

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Řešení audiosystému pro poslechovou místnost

Autor práce: **Bc. Daniel Pešek**
Vedoucí práce: **Ing. Stanislav Bouzek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel PEŠEK**
Osobní číslo: **E22N0063P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Řešení audiosystému pro poslechovou místnost**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Navrhnete rozmístění vícekanálového audio systému v místnosti EK708.
2. Porovnejte elektroakustické parametry dostupných reprosoustav změřené v bezodrazové komoře a v místnosti EK708.
3. Změřte rozložení akustického pole v okolí hlavního poslechového místa a jednotlivých pracovišť.
4. Výsledky měření v EK708 porovnejte se simulací v programu EASE.

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

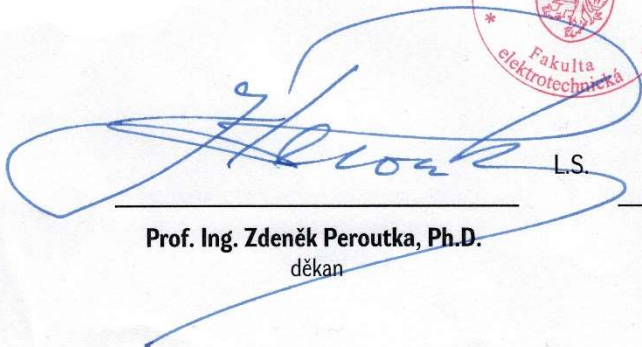
Seznam doporučené literatury:

1. Salava, T. Elektroakustická a elektromechanická měření.
2. Crocker, M. Handbook of Acoustics, ISBN: 978-0-471-25293-1
3. Martin C. High Performance Loudspeakers, ISBN-13: 978-0470094303
4. Don, D. Sound System Engineering, ISBN-13: 978-0240818467
5. Beranek, L. Acoustics, ISBN-13: 978-0883184943

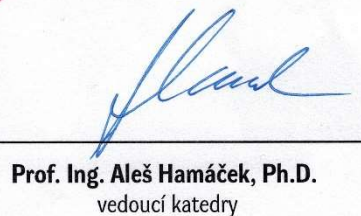
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**




L.S.

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



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

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací vícekanálového audio systému pro poslechovou místnost. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Začátek teoretické části je věnován požadavkům na poslechovou místnost a na vícekanálové reprosoustavy podle příslušných norem a specifikací. Další kapitola se zabývá umístěním reproduktorů z hlediska systému 7.1.4 a potřebným technickým vybavením. Poslední kapitola teoretické části je zaměřena na model reproduktoru v programu EASE 4. V praktické části je na základě požadavků a série měření proveden návrh vícekanálového audio systému pro poslechovou místnost EK708 v budově FEL ZČU. V závěru práce jsou uvedeny výsledky měření 5.1 audio systému a také porovnání se simulací v programu EASE 4.

Klíčová slova

audio systém, reproduktory, simulace, umístění reprosoustav, vícekanálový zvuk

Abstract

This thesis deals with the design and implementation of a multi-channel audio system for a listening room. The thesis is divided into theoretical and practical parts. The beginning of the theoretical part is focused on the requirements for the listening room and the multi-channel loudspeaker system according to the relevant standards and specifications. The next chapter deals with loudspeaker placement in terms of the 7.1.4 system and the necessary technical equipment. The last chapter of the theoretical part focuses on the loudspeaker model in the EASE 4 program. In the practical part, based on the requirements and a series of measurements, the design of a multichannel audio system for the listening room EK708 in the building of the FEL ZČU is carried out. In the conclusion of the thesis, the measurement results of the 5.1 audio system are presented, as well as a comparison with the simulation in the EASE 4 program.

Key Words

audio system, speakers, simulation, speaker placement, multichannel sound

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího závěrečné práce, za použití odborné literatury a jiných zdrojů, které jsou v práci odcitovány a uvedeny v seznamu literatury. Dále prohlašuji, že práce byla vyhotovena v souladu s autorským zákonem č. 121/2000 Sb. Také prohlašuji, že software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Plzni dne 24.5.2024

Bc. Daniel Pešek

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Požadavky na poslechovou místnost	- 2 -
1.1 Poslechové podmínky	- 2 -
1.2 Akustické parametry	- 2 -
1.2.1 Přímý zvuk	- 2 -
1.2.2 Počáteční odrazy	- 2 -
1.2.3 Dozvukové pole	- 2 -
1.2.4 Hladina akustického tlaku	- 3 -
1.2.5 Hlukové pozadí	- 4 -
1.2.6 Frekvenční odezva v poslechovém místě	- 4 -
2 Požadavky na vícekanálové reprosoustavy	- 6 -
2.1 Frekvenční odezva	- 6 -
2.2 Činitel směrovosti C	- 9 -
2.3 Zkreslení	- 9 -
2.4 Časová diference mezi kanály	- 9 -
2.5 Maximální provozní hladina akustického tlaku	- 9 -
2.6 Vlastní šum soustavy	- 9 -
2.7 Uspořádání vícekanálového audiosystému	- 9 -
3 Umístění reproduktorů	- 11 -
3.1 Umístění předních reproduktorů	- 13 -
3.2 Umístění prostorových reproduktorů	- 14 -
3.3 Umístění subwooferu	- 15 -
3.4 Natočení reproduktorů	- 15 -
3.5 Stropní reproduktory	- 16 -
3.5.1 Umístění stropních reproduktorů	- 16 -
4 Technické vybavení pro vícekanálový zvuk	- 18 -
4.1 Zdrojová zařízení vícekanálového zvuku	- 18 -
4.2 Zvukové kodeky	- 19 -
4.3 Dekodéry zvuku	- 20 -
4.3.1 Hardwarové dekodéry	- 20 -

4.3.2	Softwarové dekodéry	- 20 -
4.4	Dekodéry zvuku Dolby a DTS	- 21 -
4.5	Referenční dekodér Dolby Professional DP580	- 21 -
4.6	Zvuková rozhraní.....	- 22 -
5	Simulace elektroakustických parametrů v programu EASE	- 24 -
5.1	Přidání reproduktoru.....	- 24 -
6	Rozmístění vícekanálového audio systému v místnosti EK708.....	- 27 -
6.1	Místnost z pohledu prostorové akustiky	- 27 -
6.2	Návrh vícekanálového audio systému v místnosti EK708	- 27 -
6.3	Vybraná reprosoustava	- 30 -
6.3.1	KRK VXT8	- 30 -
6.3.2	KRK V12 S.....	- 32 -
6.4	Návrh reproduktorového stojanu.....	- 33 -
7	Měření reproduktorů v bezodrazové komoře	- 35 -
8	Měření a výsledky v místnosti EK708	- 38 -
8.1	Vliv pozice předního středního reproduktoru.....	- 38 -
8.2	Měření předního levého a pravého reproduktoru	- 40 -
8.3	Měření subwooferu.....	- 43 -
8.4	Porovnání elektroakustických parametrů reprosoustav v bezodrazové komoře a v místnosti EK708	- 43 -
8.5	Měření kompletního 5.1 audio systému	- 44 -
9	Simulace a porovnání výsledků simulace s měřením.....	- 49 -
	Zhodnocení a závěr.....	I
	Literatura	II
	Seznam obrázků.....	VI

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem audiosystému pro poslechovou místnost. Jejím cílem je navrhnout a realizovat vícekanálový audiosystém, který zajistí kvalitní a věrnou reprodukci zvuku v daném prostoru pro stereo a vícekanálové poslechové testy a zpracování zvukových nahrávek.

Přestože kvalitní studiové reproduktory mají výborné elektroakustické parametry, správné umístění reproduktorů a jejich pozice vůči posluchači hraje zásadní roli v dosažení optimálního zvukového zážitku. Vhodné rozmístění reproduktorů zajišťuje rovnoměrné rozložení zvukového pole a minimalizuje nežádoucí odrazy do poslechového místa, čímž umožňuje posluchačům vnímat zvuk tak, jak byl zamýšlen tvůrci nahrávky. Tento aspekt je obzvláště důležitý pro dosažení věrného prostorového zvuku. Nesprávné umístění reproduktorů může vést k fázovým posunům a interferencím, které negativně ovlivňují čistotu a lokalizaci zvuku. Rozmístění reproduktorů musí být přizpůsobeno specifickým akustickým vlastnostem místnosti, jako jsou její velikost, tvar a zvuková pohltivost stěn a dalšího použitého vybavení.

Práce je rozdělena do několika částí. V úvodní teoretické části jsou popsány požadavky norem a specifikací, které určují optimální rozmístění a specifikaci reproduktorů pro systém 7.1.4. V praktické části pak byl zkoumán hlavně vliv umístění reproduktoru v poslechové místnosti na frekvenční amplitudovou charakteristiku a také byly provedeny simulace v programu EASE 4.

1 Požadavky na poslechovou místnost

1.1 Poslechové podmínky

Kvalita poslechových podmínek v poslechové místnosti je definována vlastnostmi zvukového pole vytvářeného reproduktorem (reproduktory) v poslechovém prostoru ve výšce uší posluchače (cca 1,2 m nad úrovní podlahy v případě sedícího posluchače). Hlavními složkami zvukového pole jsou přímý zvuk, počáteční odrazy (early reflections) a vícenásobné odrazy, které tvoří dozvukové pole. Všechny tyto složky jsou závislé na čase a frekvenci. [17]

1.2 Akustické parametry

1.2.1 Přímý zvuk

Přímý zvuk se definuje jako zvukové pole, které by bylo naměřeno za použití stejných reproduktorů v bezodrazových podmínkách, tedy bez počátečních odrazů a dozvuku způsobeného poslechovou místností. Kvalita přímého zvuku je dána elektroakustickými parametry reproduktorů. [17]

1.2.2 Počáteční odrazy

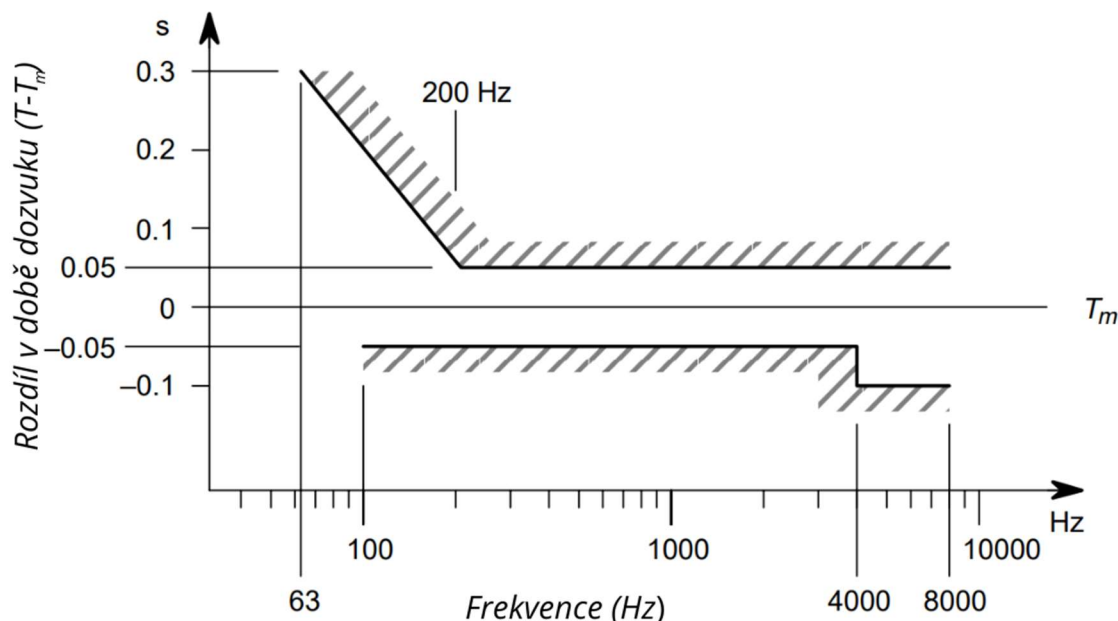
Počáteční odrazy jsou definovány jako odrazy od stěn nebo jiných povrchů v místnosti, které se dostanou do poslechového prostoru během prvních 15 ms po příchodu přímého zvuku. Počáteční odrazy tedy urazí dráhu delší maximálně o 5,1 m oproti přímému zvuku. Hladina těchto odrazů by měla být alespoň 10 dB pod úrovní přímého zvuku pro všechny frekvence v rozsahu 1 kHz až 8 kHz. [17]

1.2.3 Dozvukové pole

Dozvuk je efekt způsobený vícenásobnými odrazy od povrchů v poslechové místnosti, které se do poslechového prostoru dostanou až po prvních odrazech (časové zpoždění větší než cca 15 ms). [17]

Dozvukové pole by mělo být v poslechovém prostoru dostatečně difuzní, aby se zabránilo jevům, jako je například třepavá ozvěna. Důležitým parametrem dozvukového pole je doba dozvuku, která je definována jako doba, za kterou hladina akustického tlaku v uzavřeném prostoru poklesne o 60 dB pod počáteční hladinu. Doba dozvuku měřicího přístroje a filtrů by měla být kratší než doba dozvuku dozvukového pole. Doba dozvuku by se měla měřit v poslechové místnosti s 1/3oktávovou frekvenční filtrací s použitím poslechových

reproduktorů jako zdrojů zvuku. Doba dozvuku je frekvenčně závislá. Jmenovitá hodnota T_m je průměr naměřených dob dozvuku v 1/3oktávových pásmech od 200 Hz do 4 kHz. Jmenovitá doba dozvuku T_m by se měla pohybovat v rozmezí od 0,2 do 0,4 s, záleží na velikosti místnosti. Aby bylo zajištěno, že akustický projev místnosti zůstane "přirozený", měla by se hodnota T_m zvyšovat s velikostí místnosti. Doba dozvuku T , měřená v 1/3oktávových pásmech ve frekvenčním rozsahu od 63 Hz do 8 kHz, by měla odpovídat toleranční masce znázorněné na Obr. 1. [17]



Obr. 1: Toleranční pásmo pro dobu dozvuku poslechové místnosti. Převzato z [17].

1.2.4 Hladina akustického tlaku

Referenční poslechová hladina akustického tlaku, $L_{LISTref}$, charakterizuje citlivost reprodukčního kanálu. Slouží k určení referenčního zesílení (0 dB) pro úpravu úrovně při poslechu. Reprodukční kanál se obvykle skládá z ovladače hlasitosti a reproduktoru, který může být složitým zařízením zahrnujícím zesilovače, filtry a další prvky. Kanál se nastavuje na referenční hladinu akustického tlaku tak, že do každého reprodukčního kanálu se zvlášť přivede zkušební signál typu růžového šumu. RMS hladina zkušebnímu signálu musí být na úrovni "vyrovnávacího signálu", tedy:

-9 dB s ohledem na povolenou maximální hladinu u analogových zařízení (doporučení ITU-R BS.645 [35]). [17]

-18 dB vzhledem k dBFS (úplná hladina digitálního rozsahu) v digitálních zařízeních (technické doporučení EBU R68 [36]). [17]

Zesílení reprodukčního kanálu se nastaví tak, aby hladina akustického tlaku (měřena RMS, s časovou konstantou SLOW) v referenčním (poslechovém) bodě byla:

$$L_{LISTref} = 85 - 10 \log(n) \text{ dB}, \quad [17]$$

kde n je počet reprodukčních kanálů v celkové konfiguraci.

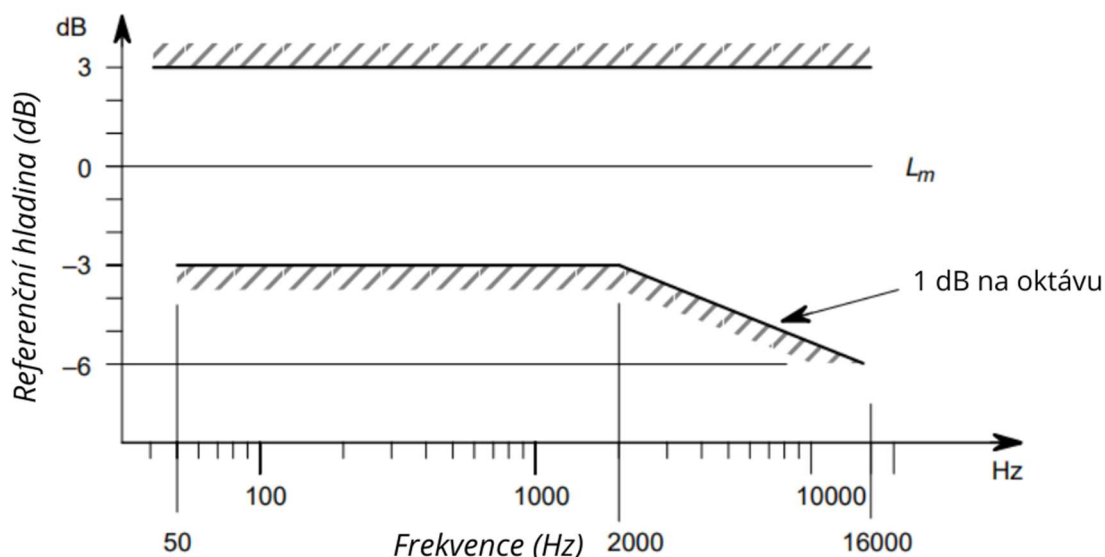
Rozdíl mezi úrovněmi jakýchkoli dvou kanálů by neměl překročit 1 dB. U dvoukanálové stereofonie je obzvláště důležité těsné sladění reproduktorů. [17]

1.2.5 Hlukové pozadí

Hladina akustického tlaku (RMS, SLOW) trvalého hluku pozadí z klimatizačních systémů nebo jiných vnějších či vnitřních zdrojů, měřená v poslechovém prostoru ve výšce 1,2 m nad úrovní podlahy by, pokud možno neměla překročit NR 10. Hluk pozadí by v žádném případě neměl překročit NR 15. Na obrázku 3 a v tabulce 1 uvedené v normě EBU Tech. 3276 [17] je možno najít přesné hodnoty NR10 a NR15 pro jednotlivá 1/3oktávová pásma. Hluk pozadí by neměl být impulsní, cyklický nebo tónový. [17]

1.2.6 Frekvenční odezva v poslechovém místě

Toleranční maska je definována pro frekvenční odezvu hladiny akustického tlaku produkovaného reproduktorem (reproduktory) v libovolném poslechovém bodě. Zkušebním signálem pro toto měření je v 1/3oktávy filtrovaný růžový šum. Toleranční maska je důležitým kritériem pro vyhodnocení vzájemného vlivu reproduktoru a poslechové místnosti, a tedy pro posouzení poslechových podmínek. Dobře koresponduje se subjektivním hodnocením reprodukováného zvuku. Hranice tolerance pro naměřené křivky jsou uvedeny na Obr. 2. L_m je střední hodnota hladin 1/3oktávových pásem se středními frekvencemi od 200 Hz do 4 kHz. Tolerance by měly být dodrženy pro každý (hlavní) kanál samostatně. Toto je důležité obzvláště pro stereofonní reprodukci. [17]



Obr. 2: Toleranční maska hladiny akustického tlaku. Převzato z [17]

Elektronická korekce (ekvalizace) může být nutná, pokud nelze dosáhnout linearitu křivky provozní odezvy místnosti jinak. Korekci lze provést pomocí úpravy frekvenční charakteristiky reproduktorů nebo pomocí externích ekvalizérů zařazených mezi budící signál a reproduktor. Aby nedošlo ke zhoršení kvality reprodukce, měla by se ekvalizace používat velmi opatrně. Doporučuje se provádět korekce pouze v oblasti nízkých frekvencí ($f < 300$ Hz). Všechny kanály by měly být upraveny stejným způsobem. [17]

2 Požadavky na vícekanálové reprosoustavy

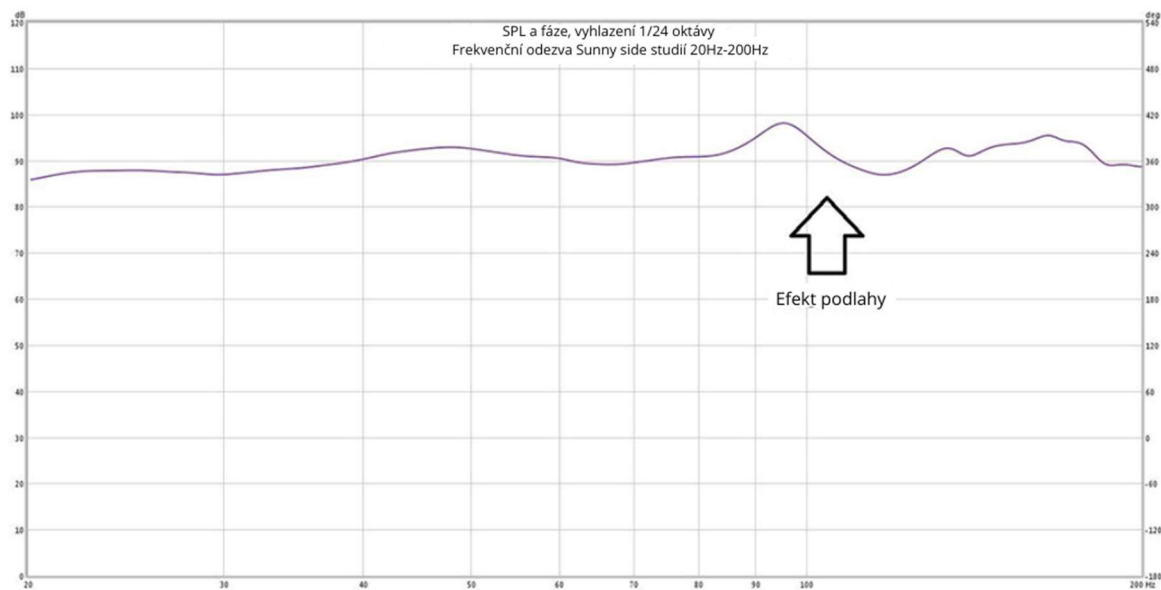
Požadavky na vícekanálové reprosoustavy udávají normy EBU Tech 3276 [17], AESTD1001.1.01-10 [37].

2.1 Frekvenční odezva

Křivka frekvenční odezvy se měří v 1/3oktávových pásmech, kdy testovacím signálem je růžový šum. Měření se provádí na hlavní ose (směrový úhel = 0°). Křivka by měla spadat do tolerančního pásma 4 dB ve frekvenčním rozsahu od 40 Hz do 16 kHz. Křivky frekvenční charakteristiky měřená při směrových úhlech $\pm 10^\circ$ a $\pm 30^\circ$ by se neměly lišit od frekvenční charakteristiky měřené na hlavní ose (směrový úhel = 0°) o více než následující přípustné odchylky. A to ± 3 dB pro směrové úhly v rozsahu $\pm 10^\circ$ a ± 4 dB pro směrové úhly v rozsahu v horizontální rovině $\pm 30^\circ$. Rozdíl mezi předními reproduktory v pásmu 250 Hz – 2 kHz by měl být maximálně 0,5 dB. [17] [37]

Frekvenční odezva je funkce, která určuje charakter každého zařízení produkujícího zvuk. Křivka frekvenční odezvy znázorňuje výkon reproduktoru v celém frekvenčním spektru. Plochá křivka znamená, že reproduktor reprodukuje všechny frekvence stejně, zatímco neplochá křivka ukazuje, že reproduktor zdůrazňuje určité frekvence nebo je naopak potlačuje. Ve studiovém prostředí je požadována právě plochá vyrovnaná frekvenční odezva pro přesnou reprodukci zvuku. Dosažení takto rovné frekvenční odezvy je v reálných podmínkách velmi obtížné. Je potřeba se z velké části zbavit nežádoucích odrazů, a toho lze dosáhnout pouze ve specifických podmínkách. Nevhodné umístění odrazivých ploch v okolí audiosystému a poslechového místa může mít za následek velmi nevyrovnanou frekvenční charakteristiku. Často se toto stává v pásmu nízkých frekvencí, kde je charakter akustického pole výrazně ovlivněn vlastními frekvencemi místnostmi. Zabránit vzniku stojatého vlnění na nízkých frekvencích je velmi problematické, protože není jednoduše možné vytvořit pohltivý obklad dostatečně účinný v širším pásmu nízkých frekvencí.

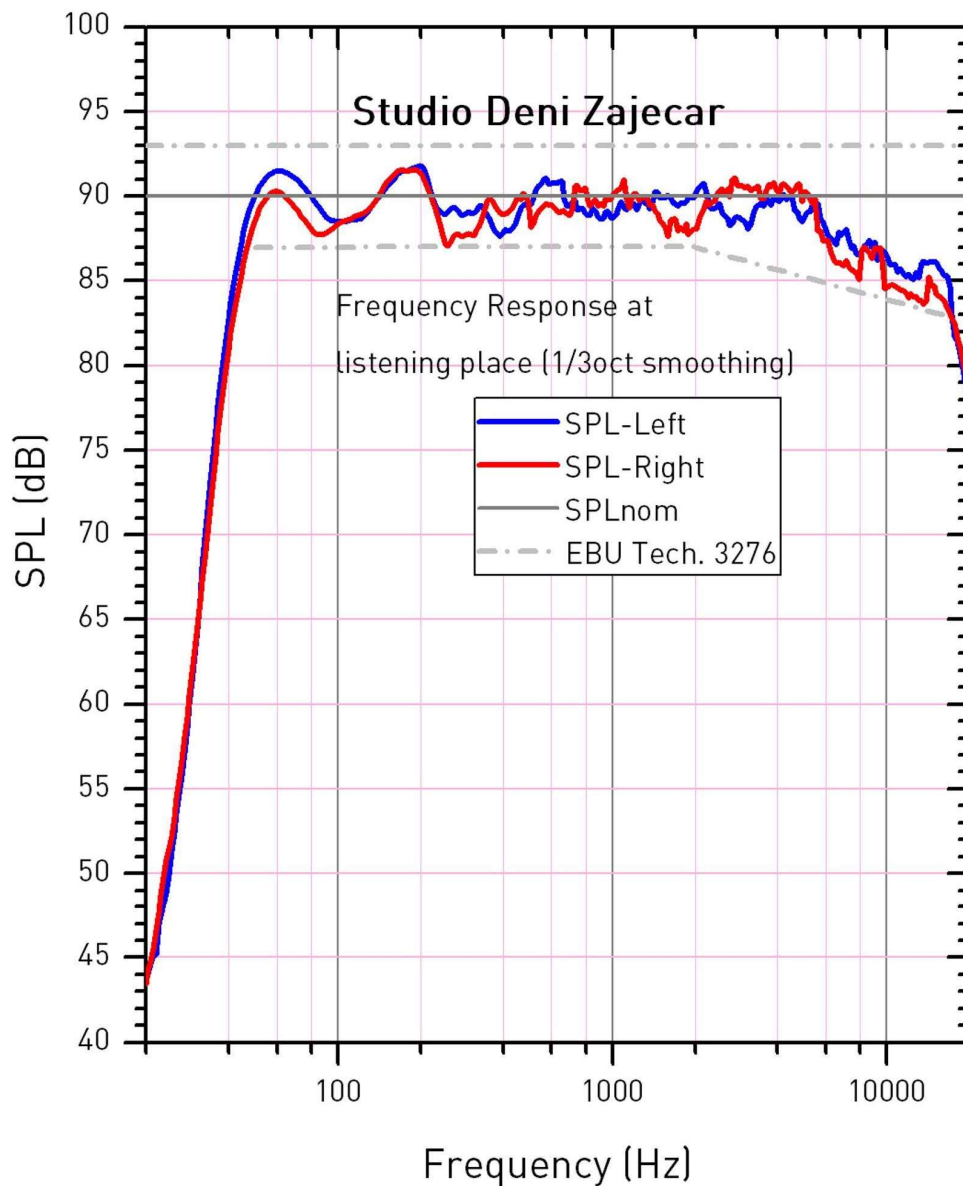
Jako první příklad je zde na Obr. 3 uvedena amplitudová frekvenční charakteristika v 1/24oktávových pásmech 20 Hz do 200 Hz, naměřená v poslechového místě v renomovaném studiu Sunny Side v Bruselu v Belgii. Je zde vidět, že odraz od podlahy v tomto případě způsobuje mírný nárůst na frekvenci 95 Hz, následovaný poklesem na frekvenci přibližně 140 Hz a dalším mírným nárůstem na frekvenci přibližně 180 Hz. [14] [17] [19]



Obr. 3: Frekvenční odezva 20 Hz - 200 Hz měřená v poslechové místě, Sunny Side Studios. Převzato z [19]

Tento odraz je dle provozovatele studia posledním a konečným odrazem, kterému se nelze vyhnout, ať už je místnost navržena jakkoliv dobře. Na tento jev nemá vliv umístění koberce, protože v tomto frekvenčním pásmu nemá dostatečnou zvukovou pohltivost. Tato křivka byla měřena v prázdné místnosti. Také si lze všimnout, že měřítko svislé osy se pohybuje od 0 dB do 120 dB. To znamená, že tato frekvenční charakteristika vykazuje celkovou odchylku ± 3 dB a až ± 5 dB na frekvencích ovlivněných odrazem od podlahy. U tohoto měření není uvedeno frekvenční pásmo nad 200 Hz, ale vzhledem k správnému umístění reproduktorů, akustickým úpravám a žádnému jinému objektu v místnosti lze očekávat, že zbytek spektra bude mít podobně malé odchylky. [14] [19]

Další příklad je od odborníka na akustiku Bogiče Petroviće a jeho firmy MyRoom design. Jeho práce je mnohem snadněji přizpůsobitelná domácím studiím, protože je zaměřena speciálně na malé místnosti. Na Obr. 4 je amplitudová frekvenční odezva v celém spektru 20 Hz - 20 kHz, měřená v poslechové pozici pro každý reproduktor zvlášť ve studiu v Zaječaru v Srbsku, a meze tolerance podle EBU Tech. 3276. Frekvenční charakteristika je zde uvedena v 1/3oktávy a svislá osa je v rozsahu od 40 dB do 100 dB. Odezva vykazuje odchylku ± 2 dB mezi přibližně 50 Hz a 6 kHz. Také si lze všimnout podobného propadu a nárůstu frekvence kolem 100 Hz. Zde se opět projevuje odraz od podlahy jako v přechodném příkladu. Zajímavé je, že oproti minulému příkladu bylo těchto výsledků dosaženo i se studiovým nábytkem. [14] [21]



Obr. 4: Frekvenční odezva 20 Hz - 20 kHz, studio Deni Zajecar. Převzato z [21]

Z těchto příkladů vyplývá, že ani ty nejlepší profesionálové nejsou schopni dosáhnout dokonale rovné frekvenční odezvy bez ekvalizace. Pro amatérská studia je více než dobrým výsledkem rozdíl 6 dB mezi poklesy a špičkami. S požadavkem na ideálně plochou odezvu roste exponenciálně složitost akustického řešení prostoru a také požadavky na audio systém. [17] [18] [14] [19]

2.2 Činitel směrovosti C

Činitel směrovosti C, který se udává v dB, je vyjádřený jako poměr intenzity zvuku v 1 m na referenční ose, k intenzitě zvuku, kterou by ve stejném místě vyvolal v podmínkách volného pole všesměrový zdroj vyzařující stejný akustický výkon jako testovaný reproduktor. Činitel směrovosti by se měl pohybovat v mezích od 6 dB do 12 dB podle [17] a od 6 dB do 10 dB podle [37].

2.3 Zkreslení

Harmonické zkreslení se měří pomocí sinusových signálů. Do reproduktoru se přivádí vstupní signál s konstantním napětím. Tento signál by měl vytvářet průměrnou hladinu akustického tlaku (SPL) 96 dB a mělo by být dosaženo minimálně -30 dB (THD maximálně 3 %) pro frekvence nižší než 100 Hz a -40 dB (THD max. 1 %) pro frekvence vyšší než 100 Hz. [37]

2.4 Časová diference mezi kanály

Časová diference mezi kanály u stereofonního nebo vícekanalového systému by neměla překročit 100 μ s podle [38] a podle [37] by neměla překročit 10 μ s.

2.5 Maximální provozní hladina akustického tlaku

Maximální provozní hladina akustického tlaku je definována jako maximální hladina akustického tlaku nepřerušovaného signálu, kterou může reproduktor vydávat po dobu nejméně 10 minut, aniž by došlo k tepelnému nebo mechanickému poškození. Tato hladina maximálního akustického tlaku je měřena efektivní hodnotou s pomalou časovou konstantou v referenční vzdálenosti 1 m. A měla by být větší než 108 dB podle [17] a větší než 112 dB podle [37].

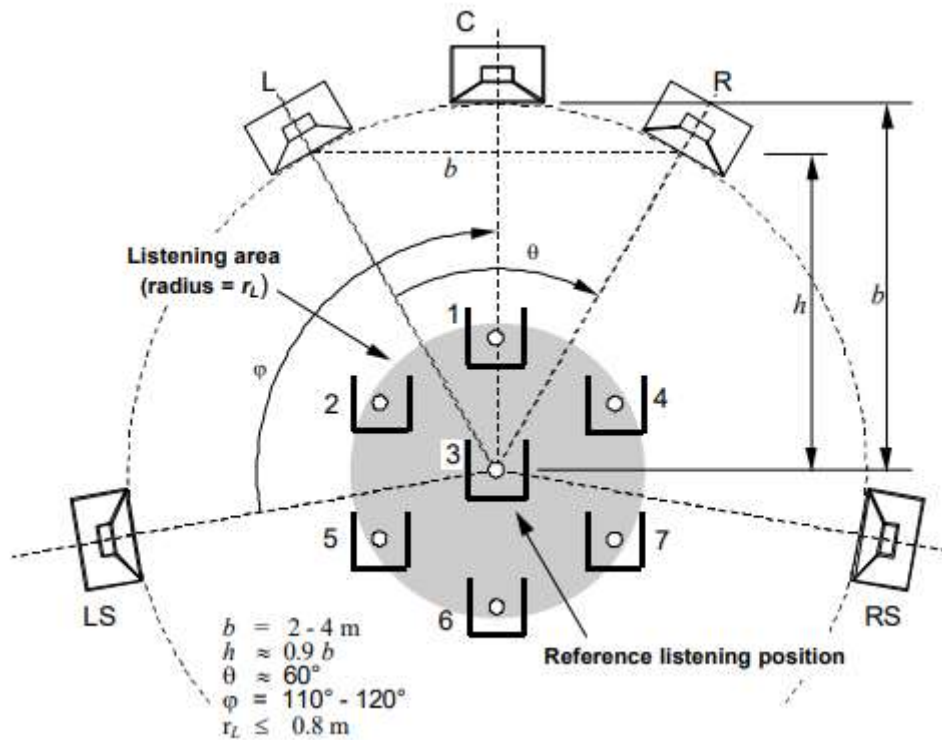
2.6 Vlastní šum soustavy

Ekvivalentní hladina akustického hluku generovaná jedním referenčním reproduktorem vztažená na vzdálenost 1 m od akustického středu by měla být menší nebo rovna 10 dB.

2.7 Uspořádání vícekanalového audiosystému

Pro vícekanalový poslech by mělo být dle normy EBU Tech. 3276s1 rozmístěno pět širokopásmových reproduktorů kolem poslechového místa podle uspořádání uvedeném na

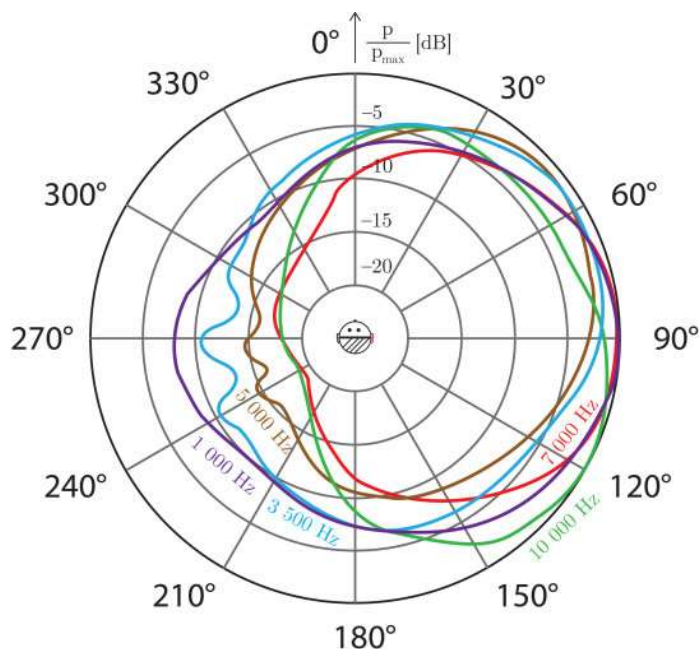
Obr. 5. Reproductory jsou umístěny na kružnici o poloměru b . Kromě uspořádání reproduktorů je zde také vidět a poloměr r_L , který určuje možný rádius, ve kterém je také možno poslouchat při zachování dostatečných parametrů audio systému. Tento poloměr by měl být menší nebo roven 0,8 m. [43] Dalším podrobnostem k umístění vícekanálového poslechového systému je věnována kapitola 3.



Obr. 5: Typické uspořádání pětikanálového poslechového systému. Převzato z [43].

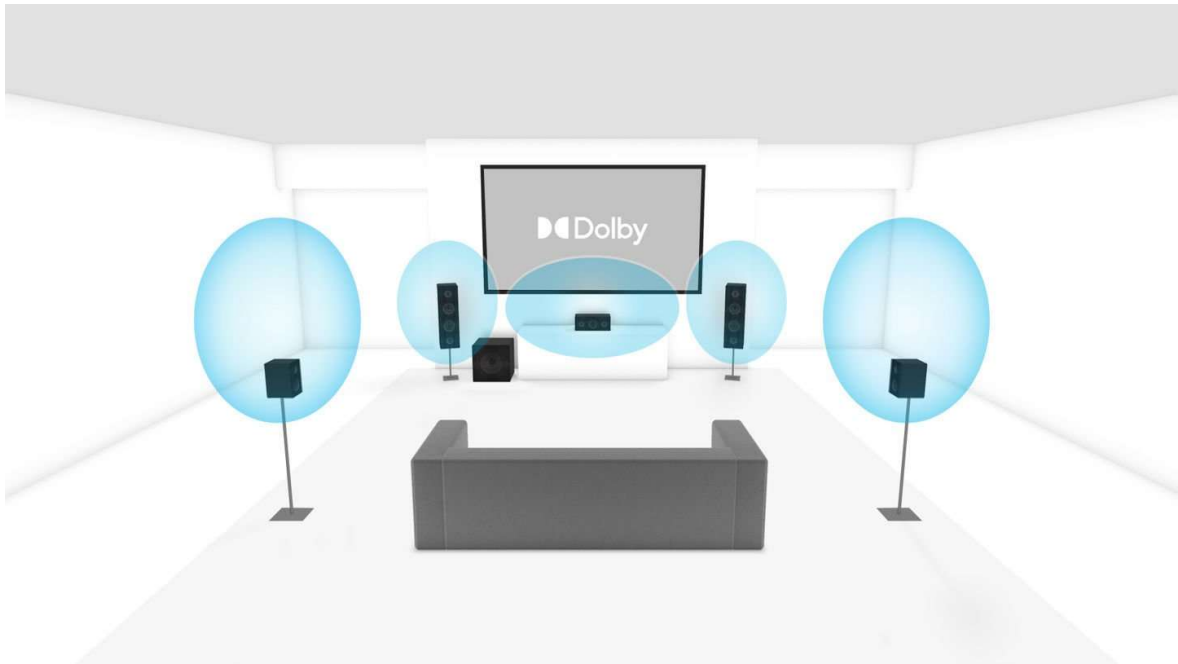
3 Umístění reproduktorů

Klíčovým prvkem pro dosažení pohlcujícího audiovizuálního zážitku je nejen výběr kvalitních reproduktorů, ale také jejich správné rozmístění v daném prostoru vůči posluchači. Velmi významnou roli samozřejmě hraje i akustický projev prostoru, který má zásadní vliv na výslednou frekvenční charakteristiku reproduktoru v místě posluchače. Na Obr. 6 je uvedena směrová charakteristika pravého lidského ucha pro různé frekvence, která popisuje citlivost ucha na zvukové podněty z různých úhlů. Jak je vidět z uvedených charakteristik, lidské ucho vnímá zvuky směřující z prostoru za hlavou téměř se stejnou intenzitou jako zvuky z předního směru. Z tohoto důvodu je vícekanálová reprodukce zvuku, která pokrývá celý 360° prostor, ze své podstaty realističtější a věrohodnější, než běžná dvoukanálová reprodukce (pouze z předního směru). [15] [16]



Obr. 6: Směrová charakteristika pravého lidského ucha. Převzato z [29].

Nezákladnější konfigurace 5.1 zahrnuje celkově 6 kanálů – subwoofer (speciální kanál pro pásmo nízkých frekvencí) a 5 prostorových kanálů. Na Obr. 7 je možné sledovat základní rozmístění reproduktorů v systému 5.1 podle specifikace Dolby. K dalšímu zdokonalení se do 5.1 systému přidávají další dva zadní prostorové kanály, což vytváří konfiguraci 7.1. Také je možné systém rozšířit do další výškové úrovně reproduktory umístěnými na stropě, například v počtu dalších 4 reproduktorů, čímž vznikne systém 7.1.4. Pro přiblížení této konfigurace je uveden Obr. 8. [4] [30] [31]



Obr. 7 Pohled na rozmístění reproduktorů v systému 5.1. Převzato z [30]



Obr. 8: Pohled na rozmístění reproduktorů v systému 7.1.4. Převzato z [31]

Umístění všech reproduktorů do úrovně výšky hlavy posluchače by se mělo řídit následujícími doporučeními: Jako referenční bod se použijí reproduktory umístěné v přední části místnosti. Všechny reproduktory v rovině hlavy (uší) posluchače by měly být ideálně ve stejné vzdálenosti od pozice posluchače, díky tomu dorazí zvuk ze všech reproduktorů k posluchači ve stejnou dobu. Všechny reproduktory by měly být ve stejné výšce, obvykle

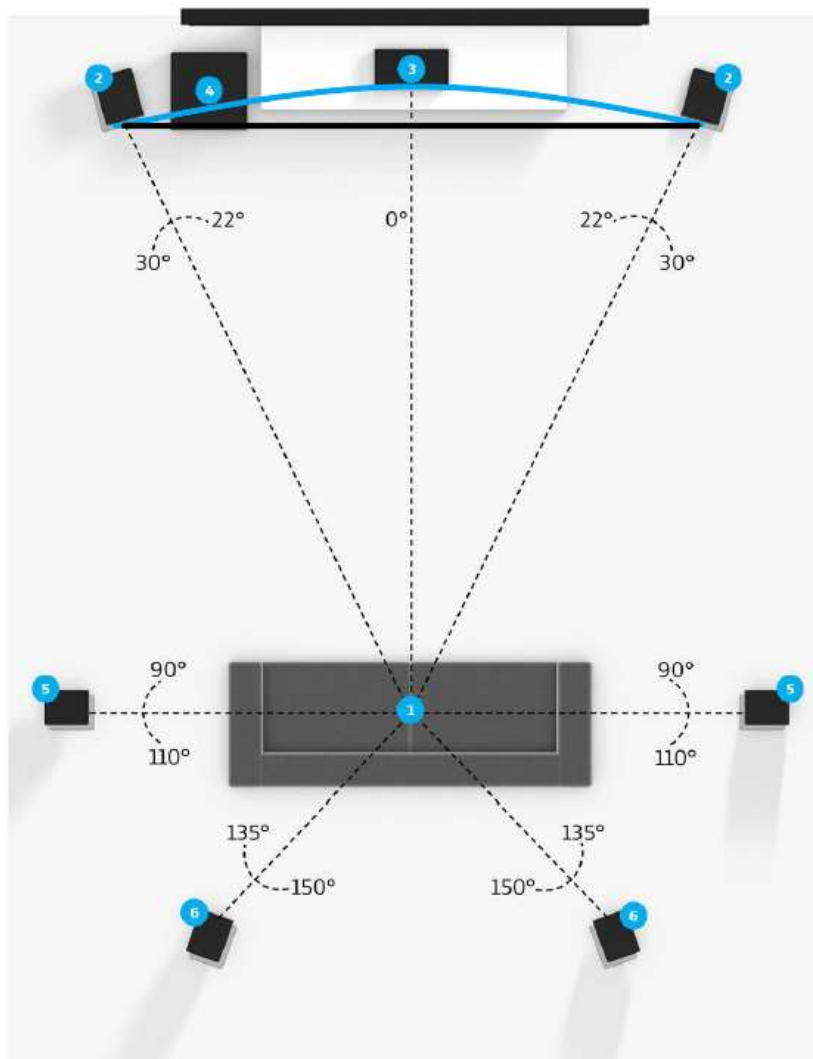
1,2 metru, což odpovídá úrovni uší průměrného sedícího posluchače. Pokud je to možné, měla by být výška zadních reproduktorů stejná jako výška předních reproduktorů. Pokud je to kvůli geometrii místnosti nepraktické nebo nemožné, mohou být zadní reproduktory umístěny výše než přední reproduktory a sklopeny směrem dolů. Doporučuje se však, aby výška zadních reproduktorů nebyla vyšší než 1,25násobek výšky předních reproduktorů. Je také důležité, aby žádný reproduktor nebyl, pokud možno, zakryt, což může být nejčastěji způsobeno rozestavením nábytku. Pro zlepšení kvality zvuku a snížení nežádoucích odrazů zvuku se doporučuje použít zvukově pohlcující a zvukově rozptylující úpravy, které minimalizují odrazy od stěn, podlahy a stropu. [5] [6]

3.1 Umístění předních reproduktorů

Soustava předních reproduktorů se skládá ze středového, levého předního a pravého předního kanálu. Pokud se jedná o poslechový systém propojený s video projekcí, středový reproduktor by měl být umístěn přímo za obrazem (zvukopropustné projekční plátno) nebo pod obrazem (TV, monitor). Nejběžnějším umístěním je pod obrazovkou, avšak záleží na výšce a dostupném prostoru pro umístění reproduktoru. Středový reproduktor hraje v prostorovém zvukovém systému klíčovou roli, zpracovává většinu dialogů a dalších předních a středových zvuků ve filmech nebo televizních pořadech. Je velmi důležité umístit středový reproduktor dostatečně blízko k obrazovce, aby pocitově zvuk vycházel přímo z ní. Větší vzdálenost od obrazovky může vést k nepřirozenému až rušivému poslechovému zážitku. Reprosoustava by měla být umístěna tak, aby výškový reproduktor byl v rovině s ušima posluchače. Ideálně by hlavní pozice posluchače měla být v ose se středem televizní obrazovky a středovým reproduktorem. Tato centrální pozice umožňuje optimální směrování zvuku dialogů přímo na uši posluchače, což přispívá ke kvalitnímu poslechu a celkovému zážitku.

Pro levý a pravý přední reproduktor je důležité, aby byly oba umístěny ve stejné vzdálenosti od poslechového místa. Ideální je vytvořit rovnostranný trojúhelník mezi místem posluchače a reproduktory. Pokud to není možné, musí reproduktory směřovat k posluchači pod úhlem 22–30° od středové osy. Tímto je zajištěn optimální stereofonní zvukový prožitek, aniž by byla omezena šířka vnímaného zvukového pole. Pokud se vzdálenost posluchače zvětšuje, úhel se zmenšuje, což je přijatelné. Avšak pokud se posluchač příliš přiblíží reproduktorům, úhel se rozšiřuje natolik, že se riziko degradace stereofonního efektu výrazně zvyšuje. Je zásadní zajistit, aby pravý a levý přední reproduktor byly umístěny ve stejné vzdálenosti od obrazovky i místa posluchače. Pravolevou symetrií se dosáhne

vyváženého stereofonního obrazu a pozornost diváka se soustředí na zvuk. Na Obr. 9 je ukázáno optimální rozmístění reproduktorů v konfiguraci 7.1. Středový reproduktor, označený č. 3, by měl být umístěn na vrcholu vyznačeného modrého oblouku, jehož poloměr je dán vzdáleností od posluchače. Přední levý a pravý reproduktor, označené číslem 2, by měly být umístěny v průsečíku oblouku a vrcholů rovnoramenného trojúhelníka, což zajistí jejich rovnoměrnou vzdálenost od místa posluchače (bod číslo 1).



Obr. 9: Pohled shora na umístění reproduktorů v 7.1 systému. Převzato z [5]

3.2 Umístění prostorových reproduktorů

Prostorové reproduktory mají za úkol vytvářet pocit prostoru a ambience a doplňují tak přední zvukovou stopu. Jejich správné umístění má zásadní význam pro celkový prostorový efekt. Na Obr. 9 je zobrazeno rozmístění těchto reproduktorů (č. 5 a 6). U systému 7.1 by měly být boční reproduktory (označené číslem 5) umístěny v úhlu

90° až 110°. Pro další dva zadní reproduktory (označené číslem 6) je ideální místo v prostoru v úhlu 135° až 150° od místa poslechu, což přispívá k vytvoření zadního zvukového prostoru. [6]

3.3 Umístění subwooferu

V porovnání s ostatními reproduktory prostorového zvuku mají subwoofery zcela odlišnou úlohu – ve zvukovém spektru reprodukují velmi nízké basové frekvence. Protože vyzařování nízkých frekvencí je méně směrové, je možné subwoofer umístit na různá místa v místnosti a není předem stanoveno jedno optimální místo. Na Obr. 9 je subwoofer označen číslem 4. Existuje však několik obecných pokynů, které pomáhají optimalizovat rozmístění. [6]

Zaprvé je důležité si dávat pozor na umístění subwooferu v rohu místnosti, neboť to může negativně ovlivnit kvalitu reprodukce nízkých frekvencí. Umístění subwooferu do rohu může vést k příliš dominujícím a obtížně ovladatelným nízkým frekvencím. Nicméně pokud je systém určen pro posluchače, který preferuje hluboké basy, může mu takovéto řešení vyhovovat. Experimentování s různými umístěními může vést k nalezení optimální pozice pro subwoofer. Dále se doporučuje vyvarovat se stejných vzdáleností mezi protilehlými stěnami, což znamená, že subwoofer by neměl být umístěn přímo do středu místnosti. Umístěním subwooferu do kmity nebo uzlu stojaté vlny způsobí, že vnímaná hlasitost nízkých frekvencí se bude v různých bodech místnosti výrazně měnit. Pokud se zjistí pokles basů v okolí hlavního poslechového místa, je možné experimentovat právě s posunutím subwooferu, zvyšování hlasitosti problém nevyřeší. Někdy může stačit i posun o pouhých několik centimetrů k dosažení významné změny. Možností je také přidat další subwoofer, čímž vznikne systém 7.2. Toto opatření může pomoci vyrovnat basy ve velkých místnostech nebo v prostorech, kde se nízké frekvence vzájemně ruší. Klíčová je poslechová kontrola (ideálním případě také objektivní měření) během přesouvání reproduktorů, dokud není dosaženo požadovaného zvukového výstupu. [6]

3.4 Natočení reproduktorů

Kvůli omezenému směrovému vyzařování běžných reproduktorů hlavně na vyšších frekvencích se často používá natočení reproduktorů k poslechovému místu. Natočení směrem k poslechovému místu částečně zúží stereofonní obraz a zvuk získá na přesnosti. Směrování reproduktorů dovnitř často optimálně funguje při jednom místě k sezení mezi reproduktory. Alternativně je možné ponechat reproduktory natočené rovně pro vytvoření

celkově širší zvukové scény, což se osvědčuje při poslechu více posluchačů na rozlehlejších prostorech. [6]

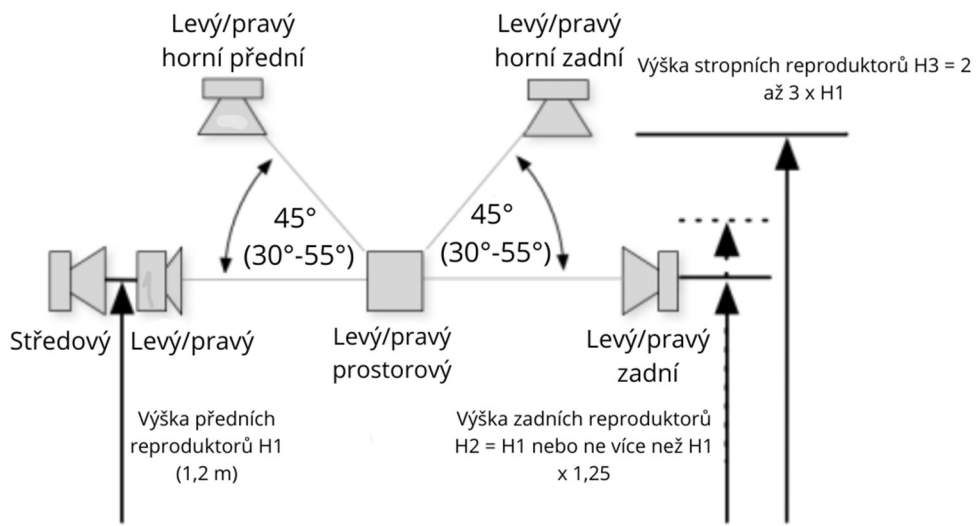
3.5 Stropní reproduktory

Další možností rozšíření systému jsou stropní reproduktory. Pro přidání horních zvukových kanálů do místnosti existuje celá řada variant. Většina běžných stropních reproduktorů s širokou směrovou charakteristikou bude v poslechové místnosti dobře fungovat. Zvukový signál pro takový multikanálový systém je mixován pomocí diskretních zvukových objektů, které se mohou pohybovat kdekoli v trojrozměrném prostoru. Je proto vhodné zvolit reproduktory, které svými parametry a zvukovým projevem co nejpřesněji odpovídají primárním reproduktorům na výškové úrovni posluchače. [5]

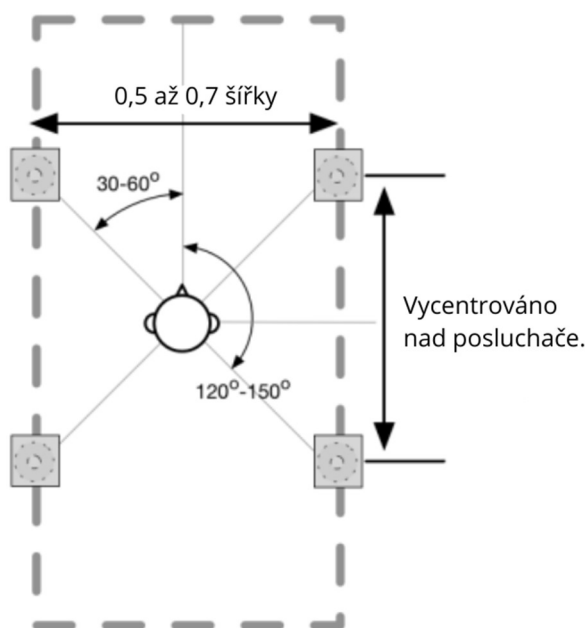
3.5.1 Umístění stropních reproduktorů

Pokud jsou zvoleny stropní reproduktory s širokou směrovou charakteristikou (přibližně 45 stupňů vůči akustické referenční ose ve zvukovém pásmu od 100 Hz do 10 kHz nebo širším), mohou být reproduktory namontovány přímo směrem dolů. U reproduktorů s užším rozptylovým profilem by měly být reproduktory natočeny směrem k primárnímu poslechovému místu. [5]

Stropní reproduktory by měly být umístěny ve výšce, která je dvakrát až třikrát vyšší než svislá poloha reproduktorů na úrovni posluchače (na Obr. 10 označené jako H3). Výškový úhel od místa poslechu k levému nebo pravému hornímu přednímu reproduktoru a levému nebo pravému hornímu zadnímu reproduktoru v referenčním uspořádání 7.1.4 by měl být 45°. Tento úhel lze v případě potřeby upravit v rozmezí 30° až 55°, jak je znázorněno na Obr. 10. Obr. 11 ukazuje preferované umístění čtyř stropních reproduktorů při pohledu shora. Horizontální šířka by měla být přibližně stejná jako horizontální vzdálenost levého a pravého reproduktoru. Při zachování těchto pravidel by měla být vzdálenost mezi stropními reproduktory do stran 0,5 až 0,7 šířky celkového uspořádání v závislosti na vzdálenosti obrazovky a tří předních reproduktorů ve vztahu k prostorovým reproduktorům. Nejvhodnější je udržovat stropní uspořádání ve středu, zepředu dozadu, nad poslechovým prostorem, i když jsou přední reproduktory a obrazovka ve větší vzdálenosti než prostorové reproduktory. [5]



Obr. 10: Vertikální poloha předních, prostorových a horních reproduktorů. Převzato z [5]



Obr. 11: Pohled shora, umístění stropních reproduktorů. Převzato z [5]

4 Technické vybavení pro vícekanálový zvuk

Kromě kvalitních reproduktorů je vícekanálový audio-systém specifický dalšími zařízeními, která jsou zdrojem budicího signálu nebo ho dále zpracovávají. Vícekanálové audio-systémy byly dříve určeny primárně pro filmy, v současné době je ale stále dostupnější i čistě hudební obsah. Do vícekanálového zvuku je zpracovávána nová i starší tvorba, ke které jsou ještě dostupné jednotlivé zvukové stopy. Tzv. Spatial Audio nabízí například společnost Apple, která poskytuje tuto technologii nejen pro vícekanálové reproduktorové audiosystémy, ale také pro jejich sluchátka AirPods Pro a AirPods Max. Tato technologie simuluje zvuky přicházející z různých směrů a vytváří iluzi, že se posluchač nachází přímo uprostřed dění. Sluchátka navíc obsahují senzory polohy a pohybu hlavy, takže posluchač se může v prostorovém zvuku „rozhlížet“. Co se týká standardu Dolby Atmos, tuto technologii podporují také streamovací služby jako Netflix, Apple TV+, Disney+ a Amazon Prime Video.

4.1 Zdrojová zařízení vícekanálového zvuku

Vícekanálový zvukový signál je v případě filmů součástí video signálu a bez ohledu na zdroj dat je nutné ho od obrazové stopy oddělit, dekodovat a poté nasměrovat k jednotlivým reproduktorům. Základní audio-video (AV) přijímač, často nazývaný také jako receiver, je zařízení, které slouží k přijímání a zpracování různých audio a video signálů. Jeho hlavní funkcí je spojovat různá zařízení, jako jsou například televizor, reproduktory, Blu-ray přehrávače, síťové přehrávače, herní konzole apod., do jednoho systému a zajišťovat jejich součinnost. AV přijímač tedy slouží jako centrální kontrolní jednotka pro správu a optimalizaci zvuku a obrazu v domácím kině nebo multimediálním systému. [8]

Mezi hlavní činnosti AV přijímače patří:

- Připojení a přepínání mezi zdroji zvuku a obrazu

Každý zdroj zvuku v multikanálovém systému, jako jsou přehrávače CD, gramofony nebo digitální audio přehrávače, se připojuje k AV přijímači. Sekce předzesilovače AV přijímače umožňuje snadno přepínat nebo volit mezi připojenými zdroji zvuku, které chce posluchač přehrát. Díky AV přijímači se nemusí ručně připojovat a odpojovat kabely, vše lze přepínat pomocí jednoho zařízení vzdáleně. Každý ze vstupů má ideální parametry pro připojení daných zdrojů (vstupní impedance, citlivost apod.)

Výstupy AV přijímače jsou dále připojeny k zobrazovacím zařízením, jako je televizor nebo projektor, a audio-systému. Ve většině případů přepínání jednotlivých zdrojů je realizováno dálkovým ovladačem. V dnešní době, kdy ubývá fyzických nosičů, nabízí receivery také připojení k internetu prostřednictvím portů Ethernet nebo WiFi a následné využití streamovacích služeb, bezdrátové streamování hudby přes Bluetooth, bezdrátové streamování videa nebo zrcadlení obrazovky prostřednictvím DLNA/Miracast/Airplay. Dalšími zajímavými funkcemi jsou např. zvukový výstup pro více místností, a některá zařízení umožňují i kalibraci místnosti pomocí DSP pro optimalizaci zvuku. Mnoho z těchto doplňkových funkcí závisí na konkrétní značce, modelu a v neposlední řadě ceně AV přijímače. [8]

- Dekódování formátu prostorového zvuku

AV přijímač má často zabudované dekodéry pro různé zvukové formáty, jako je Dolby Digital, DTS nebo Dolby Atmos. Ze všech komponentů systému domácího kina je AV receiver jediný, který má schopnost dekodovat analogové a digitální formáty prostorového zvuku ze vstupních video souborů. Schopnost dekodovat formáty prostorového zvuku je vlastnost, která odlišuje A/V receiver od tradičních stereofonních zesilovačů [8].

- Distribuce zvukových signálů pro audio-systém

Základní funkcí A/V receiveru je, aby obsahoval potřebný počet samostatných výstupních zvukových kanálů dle požadované konfigurace multikanálového zvuku (minimálně 5.1). Dalšími důležitými funkcemi jsou frekvenční úpravy a zpoždění jednotlivých zvukových kanálů. V případě pasivního audio-systému obsahuje receiver také výkonové zesilovače [8].

4.2 Zvukové kodeky

Kodek je spojení slov kodér/dekodér. Jedná se o zařízení nebo program, který kóduje nebo dekóduje datový tok nebo signál. [23] Ke kompresi digitálních zvukových dat se používají různé zvukové kodeky a ke zpracování těchto formátů jsou zapotřebí různé dekodéry. Mezi nejčastější zvukové kodeky patří: [22]

- MP3: Jeden z nejpoužívanějších zvukových formátů MP3 nabízí dobrou rovnováhu mezi velikostí souboru a kvalitou zvuku. Používá ztrátovou kompresi, při které se kvůli snížení velikosti souboru vyřadí některá zvuková data.
- AAC: Advanced Audio Coding je nástupcem formátu MP3 a poskytuje lepší kvalitu zvuku při podobných bitových rychlostech. Běžně se používá v zařízeních Apple a streamovacích platformách jako je Spotify.
- FLAC: Free Lossless Audio Codec je bezztrátový kompresní formát, který zachovává všechna zvuková data a poskytuje vysokou kvalitu zvuku. Soubory FLAC jsou větší než soubory MP3 nebo AAC, ale nabízejí vynikající kvalitu zvuku.

4.3 Dekodéry zvuku

Dekodéry zvuku hrají ve světě digitálního zpracování zvuku zásadní roli. Jde o zařízení pro zpracování digitálního signálu, které je zodpovědné za převod digitálních zvukových dat do formátu, který lze přehrát pomocí reproduktorů nebo sluchátek. Tento proces zahrnuje dekódování digitálních dat, která mohou být uložena v různých formátech, například MP3, AAC nebo FLAC, a také jejich převod na analogové signály. Tyto signály jsou poté zesíleny a přeneseny do výstupních zařízení pro přehrávání. Zvukové dekodéry lze obecně rozdělit do dvou typů. Jsou to hardwarové dekodéry a softwarové dekodéry. [22]

4.3.1 Hardwarové dekodéry

Hardwarové dekodéry jsou integrované obvody nebo samostatná zařízení, která provádějí proces dekódování. Často se nacházejí v audio zařízeních, jako jsou systémy domácího kina, integrované audio-systémy a přenosné hudební přehrávače. Hardwarové dekodéry mohou ve srovnání se softwarovými dekodéry nabídnout vyšší kvalitu zvuku a nižší latenci, protože jsou pro tento účel speciálně navrženy. Mohou však být dražší a nemusí podporovat všechny současné zvukové formáty a nelze je jednoduše doplnit o nové [22]. Příklad konkrétního hardwarového dekodéru je uveden v podkapitole 4.5.

4.3.2 Softwarové dekodéry

Softwarové dekodéry jsou programy nebo aplikace, které se spouštějí v počítači nebo v mobilním zařízení a slouží k dekódování digitálních zvukových souborů. Často jsou součástí přehrávačů médií, jako jsou např. iTunes. Softwarové dekodéry jsou flexibilnější než hardwarové dekodéry, protože je lze snadno aktualizovat tak, aby podporovaly nové

zvukové formáty. Výkon softwarových dekodérů se však může lišit v závislosti na výpočetním výkonu zařízení, na kterém jsou spuštěny. [22]

4.4 Dekodéry zvuku Dolby a DTS

Za zvukové dekodéry je nezbytné zmínit samostatně Dolby a DTS, dva hlavní hráče na poli technologie prostorového zvuku. Obě společnosti vyvinuly vlastní zvukové kodeky a dekodovací technologie pro vysoce kvalitní vícekanálový zvuk ve filmech, počítačových hrách a hudbě. Mezi jejich významné kodeky a dekodéry patří např: [22]

- Dolby Digital: V současné době se používá na discích DVD, Blu-ray a streamovacích platformách. Podporuje až 5.1 kanálů prostorového zvuku.
- Dolby Atmos: V tomto případě se jedná o pokročilý objektový zvukový formát, který umožňuje dosáhnout působivějšího a přesnějšího prostorového zvuku přidáním výškových kanálů k tradičnímu prostorovému zvuku.
- DTS-HD Master Audio: Bezztrátový zvukový kodek s vysokým rozlišením, který podporuje až 7.1 kanálů prostorového zvuku a poskytuje vynikající kvalitu zvuku pro Blu-ray a digitální streamovací platformy.
- DTS:X: Podobně jako Dolby Atmos je DTS:X objektový zvukový formát, který nabízí pohlcující a flexibilnější prostorový zvuk, protože eliminuje potřebu specifických konfigurací reproduktorů.

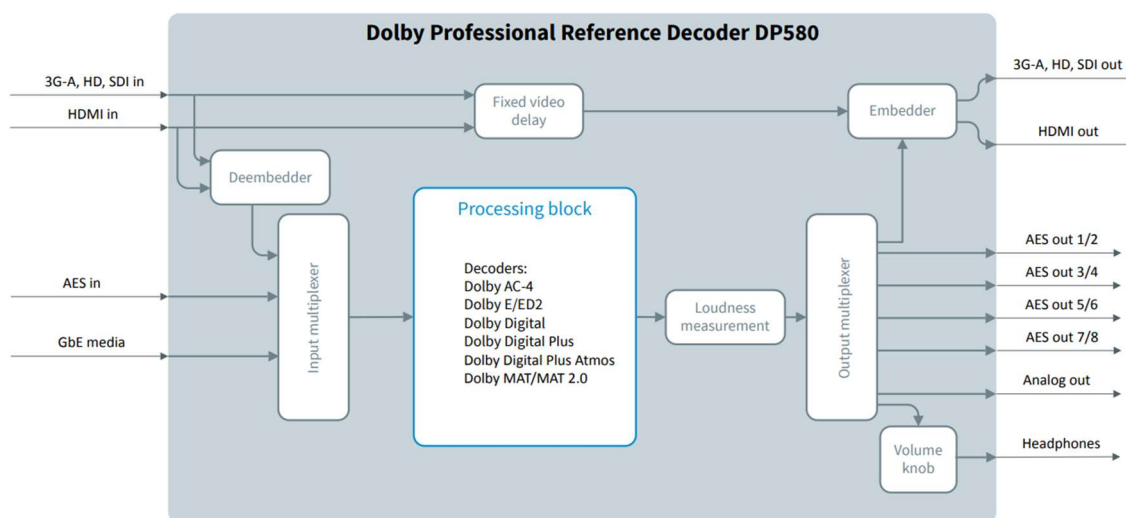
4.5 Referenční dekodér Dolby Professional DP580

DP580 je profesionální referenční dekodér Dolby, který podporuje různé zvukové formáty Dolby potřebné pro zpracování formátu Dolby Atmos. Nabízí funkce jako dekódování Dolby AC-4, Dolby E/ED2, Dolby Digital, Dolby Digital Plus, Dolby Digital Plus Atmos a další. Zařízení lze použít k monitorování a ověřování zvuku ve vysílacích produkčních řetězcích nebo v testovacích prostředích.

DP580 funguje jako komplexní nástroj pro analýzu zvuku kodeků Dolby, který poskytuje informace o stavu v reálném čase, monitorování chyb a záznamy o událostech. Podporuje více vstupních formátů, nabízí měření hlasitosti, deembedování, embedování, řízení hlasitosti a různé možnosti výstupu, jako je AES, HDMI, analogový výstup a monitorování do sluchátek. Zařízení lze ovládat prostřednictvím webového grafického uživatelského

rozhraní a poskytuje podrobnou zpětnou vazbu z monitorování prostřednictvím LED diod a měřičů hlasitosti.

Na Obr. 12 je blokové schéma zařízení, které znázorňuje průběh zpracování zvuku v zařízení. Ukazuje cestu signálu ze vstupních zdrojů, jako jsou AES, SDI, HDMI, do dekodérů pro různé formáty zvuku Dolby. Schéma také zahrnuje komponenty, jako je měření hlasitosti, deembedder, embedder, ovladač hlasitosti, vstupní/výstupní multiplexory a monitorovací funkce, jako jsou sluchátka a analogové výstupy. [11]



Obr. 12: DP580 blokový diagram. Převzato z [11]

4.6 Zvuková rozhraní

Zvukové rozhraní je ústředním prvkem veškerého studiového vybavení. Přes rozhraní vše komunikuje se zdrojem, ať už je to počítač nebo hardwarový sekvencer. Většina počítačů, tabletů a chytrých telefonů má zabudované zvukové karty, které převádějí digitální signály na audio signály. Ale skutečnost je taková, že integrovaná zvuková karta v počítači je často poměrně jednoduché zařízení s omezenými možnostmi vstupů a výstupů a zvukovou kvalitou. Univerzálních zařízení jednoduše nebyla vyrobena pro nahrávání nebo přehrávání zvuku v profesionální kvalitě. Proto přichází na řadu studiová zvuková rozhraní. Kvalitní rozhraní umožňuje snadno nahrávat/přehrávat více kanálů zvuku, a to s minimálním zpožděním.

Hlavním úkolem zvukových zařízení je dnes převod analogového signálu na digitální nebo naopak. Když se ještě zvuk nahrával výhradně analogově, vše se přenášelo přes

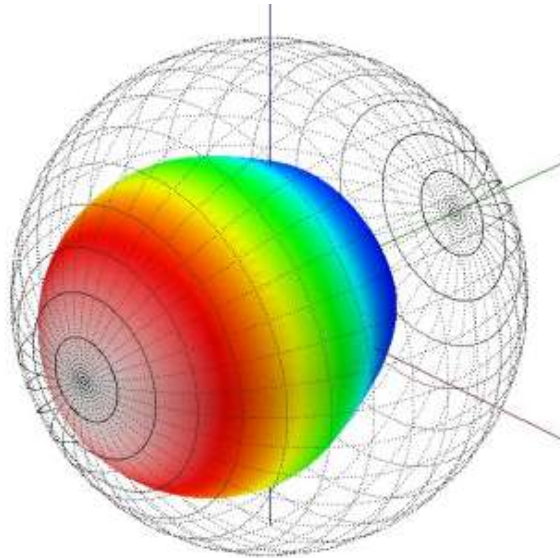
mixážní pult a nahrávalo (např. na pásku). V současné době se vše, co souvisí s nahráváním a úpravami zvuku, provádí na digitální úrovni. Většina rozhraní umí tyto signály převádět obousměrně, tedy jak analogově na digitální, tak digitálně na analogový. Tyto typy převodů provádí samotné rozhraní a většina zvukových rozhraní je vybavena několika kanály každého z nich. Zvuková rozhraní jsou také vybavena zabudovanými mikrofonními předzesilovači. Předzesilovače jsou potřebné pro převod mikrofonního signálu na linkovou úroveň. Některá rozhraní navíc mohou sloužit jako zesilovače pro sluchátka s vysokou impedancí, takže není potřeba pořizovat další samostatná speciální zařízení. Celkově lze říci, že v každém vstupu a výstupu zvukového rozhraní dochází ke konverzi signálů. [24] [25]

5 Simulace elektroakustických parametrů v programu EASE

EASE 4 je program, který se zabývá simulací elektroakustiky a prostorové akustiky pro účely návrhu akustických úprav prostoru a konfigurace audiosystému. Tento program poskytuje několik aplikací jako je analýza pokrytí a rozložení SPL vybraného prostoru při buzení audiosystémem, výpočty doby dozvuku a srozumitelnosti řeči a různé další simulace z oboru prostorové akustiky.

5.1 Přidání reproduktoru

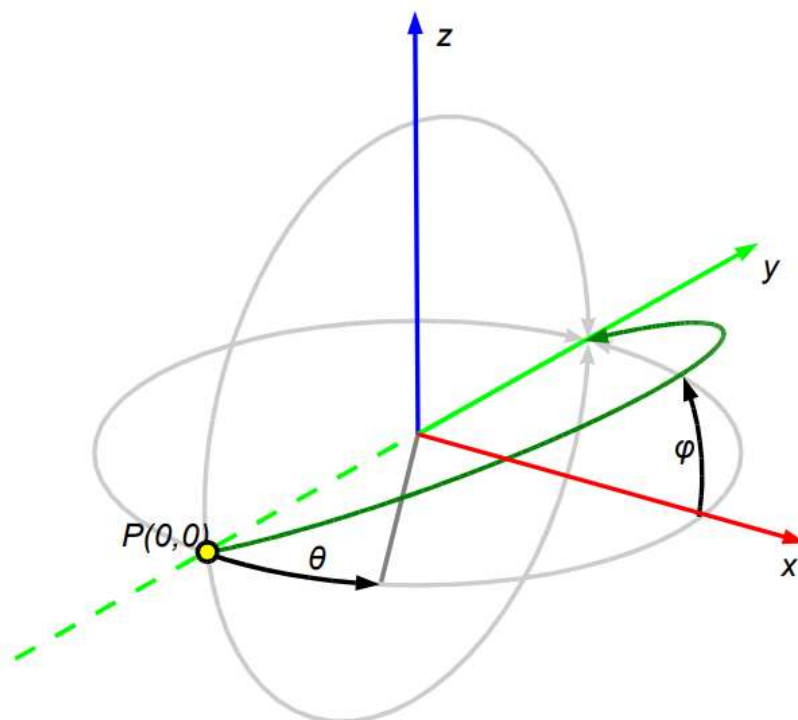
Pro simulace konfigurací audiosystémů se v programu EASE používá funkce „Speaker Base“, což je editor a prohlížeč dat modelů reproduktorů dodaných výrobcí a uživateli. Jsou 2 možnosti, jak přidat konkrétní reproduktor do programu EASE 4. Zprv je zde možnost importovat vybraný reproduktor z katalogu, který je dostupný od dodavatele softwaru. Databáze obsahuje převážně reproduktory pro ozvučení velkých produkcí, od samostatných reproduktorů pro line array systémy. Pokud žádný reproduktor z databáze svými parametry nevyhovuje, je možnost vytvořit vlastní reproduktor přímo v programu EASE. Podklady jsou mechanické parametry a samozřejmě elektroakustické parametry. Kromě frekvenční amplitudové charakteristiky software vyžaduje znalost směrové charakteristiky zdroje zvuku. V programu EASE 4 je zdroj modelován jako bod s daným útlumovým diagramem (attenuation pattern), který je funkcí úhlu šíření. Měřicí body jsou na povrchu koule rozmístěny v úhlech po 5° , což dává celkový počet 2 522 bodů (viz. Obr. 13). [33] [34]



Obr. 13: Koule kolem zdroje zvuku (EASE balloon). Převzato z [33]

Pomocí funkce „Attenuation Data“ se zpřístupní směrová data amplitudy reproduktoru ve formě tabulek a je potřeba zadat 2 522 naměřených hodnot nebo je lze importovat v předepsaném formátu ASCII. [33]

Osový systém používaný v EASE je znázorněn na Obr. 14. Bod P (0,0) je bod na ose, úhel θ se může pohybovat v rozmezí 0° až 180° , od přední části zdroje k jeho zadní části. Úhel φ se může měnit v rozmezí 0° až 355° otáčející se proti směru hodinových ručiček z pravé strany zdroje nahoru. [33] [34]



Obr. 14 EASE Referenční systém. Převzato z [33]

Musí být známa hodnota útlumu pro údaje o hodnotách v ose:

- pro každý bod $P(\theta, \varphi)$ s rozlišením 5° ,
- pro každé třetinové oktávové frekvenční pásmo od 100 Hz do 10 kHz.

Uvnitř systému EASE jsou údaje o reproduktorech uloženy v 21 tabulkách, jedna pro každé třetinooktávové frekvenční pásmo v rozsahu 100 Hz - 10 kHz. Každá tabulka má 37 řádků a 72 sloupců a obsahuje údaje o útlumu vzhledem k polárním souřadnicím θ a φ . Ve verzi EASE 4 umožňuje druhá sada tabulek ukládat také údaje o fázové charakteristice. Všechny výše zmíněné údaje odečtené s rozlišením 5 stupňů a ve 21 třetinooktávových frekvenčních pásmech pak tvoří trojrozměrnou matici 37 x 72 x 21. [33] [34]

6 Rozmístění vícekanálového audio systému v místnosti EK708

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout umístění vícekanálového audio systému v místnosti EK708. Pro lepší vizualizaci umístění reproduktorů do řešené místnosti dle požadavků uvedených v kapitole 2 a 3 byl vytvořen model ve 3D modelovacím programu SketchUp. Tento program byl vybrán pro svou jednoduchost a komptabilitu formátu s programem EASE, který bude použit pro simulace akustických parametrů v kapitole 9. Návrh umístění jednotlivých reproduktorů byl proveden pro konfiguraci 7.1.4., protože jejím základem je právě konfigurace 5.1, která bude realizována na základě této diplomové práce a do budoucna je pravděpodobné, že dojde k rozšíření audiosystému.

6.1 Místnost z pohledu prostorové akustiky

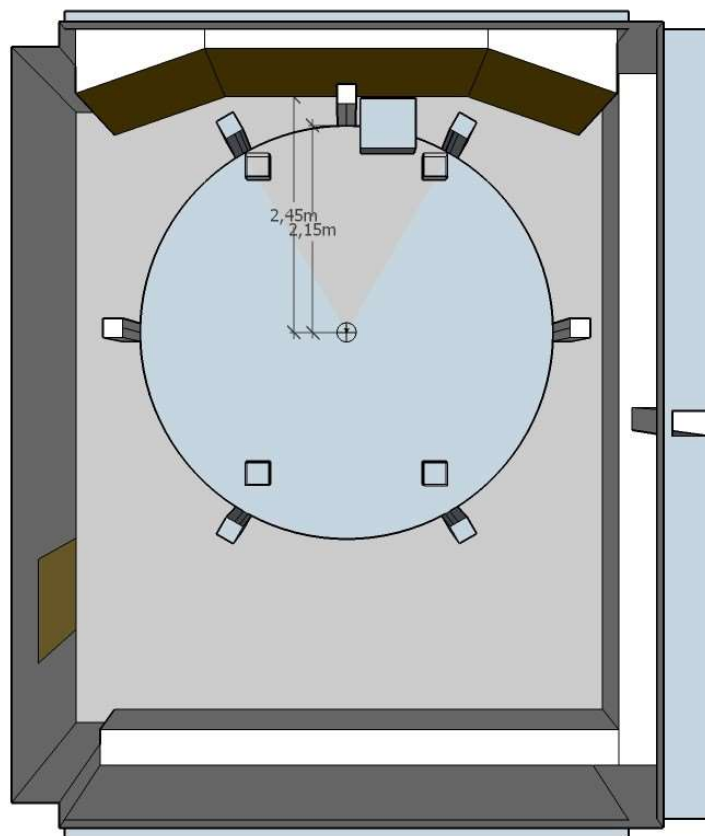
Místnost EK708 má půdorysné rozměry 7,1 m x 5,6 m má výšku 3,25 m. Objem celé místnosti je cca 130 m³. S cílem vyřešit prostorovou akustiku této místnosti již bylo zpracováno několik diplomových prací [28] [45] [46]. V rámci poslední dokončené diplomové práce M. Landgráfa z roku 2023 byl na přední stranu prostoru umístěn nízkofrekvenční rezonátor. Ten má za účel nejen zkrátit dobu dozvuku celé místnosti, ale také potlačit jev, který se nazývá SBIR (speaker – boundary interference response). Efekt SBIR se vyskytuje při umístění reprosoustavy před odrazivou stěnu místnosti, kdy v poslechovém místě dochází k výraznému poklesu nebo nárůstu zvukové energie na nízkých frekvencích. To je zapříčiněné sečtením přímé vlny zvuku s odraženou vlnou zvuku od stěny, před kterou je reproduktor umístěn. Tím dojde na určité frekvenci, která je dána vzdáleností reproduktoru od stěny, k výraznému propadu v amplitudové frekvenční charakteristice. [28] [32]

V místnosti jsou současně s návrhem audiosystému paralelně řešeny finální akustické úpravy pro zkrácení doby dozvuku a zlepšení srozumitelnosti. Mělo by dojít k instalaci stropních akustických kazet, které jsou pohltivé ve frekvenčním pásmu 80 až 120 Hz a díky svému nepravoúhlému tvaru napomáhají difuzitě akustického pole na vyšších frekvencích. Dále by na obou stěnách měly být umístěny akustické závěsy pohltivé převážně na středních a vysokých frekvencích.

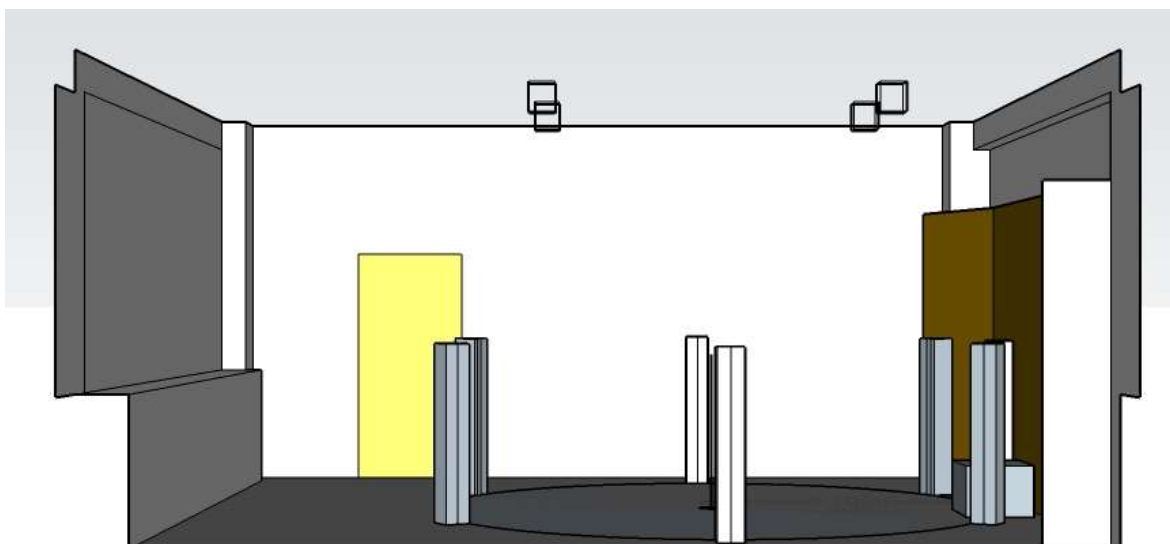
6.2 Návrh vícekanálového audio systému v místnosti EK708

Při řešení již konkrétního umístění reproduktorů 5.1 systému bylo nutné začít výběrem místa posluchače, od kterého se měří vzdálenosti a úhly k jednotlivým reproduktorům. Wes

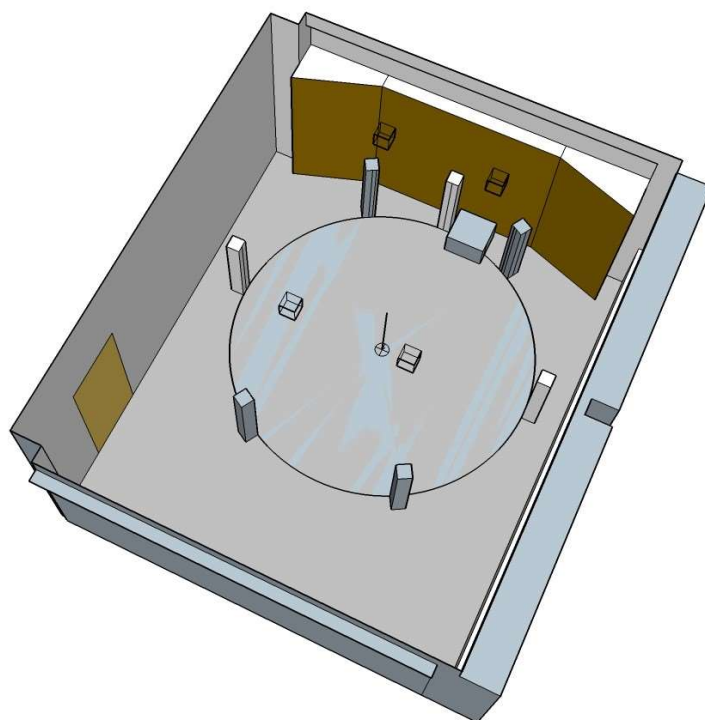
Lachot, který navrhuje poslechové místnosti pro nahrávací studia, stejně jako řada výrobců reproduktorů [38], doporučuje vycházet z umístění poslechového místa v 38% délky místnosti. Tato pozice se nenachází v minimu ani maximu stojatého vlnění vznikajícího na prvních vlastních frekvencích. Poslechové místo je střed kružnice, na níž jsou v ideálním případě umístěny jednotlivé reproduktory vícekanálového audiosystému. To znamená, že pro konfiguraci audiosystému v rozsahu 7.1 jsou vzdálenosti všech 3 předních a 4 prostorových reproduktorů od poslechového bodu stejné. Pro řešenou místnost byl na základě velikosti místnosti a prostorového uspořádání dalšího vybavení vybrán poloměr kružnice 2 m. Tím je dodrženo hned několik bodů z druhé kapitoly. Úhly předních levých a pravých reproduktorů od středového bodu jsou 30° . Pro 2 boční reproduktory tento úhel činí 90° a pro 2 zadní je tento úhel 150° . Stropní reproduktory jsou opět navrženy podle doporučení v první kapitole (Obr. 10 a Obr. 11). Pro umístění subwooferu nejsou dána žádná konkrétní doporučení, měl by se nacházet v přední části místnosti a jeho přesná poloha má být vybrána na základě naměřených frekvenčních charakteristik nebo alespoň subjektivního posouzení v poslechovém místě. Stropní reproduktory jsou rozmístěny dle požadavků více uvedených norem a specifikace mezi stávající osvětlení a zamýšlené akustické prvky. Na Obr. 15 a Obr. 16 jsou vidět pohledy shora a z boku na místnost s navrženým rozmístěním audiosystému a na Obr. 17 je 3D pohled na celou místnost. Na pohledu shora jsou vyznačeny 2 rozměry. Střed kruhu, tedy místo posluchače, je vzdálený 2,45 m od rezonátoru a je uprostřed šířky místnosti. Kruh, na kterém jsou umístěny reproduktory, má poloměr 2,15 m. Jedná se o poloměr, při kterém vyšly nejvyrovnanější frekvenční amplitudové charakteristiky předních reproduktorů měřené v místě poslechu (kap. 8).



Obr. 15: Pohled shora na rozmístění vícekanálového audio systému 7.1.4



Obr. 16: Pohled ze strany na rozmístění vícekanálového audio systému 7.1.4



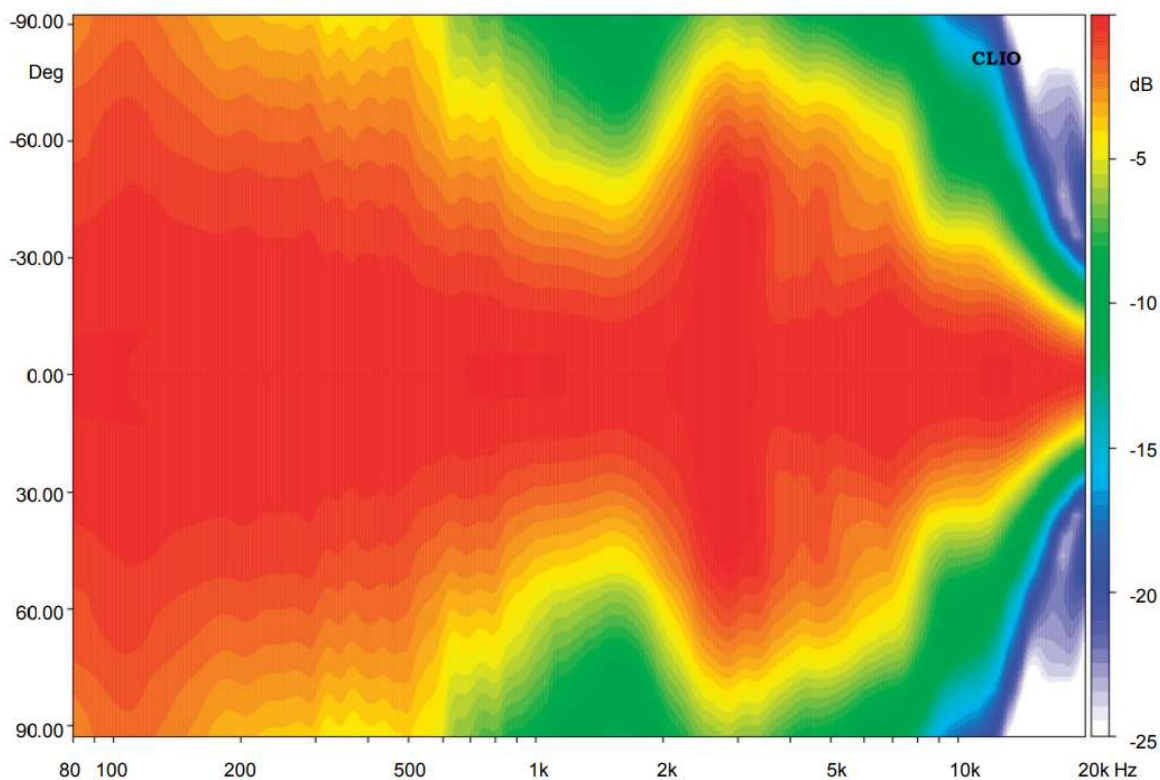
Obr. 17 3D pohled na návrh

6.3 Vybraná reprosoustava

Pro řešení vícekanálový audio systém byly již dříve vybrány a zakoupeny reproduktory KRK VXT8 a jako subwoofer byl zvolen KRK V12 S. Dvojice KRK VXT8 je instalována i jako poslechový audiosystém v akustických laboratořích. Bude tak možné přecházet mezi oběma pracovišti bez nutnosti zvykání si na jiný audiosystém. V této kapitole jsou popsány jejich parametry.

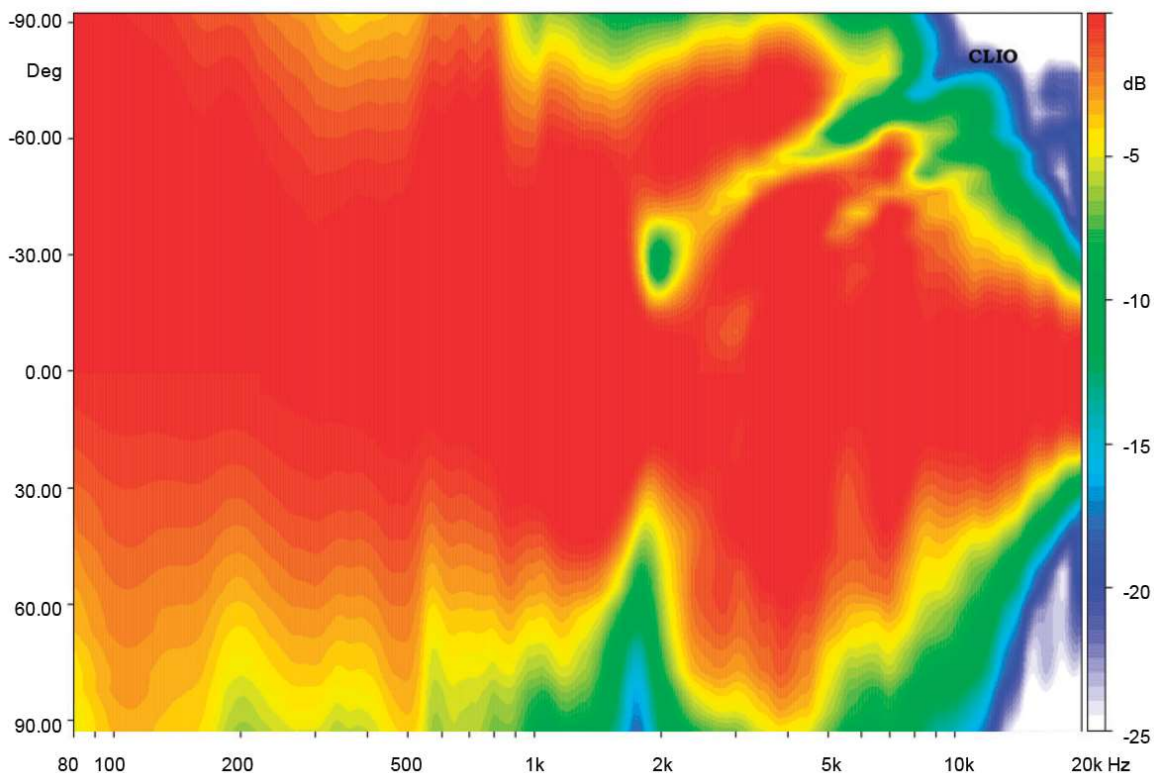
6.3.1 KRK VXT8

Jedná se o dvoupásmový aktivní studiový reproduktor. Basový měnič má průměr 200 mm a výškový 25 mm. Jedná se o tzv. bi-amp konstrukci, kdy každý reproduktor je buzen vlastním zesilovačem o výkonu 100 W pro basový měnič a 80 W pro výškový měnič. Zesilovače pracují ve třídě AB. Frekvenční rozsah reproduktoru je 37 Hz až 22 kHz (± 3 dB). Maximální hladina akustického tlaku (SPL), který je reproduktor schopný vyzařovat je 114 dB. Reproduktor je 433 mm vysoký, 318 mm široký a 296 mm hluboký s hmotností 16,5 kg. [26] Reproduktor je zobrazen na Obr. 21. Na Obr. 18 je zobrazena horizontální směrová charakteristika reproduktoru. Je zde vidět, že zvukové vlny vyzařuje osově symetricky. Až na nejvyšší frekvence nad 10 kHz je úhel vyzařování (pokles -6 dB) téměř $\pm 30^\circ$.



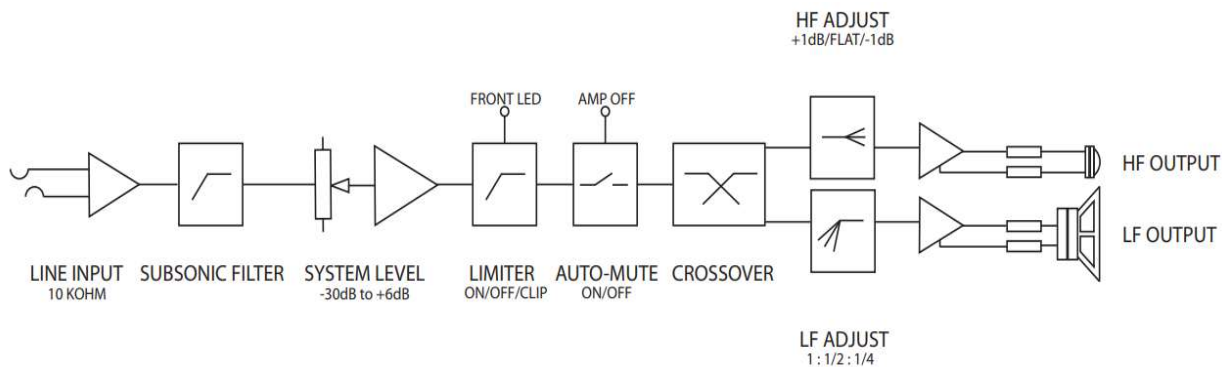
Obr. 18: Horizontální směrová charakteristika reproduktoru KRK VXT8. Převzato z [41].

Na Obr. 19 je zobrazena vertikální směrová charakteristika reproduktoru. Na rozdíl oproti předchozímu obrázku se zde zvukové vlny vyzařují osově nesymetricky. To znamená, že vertikální úhel, ve kterém jde reproduktor použít je mnohem menší než v horizontálním směru. Je zde vidět, že v okolí dělicí frekvence (2 kHz) dochází díky vzájemnému ovlivňování měničů k výraznému snížení vyzařovacího úhlu. Proto je velmi důležité umístit reproduktory jejich akustickým středem do výšky uší posluchače.



Obr. 19: Vertikální směrová charakteristika reproduktoru KRK VXT8. Převzato z [41].

Na Obr. 20 je ukázáno blokové schéma reproduktoru KRK VXT8. Lze si všimnout, že kromě nastavení hlasitosti má reproduktor několik možností nastavení dolní a horní propusti pro úpravu frekvenční charakteristiky



Obr. 20: Blokové schéma reproduktoru KRK VXT8. Převzato z [41]

6.3.2 KRK V12 S

Tento reproduktor je určený pro reprodukci velmi nízkých frekvencí, proto je také označován termínem subwoofer. Má jeden měnič o průměru 305 mm a jeho frekvenční rozsah je od 29 Hz až do 130 Hz. Citlivost vstupu lze stejně jako u širokopásmových reproduktorů VXT8 nastavit od -30 dB až po +6 dB. Reproduktor má také zabudované nastavení mezní frekvence dolní propusti, která lze nastavit od 50 Hz po 130 Hz. Díky tomu

lze jednoduše nastavit frekvenční pásmo, které bude přehrávat subwoofer a které širokopásmové reproduktory. Mimo jiné je zde také možnost přepnout fázi mezi 0° a 180°. Jeho maximální průměrná hladina akustického tlaku (SPL) je 114 dB. Váží 33 kg a je vysoký 381 mm, široký 559 mm a hluboký 508 mm. Reprodaktor je zobrazený na Obr. 22.



Obr. 21: Reprodaktor KRK VXT8. Převzato z [27]

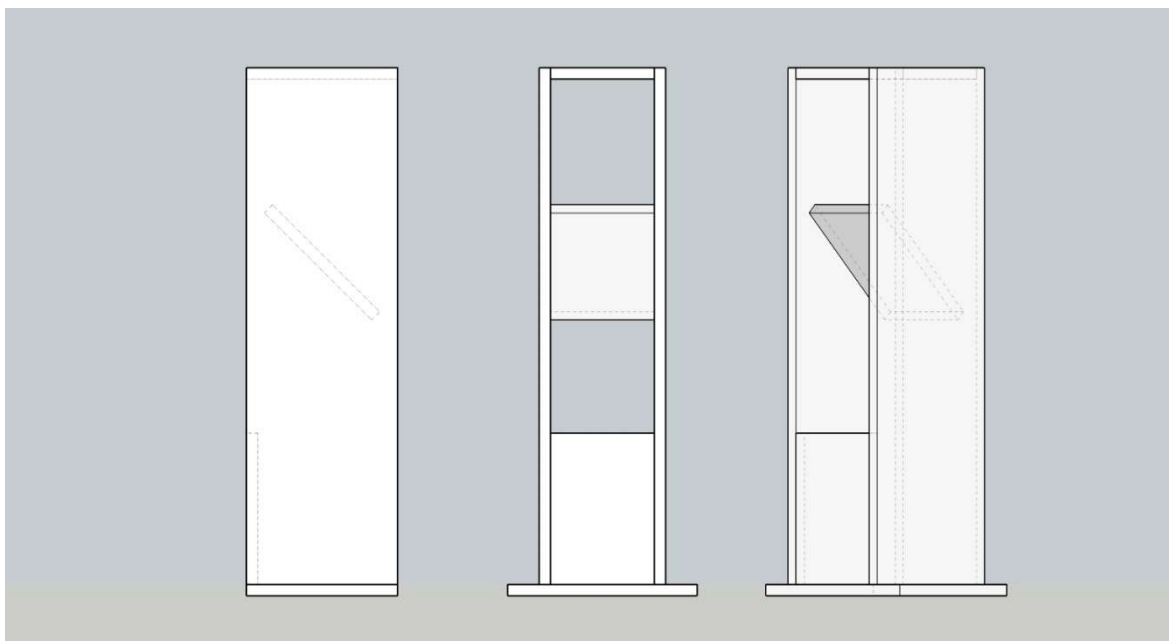


Obr. 22: Reprodaktor KRK V12 S. Převzato z [44]

6.4 Návrh reproduktorového stojanu

Jak již bylo zmíněno v teoretickém úvodu a potvrzeno směrovou charakteristikou vybraného reproduktoru, reproduktor musí být umístěn ve správné výšce. Levné dostupné stojany na trhu nemají dostatečnou tuhost nebo správnou výšku. Protože je pro zamýšlený audiosystém potřeba celkem 5 stojanů pod reproduktory, bylo rozhodnuto pro vlastní návrh a konstrukci. Výška stojanu byla zvolena tak, aby se akustický střed reproduktoru nacházel ve výšce uší sedícího posluchače (1,2 m). Mezi reproduktorem a stojanem byl ponechán

prostor pro antivibrační vrstvu. Ta zamezí přenosu vibrací, a díky tomu se podlaha a stěny nebudou stávat dalším zdrojem zvuku. Na Obr. 23 je zobrazena konstrukce stojanu ve 2D. Stojan bude vyroben z překližky o tloušťce 25 mm. Na Obr. 24 je vidět zhotovený stojan.



Obr. 23: Model stojanu



Obr. 24: Reprodukory KRK VXT8 na vyrobených stojanech

7 Měření reproduktorů v bezodrazové komoře

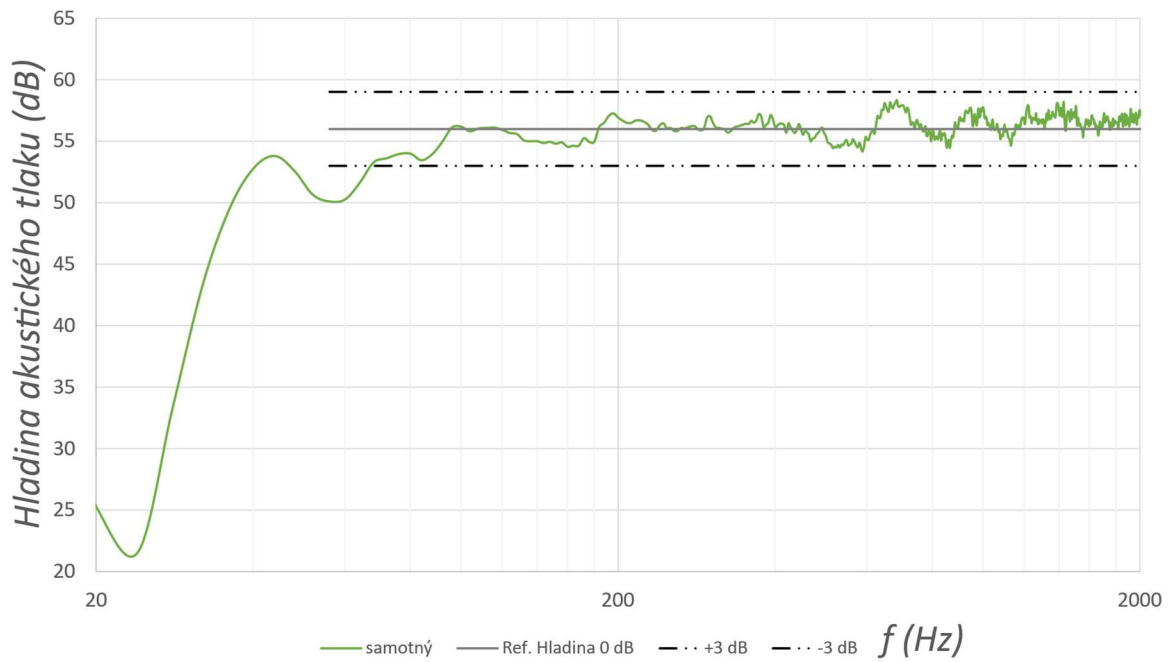
Pro ověření frekvenční amplitudové charakteristiky byly použité reproduktory KRK VXT8 a subwoofer KRK V12S změřeny v bezodrazové komoře. Frekvenční charakteristika reproduktoru KRK VXT8 v ose poslechu již byla měřena v diplomové práci M. Landgráfa, který řešil návrh akustického obkladu na přední stěnu místnosti, aby bylo zabráněno výše popsanému efektu SBIR. Měření proběhlo v bezodrazové komoře v konfiguraci, která je vidět na Obr. 25. Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 2,2 m od MDF desky, která v tomto experimentu zastávala roli odrazivé stěny používaného v místnosti EK708. Reproductor byl postupně posouván směrem k mikrofonu a v každém bodě byl proveden náměr. Kromě toho byla změřena i frekvenční amplitudová charakteristika samotného reproduktoru bez odrazivé desky. [28]



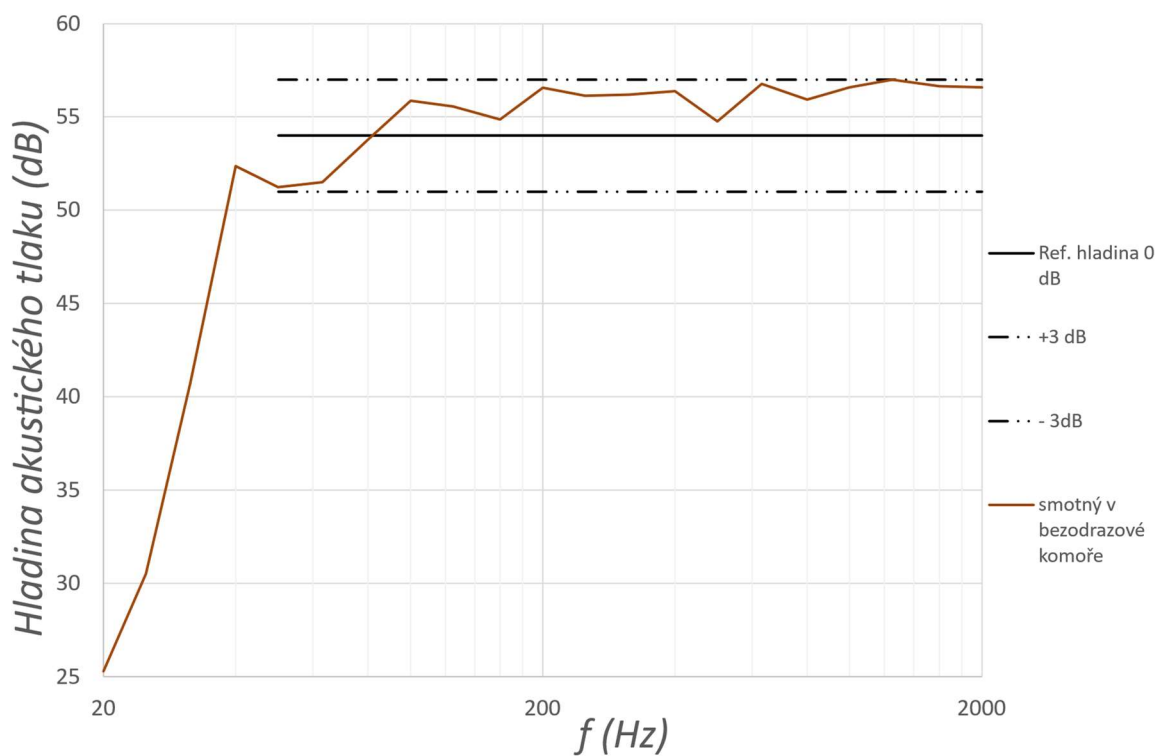
Obr. 25: Měření vlivu odrazivé plochy za reproduktorem v bezodrazové komoře. Převzato z [28]

Na grafu na Obr. 26 je uvedena naměřená frekvenční amplitudová charakteristika samotného reproduktoru a toleranční meze dané normou EBU Tech. 3276. Měření bylo vyhodnoceno FFT analýzou s rozlišením 4 Hz. Světle zelená křivka je měření bez MDF desky a ukazuje hladinu akustického tlaku samotného reproduktoru. Přestože naměřené hodnoty jsou uvedeny s vyšším rozlišením než požadovaná 1/3oktávy, naměřená křivka splňuje požadované toleranční meze v pásmu od 70 Hz výše. Vyhodnocení měření

v 1/3oktávy je uvedeno na dalším grafu na Obr. 27. Zde je vidět, že křivka tentokrát splňuje požadované meze již od dolní limitu 50 Hz. [28]

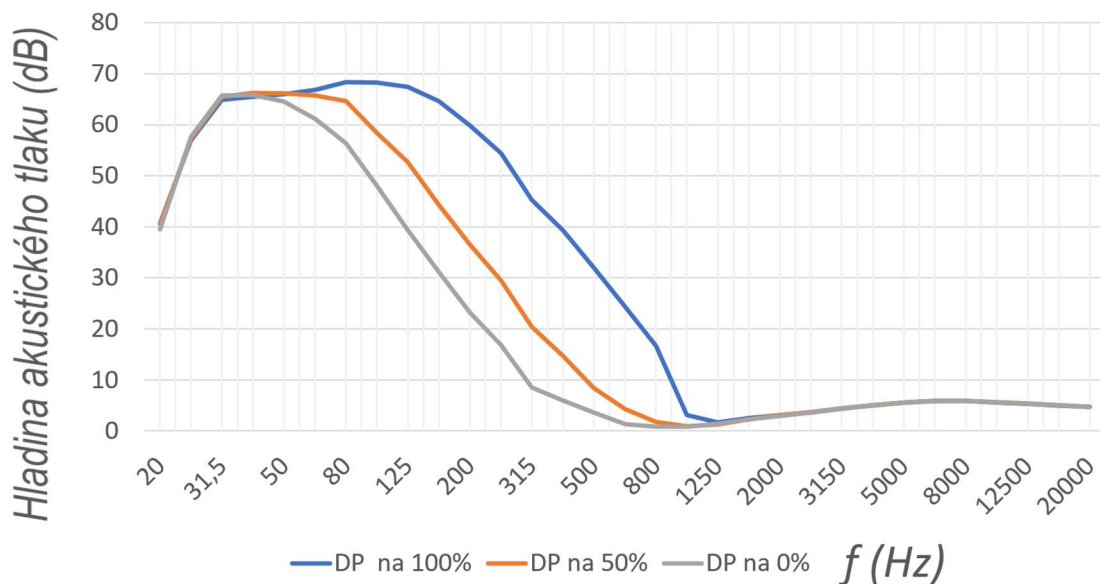


Obr. 26: Frekvenční amplitudová charakteristika KRK VXT8, měření v bezodrazové komoře, FFT.



Obr. 27 Frekvenční amplitudová charakteristika KRK VXT8, měření v bezodrazové komoře, CPB.

Pro potřeby této práce byl v bezodrazové komoře změřen také subwoofer KRK V12S. V amplitudové frekvenční charakteristice v 1/3oktávovém pásmu (CPB) (Obr. 28) lze sledovat výsledné hladiny akustického tlaku pro tři měření. Modrá křivka znázorňuje hodnoty pro plný frekvenční rozsah reproduktoru. To znamená, že filtr dolní propustí (DP) byl přepnut na 100 % (tedy 130 Hz). Je zde vidět, že reproduktor má vyrovnanou frekvenční odezvu od zhruba 29 Hz až do požadovaných 130 Hz. Pro případ, kdy filtr byl přepnut na 50 %, byla naměřena data znázorňující oranžovou křivku a frekvenční odezva reproduktoru začínala na 29 Hz a měla dostatečnou hlasitost až do 80 Hz. Pro poslední měření byl filtr přepnut na 0 % (tedy 50 Hz). Na grafu to představuje šedivá křivka. Zde měl reproduktor frekvenční odezvu opět od 29 Hz až do 50 Hz. Toto měření potvrzuje manuál od výrobce, který uvádí frekvenční odezvu subwooferu od 29 Hz až do 130 Hz dle nastavení filtru. [40]



Obr. 28: Frekvenční amplitudová charakteristika subwooferu v CPB

8 Měření a výsledky v místnosti EK708

V rámci diplomové práce M. Landgráfa [28] bylo provedeno i měření frekvenční amplitudové charakteristiky zmíněných reproduktorů přímo v řešené místnosti EK708. Měření mělo prokázat potlačení efektu SBIR pomocí realizovaného nízkofrekvenčního rezonátoru. Měření potvrzuje, že návrh i konstrukce nízkofrekvenčního rezonátoru na přední stěně byly provedeny správně, protože při umístění reproduktoru v uvažované vzdálenosti od rezonátoru (vzdálenost čelní stěna reproduktoru – čelní stěna rezonátoru) nedochází k propadu na frekvenci 152 Hz, která by odpovídala právě efektu SBIR.

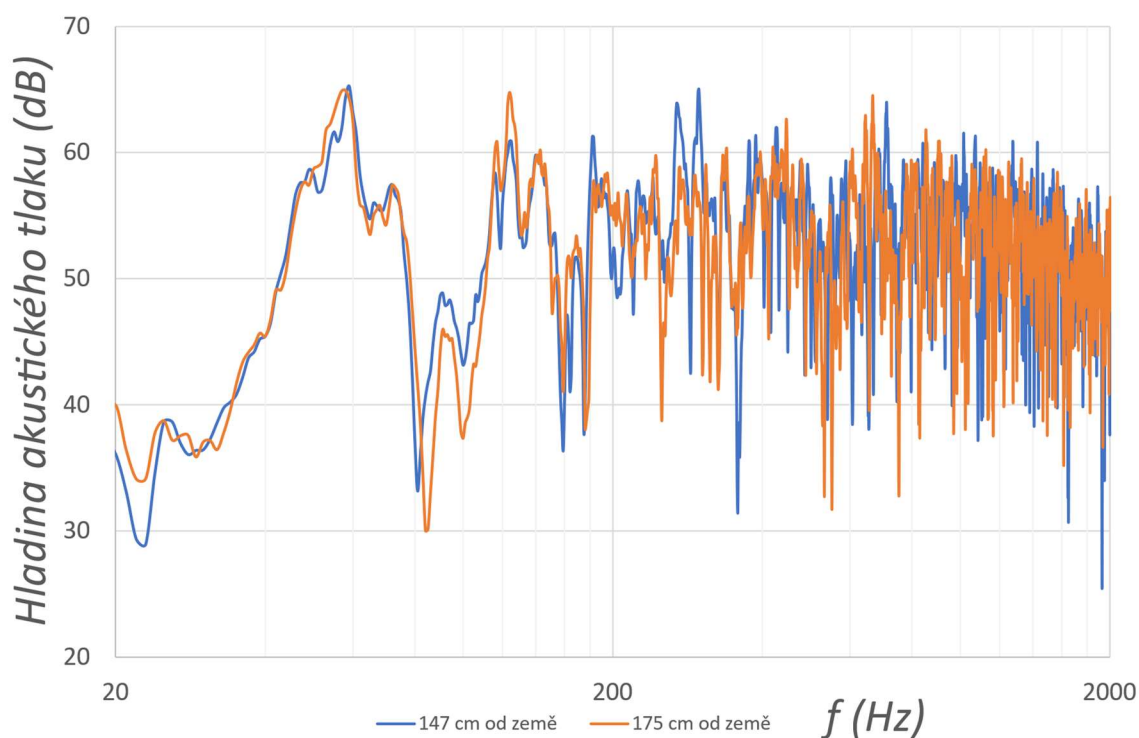
Kromě tohoto rezonátoru nejsou zatím realizovány další akustické obklady, takže prostor je víceméně odrazivý, což má za následek výrazné propady v jiných frekvenčních pásmech. Přestože se počítá s instalací dalších akustických obkladů, nelze předpokládat, že by došlo k úplnému zamezení nežádoucích odrazů na nízkých frekvencích. Místnost má na jedné straně okna, tudíž není možné zde jednoduše umístit robustnější nízkofrekvenčně pohltivé prvky. Zároveň má být tato místnost nadále využívána jako učebna, takže všechny úpravy musí být kompromisem mezi co nejlepšími poslechovými podmínkami a další využitelností prostoru. Pro nalezení ideální pozice reproduktorů vůči poslechovému místu byla provedena série měření s reproduktory v různých pozicích. Na základě těchto měření bylo vybráno umístění, při kterém bylo dosaženo nejvyrovnanějšího průběhu frekvenční amplitudové charakteristiky v místě poslechu (kap. 6.2).

8.1 Vliv pozice předního středního reproduktoru

Při umístění středního reproduktoru v polovině šířky místnosti, lze kvůli uzlům a kmitnám stojatého vlnění, které se v tomto prostoru pravděpodobně nacházejí, očekávat propad v určité oblasti nízkých frekvencí. Mikrofon byl umístěn v poslechovém místě ve výšce 1,2 m. Reprodukter KRK VXT8 byl umístěn v pozici centrálního reproduktoru, jak je zobrazeno na Obr. 9 (reproduktor č. 3), a byl v tomto případě umístěn na běžný reproduktorový stojan. Výška od země ke středu výškového měniče byla 1,47 m, a pro druhé měření byl stojan zvednut tak, aby vzdálenost od země k výškovému měniči byla 1,74 m, což zhruba odpovídá vzdálenosti 1,47 m od stropu. Tyto frekvenční amplitudové charakteristiky byly zaznamenány při buzení bílým šumem. U obou měření se reproduktor posouval směrem od rezonátoru k měřicímu mikrofonu. Začínalo se na vzdálenosti 68 cm od rezonátoru a po každém posunu o 20 cm byla zaznamenána nová křivka až do vzdálenosti

128 cm od rezonátoru. Výsledné frekvenční amplitudové charakteristiky pro vzdálenost 68 cm a 88 cm lze vidět v grafech na Obr. 29 a Obr. 30. Další vzdálenosti zde nejsou uvedeny, protože reproduktory reálně v těchto pozicích nebudou používány.

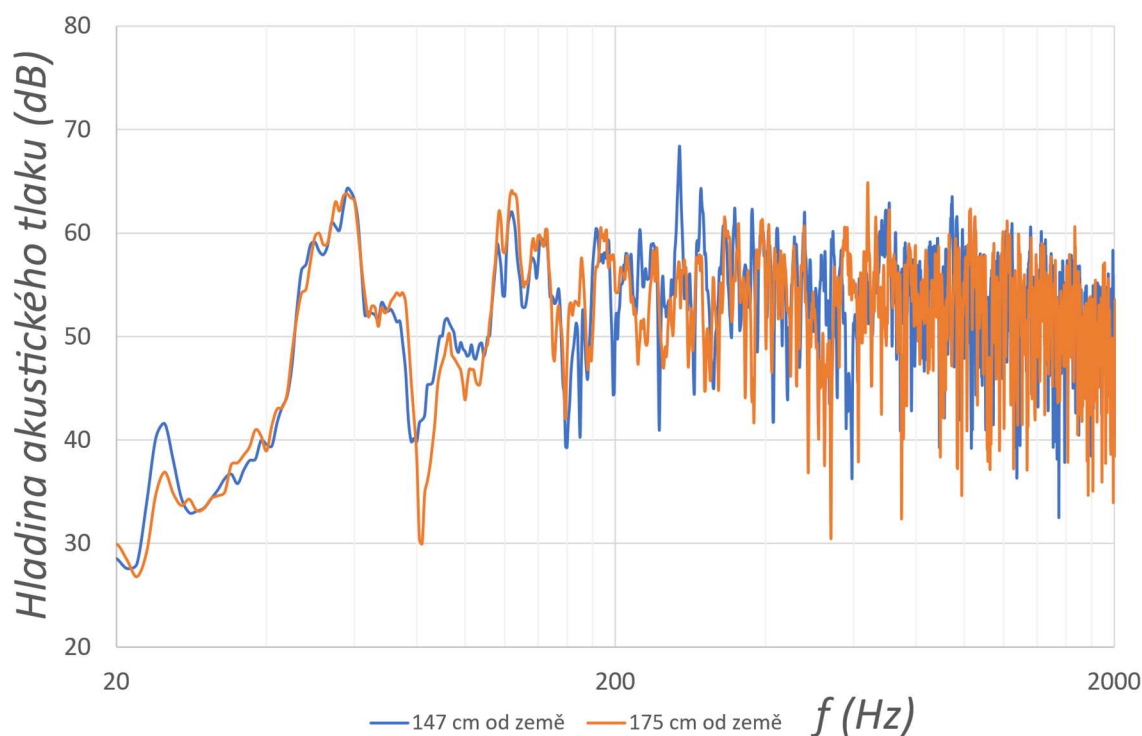
Lze pozorovat frekvenční rozsah zdroje zvuku pro obě měření od zhruba 40 Hz, což potvrzuje i manuál od výrobce, který udává frekvenční rozsah od 37 Hz [26]. Dále je zde viditelný významný pokles hladin akustického tlaku pro obě měření, konkrétně na frekvenci 81 Hz pro modrou křivku o 15 dB a na frekvenci 85 Hz pro oranžovou křivku o 18 dB. Čím výše je tedy reproduktor umístěn, tím je propad výraznější a frekvence se posouvá výše.



Obr. 29: Frekvenční amplitudová charakteristika předního středového reproduktoru pro vzdálenost 68 cm od rezonátoru.

Druhý graf zobrazuje stejnou frekvenční amplitudovou charakteristiku, ale pro zdroj zvuku posunutý na vzdálenost 88 cm od rezonátoru. Na tomto grafu lze pozorovat významně větší rozdíl hladin akustického tlaku na frekvenci 80 Hz a 82 Hz a to o 9 dB. Při porovnání obou grafů je tedy patrné, že tento pokles akustického tlaku se při vyšší výšce reproduktoru a vzdálenosti od rezonátoru zvětšuje. Reprodukter bude reálně umístěn ve výšce 1,2 m a co nejbližše rezonátoru, proto by měl být tento jev ve finálním rozestavení co nejvíce potlačen. Projekční plátno nyní začíná ve výšce 1,1 m. Pokud by měl být střední reproduktor umístěn tak, aby nebránil pohledu na něj, bylo by nutné ho otočit o 90° a umístit do výšky maximálně

0,95 m. Zároveň by tento problém měla částečně vyřešit i instalace zamýšleného stropního obkladu, který zvýší pohltivost stropu na nízkých frekvencích a tím omezí vznikající odrazy.

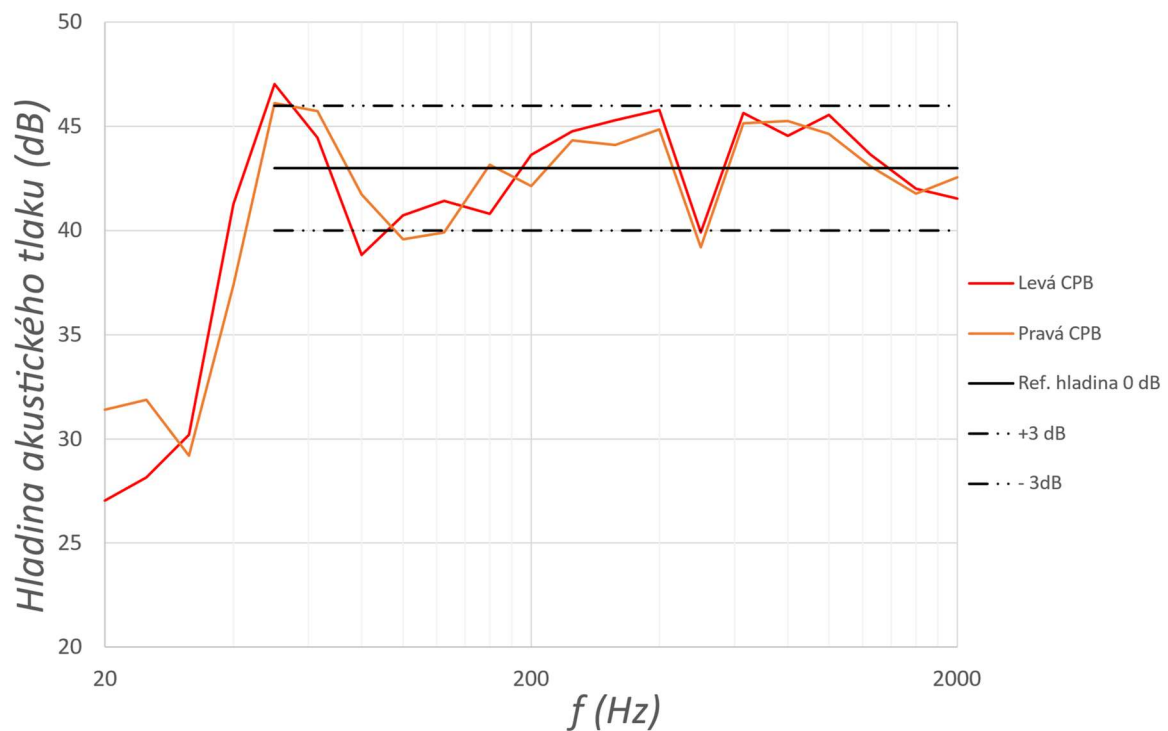


Obr. 30: Frekvenční amplitudová charakteristika předního středového reproduktoru pro vzdálenost 88 cm od rezonátoru.

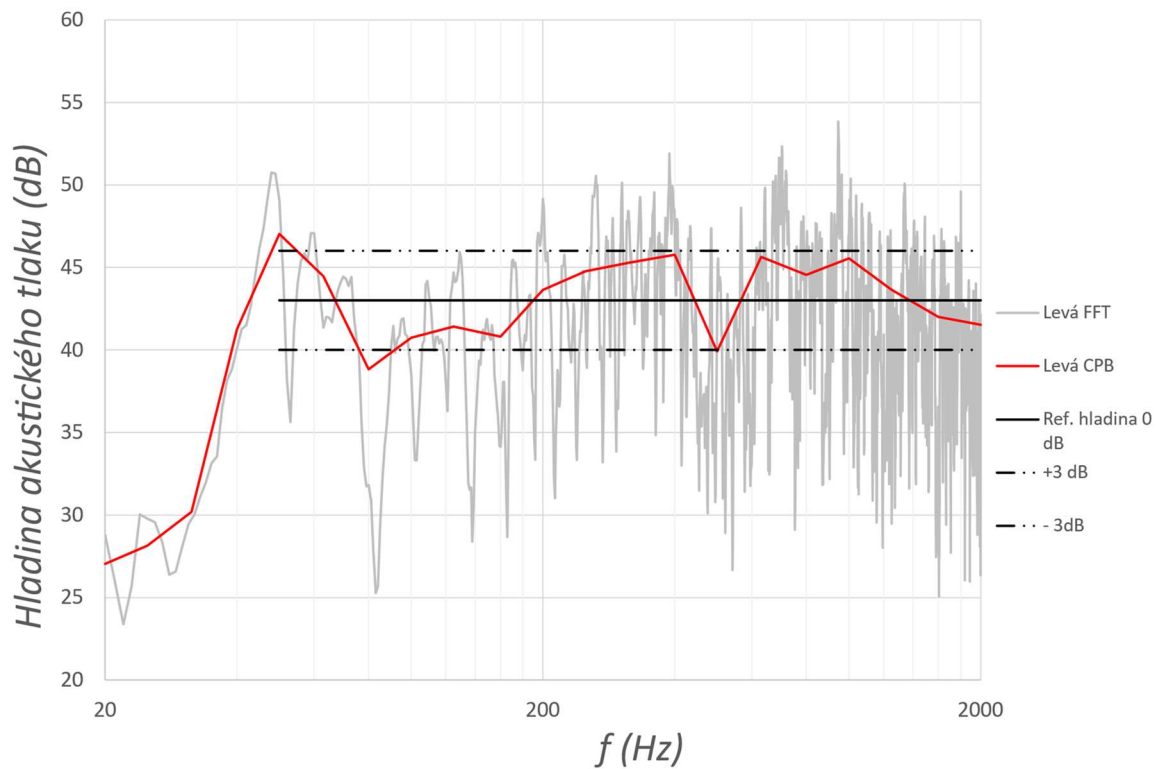
8.2 Měření předního levého a pravého reproduktoru

Přední levý a pravý reproduktor byly umístěny podle návrhu na Obr. 15 a následně byly pro každý samostatně naměřeny frekvenční amplitudové charakteristiky v poslechovém místě. Na grafech Obr. 32 a Obr. 33 jsou vidět výsledky těchto měření. Na Obr. 31 je zobrazena frekvenční amplitudová charakteristika předního levého a předního pravého reproduktoru pro 1/3oktávovou analýzu (CPB). Také jsou zde čerchovanými černými čarami znázorněny toleranční meze podle [17]. Lze si všimnout, že na frekvenci 50 Hz přední levý reproduktor překročuje povolenou hranici o 4 dB, ale pravý reproduktor pouze o několik desetin dB. Tento nárůst by mělo být možné částečně korigovat nastavením přepínače „LF Level Adjust“ přímo na reproduktoru, který omezuje hlasitost právě na nejnižších frekvencích. Pak následuje pokles s minimem v pásmu 80 až 100 Hz, který je nejspíše, stejně jako u středového reproduktoru, způsoben odrazivou podlahou a stropem. Levý reproduktor překračuje dolní mez o 2 dB a pravý o necelý 1 dB. Další výraznější pokles a nesplnění toleranční meze nastává pro oba reproduktory na frekvenci 500 Hz, a to opět o necelý 1 dB. Lze předpokládat, že tento problém může být způsoben velmi malou zvukovou

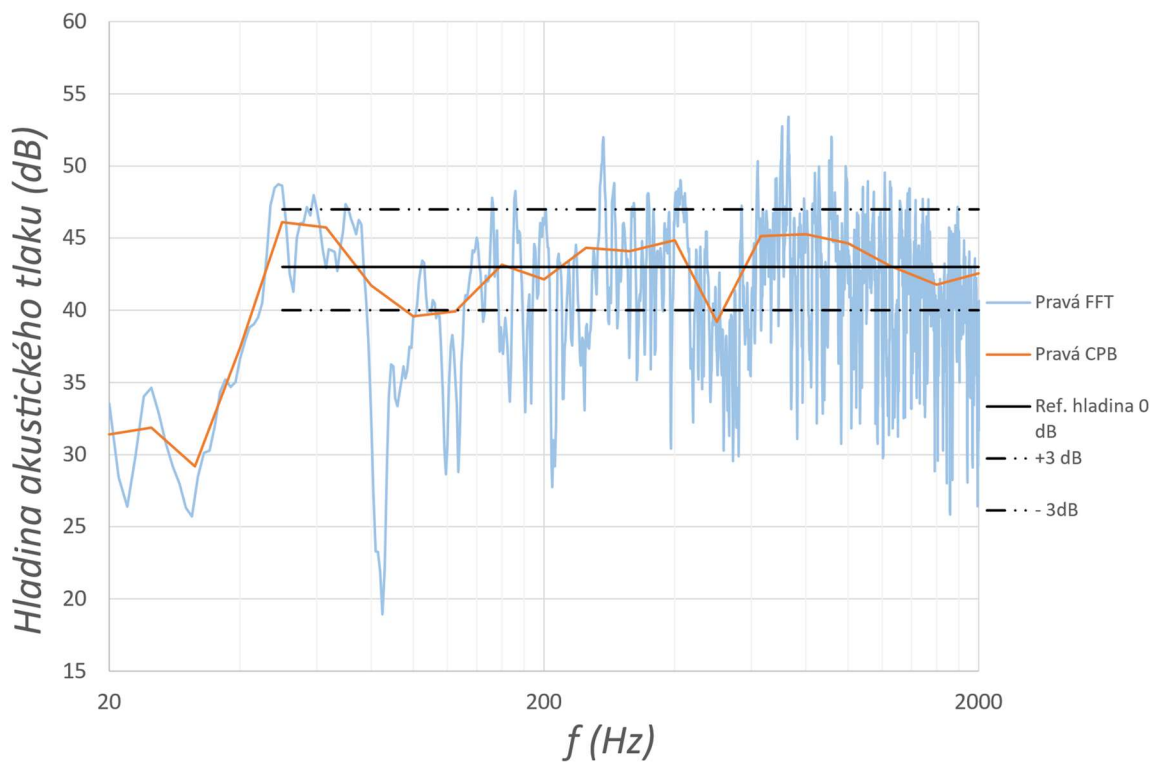
pohltivostí bočních stěn místnosti (vlevo holá stěna, vpravo okno) a bude vyřešen instalací zamýšlených akustických závěsů. Na Obr. 32 a Obr. 33 jsou výsledky stejného měření, ale uvedené v FFT analýze s rozlišením 1 Hz. Na Obr. 32 jsou zobrazené data pro přední levý reproduktor a na Obr. 33 data pro přední pravý reproduktor. Z obou těchto grafů lze vidět velký pokles v okolí frekvence 83 Hz, který není v 1/3oktávové analýze tak patrný. Tento pokles je u předního pravého reproduktoru o 6 dB větší než pro levý přední. Větší pokles u předního pravého reproduktoru je pravděpodobně způsoben okny, která pokrývají celou pravou stranu místnosti.



Obr. 31: Frekvenční amplitudová charakteristika předního levého a pravého reproduktoru pro 1/3 oktávovou analýzu.



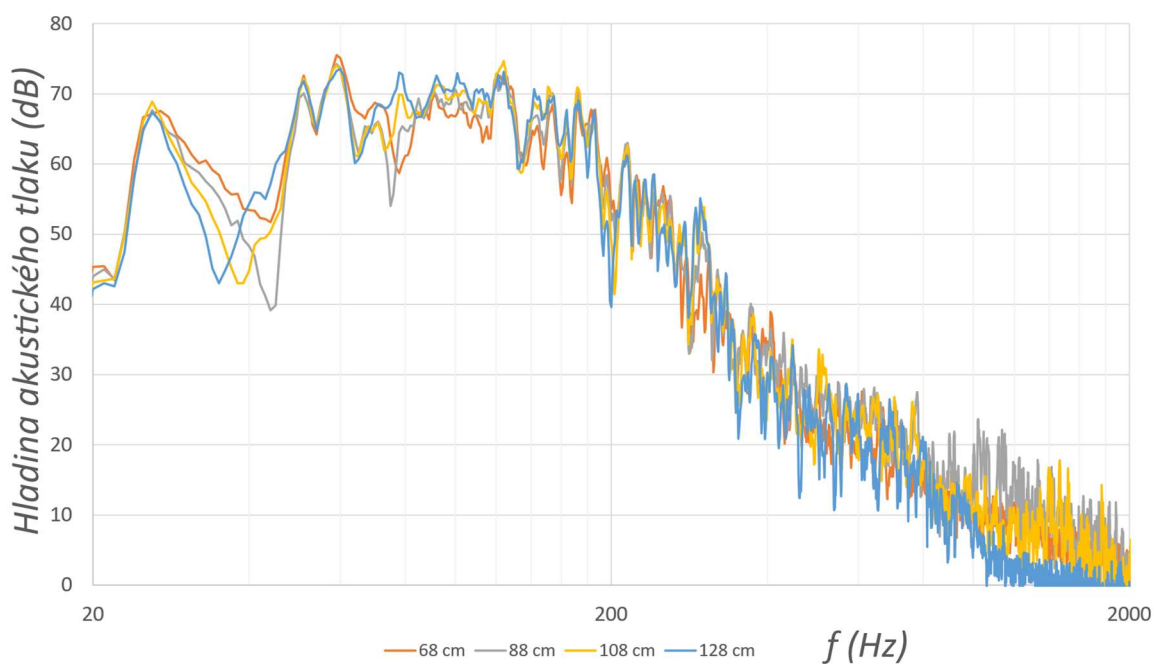
Obr. 32: Frekvenční amplitudová charakteristika předního levého reproduktoru, spektrum uvedeno v FFT a CPB.



Obr. 33: Frekvenční amplitudová charakteristika předního pravého reproduktoru, spektrum uvedeno v FFT a CPB.

8.3 Měření subwooferu

Subwoofer byl umístěn vedle předního středového reproduktoru na podlahu, a podobně jako v kapitole 11.1, byl posouván po 20 cm postupně blíže k mikrofonu. Ze začátku měření byla jeho přední strana ve vzdálenosti 68 cm od rezonátoru a provedena bylo celkem 4 měření až do vzdálenosti 128 cm. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny v grafu na Obr. 34, kde jsou patrné 4 křivky hladin akustického tlaku pro různé vzdálenosti subwooferu od rezonátoru. Oranžová křivka, která odpovídá měření, kdy je subwoofer umístěn co nejbliže k rezonátoru, dosahuje nejlepších výsledků. Pokles okolo 40 Hz je zde nejmenší ze všech 4 naměřených úrovní akustického tlaku, a to na úrovni 15 dB. Pravděpodobně je způsoben umístěním subwooferu blízko středu šířky místnosti. Pro další pozice měření je tento pokles větší, což naznačuje, že subwoofer by měl být umístěn co nejbliže k rezonátoru. Právě na těchto frekvencích subwoofer slouží jako jediný základní reproduktor celého audio systému. Frekvence od 40 Hz výše již přebírají reproduktory KRK VXT8.

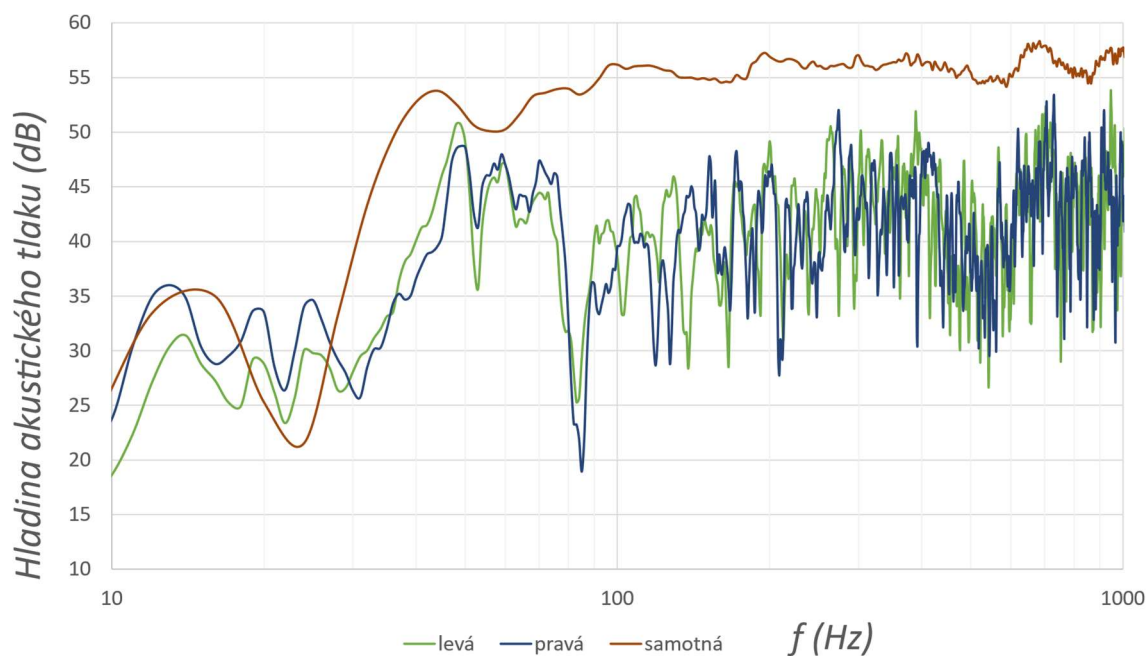


Obr. 34 Frekvenční amplitudová charakteristika měřeného subwooferu.

8.4 Porovnání elektroakustických parametrů reprosoustav v bezdrazové komoře a v místnosti EK708

Na Obr. 35 jsou zobrazeny tři křivky: hnědá křivka představuje měření reproduktoru KRK VXT8 v bezdrazové komoře, zatímco zelená a modrá křivka znázorňují výsledky

měření předního levého a pravého reproduktoru v místnosti EK708. Pozorujeme, že v měřeních v bezodrazové komoře není téměř žádný pokles úrovně akustického tlaku a frekvenční charakteristika je celkově hladší. Ve všech měřeních provedených v místnosti EK708 s reproduktorem ve výšce 1,2 m je viditelný pokles ve frekvenčním pásmu kolem 80 Hz. Ten je nejspíše způsoben stojatým vlněním vzniklým mezi stropem a podlahou (efekt podlahy, popsáný v kapitole 2). Na strop by v budoucnu měly být nainstalovány akustické kazety s možností naladění rezonanční frekvence od 50 do 100 Hz. Pokud by se instalací kazet nepodařilo tento efekt eliminovat zcela, je zde ještě možnost ekvalizace budícího signálu. Rozdíl ve velikosti hladiny akustického tlaku mezi těmito dvěma měřeními je důsledkem jiného nastavení úrovně budícího signálu.



Obr. 35 Frekvenční amplitudová charakteristika reprosoustavy KRK VXT8 naměřené v bezodrazové komoře a v místnosti EK708.

8.5 Měření kompletního 5.1 audio systému

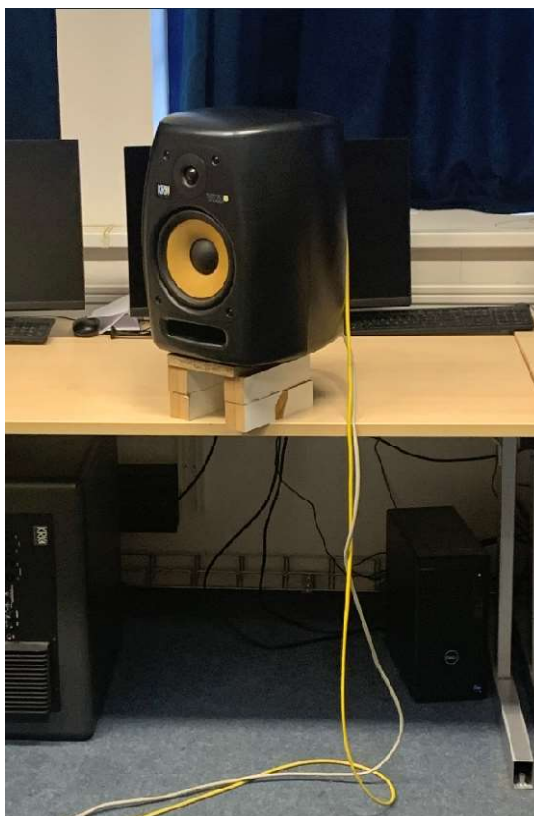
Dle požadavků specifikace [17] a [43] bylo provedeno měření frekvenční charakteristiky v místě poslechu a jeho blízkém okolí pro každý z reproduktorů 5.1 systému samostatně. Reprodukory byly umístěny na stojanech popsáných v kapitole 6.4 (viz. Obr. 36). Závěsy přes okna na pravé straně místnosti byly zataženy. Na levé straně byly pro zachování symetrie místnosti doplněny pohltivé akustické panely z 40 mm melaminové pěny v celkové ploše 5 m². Tyto panely jsou pohltivé hlavně na středních a vysokých frekvencích. Čtveřice měřicích mikrofónů GRAS 40PH byla umístěna ve výšce 1,2 m.

Kromě hlavního poslechového místa byly umístěny ještě 3 další mikrofony ve vzdálenosti 0,65 m v úhlech 90°, 137° a 210°.



Obr. 36 Ukázka z měření 5.1 systému

Pravý zadní reproduktor nebylo možné umístit na stojan jako ty ostatní z důvodu současného umístění pracovního stolu. Proto byl reproduktor umístěn na podložky přímo na stůl. V budoucnu je plánováno jiné rozestavní stolů tak, aby bylo možné všechny reproduktory umístit na stojany a v jejich těsné blízkosti se nenacházely další odrazivé plochy (viz. Obr. 37).

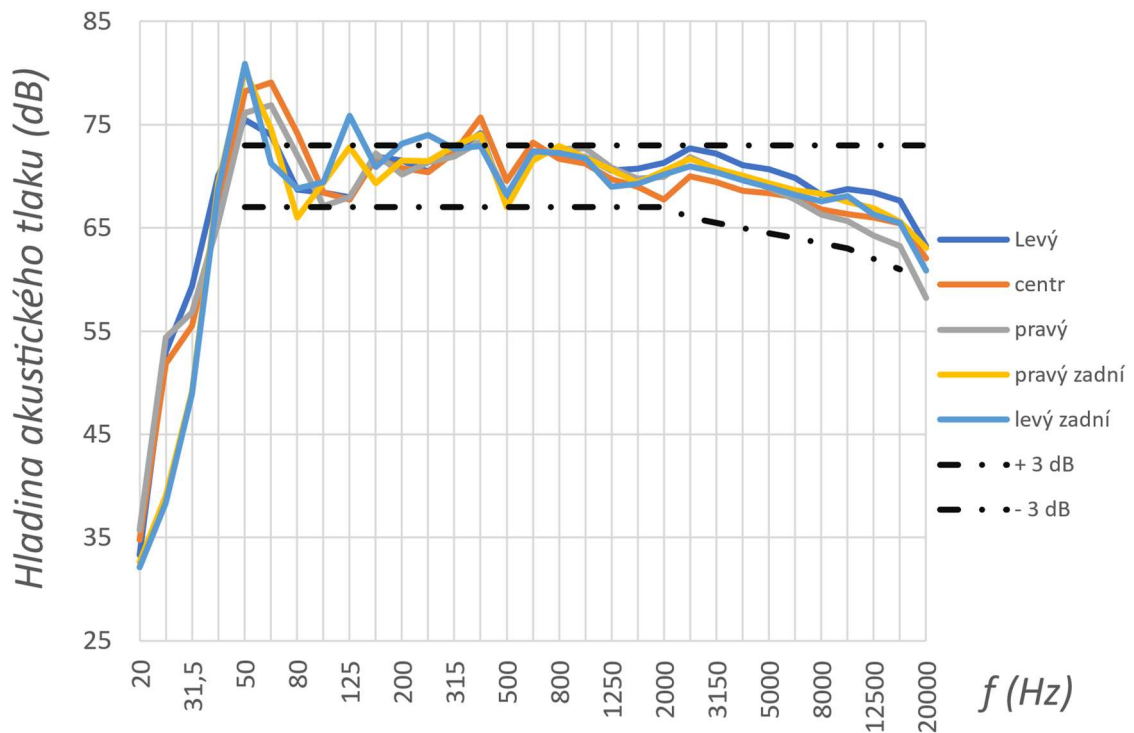


Obr. 37 Pravý zadní reproduktor umístěný na stole

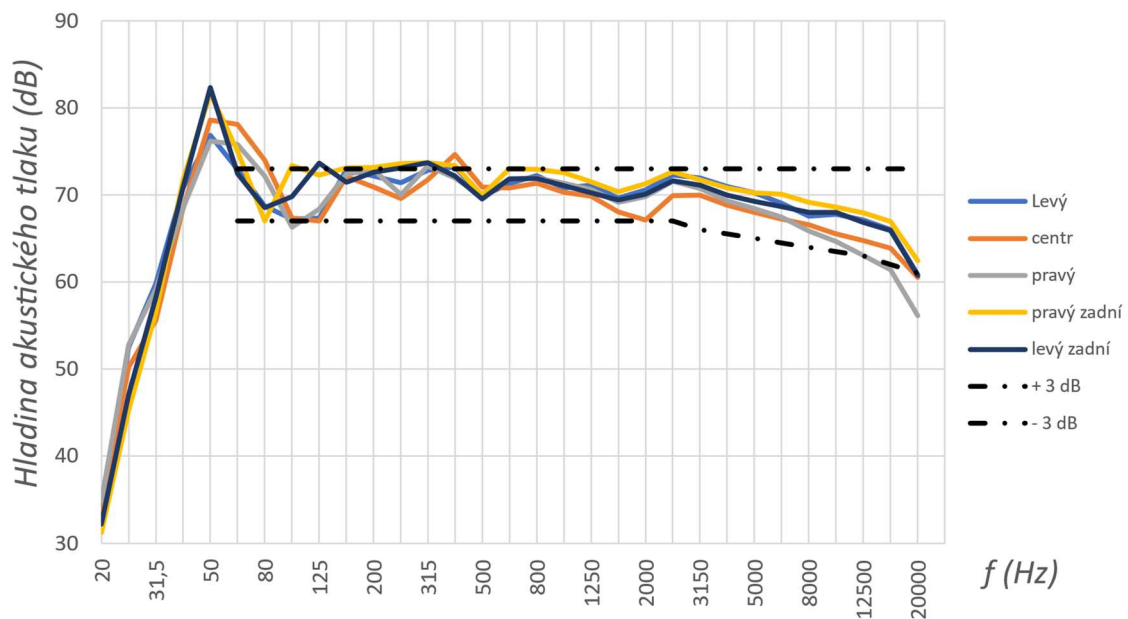
Reproduktory byly buzeny růžovým šumem a výsledky jsou uvedeny v 1/3oktávové analýze. Níže jsou uvedeny výsledky vždy pro hlavní poslechové místo samostatně a dále průměrné hodnoty ze všech 4 mikrofonů. Rozdíly mezi jednotlivými měřicími místy jsou až na výjimky v několika frekvenčních pásmech nižší než 4 dB. Lze tedy říci, že v blízkém okolí hlavního poslechového místa se vnímaný zvuk výrazně neliší.

Frekvenční charakteristiky naměřené v poslechovém místě z různých směrů (Obr. 38) (z jednotlivých reproduktorů) se nejvíce liší v pásmu 40 až 125 Hz, kdy maximální rozdíl je až 8 dB. Toto je pravděpodobně způsobeno nevyrovnaným akustickým polem na nízkých frekvencích. Po instalaci stropního obkladu a případných dalších akustických úprav by se rozdíl měl snížit. Pokud by k tomu nedošlo, je vhodné nejnižší frekvence vhodně ekvalizovat. V pásmu 160 Hz až 10 kHz jsou pak rozdíly nižší než 3 dB.

Největší odchylky od ideálně hladké křivky jsou opět v problematických pásmech 50 Hz, 80 – 125 Hz a 500 Hz. Přesto je kromě pásma 50 až 80 Hz toleranční maska víceméně splněna. Pro co nejlepší poslechové podmínky by přesto bylo vhodné se ještě pokusit výše popsané problémy vyřešit. Křivky průměrných hodnot získané ze všech měřicích míst jsou vlivem průměrování samozřejmě hladší a překročení tolerančních mezí není tak výrazné (Obr. 39).



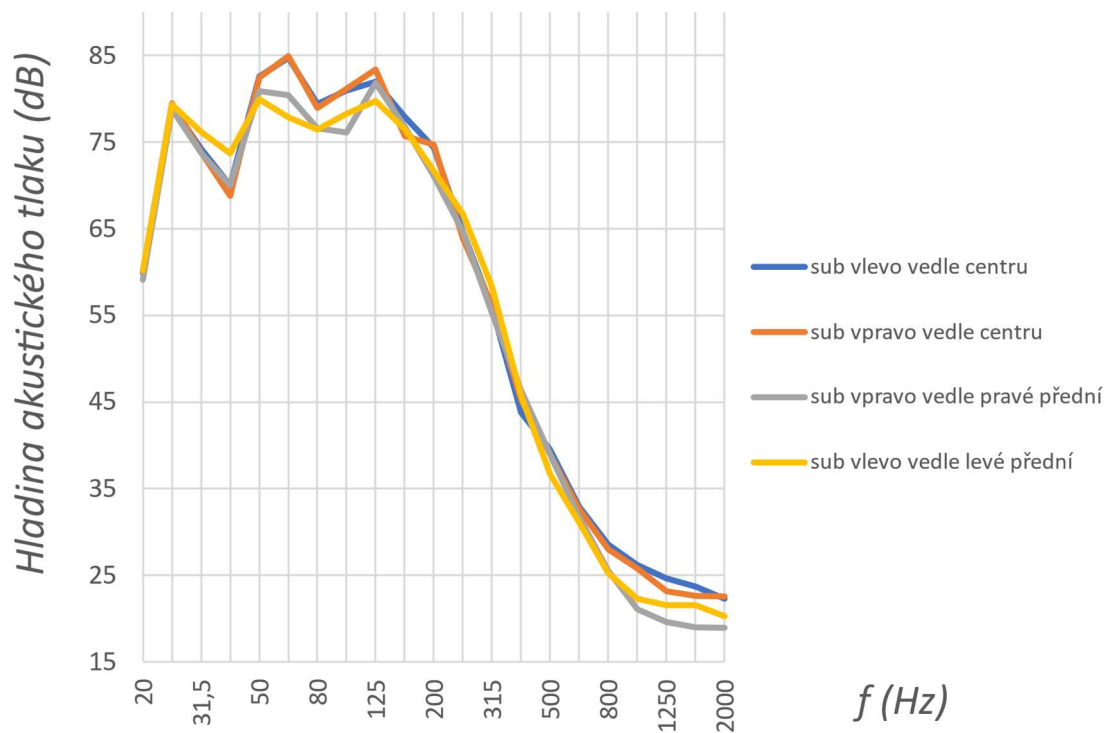
Obr. 38 Frekvenční amplitudová charakteristika pro rozmístění 5.1 a poslechové místo, spektrum uvedeno v CPB.



Obr. 39 Zprůměrovaná frekvenční amplitudová charakteristika pro rozmístění 5.1 a všech 4 měřících míst, spektrum uvedeno v CPB.

Pro subwoofer není dle specifikace dána přesná poloha, proto byl postupně umístěn do 4 pozic, které jsou volné vedle reproduktorových stojanů. Výsledky jsou uvedené v grafu na Obr. 40. Z grafu je patrné, že nejvýhodnější je umístění subwooferu nalevo od stojanu levého předního reproduktoru. Při buzení z této pozice je nejnižší propad na 40 Hz a zároveň

nedochází k takovému nárůstu v pásmech 63 až 125 Hz jako v jiných pozicích. Subwoofer bude pravděpodobně používán jen pro nejnižší frekvence od 29 do 60 Hz.

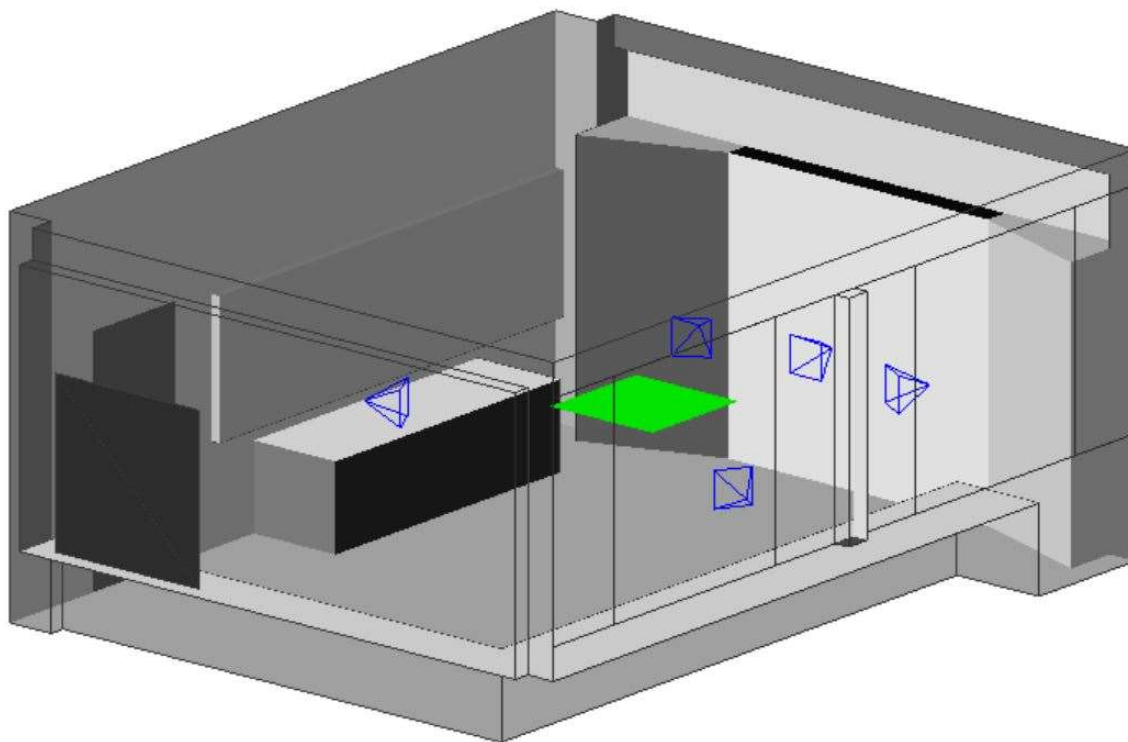


Obr. 40 Frekvenční amplitudová charakteristika pro subwoofer a poslechové místo, spektrum uvedeno v CPB.

9 Simulace a porovnání výsledků simulace s měřením

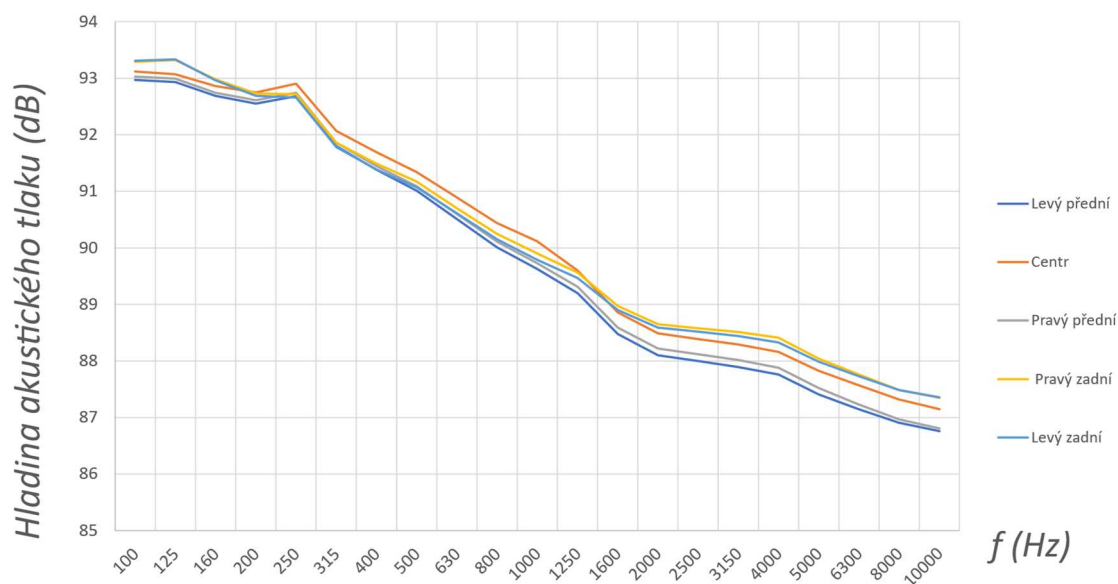
Stejná konfigurace umístění jednotlivých širokopásmových reproduktorů a měřících míst byla vytvořena v modelu pro simulaci v programu EASE (viz Obr. 41). Buzení pomocí subwooferu nebylo simulováno, protože frekvenční rozsah simulace je od 100 Hz do 10 kHz. Protože v databázi reproduktorů není dostupný model pro KRK VXT8, byl jako parametrově nejblíže vybrán reproduktor JBL LSR 6328P, který má také 200 mm basový měnič, 25 mm výškový reproduktor a velmi podobné elektroakustické parametry. Model samotné místnosti byl vygenerován z 3D modelu v programu SketchUp, jednotlivým plochám byly přiřazeny dílčí zvukové pohltivosti. Jako měřící plocha byl určen čtverec o rozměru 1x1 m, kdy středem této plochy je hlavní poslechové místo.

Pro simulaci byla zvolena funkce programu EASE 4 s názvem standardní mapování s odrazy (Standard Mapping with Reflections), která využívá kombinaci jak standardního mapování, tak i odrazy paprsků od jednotlivých ploch uzavřeného prostoru. Vypočítán byl parametr total SPL, což je akustický tlak počítaný na dané ploše. Parametry simulace byly nastaveny takto: Rozlišení = 0.1 m, hluk pozadí: 30 dB v každém 1/3oktávovém pásmu, počet paprsků pro každý reproduktor = 1000, řád odrazu = 3.



Obr. 41 Model simulace v programu EASE, modré jehly jsou reproduktory a zelený čtverec je měřící plocha

V grafu na Obr. 42 jsou uvedeny vypočítané křivky závislosti frekvenční amplitudové charakteristiky na ploše 1x1 m. Na rozdíl od reálného měření vychází v simulaci výrazný nárůst na nízkých frekvencích (maximální hodnota do 250 Hz až 93 dB), poté křivka postupně klesá až k hodnotě 88 dB na frekvenci 2 kHz. Podobně jako v reálném měření jsou rozdíly při buzení jednotlivými reproduktory velmi malé – do 1 dB. Nevyrovnanost frekvenční charakteristiky je pravděpodobně velmi ovlivněna parametry vytvořeného modelu místnosti. Nejen absolutní hodnota zvukové pohltivosti jednotlivých ploch, ale také jejich rozmístění v okolí reproduktorů může mít za následek tento rozdíl oproti reálnému měření. Přestože je model optimalizován tak, aby doba dozvuku v simulaci vycházela velmi podobně, rozdíly v simulovaných a naměřených frekvenčních amplitudových charakteristikách jsou velmi výrazné. Akustické parametry jednotlivých částí nábytku a dalšího vybavení jsou velmi těžko definovatelné, model byl také značně zjednodušen. Pokud bychom se chtěli podrobněji zabývat optimalizací simulace v programu EASE, bylo by vhodné použít reproduktor, který je součástí interní databáze a zároveň měření i simulaci provádět v prostoru, který má jednodušeji definovatelné činitele zvukové pohltivosti a neobsahuje takové množství dalšího vybavení.



Obr. 42 Vypočtená frekvenční amplitudová charakteristika simulovaného modelu

Zhodnocení a závěr

Tato diplomová práce se zabývala návrhem a realizací vícekanálového audio systému pro poslechovou místnost EK708 v budově FEL ZČU. V teoretické části byly popsány požadavky norem a specifikací, které určují optimální rozmístění a specifikaci reproduktorů pro systém 7.1.4. Byly také popsány akustické parametry, které jsou nezbytné pro dosažení kvalitní zvukové reprodukce.

Na základě těchto teoretických poznatků byl vytvořen 3D model místnosti pomocí programu SketchUp, který znázorňuje ideální pozice reproduktorů. Praktická část práce se zaměřila na měření frekvenčních amplitudových charakteristik studiových reproduktorů v poslechovém místě, což posloužilo jako základ pro výběr nejvhodnějšího umístění reproduktorů.

Byly navrženy a vyrobeny stojany pro reproduktory, které zajišťují ideální výšku vůči uším posluchače. Následně byla v místnosti rozmístěna konfigurace 5.1, skládající se z pěti reproduktorů s plným frekvenčním rozsahem a jednoho subwooferu, která bude základem pro pozdější konfiguraci 7.1.4. Bylo provedeno měření výsledného akustického tlaku v poslechovém místě a jeho blízkém okolí. Výsledky měření ukázaly, že místnost vykazuje výrazný pokles akustického tlaku kolem frekvence 80 Hz, což je způsobeno tzv. "floor" efektem. Tento efekt vzniká, když se zvukové vlny na této frekvenci vzájemně ruší kvůli odrazům od podlahy, což vede k výraznému snížení úrovně zvuku v dané frekvenční oblasti.

Je důležité, že až na menší nedokonalosti výsledky měření spadají do tolerančních mezí, což potvrzuje správnost teoretických předpokladů a také celého zrealizovaného řešení. Navíc byl model systému 5.1 simulován v programu EASE 4, aby se ověřila teoretická očekávání s praktickými výsledky, a simulace potvrdily správnost měření.

Přínosem této práce je potvrzení teoretických předpokladů a získání praktických zkušeností s návrhem a realizací audiosystémů v reálných podmínkách. Navržený systém, i přes určité omezení dané akustickými vlastnostmi místnosti, splňuje většinu požadavků a poskytuje kvalitní zvukovou reprodukci.

Další cíl práce by mohlo být rozšíření systému na plnou 7.1.4 konfiguraci a provedení příslušných měření a simulací, aby se ověřilo, že nový systém splňuje požadované standardy a poskytuje optimální zvukovou kvalitu.

Literatura

- [1] GANS, Dave. How to set up a 7.1 surround sound speaker system. Online. Klipsch. 2015. Dostupné také z: <https://www.klipsch.com/blog/how-to-set-up-a-7-1-system>.
- [2] Home Theater Speaker Guide. Online. Dolby. Dostupné také z: https://www.dolby.com/siteassets/about/support/guide/setup-guides/7.1-virtual-speakers-setup/7_1_virtual_speaker_setup.pdf.
- [3] ALESSI, Marco Sebastiano. *Speaker placement 101: Surround 5.1, 7.1, Dolby Atmos, and more*. Online. Higherhz. 2023. Dostupné také z: <https://higherhz.com/surround-sound-speaker-placement/>.
- [4] LOFFT, Alan. *Going to 7.1 – Channel Surround Sound*. Online. Audioholics. 2009. Dostupné také z: <https://www.audioholics.com/audio-technologies/7-1-surround-sound>.
- [5] *Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines*. Online. Dolby. 2018. Dostupné také z: https://www.dolby.com/siteassets/technologies/dolby-atmos/atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf?fbclid=IwAR2X9rVp_vRUals6i48tta850WzvyymFEeVwaVH12TGRHXRich-DkbdH0sIM.
- [6] BRANT, Paul. *Surround Sound Speaker Placement: 5.1, 7.1 & Dolby Atmos Setup*. Online. Home Cinema Guide. 2023. Dostupné také z: <https://www.the-home-cinema-guide.com/surround-sound-speaker-placement.html>.
- [7] PENDLEBURY, Ty. What does an AV receiver actually do? Online. Cnet. 2007. Dostupné také z: <https://www.cnet.com/tech/home-entertainment/what-does-an-av-receiver-actually-do/>.
- [8] Understanding AV receivers: Why do you need one? — Part 1. Online. Ooberpad. 2017. Dostupné také z: <https://www.ooberpad.com/blogs/audio-video-tips/understanding-av-receivers-why-do-you-need-one-part-1>.
- [9] Dolby Professional Reference Decoder DP580. Online. Dolby. 2018. Dostupné také z: https://www.hhb.co.uk/wp-content/uploads/dolby_dp580_user_guide_v2.5.0.0.pdf.
- [10] Dolby DP580 Professional Reference Decoder Manual. Online. Dolby. 2013. Dostupné také z: https://www.hhb.co.uk/wp-content/uploads/user_manual_20131108142533_58966.pdf.
- [11] Dolby Professional Reference Decoder DP580. Online. Dolby. 2018. Dostupné také z: <http://www.dmtpro.com.cn/uploadfile/2020/0316/20200316111908684.pdf>.

- [12] FOX, Arthur. Differences Between 2.5mm, 3.5mm And 6.35mm Headphone Jacks. Online. My new microphone. 2020. Dostupné také z: <https://mynewmicrophone.com/differences-between-2-5mm-3-5mm-6-35mm-headphone-jacks/>.
- [13] Listening conditions for the assessment of sound programme material. Online. Ebu. 2004. Dostupné také z: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276s1.pdf>.
- [14] An Inconvenient Truth About Room Acoustics (The Myth Of The Flat Frequency Response). Online. Acoustics Insider. Dostupné také z: <https://www.acousticsinsider.com/blog/flat-frequency-response?fbclid=IwAR1wWlztD1DAAtWqsZwwUEYrCD0nKxzV7E3L5qFGSFExJeiAAw uEsjAZ4k3M>.
- [15] FORTUNE, T. W. Real-ear polar patterns and aided directional sensitivity. Online. Pub Med. 1997. Dostupné také z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9101458/>.
- [16] Human Ear Polar Patterns. Online. Audio Science Review. 2020. Dostupné také z: <https://www.audiosciencereview.com/forum/index.php?threads/human-ear-polar-patterns.13099/>.
- [17] Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic EBU Tech 3276. Online. Ebu. 1998. Dostupné také z: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf>.
- [18] What is the best frequency response for speakers? Online. Hifi Centre. Dostupné také z: <https://hificentre.com/blogs/news/what-is-the-best-frequency-response-for-speakers-1>.
- [19] On the job in 2013. Online. Northward acoustics. 2013. Dostupné také z: <https://northwardacoustics.com/on-the-job/on-the-job-2013/>.
- [20] About recording mixing & mastering immersive audio residency home of the Bionix. Online. Sunny side. 2022. Dostupné také z: <https://sunnysideinc.be>.
- [21] My Room Acoustics LLC. Online. Facebook. Dostupné také z: <https://www.facebook.com/MyRoom.Acoustics/photos/a.596979000398283.1073741843.108419192587602/1490513924378115/?type=3&theater>.
- [22] Audio decoder. Online. Electricity Magnetism. 2024. Dostupné také z: <https://www.electricity-magnetism.org/audio-decoder/>.
- [23] RASHID, Dua. Audio Codecs Explained for Non-Audiophiles. Online. Audioholics. 2021. Dostupné také z: <https://www.audioholics.com/audio-technologies/codecs>.
- [24] BONGIORNO, Jeremy. What is an Audio Interface? Online. Audient. Dostupné také z: <https://audient.com/tutorial/what-is-an-audio-interface/>.

- [25] How Does an Audio Interface Work? Online. Sweetwater. 2023. Dostupné také z: <https://www.sweetwater.com/sweetcare/articles/how-does-an-audio-interface-work/#>.
- [26] KRK VXT series bi-amplified studio monitor. Online. Deepsonic. Dostupné také z: https://www.deepsonic.ch/deep/docs_manuals/krk_vxt_manual.pdf.
- [27] KRK VXT series bi-amplified studio monitor. Online. Fear Deal Music. Dostupné také z: <https://www.fairdealmusic.co.uk/products/krk-vxt-8-studio-monitor>.
- [28] LANDGRÁF, Martin. Akustické úpravy poslechové místnosti. Online, Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2023. Dostupné také z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/53368/1/Diplomova%20prace_Landgraf.pdf.
- [29] Fyziologie a vlastnosti sluchu. Online. Vovcr. Dostupné také z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/586/page36.html>.
- [30] Home Theater Speaker Guide. Online. Dolby. Dostupné také z: https://www.dolby.com/siteassets/about/support/guide/setup-guides/5.1-virtual-speakers-setup/5_1_virtual_speaker_setup.pdf.
- [31] 7.1.4 Overhead speaker setup. Online. Dolby. 2024. Dostupné také z: <https://www.dolby.com/about/support/guide/speaker-setup-guides/7.1.4-overhead-speaker-setup-guide>.
- [32] Speaker Placement and Reflections from Nearby Walls. Online. Arqen. Dostupné také z: <https://arqen.com/acoustics-101/speaker-placement-boundary-interference/>.
- [33] PONTEGGIA, Daniele. How to create EASE loudspeaker models using CLIO. Online. Audiomatica. Dostupné také z: https://www.audiomatica.com/wp/wp-content/uploads/polar_measurements_and_ease-1.pdf.
- [34] EASE® 4.4 User's Manual. Online. Afmg. Dostupné také z: https://www.afmg.eu/sites/default/files/2021-09/Ease44Help_0.pdf.
- [35] Test signals and metering to be used on international sound programme connections. Online. Itu. Dostupné také z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.645-2-199203-I!!PDF-E.pdf.
- [36] Alignment level in digital audio production equipment and in digital audio recorders. Online. Ebu. Dostupné také z: <https://tech.ebu.ch/docs/r/r068.pdf>.
- [37] Multichannel surround sound systems and operations AESTD10001. Online. Aes. Dostupné také z: <https://www.aes.org/technical/documents/AESTD1001.pdf>.
- [38] Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems. Online. Itu. 2015. Dostupné také z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-3-201502-I!!PDF-E.pdf.

- [39] JULIAN, Jake. Positioning Your Speakers. Online. Kali audio. Dostupné také z: https://www.kaliaudio.com/speaker-positioning-guide?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTEAAAR3GslieYKi9bWTb8UKcd_3F5AceJ0UAupQyS6AOuosAceQ9c2F287jpmmM_aem_ATQs4HjHuv2o7awMngBg60Umvz9nbE-950aoO9ldaKCP9ORbZsQybzxRVQM-z0XQVNX5UmNkqgafhRkYrAI_ZF3Q.
- [40] V Series Sub Manual. Online. Amazonaws. Dostupné také z: https://s3.amazonaws.com/gibson-pro-audio/krk/manuals/VSeries_Sub_Manual.pdf.
- [41] Multichannel surround sound systems and operations AESTD1001. Online. Aes. Dostupné také z: <https://www.aes.org/technical/documents/AESTD1001.pdf>.
- [42] Frekvenční analýza. Online. Ekosoftware. Dostupné také z: <https://www.ekosoftware.cz/frekvencni-analyza>.
- [43] Listening conditions for the assessment of sound programme material EBU Tech 3276-S. Online. Ebu. 2004. Dostupné také z: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276s1.pdf>.
- [44] KRK V 12-S. Online. Long and McQuade. 2004. Dostupné také z: https://www.long-mcquade.com/5490/Pro_Audio_Recording/Subwoofers/KRK/V12-S_-_Subwoofer.htm.
- [45] BALKOVSKÝ, Bronislav. Návrh akustických úprav poslechové místnosti. Plzeň: Dostupné z: <https://theses.cz/id/8n69op/>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [46] ALTMAN, Jan. Návrh akustických úprav poslechové místnosti. Diplomová práce. Plzeň: FEL ZČU Plzeň, 2010.

Seznam obrázků

Obr. 1: Toleranční pásmo pro dobu dozvuku poslechové místnosti. Převzato z [17].	3 -
Obr. 2: Toleranční maska hladiny akustického tlaku. Převzato z [17].	5 -
Obr. 3: Frekvenční odezva 20 Hz - 200 Hz měřená v poslechovém místě, Sunny Side Studios. Převzato z [19].	7 -
Obr. 4: Frekvenční odezva 20 Hz - 20 kHz, studio Deni Zajecar. Převzato z [21].	8 -
Obr. 5: Typické uspořádání pětikanálového poslechového systému. Převzato z [43].	10 -
Obr. 6: Směrová charakteristika pravého lidského ucha. Převzato z [29].	11 -
Obr. 7 Pohled na rozmístění reproduktorů v systému 5.1. Převzato z [30].	12 -
Obr. 8: Pohled na rozmístění reproduktorů v systému 7.1.4. Převzato z [31].	12 -
Obr. 9: Pohled shora na umístění reproduktorů v 7.1 systému. Převzato z [5].	14 -
Obr. 10: Vertikální poloha předních, prostorových a horních reproduktorů. Převzato z [5].	17 -
Obr. 11: Pohled shora, umístění stropních reproduktorů. Převzato z [5].	17 -
Obr. 12: DP580 blokový diagram. Převzato z [11].	22 -
Obr. 13: Koule kolem zdroje zvuku (EASE balloon). Převzato z [33].	25 -
Obr. 14 EASE Referenční systém. Převzato z [33].	26 -
Obr. 15: Pohled shora na rozmístění vícekanálového audio systému 7.1.4.	29 -
Obr. 16: Pohled ze strany na rozmístění vícekanálového audio systému 7.1.4.	29 -
Obr. 17 3D pohled na návrh.	30 -
Obr. 18: Horizontální směrová charakteristika reproduktoru KRK VXT8. Převzato z [41].	31 -
Obr. 19: Vertikální směrová charakteristika reproduktoru KRK VXT8. Převzato z [41].	32 -
Obr. 20: Blokové schéma reproduktoru KRK VXT8. Převzato z [41].	32 -
Obr. 21: Reproduktor KRK VXT8. Převzato z [27].	33 -
Obr. 22: Reproduktor KRK V12 S. Převzato z [44].	33 -
Obr. 23: Model stojanu.	34 -
Obr. 24: Reproduktory KRK VXT8 na vyrobených stojanech.	34 -
Obr. 25: Měření vlivu odrazivé plochy za reproduktorem v bezodrazové komoře. Převzato z [28].	35 -
Obr. 26: Frekvenční amplitudová charakteristika KRK VXT8, měření v bezodrazové komoře, FFT.	36 -

Obr. 27 Frekvenční amplitudová charakteristika KRK VXT8, měření v bezodrazové komoře, CPB.	- 36 -
Obr. 28: Frekvenční amplitudová charakteristika subwooferu v CPB.....	- 37 -
Obr. 29: Frekvenční amplitudová charakteristika předního středového reproduktoru pro vzdálenost 68 cm od rezonátoru.	- 39 -
Obr. 30: Frekvenční amplitudová charakteristika předního středového reproduktoru pro vzdálenost 88 cm od rezonátoru.	- 40 -
Obr. 31: Frekvenční amplitudová charakteristika předního levého a pravého reproduktoru pro 1/3 oktávovou analýzu.	- 41 -
Obr. 32: Frekvenční amplitudová charakteristika předního levého reproduktoru, spektrum uvedeno v FFT a CPB.	- 42 -
Obr. 33: Frekvenční amplitudová charakteristika předního pravého reproduktoru, spektrum uvedeno v FFT a CPB.	- 42 -
Obr. 34 Frekvenční amplitudová charakteristika měřeného subwooferu.....	- 43 -
Obr. 35 Frekvenční amplitudová charakteristika reprosoustavy KRK VXT8 naměřené v bezodrazové komoře a v místnosti EK708.....	- 44 -
Obr. 36 Ukázka z měření 5.1 systému.....	- 45 -
Obr. 37 Pravý zadní reproduktor umístěný na stole.....	- 46 -
Obr. 38 Frekvenční amplitudová charakteristika pro rozmístění 5.1 a poslechové místo, spektrum uvedeno v CPB.	- 47 -
Obr. 39 Zprůměrovaná frekvenční amplitudová charakteristika pro rozmístění 5.1 a všech 4 měřících míst, spektrum uvedeno v CPB.	- 47 -
Obr. 40 Frekvenční amplitudová charakteristika pro subwoofer a poslechové místo, spektrum uvedeno v CPB.	- 48 -
Obr. 41 Model simulace v programu EASE, modré jehly jsou reproduktory a zelený čtverec je měřící plocha.....	- 49 -
Obr. 42 Vypočtená frekvenční amplitudová charakteristika simulovaného modelu.....	- 50 -