vztažená míra intenzity zvukové energie, která se přemění v teplo či přejde do druhého prostředí k intenzitě zvukové energie, která dopadla na materiál 1.17. Dále je možno říci, že platí  $\alpha + r + \varsigma = 1$ .

$$\alpha = \frac{I_A}{I_0} \quad (1.15)$$

$$r = \frac{I_R}{I_0} \quad (1.16)$$

$$\varsigma = \frac{I_P}{I_0} \quad (1.17)$$

$$\alpha_{\text{MID}} = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i S_i}{\sum_{i=0}^n S_i} \quad (1.18)$$

- Počáteční prodleva ITDG - (Initial Time Delay Gap) - Jedná se o časové zpoždění mezi vlnou přímou a prvními odrazy od stěn, stropu či odrazivých ploch. Hodnota ITDG je určována z impulsové odezvy prostoru.

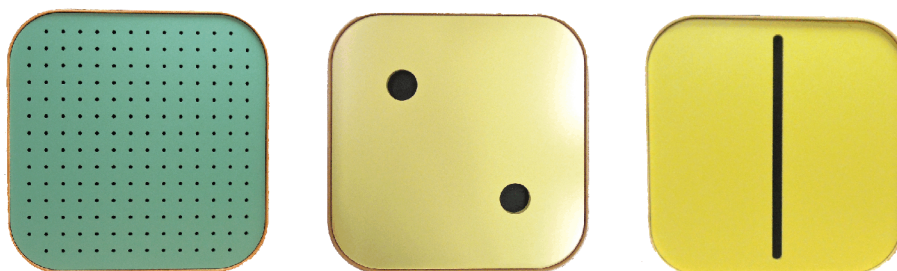
- Koeficient difuzity - Označován také jako SDI (Surface Diffusion Index) či  $d$ , udává míru rozptylovosti použitých povrchů, tj. snaží se navodit difuzní akustické pole ve všech místech prostoru. Více o koeficientu difuzity je uvedeno v kapitole 2.2.

### 1.3 Typy akustických prvků

Je nutné si uvědomit, že každý předmět (osoba, vybavení místnosti, nábytek, omítky, okna, dveře, výplně otvorů), ale i materiály, ze kterých jsou prvky či místnosti vyrobeny, mají větší či menší vliv na akustiku daného objektu. Jedinou možností jak zjistit výsledné parametry místnosti je měření. I když simulace daného prostoru nám samozřejmě umožní navrhnout řešení, nelze očekávat, že se výsledek simulace bude totožně shodovat s finálním měřením. Akustické prvky je možné základně rozdělit dle umístění:

- stěnové panely,
- stropní závěsné a podhledové panely,
- podlahové panely,
- přenosné a pohyblivé panely.

Pokud není možné dosáhnout daných parametrů použitím běžných stavebních materiálů, používají se speciální akustické prvky:



Obr. 1.6: Typizované akustické prvky. Zleva děrovaný absorbér, štěrbinový rezonátor, nízkotónový rezonátor.

- *Kmitající panely* - Jedná se o interiérový prvek umožňující absorbovat pouze nízké kmitočty, přičemž vysoké kmitočty absorbovány nejsou, ale dochází k jejich odražení. Tyto panely se používají pro úpravu prostoru, kde jsou kladeny nároky na srozumitelnost. Proto jejich vlastnosti dokáží omezit nízkotónové

rušivé elementy, ale spektrum vysokých kmitočtů důležitých k dobré srozumitelnosti řeči (sykavky atd.) zůstává nezměněné.

- *Štěrbinové rezonátory* - Jedná se o akustický obkladový prvek, jehož vlastnosti se vyznačují účinným pohlcováním středních kmitočtů.
- *Nízkotónové rezonátory* - Nejčastěji jedno-štěrbinový nebo dvou-štěrbinový prvek. Díky těmto štěrbinám je možné naladit rezonátor na danou frekvenci. Velice účinný v pásmu nízkých kmitočtů.
- *Zavěšené absorbéry* - Akustické prvky tohoto označení se vyznačují svým širokospektrálním pohlcováním. Nejčastěji jsou zavěšeny na nosných lanech pod stropy. Využívají se v přednáškových sálech, ale i sportovištích. U tohoto prvku jsou funkční obě jeho strany.
- *Děrované absorbéry* - Prvky, jejichž přední strana je perforovaná. Hustota perforace určuje jejich frekvenční závislosti. Jedná se o středo-frekvenční až širokopásmové prvky. Na dolních a horních kmitočtech jejich vliv klesá.
- *Difuzory* - Akustické difuzory (někdy také označovány difuzéry) slouží k všesměrovému rozptylu zvuku do okolí. Důsledkem toho je omezení míst s velkým množstvím odrazů. Tyto prvky jsou nejčastěji umístovány na stěny a stropy (detailněji popsáno v kap. 2.1). Na obr. 1.7 jsou příklady těchto prvků.
- *Akustická okna a dveře* - *Akustická okna* se umísťují do většiny hudebních režii pro lepší kontakt s interpretem. Mají velký stupeň vzduchové neprůzvučnosti  $R$  v rozmezí 40–50 dB. Skla jsou uchycena v pružném uložení, aby se nepřenašely nežádoucí vibrace. Výplň mezi okny tvoří na spodní a horní straně materiál s velkým koeficientem pohltivosti. Úhel naklonění skel záleží na proporcích místnosti. *Akustické dveře* - Jsou masivní sendvičově kladené materiály se speciálními zárubněmi a těsněním se značným stupněm vzduchové neprůzvučnosti  $R$  v rozsahu 45–55 dB.



Obr. 1.7: Typy akustických difuzních prvků.

Většina těchto prvků je umístěna na zdech či stropěch místnosti. K dosažení optimálních výsledků je nutné panely kombinovat či shlukovat. Samozřejmostí je, že u většiny prvků hraje významnou roli jak jejich samotná tloušťka, tak vzduchová mezera, která se za nimi nachází. Mnohem lepších parametrů prostoru lze také dosáhnout například kombinací klasického rastrového stropu a širokospektrálních akustických podhledů než při pokrytí celého stropu těmito prvky. Vlastní absorpční schopnosti materiálů jsou kmitočtově závislé. V neposlední řadě se také začíná využívat vlastností nanovláken. Tyto materiálové struktury mají velkou budoucnost ve využití pro akustické úpravy.

## 2 MĚŘENÍ KOEFICIENTU DIFUZITY

Ve většině případů byly vzorky doposud popisovány pouze veličinami, kterými jsme se zabývali v předchozí kapitole a nebyl kladen důraz na posuzování schopnosti rozptylovat zvukovou energii. V této části definujeme veškeré předpoklady, matematický aparát týkající se problematiky měření koeficientu difuzity  $d$  a interpretaci výsledků měření.

### 2.1 Difuzory

Velký rozmach difuzorů, také označovaných jako difúzní panely, přišel až ke konci 20. století. Velký počín v tomto směru udělaly laboratoře RPG Diffusor Systems, Inc., které začaly tyto prvky umisťovat do režijních pracovišť a studií. Pro své velice dobré akustické vlastnosti se začaly využívat i k akustickým úpravám sálů a konferenčních místností. V dnešní době patří spolu s dalšími akustickými absorpčními obklady k jedněm z nejvýznamnějších prvků umožňujících značným způsobem ovlivnit akustické vlastnosti prostoru. Tyto panely slouží k všesměrovému rozptylu zvuku do okolí, což má za následek navození homogenního akustického pole ve více částech poslechového prostoru. Do roku 1991 nebyly tyto prvky na našem území vůbec používány. V nynější době existuje několik variant struktur difuzorů. Výsledná funkce je ale vždy stejná a tyto struktury umožňují všesměrový rozptyl zvuku a tím mají schopnost omezit odražený přímý zvuk. Nezanedbatelný parametr těchto panelů je také samozřejmě koeficient pohltivosti  $\alpha$ . Jednotlivými konstrukcemi struktur difúzních panelů jsme schopni dosáhnout rozptylu zvuku pouze v určitém frekvenčním pásmu, proto je nutné sledovat jak výsledné rozložení intenzit jednotlivých panelů, tak i frekvenční závislosti jednotlivých parametrů. Samozřejmě je také možné navrhovat speciální typy těchto prvků, které nebudou rozptylovat zvuk všesměrově, ale bude docházet k rozptylu pouze do určitých míst prostoru. Tyto prvky je ale nutné konstruovat vždy pro konkrétní prostor zvlášť a v současné době neexistuje možnost předem tyto podmínky nasimulovat pro více než jednu rovinu. Při návrhu těchto panelů je vždy kladen důraz také na vizuální stránku tohoto prvku. Proto při jejich návrhu nesmí být na tento požadavek zapomenuto.

#### 2.1.1 MLS difuzory

Jedná se o strukturu materiálu tvořenou pouze dvěma hloubkami. Řešení a návrh těchto prvků vychází z vlnové délky  $\lambda$ , pro kterou má daný pás rozptylovat zvuk. Maximální rozptyl pro daný pás tedy nastane, pokud je šířka pásu rovna či menší než polovina vlnové délky, pro kterou chceme difuzor konstruovat, tzn.  $l_{mls} \leq \frac{\lambda_{struct}}{2}$ . Při



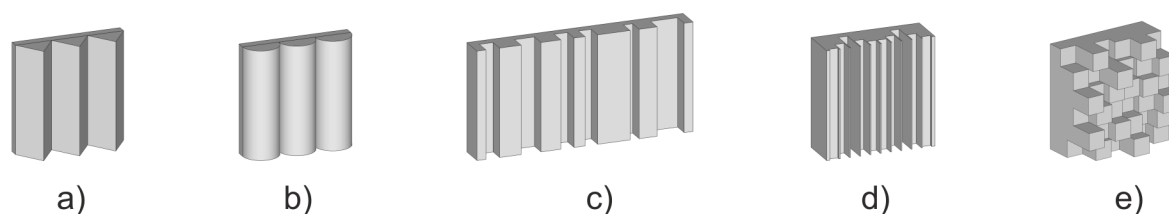
návrhu těchto difuzorů je nutné brát zřetel na funkční rozměry prvku. Kombinací horizontálního a vertikálního směru pásů lze dosáhnout výrazného zlepšení homogenity akustického pole. Nejčastěji se tyto prvky konstruují pro frekvence 300–3 000 Hz.

### 2.1.2 1D QRD difuzory

Tyto 1D difuzory se označují také Schroederovy difuzory. Jedná se o kombinaci stejně širokého šachtového systému a proměnné hloubky jednotlivých šachet. Právě hloubkou a šířkou šachet, tloušťkou překážky aj. lze měnit parametry difuzoru. Pokud na panel dopadne zvuková vlna, odrazí se v jednotlivých šachtách ode dna zpět z panelu. Různá hloubka šachet zapříčiní, že odražené vlnění bude při výstupu z difuzoru v různých fázích a každá šachta se tedy chová jako zdroj zvukových vln. V čele panelu dochází k difrakčním jevům, které mají za následek šíření odražených vln do celé poloroviny. Funkčnost tohoto prvku je v kmitočtovém rozsahu 200–3 500 Hz.

### 2.1.3 2D QRD difuzory

Tyto 2D struktury představují poměrně nové odvětví, umožňující vytvořit plně funkční difuzor se zajímavým provedením. Nejjednodušší typ těchto prvků je složen ze čtvercové struktury různé hloubky či výšky. Výsledná schopnost rozptylovat akustickou energii je u těchto typů difuzorů vyšší než u 1D struktur, tzn. že funkční frekvenční pásmo lze touto strukturou rozšířit a docílit vyrovnanější koeficient difuzity pro všechna pásma.



Obr. 2.1: a)-b) Difuzory založené na geometrickém principu, c) MLS difuzor, d) 1D QRD difuzor, e) 2D QRD difuzor

## 2.2 Měření koeficientu difuzity technikou hraniční roviny

Samotný koeficient difuzity a grafické vyjádření rozložení akustické energie při dopadu na materiál pomocí směrových charakteristik je důležitým aspektem pro návrh náročných akustických prostor, ale také pro samotné projektanty těchto akustických

prvků. Těm výsledky daných měření usnadňují další návrhy těchto difuzních prvků a umožňují zpětně ověřit, zda je dané řešení plně funkční a odpovídá teoretickému návrhu. Znalost koeficientu difuzity daných prvků umožňuje efektivněji umístit dané prvky v prostoru a přináší větší účinnost správného využití těchto prvků. Pokud nebyl koeficient difuzity měřen přímo pro dané prvky, měření se provádělo až ve finálním stavu upraveného prostoru, což může vést ke značně odlišným představám projektanta od skutečnosti.

Jak již bylo řečeno, difuzní koeficient určuje míru schopnosti materiálu či prvku rozptylovat zvuk. K lepší interpretaci výstupů se využívají směrové charakteristiky a další normalizované koeficienty difuzity. S koeficientem difuzity úzce souvisí tzv. koeficient scatteringu  $s$  (Scattering coefficient), který určuje poměr rozptýlené zvukové energie v prostoru mimo ostrý odraz a celkové odražené energie. Tento koeficient se nejčastěji využívá pro modelování prostorů na základě geometrických předpokladů. Metoda, která zde bude rozebrána, je tzv. **Metoda měření koeficientu difuzity technikou hraniční roviny**. Pro korektní měření je nutné definovat několik předpokladů týkajících se správné volby rozměrů měřeného vzorku, rozmístění měřicího aparátu použitého prostoru pro měření apod. [5].

### 2.2.1 Uvažovaná polorovina odrazu

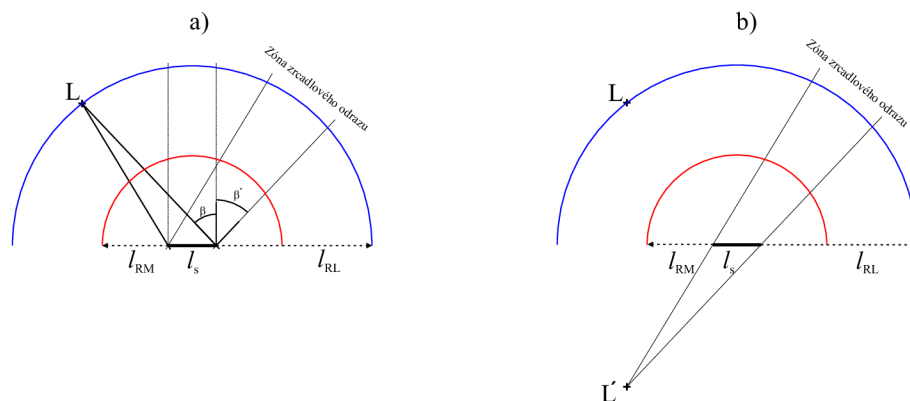
Jelikož je ve většině případů difuzní panel konstruován, aby rozptyloval zvukovou energii pouze v jedné polorovině, a to v polorovině, která je definována přímkou kopírující přední hranu difuzního prvku a vektorem představujícím směr a intenzitu vlnění dopadajícího signálu na tento prvek ( $\varrho \in \mathbf{d}_0$ ), je při měření uvažována právě tato polorovina  $\varrho$ .

### 2.2.2 Zóna zrcadlového odrazu

Zóna zrcadlového odrazu představuje množinu takových míst v prostoru, do kterých se dle definice odrazu zvuku šíří zvuk odražený od vzorku. V tomto případě ale za vzorek uvažujeme referenční hladkou odrazivou desku. Pokud tedy definujeme délku měřeného vzorku difuzoru jako  $l_s$  a víme, že zdroj signálu je ve vzdálenosti  $l_{RL}$ , přičemž platí, že  $l_s \ll l_{RL}$ , vlnění dopadne na celou plochu vzorku.

Nyní je možné definovat zónu zrcadlového odrazu dvěma způsoby:

- Pomocí imaginárního zdroje zvuku - tj. pomocí nejednoznačnosti určení směru příchodu signálu. Tento princip určení spočívá ve využití tzv. zrcadlového zdroje, viz obr. 2.2. Princip lze dobře vysvětlit na určování časového zpoždění dopadu vlnoplochy na senzory. Vezmeme-li v úvahu dva senzory, na které



Obr. 2.2: Určování zóny zrcadlového odrazu: a) pomocí odražených signálů, b) pomocí imaginárního zdroje zvuku.

dopadá akustická vlnoplocha pod určitým úhlem a intenzitou vyjádřenou vektorem  $\mathbf{d}_0$ , nelze jednoznačně určit, zda směr příchodu signálu DOA přichází z poloroviny  $\varrho$ , definované vektorem  $\mathbf{d}_0$  a přímkou protínající tyto dva senzory, či poloroviny  $\varrho'$ , k ní zrcadlově otočené, vztahené právě k této přímce. V této polovině se tedy nachází alternativní (zrcadlový) zdroj signálu, definovaný vektorem  $\mathbf{d}'_0$ . Zónu zrcadlového odrazu poté můžeme definovat jako prostor, který je vymezen dvěma polopřímkami vycházejícími z  $\mathbf{d}'_0$ , tj. zrcadlového zdroje signálu, a tyto polopřímky protínají okraje měřeného vzorku.

- Pomocí odražených signálů - tj. pomocí odrazu zvuku. Jedná se o obdobné určení zóny zrcadlového odrazu jako v předchozím případě, ale její vyjádření je dosaženo geometrickým konstruováním odrazů zvuku, viz obr. 2.2. Pokud tedy dopadne na okraj měřeného vzorku zvuk ze zdroje  $L \in \varrho$  pod úhlem  $\beta$ , dle teorie odrazu zvuku z kap. 1.2.2, kde  $\beta = \beta'$ , můžeme definovat zónu zrcadlového odrazu jako prostor vymezený polopřímkami, jež vycházejí z okrajů měřeného vzorku pod úhlem  $\beta'$  měřeného ke kolmici protínající okraj měřeného vzorku.

Pro zónu zrcadlového odrazu musí platit podmínka:

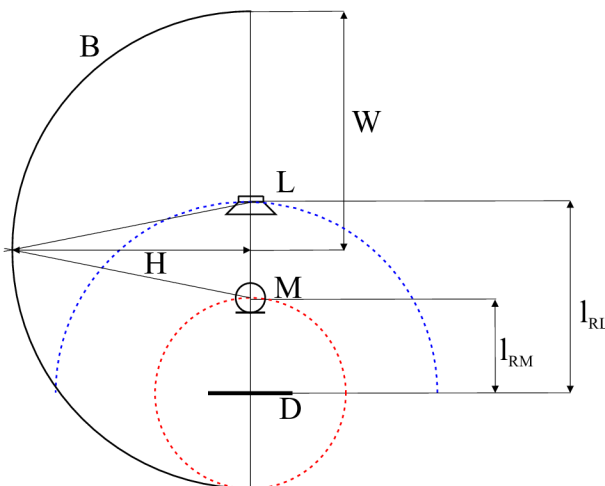
- minimálně 80 % počtu mikrofonů musí ležet mimo tuto zónu.

S ohledem na tuto podmínku musí být správně volena velikost poloměru půlkruhu mikrofonů  $l_{RM}$ , velikost měřeného vzorku  $l_s$  a tím i poloměr půlkruhu zdrojů  $l_{RL}$ . Při geometrickém konstruování je nutné dodržet předpoklad  $\lambda < l_s$ . Tento předpoklad poté zaručí neprojevení jevu ohybu zvuku.

### 2.2.3 Velikost měřeného prostoru

Je nutné také uvést několik požadavků na velikost prostoru, ve kterém probíhá měření. Technika hraniční roviny předpokládá měření v prostorách dvou typů:

- volné prostředí,
- uzavřený prostor s dále definovanými parametry.

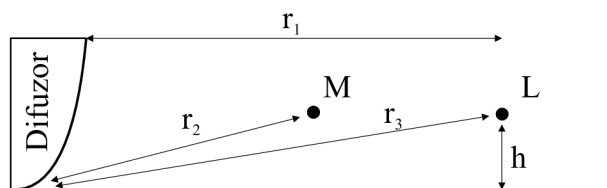


Obr. 2.3: Rozmístění měřicí aparatury a vymezení daného prostoru.

Na *volné prostředí* nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky, až na nutnost mít povrch země rovný a akusticky odrazivý a další požadavky, které musí být splněny, vycházejí přímo z definice volného prostoru.

Na *uzavřený prostor* jsou kladeny další požadavky týkající se především rozměrů. Pro takový typ prostoru je nutné definovat tzv. hraniční rezervovaný prostor označovaný také zkratkou TAR (z anglického „Terminal area Reserved“). Tyto rozměrové parametry jsou zobrazeny na obr. 2.3, kde  $L$  představuje zdroj signálu,  $M$  měřicí senzor (mikrofon),  $H$  a  $W$  představují poloosy hraniční rezervované oblasti,  $B$  vymezuje prostor hraniční rezervované oblasti TAR a  $D$  je měřený vzorek. Další požadavek se týká podlahy prostoru. Musí se jednat o rovnou, hladkou a odrazivou plochu.

Pokud víme, že poloměr půlkruhu se senzory má velikost  $l_{RM}$  a vzdálenost měřeného vzorku od zdroje zvuku je  $l_{RL} = 2l_{RM}$ , zvuk, který se šíří přímo od zdroje zvuku k měřenému vzorku nejprve urazí vzdálenost  $l_{RL} - l_{RM}$  k senzorům (před dopadem na měřený prvek), poté zvuk urazí vzdálenost  $l_{RM}$ , kde dopadne na měřený prvek (difuzor), zde dojde k rozptýlení a tento rozptýlený zvuk se šíří zpět k měřicím senzorům. Pokud zvolíme poloměr půlkruhu senzorů  $l_{RM} = R$ , rozdíl vzdáleností půlkruhu zdrojů zvuku a půlkruhu senzorů se bude rovnat  $l_{RL} - l_{RM} = R$ , tzn.

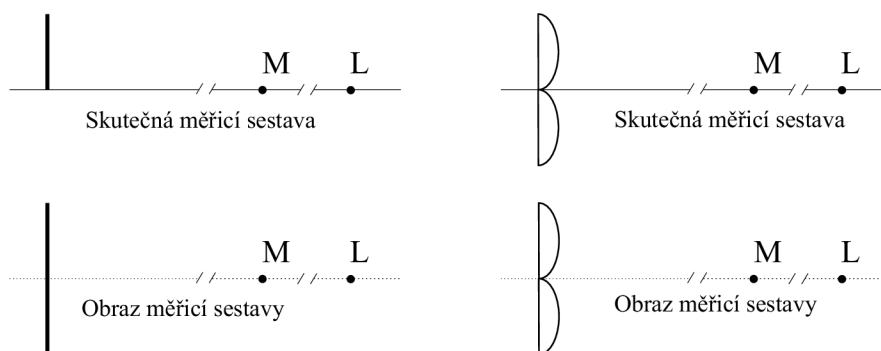


Obr. 2.4: Schéma vzdáleností mezi měřeným vzorkem, senzory a zdrojem zvuku ve výšce  $h$ .

$l_{RL} = 2R$ , je možné říci, že zvuk šířící se od zdroje zvuku  $L$  přes odrazení od difuzoru urazí vzdálenost rovnu  $3R$ . Pokud tuto vzdálenost převedeme na časový údaj, tzn.  $t = \frac{3R}{c}$ , získáme prvotní údaj pro správné vymezení snímaného okna. Pokud by v blízkosti senzorů byla překážka, docházelo by k prvotním odrazům dříve. Nejbližší překážka je ale v našem prostoru sám zdroj zvuku. Zvuk by v tomto případě musel urazit vzdálenost až k senzoru rovnu  $5R$ , a proto je limitující vzdálenost tzv. bezodrazové zóny, kdy je možné zaznamenat pouze měřený vzorek, rovna  $4R$ . Nejbližší další odrazivá plocha může být tudíž až ve vzdálenosti rovné minimálně  $5R$ .

Dále je nutné definovat **hraniční rezervovaný prostor**. Jedná se o elipsoidní prostor, ve kterém z důvodu vzniku systematických chyb a nechtěných odrazů k senzorům není akceptovatelná žádná překážka. Hraniční rezervovaný prostor TAR poté můžeme definovat dvěma poloosami  $H$  a  $W$ , kde platí  $H = 2,45R$  a  $W = 2,5R$ .

## 2.2.4 Tvar měřeného vzorku



Obr. 2.5: Vliv zrcadlení na tvar vzorku.

Pro správné měření koeficientu difuzity touto metodou je důležité správně vnímat celý přenosový systém. Jak již bylo řečeno výše, je nutné, aby podlaha byla tvořena hladkým materiálem s minimálním koeficientem pohltivosti. Poté je možné tvrdit, že vlny, které dopadnou na materiál, se odrazí se stejným úhlem, pod kterým dopadly,

viz kap. 1.2.2. Pokud je tedy vzorek umístěn přímo na podložce, naměřená data odpovídají systému, který měříme a systému, který je zrcadlově otočen, viz obr. 2.5.

Pokud by bylo nutné, i navzdory předpokladu o umístění senzorů co nejbližší podložce, umístit zdroj či senzor výše od podložky, je nutné vzít v úvahu jisté frekvenční omezení metody na vysokých kmitočtech vyjádřené jako:

$$|r_1 - r_2 - r_3| \ll \frac{\lambda}{2}, \quad (2.1)$$

kde  $r_1$ ,  $r_2$  a  $r_3$  jsou vzdálenosti mezi měřeným vzorkem, senzory a zdrojem zvuku ve výšce  $h$ , viz obr. 2.4.

### 2.2.5 Rozlišení metody a požadavky na senzory

Pro správnou interpretaci a možnosti získat detailní průběh směrových charakteristik je nutné dostatečně husté pokrytí půlkruhu senzory, přičemž je samozřejmě nutné vzít v úvahu všechna výše zmíněná doporučení a omezení, jako např. zónu zrcadlového odrazu (kap. 2.2.2). Pro detailní zobrazení je ale nutné dodržet maximální krok umístění senzorů v půlkruhu  $5^\circ$ . Pro pokrytí takového půlkruhu je tedy potřeba minimálně 36, resp. 37 senzorů (z důvodu umístění vždy na  $90^\circ$ ). Dále je kladen důraz na co nejmenší velikost senzoru, aby jeho umístění mohlo být co nejbližší spodní desce, nejlépe bez nutnosti využít k uchycení rozměrné držáky těchto senzorů, které by mohly negativně ovlivnit výsledek.

### 2.2.6 Typy impulsových odezev

Metoda měření koeficientu hraniční rovinou uvádí, že je nutné pro výpočet během měření získat tři typy impulsových odezev a během zpracování z nich vypočítat impulzní odezvu čtvrtou. Proto je minimální základní vstupní datový proud k samotnému výpočtu roven čtyřem impulsovým odezvám. Pro naše potřeby byla ale zavedena určitá modifikace z důvodu lepšího porovnání výsledků a do stávajícího stavu byla přidána impulsová odezva vztažné odrazivé desky. Při měření je tedy nutné získat tyto typy odezev:

- impulsová odezva  $h_1(t)$  - Impulsová odezva představuje sejmutou impulsovou odezvu pozadí se vzorkem. Tudiž v této části se nám projevuje přenosová funkce systému.
- impulsová odezva  $h_{1f}(t)$  - Impulsová odezva představuje tutéž odezvu jako impulsová odezva  $h_1(t)$  s tím rozdílem, že měřený vzorek nahradí referenční odrazivá deska stejných rozměrů jako měřený vzorek. Tato odezva slouží k referenčnímu srovnání vypočtených dat a celkové lepší interpretaci výsledků.

- impulsová odezva  $h_2(t)$  - Tato impulsová odezva představuje odezvu pozadí bez vzorku. Zdroj zvuku zůstává ve stejném poloměru, ale odebere se měřený vzorek. Jedná se tedy o impulsovou odezvu odrazné plochy.
- impulsová odezva  $h_3(t)$  - Impulsová odezva představuje odezvu kanálu typu zdroj-mikrofon. Jedná se o případ, kdy je zdroj signálu umístěn na pozici měřeného prvku. Zdroj signálu je poté směřován tak, aby jeho maximum směrové charakteristiky bylo vždy natočené právě k senzoru, pro který tuto odezvu snímáme.

Poslední impulsovou odezvou, která je nutná k výpočtu koeficientů, je impulsová odezva  $h_4(t)$ . Tato odezva představuje odezvu odrazu od vzorku do daného směru. Nejprve je nutné získat odezvu  $h_{12}(t)$  a  $h_{12f}(t)$  jako:

$$h_{12}(t) = h_1(t) - h_2(t), \quad (2.2)$$

respektive:

$$h_{12f}(t) = h_{1f}(t) - h_2(t). \quad (2.3)$$

Poté můžeme vypočítat  $h_4(t)$  a  $h_{4f}(t)$  pomocí dekonvoluce jako:

$$h_4(t) = \text{IFT} \left\{ \frac{\text{FT}[h_{12}(t)]}{\text{FT}[h_3(t)]} \right\} = \text{IFT} \left\{ \frac{\text{FT}[h_1(t) - h_2(t)]}{\text{FT}[h_3(t)]} \right\}, \quad (2.4)$$

respektive:

$$h_{4f}(t) = \text{IFT} \left\{ \frac{\text{FT}[h_{12f}(t)]}{\text{FT}[h_3(t)]} \right\} = \text{IFT} \left\{ \frac{\text{FT}[h_{1f}(t) - h_2(t)]}{\text{FT}[h_3(t)]} \right\}. \quad (2.5)$$

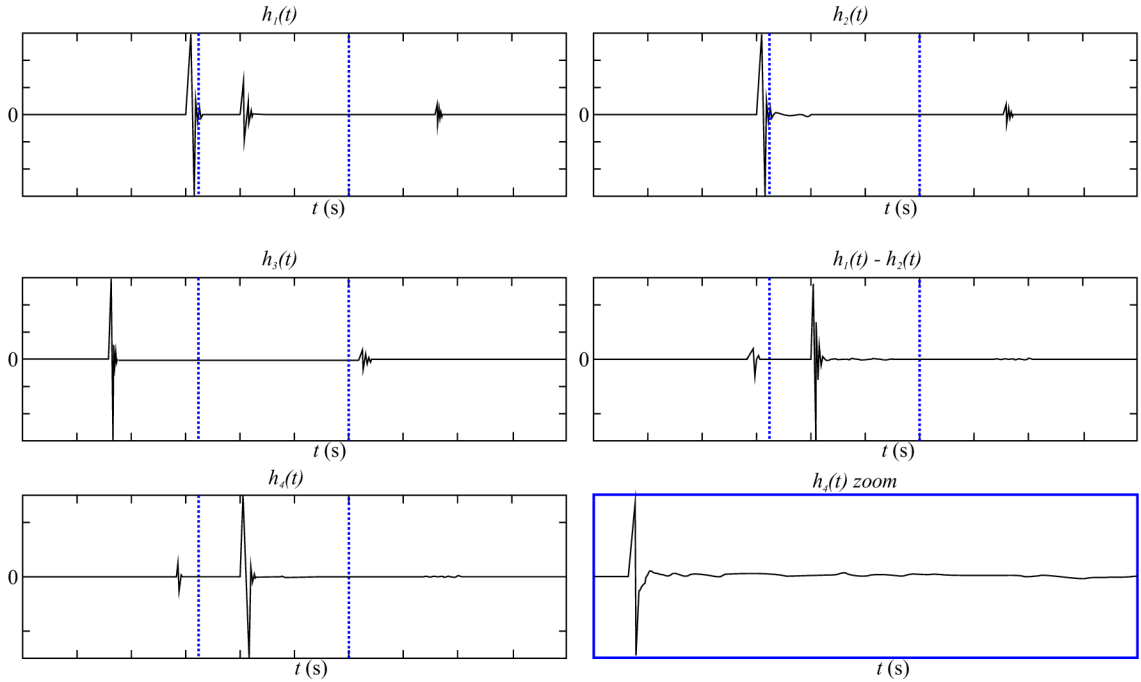
Ke všem těmto impulsovým odezvám je nutné určit tzv. *časový rámec*. Tento rámec slouží k omezení zpracování právě námi užitečné části impulsových odezev a pomáhá odstranit nežádoucí vlivy na výpočet. Je nutné dodržet volbu rámce, časově konstantní pro všechny typy impulsových odezev. Vezmeme-li v úvahu stav zobrazený na obr. 2.3, přičemž  $l_{\text{RM}} = R$ , pro spodní hranici časového okna musí platit:

$$\begin{aligned} t_{\min} &< \frac{3R}{c} \\ t_{\min} &< \frac{(l_{\text{RL}} + l_{\text{RM}})}{c}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

a zároveň pro maximální časovou vzdálenost okna musí platit:

$$\begin{aligned}
t_{\max} &< \frac{5R}{c} \\
t_{\max} &< \frac{2l_{\text{RL}} + (l_{\text{RL}} - l_{\text{RM}})}{c}.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Toto okno tedy aplikujeme na všechny impulsové odezvy a následně je provedena třetinooktávová analýza. Na obr. 2.6 jsou zobrazeny průběhy jednotlivých impulsových odezev. Je nutné si uvědomit, co dané impulsové odezvy zobrazují.



Obr. 2.6: Impulsové odezvy využívané k výpočtům, kde  $h_1(t)$  - impulsová odezva pozadí s měřeným vzorkem,  $h_2(t)$  - impulsová odezva pozadí bez vzorku,  $h_3(t)$  - impulsová odezva zdroj-mikrofon,  $h_4(t)$  - dekonvulovaná odezva vzorku,  $h_1(t) - h_2(t)$  - odezva po odečtení pozadí,  $h_4(t)$  zoom - výsledná dekonvulovaná odezva po aplikaci časového rámce.

## 2.2.7 Výpočet koeficientu difuzity

Jedná se o celkem složitý proces, který pro svůj výpočet používá autokorelační funkci. Autokorelační funkce se běžně používá ke zjištění podobnosti mezi signálem a zpožděnou verzí sebe sama. Vzorce mohou být upraveny do jednoho a poté získáme:

$$d_{\Psi} = \frac{\left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2}, \tag{2.8}$$



kde  $d_\Psi$  je koeficient difuzity pro daný úhel,  $n$  odpovídá počtu senzorů použitých k měření a  $L_i$  je hodnota akustického tlaku pro danou polohu mikrofону. Stejným způsobem je možné nalézt, dle vzorce 2.8, koeficient difuzity pro referenční desku  $d_{\Psi,f}$ . Je třeba dodat, že hodnoty vypočteného koeficientu difuzity jsou kmitočtově závislé. Nejčastější interpretace bývá ve třetinooktávových či oktávových frekvenčních pásmech.

### 2.2.8 Normalizace koeficientu difuzity

V kapitole 2.2.6 jsme definovali impulsovou odezvu  $h_{1f}(t)$ . Tato odezva bude sloužit k referenčnímu porovnání, ale také k výpočtu tzv. *normalizovanému koeficientu difuzity*  $d_{\Psi,r}$ .

Nutnost zavedení tohoto normalizovaného koeficientu je následující: z důvodu nezanedbatelné tloušťky vzorku dochází k odrazům od okrajů vzorku a také se projevuje ohyb zvuku popsáný v kapitole 1.2.2. Tyto jevy mají za následek zvýšení koeficientu difuzity  $d_\Psi$  v oblasti nízkých kmitočtů. Důvodem tohoto zvýšení na nízkých kmitočtech je, že difuzor se v oblasti nízkých kmitočtů chová jako bodový zdroj a dochází k všesměrovému odrazu. Tento jev může vést k jistým chybám v měření. K odstranění těchto nepřesností je tedy nutné dle definice pro  $h_{1f}(t)$ , z kapitoly 2.2.6, naměřit i impulsovou odezvu referenční desky obdobných rozměrů jako má měřený vzorek. Na základě této odezvy poté můžeme stanovit koeficient difuzity pro tuto referenční desku  $d_{\Psi,f}$ , dle 2.8. Z takto připravených dat je možné stanovit normalizovaný koeficient difuzity  $d_{\Psi,r}$  jako:

$$d_{\Psi,r} = \frac{d_\Psi - d_{\Psi,f}}{1 - d_{\Psi,f}}, \quad (2.9)$$

kde  $\Psi$  je úhel dopadu zvukového signálu. Tento koeficient je opět frekvenčně závislý.

### 2.2.9 Koeficient difuzity pro všesměrový dopad

Ve většině případů není nutné interpretovat výsledky pro všechny úhly, ale zavádí se pojem *koeficient difuzity pro všesměrový dopad*  $d_{00}$ . Jedná se opět o frekvenčně závislý koeficient, který je vyjádřen jako průměrná hodnota koeficientu pro dané úhly dopadu zvukového signálu. Nejpresnější výsledek získáme využitím koeficientů pro všechny naměřené úhly, ale připouští se také zkrácené měření s krokem  $10^\circ$ , či druhé zkrácené měření, které odpovídá kroku  $30^\circ$ . Koeficient difuzity pro všesměrový dopad pak můžeme definovat vztahem:

$$d_{00} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{\Psi,i}, \quad (2.10)$$

kde  $n$  je počet mikrofónů a  $d_{\Psi,i}$  je koeficient difuzity pro daný úhel.

## 2.3 Měření impulsové odezvy metodou MLS

Pro akustická měření je vhodných několik typů měřicích signálů:

- sinusový signál,
- bílý šum,
- růžový šum,
- swept sine (sinus přeladovaný v čase),
- MLS signál.

V našem měření se budeme zabývat pouze měřením impulsové odezvy metodou MLS, tudíž k měření využijeme právě tento signál.

*Signál MLS*, z anglického „Maximum Length Sequence“, je definován jako periodická binární pseudonáhodná posloupnost, jejíž úrovně hodnoty odpovídají  $+A$  pro logickou 0 a  $-A$  pro logickou 1, kde  $A$  odpovídá dané (zvolené) úrovně hodnotě velikosti signálu. Signál MLS má vlastnosti podobné vlastnostem Diracova impulsu. Frekvenční spektrum tohoto signálu je ploché. Signál je generován jako periodická pseudonáhodná posloupnost řadou posuvných registrů se zpětnou vazbou, přičemž délka periody je:

$$L_{\text{MLS}} = 2^N - 1, \quad (2.11)$$

kde  $N$  je řád posuvného registru.

Metoda MLS vykazuje při měření impulsové odezvy velkou odolnost vůči rušení. V této metodě je ale nutné zaručit tvrzení:

- přenosová soustava je lineární a časově invariantní.

Z tohoto tvrzení vyplývá nemožnost měření impulsové odezvy, pokud by systém nebyl časově stálý. Pokud by nebylo možné tuto podmínku zaručit, není možné toto zkreslení potlačit a je nutné využít jinou metodu měření impulsové odezvy.

Autokorelační funkci tohoto signálu můžeme definovat jako:

$$R_{p_{xx}} = \rho_p[n] - \frac{1}{L_{\text{MLS}} + 1}, \quad (2.12)$$

kde  $\rho_p[n]$  je sled výkonových spektrálních hustot Diracova impulsu a  $L_{\text{MLS}}$  je perioda délky pseudonáhodné sekvence signálu.

Poté můžeme definovat impulsovou odezvu soustavy s přenosovou funkcí  $h[n]$  na vstupní MLS signál  $x[n]$  jako:

$$y[n] = x[n] \otimes h[n] = \sum_{k=0}^{L_{\text{MLS}}-1} x[k]h[n-k], \quad (2.13)$$

kde symbol  $\otimes$  představuje periodickou konvoluci. Po úpravách je možné definovat vztah pro vzájemnou korelační funkci  $R_{pxy}$  jako:

$$R_{pxy} = h[n] + r_{ss}, \quad (2.14)$$

přičemž úroveň  $r_{ss}$  je zanedbatelná oproti  $h[n]$ . Proto lze říci, že vzájemná korelační funkce je přibližně stejná jako periodická impulsová odezva soustavy  $h[n]$ . Proto tedy můžeme psát:

$$h[n] \approx R_{pxy} = x[n] \oplus y[n] = \sum_{k=0}^{L_{\text{MLS}}-1} x[k+n]y[k], \quad (2.15)$$

kde symbol  $\oplus$  představuje cyklickou korelaci a  $L_{\text{MLS}}$  představuje délku periody signálu, definovanou dle 2.11.

Jistým omezením metody MLS je právě délka periody měřicího signálu  $L_{\text{MLS}}$ . Metodu lze nasadit pouze pro měření impulsových odezev, které jsou kratší než doba trvání jedné periody měřicího signálu  $L_{\text{MLS}}$ . Pokud by nebyla tato podmínka dodržena, projeví se tzv. časový aliasing a impulsová odezva nemůže být správně určena.

## 2.4 Návrh 1D QRD difuzního panelu

Jendy z nejčastěji používaných struktur difuzorů jsou právě 1D QRD struktury. Při návrhu je nutné znát určité vstupní parametry. V našem případě budeme navrhovat panel pro rozptyl zvuku v úhlu rovném  $180^\circ$  v pracovním kmitočtovém pásmu  $f_{\text{d}_{\min}} = 700$  Hz a  $f_{\text{d}_{\max}} = 3500$  Hz. Počet šachet 1D QRD struktury je dán:

$$G = (p - 1) \frac{f_{\text{d}_{\max}}}{f_{\text{d}_{\min}}}, \quad (2.16)$$

kde  $p$  je počet laloků při  $f_{\text{d}_{\min}}$  a kolmém dopadu budící vlny na panel. V našem případě je voleno  $p = 3$ . Za počet šachet  $G$  je ale nutné volit první větší prvočíslo [1]. Pro výše zmíněné hodnoty dostáváme  $G = 10$ , tj. volíme první vyšší prvočíslo  $G = 11$ . Posloupnost šachet je pak dána  $n = 0, 1, 2, \dots, G - 1$ . Nyní lze definovat šířku šachty  $s$ , která je dána vztahem:

$$s = \frac{c}{2f_{\text{d}_{\max}}} - t_d, \quad (2.17)$$

kde  $t_d$  je tloušťka přepážky difuzoru. Hloubky jednotlivých šachet jsou úměrné posloupnosti  $a_n$  pro  $n = 0, 1, 2, \dots, G - 1$  vyjádřené jako:

$$a_n = n^2 \pmod{G}. \quad (2.18)$$

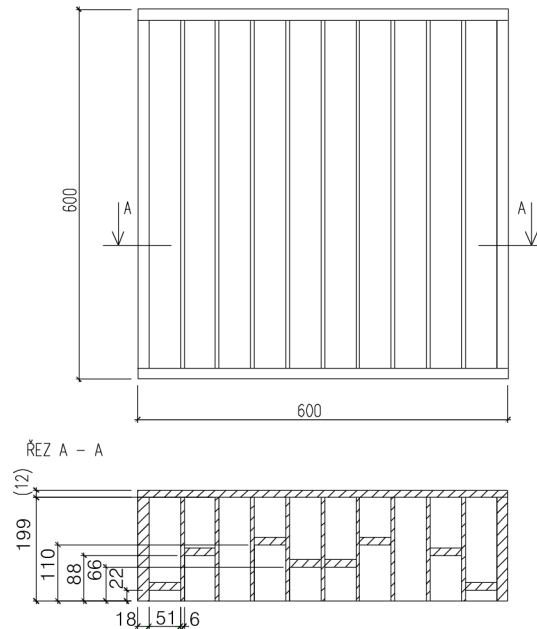
Tab. 2.1: Závislost hloubky šachet na posloupnosti  $a_n$

$n$	(-)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a_n$	(-)	0	1	4	9	5	3	3	5	9	4	1
$d_n$	(mm)	0	22,1	88,3	198,7	110,4	66,2	66,2	110,4	198,7	88,3	22,1

Pro hloubku šachet  $d_n$  je pak možné psát:

$$d_n = a_n \frac{c}{2Gf_{d_{\min}}}. \quad (2.19)$$

V tab. 2.1 je zobrazena velikost jednotlivých šachet  $d_n$ . Výsledný počet šachet byl opět eliminován na  $G = 10$  z důvodu nulové hloubky nulté šachty. Na obr. 2.7 jsou zobrazeny finální rozměry difuzního prvku s pracovním pásmem  $f_{d_{\min}} = 700$  Hz až  $f_{d_{\max}} = 3500$  Hz.



Obr. 2.7: Zobrazení výsledných rozměrů difuzoru.

## 2.5 Simulace směrových charakteristik difúzních panelů

Rozptyl akustické energie do prostoru (difúzi) je nejlépe možné zobrazit pomocí směrových charakteristik pro daná frekvenční pásma. Difúzní vlastnosti vyplývají ze vzájemného ovlivňování akustického vlnění vznikajícího nad povrchem panelu. O této problematice bylo pojednáno v kap. 2.1. V určitém stavu je možné každý kus

1D QRD struktury považovat za zdroj akustického vlnění. Pokud tedy dopadne na panel rovinná vlna s vlnovou délkou  $\lambda_x$ , je možné stanovit fázový posun odražené vlny v úrovni přední hrany prvku, daný hloubkou šachty oproti vlně dopadající jako:

$$\varphi_n = 2\pi \frac{2d_n}{\lambda_x}, \quad (2.20)$$

kde  $d_n$  je hloubka  $n$ -té šachty 1D difuzoru. Pro simplifikaci nyní budeme uvažovat pouze difrakci Fraunhoferovu. Při ní je možné vlnu šířící se od bodového zdroje panelu do prostoru nahradit v bodě pozorování vlnou rovinnou, tj. musí platit:

$$\frac{l_s}{\sqrt{\lambda_x u}} \ll 1, \quad (2.21)$$

kde  $u$  je vzdálenost pozorování od místa, kde dochází k difrakci, tj. nad povrchem panelu. Pokud by podmínka 2.21 nebyla splněna, což znamená, že vzdálenost  $u$  je menší, tj.  $\frac{l_s}{\sqrt{\lambda_x u}} \approx 1$ , nelze předpokládat možnost aproximace vlny přímkou a jedná se tedy o difrakci Fresnelovu. Pokud je tedy možné aproximovat odražené vlnění ve vzdálenosti  $u$  přímkou, je možné přistoupit k výpočtu rozložení směrových charakteristik. Délku difuzoru je nutné rozdělit na  $N$  částí o velikosti  $\Delta x$ , kde  $N = \frac{l_s}{\Delta x}$ , přičemž  $\Delta x \ll s$ . Parametr  $s$  poté vyjadřuje šířku šachty 1D QRD difuzoru. Nyní lze vyjádřit amplitudu vln vycházejících z difuzoru pro daný úhel jako:

$$A(\delta) = \frac{1}{N} \sqrt{\left[ \sum_{k=1}^N \cos \left( \delta k \Delta x - 4\pi \frac{d_{k\Delta x}}{\lambda} \right) \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^N \sin \left( \delta k \Delta x - 4\pi \frac{d_{k\Delta x}}{\lambda} \right) \right]^2} \quad (2.22)$$

pro  $k = 1, 2, \dots, N$ ,

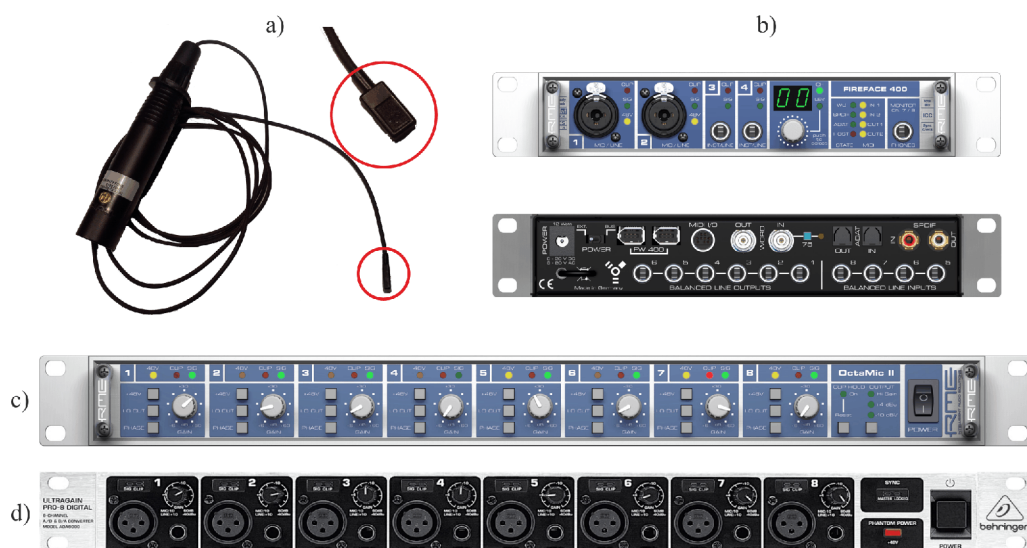
kde  $\delta$  je dána vztahem 2.23 a vyjadřuje úhel, který je dán úhlem dopadu přímé budící vlny a úhlem difrakce, pod kterým sledujeme odezvu na vlnu budící.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \lambda_d - \sin \lambda_i) \quad (2.23)$$

### 3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY PŘI MĚŘENÍ KOEFICIENTU DIFUZITY METODOU HRANIČNÍ ROVINY

#### 3.1 Měřicí aparatura

Pro měření byly využity mikrofonní senzory značky Countryman Associates typu MEMWP4FFF05B. Tyto mikrofony se vyznačují malými rozměry uložení mikrofonní kapsle. Jedná se o kondenzátorové mikrofonní senzory s kulovou směrovou charakteristikou s frekvenčním rozsahem 20 Hz až 20 000 Hz. Ke správné funkci je nutné mikrofonní sensor napájet fantomovým napájením v rozsahu +5 V až +50 V. Výstupní impedance mikrofону je 600  $\Omega$  a citlivost je rovna -40 dB. Mikrofon se vyznačuje vyrovnanou frekvenční charakteristikou s mírným zdvihem v oblasti nad 15 000 Hz.



Obr. 3.1: Měřicí přístroje: a) Countryman MEMWP4FFF05B, b) RME FireFace 400, c) RME Octamic II, d) Behringer Ultragain PRO-8 DIGITAL ADA8000.

Jako mikrofonní předzesilovače a zároveň phantomové napaječe byly využity předzesilovače RME Octamic II a Behringer Ultragain PRO-8 DIGITAL ADA8000. RME Octamic II je 8kanálový mikrofonní předzesilovač s A/D převodníky. Tyto A/D převodníky jsou 24bitové se vzorkovací frekvencí 192 kHz. Předzesilovače se vyznačují velkým odstupem  $S/N = 110$  dBA. RME Octamic II pracuje s frekvenčním rozsahem 5 Hz až 200 kHz. A/D převodníky poté umožňují toto zařízení připojit přes ADAT rozhraní ke zvukové kartě. Behringer Ultragain PRO-8 DIGITAL

ADA8000 je opět 8kanálový předzesilovač s možností A/D převodu. Jeho vzorkovací frekvence je maximálně 48 kHz. Předzesilovač také umožňuje zapnout phantomové napájení pro každý mikrofon. Frekvenční rozsah je v rozmezí 10 Hz až 21 kHz. Pro připojení ke zvukové kartě je zde využito analogových výstupů. Pro připojení analogových i digitálních vstupů k PC je použita externí zvuková karta RME FireFace 400. Jedná se o zvukovou kartu, která obsahuje osm 24bitových A/D převodníků se vzorkovací frekvencí 192 kHz a také digitální ADAT vstup i výstup, přes který můžeme rozšířit počet vstupních kanálů až na šestnáct se vzorkovací frekvencí 48 kHz. Pro měření impulsových charakteristik byl použit software pro akustická měření Easera od společnosti AFMG. Schéma zapojení celé měřicí soustavy je zobrazeno v příloze A.1.

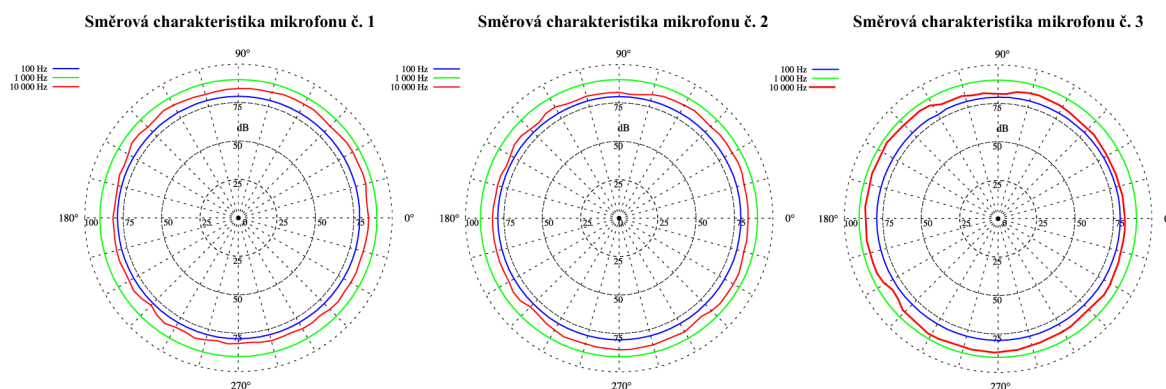
## 3.2 Směrové charakteristiky mikrofonů

Při kladení nároků na měření bylo řečeno, že požadavky na senzory jsou především ve směrové charakteristice a také v samotných rozměrech mikrofonu. Jelikož výrobce přesně nedefinoval průběhy pro referenční frekvence 100 Hz, 1 000 Hz a 10 000 Hz, ale pouze pro  $f < 8$  kHz, bylo provedeno kontrolní měření směrových charakteristik třech měřicích mikrofonů. Pro měření směrové charakteristiky mikrofonu je tedy nutno zaručit následující podmínky:

- mikrofon i reproduktor musí být umístěny ve stejné výšce  $h$ ,
- vzdálenost mezi reproduktorem a mikrofonem musí být rovna  $l_x = 1$  m,
- k mikrofonu smí dorazit pouze vlna přímá.

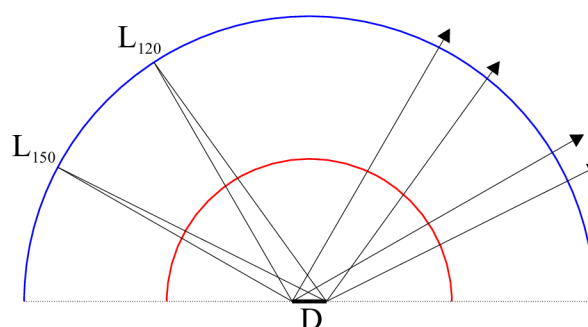
Měření probíhalo v semi-bezodrazové komoře. Mikrofony byly umístěny na neodrazivou podložku na točnu umožňující přesné pootočení mikrofonu. Ve stejné výšce byl do vzdálenosti  $l_x = 1$  m umístěn reproduktor v kolmém směru k ose mikrofonu. Reproduktor byl buzen sinusovým signálem z generátoru o frekvenci 100 Hz, 1 000 Hz a 10 000 Hz. Krok měření směrové charakteristiky byl zvolen na  $\zeta = 5^\circ$ . Takový krok zaručí dostatečně správnou interpretaci výsledků měření směrové charakteristiky mikrofonu.

Pomocí měřiče akustického tlaku byly zaznamenány energetické hodnoty a zobrazeny do polárních souřadnic. Výsledné charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 3.2. Vliv na rozdílech intenzit je způsoben nevyrovnanou frekvenční charakteristikou zdroje zvuku. Z obr. 3.2 je patrné, že se jedná o téměř ideální kulové charakteristiky pro frekvenci 1 000 Hz. V této frekvenci se pohybuje rozdíl hodnot v úrovních  $\Delta_{1000} = \pm 0,2$  dB. Pro frekvenci 100 Hz se rozdíl pohybuje v rozsahu  $\Delta_{100} = \pm 0,4$  dB



Obr. 3.2: Směrové charakteristiky mikrofonů Countryman MEMWP4FFF05B.

a pro frekvenci rovnu 10 000 Hz se rozdíl pohyboval v rozmezí  $\Delta_{10000} = \pm 3,4$  dB. Tyto rozdíly hodnot nejsou kritické, proto je stále možné považovat směrovou charakteristiku za kulovou. Také byla měřena vertikální směrová charakteristika ve své horní polovině a její výsledky byly zcela totožné jako na obr. 3.2.



Obr. 3.3: Velikost zrcadlových zón pro  $l_s = 1,2$  m.

### 3.3 Kalibrace měřicí aparatury

Kalibraci měřicí aparatury je nutné provádět před každým měřením. Správná kalibrace má za následek shodné zesílení signálu na všech vstupech do A/D převodníků.

Pro kalibraci měřicí aparatury je možné využít vhodný testovací signál. Doporučuje se využívat testovací signál, který odpovídá metodě získání impulsové charakteristiky. Běžně se jedná o sinusový signál s  $f = 1$  kHz, různé druhy *sweep* signálů, bílý šum (white noise) či MLS signál. Nutnou podmínkou samozřejmě je, že při kalibraci se použije shodný signál na všechny kanály.

Veškerou kalibraci měřicí aparatury je nutné provádět při shodně nastavených módech jednotlivých kanálů, tzn. při shodně nastavených útlumových člancích, modifikacích fází, filtračních článků a zapnutém fantomovém napájení.



Zdroj zvuku je umístěn na místo měřeného vzorku na točnu, která umožňuje pootáčení daným směrovým zdrojem zvuku. Pro každý kanál, na který je nasměrován zdroj zvuku, provedeme nastavení *Gain* na referenční úroveň. Tuto úroveň sledujeme v multi-trackovém SW, který umožňuje volbu zobrazení SW mixážního pultu s indikátory vybuzení. Indikátory vybuzení přepneme do módu *Post-Fader*, *Fast Release* a *Meter Input*. Jednotlivé volby se mohou lišit typem použitého SW. V tomto nastavení je nutné, aby při prvotní kalibraci parametrem *Gain* byly tahové potenciometry nastaveny na výchozí úroveň. Pokud je hrubě nastavena úroveň *Gain*, jednotlivé malé odchylky je možné nastavit právě tahovými potenciometry. Pokud je výstupní úroveň na jednotlivých kanálech totožná, je možné vstupní signály jednotlivých kanálů zaznamenat a následně dle vztahu 3.1 vypočítat úroveň středního okamžitého akustického výkonu. Úrovně středního okamžitého akustického výkonu jednotlivých signálů by se poté měly pro každý kanál shodovat.

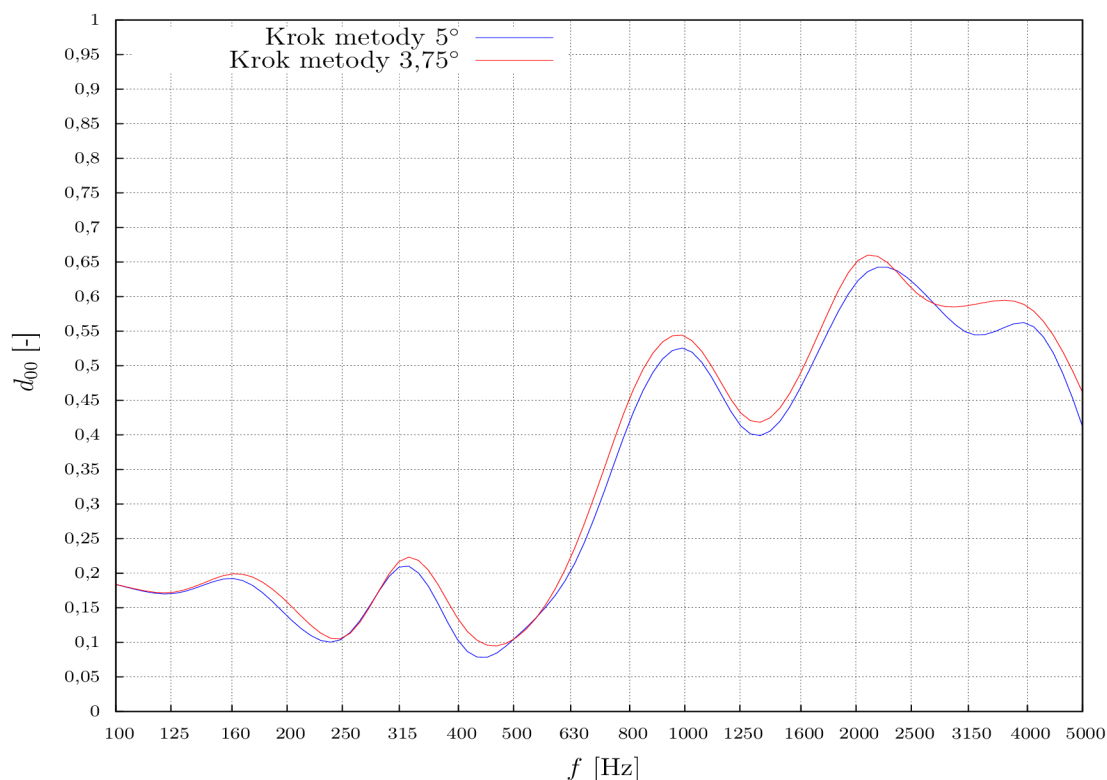
$$P = \frac{1}{K} \sum_{s=0}^{K-1} x^2[k], \quad (3.1)$$

kde  $K$  je počet vzorků signálu a  $x[k]$  je posloupnost vzorků signálu.

### 3.4 Vliv kroku metody na výsledný koeficient difuzity a směrové charakteristiky

V průběhu měření byl testován vliv kroku metody  $\zeta$  na výsledný koeficient difuzity. Při volbě kroku metody je samozřejmě nutné vzít v potaz i maximální počet využitelných senzorů. Ve všech volbách kroku metody je ale nutné, aby krok metody, a tím i rozložení senzorů po půlkruhu, byl po celém obvodu lineární. Maximální krok metody, který je doporučen pro měření koeficientu difuzity je  $\zeta = 5^\circ$ . Pro jemnější krok metody již nedochází ke zpřesnění dat do takové míry, aby to bylo pro řešitele přínosné, viz obr. 3.4. Pokud ale budeme uvažovat směrové charakteristiky, zde je věc diametrálně odlišná. Jestliže krok metody zvolíme  $\zeta \leq 5^\circ$ , dostaneme mnohem detailnější směrovou charakteristiku. Je tedy nutné zvolit kompromis, který nám umožní změřit směrovou charakteristiku dle požadované přesnosti a zároveň umožní dostatečně přesně vypočítat koeficienty difuzity. Pro naše účely byl krok metody zvolen na  $\zeta = 3,75^\circ$  z důvodu nutnosti zobrazit přesnější směrové charakteristiky. Pro tento krok je možné v polovině  $\varrho$  vykreslit směrovou charakteristiku jemnější. Toto rozlišení směrových charakteristik přináší pro následnou analýzu a modifikaci panelů důležité informace. Nevýhodou tohoto kroku metody je větší počet mikrofonů a složitější měřicí aparatura. Měření je možné také rozdělit do dílčích sekcí a tím omezit počet senzorů.

### Normalizovaný koeficient difuzity pro všesměrový dopad



Obr. 3.4: Zobrazení normalizovaného koeficientu difuzity pro všesměrový dopad s modifikovanými kroky metody.

## 3.5 Modifikace měřicí aparatury

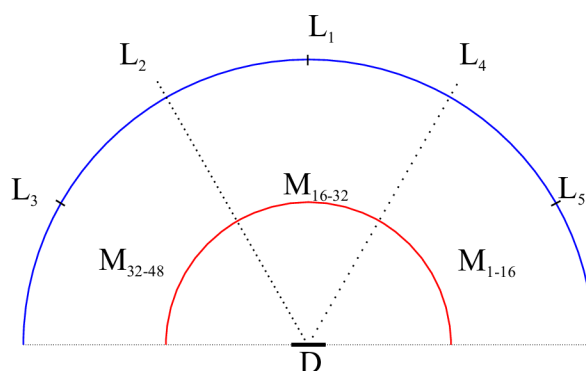
Měřicí aparatura A.1, na níž je nyní prováděno měření, splňuje všechny požadavky na měření, ale uplatňují se zde další jevy, které negativně ovlivňují výsledné koeficienty. Mezi analogovou cestou tvořenou RME FireFace 400 + ADA8000 a digitální částí RME FireFace 400 + RME Octamic II, dochází k fázovému zpoždění v řádu jednotek vzorků. K tomuto zpoždění by za předpokladu propojení WordClock synchronizací docházet nemělo, ale tento posuv je na impulsové charakteristice zřetelný. Z důvodu uvedeného zpoždění je nutné toto zpoždění pomocí autokorelační funkce nalézt a následně upravit impulsové odezvy na správnou časovou osu. Dalším nedostatkem této aparatury je nemožnost měřit celou snímanou polovinu na jeden náměr, ale měření je rozděleno do tří sekčních měření. V důsledku toho dochází ke změně přenosového systému, celkový čas měření se násobně prodlužuje a je nutno dbát zvýšené pozornosti na chyby vniklé při měření, a to jak systematické, tak nahodilé.

V důsledku eliminace těchto chyb byla navržena nová měřicí aparatura, která

většinu těchto chyb odstraní a měření se stane plně automatické. Veškerá komunikace probíhá pomocí komunikačního protokolu MADI, A/D převodníků ADA 8000 a konvertoru ADI 648. Tento protokol a HW vybavení umožňuje snadno rozšířit měřicí aparaturu až na 64 kanálů, což přináší možnost volby kroku pro toto měření až  $\zeta = 2,8^\circ$ . Tato aparatura zajišťuje plnou synchronnost a konstantní fázové zpoždění na všech kanálech. Také je eliminována změna přenosového systému pevným rozmístěním zdrojů zvuku. Modifikovaná měřicí aparatura je zobrazena v příloze B.1. V rámci modifikace této aparatury byla navržena šablona pro multi-trackové systémy Nuendo, Avid Pro-Tools a Logic, které umožňují uživatelsky přívětivé zacházení a automatické změření hladin akustické energie pro veškeré polohy zdroje zvuku.

### 3.6 Měření impulsové charakteristiky

Pro měření impulsových charakteristik sloužících k výpočtu koeficientu difuzity metodou hraniční roviny bylo navrženo polokruhové pole s poloměrem  $l_{RM} = 5$  m. Krok metody byl zvolen na  $\zeta = 3,75^\circ$ , což odpovídá vytvoření polokruhového pole s lineárním rozložením se 48 senzory. Je nutné dbát na přesné rozmístění senzorů. Pole zdrojů zvuku bylo navrženo o poloměru  $l_{RL} = 10$  m. Zdroje zvuku byly rozmístěny v úhlech  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  a  $150^\circ$ . Měření probíhalo v Roudnici nad Labem ve sportovní hale s rozměry  $50 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ . Za účelem simulace akustických veličin a chování vln byl vytvořen v SW SketchUp model haly, ve které probíhalo měření. Tento model je zobrazen na obr. D.1 a je možné ho importovat i s použitými materiály do SW Ease. Měřené vzorky mají rozměry  $1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ . Na obr. 3.3 jsou zobrazeny výskyty zrcadlových zón v našem konkrétním případě.



Obr. 3.5: Rozložení senzorů, zdrojů zvuku a jejich značení v poli.

Zde je patrné, že podmínka minimálního počtu senzorů nacházejících se mimo zrcadlovou zónu odrazů je s přehledem splněna pro všechny polohy zdroje zvuku.

K záznamu zvuku byl použit software Easera od společnosti AFMG a jako testovací signál byl zvolen signál MLS. Vzorovací kmitočet byl zvolen na  $f_{vz} = 44\,100$  Hz. Jelikož není možné ke zvukové kartě RME FF400 připojit více než 18 vstupních kanálů, každé měření bylo rozděleno do tří částí v rozsahu úhlů  $0^\circ$ - $56,25^\circ$ ,  $60^\circ$ - $116,25^\circ$  a  $120^\circ$ - $176^\circ$ . Pro každý rozsah úhlů a všechny polohy zdroje zvuku byly naměřeny impulsové odezvy v tomto pořadí:  $h_3(t)$  (impulsová odezva zdroj-mikrofon),  $h_2(t)$  (impulsová odezva pozadí bez vzorku),  $h_1(t)$  (impulsová odezva pozadí se vzorkem) a  $h_{1f}(t)$  (impulsová odezva pozadí s referenční deskou). Tato data jsou klíčová ke správnému výpočtu koeficientu difuzity. Výsledné odezvy byly poté uloženy ze software Easera v textovém formátu \*.etx. Rozložení pole a jednotlivé značení sensorů a zdrojů zvuku používané při volání a zpracování dat je zobrazeno na obr. 3.5.

## 3.7 Opakovatelnost, stabilita a vlivy vzorku na měření

V rámci měření probíhalo několik náměrů z důvodu otestování opakovatelnosti a stability měření.

- Stabilita měření - charakterizuje celkovou proměnlivost výsledků měření daného parametru v delším časovém úseku při zachování všech jeho charakterizujících parametrů.
- Opakovatelnost měření - definuje shodnost měření v podmínkách opakovatelnosti, kterými jsou podmínky, kdy je dodržena volba stejné metody, nezměněná měřicí aparatura, zachován stacionární přenosový kanál a měření provádí stejný operátor měření.
- Reprodukovatelnost měření - udává shodnost výsledku, kdy výsledky měření se získávají v různých laboratořích s různou měřicí aparaturou na stejných měřených vzorcích.

### 3.7.1 Stabilita měření

Z důvodu finanční náročnosti na měřicí aparaturu a celého procesu nemohla být reprodukovatelnost měření zkoumána. V ostatních případech bylo změřeno nedostatečné množství náměrů na správné stanovení těchto parametrů. Cílem tohoto srovnání bylo pouze získat představu o změnách ve výsledných parametrech souvisejících s touto problematikou.

Výsledná srovnání jsou zobrazena na obr. 3.6 s ohledem na velikost měřeného vzorku. Rozdíly mezi jednotlivými měřeními jsou nejvíce patrné u vzorku s nejmenšími rozměry. U malých vzorků hraje zásadní vliv přesnost umístění vzorku v prostoru a zároveň jednotlivé rozdíly rozmístění měřicí aparatury. V současné době není možné zaručit neměnný přenosový kanál, a to z důvodu dynamického rozmístění kabeláže k jednotlivým sensorům. Vliv na výsledné koeficienty má také přesnost kalibračního měření.

Vliv na vzorky s většími rozměry není zcela tak patrný jako v předchozím případě a způsobené rozdíly byly popsány výše.

### 3.7.2 Vliv referenční desky na měření koeficientu difuzity

Dále byl zkoumán vliv referenční desky na výsledný koeficient difuzity. Toto srovnání bylo provedeno z důvodu určitého zjednodušení měření a zkrácení času potřebného na změření jednoho vzorku. Měření bylo prováděno s dvěma typy referenčních desek. V prvním případě se jednalo o tenkou, hladkou MDF desku síly 12 mm. V druhém případě se vždy jednalo o vzorek otočený o 180°. Zadní strana každého vzorku je tvořena hladkou deskou. Cílem bylo zjistit, jak velké rozdíly v měření budou patrné.

Dle předpokladů se rozdíly projevovaly ve většině případů na nízkých kmitočtech. Tento jev je způsoben jak rozdílnou impedancí povrchu referenční desky, tak také tuhostí desky. Na obr. 3.7 jsou zobrazeny výsledné koeficienty difuzity pro všesměrový dopad  $d_{00}$  v závislosti na typu referenční desky. V případě vzorků o velikosti  $600 \times 1\,200$  mm a  $600 \times 1\,800$  mm je  $d_{00}$  odlišný pro  $f < 800$  Hz a maximální rozdíl je roven  $\Delta d_{00} = 0,14$ . Vznik tohoto rozdílu byl popsán výše.

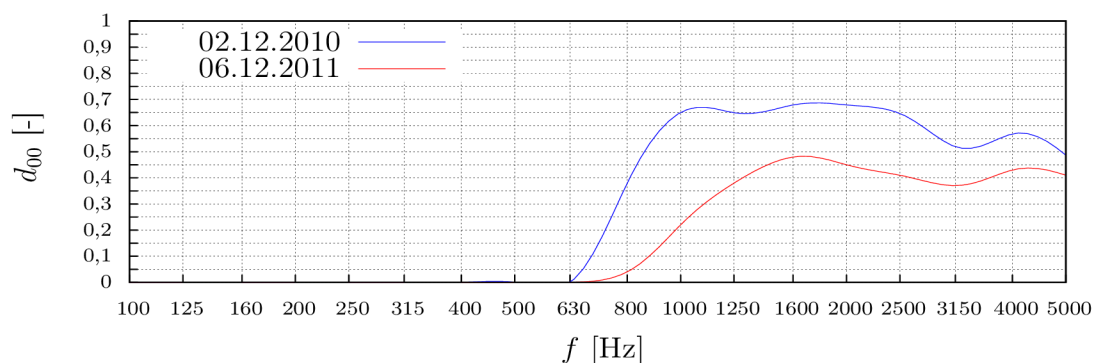
U vzorku velikosti  $600 \times 600$  mm je maximální rozdíl roven opět  $\Delta d_{00} = 0,14$ , avšak pásmo, u kterého se tento rozdíl projevuje, je posunuto k vyšším kmitočtům pro  $f = 500\text{--}2\,500$  Hz. Tento rozdíl u vzorku malých rozměrů je do jisté míry způsoben umístěním vzorku v prostoru, viz kap. 3.7.1. Dalším důvodem vzniku rozdílu je také, jako v předešlém případě, změna akustické impedance povrchu, který byl popsán u vzorků větších rozměrů a v neposlední řadě i odrazy od bočnic difuzoru.

### 3.7.3 Vliv velikosti vzorku na měření koeficientu difuzity

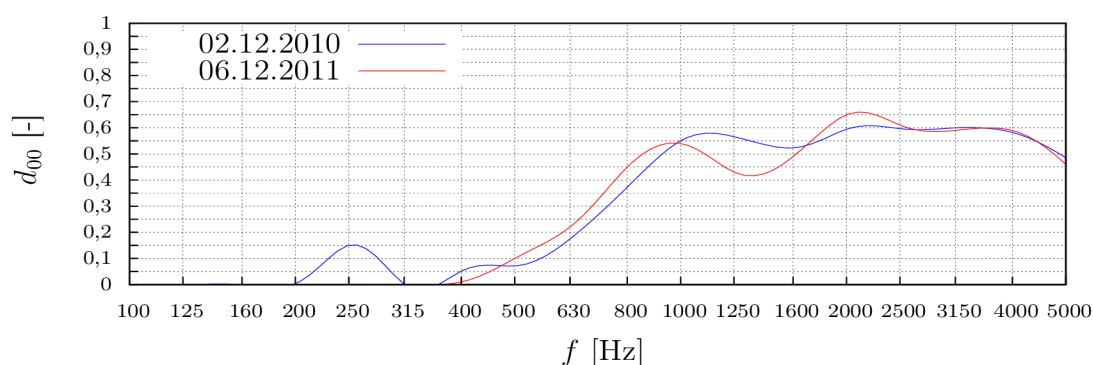
Podstatnou roli na výsledném koeficientu difuzity hrají také rozměry měřeného vzorku. Výsledný dopad nelze předem určit, a to z důvodu závislosti na struktuře a typu difúzního panelu. Srovnání 1D QRD struktury je zobrazeno na obr. 3.8.

Parametr, jehož vliv nelze zanedbat, je právě vlnová délka  $\lambda$ . Pro rozměry vzorku velikosti  $600 \times 600$  mm je koeficient ve frekvenčním rozsahu  $f = 100\text{--}500$  Hz nulový. Tento rozsah odpovídá vlnové délce  $\lambda = 0,68\text{--}3,4$  m. Při těchto vlnových délkách se

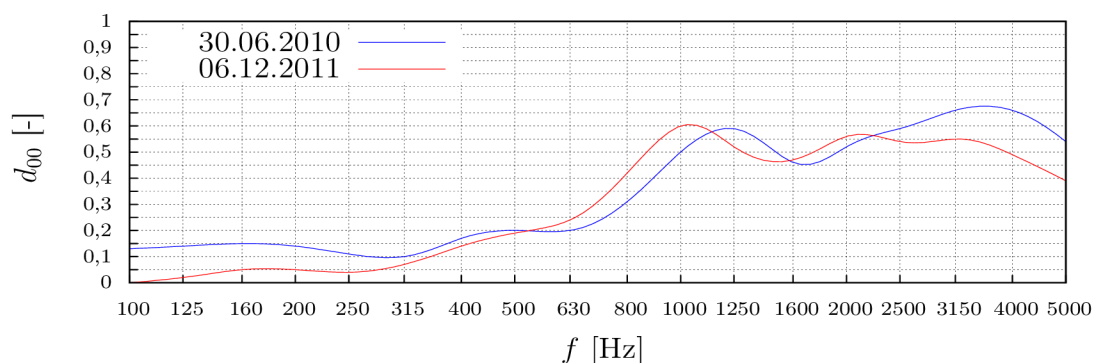
a)



b)

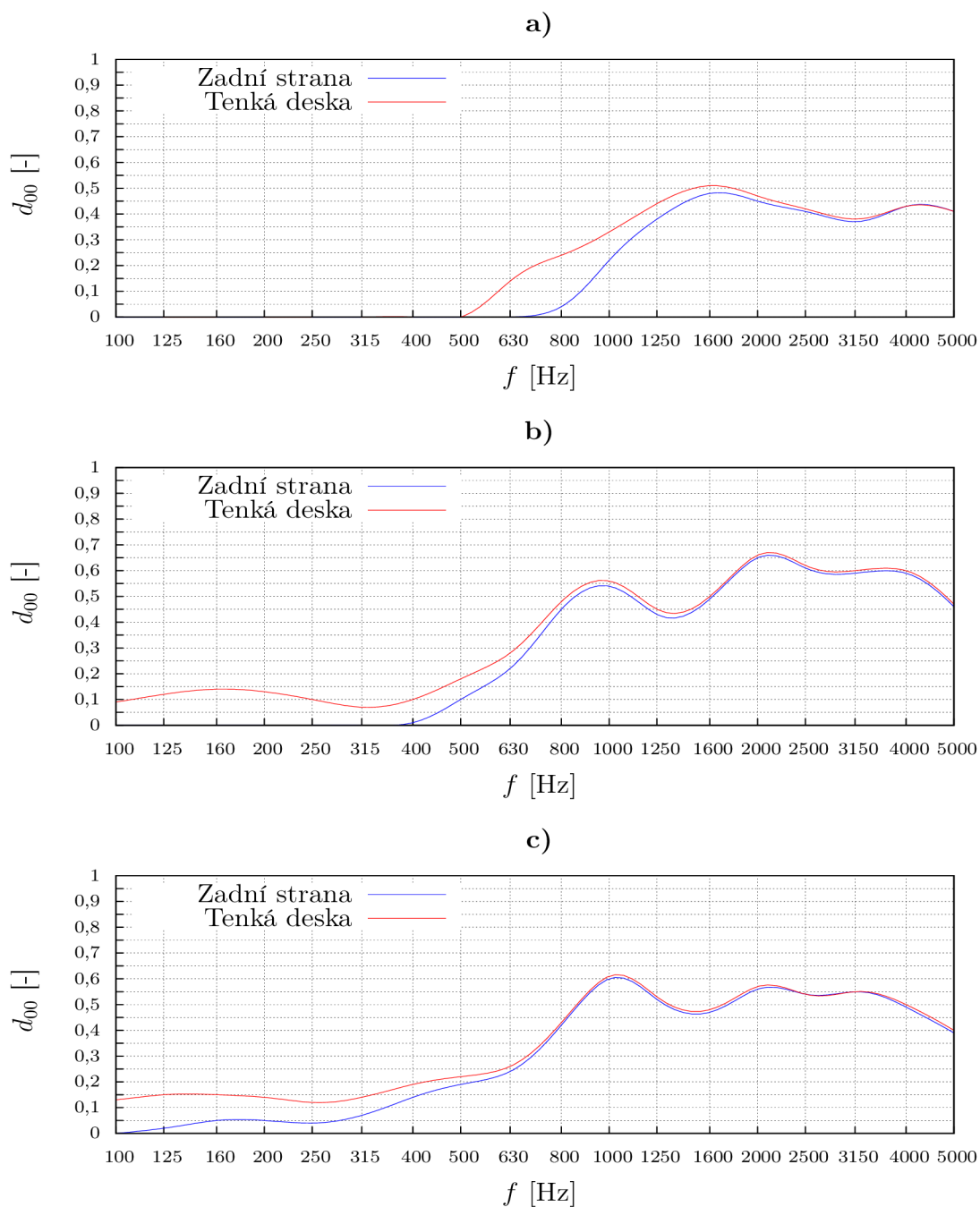


c)



Obr. 3.6: Porovnání stability měření difuzoru s 1D QRD strukturou o rozměrech:  
a)  $600 \times 600$  mm, b)  $600 \times 1200$  mm, c)  $600 \times 1800$  mm.

projeví ohyb zvuku a dochází k úniku akustické energie mimo měřený vzorek. Proto není možné zaznamenat v tomto frekvenčním intervalu koeficient difuzity. Zřetelně je možné tuto problematiku sledovat pokud za referenční odrazivou desku zvolíme zadní stranu vzorku. V tomto případě dochází k minimální změně přenosového ka-

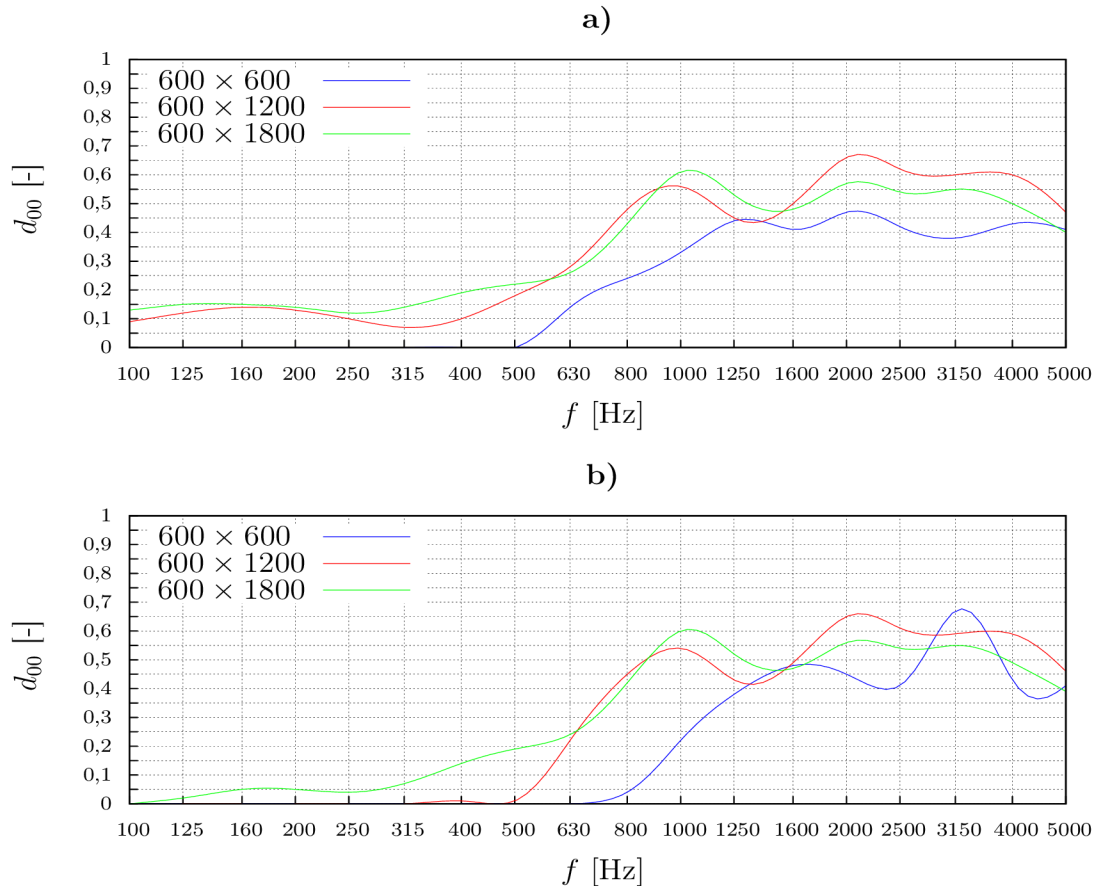


Obr. 3.7: Porovnání různých typů referenčních desek 1D QRD struktury na všesměrový koeficient difuzity  $d_{00}$ : a)  $600 \times 600$  mm, b)  $600 \times 1200$  mm, c)  $600 \times 1800$  mm.

nálu, akustická impedance zůstává stejná a frekvenční rozsah měřených koeficientů difuzity se s přibývajícím rozměry zvětšuje k nízkým kmitočtům.

### 3.8 Zpracování dat

Pro automatické zpracování dat se používají softwarové nástroje pod licenci GNU Octave, GNUplot a  $\text{\LaTeX}$ . Jednotlivou komunikaci mezi těmito software a předávání parametrů zajišťuje unixový shell *Bash*. Testování software probíhalo na operačním systému Ubuntu 11.10 a verzích software Octave v. 3.2.4, GNUplot v. 4.4.3 a  $\text{\LaTeX}$  (TEX Live 2011). Skripty a funkce pro Octave jsou kompatibilní i se software Matlab. Veškeré části zpracování jsou testovány na operačních systémech MAC OS X, Windows a Linux. Plná kompatibilita je zaručena pro systém Linux a MAC OS X, pro které jsou napsány vazební shellové skripty. Operační systém Linux byl vybrán opět pro možnost distribuovat SW pod GNU licenci. Pro lepší kontrolu nad probíhajícími skripty je v průběhu měření podávána uživateli informace o stavu zpracování. Pro následné zkontrolování průběhu zpracování je informace také uklá-



Obr. 3.8: Porovnání vlivu velikosti 1D QRD vzorku na všesměrový koeficient difuzity  $d_{00}$  pro typy referenčních desek: a) tenká deska MDF 12 mm, b) zadní strana vzorku.



dána do Log souboru. Výsledné zpracování se všemi daty umožní skript uživatelsky zvolit možnost zálohy a komprimaci všech vypočtených dat.

### Výpočty směrových charakteristik a koeficientů difuzity

O veškeré výpočty dle teoretických předpokladů se starají skripty a funkce Octave. Zde probíhá import dat z textových souborů software Easera \*.etx (soubory jsou ukládány do struktur a matic) a dále samotný výpočet popsáný v kapitole 2.2. Jediný nutný uživatelský zásah je v případě neúplných měření (z důvodu použití stejných dat). Proto uživatel musí tuto informaci definovat do souboru *conf.ini*. Výstupem výpočtů jsou textové soubory (\*.txt) pro žádané grafické výstupy s definovanou strukturou. Veškerá načtená data ze souborů jsou uložena do struktur, aby mohl být výpočet v budoucnu kdykoli znovu zopakován.

### Grafické zobrazení výsledků

Pro lepší interpretaci výsledků jsou data zobrazena do grafů vyjadřujících směrové charakteristiky pro daný směr dopadu a závislost koeficientu difuzity na frekvenci při daném směru dopadu. Pro toto zobrazení byl použit software GNUplot, který umožňuje plnou kontrolu nad grafickým výstupem. Pro překlad byly využity terminály *epslatex* a *postscript eps*. První zmíněný terminál *epslatex* nám umožňuje kontrolovat textovou část grafického výstupu plně v sazebním systému L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Terminál *postscript eps* nám umožňuje zobrazit i ty výsledky, které není třeba uvádět do následného protokolu, ale mají důležitou informační hodnotu pro následnou korekci panelů.

### Tvorba měřicího protokolu

Pro tato měření byla navržena jednotná šablona pro L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, která umožňuje interpretaci nejdůležitějších dat. Byly vytvořeny dvě jazykové mutace (angličtina, čeština). Ve výsledném protokolu jsou zobrazena pouze nejdůležitější data z měření, tj. směrové charakteristiky pro všechny polohy zdroje a koeficient difuzity pro všesměrový dopad  $d_{00}$ . Kompletní soubor grafů je poté obsažen pouze ve formátu \*.eps. Zdrojová data pro každý protokol jsou vytvářena v průběhu měření do inicializačního souboru, se kterým dále šablona pro sazbu pracuje. V tomto případě je nutné uživatelsky zadat popis měřeného vzorku právě do tohoto souboru.

### Propojovací skripty

I když Octave umožňuje využívat vnitřní unixové a Bash příkazy, bylo přistoupeno k vytvoření těchto propojovacích a předávacích skriptů. Důvody tohoto rozhodnutí

jsou následující: možnost plné kompatibility se všemi operačními systémy (nutno pouze zaměnit tyto skripty), oddělení části zpracování dat všemi potřebnými SW (o předávání hodnot se starají tyto skripty) a v neposlední řadě také přehlednost kódu pro následné úpravy a snadnější detekce chyb.

### 3.9 Shrnutí výsledků měření koeficientu difuzity

Při měření bylo naměřeno 21 testovacích vzorků, kde byl kladen velký důraz na splnění všech vstupních podmínek. Jelikož je příprava měření časově náročná, ve většině případů se měření provádí právě s většími počty vzorků, a proto byla aplikace na výpočet koeficientu difuzity navržena tak, aby dokázala najednou zpracovat větší množství vzorků. Důraz byl kladen také na minimální zásah uživatele a možnost automatického zpracování. Jelikož mají zdrojová data velký objem (v řádu jednotek GB), je rychlost zpracování dat závislá především na velikosti paměti RAM a swap oddílu. Pro účely testování byl zvolen, z důvodu možnosti nastavení různých HW parametrů, pro běh operačního systému virtualizační nástroj s dedikovanými 2 GB operační paměti a dva procesory o taktu 2,4 GHz. Vypočtená data korespondují s fyzikálními a teoretickými předpoklady vzorků. V protokolu jsou udávány směrové charakteristiky pro veškeré polohy zdroje zvuku a koeficient difuzity pro všesměrový dopad  $d_{00}$ . Tyto parametry nejlépe vystihují daný prvek. Ostatní data jsou dostupná mimo obsah protokolu. Jelikož není zaručena plná kompatibilita rozšířených interních funkcí mezi software Matlab a Octave, většina problémových funkcí byla nahrazena jako uživatelské funkce, které tuto kompatibilitu zaručí. Do směrových charakteristik byly vyneseny křivky odezvy měřeného vzorku, odezva referenční desky a interpolovaná křivka polynomem  $n$ -tého stupně pro vyhlazení průběhu. Z důvodu simulace akustických parametrů také vznikl model měřeného prostoru, který lze importovat do většiny akustických SW.

## 4 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla zkoumána problematika měření koeficientu difuzity. V rámci zpracování byla popsána metoda měření koeficientu difuzity hraniční rovinou, její teoretické předpoklady, postup měření a jednotlivé omezující parametry metody.

Její modifikace byla implementována v prostředí Octave, kde se ověřovala funkčnost odvozených teoretických postupů, vhodnost metody a její implementace do dostupných prostor. V tomto prostředí byly navrženy funkce, které umožňují pracovat s daty ze software Easera a funkce potřebné pro následné zpracování. Veškerý kód navržený pro Octave je navržen tak, aby byla zaručena plná kompatibilita s prostředím Matlab. Funkce využívající se při zpracování byly navrženy s ohledem na budoucí využití při řešení problematiky měření scatteringu. Pro grafické výstupy byl použit software GNUplot, který umožňoval plnou kontrolu nad vytvářenými grafy a možnost grafického sjednocení všech interpretovaných výsledků. V rámci návrhu byl také vytvořen dvojjazyčný návrh protokolu (záznam o měření) v sazebním systému L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, který dokáže jednotnou formou interpretovat dosažené výsledky. Komunikace mezi jednotlivými částmi je zajištěna Bash skripty unixového shellu. Proto je plně automatická funkčnost zaručena v operačních systémech Linux a MAC OS X.

Samotné výsledky měření byly porovnávány s teoretickými předpoklady vzorků při jejich návrhu a se SW AFMG Reflex. Porovnávání dat naměřených v jiných laboratořích a ústavech prozatím možné není, protože nejsou dostupné podmínky, za kterých se tyto parametry měří. Větší rozsah měření bude nejspíše probíhat až při konečném potvrzení normy zabývající se měřením koeficientu difuzity a jejich jednotné interpretace. V rámci měření došlo k porovnání opakovatelnosti a stability měření a porovnání vlivu rozměrů vzorku a vlivu referenčních desek na výsledný koeficient difuzity. Dále byly porovnány různé volby kroku metody.

Následně byla také navržena modifikace měřicí aparatury, umožňující minimalizovat chyby vzniklé při měření a také zvýšit efektivnost a snížit náklady potřebné na měření. Pro tuto modifikaci byla navržena šablona pro multi-trackové systémy Nuendo, Avid Pro-Tools a Logic, což umožňuje automatizovat celé měření jednoho vzorku a možnost volit zdroje signálu.

V dalším výzkumu problematiky měření akustických parametrů by bylo užitečné se zaměřit na rozšíření měření o možnost měření scatteringu. Dále by bylo užitečné zvolit jednotný programovací jazyk, který by umožnil i během měření zobrazit určitý náznak výsledného zpracování a následně také zvážit možnost a přínos přesměrovat výpočty do GPU či otestovat možnosti zpracování na vzdálených výpočetních serverech (např. Amazon EC2).

## LITERATURA

- [1] COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. *Acoustic Absorbers and Diffusers : Theory, design and application*. Second edition. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN : Taylor & Francis, 2009. 476 s. ISBN 0-203-89305-0. [kniha]
- [2] VIGRAN, Tor E. *Building Acoustics*. First edition. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN : Taylor & Francis, 2008. 362 s. ISBN 0-203-93131-9. [kniha]
- [3] LONG, Marshall. *Architectural Acoustic*. First edition. 84 Theobald's Road, London WC1 X 8RR, UK : Elsevier Academic Press, 2006. 844 s. ISBN 978-0-12-455551-8, 0-12-455551-9. [kniha]
- [4] EVEREST, Alton F. *Master Handbook of Acoustic*. Fourth edition. Columbus, OH 43272 : McGraw-Hill, 2001. 615 s. ISBN 0-07-139974-7. [kniha]
- [5] ISO/DIS 47497-2. *Acoustic - Sound-Scattering properties of surfaces : Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field*. Geneva : ISO, 03-07-2011. 16 s. ISO/TC 43/SC2. [standard]
- [6] VONDRÁŠEK, Martin; ANTEK, Michael. *Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů*. Akustické listy. 2005, 11(3), s. 9-18. ISSN 1212-4702.
- [7] VORLANDER, Michael. *Auralization : Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. First edition. Germany : Springer, 2008. 335 s. ISBN 978-3-540-48830-9.

## SEZNAM ZKRATEK

ACH	bezodrazová komora – Anechoic Chamber
FT	Fourierova transformace - Fourier Transform
GNU	všeobecná veřejná licence - General Public License
GPU	grafický procesor - Graphic Processing Unit
IFT	inverzní Fourierova transformace - Inverse Fourier Transform
ITDT	počáteční prodleva - Initial Time Delay Gap
MADI	komunikační protokol pro přenos multikanálového audia - Multichannel Audio Digital Interface
MDF	polotvrdá dřevovláknitá deska - Medium Density Fibreboards
DOA	směr příchodu signálu - Direction of Arrival
MLS	posloupnost maximální délky - Maximum Length Sequence
$R_T$	doba dozvuku – Reverberation Time
SDI	koeficient difuzity - Surface Diffusion Index
SZ	zrcadlová zóna - Specular Zone
TAR	hraniční rezervovaný prostor - Terminal Area Reserved

## SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

$\alpha$	koeficient zvukové pohltivosti
$\alpha_E$	Eyringův činitel pohltivosti
$\alpha_{MID}$	střední hodnota koeficientu pohltivosti
$\varsigma$	koeficient zvukové průzvučnosti
$\delta$	úhel difrakce
$\varrho$	polorovina odrazu
$\Theta$	teplota
$\phi$	relativní vlhkost vzduchu
$\lambda$	vlnová délka
$\lambda_d$	vlnová délka difrakce
$\lambda_i$	vlnová délka budící vlny
$\lambda_{struct}$	konstrukční vlnová délka difuzoru
$\beta$	úhel dopadu zvukové vlny
$\beta'$	úhel odrazu zvukové vlny
$\rho_p[n]$	sled výkonových spektrálních hustot Diracova impulsu
$\zeta$	krok měření metody
$\varphi_n$	fázové zpoždění mezi vlnou přímou a odraženou
$a_n$	posloupnost přepážek 1D QRD difuzoru
$c$	rychlost zvuku
$d$	koeficient difuzity
$\mathbf{d}_0$	vektor představující velikost intenzity zvuku dopadající na materiál a její směr
$\mathbf{d}'_0$	alternativní zrcadlený vektor představující velikost intenzity zvuku dopadající na materiál a její směr
$d_\Psi$	koeficient difuzity pro daný úhel $\Psi$

$d_{\Psi,r}$	normalizovaný koeficient difuzity pro daný úhel $\Psi$
$d_{\Psi,f}$	koeficient difuzity referenční odrazivé desky pro daný úhel $\Psi$
$d_{00}$	koeficient difuzity pro všesměrový dopad
$\Delta d_{00}$	změna/rozdíl koeficientu difuzity pro všesměrový dopad
$d_{k\Delta x}$	hloubka části $\Delta x$
$d_n$	hloubka šachty 1D QRD difuzoru
$f$	kmitočet
$f_{d_{\min}}$	konstrukční dolní kmitočet difuzoru
$f_{d_{\max}}$	konstrukční horní kmitočet difuzoru
$f_k$	kritický kmitočet
$f_s$	střední kmitočet
$f_{vz}$	vzorkovací kmitočet
$h_1(t)$	impulsová odezva pozadí se vzorkem
$h_{1f}(t)$	impulsová odezva pozadí s referenční deskou
$h_2(t)$	impulsová odezva pozadí bez vzorku
$h_3(t)$	impulsová odezva zdroj-mikrofon
$h_4(t)$	dekonvoluovaná impulsová odezva vzorku
$h_{4f}(t)$	dekonvoluovaná impulsová odezva referenční desky
$h_{12}(t)$	impulsová odezva bez přenosové funkce systému pro měřený vzorek
$h_{12f}(t)$	impulsová odezva bez přenosové funkce systému pro referenční desku
$h[n]$	přenosová funkce
$l_s$	délka difuzního prvku
$l_{RL}$	poloměr půlkruhu zdrojů signálu
$l_{RM}$	poloměr půlkruhu mikrofonů
$p$	počet laloků směrové charakteristiky pro $f_{d_{\min}}$ při kolmém dopadu budící vlny

$p(t)$	impulsová odezva
$r$	koeficient zvukové odrazivosti
$r_x$	vzdálenost od měřeného vzorku
$r_{ss}$	stejnoseměrná složka
$s$	koeficient scatteringu
$s$	šířka šachty 1D QRD difuzoru
$t_d$	tloušťka přepážky 1D QRD difuzoru
$t$	čas
$t_{\min}$	dolní hranice časového zpracovávaného okna
$t_{\max}$	horní hranice časového zpracovávaného okna
$t_s$	čas těžiště impulsové odezvy
$\Delta t_{xydB}$	čas poklesu o xy dB
$u$	vzdálenost pozorování od bodového zdroje
$v_{faz}$	fázová rychlost
$\Delta x$	velikost částí difúzního panelu
$x[n]$	vstupní signál
$x^2[k]$	posloupnost vzorků signálu
$A(\delta)$	amplituda vln rozptylovaných difuzorem pro daný úhel
B	hraniční rezervovaný prostor
$C_{50}$	míra zřetelnosti
$C_{80}$	míra jasnosti
D	měřený vzorek
$D_{50}$	zřetelnost
$E$	zvuková energie
$E_{DT}$	počáteční doba dozvuku

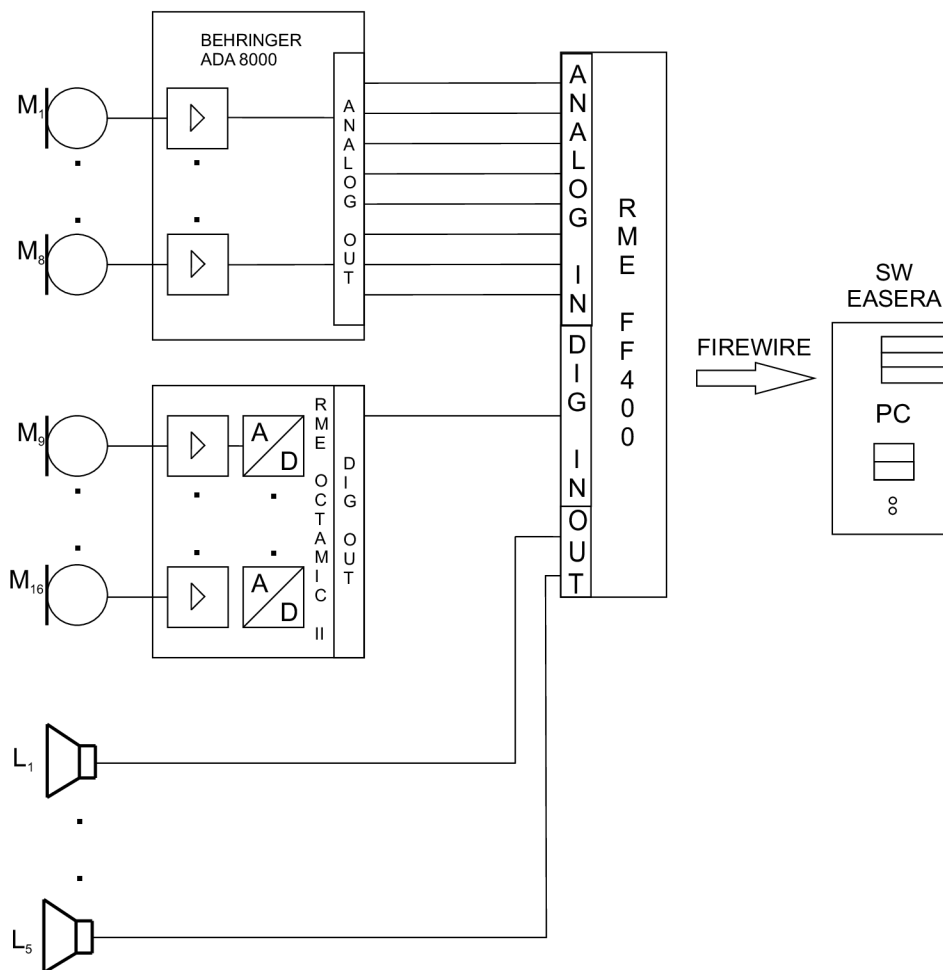


$G$	počet šachet 1D QRD difuzoru
$H$	horizontální poloosa elipsy hraničního rezervovaného prostoru
$I$	intenzita zvuku
$I_0$	intenzita zvuku dopadající na materiál
$I_A$	intenzita zvuku vstupující do materiálu
$I_P$	Intenzita zvuku vstupující do druhého prostředí
$I_R$	intenzita odraženého zvuku
$I_T$	intenzita zvuku přeměněná na tepelnou energii
$K$	počet vzorků signálu
$L$	zdroj zvuku
$L_{MLS}$	perioda délky pseudonáhodné sekvence signálu MLS
$M$	měřicí senzor
$N$	počet částí difúzního panelu
$P$	střední hodnota okamžitého akustického výkonu
$R$	stupeň vzduchové neprůzvučnosti
$R_T$	doba dozvuku
$R_{TE}$	doba dozvuku dle Eyringa
$R_{TM}$	doba dozvuku dle Millingtona
$R_{TS}$	doba dozvuku dle Sabina
$R_{p_{xx}}$	autokorelační funkce MLS signálu
$R_{p_{xy}}$	vzájemná korelační funkce systému
$S$	obsah
$T$	perioda signálu
$V$	objem
$W$	vertikální poloosa elipsy hraničního rezervovaného prostoru

# SEZNAM PŘÍLOH

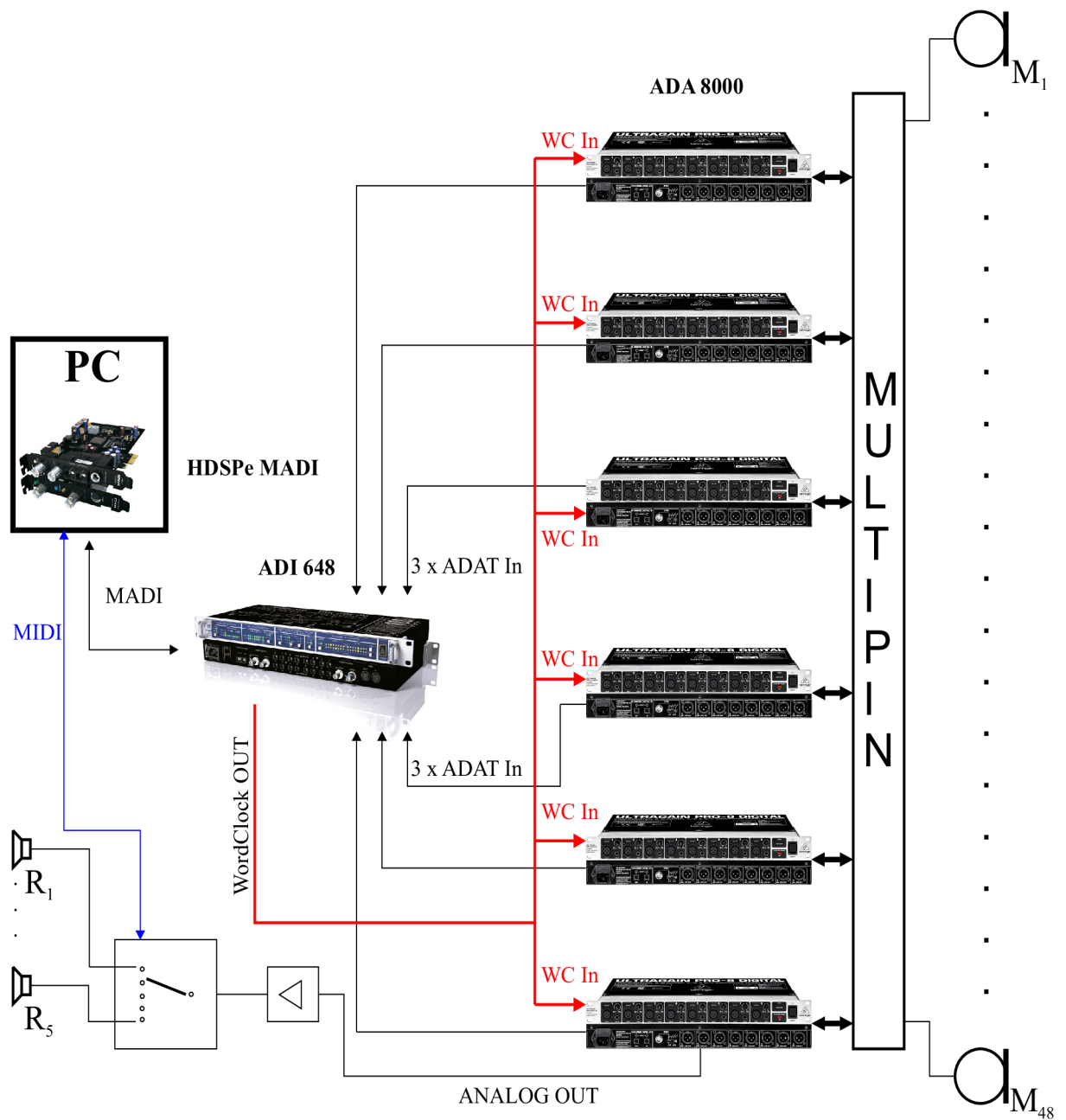
A	Měřicí aparatura	62
B	Modifikovaná měřicí aparatura	63
C	Záznam o měření koeficientu difuzity	64
D	Model měřicí haly	72
E	Obsah přiloženého DVD	73

# A MĚŘICÍ APARATURA



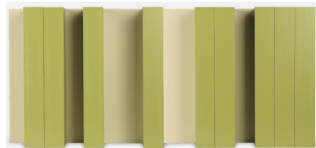
Obr. A.1: Zapojení měřicí aparatury.

## B MODIFIKOVANÁ MĚŘICÍ APARATURA



Obr. B.1: Modifikovaná měřicí aparatura.

# C ZÁZNAM O MĚŘENÍ KOEFICIENTU DIFUZIVITY

<b>Záznam o měření koeficientu difuzity</b> technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2		List: 1 z 8	Číslo měření: M11-002-0630-01
<p><b>Výrobek:</b> AUDITON Rail <b>Výrobce:</b> SONING Praha a.s.</p> <p><b>Popis vzorku:</b> Difuzní prvek AUDITON RAIL je jedním z mnoha difuzorů navržených na principu MLS, který rozptyluje zvuk v jedné rovině. Panel AUDITON RAIL, vyrobený z materiálu na bázi dřeva, je nutno instalovat na vyrovnávací rošt. Při návrhu roštu je nutné zohlednit značnou hmotnost samotného akustického prvku pohybující se v rozmezí 45 – 80m<sup>2</sup>.</p>			
			
<b>Rozměry:</b>	600×1200 mm	<b>Poloměr oblouku mikrofonů:</b>	5 m
<b>Plocha:</b>	1,08 m <sup>2</sup>	<b>Poloměr oblouku zdroje:</b>	10 m
<b>Měřítko:</b>	$N = 1 : 1$	<b>Počet poloh zdroje:</b>	5
<b>Zkušební místnost:</b>	Sportovní hala v Roudnici nad Labem	<b>Datum měření:</b>	30. června 2011
<b>Rozměry:</b>	50×30×15 m	<b>Teplota vzduchu:</b>	25 °C
<b>Objem:</b>	18000 m <sup>3</sup>	<b>Relativní vlhkost:</b>	67 %
		<b>Tlak vzduchu:</b>	1004 hPa
<b>Použité měřicí přístroje:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Sada 16 mikrofonů COUNTRYMAN MEMWP4FFF05B</li> <li>○ Osmikanálový mikrofonní předzesilovač RME OCTAMIC II</li> <li>○ Osmikanálový mikrofonní předzesilovač BEHRINGER ULTRAGAIN PRO-8 DIGITAL ADA 8000</li> <li>○ Externí zvuková karta RME FIREFACE 400</li> <li>○ PC s měřicím SW EASERA</li> </ul>			
		<b>MikySound.com</b> Dlouhé Dvory 24, 50312, Věstary Zpracování zvuku v reálném čase	
		Datum vzniku záznamu: 30. října 2011 Odpovědný pracovník: Petr Mikeš	

## Záznam o měření koeficientu difuzity

technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:

2 z 8

Číslo měření:

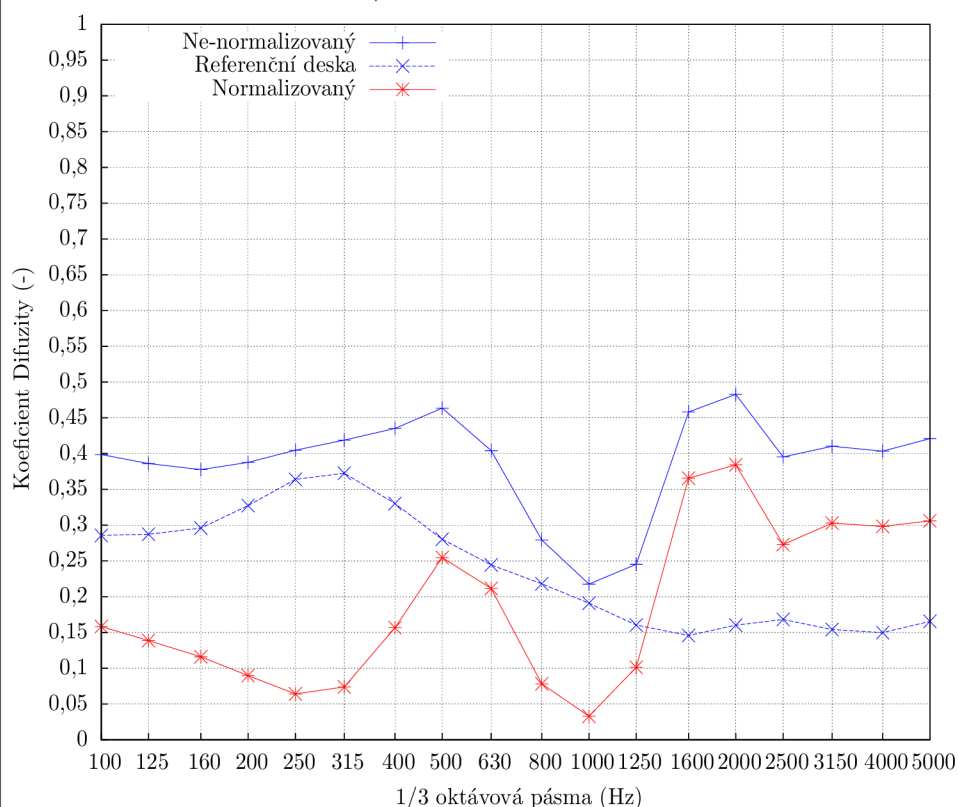
M11-002-0630-01

### Výsledky měření technikou hraniční roviny dle ISO 17497-2

- Koeficient difuzity měřeného vzorku ( $d$ )
  - Koeficient difuzity referenční plochy ( $d_r$ )
  - Normalizovaný koeficient difuzity ( $d_n$ )
- pro všesměrový dopad v třetinooktávových pásmech

$f$ (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1k25	1k6	2k	2k5	3k15	4k	5k
$d$ (-)	0,40	0,39	0,38	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,40	0,28	0,22	0,25	0,46	0,48	0,40	0,41	0,40	0,42
$d_r$ (-)	0,29	0,29	0,30	0,33	0,36	0,37	0,33	0,28	0,24	0,22	0,19	0,16	0,15	0,16	0,17	0,15	0,15	0,17
$d_n$ (-)	0,16	0,14	0,12	0,09	0,06	0,07	0,16	0,25	0,21	0,08	0,03	0,10	0,37	0,38	0,27	0,30	0,30	0,31

### Koeficient difuzity v 1/3 oktávových pásmech pro všesměrový odraz



MikySound.com

Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetareny

Zpracování zvuku v reálném čase

Datum vzniku záznamu:

30. října 2011

Odpovědný pracovník:

Petr Mikeš

**Záznam o měření koeficientu difuzity**  
technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:  
3 z 8

Číslo měření:  
M11-002-0630-01

**Tabulkové vyjádření směrové charakteristiky pro kolmý dopad**

Úhel (°)	Třetinooktávová pásma (Hz)																	
	100 (dB)	125 (dB)	160 (dB)	200 (dB)	250 (dB)	315 (dB)	400 (dB)	500 (dB)	630 (dB)	800 (dB)	1k (dB)	1k25 (dB)	1k6 (dB)	2k (dB)	2k5 (dB)	3k15 (dB)	4k (dB)	5k (dB)
0.0	41,2	41,2	38,8	36,4	44,5	52,0	57,4	59,4	57,7	58,1	58,9	58,2	57,7	59,8	60,1	59,7	62,1	61,3
3.75	40,1	39,4	35,8	39,1	47,2	53,4	58,4	61,1	61,5	58,8	52,3	54,7	57,6	55,6	57,5	58,9	59,0	59,2
7.50	44,9	45,0	43,6	43,2	45,0	48,2	50,3	49,2	47,7	51,9	51,8	57,7	60,9	62,6	65,0	64,9	63,4	61,7
11.25	44,3	45,4	45,4	45,5	43,9	42,4	51,7	58,3	61,9	61,3	57,5	55,9	57,7	60,0	64,7	65,5	63,2	61,6
15.0	41,2	43,2	44,7	46,5	47,5	47,4	51,4	58,2	62,7	62,9	64,5	65,2	62,1	58,8	66,5	67,7	62,9	60,1
18.75	41,2	43,8	46,3	49,5	52,0	53,7	55,2	58,4	62,2	62,6	65,9	67,3	66,1	64,0	64,0	68,7	69,0	67,1
22.50	22,1	28,2	33,8	40,0	45,5	50,8	56,3	60,3	62,3	63,1	67,5	69,3	69,0	69,0	68,5	67,8	69,0	69,2
26.25	44,0	43,7	41,8	43,5	49,1	54,5	59,2	61,9	63,1	65,1	68,4	73,1	74,2	73,8	75,9	77,6	77,1	75,0
30.0	47,8	46,8	43,8	48,3	54,1	58,2	60,8	62,2	64,6	66,6	67,4	71,2	74,3	75,1	78,1	80,1	79,7	78,7
33.75	48,3	50,3	51,7	53,5	55,0	57,2	61,6	65,4	67,5	67,9	70,2	71,7	72,2	72,7	74,2	75,4	75,5	76,2
37.50	49,6	52,2	54,1	56,2	57,6	58,5	60,8	63,5	65,1	66,9	69,4	68,9	65,8	66,1	70,4	73,3	72,3	69,9
41.25	45,8	48,4	50,5	52,9	54,8	56,3	58,6	61,0	63,0	64,9	65,8	64,6	63,7	64,6	63,1	66,3	67,1	64,6
45.0	34,8	36,7	38,2	41,1	45,1	49,9	54,9	57,8	58,0	54,4	53,8	62,5	64,2	61,5	62,3	63,9	63,5	65,2
48.75	35,7	37,0	37,8	41,2	46,1	51,4	56,2	58,5	57,8	57,2	59,3	60,4	61,0	65,0	66,1	63,2	59,8	60,7
52.50	41,5	44,7	47,7	51,3	54,1	56,0	56,7	54,9	55,9	61,7	63,4	61,0	58,7	61,2	61,7	62,3	60,8	59,7
56.25	40,8	43,8	46,4	49,5	51,6	52,3	50,6	51,6	57,2	58,1	58,4	59,3	58,1	60,2	61,9	63,3	63,8	63,7
60.0	42,9	45,0	46,2	47,4	47,3	45,7	48,0	52,3	53,2	50,8	54,0	55,3	56,9	59,5	59,8	58,4	58,0	56,9
63.75	38,9	40,1	40,2	40,3	38,9	34,4	39,8	45,6	48,0	51,6	54,1	53,6	50,0	50,6	52,7	55,5	56,4	56,3
67.50	38,3	39,4	39,5	39,7	38,5	36,4	42,1	47,5	50,3	51,3	49,6	51,5	54,1	52,4	52,4	56,0	55,9	57,5
71.25	36,3	37,5	37,7	38,3	38,0	35,9	32,4	40,3	48,0	51,4	51,0	48,8	51,7	55,7	56,7	56,5	56,5	57,1
75.0	39,5	41,1	42,0	43,3	43,5	42,5	42,7	46,1	47,2	47,5	51,0	52,4	53,2	55,3	54,7	53,8	55,5	55,4
78.75	40,2	42,0	43,0	44,3	44,4	42,4	39,1	44,1	47,1	46,7	46,1	51,0	53,5	55,4	60,8	61,0	58,3	58,9
82.50	32,2	33,1	32,2	30,3	32,3	40,6	46,7	49,2	48,8	46,0	48,6	49,7	49,4	52,8	56,4	57,6	56,0	54,1
86.25	32,2	34,1	35,4	37,5	38,8	38,8	38,6	42,7	47,3	50,1	51,2	51,2	49,5	51,9	57,1	58,2	56,6	55,5
90.0	35,3	37,8	40,1	43,2	45,9	48,0	49,3	48,1	43,5	41,5	48,1	49,7	53,9	57,9	58,4	56,9	55,2	55,2
93.75	33,4	32,5	29,8	33,6	38,8	42,1	43,2	41,1	37,0	46,6	48,9	50,3	54,6	57,5	61,8	61,1	57,9	60,7
97.50	33,9	35,8	36,9	38,1	38,5	39,5	42,9	44,4	42,4	44,4	49,1	52,0	51,2	50,7	52,5	56,2	58,1	59,7
101.25	26,5	26,6	27,4	31,9	35,7	37,8	37,4	42,5	50,2	52,0	51,1	53,5	53,9	54,5	55,5	55,5	56,0	56,3
105.0	29,7	31,5	33,0	35,4	37,6	39,5	41,5	42,8	43,8	42,6	46,5	52,2	55,8	56,2	55,0	54,0	55,1	56,4
108.75	31,2	32,9	34,1	36,2	37,8	39,0	40,1	41,3	44,8	47,7	47,1	48,0	50,5	54,9	57,3	58,2	57,1	55,8
112.50	25,9	24,4	19,8	25,8	32,4	36,7	40,3	43,0	44,5	44,7	43,1	46,1	51,5	52,1	51,4	54,7	56,9	55,5
116.25	24,2	28,1	31,7	36,1	39,9	43,4	47,2	49,8	51,0	51,2	51,9	51,0	50,5	56,0	56,8	54,6	56,1	57,0
120.0	35,0	36,8	38,1	39,8	40,8	40,7	39,1	34,8	34,0	42,6	44,8	51,3	57,1	59,2	59,3	60,2	60,0	59,0
123.75	37,2	39,3	40,7	42,3	42,6	41,1	38,4	42,4	45,1	44,7	45,4	47,4	54,8	57,2	57,4	57,7	57,7	57,7
127.50	22,7	25,2	31,1	36,8	40,3	41,7	42,0	48,0	53,3	53,7	50,4	53,0	54,8	57,7	60,9	62,3	60,0	54,8
131.25	32,0	33,9	35,1	37,6	41,2	45,9	50,7	53,2	53,3	51,3	52,1	54,1	54,4	54,6	55,4	58,9	60,4	59,9
135.0	37,1	40,0	42,3	44,9	46,4	45,9	43,3	50,3	56,3	57,1	54,2	49,1	51,1	54,4	57,4	58,4	56,9	58,2
138.75	29,3	32,8	36,0	39,8	42,8	45,0	46,0	43,8	44,2	48,9	53,9	56,0	58,8	60,6	60,8	60,4	58,7	59,7
142.50	28,7	30,8	32,8	35,9	39,0	42,5	46,7	50,2	52,2	50,8	46,8	47,6	53,9	55,7	56,6	56,1	55,8	55,8
146.25	36,1	37,7	38,3	38,5	37,2	38,7	45,9	49,5	50,1	53,4	54,5	52,8	57,6	61,3	62,4	60,9	57,7	57,8
150.0	32,6	35,7	38,4	41,8	44,6	47,0	48,7	48,9	51,0	54,1	53,1	55,2	57,5	56,6	55,8	53,9	58,5	60,8
153.75	38,8	40,8	42,5	45,0	47,0	48,7	50,2	50,1	47,1	47,9	52,7	55,3	54,1	53,0	57,0	57,4	55,1	56,5
157.50	34,2	35,3	35,6	36,4	37,0	38,7	43,2	47,1	48,8	48,5	50,3	51,4	52,9	60,6	60,6	58,3	58,9	55,2
161.25	35,5	36,4	35,8	35,4	38,5	45,0	50,5	52,4	50,8	54,3	55,8	53,1	50,4	56,2	59,1	58,2	56,2	56,5
165.0	35,4	35,7	34,6	33,6	34,0	37,3	40,6	40,8	43,4	49,5	50,6	49,1	53,8	58,3	58,8	56,9	55,6	57,3
168.75	36,3	36,8	36,5	38,4	41,9	45,8	49,3	50,6	48,7	46,8	49,0	51,1	54,3	56,5	56,3	57,4	60,1	60,1
172.50	34,9	35,5	36,4	40,1	43,9	46,9	48,8	48,3	46,3	47,9	48,6	50,7	51,9	54,9	56,9	59,5	61,0	59,6
176.25	38,5	40,8	42,2	43,5	43,1	40,4	44,7	51,0	53,1	54,4	56,4	57,4	57,2	59,7	60,6	58,4	58,4	57,8



MikySound.com  
Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetary  
Zpracování zvuku v reálném čase

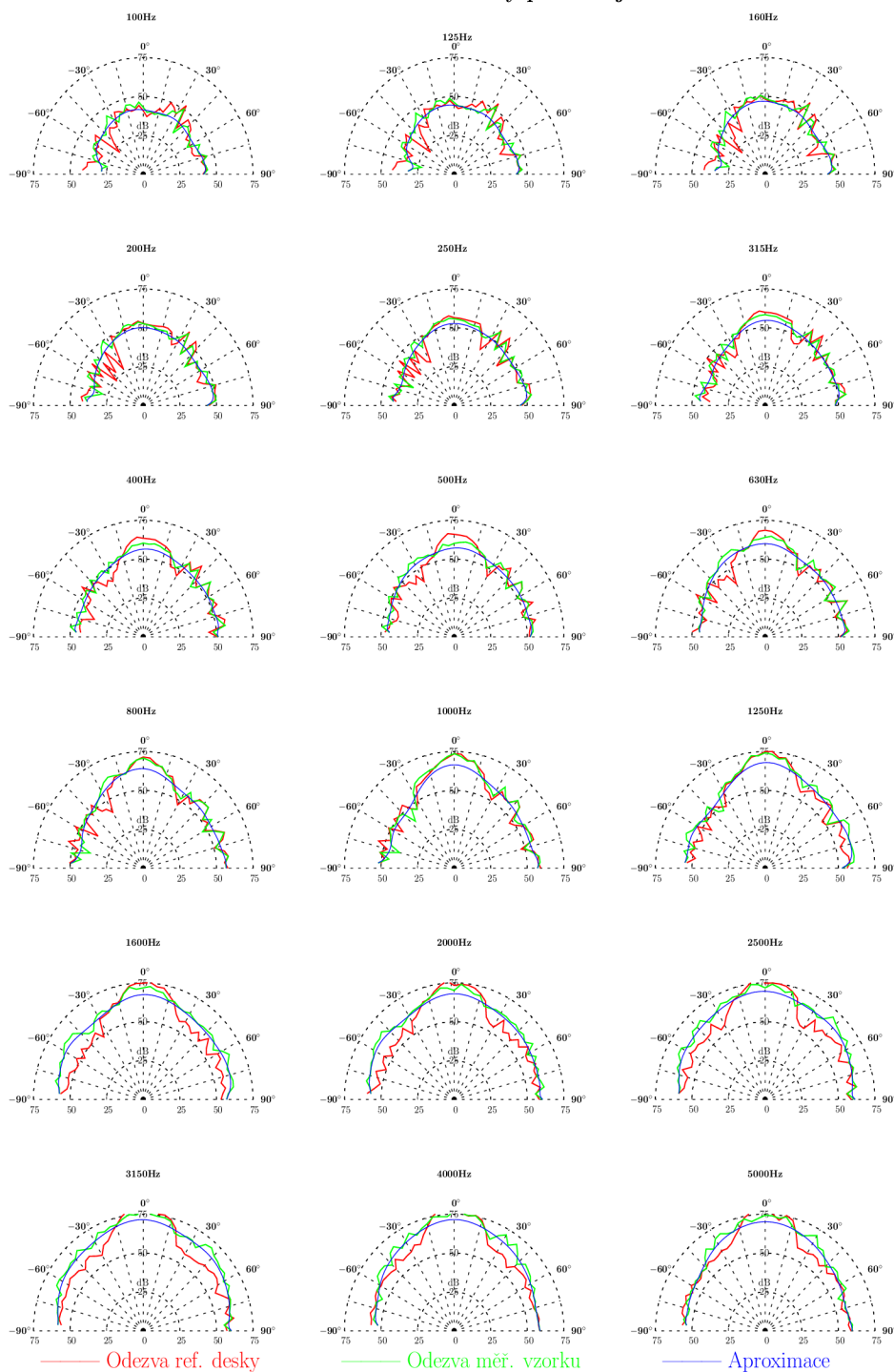
Datum vzniku záznamu:  
30. října 2011  
Odpovědný pracovník:  
Petr Mikeš

**Záznam o měření koeficientu difuzity**  
 technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:  
4 z 8

Číslo měření:  
M11-002-0630-01

**Směrové charakteristiky pro zdroj 1**



MikySound.com  
 Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetary  
 Zpracování zvuku v reálném čase

Datum vzniku záznamu:  
30. října 2011  
 Odpovědný pracovník:  
Petr Mikeš

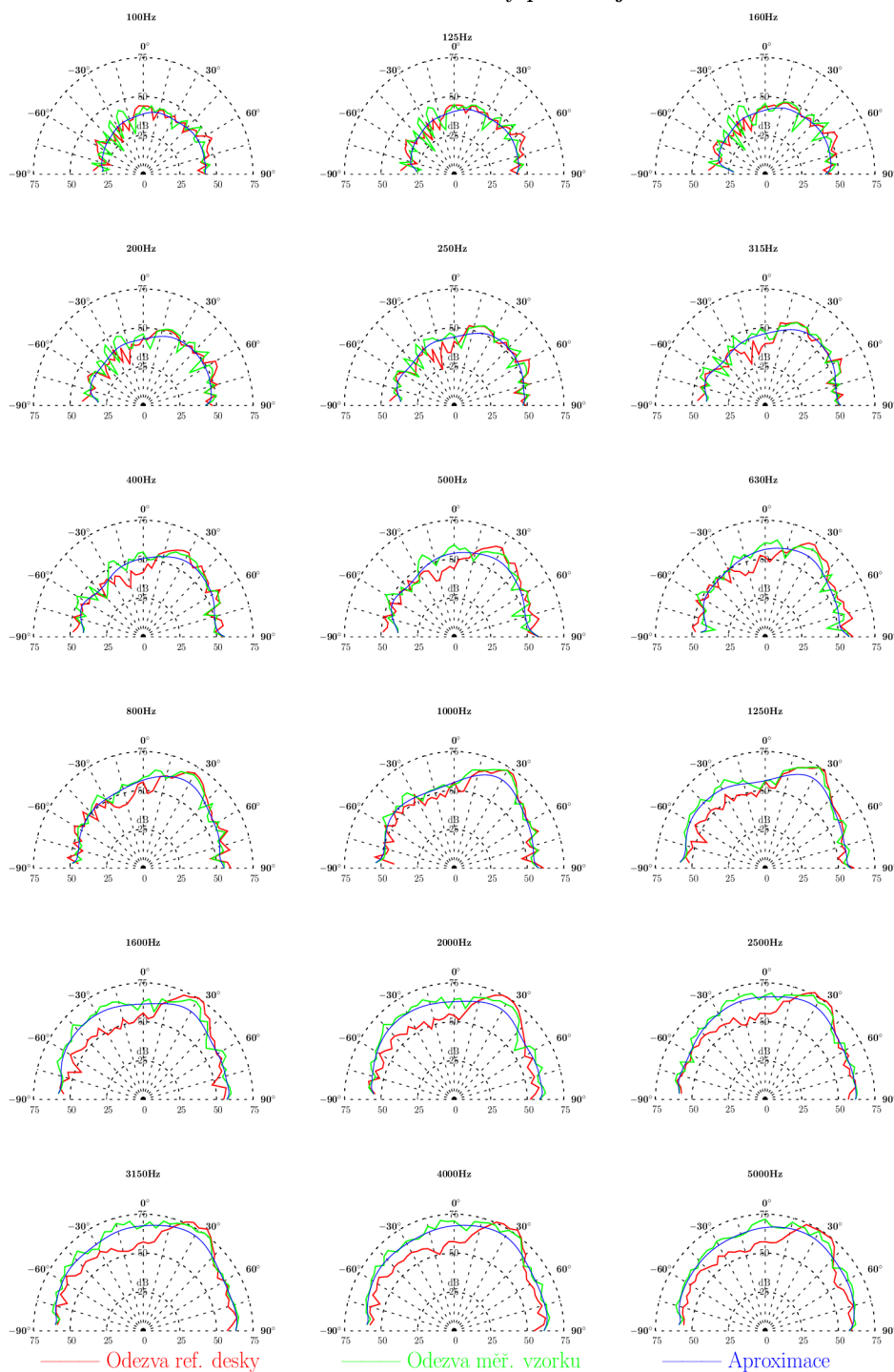


**Záznam o měření koeficientu difuzity**  
 technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:  
5 z 8

Číslo měření:  
M11-002-0630-01

**Směrové charakteristiky pro zdroj 2**



MikySound.com  
 Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetary  
 Zpracování zvuku v reálném čase

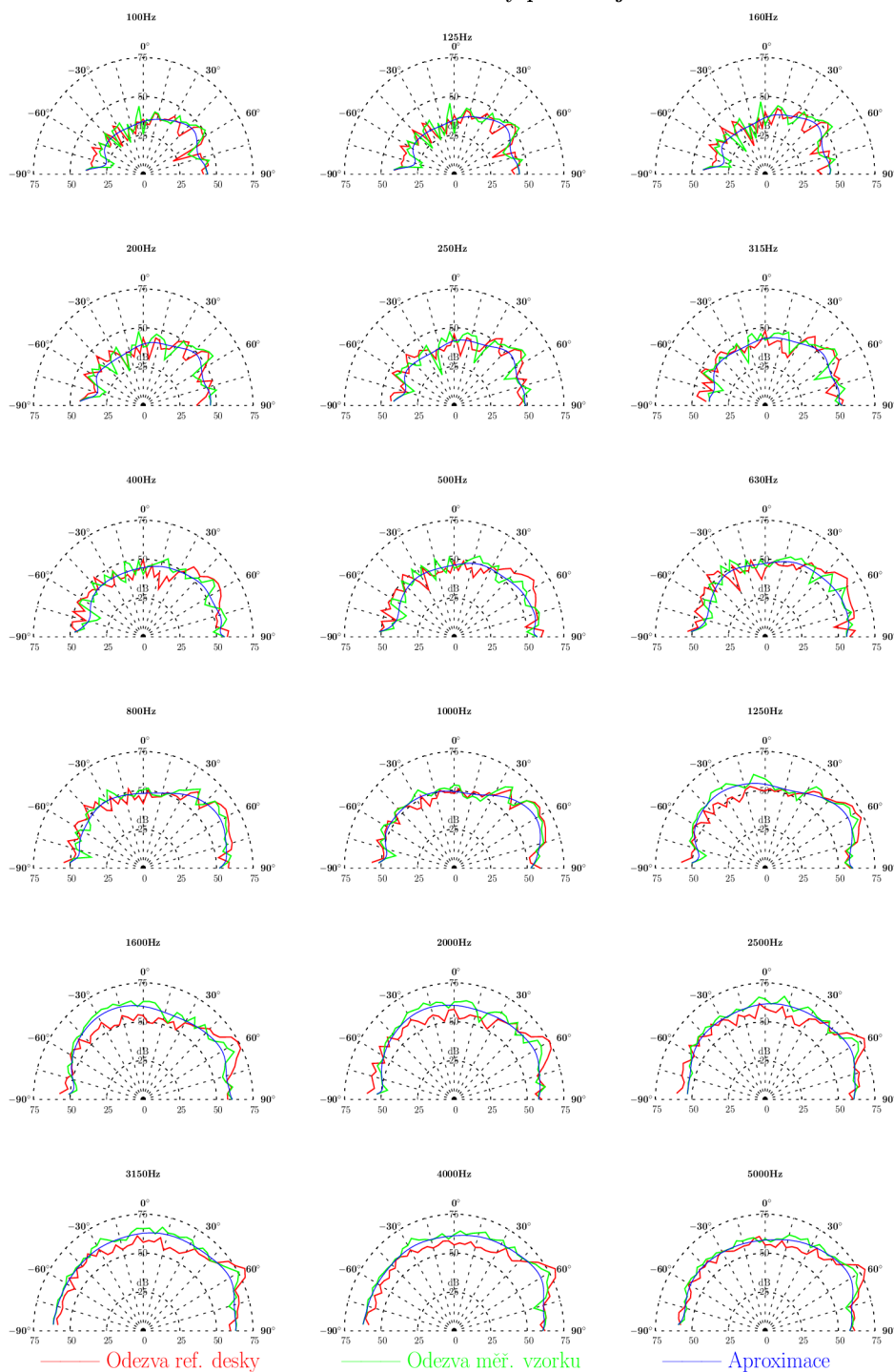
Datum vzniku záznamu:  
30. října 2011  
 Odpovědný pracovník:  
Petr Mikeš

**Záznam o měření koeficientu difuzity**  
 technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:  
6 z 8

Číslo měření:  
M11-002-0630-01

**Směrové charakteristiky pro zdroj 3**



MikySound.com  
 Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetary  
 Zpracování zvuku v reálném čase

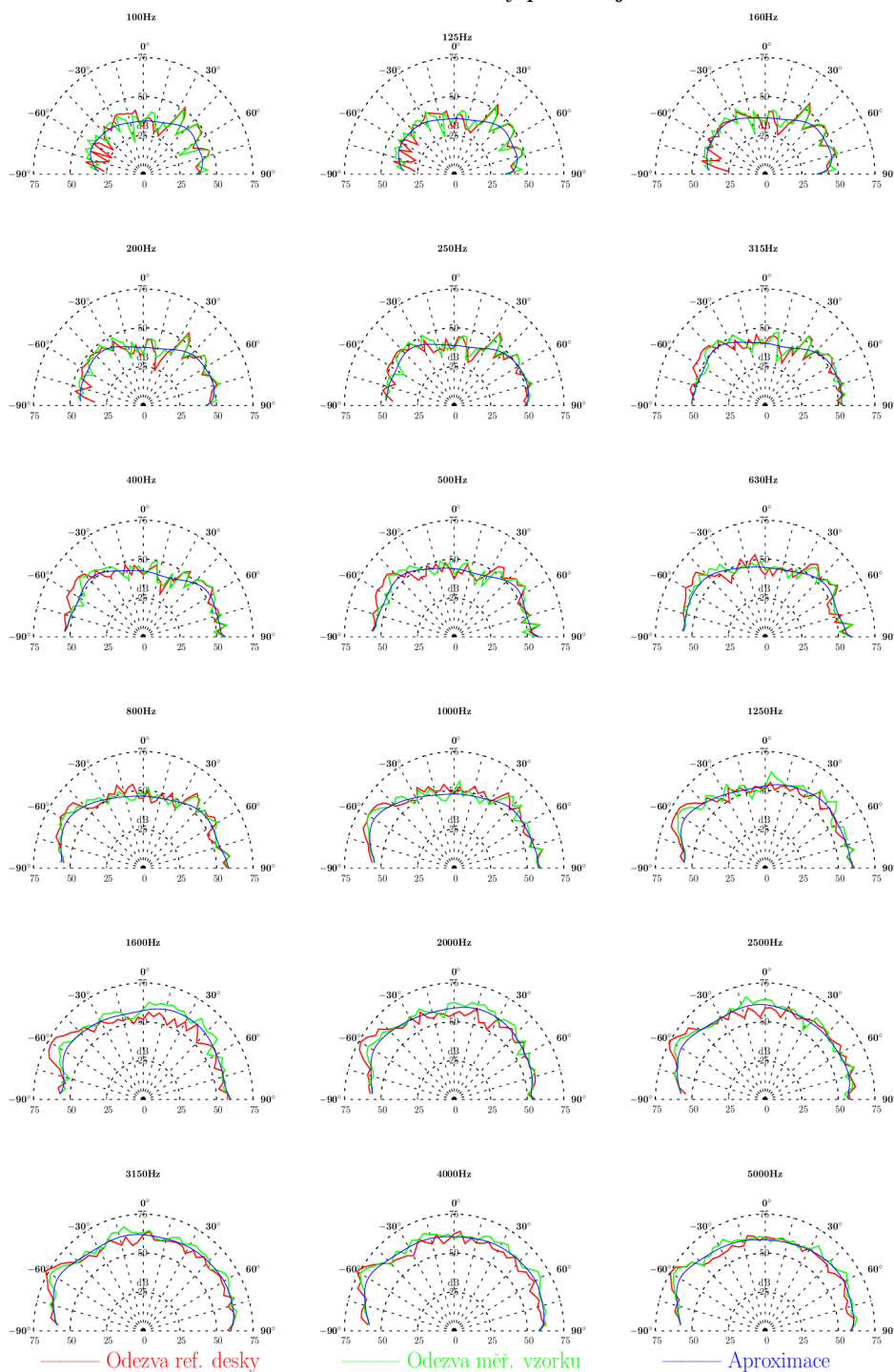
Datum vzniku záznamu:  
30. října 2011  
 Odpovědný pracovník:  
Petr Mikeš

**Záznam o měření koeficientu difuzity**  
 technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:  
7 z 8

Číslo měření:  
M11-002-0630-01

**Směrové charakteristiky pro zdroj 4**



MikySound.com  
 Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetary  
 Zpracování zvuku v reálném čase

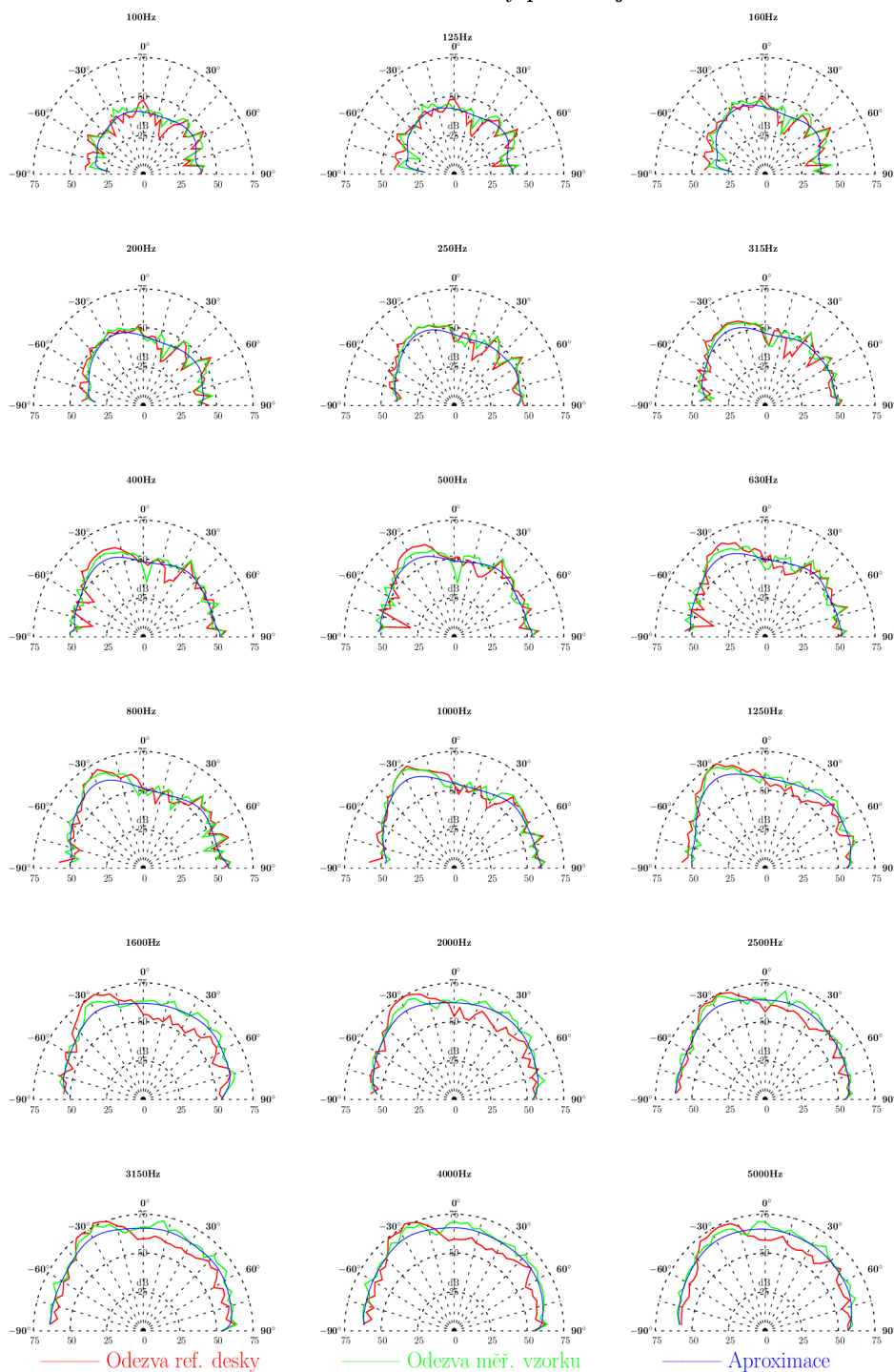
Datum vzniku záznamu:  
30. října 2011  
 Odpovědný pracovník:  
Petr Mikeš

**Záznam o měření koeficientu difuzity**  
 technikou hraniční roviny dle normy ISO 17497-2

List:  
8 z 8

Číslo měření:  
M11-002-0630-01

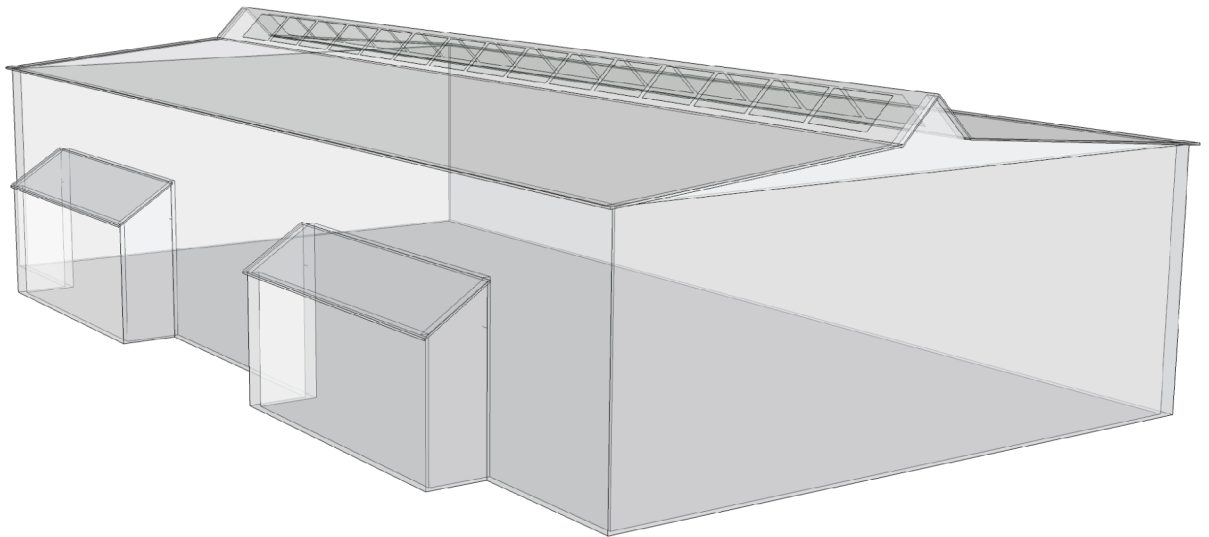
**Směrové charakteristiky pro zdroj 5**



MikySound.com  
 Dlouhé Dvory 24, 50312, Všetary  
 Zpracování zvuku v reálném čase

Datum vzniku záznamu:  
30. října 2011  
 Odpovědný pracovník:  
Petr Mikeš

## D MODEL MĚŘICÍ HALY



Obr. D.1: Model sportovní haly Roudnice nad Labem.

## E OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

Součástí diplomové práce je i DVD, které obsahuje tyto adresáře:

- **Fotodokumentace** - obsahuje fotodokumentaci z měření v roce 2012 a také fotodokumentaci z měření směrových charakteristik senzorů.
- **Popis\_Struc\_Sablony** - obsahuje popis veškerých souborů obsažených v adresáři **Sablona\_Mereni** a zahrnutých podadresářích.
- **Sablona\_Mereni** - obsahuje kompletní balík připravený ke zpracování měření. Součástí tohoto adresáře jsou veškeré vytvořené funkce, skripty a šablony pro automatické zpracování naměřených dat.
- **Signals** - obsahuje zvukové vzorky zdrojových signálů ve formátu \*.wav, používaných během testování.
- **SketchUp** - obsahuje 3D model sportovní haly v Roudnici nad Labem, ve které probíhala měření a dále také 3D modely typů difuzorů.
- **SmeroveCharakteristikyMikrofonu** - obsahuje skript pro zpracování a zobrazení výsledných směrových charakteristik senzorů.