

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE  
**FILMOVÁ A TELEVIZNÍ FAKULTA**

Filmové, televizní a fotografické umění a nová média  
Obor zvuková tvorba

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Akustické úpravy domácího studia

**Jakub Trš**

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Oponent práce: MgA. Petr Neubauer

Datum obhajoby: 13.9.2018

Přidělovaný akademický titul: BcA.

Praha, 2018

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE  
**FILM AND TV SCHOOL**

Film, Television and Photographic Arts and New Media  
Department of sound

**BACHELOR'S THESIS**

Acoustic treatment of a bedroom studio

**Jakub Trš**

Thesis supervisor: Dr. Ing. Libor Husník

Thesis opponent: MgA. Petr Neubauer

Date of defense: 13.9.2018

Degree acquiring: BcA.

Prague, 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

Akustické úpravy domácího studia

vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Praha, dne

podpis diplomanta

## **Upozornění**

Využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě licenční smlouvy, tj. souhlasu autora a AMU v Praze.



# Poděkování

Dr. Ing. Libor Husník - za trpělivé vedení, odborné připomínky a užitečné podněty;

Martin Stýblo - za inspiraci k tématu;

rodiče - za trpělivost a podporu;

Petr "Kakaxa" Fleissig - za shovívavost při nekonečných srovnávacích seancích;

Bart Bielinski - za spoluúčast na akustickém dobrodružství,

Ing. Petr Sýs - za vstřícnost v prvotních fázích plánování práce.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi akustických úprav malé domácí místnosti s vynaložením minimálních materiálních prostředků. Vycházejíc ze základních fyzikálních zákonitostí prostorové akustiky, práce analyzuje měření frekvenční odezvy a doby dozvuku pro různé pozice budiče a posluchače, přitom zkoumá vliv běžného domácího vybavení a některých rozšířených podomácku vyrobených akustických prvků na poslechové podmínky s cílem splnit parametry stanovené doporučením EBU Tech 3276. Dojde také na zkoumání možností zlepšení frekvenční odezvy s pomocí ekvalizace.

## Abstract

This thesis addresses the options of acoustic treatment of a small room situated in residential premises at minimum cost. Using the knowledge of basic principles of room acoustics, room frequency response and reverberation time in different parts of the room are analyzed in order to find out how they are influenced by the relative position in the room by regular household equipment and by certain common home-made acoustic treatment - with the goal of complying with the EBU Tech 3276 recommendations. Options of digital room correction are also examined.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Teorie</b>	<b>12</b>
1.1 Základy šíření zvuku	12
1.2 Přístupy	14
1.2.1 Vlnová akustika	14
1.2.2 Geometrická akustika	17
1.2.3 Statistická akustika	18
1.3 Parametry prostorové akustiky	20
1.3.1 Činitel pohltivosti	20
1.3.2 Doba dozvuku	21
1.4 Ovlivňování akustiky prostoru	24
1.4.1 Principy absorpce	24
1.5 Rozdělení akustických prvků	25
1.5.1 Obklady tvořené porézními materiály	25
1.5.2 Obklady založené na principu rezonance	26
1.5.3 Kmitající desky a membrány	26
1.5.4 Helmholtzův rezonátor	27
1.5.5 Basové pasti	28
1.5.6 Difuzní prvky	29
1.6 Základy měření	30
1.6.1 Buzení impulsem	30
1.6.2 Buzení sinusovým signálem přeladované frekvence (“sweep”)	32
1.6.3 Metoda MLS	33
1.7 Normy a doporučení (pro 2.0 systém)	34
1.8 Přístupy k návrhu kontrolní místnosti	39
1.8.1 Non-environment	39
1.8.2 Live end dead end	40
1.8.3 Reflection free zone & controlled image design	41
1.8.4 Ambechoic (ambient anechoic) design	41
1.9 Domácí studio	42
<b>2 Měření</b>	<b>43</b>
2.1 Výchozí podmínky	43
2.1.2 Měření AA	43
2.1.3 Komentář k měření AA	46
2.2 Nalezení nové pozice D	48
2.2.1 Měření DL - levý reproduktor	50
2.2.2 Měření DL - pravý reproduktor	51
2.2.3 Komentář k měření DL	51

2.3 Pozice DR	52
2.3.1 Měření v pozici DR - levý reproduktor	53
2.3.2 Měření DR - pravý reproduktor	54
2.3.3 Komentář k měření DR	54
2.4 Efekt absorpčních panelů	55
2.4.1 Měření DQ - levý reproduktor	55
2.4.2 Měření DQ - pravý reproduktor	56
2.4.3 Komentář k měření DQ	56
2.5 Efekt plat od vajec	57
2.5.1 Měření DP - levý reproduktor	57
2.5.2 Měření DP - pravý reproduktor	58
2.5.3 Komentář k měření DP	59
<b>3 Elektronická kalibrace</b>	<b>60</b>
3.1 Měření	61
3.1.2 Měření bez korekcí, levý reproduktor	61
3.1.3 Měření s kalibrací Sonarworks Reference 4:	62
3.1.4 Měření s filtry nastavenými podle výpočtu Room EQ Wizard, var. 1	62
3.1.5 Měření s filtry nastavenými podle výpočtu Room EQ Wizard, var. 2	63
3.1.6 Všechny grafy SPL dohromady:	63
3.1.7 RT30 měření E (A-D) v pozici 1	64
3.1.8 Komentář k měření s využitím ekvalizace	66
<b>4 Další faktory</b>	<b>67</b>
4.1 Reproduktory a sluchátka	67
<b>5 Závěr</b>	<b>68</b>
<b>6 Literatura a zdroje</b>	<b>69</b>



# Seznam příloh

**Příloha 1 - výsledky měření AA**

**Příloha 2 - výsledky měření DL**

**Příloha 3 - výsledky měření DR**

**Příloha 4 - výsledky měření DQ**

**Příloha 5 - výsledky měření DP**

**Příloha 6 - výsledky měření EA**

**Příloha 7 - výsledky měření EB**

**Příloha 8 - výsledky měření EC**

**Příloha 9 - výsledky měření ED**

# Úvod

Existuje řada způsobů jak vynaložit úsilí s cílem zkvalitnění poslechových podmínek, z nichž kvalita elektroakustického reprodukčního řetězce bývá na prvním místě - od snahy o co nejkvalitnější AD/DA převodníky po co nejvyrovnanější frekvenční odezvu reproduktorů.

Ovšem častěji než si leckdo uvědomuje, nastává problém mezi reproduktory a ušima. Při poslechu reprodukováného zvuku v prostorách menších rozměrů, se kterými se lze běžně setkat v domácnostech či studiích zařízených v místech, která k tomuto účelu nebyla původně zamýšlena, se setkáváme s nežádoucí změnou frekvenční odezvy (zejména na nižších kmitočtech) vyplývající z geometrie těchto prostor. Jaký smysl má investovat do drahých reproduktorů s co nejplošší frekvenční charakteristikou, pokud ji akustika místnosti změní k nepoznání?

Rozšíření digitálních technologií přináší bezprecedentní moc manipulovat se zvukem do rukou takřka každému, čímž se zvuková tvorba více než kdy dříve stává soukromou a volnočasovou záležitostí jednotlivců - právě tímto způsobem (autora nevyjímaje) se lidé často dostávají k našemu oboru. Nicméně není v možnostech každého pracovat a tvořit v podmínkách profesionálně zařízeného studia - tvorba probíhá v ložnicích, pokojích, na půdách či sklepeních, zkrátka v podmínkách, které jsou právě člověku k dispozici. Následkem neoptimálních poslechových podmínek je často fakt, že při poslechu nahrávky v jiném prostředí se mix jeví zcela jinak. Nicméně leckdy relativně malá úprava stávajícího prostředí může stačit k posunu v poslechových a pracovních podmínkách obecně. Ať jde o domácí sledování filmů či seriálů, nebo počítačově založenou hudební/zvukovou tvorbu obecně, kvalitní reprodukce je inspirujícím prvkem, kdežto její nedostatky mohou práci znepříjemňovat.

Inspirací pro tuto práci byl zážitek z poslechu nových reproduktorů u kamaráda doma v akusticky neupravené ložnici. Reprodukory byly známé svým příznivým poměrem ceny a výkonu, nicméně veškeré nižší frekvence se v místě poslechu kamsi vytratily.

Posluchač KZT v rámci bakalářského studia absolvuje mimo jiné předmět zabývající se prostorovou akustikou. Vzhledem k poměrně silné provázanosti s matematikou a fyzikou bývá ze zkušenosti autora předmětem obávaným a po absolvování zkoušky s úlevou zapomenutým - ovšem právě poznatky, které přináší, jsou jedním z klíčů k uchopení podstaty "dobrého" či "špatného" zvuku. Tato práce si tedy klade za cíl tyto poznatky využít v praxi při návrhu tzv. domácího studia - snahou bude zjistit, jakého zlepšení poslechových podmínek se dá dosáhnout s vynaložením minimálních prostředků.

V prvních kapitolách práce dojde k zopakování teorie, kterou budeme v pozdějších kapitolách aplikovat na konkrétním příkladu zlepšení akustiky malé domácí místnosti.

# 1 Teorie

## 1.1 Základy šíření zvuku

Na počátku každého zvuku, kterého se týká našeho zkoumání, je zdroj kmitání (oscilace) - v našem případě kmitání hmotných bodů kolem rovnovážné polohy. Kmitání můžeme podle tendence k opakování dělit na periodické a neperiodické. Nejjednodušší periodické kmitání se dá popsat rovnicí pro harmonický signál, která je ekvivalentní rovnici pro matematickou funkci sinus, a známe jej jako čistý tón (bez vyšších harmonických frekvencí, blízko je mu třeba klasická "vidličková" ladička).

Obecně známým vztahem harmonického signálu je:

$$u_n(t) = U_n \cdot \sin(\Omega t + \phi)$$

kde:

$u_n$  je okamžitá výchylka

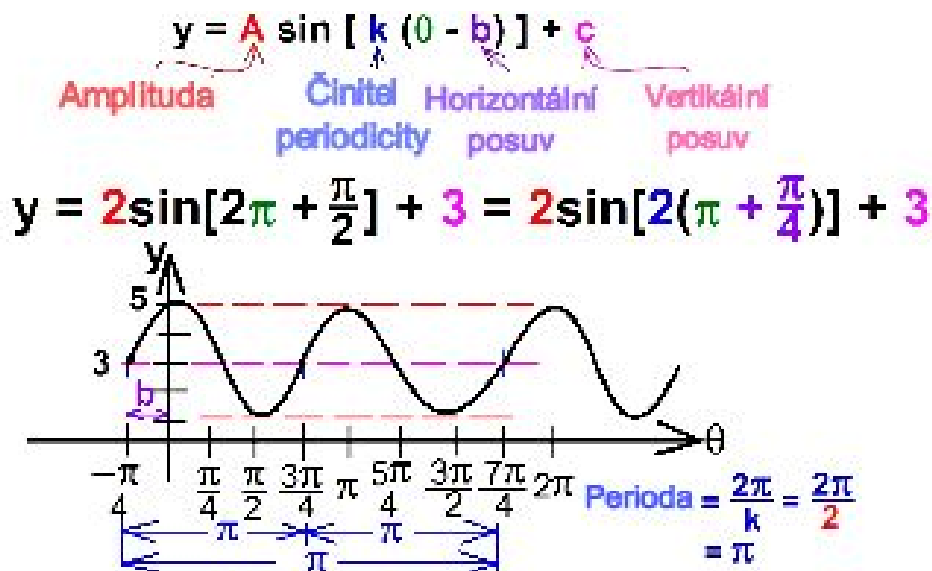
$t$  je čas

$U_n$  je maximální výchylka signálu - amplituda signálu

$\Omega$  je úhlová rychlost v rad/sec ( $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ )

$\phi$  je fázový posun

Všimněme si podobnosti se vzorcem funkce sinus:



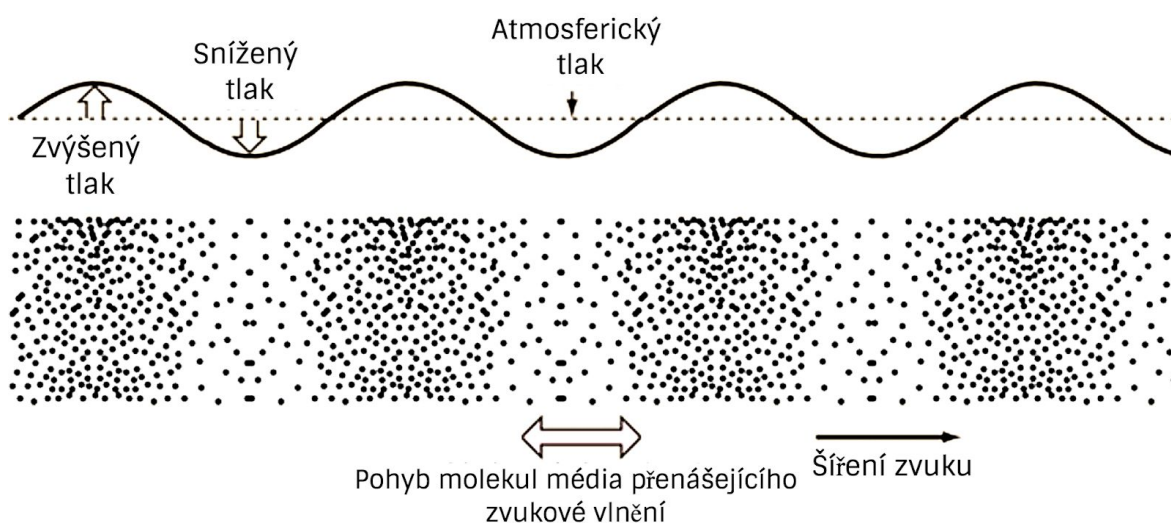
Obr. 1: vzorec funkce sinus s popisem členů ovlivňujících amplitudu ( $A$ ), periodicitu ( $k$ ), horizontální ( $b$ ) a vertikální ( $c$ ) posun;

zdroj originálu: <http://www.ilectureonline.com/lectures/subject/MATH/16/236/3139>

Zvuk můžeme definovat jako kmitání pevného, kapalného či plynného prostředí, které dokáže způsobit sluchový vjem [1] (str. 15), pro člověka se jeho kmitočtové rozmezí zpravidla uvádí mezi 16 Hz a 16 kHz. Zvuk je podélným vlněním částic prostředí kolem rovnovážné polohy ve směru šíření vlnění, jde tedy o podélné vlnění projevující se zahušťováním a zředčováním tlaku média (narozdíl od např. vln na hladině rybníka, které jsou příkladem vlnění příčného). Na tento základní fakt se dá poměrně jednoduše zapomenout, protože zvuková vlna se takřka vždy znázorňuje právě grafem vlnění příčného.



Obr. 2: znázornění časového průběhu signálu obecně známé jako "waveforma"



Obr. 3: znázornění podélného pohybu částic;

zdroj originálu: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/tralon.html>

Rychlost šíření vlnění vždy závisí na teplotě, tlaku a hustotě prostředí, pro naše účely budeme uvažovat práci v suchém vzduchu při teplotě 20 °C, kde se zvukové vlnění bude šířit rychlostí 343 m/s.

Prostorová akustika využívá k řešení akustických problémů několika přístupů, které se liší svým pohledem na zvuk a které umožňují řešit různé druhy problémů v různých kmitočtových pásmech.

## 1.2 Přístupy

### 1.2.1 Vlnová akustika

Vlnová akustika představuje výpočetní metodu využívající vlnovou rovnici a okrajové podmínky pro řešení pole na nízkých kmitočtech v případech, kdy jsou okrajové podmínky snadno definovatelné. Vlnová rovnice je významná diferenciální rovnice popisující celou řadu vlnění nejen v akustice, a okrajové podmínky představují známou velikost veličiny v dané souřadnici - jinak řečeno, jejich zavedením z pohledu matematiky stavíme zdi místnosti, od kterých se zvuková vlna bude odrážet.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2}$$

kde

$c$	je rychlost šíření zvuku [m/s]
$p$	je akustický tlak
$\delta$	je šířka rezonanční křivky (vlastního kmitu)
$t$	je čas

*Vzorec vlnové rovnice umožňující výpočet vlastních kmitů, [1] (str. 18)*

Před příchodem výpočetní techniky mělo pro výpočetní náročnost smysl tuto metodu využívat ve zjednodušujícím případě předpokládajícím dokonale pravoúhlý prostor se 100% odrazivými stěnami, dnešní počítačové programy ji ovšem dokáží využít pro simulaci akustických podmínek místností, které tyto podmínky nesplňují.

Řešením následujícího vztahu:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz})$$

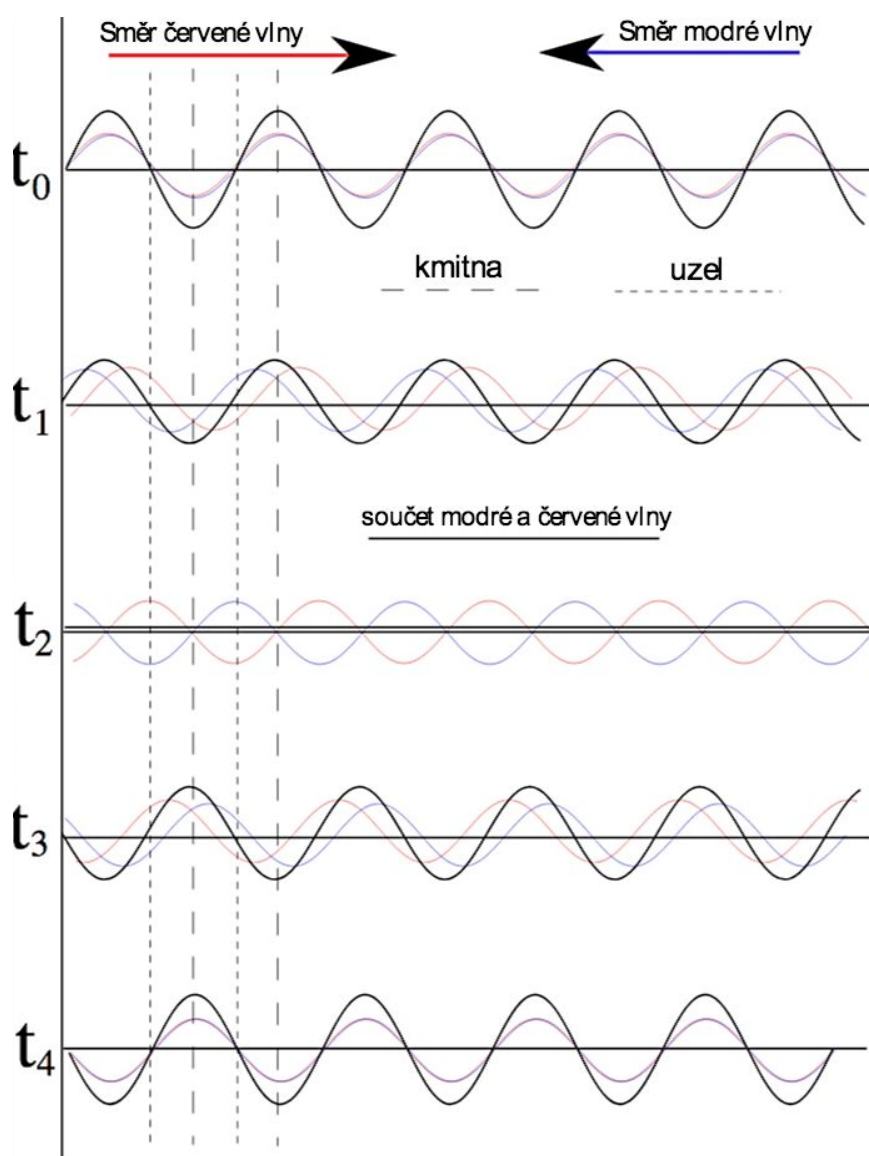
lze vypočítat vlastní módy místnosti - množinu rezonancí existujících v místnosti, pokud je vybudena akustickým zdrojem. Ty můžeme rozdělit na [1] (str. 48):

1. osová, vznikající odrazem vlny od dvou protilehlých stěn (dostáváme je, pokud je z čísel  $n$  nenulové pouze jedno);
2. tangenciální, vznikající odrazem vlny od čtyř stěn (z čísel  $n$  jsou dvě nenulová);
3. kosé, vznikající odrazem od všech šesti stěn (všechna čísla  $n$  jsou nenulová);
4. degenerované, obzvláště silné, vzniklé rovností rozměrů stěn.

Rezonance je jev zesílení amplitudy kmitání fyzikální soustavy v momentě, kdy se kmitočet zdroje budícího kmitání blíží vlastnímu kmitočtu této soustavy (který najdeme na vlastním módu).

Vlastní módy nemají pouze uzavřené místnosti, mají je všechna hmotná tělesa - vzpomeňme si třeba na klasický příklad vojenského pochodu po mostě, který byl frekvencí pochodu shodnou s jeho vlastním módem vybuzen k rezonanci, kterou jeho materiál nevydržel a zřít se.

Interference přímých a odražených vln s vlnovou délkou odpovídající kmitočtům ekvivalentním vlastním módům místnosti (a jejich násobkům) má na svědomí vznik stojatého vlnění, což je vlnění se stálou amplitudou v každém bodě. Protože vzniká setkáním dvou protiběžných vln, jeho uzly (místa nulové výchylky) a kmitny (místa maximální výchylky) zůstávají na stejném místě v prostoru a mají za následek znatelný pokles (či naopak nárůst) intenzity zvuku v závislosti na pozici posluchače v místnosti, což za přítomnosti více kmitočtů vnímáme jako změnu barvy zvuku.



Obr. 4: grafické znázornění vzniku stojatého vlnění, jeho uzlů a kmiten;  
zdroj originálu: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standingwaves.svg>

Pro zachování uniformity zvukového pole (zvukovým polem rozumíme oblast prostředí, ve které se nachází zvukové vlnění [5]) je třeba, aby od sebe vlastní kmity byly vzdáleny co nejméně [1] (str. 69), jinak dochází ke zvýrazňování frekvencí při shodě budícího a rezonančního kmitočtu. Problémy se vzájemnou vzdáleností vlastních kmitů se projevují zejména na nízkých frekvencích až do hranice, kterou stanovuje tzv. Schroederův kritický kmitočet, definován vztahem [2] (str. 84):

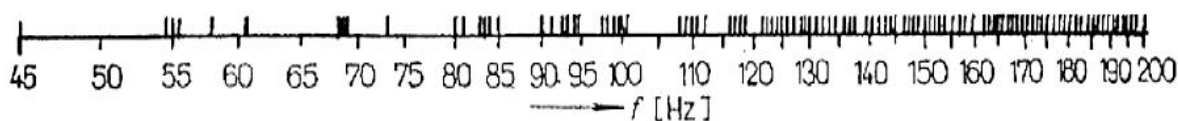
$$f(k) = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz})$$

kde

T je doba dozvuku [s]

V je objem místnosti [m<sup>3</sup>]

Z tohoto vztahu mimo jiné můžeme vyvodit, že problémy vyplývající ze stojatého vlnění jsou minimální ve větších prostorách (koncertní sítě, velká TV studia apod.), protože Schroederův kmitočet se v nich zpravidla nachází pod hranicí slyšitelných kmitočtů. Zdroj [1] (str.69) uvádí, že minimální objem místnosti s optimálním rozložením vlastních kmitů je 200 m<sup>3</sup>, což demonstruje na příkladu rozložení kmitů v místnosti s menším objemem, 136 m<sup>3</sup>:



Obr. 5: rozložení vlastních kmitů v menší místnosti, [1] (str.49)

Pro co nejoptimálnější rozložení vlastních kmitů je vhodné, aby uvažovaná místnost měla co nejnepravdělnější členění, které by umožnilo nepravidelné odrazy od stěn (než začneme naši pomyslnou akusticky nevhodnou místnost zanášet nábytkem, je třeba si uvědomit, že ne všechny materiály jsou na všech frekvencích stejně odrazivé jako zdi místnosti a navíc kusy jako skříň či kredenc budou mít zase své vlastní kmitočty, na kterých budou rezonovat).

Zdroj [1] (str. 51) uvádí doporučené poměry rozměrů místnosti z hlediska rozložení vlastních kmitů:

- 2,5 : 1,5 : 1 pro menší místnosti;
- 3 : 2 : 1 pro větší místnosti.

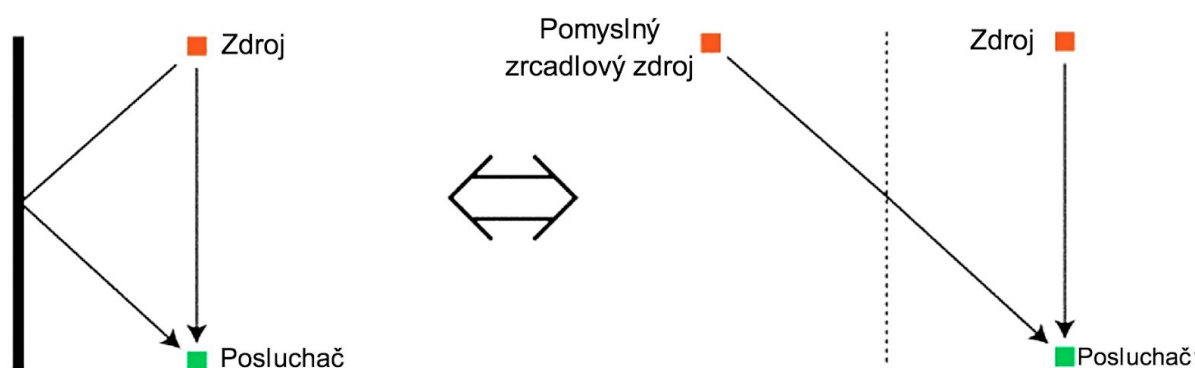
Pro optimální rozložení vlastních kmitů by rozměry neměly být celočíselnými násobky (což je opět u domácích studií poměrně častý případ).



Vlastní kmity mimo jiné ovlivňují i přechodné jevy jako počátek a konec zvukového pole, protože doba nárůstu či poklesu zvukové energie vlivem odrazů od stěn či jejich pohlcování jsou frekvenčně závislé [1] (str. 48).

### 1.2.2 Geometrická akustika

Tento přístup představuje metodu používanou pro vyšší kmitočty nad Schroederovou frekvencí, kde díky kratším vlnovým délkám uvažovaných kmitočtů nebereme v potaz případy ohybu vln kolem překážek, ale operujeme pouze s jejich odrazy - dá se totiž říct, že čím větší je rozměr překážky vůči vlnové délce vlny, tím spíše s ní můžeme operovat jako s vlnou optickou [1] (str. 43). Tyto podmínky nám tedy umožňují využívat k modelování zvukových paprsků pomyslné zrcadlové zdroje a zákonitosti úhlu dopadu a odrazu používané v optice - s každým novým odrazem vlny dojde ke skokovému poklesu energie (vlivem pohlcení stěnou) a vyzáření jejího zbytku z nového pomyslného zdroje.



Obr. 6: grafické znázornění konstrukce zvukového paprsku od rovinné stěny;  
zdroj originálu: <http://users.spa.aalto.fi/ville/diffrvisual/basicidea.html>

Odrazy se nedějí pouze od rovných ploch - ty vypuklé (konvexní) vlny rozptylují a mají žádoucí difuzní účinky, kdežto plochy vyduté (konkávni) vlny soustřeďují, čímž často zhoršují akustiku místnosti.

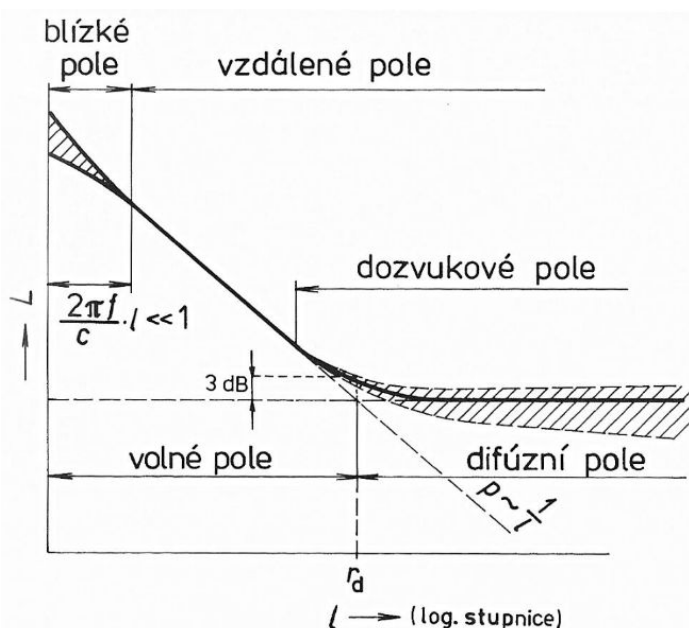
Využití geometrické akustiky je nejsmysluplnější pro získání představy o akustických vlastnostech prostoru ve stádiu návrhu projektu. Vzhledem ke značnému nárůstu hustoty odrazů v čase je tato metoda výpočetně náročná. Protože ohyb vln navíc není možné vyloučit pro vlny s velkou vlnovou délkou, na nižších frekvencích přestává platit podmínka poměru vlnové délky a rozměru překážky, která je pro využití geometrické akustiky klíčovou.

### 1.2.3 Statistická akustika

Statistická akustika s pomocí výpočtů hustoty energie zvukového pole sleduje jeho difuzitu.

Zvukové pole můžeme rozdělit na několik druhů:

- *difuzní* pole je takové, které má v dané oblasti uniformní rozložení zvukové energie a dominuje mu odražený zvuk, respektive většina zvukových vln byla několikrát odražena od hranic média [5];
- *volným* polem označujeme pole v médiu, jehož hranice na něj mají zanedbatelný vliv [5]. V praxi mluvíme o volném poli, pokud je přímý zvuk v daném prostoru o 10 dB silnější, než odražený zvuk.
- *blízké* pole je definováno jako oblast zpravidla do vzdálenosti dvou period od zdroje, kde (pro kulovou vlnu) neplatí pravidlo úbytku energie o 6 dB se čtvercem vzdálenosti;
- *vzdálené* pole je oblastí, kde platí pravidlo úbytku energie o 6 dB se čtvercem vzdálenosti;
- *dozvukovým* polem je myšlena součást difuzního a vzdáleného (v uzavřené místnosti), předchází difuzní, začíná cca tam, kde končí pravidlo 6 dB vlivem odražených vln.



Obr. 7: přehled akustických polí v uzavřeném prostoru, [3]

Výhodou statistické teorie oproti vlnové teorii je možnost obdržet výsledky založené na průměrných hodnotách veličin, které nejsou závislé na konkrétním čase ani bodě v měřeném prostoru, jako je hustota zvukové energie či intenzita zvuku. Statistickou akustiku je možné použít za předpokladu několika zjednodušujících podmínek:

- velikost zvukové energie v jakémkoliv bodě je dána součtem středních hodnot energie, která tam dorazila odrazy;

- hustota zvukové energie je všude stejná (respektive energie přímého pole je zanedbatelná oproti energii difuzního pole);
- všechny úhly, odkud energie přichází, jsou zastoupeny stejně pravděpodobně.

Kromě hustoty zvukové energie můžeme s pomocí statistické teorie vypočítat dobu dozvuku či vliv útlumu prostředí na ni. Statistickou teorii můžeme použít pouze pro frekvence nad Schroederovou kritickou frekvencí.

## 1.3 Parametry prostorové akustiky

Užitečnost znalosti přístupů prostorové akustiky by byla omezena bez zmínění několika parametrů, se kterými tyto přístupy operují.

### 1.3.1 Činitel pohltivosti

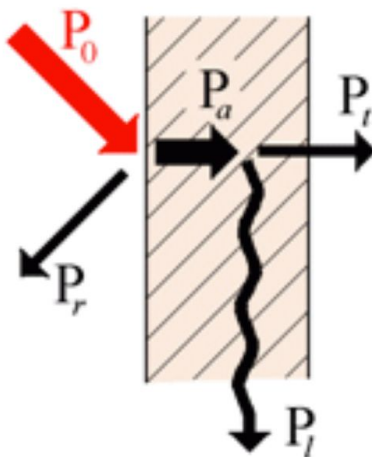
Dokonale odrazivý povrch stěn existuje stále pouze v teorii, v praxi se vlnění odráží s nižší energií, než se kterou ke stěně dorazilo, a její zbývající část je stěnou buď pohlcena a přeměněna na teplo, nebo projde skrz, popř. obojí. [1] (str. 53)

Na obr. 8 je znázorněn zákon zachování energie zvukové vlny dopadající na stěnu, kde:

- $P_0$  znázorňuje dopadající vlnu,
- $P_r$  vlnu odraženou,
- $P_a$  absorbovanou energii,
- $P_t$  energii vlny vyzářenou na druhé straně stěny a
- $P_l$  energii přeměněnou na teplo.

Podle zákona o zachování energie se  $P_0$  rovná součtu  $P_a$  a  $P_r$ .

Poměr absorbované a odražené energie pro konkrétní materiál vyjadřuje činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ .



Obr. 8: zachování zvukové energie dopadající na stěnu;

zdroj: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/227-sireni-zvuku-v-uzavrenem-prostoru-difuzni-zvukove-pole>

Hodnota činitele zvukové pohltivosti se může pohybovat mezi 0 (všechny vlny jsou odraženy) a 1 (žádná vlna není odražena).

$$\alpha = \frac{P_r}{P_0} \quad [\text{bez jednotky}]$$

Z činitele zvukové pohltivosti vychází veličina pohltivosti ( $A$ ), definována jako součin činitele pohltivosti a plochy povrchu, pro který ji chceme vypočítat:

$$A = \alpha \cdot S \quad [\text{bez jednotky}]$$

kde

$S$  je plocha [ $\text{m}^2$ ]

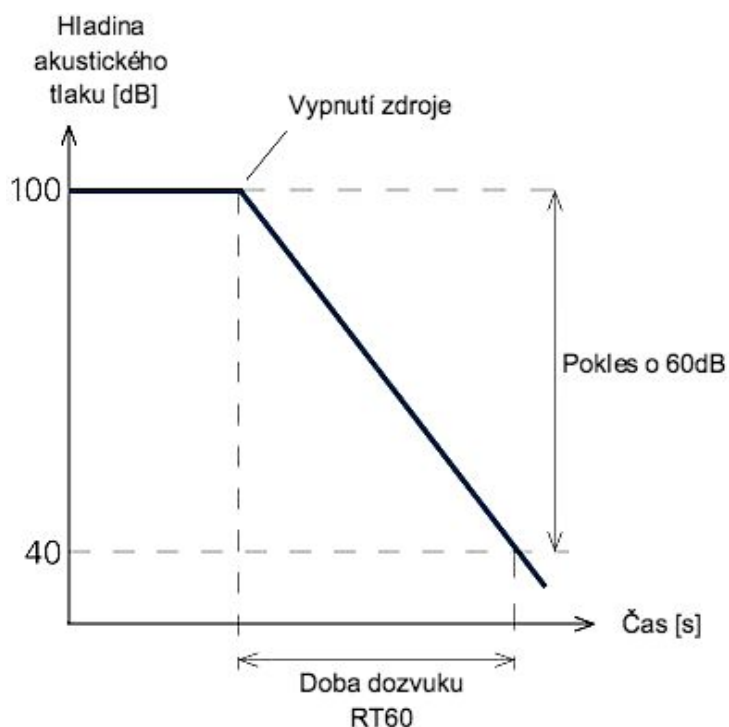
Vzhledem k tomu, že místnost, pro kterou chceme pohltivost stěn vypočítat, se v praxi většinou skládá z různých druhů povrchů s různými činiteli pohltivosti, použijeme pro výpočet vztah pro celkovou absorpci:

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i \quad [\text{m}^2]$$

Činitel zvukové pohltivosti je frekvenčně závislý, což se projevuje mj. různou účinností akustických prvků na různých frekvencích.

### 1.3.2 Doba dozvuku

Dozvuk definujeme jako zvuk šířící se prostorem po vypnutí zdroje až do jeho úplného pohlcení stěnami. Doba dozvuku se definuje jako čas, za který intenzita zvuku po vypnutí zdroje (difuzního pole) v místnosti klesne o 60 dB - označovaná jako RT60. [2] (str. 97)



Obr. 9: znázornění doby RT60;  
zdroj originálu:

<https://www.nti-audio.com/en/applications/room-building-acoustics/reverberation-time-rt60>

Pokud prostředí neposkytuje adekvátní odstup od hlukového pozadí, dá se měřit také RT20 nebo RT30 a to tak, že se změří pokles zvukové energie o 20, resp. 30 dB a pak se tato doba vynásobí třemi, resp. dvěma.

Protože doba dozvuku je nejvíce ovlivňována pohltivostí stěn a překážek v místnosti a ta je frekvenčně závislá, totéž platí i o době dozvuku. Na jednotlivých frekvencích ji mimo to ovlivňuje i výskyt vlastních kmitů místnosti, což se v malých místnostech projevuje např. přezníváním některých basových tónů.

Pro výpočet doby dozvuku existuje několik vztahů, prvním je Sabinův vzorec [1] (str. 56):

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad [\text{s}; \text{m}^3, \text{m}^2]$$

Clement Sabine tento vzorec empiricky odvodil začátkem 20. století. Předpokládal přítom plynulé pohlcování zvuku stěnami. Při přítomnosti ploch s různými činiteli pohltivosti spočítáme jeho střední hodnotu s pomocí vztahu:

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

Sabinova rovnice je vhodná pro prostory s nízkým činitelem pohltivosti stěn. Její využití při jeho extrémních hodnotách je problematické z toho důvodu, že v případě maximální pohltivosti stěn by se doba dozvuku měla rovnat nule, což rovnice neumožní; v případě nulové pohltivosti by pak měla být nekonečná, což zase vylučují ztráty energie při průchodu vlny samotným prostředím.

Carl Eyring předpokládal skokové ztráty energie při odrazech, což jej dovedlo k následujícímu upřesnění Sabinovy rovnice [1] (str. 57):

$$T_E = 0.164 \frac{V}{-S \ln(1-\alpha)} = 0.164 \frac{V}{\alpha' S} \quad [\text{s}; \text{m}^3, \text{m}^2]$$

Tato rovnice vyhovuje i v místnostech s vyšším činitelem pohltivosti stěn. Protože ovšem pracuje se střední hodnotou činitele pohltivosti namísto toho, aby brala v potaz odlišné hodnoty činitele pohltivosti různých překážek a stěn, nehodí se pro výpočet doby dozvuku v místnostech s hodnotou činitele přesahující 0.8.

Nedostatek Eyringovy rovnice napravuje rovnice Millingtonova [1] (str. 58):

$$T_M = 0.164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad [\text{s}; \text{m}^3, \text{m}^2]$$

Protože doba dozvuku kromě frekvence přímo souvisí také s možnostmi šíření zvuku v daném prostředí, pro kompenzaci jeho vlivu se ve výpočtech navíc do jmenovatele dosazuje korekční člen  $4mV$ , kde “m” je činitel útlumu závisící na relativní vlhkosti, hustotě a teplotě. Po přepisu vztahů s činitelem útlumu tedy dostaneme:

$$T_S = 0.164 \frac{V}{\alpha \cdot S + 4mV} \quad [\text{s}]$$

$$T_E = 0.164 \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\alpha) + 4mV} \quad [\text{s}]$$

$$T_M = 0.164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_i) + 4mV} \quad [\text{s}]$$

## 1.4 Ovlivňování akustiky prostoru

Jak jsme viděli v předchozích odstavcích, pro co nejlepší poslechové podmínky potřebujeme co nejrovnoměrnější rozložení vlastních módů, čehož dosáhneme volbou vhodných rozměrů místnosti. V případě domácích studií jsou ovšem rozměry zpravidla pevně dané, takže je třeba hledat jiné řešení. Tím je úprava pohltivosti odrazivých ploch v místnosti (stěn) - pokud zvětšíme pohltivost stěn, z pohledu intenzity odraženého vlnění jde vlastně o totéž, jako kdyby byly stěny dál od sebe [6]. Absorbci můžeme zmírnit energii odražených vln s frekvencemi korespondujícími vlastním módům a tím zmírnit problémy způsobené jejich nepříznivým rozložením.

### 1.4.1 Principy absorpce

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, pokud má činitel pohltivosti hodnotu menší než 1, dojde k odrazu vlny, která nese pouze část původní energie. Zbývající část buď projde skrz stěnu či překážku, nebo je přeměněna v jinou formu energie, zpravidla tepelnou. Prozkoumejme tedy nyní jakými způsoby k absorpci může dojít.

Přeměnu zvukové energie v akustických materiálech můžeme podle [1] (str. 63) rozdělit na:

1. přeměny vznikající třením (viskózní ztráty) - zvuková energie se mění na tepelnou při pohybu částic podél plochy. Tohoto principu využívají porézní akustické materiály, které se snaží poskytovat zvukovému vlnění co největší třecí plochu;
2. přeměny vznikající poklesem akustického tlaku (relaxační přeměny) probíhají zejména u látek, které dobře vedou teplo, protože v místě nárůstu tlaku vzduchu se zvyšuje teplota a "zahřeje-li" takto zvuková vlna dobře teplovodivý materiál, ztratí tím část energie;
3. přeměny vznikající nepružnou deformací těles - za přítomnosti dostatečného množství zvukové energie může dojít k deformaci materiálu, což se děje u materiálů s tzv. pružnou hysterezí, neboli dopružováním (to znamená, že materiál se nevrátí do své původní podoby okamžitě, ale až po určitém čase). Deformace tělesa je v tomto případě analogická úbytku zvukové energie.



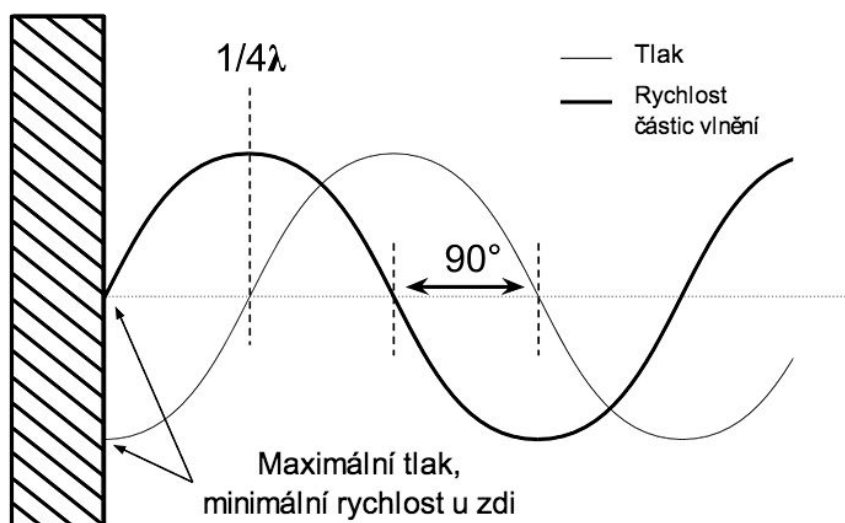
## 1.5 Rozdělení akustických prvků

Ke změně činitele pohltivosti povrchů místnosti se používají akustické obklady, které lze rozdělit podle principu jejich fungování.

### 1.5.1 Obklady tvořené porézními materiály

Porézní obklady využívají k pohlcování princip přeměny zvukové energie na tepelnou pomocí zpomalování vzduchových částic třením. Zpravidla jde o materiál, v jehož objemu jsou za účelem maximalizace třecí plochy dutinky plněné až z 99 % vzduchem. Podle struktury může jít o materiály vláknité, partikulární (kamenivo spojené lepidlem), pěnitě; typickým materiálem je minerální vlna používaná jinak k tepelné izolaci.

Porézní akustické obklady zvuk neabsorbují stejně účinně na všech frekvencích, pohltivost závisí zejména na hustotě materiálu a na tloušťce obkladu. Obklady nejefektivněji zpomalují částice vzduchu s vysokou rychlostí, z čehož vyplývá, že nejnižší frekvence, na které obklad ještě absorbuje, se rovná přibližně čtvrtině vlnové délky inkriminované vlny. Protože částice zvukové vlny dosáhnou prvního rychlostního maxima ve čtvrtině periody (tzn. ve čtvrtině vlnové délky) a protože u stěny, od které probíhá odraz, je jejich rychlost nejnižší, můžeme předpokládat, že první maximum je právě ve vzdálenosti odpovídající oné čtvrtině periody. Díky tomuto jevu se dá snížit nejnižší frekvence, na které obklad ještě pohlcuje - jednak zvětšením jeho tloušťky, jednak vytvořením "vzduchového polštáře", tj. odsazením obkladu od stěny.



Obr. 10: znázornění vztahu akustického tlaku a akustické rychlosti;  
zdroj originálu: <http://www.acousticsinsider.com/why-bass-traps-in-corners/>

Typické akustické panely, které se dají vyrobit svépomocí, přestávají účinkovat na frekvencích kolem 250 Hz (pro tloušťku 20 cm) a neřeší tedy problémy vyplývající z rozložení vlastních kmitů. Proto existují zvláštní absorbéry, tzv. basové pasti, které jsou svými rozměry navrženy specificky pro pohlcování nízkých frekvencí.

Zpravidla se umísťujú do rohů místnosti, čehož příčinou není pouze snaha o zachování co největšího využitelného prostoru, ale i to, že v rozích máme největší šanci zasáhnout jak kmity osově, tak i ty tangenciální a kosé.

### 1.5.2 Obklady založené na principu rezonance

Jak jsme zmínili výše, k rezonanci dochází při shodě budícího kmitočtu s vlastním kmitočtem soustavy. Pokud zvuková vlna rozkmitá jinou soustavu, ztratí tím část energie - tím víc, pokud dosáhne její rezonance, čehož využívají akustické prvky založené na principu rezonance. Může jít buď o kmitající desky a membrány nebo Helmholtzovy rezonátory. [1]

### 1.5.3 Kmitající desky a membrány

Tento druh obkladů se skládá zpravidla z desky či fólie připevněné k pevné konstrukci, která určuje vzdálenost od stěny (a tím tloušťku vzduchového polštáře) - ta je často vyplněna pohltivým materiálem. Společně tvoří rezonanční soustavu - energie zvukové vlny se rozkmitáním desky na její rezonanční frekvenci přeměňuje na energii mechanickou, která se tlumením vibrací mění na tepelnou energii. Rezonanční kmitočet závisí na plošné hmotnosti  $m$  a tloušťce vzduchové mezery  $d$  - čím vyšší obě hodnoty jsou, tím nižší je rezonanční kmitočet.

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad [\text{Hz}]$$

Absorpční materiál vložený na místo vzduchového polštáře rozšíří frekvenční pásmo absorpce a zároveň sníží rezonanční frekvenci, ovšem nesmí se dotýkat desky, které by tím bránil v kmitání.



Obr. 11: panelový rezonátor

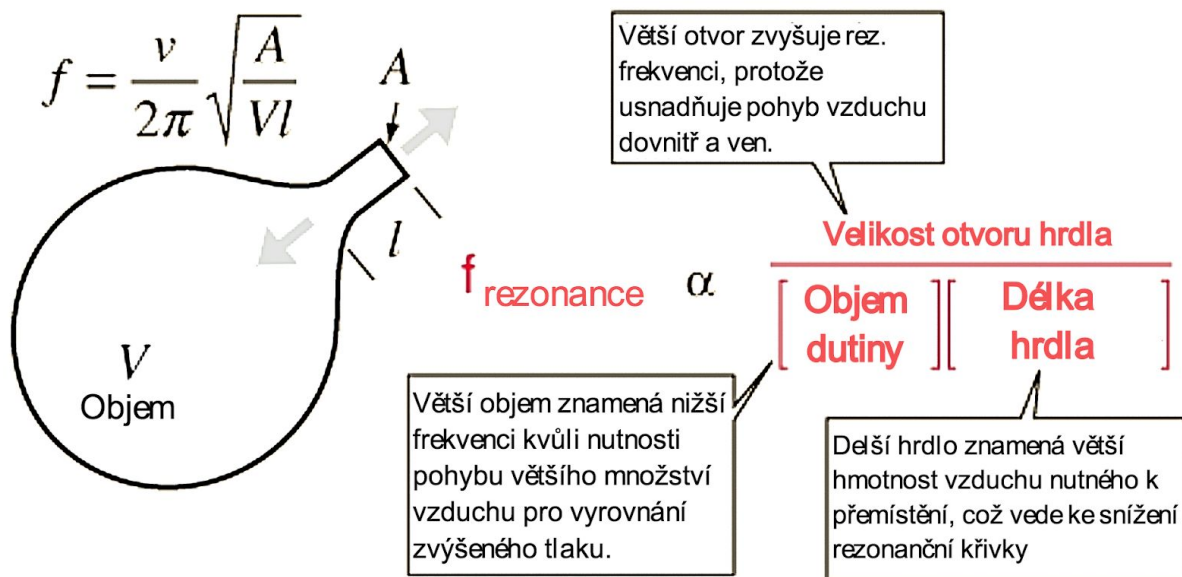
### 1.5.4 Helmholtzův rezonátor

Pokud obecně známým způsobem foukneme přes hrdlo lahve, vydá podle objemu vzduchu uvnitř tón - to proto, že vzduch uvnitř lahve se chová jako rezonanční soustava, kterou se nám tímto způsobem podařilo vybudit.

Rezonátor nazvaný podle "Říšského kancléře vědy" se skládá z dutiny plné vzduchu a zúženého hrdla s otvorem (též plného vzduchu). Vzduch v hrdle představuje akustickou hmotnost danou tvarem hrdla a hmotností vzduchu. Tento "vzdušný píšť" stojí na elastickém "polštáři" tvořeném vzduchem v dutině. Tyto dvě části spolu tvoří kmitající systém se specifickou rezonanční frekvencí danou jejich rozměry a tvarem.

Tento princip je často využíván k zesílení zvuku (např. u akustických hudebních nástrojů, ale třeba také u bassreflexových portů reproduktorů) - aby došlo k absorpci, je třeba zvuk procházející hrdlem zpomalit, k čemuž se zpravidla využívá pohltivý materiál aplikovaný uvnitř objemu rezonátoru. [7]

Protože přechod mezi dutinou a otvorem není z hlediska vlastností kmitavě se pohybujícího média skokový, ale plynulý, je třeba uvažovat o korekci otvoru  $2\Delta l$ , která nahrazuje plynulý přechod přídatnou spolukmitající hmotností před a za otvorem - jde vlastně o matematický odhad množství vzduchu kolem konců hrdla, které kmitají společně se vzduchem v hrdle.

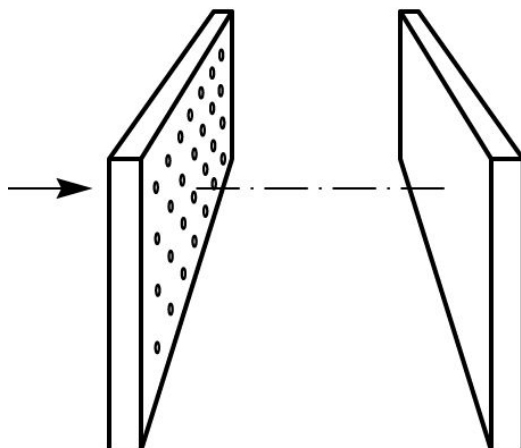


Obr. 12: schéma Helmholtzova rezonátoru;

zdroj originálu: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Ph4060/P406ex2.html>

Helmholtzovy rezonátory jsou velmi účinné v rámci jednoho specifického frekvenčního pásma, jsou ovšem zpravidla nákladné na výrobu. Nejrychlejšího zlepšení akustiky v neupravené místnosti se většinou dá dosáhnout využitím širokopásmové absorpce, proto se místo jednotlivých rezonátorů někdy používají tzv. děrované desky, tvořené děrovanou deskou, vzdušným polštářem a pevnou deskou. V tomto případě má absorpci na svědomí tření rezonujících "vzdušných píšťů"

v otvorech, kterým umožňuje pohyb právě vzdušný polštář. Protože většina takto pohlcené energie se mění na energii tepelnou, je tepelná vodivost materiálu v tomto případě důležitá. [7]



Obr. 13: schéma "děrovaných desek";

zdroj: <https://www.hunecke.de/en/knowledge/absorbers/mpa.html>

#### 1.5.5 Basové pasti

Tato práce záměrně opomíjí využívání basových pastí - aby byly tyto absorbéry účinné na nízkých kmitočtech, musely by být poměrně objemné. Jak uvidíme dále, v případě námi zkoumané místnosti by bylo potřeba dosáhnout účinku již na kmitočtech kolem 40 Hz. Čtvrtina vlnové délky vlny této frekvence se rovná 2,15 m, takže účinná basová past z porézního materiálu by zabrala spoustu místa v již tak malé místnosti, nehledě na prostředky, které by k získání takového množství materiálu bylo nutné vynaložit.



Obr. 14: basové pasti domácí výroby;

zdroj: <http://reberrecording.com/wp-content/uploads/2012/03/traps.jpg>

### 1.5.6 Difuzní prvky

Pro kontrolu nad difuzitou zvukového pole se tam, kde je specifický charakter dozvuku žádoucí součástí akustiky prostoru (koncertní sítě, větší nahrávací studia), používají prvky, které zvuk neabsorbují, ale díky své členitosti rozptylují. Jak ovšem uvidíme dále, mezi primární cíle v domácím studiu bude patřit především snížení doby dozvuku, takže se v této práci využitím difuzorů nebudeme dále zabývat.



*Obr. 15, příklad difuzních prvků;  
zdroj: <http://www.totalvibrationsolutions.com/page/288/Diffusers.htm>*



## 1.6 Základy měření

Pokud je snahou něco vylepšit, zpravidla je třeba to nejdříve změřit, už z důvodu posouzení, zda snahy o zlepšení míří správným směrem. Zásadní informace o akustice místnosti nám udávají její přenosová funkce a impulsní odezva, díky kterým se dozvíme o:

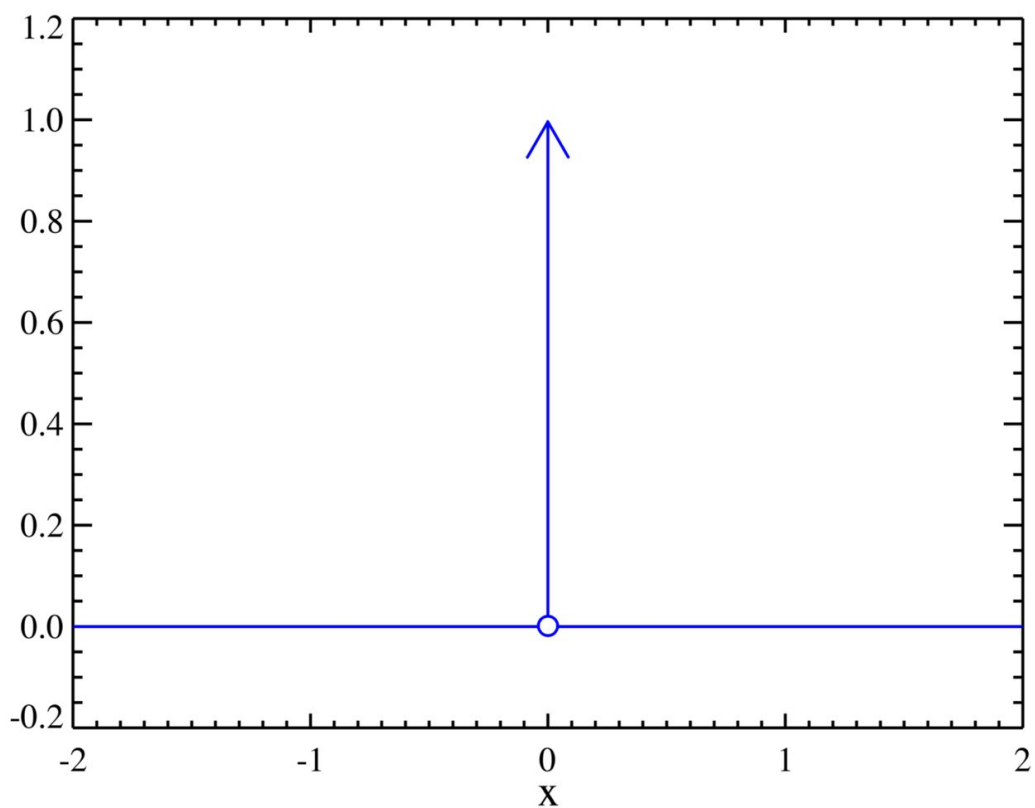
- frekvenční odezvě;
- době dozvuku v závislosti na frekvenci.

V následujících řádcích se na ně tedy zaměříme společně se způsoby jejich získávání.

### 1.6.1 Buzení impulsem

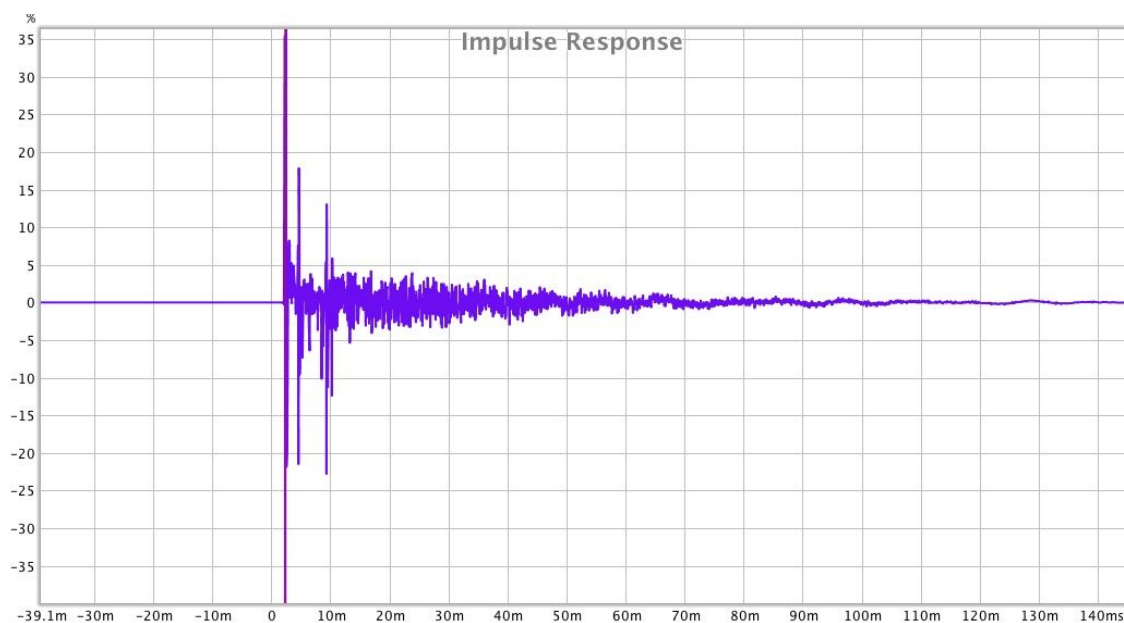
Reakce lineárního časově-neproměnného systému na krátký vstupní signál - impuls - podle teorie systémů obsahuje všechny jeho vlastnosti. Protože uzavřená místnost může být považována za lineární akustický systém (nelineární by byl třeba v případě, že by mezi konci místnosti byl velký teplotní rozdíl vzduchu), její odezva na zvukový impuls popisuje změny, které místnost způsobí zvukovému signálu na cestě z jednoho bodu do druhého [2] (str. 255), v našem případě na cestě mezi reproduktorem a posluchačem.

Nejvíce přímočarou metodou vyplývající již z definice impulsní odezvy je vybuzení místnosti krátkým impulsem. Pro dosažení co největšího odstupů signálu od šumu by měl signál být co nejsilnější, ovšem bez toho, aby přebudil systém, který jej generuje. To v praxi vylučuje reprodukci impulsů skrz reproduktory, protože intenzita potřebná pro dosažení adekvátního odstupů od hlukového pozadí by s největší pravděpodobností vedla k jejich mechanickému poškození. Používají se proto zdroje jako například elektricky generovaný impuls vznikající ve speciálním jiskřišti, startovací pistole (ne zcela optimální z hlediska frekvenční odezvy či sousedských vztahů) nebo pád nějakého hluk vydávajícího předmětu na zem (ještě méně optimální z obou jmenovaných důvodů). Snahou je přiblížit se podobou budícího signálu k tzv. Diracově jednotkovému pulsu, tj. signálu, který má v bodě nula nekonečnou hodnotu a ve všech ostatních bodech hodnotu nulovou.



Obr. 16: Diracův impuls;  
zdroj:

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Diracovo\\_delta#/media/File:Dirac\\_distribution\\_PDF.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Diracovo_delta#/media/File:Dirac_distribution_PDF.png)

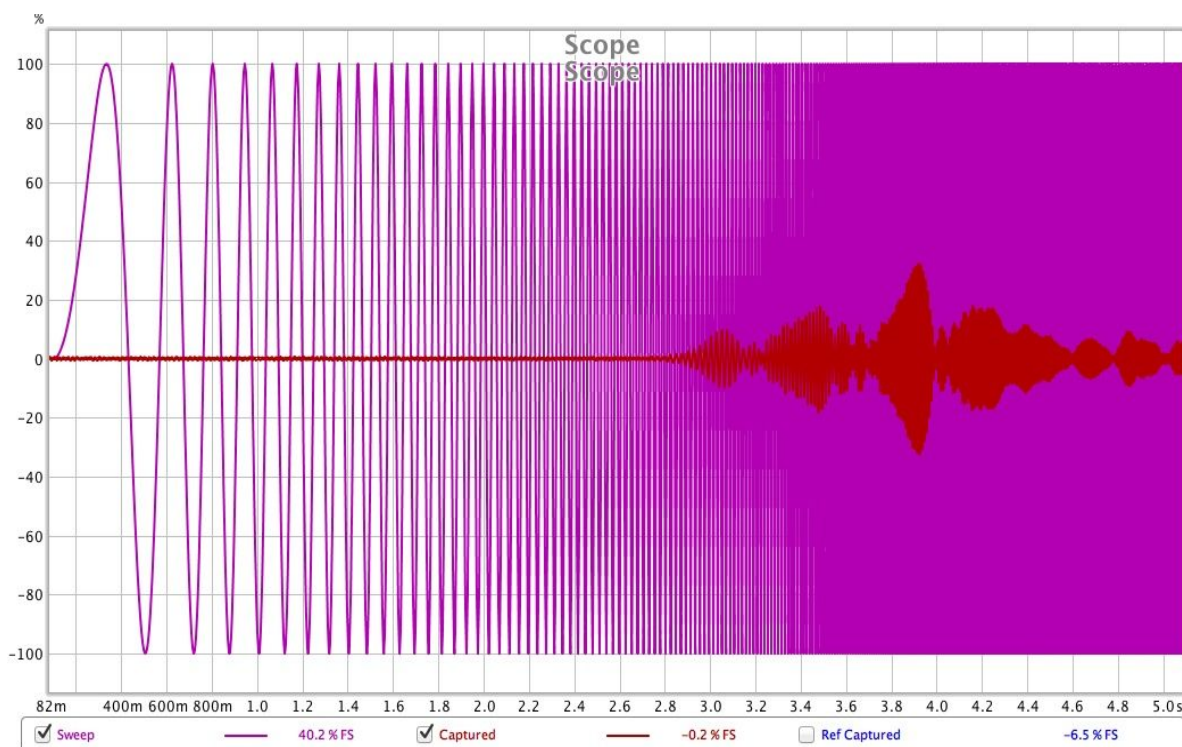


Obr. 17: Zobrazení impulsní odezvy v grafu amplitudy závislé na čase, z programu  
Room EQ Wizard

### 1.6.2 Buzení sinusovým signálem přeladované frekvence (“sweep”)

Fourierova transformace je matematický proces umožňující přecházet mezi časově a frekvenčně závislým vyjádřením signálu, který vychází z možnosti rozložení jakéhokoliv signálu na součet funkcí sinus a kosinus různých frekvencí, amplitud a fází.

Přenosová funkce (v tomto případě získaná s pomocí sweepu) je Fourierovou transformací impulsní odezvy, takže s využitím sweepu je teoreticky možné získat stejné informace; metody odlišuje pouze využití jiného budícího signálu. Výhodou této metody je snadnější praktická realizace (reprodukce signálu nevyklučuje běžné reproduktory), či snáze zlepšitelný odstup od šumu (prodloužení budícího sweepu).

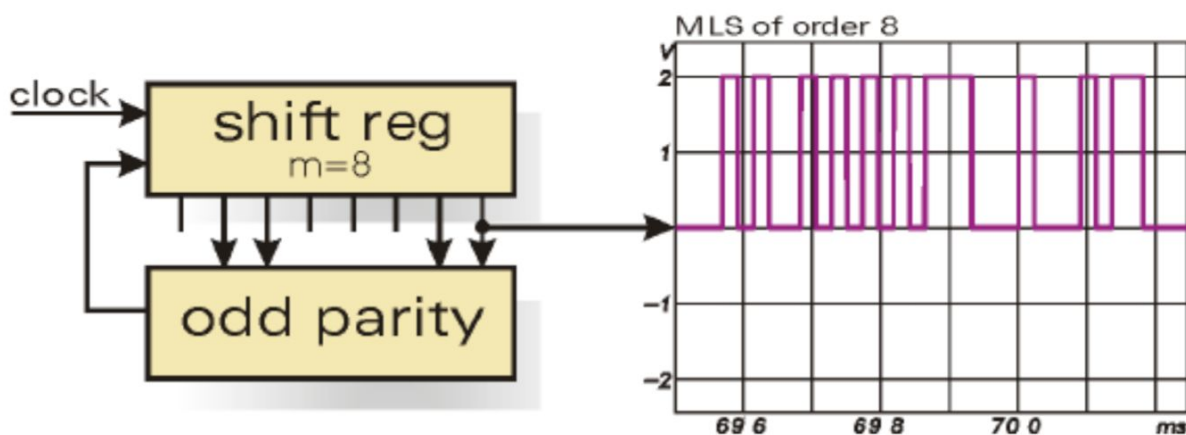


*Obr. 18: znázornění průběhu měřícího (sweep, fialový) a naměřeného signálu (červený), z programu Room EQ Wizard*



### 1.6.3 Metoda MLS

Stejně jako v případě obou výše popsaných metod, i tato spočívá ve výpočtu přenosové funkce porovnáním známého budícího signálu a jeho záznamu po průchodu prostorem místnosti, a stejně jako excitace sweepem lze výsledek přepočítat na impulsní odezvu, pouze s využitím jiného matematického postupu (Hadamardova transformace). Budícím signálem je v tomto případě pseudonáhodná periodická sekvence generovaná n-bitovým posuvným registrem se zpětnou vazbou - v praxi jde o signál podobný šumu, ovšem se známým průběhem. Nevýhodou metody je citlivost na harmonické zkreslení reprodukčního řetězce. [9]



Obr. 19: generování 8-bitového MLS signálu, [9]

## 1.7 Normy a doporučení (pro 2.0 systém)

Pro optimální poslechové podmínky pro tvorbu a konzumaci AV materiálu existuje řada doporučení. Za komplexní doporučení, co se poslechových podmínek týče, se dá považovat EBU Tech 3276, ze kterého budeme při našem zkoumání vycházet.

Vzhledem k zaměření práce omezme naše zkoumání na parametry týkající se 2.0 reprodukce. EBU Tech 3276 rozlišuje mezi “referenční poslechovou místností” jako místem pro společný poslech tří až sedmi lidí, a “kontrolní místností” (control room), myšlenou jako pracoviště pro zvukovou postprodukci. Z povahy organizace stojící za touto normou máme na mysli pracoviště pro televizní zvukovou postprodukci. V rámci této práce se budeme snažit přiblížit požadovaným vlastnostem kontrolní místnosti a vybraná doporučení se tedy vztahují na tento druh místnosti. Doporučení stanovuje mimo jiné následující parametry:

- první odrazy (tj. odražený zvuk, který dojde k posluchači během prvních 15 ms) by měly být alespoň o 10 dB slabší, než přímý zvuk pro všechny kmitočty mezi 1 kHz a 8 kHz;
- dozvukové pole by mělo:
  - dosahovat adekvátní difuzity za účelem předcházení slyšitelným akustickým deformacím, jako je např. třepotavá ozvěna;
  - být měřeno s použitím  $\frac{1}{3}$  oktávového filtru a s reproduktory jako zdroji budícího signálu;
  - průměrná doba dozvuku by se měla pohybovat v rozmezí 200 ms až 400 ms;
  - pro zachování “přirozenosti” dozvuku by jeho doba měla růst úměrně s místností podle vztahu

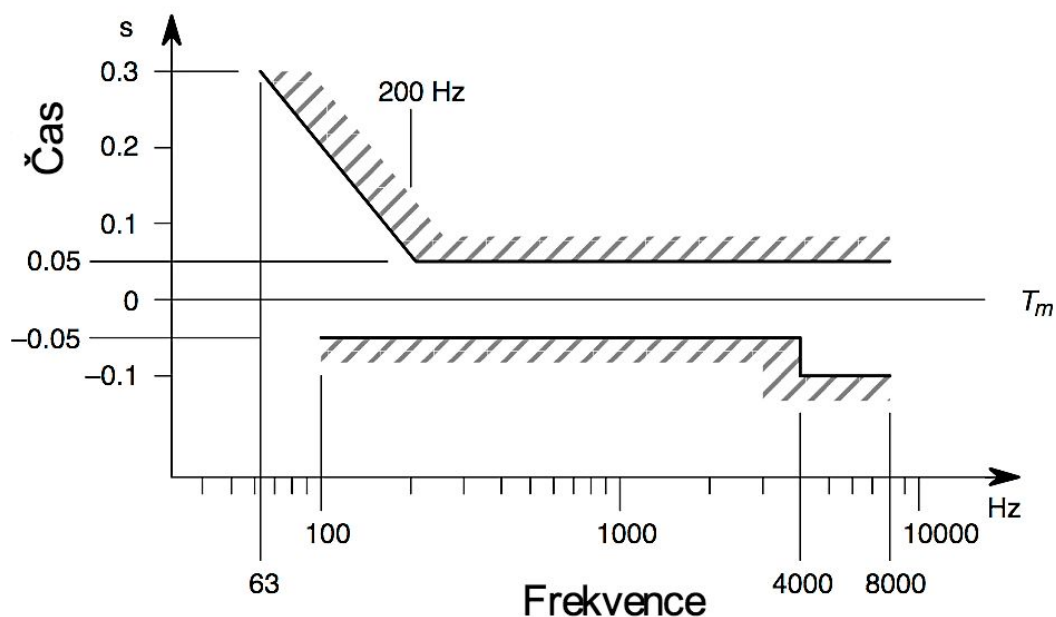
$$T_m = 0.25 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{s}]$$

kde

$V$  je objem měřené místnosti [ $\text{m}^3$ ]

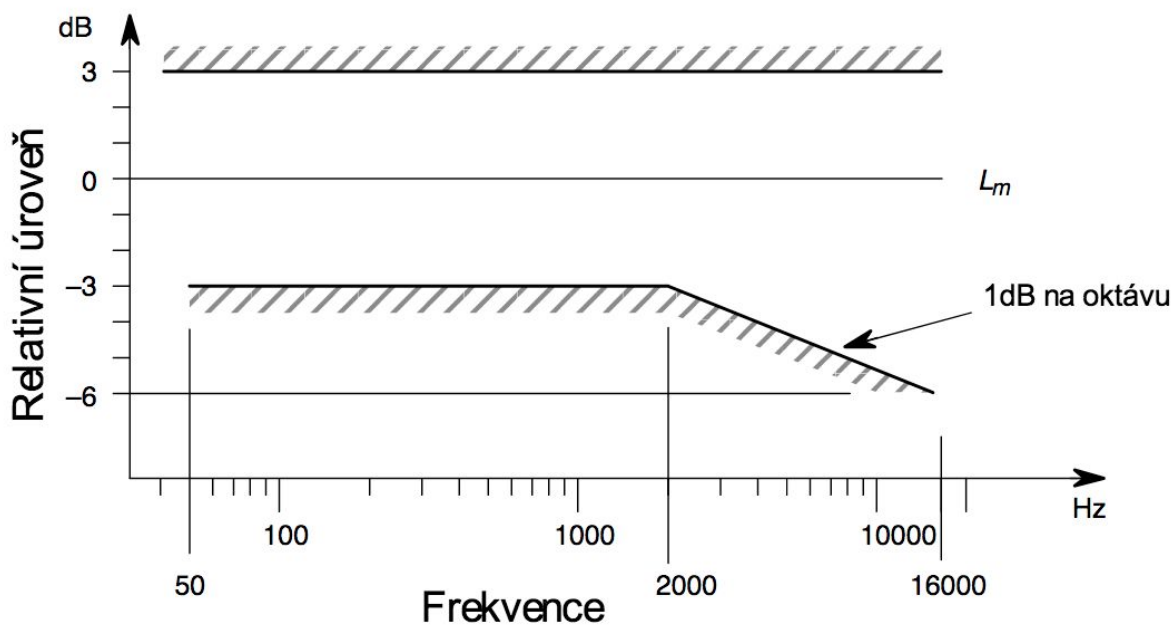
$V_0$  je referenční objem  $100\text{m}^3$ ;

- mělo by být předcházeno náhlým změnám v době dozvuku na různých kmitočtech, přípustné změny mezi sousedními  $\frac{1}{3}$  oktávovými pásmy jsou:
  - méně než 0.05 s pro frekvence mezi 200 Hz a 8 kHz;
  - méně než 25 % délky dozívání déle dozívajícího z pásem pro frekvence pod 200 Hz



Obr. 20: přípustné změny v době dozvuku v závislosti na frekvenci, [10]

- operační odezva místnosti je definována jako frekvenční odezva místnosti na akustický tlak generovaný reproduktory v každém bodě místnosti, měřícím signálem je 1/3 oktávově filtrovaný růžový šum, následující obrázek popisuje maximální přípustnou odchylku od ideální odezvy:



Obr. 21: limity tolerance operační odezvy místnosti, [10]

- vzhledem k obtížné dosažitelnosti ideální odezvy zejména na nízkých frekvencích je doporučováno:
  - zlepšit odezvu v první řadě akustickými úpravami,
  - dále je možné využít ekvalizaci, při té je ovšem na místě postupovat se zvýšenou opatrností, aby nedošlo k degradaci kvality signálu;
  - doporučuje se tímto způsobem provádět úpravy pouze v oblasti nižších frekvencí (pod 300 Hz);
  - důležité je zachování stejné odezvy pro oba reproduktory;
- hlasitost reprodukce se nastaví tak, aby A-vážená hladina akustického tlaku odpovídala

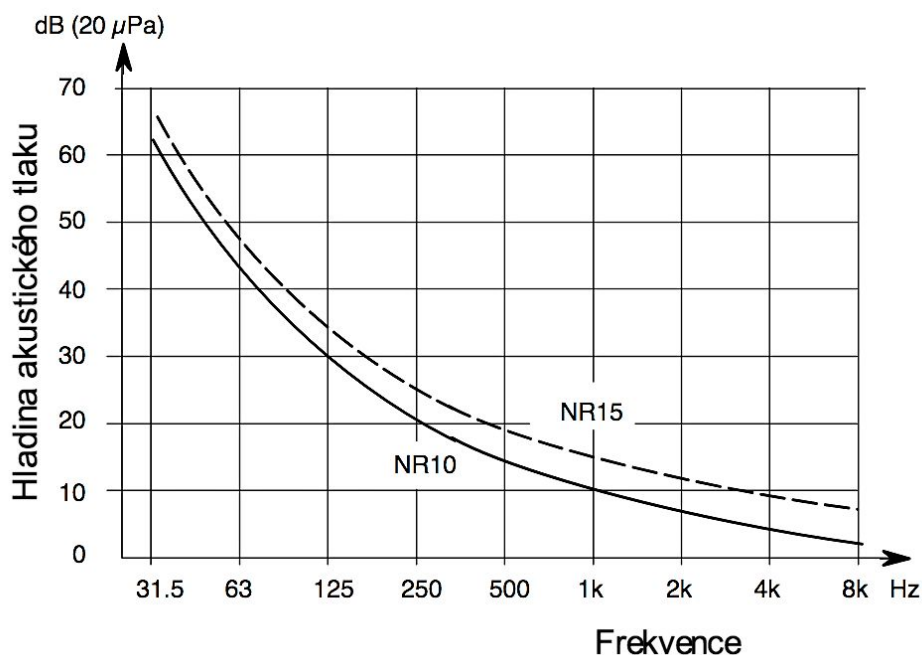
$$L_{refPOSLECH} = 85 - 10\log(n) \text{ [dB(A)]}$$

kde

- $n$  je celkový počet reproduktorů;
  - dále rozdíl mezi kanály nesmí přesahovat 1 dB;
  - v případě digitálního reprodukčního řetězce musí mít výstupní signál hodnotu -18 dBFS;
- hluk pozadí by neměl přesáhnout úroveň NR10, v žádném případě pak ne NR15 a neměl by být impulzivního, tonálního nebo cyklického charakteru;

Křivka NR	Frekvence [Hz]								
	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10	62.2	43.4	30.7	21.3	14.5	10.0	6.6	4.2	2.3
15	65.6	47.3	35.0	25.9	19.4	15.0	11.7	9.3	7.4

Obr. 22: hodnoty oktávových pásem v dB SPL [10]



Obr. 23: křivky hodnocení hlukového pozadí, [10]

- doporučení týkající se pozice reproduktorů:
  - výškové reproduktory by měly být umístěny ve výšce alespoň 1,2 m, tedy přibližně ve výšce uší sedícího člověka;
  - náklon reproduktorů by neměl přesahovat 10 stupňů vůči horizontální rovině;
  - pokud nejsou reproduktory instalované ve stěně, měly by od ní být vzdáleny alespoň 1 m;
  - šíření přímého zvuku od reproduktorů k posluchači by neměla bránit žádná překážka;
  - všechny poslechové pozice by se měly nalézat alespoň 1,5 m od zadní stěny a bočních stěn;
  - reproduktory a poslechová pozice by měly tvořit vrcholy rovnostranného trojúhelníku;
  
- doporučení týkající se vlastností místnosti:
  - minimální rozloha 30 m<sup>2</sup>
  - objem by neměl přesáhnout 300 m<sup>3</sup>

- z hlediska rozložení vlastních kmitů je žádoucí, aby rozměry místnosti dodržovaly poměr:

$$1.1w/h \leq l/h \leq 4.5w/h - 4$$

$$l < 3h$$

$$w < 3h$$

kde

$l$  je délka,  
 $w$  je šířka,  
 $h$  je výška místnosti,

a jejich poměry by neměly být v rozmezí 5 % celočíselných hodnot;

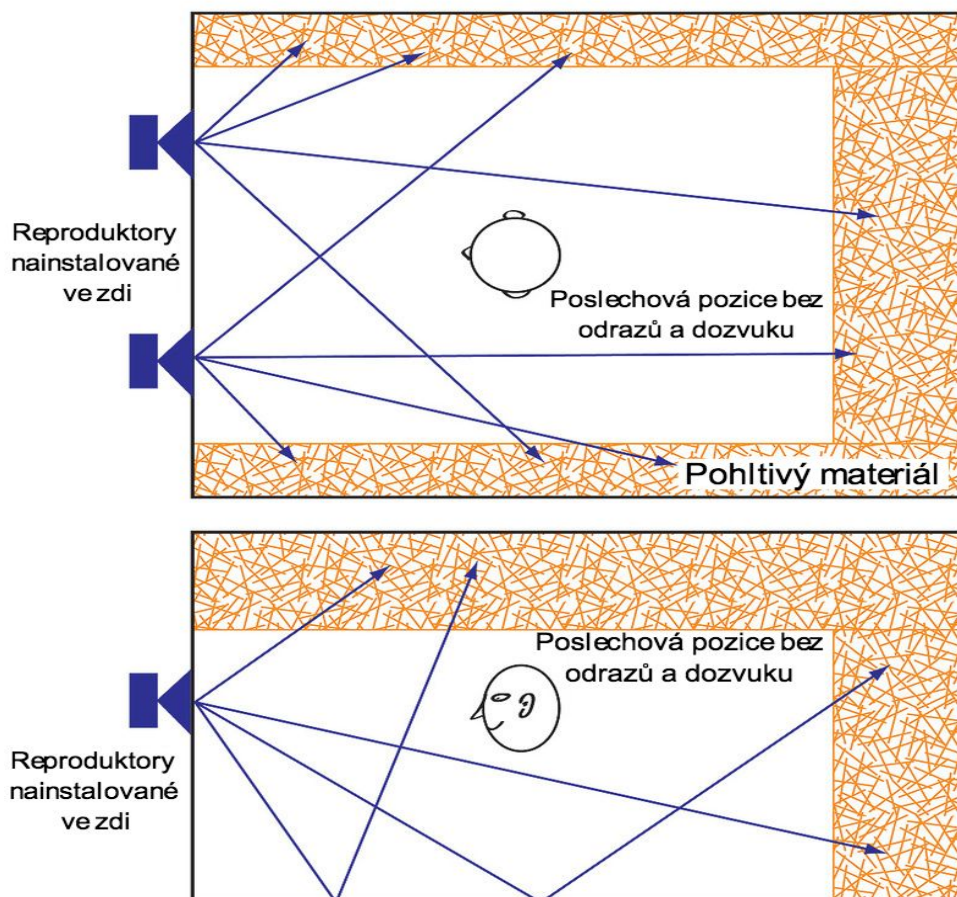
- rozměry se měří vzhledem ke vnitřním strukturám místnosti bez ohledu na vybavení;
- místnost by měla být symetrická v ose poslechu nejen svým tvarem, ale i pohltivostí ploch;
- veškeré rezonující objekty musí být řádně utlumeny, při poslechu by zvuk neměl nic slyšitelně rozvíbrovat;
- absorpční prvky je třeba rozmístit tak, aby zamezily slyšitelným odrazům či třepotavé ozvěně.

## 1.8 Přístupy k návrhu kontrolní místnosti

Cest k dosažení požadované akustiky v kontrolní poslechové místnosti je více, obzvláště pak, odhlédneme-li od audiovizuální postprodukce směrem k té hudební. V této kapitole projdeme několik příkladů odlišných filozofií přístupu k návrhu této místnosti. [4] (str. 431, 439), [11]

### 1.8.1 Non-environment

Tento druh místnosti jde cestou maximálního pohlcení a tvoří tedy akusticky “mrtvý” prostor, ve kterém posluchač slyší prakticky pouze přímý zvuk. Reproductory jsou zadržané, boční a zadní stěny jsou společně se stropem pokryté akusticky pohltivým materiálem. Výhodou je nulová možnost zastření tichých detailů, nevýhodou fakt, že difuzní pole může mít až o 10 dB větší intenzitu než přímý zvuk a v jeho absenci je třeba vynaložit proporcionalně větší akustický výkon k dosažení stejné hlasitosti.

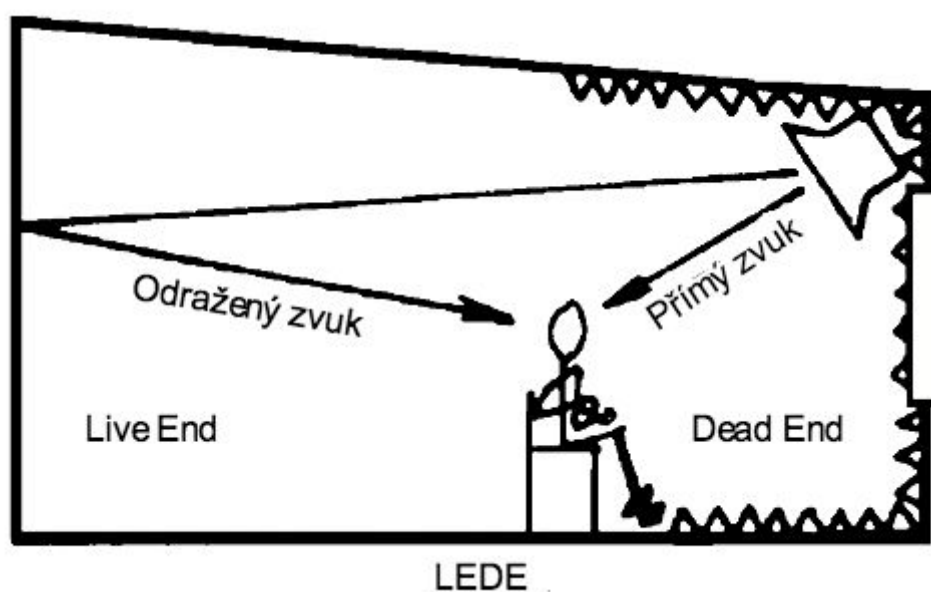


Obr. 24, non-environment čili totální absorpce;  
zdroj originálu: Howard and Angus, *Acoustics And Psychoacoustics*, Focal Press,  
2009

### 1.8.2 Live end dead end

Výše uvedený problém řeší design se zkratkou LEDE, který pro zachování dozvukového pole nechává zadní konec místnosti bez absorpce, většinou však s difuzními prvky za účelem rozptýlení prvního odrazu.

Tento přístup je méně nákladný na realizaci vzhledem k menšímu počtu pohltivých prvků. "Živost" místnosti je možné měnit změnou pohltivosti zadního konce. Nevýhodou je poměrně malý sweetspot a obtížná adaptace na případný systém prostorového zvuku.

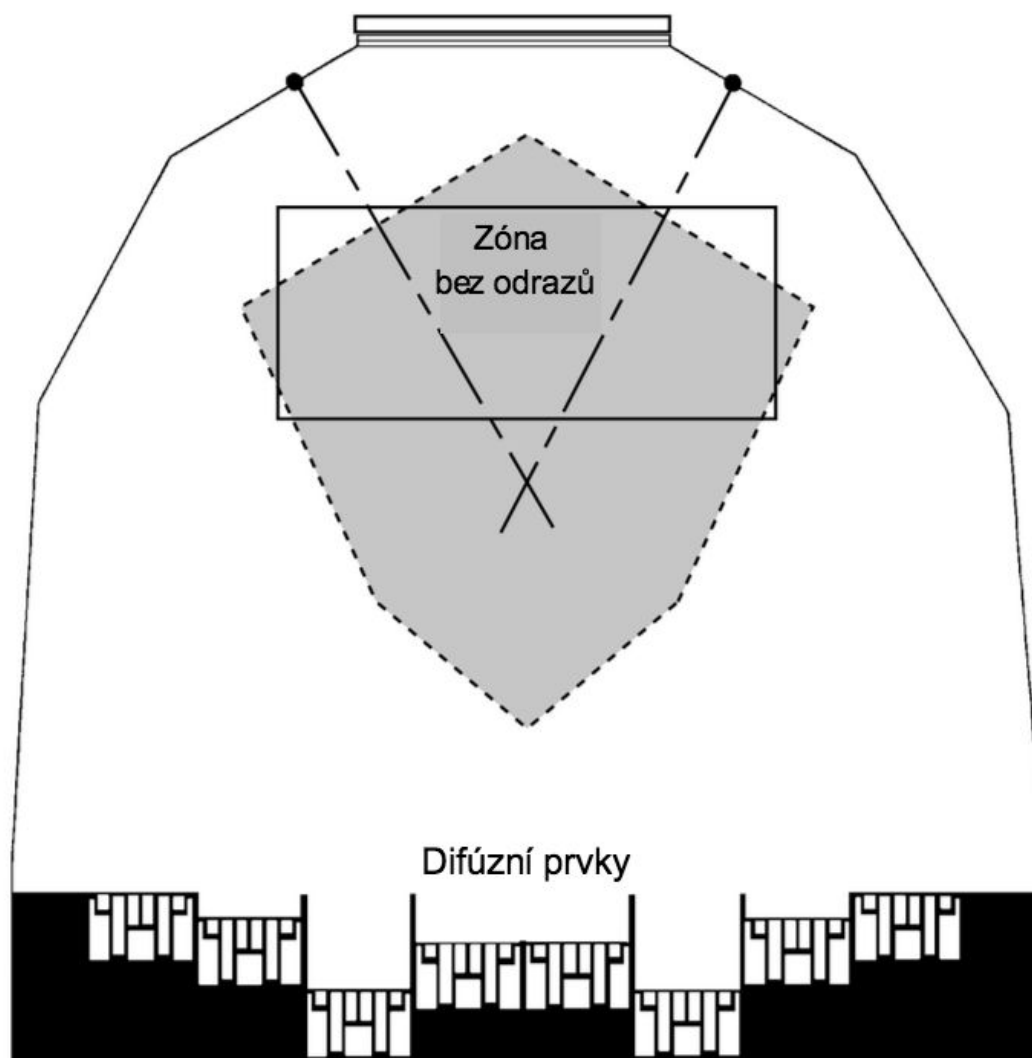


Obr. 25, schéma LEDE návrhu, [4]



### 1.8.3 Reflection free zone & controlled image design

Namísto plošné absorpce je možné zaměřit absorpci pouze na místa, která jsou příčinou nejsilnějších odrazů, které by mohly negativně interferovat s přímým zvukem. Dalším způsobem, jak zařídit, aby se první odrazy nedostávaly do poslechové pozice ve škodlivé míře, je adekvátní geometrie stěn (controlled image design), při návrhu takového prostoru se intenzivně využívá geometrická akustika.



Obr. 26, schéma možného RFZ návrhu [4]

### 1.8.4 Ambechoic (ambient anechoic) design

Tento přístup se využití absorpčních prvků zcela vyhýbá a místo nich využívá pouze difuzéry k dosažení uniformního dozvukového pole. Místnost je tedy "živá", ovšem bez výrazných odrazů v poslechové pozici.

## 1.9 Domácí studio

Výše zmíněné návrhy se neobejdou bez relativně výrazných a nákladných stavebních úprav. Vžijme se nyní do kůže někoho, kdo je v takovém měřítku provést nemůže, ať už z důvodu nedostatečných prostředků, či například bydlení v podnájmu, a položme si otázku, zda je možné se v takových podmínkách přiblížit parametrům, které doporučuje EBU Tech 3276. Za domácí studio považujeme prostor s proporcemi obytného pokoje, ve kterém se akustickými úpravami nemůžeme zbavit příliš velkého využitelného objemu. S ohledem na vlastníky budovy se také budeme vyhýbat destruktivním zásahům, jako je vrtání do zdí. Za akustické prvky pak považujeme prostředky, které by mohly být dostupné hypotetickému jednotlivci v podnájmu:

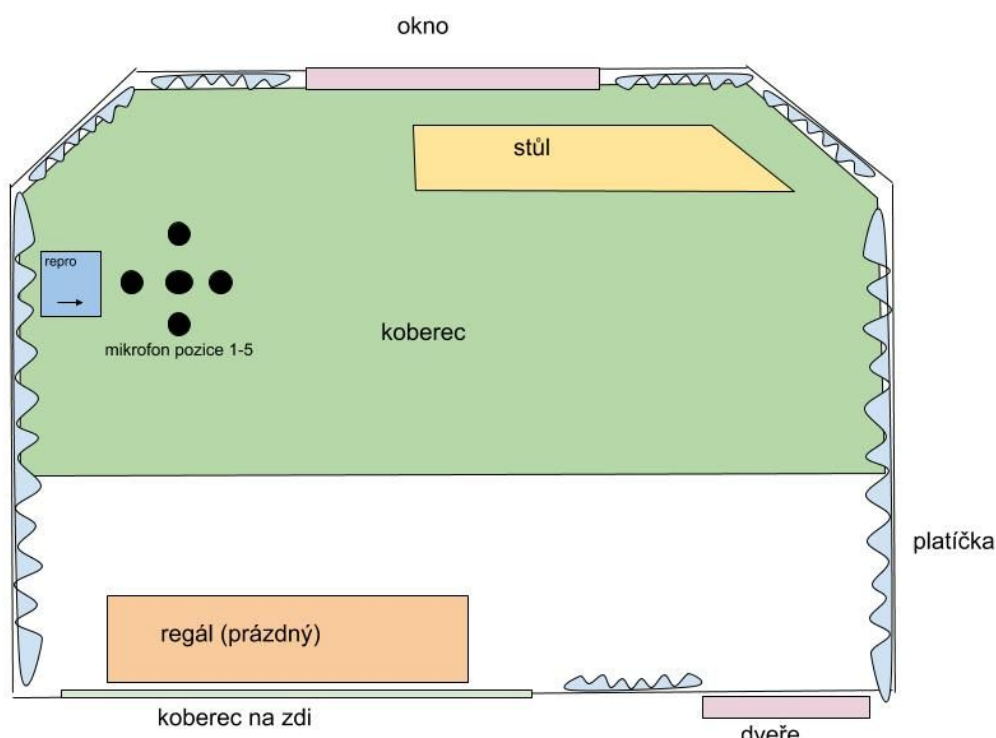
- Změna umístění reproduktorů
- Postel
- Šatní skříň
- Knihovna
- Plata od vajec (typická)
- Absorpční panely z minerální vlny
- Elektronická kalibrace (EQ)

Pro změření akustiky místnosti lze využít například volně dostupný software Room EQ Wizard, potřeba je pak kromě zvukové karty s mikrofonním vstupem ještě měřicí mikrofón. Optimálním postupem je vyklidit místnost a experimentovat s umístěním reproduktorů pro nalezení co nejrovnější odezvy na nízkých frekvencích, poté začít nábytek vracet nazpět.

## 2 Měření

### 2.1 Výchozí podmínky

Zkoumaná místnost má rozměry 3,7 x 4 x 2,5 m s mírně zkosenými rohy. Původním účelem místnosti bylo její využití pro účely hudebních zkoušek, k čemuž nikdy nedošlo, nicméně to je příčinou, proč je většina stěn pokryta buď platy od vajec či tenkým kobercem. Platy je kompletně pokryta pravá stěna, stěna s oknem z 50 % a zbytek cca ze 30 %, z levé stěny jsou odstranitelné opakovaně, ze zbytku pouze jednou. Po vyklizení místnosti bylo provedeno počáteční měření s jedním reproduktorem v bodě mezi původními pozicemi levého a pravého reproduktoru, ve výšce uší sedícího autora, tj. 140 cm.



Obr. 27: postavení AA

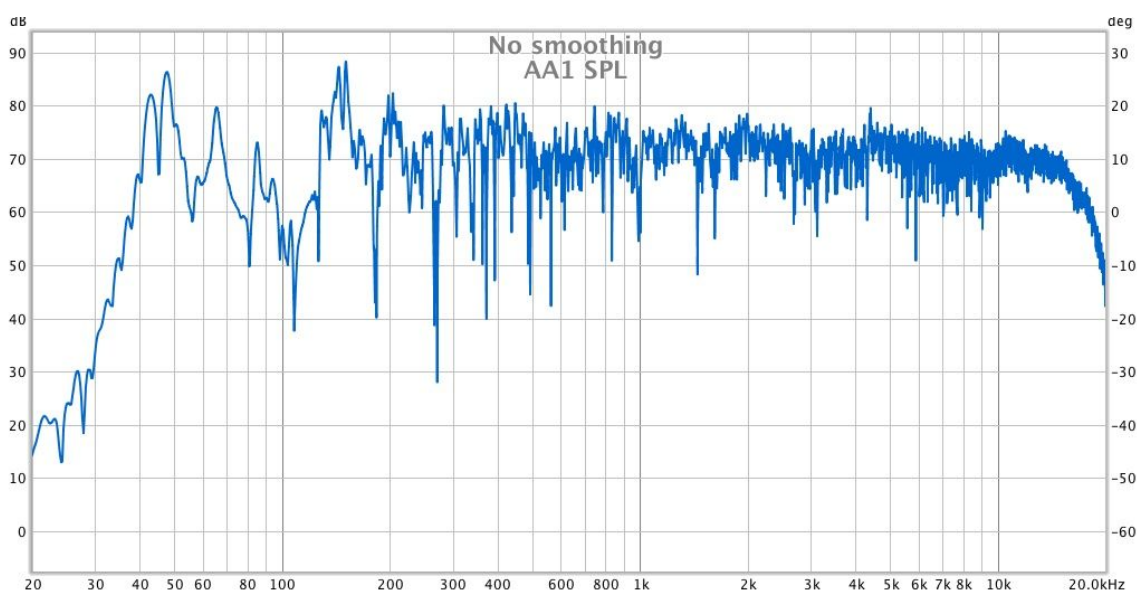
#### 2.1.2 Měření AA

Jako výstupy měření nám poslouží grafy frekvenční odezvy (dále "SPL") a frekvenčně závislé doby dozvuku. Měření pro každou pozici proběhlo v místě předpokládaného sweetspotu a čtyřech bodech po kružnici s průměrem 0,5 m a sweetspotem jako středem, což odpovídá předpokládanému největšímu rozptylu pohybu posluchačových uší při práci. Pro velký objem výsledků měření uvedeme pro každé měření pouze graf se všemi křivkami frekvenční odezvy dohromady a doby

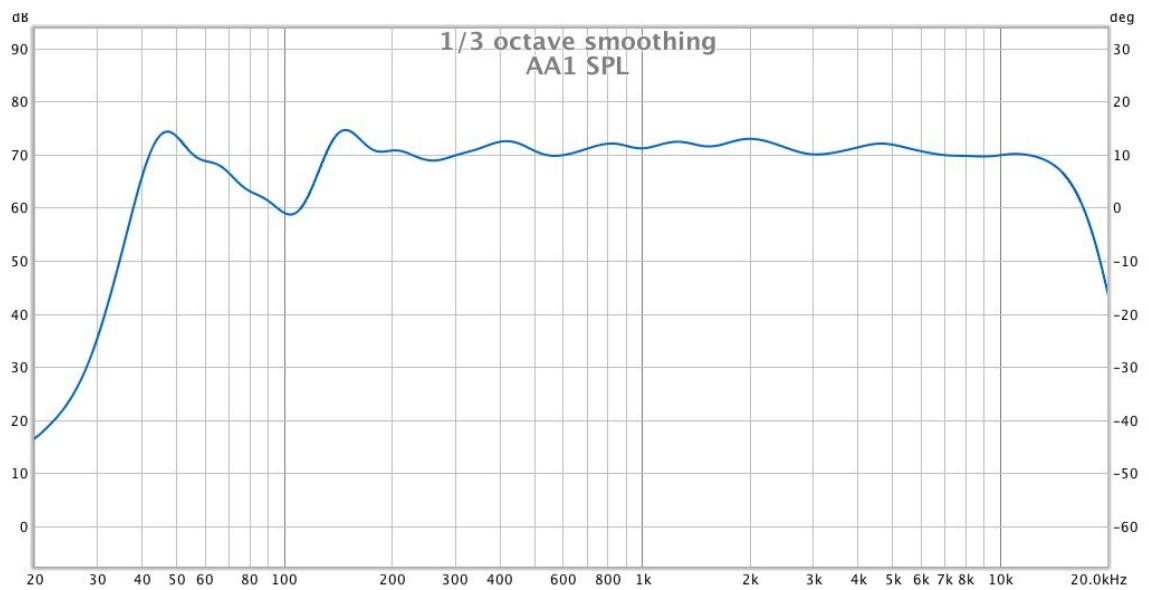
dozvuku prvního měření, na kompletní výsledky budeme odkazovat do příloh. Označení v podobě kombinací velkých písmen a čísel odpovídají autorově vlastnímu řazení měření (první písmeno představuje postavení budiče a mikrofonu, druhé písmeno specifické postavení akustických prvků, číslo pak označuje pozici mikrofonu v rámci sweetspotu).

Výsledky měření frekvenční odezvy se v určitých částech spektra pro lepší čitelnost vyhlazují filtry s 1/3 nebo 1/6 oktávovou šířkou pásma - jde zejména o frekvence nad 300 Hz, kde jsou špičky a propady natolik blízko u sebe, že vyhlazený graf lépe odpovídá tomu, jak změny ve frekvenční odezvě vnímá lidské ucho. Pro prezentaci výsledků našeho měření frekvenční odezvy tedy použijeme možnost vyhlazování s proměnlivou šířkou pásma, která prakticky nemění křivku na nízkých kmitočtech (1/48 oktávový filtr), ale ty vyšší progresivně vyhlazuje filtrem, jehož šířka pásma roste společně s frekvencí. Podobně pro prezentaci doby dozvuku použijeme vyhlazování 1/3 oktávovým filtrem, navíc při hladině hluku v místnosti, která neodpovídá ani normě NR15 (39 dB SPL, 45 dB SPL při průletu letadla) a intenzitě měřicího signálu v rozmezí 70 - 80 dB SPL využijeme možnost RT30.

Pro lepší představu si různé druhy vyhlazování předvedme na měření frekvenční odezvy první pozice:



Obr. 28, graf SPL bez vyhlazování



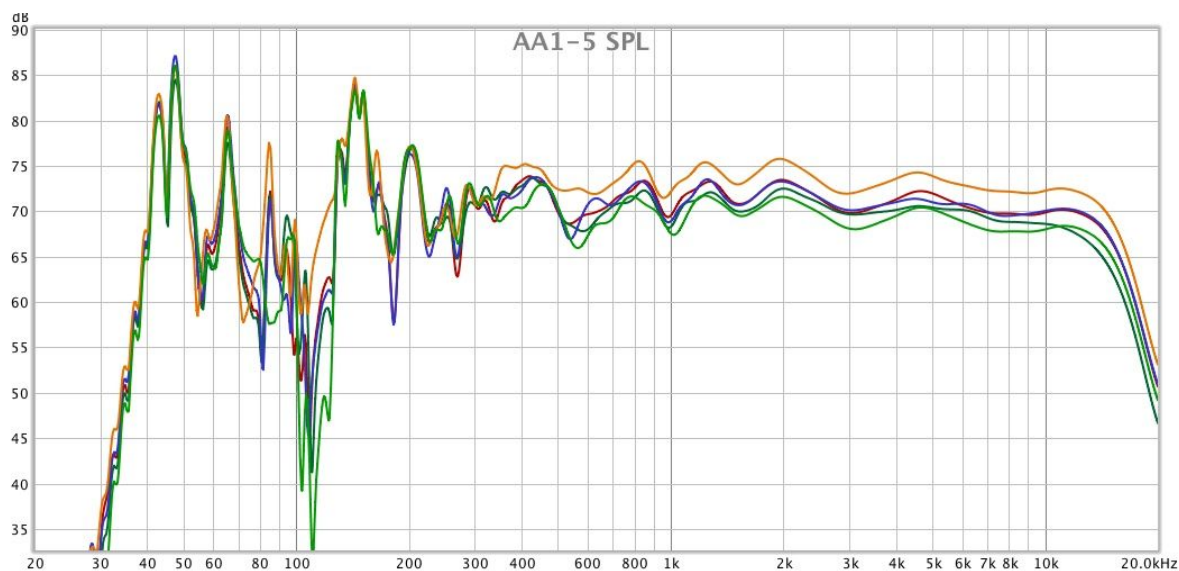
Obr. 29, graf SPL - 1/3 oktávové vyhlazení



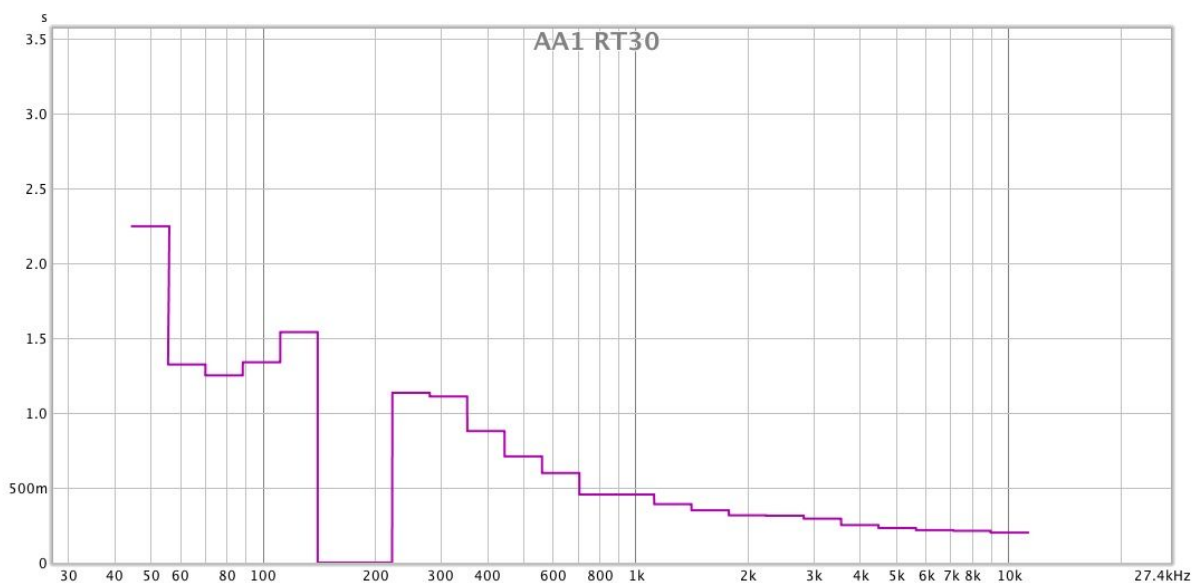
Obr. 30, graf SPL s variabilním vyhlazením

Jak si lze všimnout, variabilní vyhlazování volí adekvátní šířku filtru v závislosti na frekvenci pro dosažení čitelnosti všech pásem v rámci jednoho grafu.

V následujících grafech uvidíme všechna měření frekvenční odezvy v konfiguraci AA společně s grafem RT30 v pozici AA1; kompletní výsledky najdeme v příloze (1).



Obr. 31, graf SPL s variabilně vyhlazenými křivkami měření 1-5



Obr. 32, RT30 v konfiguraci AA1

### 2.1.3 Komentář k měření AA

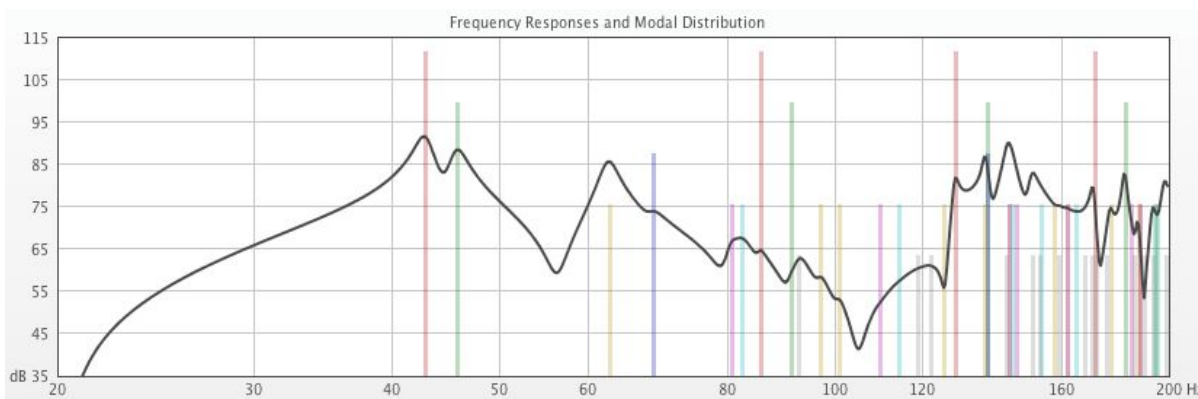
Měření v pozici AA sice pro absenci druhého reproduktoru není zcela odpovídající, nicméně jasně demonstruje problémy způsobené vlastními kmity místnosti. Navíc vzhledem k blízkosti stěny zde hraje roli jev zvaný “Speaker-boundary interference response” - odrazy od nejbližších zdí k reproduktoru vytvářejí uzly a kmity výrazné především na nízkých frekvencích, nezávislé na vlastních kmitech místnosti [4] (str. 534). Při hledání optimální pozice reproduktorů je tedy potřeba mít na zřeteli oba dva jevy.

Z grafů SPL lze vidět, že odezva na nízkých frekvencích má k rovnosti daleko a různí se i v rámci sweetspotu - v nejhorším případě (AA5SPL) pozorujeme propad kolem

110 Hz až o 50 dB. Totéž se dá konstatovat o době dozvuku, která splňuje doporučení EBU Tech 3276 přibližně až od 1,5 kHz, nižší frekvence (kromě již zmíněného pásma kolem 110 Hz) vlivem kombinace vlastních kmitů, SBIR a prázdné místnosti výrazně přeznívají, navíc je v místnosti patrná třepotavá ozvěna.

## 2.2 Nalezení nové pozice D

Software Room EQ Wizard nabízí možnost simulace frekvenční odezvy na základě rozměrů místnosti, pohltivosti jejích stěn, pozice reproduktorů a posluchače.



Obr. 33: odezva postavení AA podle simulátoru v programu REW

Zkusme nyní v praxi využít vztah pro nalezení vlastních kmitů podle [1] (str. 47):

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz})$$

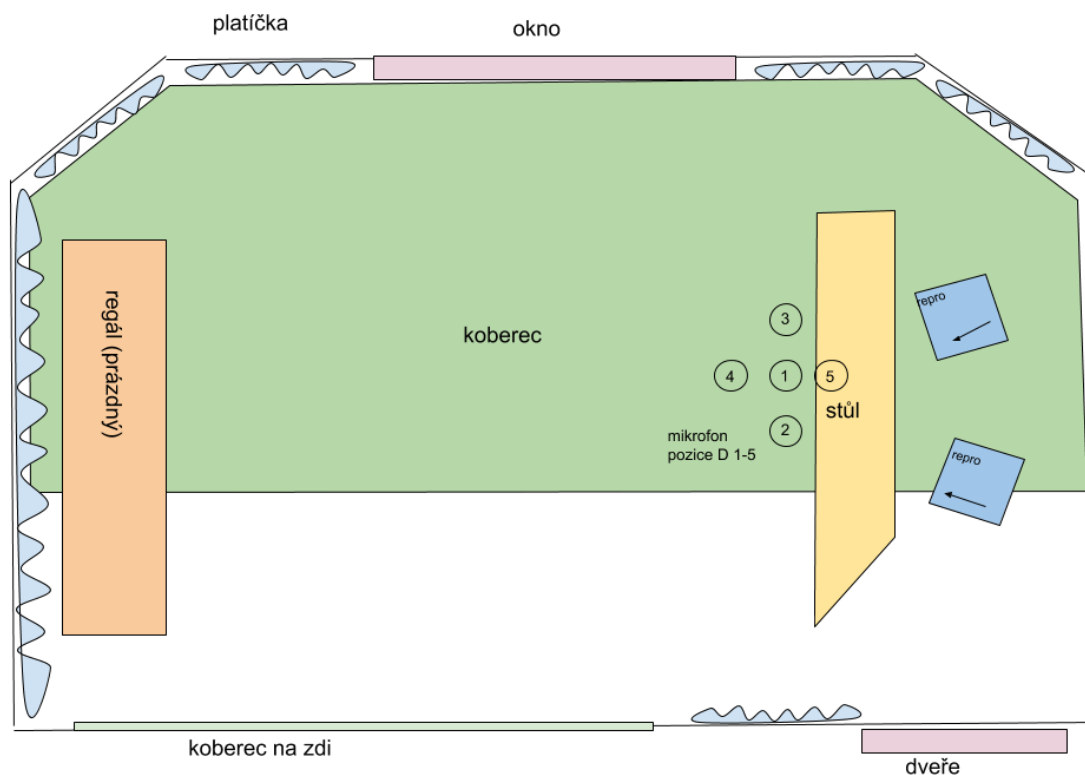
Po dosazení rozměrů místnosti za  $l_{xyz}$  získáváme teoretická maxima korespondující s těmi naměřeným pro:

$n_{xyz}$	$f_n$ [Hz]
1,0,0	42,5
1,1,0	62,6
0,1,1	82,1
3,0,0	127
0,0,2	136
0,0,3	204

Vzhledem k nezapočítaným odchylkám od ideálního tvaru a odrazivosti stěn se vypočítané kmitů od těch naměřených trochu liší, nicméně jde o odchylky v řádu jednotek Hz, z čehož můžeme soudit platnost vztahu pro jejich výpočet.



Vzhledem k tomu, že simulovaná odezva pozice AA (viz obr. 32) přinesla výsledek blížíci se reálně naměřené odezvě, byl simulátor využit k experimentálnímu nalezení pozice D:

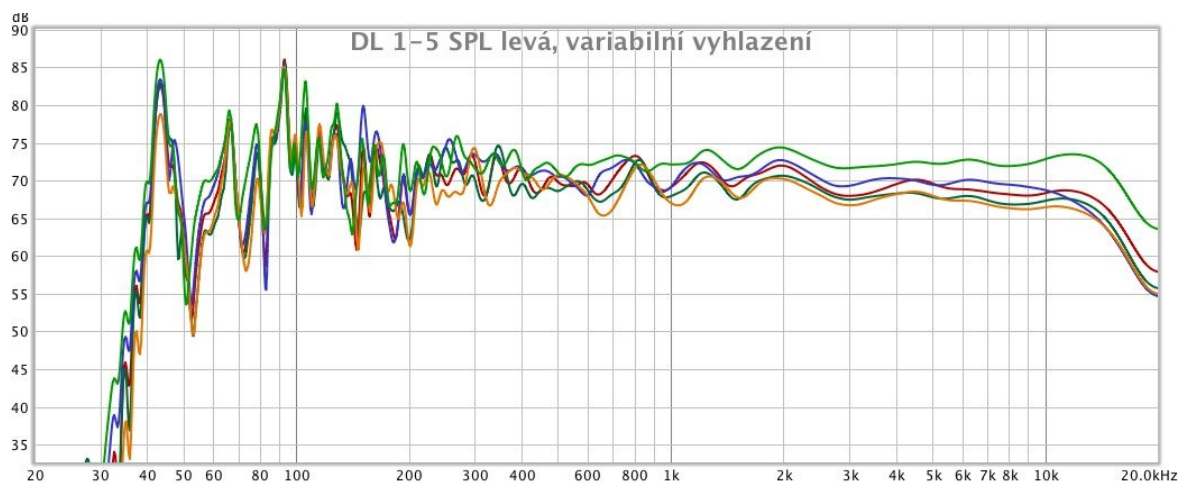


Obr. 34: postavení DL

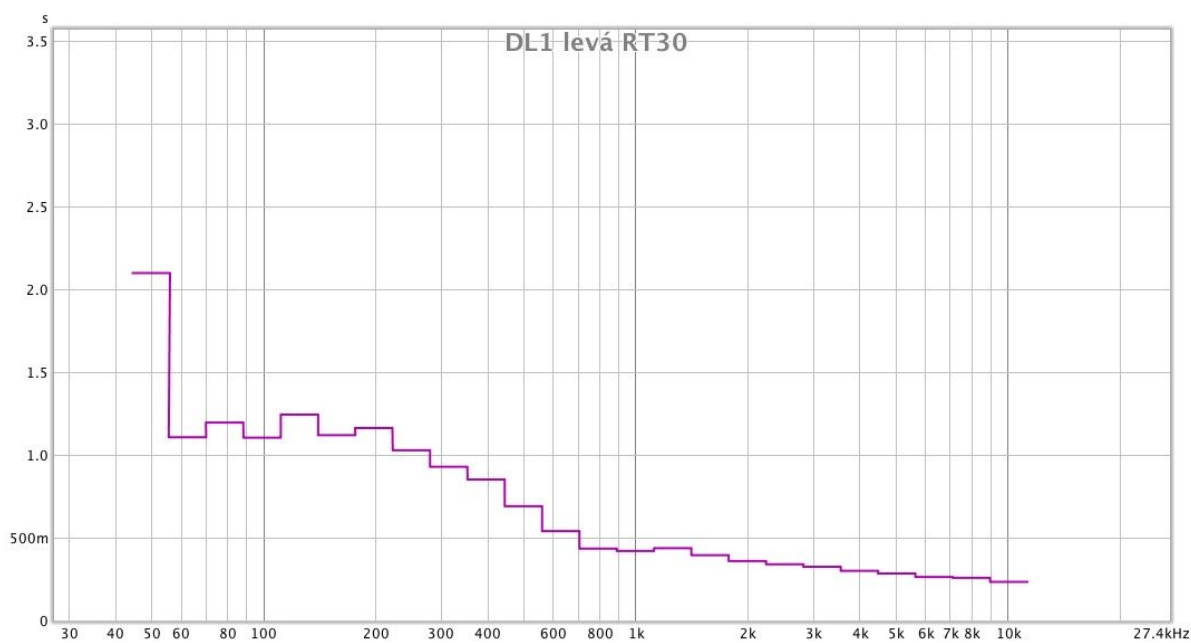
Tato pozice se od předchozí liší mimo jiné i výškou - poslech v tomto postavení se děje ve stoje, s výškou uší na 190 cm (autorovo specifikum). Tato okolnost by měla přispět ke zlepšení basové odezvy, protože pozice D se tím pádem narozdíl od pozice A nachází dál od středu vzdálenosti mezi stropem a podlahou.

## 2.2.1 Měření DL - levý reproduktor

V konfiguraci DL proběhlo měření pro každý reproduktor zvlášť.

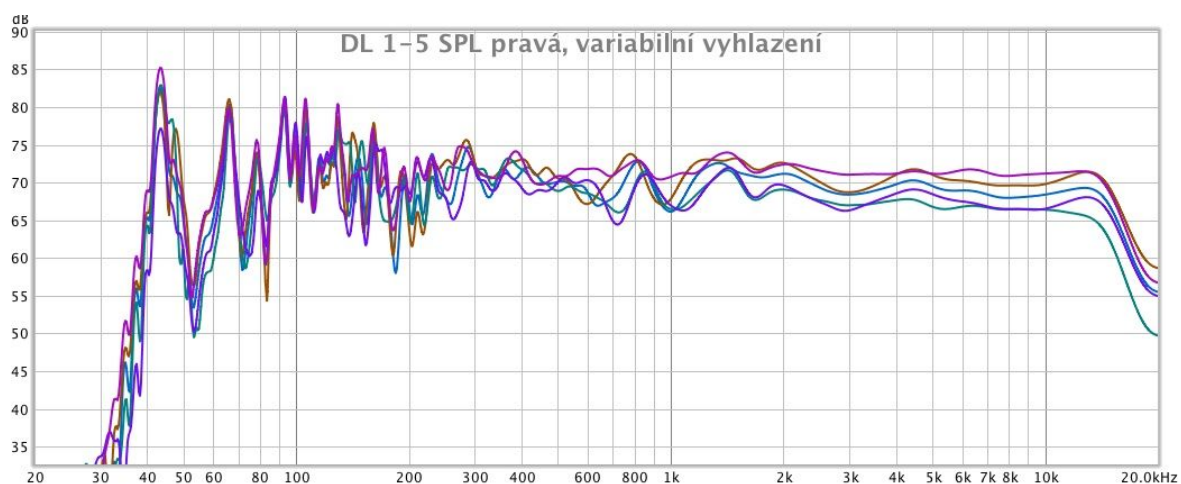


Obr. 35, odezvy 1-5, konfigurace DL, levý reproduktor, variabilní vyhlazení

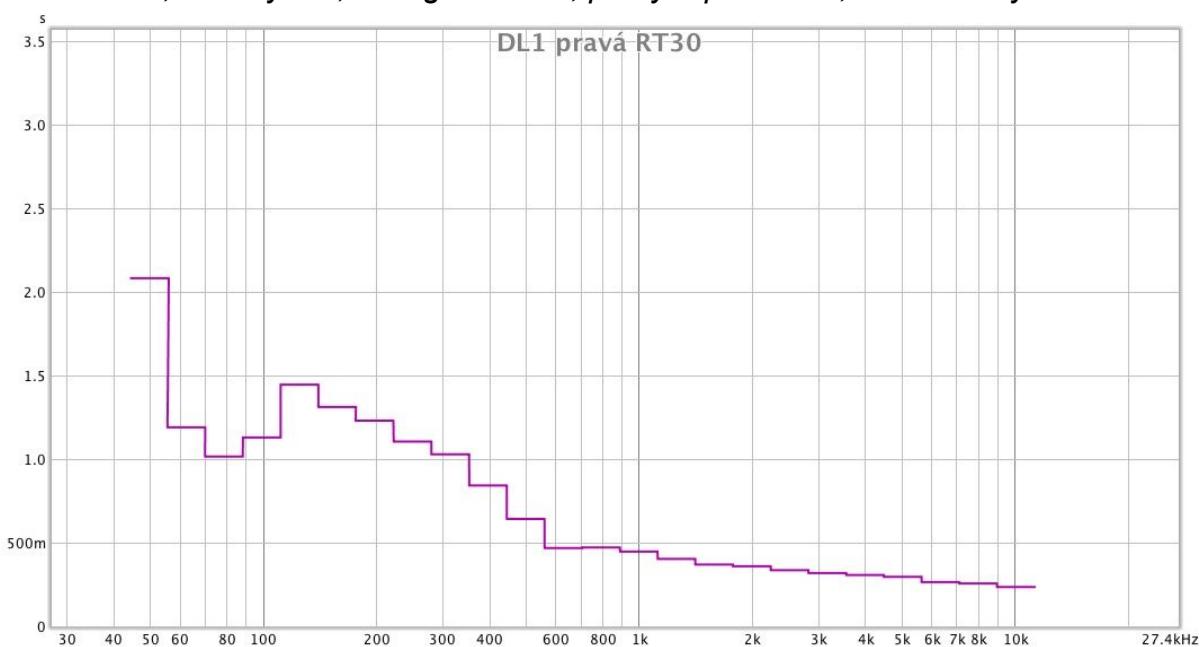


Obr. 36, RT30 v konfiguraci DL1, levý reproduktor

## 2.2.2 Měření DL - pravý reproduktor



Obr. 37, odezvy 1-5, konfigurace DL, pravý reproduktor, variabilní vyhlazení



Obr. 38, RT30 v konfiguraci DL1, pravý reproduktor

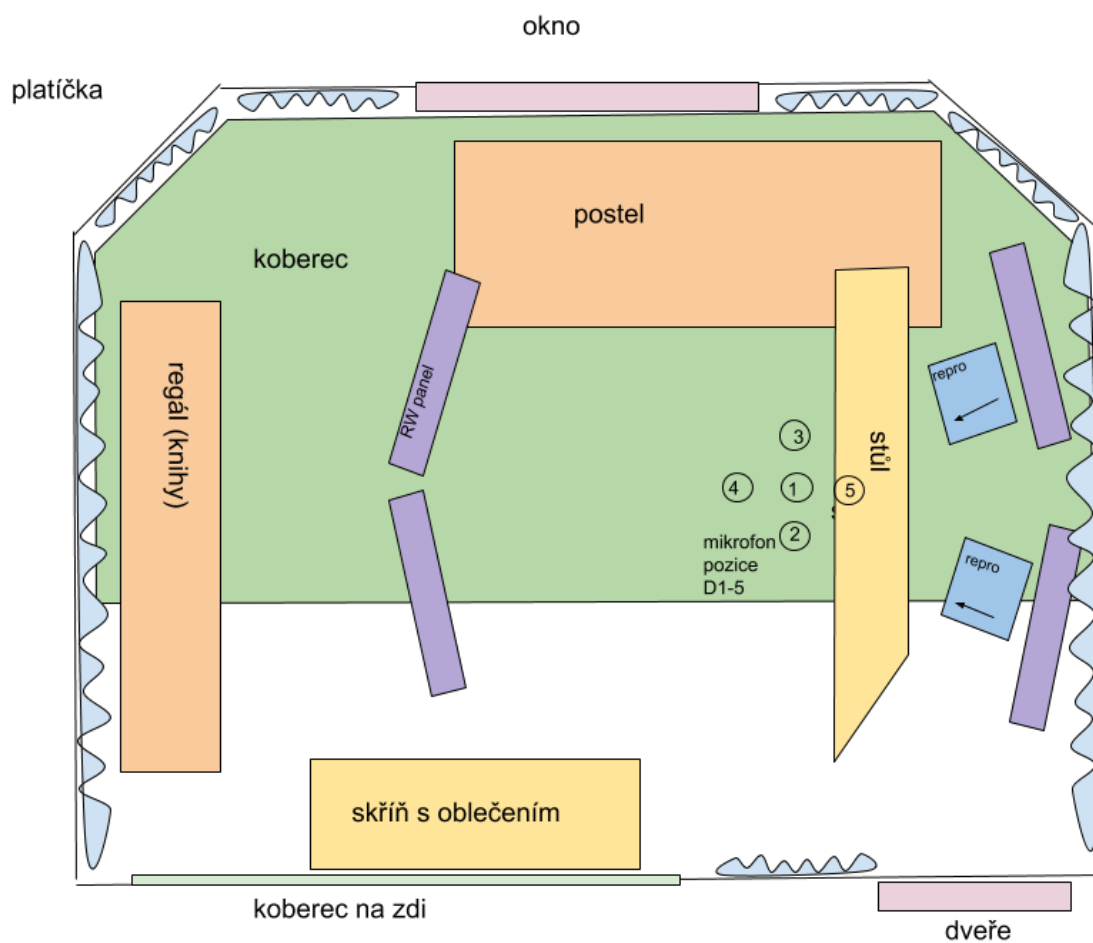
## 2.2.3 Komentář k měření DL

V pozici D můžeme pozorovat rovnější basovou odezvu, nejhorší propady mají “pouze” kolem 20 dB. Doba dozvuku stále dosahuje doporučené hodnoty pouze od cca 1,5 kHz, nicméně přeznívání nízkých frekvencí je mírnější - to vše pouhou změnou postavení reproduktorů. Hodí se podotknout, že před tímto měřením byly na korekcích reproduktorů zvýrazněny frekvence pod 250 Hz o 6 dB, aby střední hodnota dB SPL v tomto pásmu přibližně odpovídala hodnotě na vyšších frekvencích.

Kompletní výsledky se nacházejí v příloze (2).

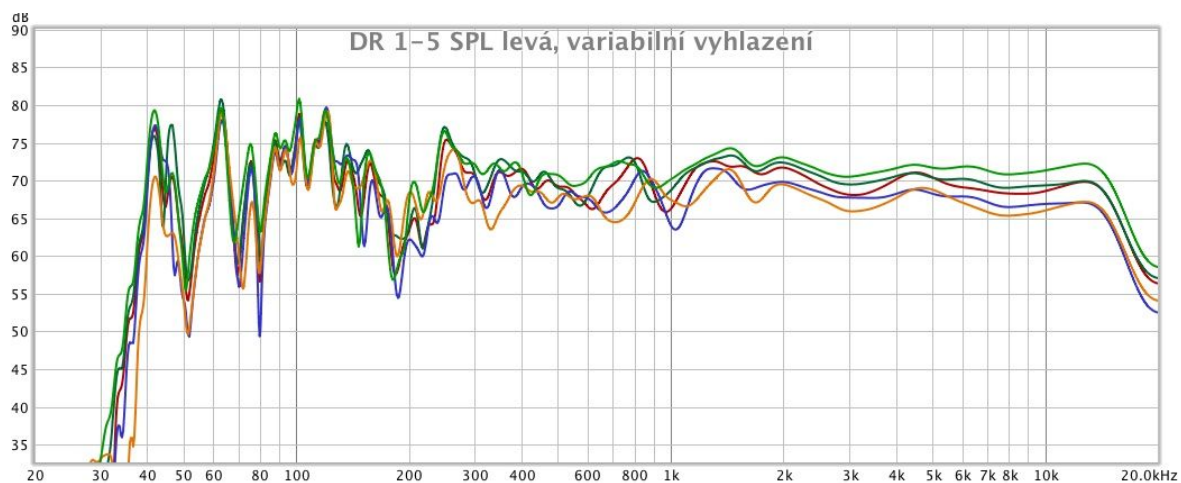
## 2.3 Pozice DR

Nyní prozkoumejme odezvu místnosti po vrácení nábytku a rozmístění absorpčních panelů do konfigurace DR:

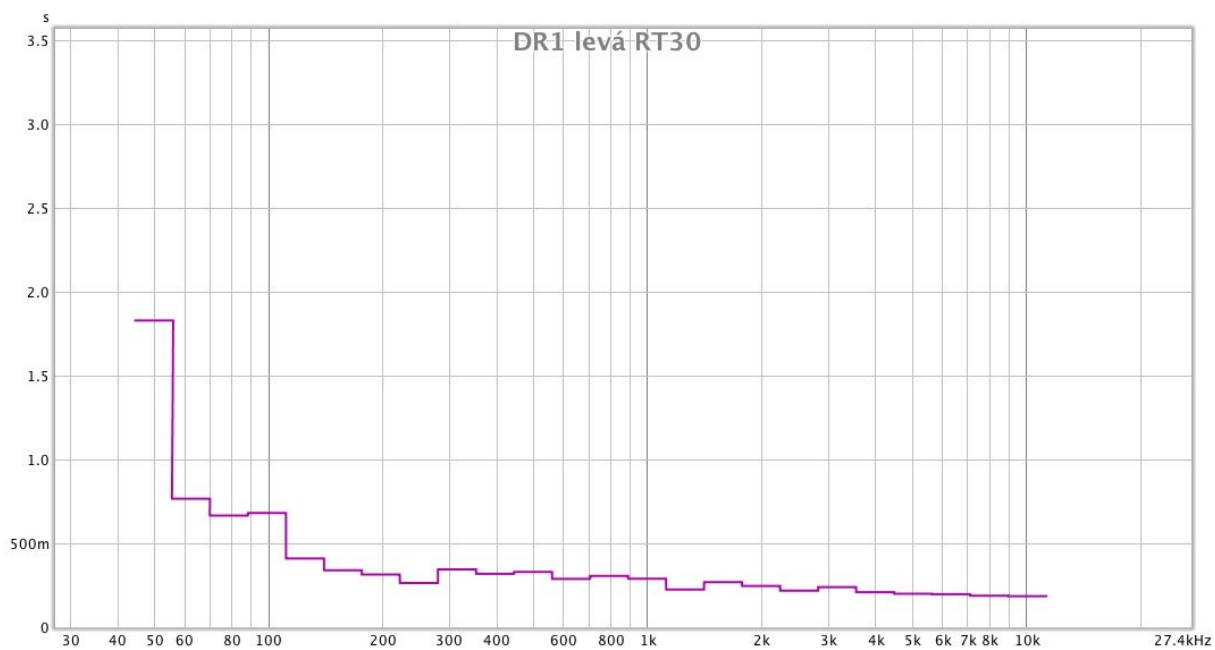


Obr. 39, konfigurace DR

### 2.3.1 Měření v pozici DR - levý reproduktor

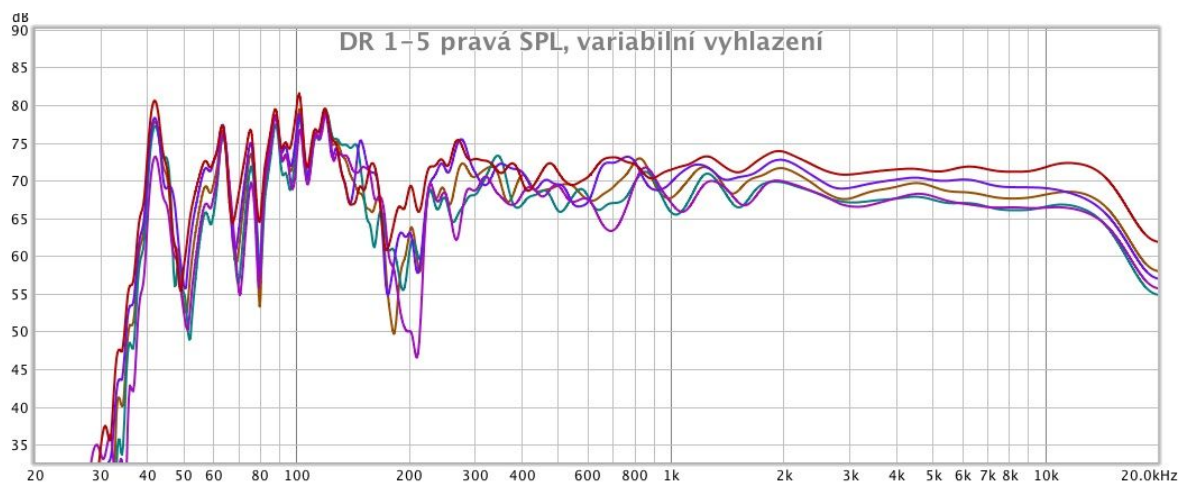


Obr. 40, odezvy 1-5, konfigurace DR, levý reproduktor, variabilní vyhlazení

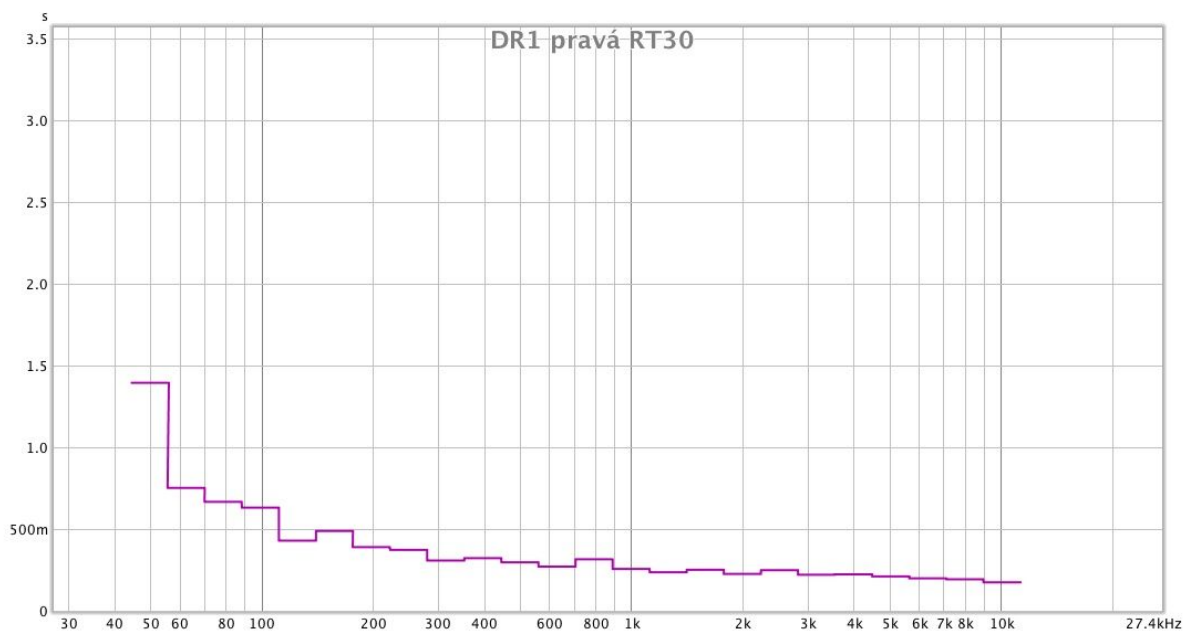


Obr. 41, RT30 v konfiguraci DR1, levý reproduktor

### 2.3.2 Měření DR - pravý reproduktor



Obr. 42, odezvy 1-5, konfigurace DR, pravý reproduktor, variabilní vyhlazení



Obr. 43, RT30 v konfiguraci DR1, pravý reproduktor

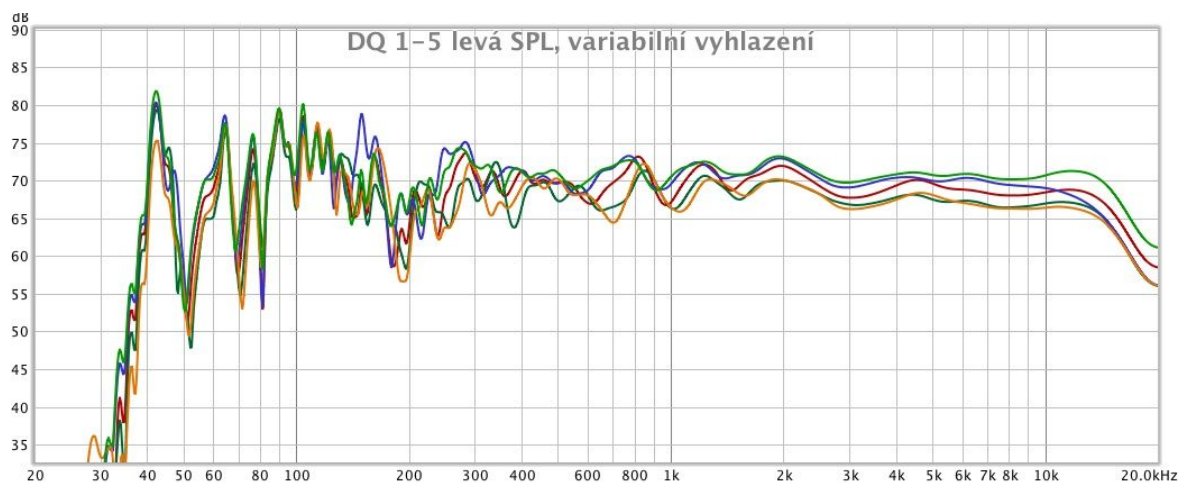
### 2.3.3 Komentář k měření DR

Oproti konfiguraci DL můžeme pozorovat zmírnění rozdílu špičky nad 40 Hz a propadu nad 50 Hz, zejména však rozdíl v době dozvuku, který se do doporučené hodnoty dostává již mezi 100 a 200 Hz. Kompletní výsledky nalezneme v příloze (3).

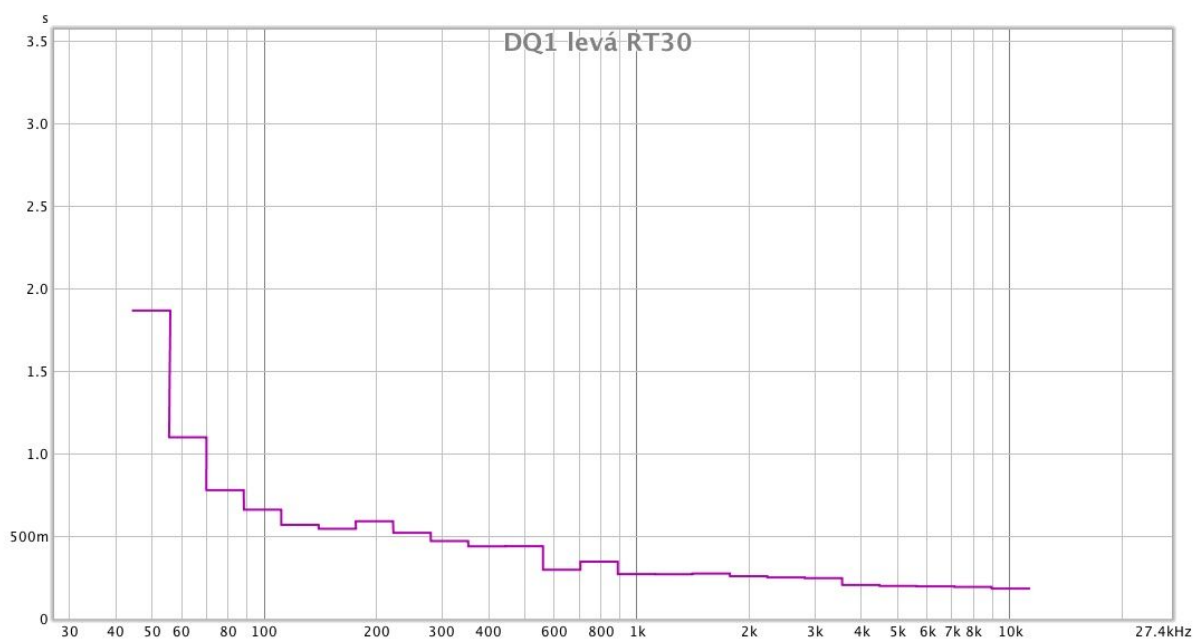
## 2.4 Efekt absorpčních panelů

Prozkoumejme nyní efekt podomácku vyrobených absorpčních panelů z materiálu Rockwool HD jejich odstraněním z místnosti.

### 2.4.1 Měření DQ - levý reproduktor

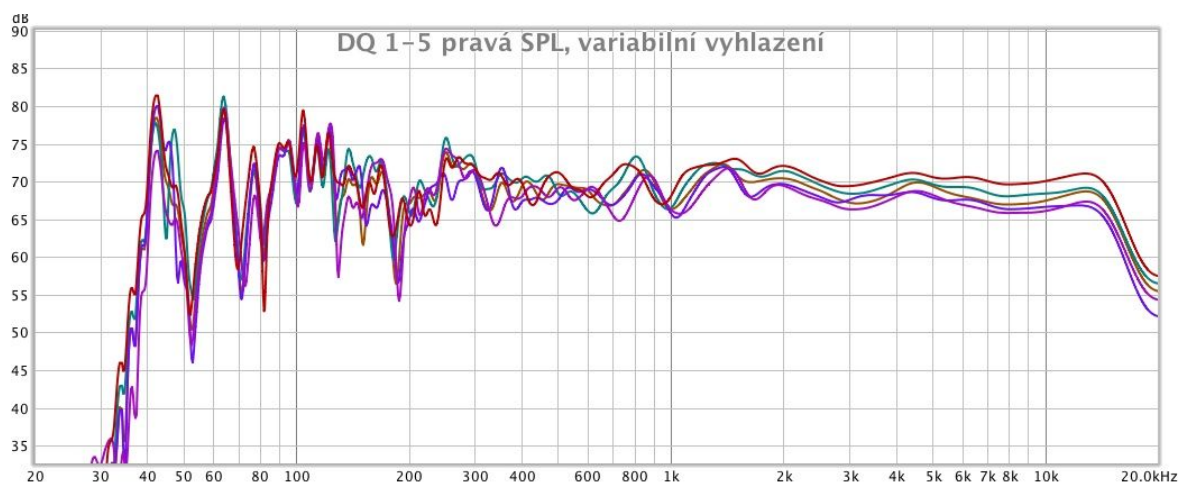


Obr. 44, odezvy 1-5, konfigurace DQ, levý reproduktor, variabilní vyhlazení

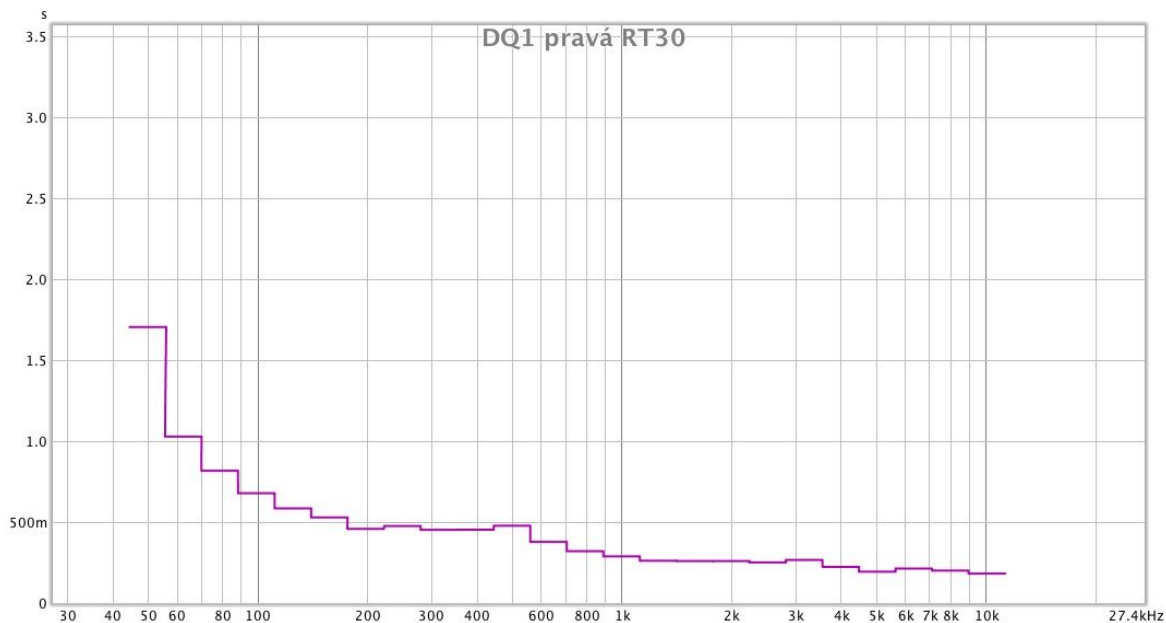


Obr. 45, RT30 v konfiguraci DQ1, levý reproduktor

## 2.4.2 Měření DQ - pravý reproduktor



Obr. 46, odezvy 1-5, konfigurace DQ, pravý reproduktor, variabilní vyhlazení



Obr. 47, RT30 v konfiguraci DQ1, pravý reproduktor

## 2.4.3 Komentář k měření DQ

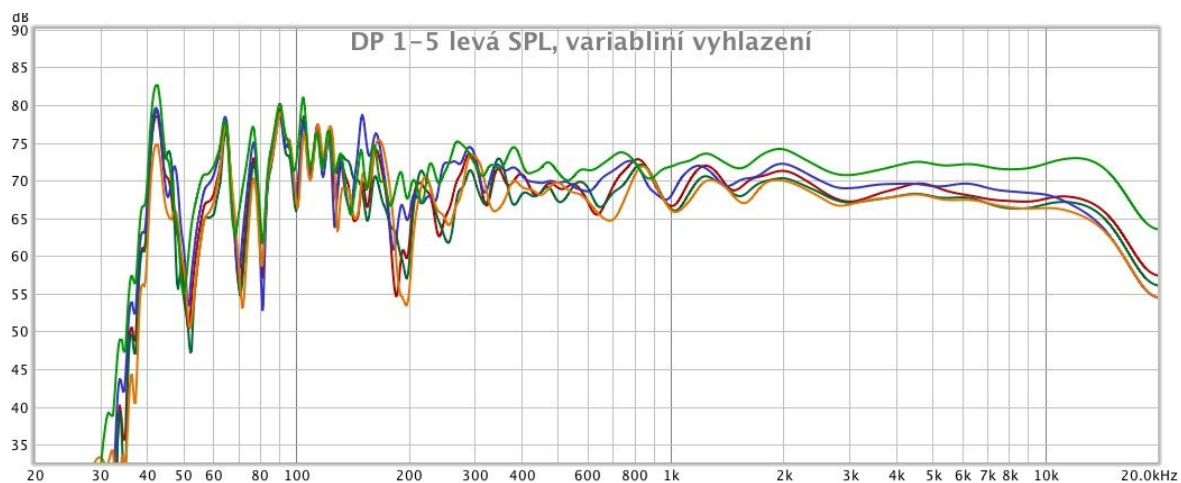
Zdá se, že tyto konkrétní panely mají nejvýraznější účinek mezi 100 Hz a 600 Hz. Dolní hranice může být vzhledem k teoreticky nedostatečné tloušťce vysvětlena postavením zadních panelů, které mohou stát v místě kmiten takto nízkých frekvencí. Aby panely nebyly přespříliš pohltivé na nízkých frekvencích, jsou obaleny vinylovou tapetou - jak můžeme vidět na grafech RT30, nad 600 Hz k příliš dramatickým změnám nedochází. Na grafech ovšem není vidět eliminace zbytků třepotavé ozvěny, o což se postarala zejména blízkost zadních panelů k poslechové pozici. Kompletní výsledky jsou k vidění v příloze (4).



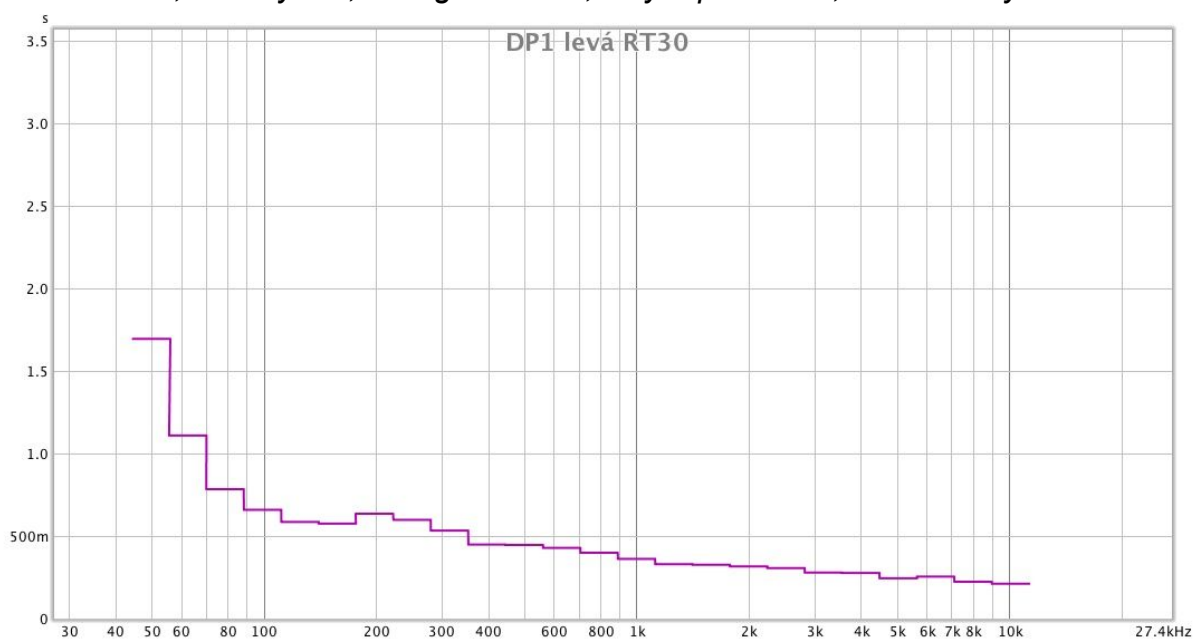
## 2.5 Efekt plat od vajec

Plata od vajec jsou další stálicí mezi domácími “akustickými” prvky. Porovnejme tedy předchozí měření s měřením stejné konfigurace, ovšem s jednou stěnou zcela holou.

### 2.5.1 Měření DP - levý reproduktor

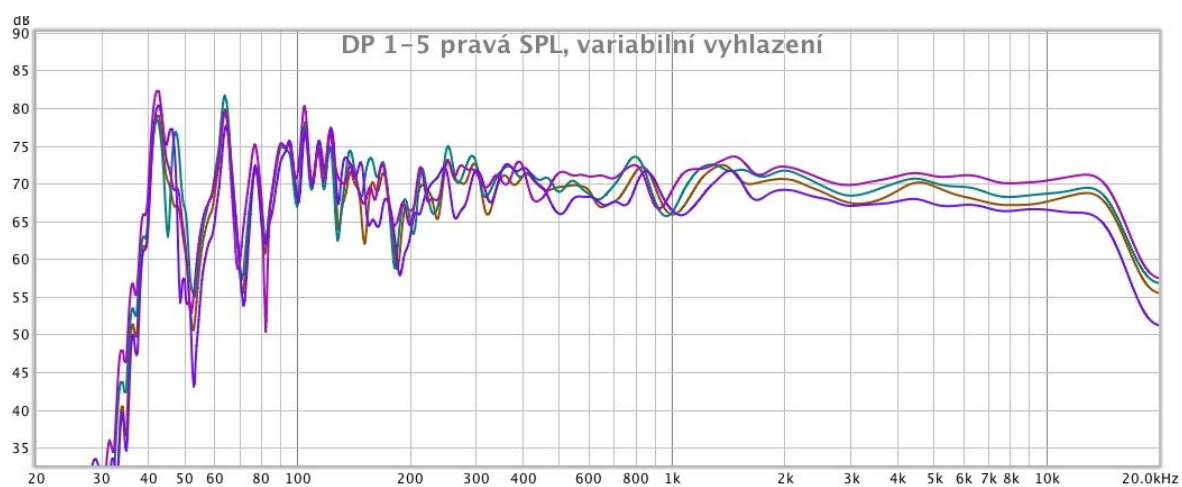


Obr. 48, odezvy 1-5, konfigurace DP, levý reproduktor, variabilní vyhlazení

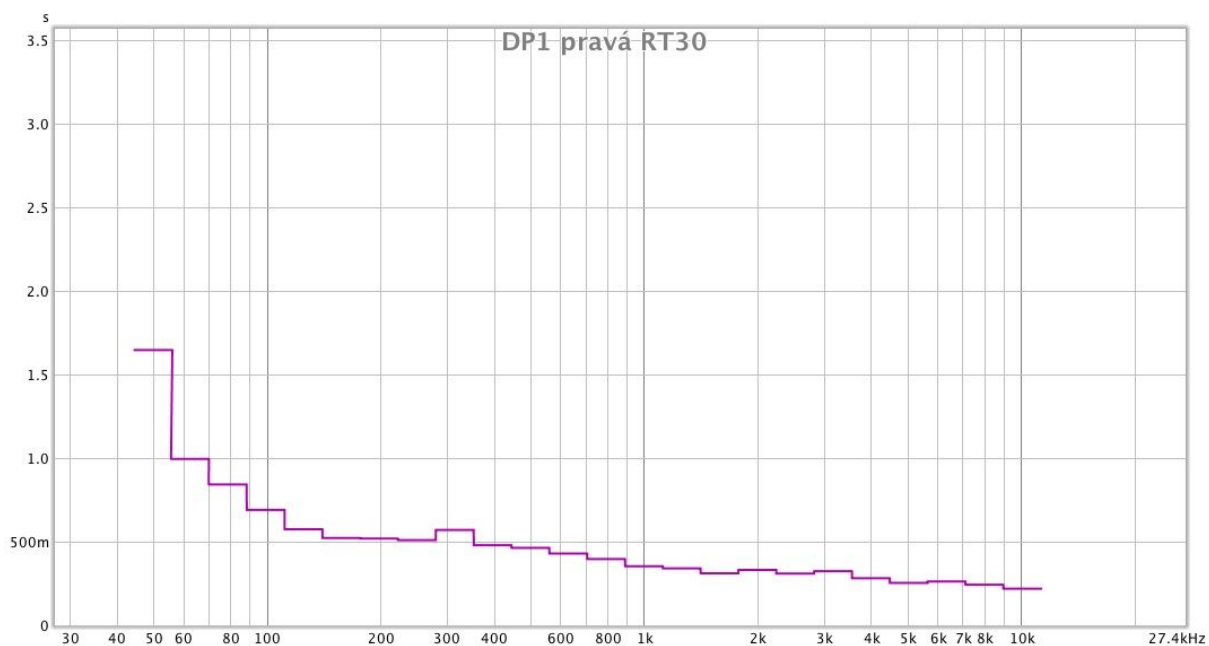


Obr. 49, RT30 v konfiguraci DP1, levý reproduktor

## 2.5.2 Měření DP - pravý reproduktor



Obr. 50, odezvy 1-5, konfigurace DP, pravý reproduktor, variabilní vyhlazení



Obr. 51, RT30 v konfiguraci DP1, pravý reproduktor

### 2.5.3 Komentář k měření DP

Jedna stěna pokrytá platy od vajíček snížila dobu dozvuku nad přibližně 1 kHz o přibližně 150 ms, nad 4 kHz pak přibližně o 50 ms. Měření proběhlo pouze s jednou odstraněnou stěnou, protože ačkoliv plata fungují pouze na vyšších frekvencích, v prázdnější místnosti se jejich odstranění ihned projevilo nepříjemnou změnou barvy třepotavé ozvěny směrem k subjektivně "ostřejšímu" charakteru. Vzhledem k efektu, který má na akustiku v místnosti jedna celá stěna pokrytá platy od vajec, můžeme odhadovat, že odstranění zbytku plat by se projevilo asi dvojnásobným zvětšením výše zmíněného rozdílu v době dozvuku. Plata tedy určitý efekt mají, nicméně menší, než si pravděpodobně myslí lidé, kteří s nimi pokrývají stěny místností s cílem místnost odhlučnit. Kompletní výsledky jsou k nalezení v příloze (5).

### 3 Elektronická kalibrace

Pokud cestou akustických úprav nelze již dál zlepšit frekvenční odezvu místnosti, může pomoci elektronická kalibrace. [12] (str. 65) Je třeba mít na paměti, že nejde o všespásný prostředek vedoucí k "narovnání odezvy" - v první řadě korekce fungují pouze pro specifickou poslechovou pozici, mimo ni může mít korekce účinek zcela opačný. Velikost pozice, kde může korekce fungovat, se snižuje s rostoucí frekvencí (čili snižující se vlnovou délkou, na 300 Hz jde o 1,14 m, na 10 kHz jde už o 3,4 cm - to znamená, že pro zachování stejné korigované odezvy na této frekvenci nemá posluchač přílišnou volnost pohybu).

Problém může nastat při zesilování pásem, která jsou vlivem stojatého vlnění v poslechové pozici utlumena - pokud budeme chtít kompenzovat 20 dB propad, snížíme si headroom reprodukčního řetězce o tuto hodnotu a můžeme narazit na zkreslení.

Kompenzace propadů v odezvě s sebou může nést ještě další komplikace - propady obvykle vznikají setkáním vln s opačnou fází, takže zesílením inkriminované frekvence hrozí to, že pouze zesílíme obě vlny, které se odečtou stejným způsobem. Pro korekci tohoto problému bychom potřebovali filtr, který zároveň pracuje s fází signálu dané frekvence, což ekvalizéry běžně nedokáží. Zato špičky v odezvě máme šanci zmírnit ze stejného důvodu - zeslabením vln, které se setkávají ve fázi, můžeme v konkrétní poslechové pozici dosáhnout zmírnění kmitny.

## 3.1 Měření

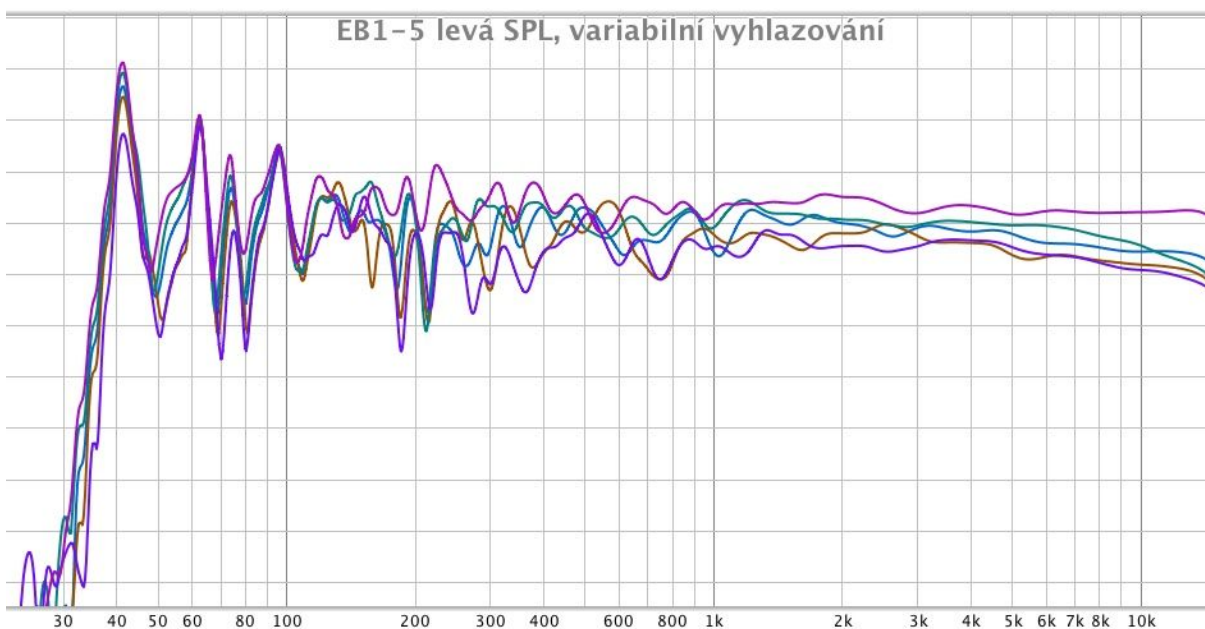
V následujícím experimentu porovnáme frekvenční odezvy místnosti v konfiguraci EA. Jde o konfiguraci DP, do které byly přidány ještě akustické prvky nad rámec tématu. Měření s pomocí sweepu podnikneme bez korekce, s korekcí Sonarworks Reference 4 a s ekvalizérem obsahujícím filtry, jejichž parametry vypočítá Room EQ Wizard. Protože software od Sonarworks umožňuje maximální rozsah korekce  $\pm 12$  dB, měření s filtry navrženými Room EQ Wizardem provedeme jednou se stejným rozsahem, dále s vyšším povoleným limitem zeslabování a se zákazem zesilování. Pro zjednodušení použijeme zprůměrované grafy frekvenční odezvy pro každou množinu pěti měření. Vzhledem k tomu, že experiment je zaměřen na porovnávání frekvenčních odezev bez změny pozice v rámci místnosti, měřen byl pouze jeden reproduktor.

### 3.1.2 Měření bez korekcí, levý reproduktor



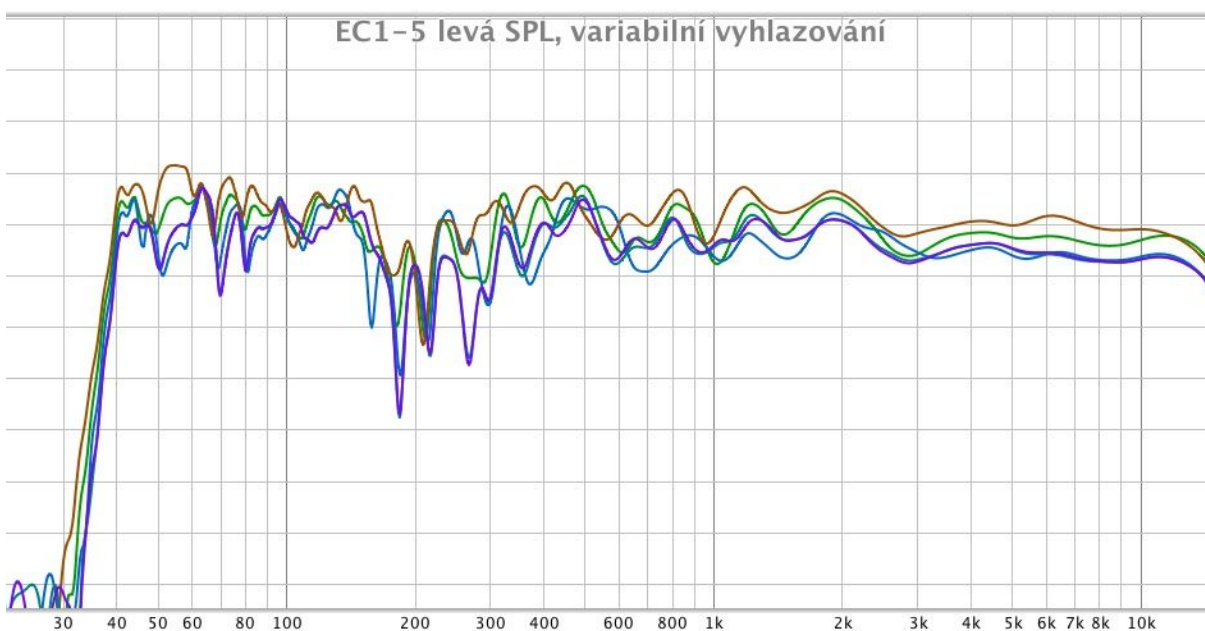
Obr. 52, odezvy 1-5, konfigurace EA, levý reproduktor, variabilní vyhlazování bez korekce

### 3.1.3 Měření s kalibrací Sonarworks Reference 4:



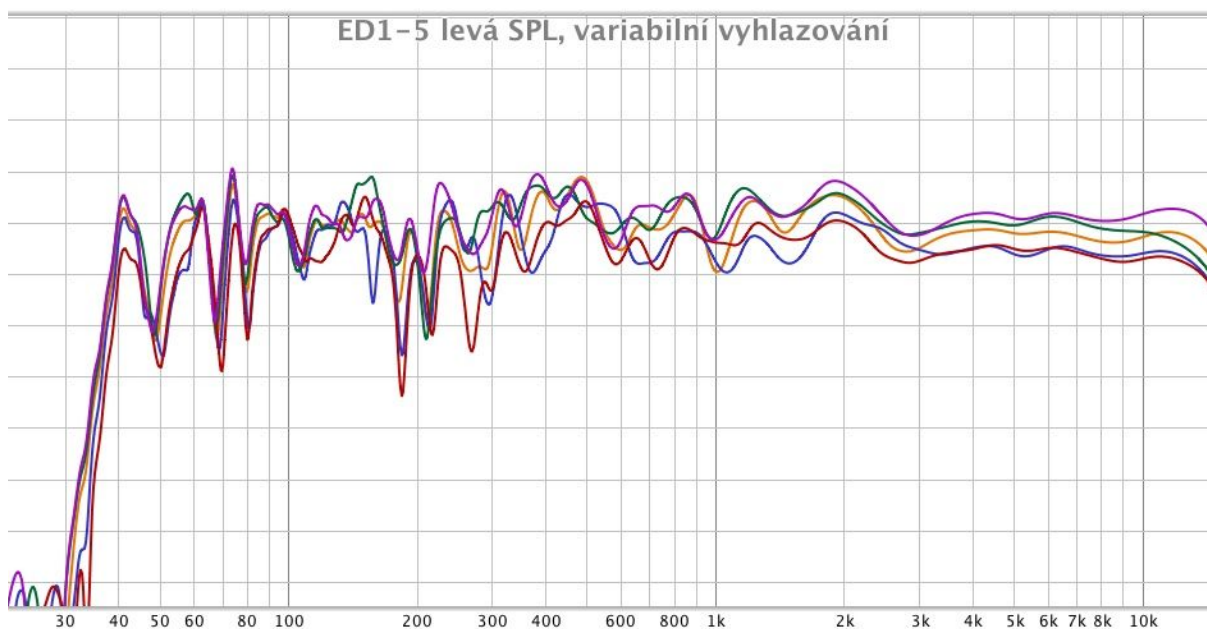
Obr. 53, odezvy 1-5, konfigurace EB, levý reproduktor, variabilní vyhlazení;  
korekce Sonarworks Reference 4

### 3.1.4 Měření s filtry nastavenými podle výpočtu Room EQ Wizard, var. 1



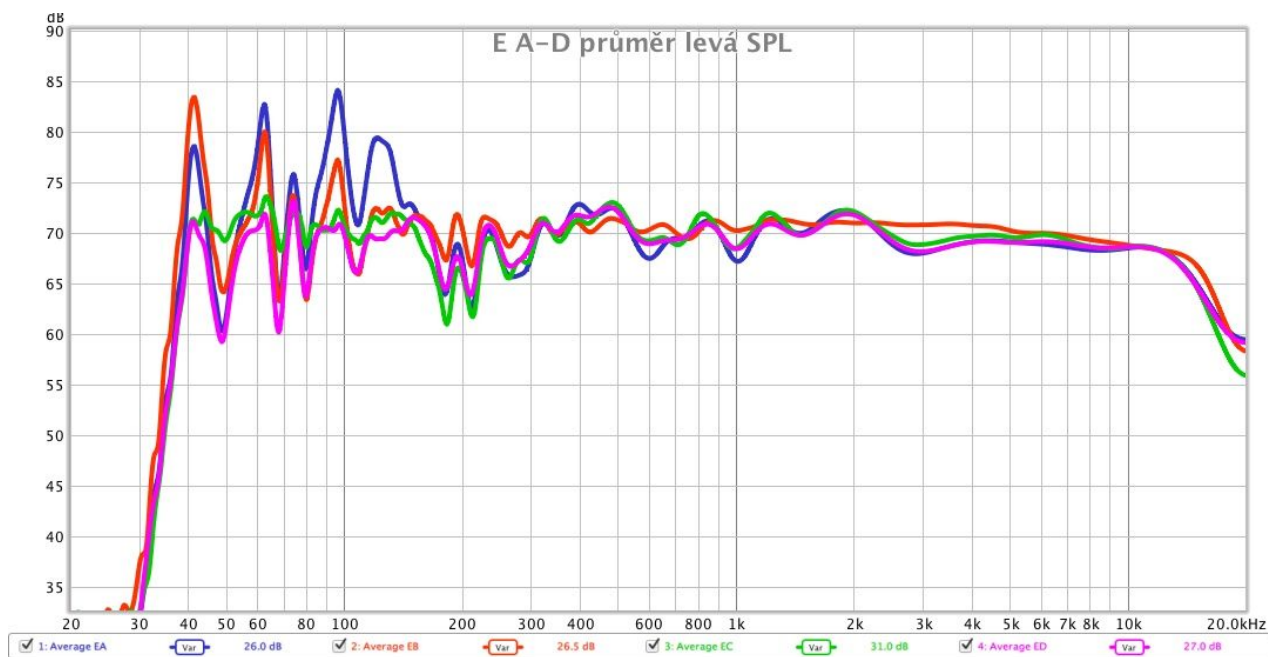
Obr. 54, odezvy 1-5, konfigurace EC, levý reproduktor, variabilní vyhlazení;  
korekce výstupu s využitím softwaru FabFilter Pro-Q2, max. povolené zesílení na filtr  
12 dB

### 3.1.5 Měření s filtry nastavenými podle výpočtu Room EQ Wizard, var. 2



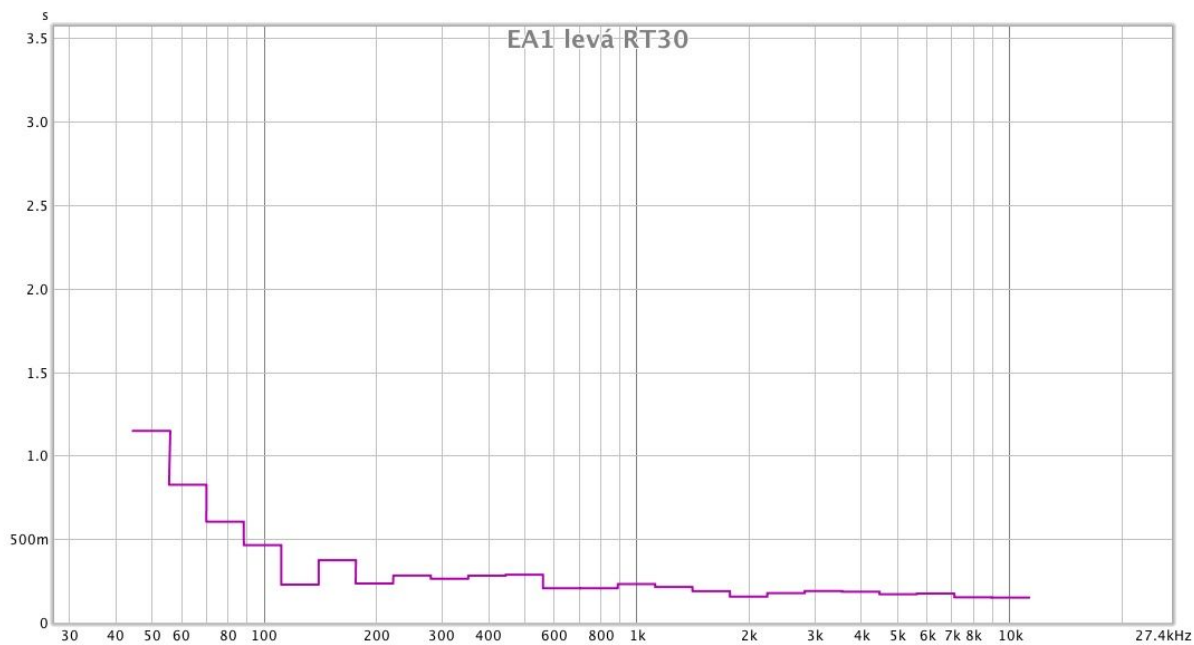
Obr. 55, odezvy 1-5, konfigurace ED, levý reproduktor, variabilní vyhlazení; korekce výstupu s využitím softwaru FabFilter Pro-Q2, max. povolené zesílení na filtr 0 dB

### 3.1.6 Všechny grafy SPL dohromady:

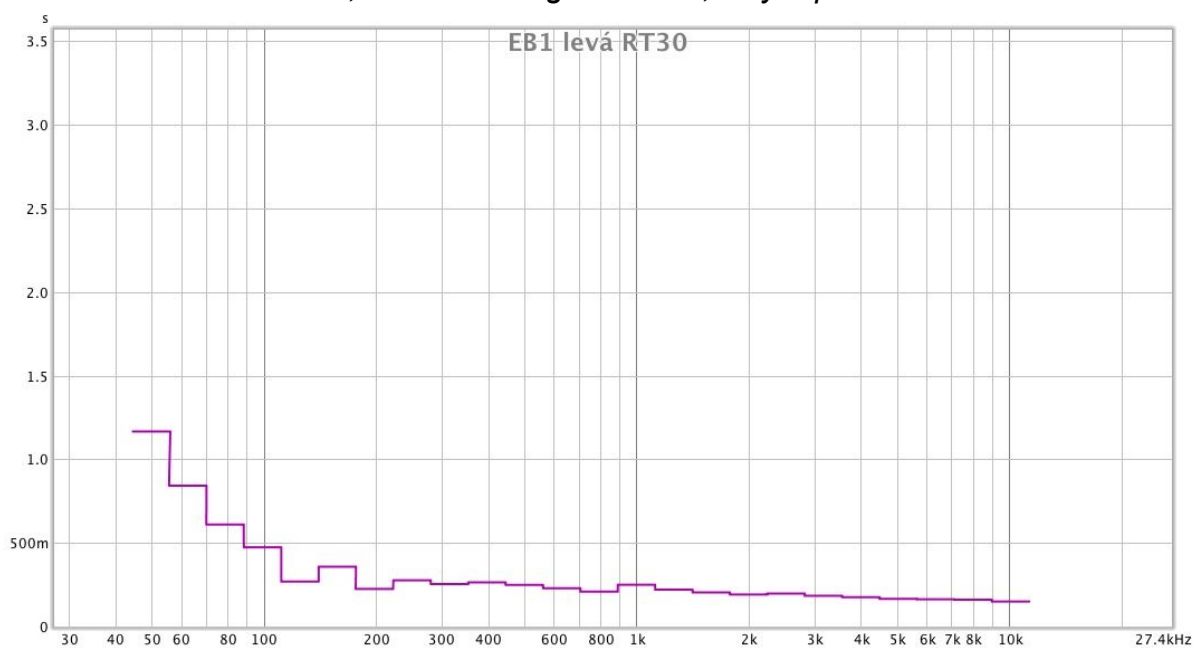


Obr. 56, odezvy EA - ED, levý reproduktor, variabilní vyhlazení

### 3.1.7 RT30 měření E (A-D) v pozici 1

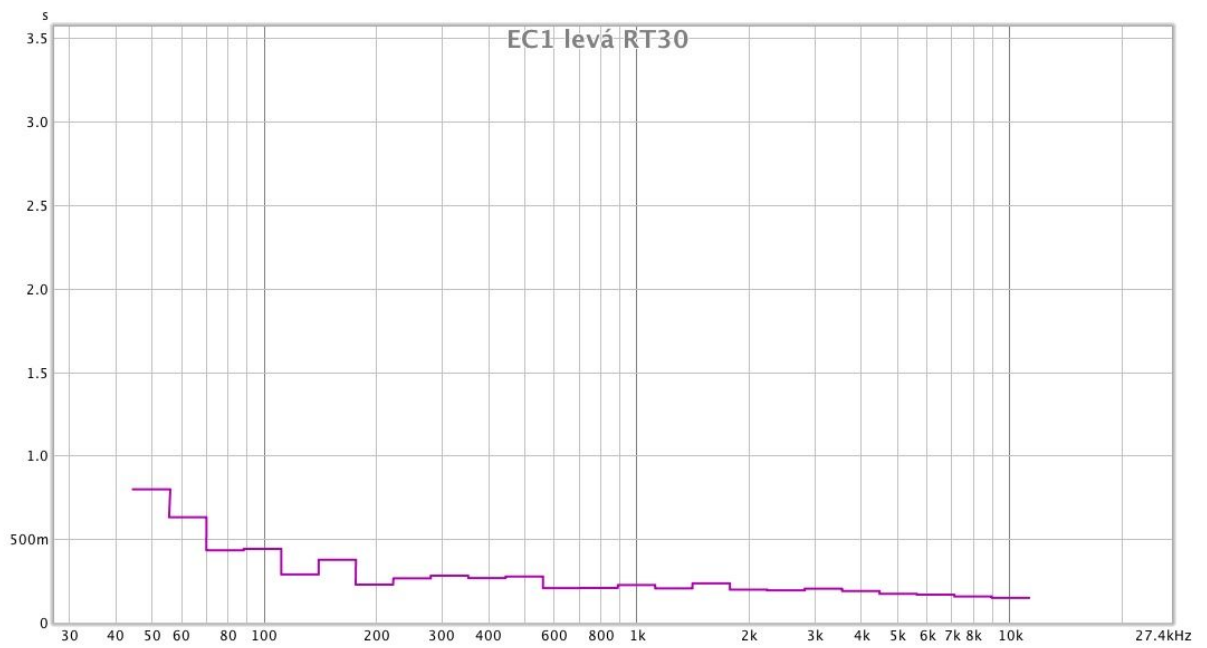


Obr. 57, RT30 v konfiguraci EA1, levý reproduktor

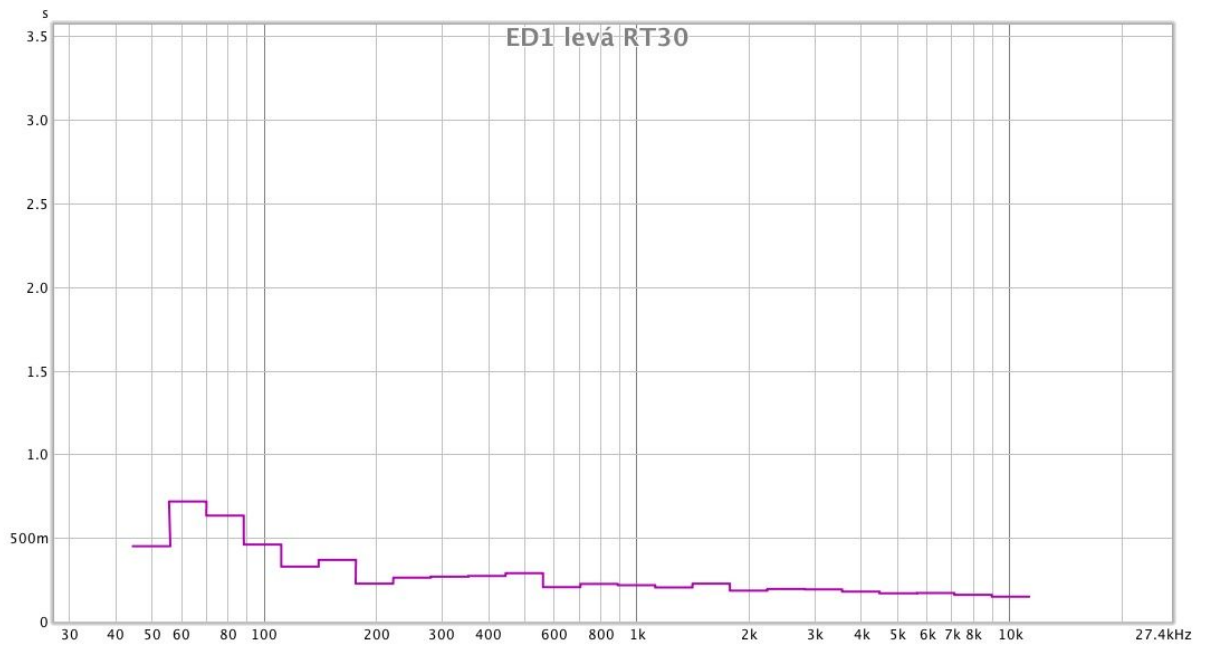


Obr. 58, RT30 v konfiguraci EB1, levý reproduktor





Obr. 59, RT30 v konfiguraci EC1, levý reproduktor



Obr. 60, RT30 v konfiguraci ED1, levý reproduktor

### 3.1.8 Komentář k měření s využitím ekvalizace

Jak můžeme vidět, ekvalizace může být pro danou poslechovou pozici klíčovou zastávkou na cestě za rovnou frekvenční odezvou na nízkých frekvencích - přichází ovšem s několika "ale", která z grafů nejsou patrná. Při reprodukci sweepu s korekcí, která má povolené zesilování frekvencí, se v poslechové pozici na nejnižších frekvencích objevilo slyšitelné zkreslení, což je dokladem sníženého headroomu. Dále je třeba brát v potaz fázové vlastnosti filtru vzhledem ke zpoždění, které do řetězce zanáší - pro co nejkvalitnější poslech je třeba dbát na fungování v "linear phase" módu, který s sebou ale nese znatelné zpoždění - na autorově systému v případě Sonarworks Reference 4 jde o 108 ms (v případě FabFilteru může jít v závislosti na nastavení kvality processingu i o ještě výraznější zpoždění, komplikující práci), což odpovídá necelým třem snímkům videa s frekvencí 25 snímků za vteřinu. Processing v módu bez zpoždění za cenu nezachování fáze se projevuje degradací stereobáze.

Co se týče výsledku Sonarworks Reference 4, při poslechu hudby je frekvenční odezva subjektivně rovnější, než se jeví podle grafu. Je proto možné, že vliv korekce se projeví až na reálně poslouchatelném materiálu - pakliže se mezi posluchačovy záliby neřadí poslech měřicích signálů.

Kompletní výsledky měření EA - ED jsou k nalezení v přílohách (6-9).

## 4 Další faktory

### 4.1 Reprodukory a sluchátka

Vzhledem ke všem zkoumaným okolnostem se nabízí otázka, proč všechny tyto problémy neobejít prací s využitím sluchátek? [13] Některé zdroje z důvodu nevyrovnané frekvenční odezvy na nízkých frekvencích v malých místnostech doporučují při práci s těmito frekvencemi použít sluchátka. [14] (str. 10)

Ovšem kromě fyzického nepohodlí pramenícího z jejich celodenního nošení se tento poslech od toho na reproduktorech liší zejména odlišnou možností prostorové lokalizace - k té dochází ve dvou fázích.

Tou první je lateralizace, kdy na základě zpoždění signálu (zpravidla nad 2 ms) a rozdílu intenzit mezi levým a pravým uchem dojde k lokalizaci jeho zdroje na spojnici obou uší. Další fází je externalizace, ve které mysl určí směr a vzdálenost zdroje na základě porovnávání vjemů z různých pozic hlavy. V případě sluchátek nemůže dojít k externalizaci, což se projevuje odlišným vjemem prostorovosti. [15] (str. 83)

Mimo to zpravidla sluchátka zvýrazňují zvukové detaily, kterých si jinak posluchač na reproduktorech nemusí všimnout.

V neposlední řadě je třeba mít na paměti pravděpodobnost, že výsledné dílo bude posloucháno s využitím obou prostředků, takže by nemělo znít uspokojivě pouze v jednom z nich.

## 5 Závěr

V prvním ročníku byl autor dotázán, proč nemůže provést zvukový mix jednoho cvičení doma v obývacím pokoji. V této práci bylo experimentálně ověřeno, že dodržení parametrů doporučení EBU Tech 3276 pro kvalitní poslechové podmínky v místnosti určené pro zvukovou postprodukci není snadné, zejména kvůli nerovné frekvenční odezvě na nízkých frekvencích či kvůli hladině hluku pozadí, a že specializovaná pracoviště mají stále své opodstatnění. Zároveň se ani nezabýváme postprodukcí audiovizuálního materiálu určeného pro kina, pro kterou je žádoucí ještě zcela jiná technologie reprodukce a akustika haly, blížící se reálnému kinosálu. Navzdory tomu jsme zjistili, že relativního zlepšení lze dosáhnout i v domácích podmínkách, a proto autor věří, že výsledek může být pro další čtenáře inspirací a ukázkou, že není příliš obtížné postavit své “tvůrčí útočiště” na pevnějších základech.

## 6 Literatura a zdroje

[1] KOLMER, Felix – Kyncl, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 2. nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 244 s., ISBN 04-526-82

[2] KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics, Fifth Edition*. Spon Press, 2009, 374 s., ISBN 0-203-87637-7

[3] SMETANA, C. a kol.: *Hluk a vibrace Měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika. 1998. 188 s., ISBN 80-901936-2-5

[4] EVEREST, F. Alton. *Master Handbook of Acoustics, Fourth Edition*. Mcgraw-Hill, 2001, 615 s., ISBN13 978-0071360975

[5] Mezinárodní elektrotechnické komise - encyklopedie pojmů z oblasti akustiky a elektroakustiky. [online] Dostupné z URL:  
<http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=801>

[6] WINER, Ethan. *Acoustic Treatment and Design for Recording Studios and Listening Rooms*. [online] Dostupné z URL:  
<http://ethanwiner.com/acoustics.html>

[7] HUNECKE, Jörg. *Micro-perforated absorbers*. [online] Dostupné z URL:  
<https://www.hunecke.de/en/knowledge/absorbers/mpa.html>

[8] HENS, Jee. *Impulse response measurements using MLS*. [online] Dostupné z URL: <http://www.jenshee.dk/signalprocessing/mls.pdf>

[9] MÜLLER, Swen - Massarani, Paolo. *Transfer-Function Measurement with Sweeps*. [online] Dostupné z URL:  
<http://www.four-audio.com/data/MF/aes-swp-english.pdf>

[10] *Doporučení EBU Tech 3276*. [online] Dostupné z URL:  
<https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf>

[11] FAZENDA Bruno - Angus, Jamie - Cox, Trevor. *The SOS Guide To Control Room Design*. 2005. [online] Dostupné z URL:  
<https://www.soundonsound.com/techniques/sos-guide-control-room-design>

[12] MULCAHY, John. *REW v5.19 Help*. 2018, 252 s. [online] Dostupné z URL:  
[https://www.roomeqwizard.com/help/help\\_en-GB/html/iseqtheanswer.html#top](https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/iseqtheanswer.html#top)

[13] ROBJOHNS, Hugh. Q: Why can't I do all my mixing on headphones? 2006.  
[online] Dostupné z URL:  
<https://www.soundonsound.com/sound-advice/q-why-cant-i-do-all-my-mixing-headphones>

[14] HAMIDOVIC, Ermin. The Systematic Mixing Guide. 2012.

[15] URBAN, Ondřej. Instrumentář elektroakustického zvuku. 1. vyd. Akademie múzických umění v Praze, 2007, 93 s. ISBN 978-80-7331-115-5