

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

## Hodnocení kvality ambisonických mikrofonů

**Filip Cendelín**

Vedoucí: Ing. František Rund, Ph.D.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cendelín** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **492017**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Hodnocení kvality ambisonických mikrofonů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Assessment of Ambisonics Microphones Quality**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s mikrofony určenými pro snímání zvuku pro ambisonii. Navrhněte metodiku, jak testovat ambisonické mikrofony s ohledem na prostorový vjem z výsledné nahrávky. V práci se primárně zaměřte na přípravu a dokumentaci záznamového řetězce. Počítejte s mikrofony vyšších řádů, minimálně do třetího řádu a reprodukci prostřednictvím sluchátek. Navrženou metodiku ověřte na dostupných mikrofonech.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Novotný, M.: Zpracování zvuku pro sférická videa - sada výukových úloh. Bakalářská práce, ČVUT FEL 2019, dostupné z <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/82837>
- [2] Plessas, P.: Rigid Sphere Microphone Arrays for Spatial Recording and Holography, Graz University of Technology, 2009
- [3] Zotter, F., Frank, M.: Ambisonics. Springer Cham 2019. doi: 10.1007/978-3-030-17207-7

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. František Rund, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.09.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Ing. František Rund, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Františku Rundovi, Ph.D. za jeho velmi cenné rady a připomínky během realizace této bakalářské práce. Děkuji též Ing. Martinu Novotnému za seznámení s místním ambisonickým pracovištěm a konzultacím k němu a Bc. Davidu Vagnerovi za asistenci při nahrávání. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině, která mě nejen během sepsání práce podporovala.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 26. května 2023

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem metodiky pro testování ambisonických mikrofonů. Navržená metodika se věnuje primárně nahrávací části, v níž je přizpůsobena podmínkám katedry radioelektroniky FEL ČVUT. Je rozdělena do třech dílčích experimentů, kde dva zkoumají přesnost směrové lokalizace zdroje zvuku a jeden kvalitu zvuku při poslechu výsledných nahrávek na sluchátka. Ověření metodiky proběhlo pilotním testem o třech posluchačích. Metodika prokázala funkčnost, avšak v případě měření minimálního rozlišitelného úhlu před posluchačem se ukázal zvolený krok po  $5^\circ$  jako příliš hrubý.

**Klíčová slova:** ambisonie, mikrofon, prostorový zvuk

**Vedoucí:** Ing. František Rund, Ph.D.

## Abstract

The bachelor's thesis deals with the design of the methodology for testing ambisonic microphones. The proposed methodology is primarily devoted to the recording part, in which it is adapted to the conditions of the Department of Radioelectronics FEE CTU. It is divided into three sub-experiments, where two investigate the accuracy of directional sound source localization and one investigates the sound quality when listening to the resulting headphone recordings. The validation of the methodology was carried out by a pilot test with three listeners. The methodology proved to be functional, however in the case of measuring the minimum audible angle in front of the listener the chosen step of  $5^\circ$  proved to be too rough.

**Keywords:** ambisonics, microphone, surround sound

**Title translation:** Assessment of Ambisonics Microphones Quality

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>	
<b>1 Ambisonie a ambisonické mikrofony</b>	<b>3</b>	
1.1 Historie ambisonie	3	
1.2 Základy teorie ambisonie	3	
1.2.1 Sférická soustava souřadnic	4	
1.2.2 Sférické harmonické funkce	4	
1.2.3 Ambisonie prvního řádu (FOA)	6	
1.2.4 Ambisonie vyššího řádu (HOA)	6	
1.2.5 Kódování záznamu (A-Format a B-Format)	6	
1.2.6 FuMa vs. AmbiX	7	
1.3 Mikrofony pro snímání ambisonie	8	
<b>2 Lokalizace zdroje zvuku člověkem</b>	<b>11</b>	
2.1 Interaurální časová diference	11	
2.2 Interaurální úroňová diference	11	
2.3 Určování elevace	12	
2.4 Přesnost lokalizace	12	
2.5 Přesnost lokalizace zvuku v ambisonii	12	
<b>3 Testování ambisonických mikrofonů v literatuře</b>	<b>13</b>	
3.1 Metoda autorů Kurz et al.	13	
3.2 Metoda autorů Paquier et al.	14	
3.3 Metoda autorů Bates et al. – díl první	14	
3.3.1 Hodnocení kvality zvuku	14	
3.3.2 Přesnost lokalizace zdroje zvuku	15	
3.4 Metoda autorů Bates et al. – díl druhý	15	
3.5 Metoda autorů Sagasti et al.	15	
3.6 Shrnutí řešerše metod	16	
<b>4 Návrh metodiky – vymezení</b>	<b>17</b>	
4.1 Směrová lokalizace	17	
4.1.1 Test směrové lokalizace A	18	
4.1.2 Test směrové lokalizace B	18	
4.2 Kvalita zvuku	19	
<b>5 Návrh metodiky – technická stránka</b>	<b>21</b>	
5.1 Podmínky nahrávacích prostor	21	
5.1.1 Frekvenční charakteristiky reproduktorů	21	
5.1.2 Měření doby dozvuku nahrávací místnosti	22	
5.1.3 Možnosti umístění testovaných mikrofonů	23	
5.1.4 Možnosti umístění reproduktorů	24	
5.2 Příprava testovacích sekvencí	24	
5.2.1 Testovací sekvence - kvalita zvuku	24	
5.2.2 Testovací sekvence - směrová lokalizace	25	
<b>6 Navržená metodika – realizace</b>	<b>27</b>	
6.1 Příprava místnosti	27	
6.2 Příprava techniky	27	
6.3 Pozice reproduktorů	28	
6.4 Pozice mikrofonů	29	
6.5 Zapojení reproduktorů a mikrofonů	30	
6.6 Postup nahrávání	30	
6.6.1 Nahrávání testu směrové lokalizace A	30	
6.6.2 Nahrávání testu směrové lokalizace B	31	
6.7 Zpracování nahrávek	31	
6.7.1 Konverze do B formátu	31	
6.7.2 Ověření nahrávek v B formátu	32	
6.7.3 Binauralizační konverze	32	
<b>7 Ověření metodiky</b>	<b>35</b>	
7.1 Přehrávání pro posluchače	35	
7.1.1 Ověření směrově lokalizačního experimentu A	37	
7.1.2 Ověření směrově lokalizačního experimentu B	37	
7.1.3 Ověření kvality zvuku	37	
7.2 Výsledky pilotního ověření	38	
7.2.1 Výsledky z ověření experimentu A	38	
7.2.2 Výsledky z ověření experimentu B	39	
7.2.3 Výsledky z ověření kvality zvuku	40	

<b>Závěr</b>	<b>41</b>
<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>43</b>
<b>Literatura</b>	<b>45</b>
<b>Přílohy</b>	<b>50</b>
<b>A Měření při přípravě místnosti</b>	<b>51</b>
A.1 Doba dozvuku místnosti . . . . .	51
A.2 Vliv zákrytu mikrofonů . . . . .	52
<b>B Kompletní výsledky experimentů</b>	<b>53</b>
B.1 Experiment A . . . . .	53
B.1.1 Určené azimuty - tabulky . . .	53
B.1.2 Odchylky od skutečných azimutů reproduktorů . . . . .	55
B.1.3 Odchylky od azimutů určených z nahrávek umělé hlavy . . . . .	60
B.2 Experiment B . . . . .	62
B.3 Experiment kvalita zvuku . . . . .	63
<b>C Obsah datové přílohy</b>	<b>65</b>

## Obrázky

1.1 Prototyp prvního ambisonického mikrofonu <i>Soundfield</i> , převzato z [1]	4	7.4 Porovnání frekvenčního spektra u skladby č. 10	40
1.2 Použitá sférická soustava souřadnic, převzato z [6]	5	A.1 Směrová vizualizace zvuku přicházejícího k nezastíněnému mikrofonu Ambeo z azimutu $-90^\circ$	52
1.3 Sférické harmonické funkce od 0. do 5. řádu, světle jsou označeny jejich kladné části, číslo značí ACN, převzato z [9]	5	A.2 Směrová vizualizace zvuku přicházejícího k zastíněnému mikrofonu Ambeo z azimutu $-90^\circ$	52
1.4 Typický záznamový řetězec v ambisonii	6	B.1 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu A (růžový šum)	57
1.5 Struktura ambisonického mikrofonu Sennheiser AMBEO VR Mic, převzato z [12]	7	B.2 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu B (růžový šum)	57
1.6 Charakteristika native B-format mikrofonu, převzato z [16]	9	B.3 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu C (růžový šum)	58
1.7 Kardioidní mikrofony v uspořádání do čtyřstěnu, převzato z [17]	9	B.4 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu A (řeč)	58
2.1 Ilustrace meziušní diference při lokalizaci zvuku, převzato z [28]	12	B.5 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu B (řeč)	59
5.1 Měření impulzové odezvy reproduktorů	22	B.6 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu C (řeč)	59
5.2 Frekvenční charakteristiky dostupných reproduktorů (při umístění na pravé straně)	22		
5.3 Ověřování vlivu dvou mikrofonů vedle sebe	23		
6.1 Vyměřování pozic pro reproduktory	28		
6.2 Označené pozice pro reproduktory	29		
6.3 Zaměřování polohy mikrofonu	30		
6.4 Plugin SPARTA Array2SH	32		
6.5 Plugin Sennheiser AMBEO A-B Converter	32		
6.6 Plugin IEM Energy Visualizer	33		
6.7 Plugin AmbiHead	33		
7.1 Ilustrační fotografie sférického mikrofonu vyvíjeného na katedře	36		
7.2 Ilustrační pohled na všechny použité mikrofony	36		
7.3 Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu A (růžový šum)	39		

## Tabulky

1.1 Označení výstupů mikrofonu <i>Sennheiser Ambeo VR Mic</i> . . . . .	7	B.10 Odchylky ( $^{\circ}$ ) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů - subjekt A (řeč) . . . . .	56
1.2 Značení kanálů u formátů AmbiX a FuMa do 2. řádu . . . . .	8	B.11 Odchylky ( $^{\circ}$ ) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů - subjekt B (řeč) . . . . .	56
1.3 Přehled vybraných komerčně dostupných mikrofonů pro snímání ambisonie . . . . .	10	B.12 Odchylky ( $^{\circ}$ ) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů - subjekt C (řeč) . . . . .	56
2.1 Průměrné lokalizační chyby ( $^{\circ}$ ) v závislosti na řádu ambisonie uváděné v článku [30] . . . . .	12	B.13 Odchylky ( $^{\circ}$ ) vůči umělé hlavě - subjekt A (růžový šum) . . . . .	60
A.1 Orientační doba dozvuku (v sekundách) měřená při pozici reproduktoru vlevo (azimut $+45^{\circ}$ )	51	B.14 Odchylky ( $^{\circ}$ ) vůči umělé hlavě - subjekt B (růžový šum) . . . . .	60
A.2 Orientační doba dozvuku (v sekundách) měřená při pozici reproduktoru vpravo (azimut $-45^{\circ}$ )	51	B.15 Odchylky ( $^{\circ}$ ) vůči umělé hlavě - subjekt C (růžový šum) . . . . .	60
B.1 Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů - mikrofon Ambeo (růžový šum) . . .	53	B.16 Odchylky ( $^{\circ}$ ) vůči umělé hlavě - subjekt A (řeč) . . . . .	61
B.2 Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů - umělá hlava Neumann KU100 (růžový šum) . . . . .	53	B.17 Odchylky ( $^{\circ}$ ) vůči umělé hlavě - subjekt B (řeč) . . . . .	61
B.3 Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů - AmbiPan 3. řád (růžový šum) . . .	54	B.18 Odchylky ( $^{\circ}$ ) vůči umělé hlavě - subjekt C (řeč) . . . . .	61
B.4 Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů - mikrofon Ambeo (řeč) . . . . .	54	B.19 Odpovědi, zda posluchač rozlišil mezi dvěma azimuty - mikrofon <i>Sennheiser Ambeo VR Mic</i> . . . . .	62
B.5 Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů - umělá hlava Neumann KU100 (řeč)	54	B.20 Odpovědi, zda posluchač rozlišil mezi dvěma azimuty - mikrofon Neumann KU100 (umělá hlava) . . .	62
B.6 Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů - AmbiPan 3. řád (řeč) . . . . .	54	B.21 Výsledky porovnání preferencí v kvalitě nahrávek . . . . .	63
B.7 Odchylky ( $^{\circ}$ ) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů - subjekt A (růžový šum) . . . . .	55		
B.8 Odchylky ( $^{\circ}$ ) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů - subjekt B (růžový šum) . . . . .	55		
B.9 Odchylky ( $^{\circ}$ ) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů - subjekt C (růžový šum) . . . . .	55		



## Úvod

S rostoucí popularitou sférických videí a virtuální reality nacházejí ambisonické mikrofony stále větší uplatnění. Na trhu se postupně objevují různě dostupné modely, přičemž můžeme narazit i na projekty podomácku vyráběných prototypů mikrofonů. Ukazuje se tedy potřeba porovnávání jejich kvality.

Cílem práce je vytvořit metodiku, díky které bude možné testovat ambisonické mikrofony v místních podmínkách katedry radioelektroniky FEL ČVUT. Metodika by měla být připravena primárně z pohledu záznamového řetězce k možnému otestování prototypu ambisonického mikrofonu 3. řádu, jenž je vytvářen na katedře, a jeho porovnání s ostatními dostupnými mikrofony. Vzhledem k častému využití ambisonie např. ve virtuální realitě, kde se používají především sluchátka, by se i navržená metodika měla věnovat výslednému prostorovému vjemu z nahrávky při poslechu na sluchátkách.

V teoretické části práce seznámí čtenáře se základy ambisonie, včetně její stručné historie, a dále schopnostmi člověka lokalizovat zdroj zvuku. V další kapitole bude uvedena rešerše metod, kterými bylo prováděno testování ambisonických mikrofonů v dostupných publikacích.

Kapitoly praktické části popíší návrh metodiky od samotného vymezení, jaké aspekty budou testovány, přes přípravu nahrávacích prostor a technického vybavení, až po samotné ověření navržené metodiky s dostupnými mikrofony. V poslední části bude čtenář seznámen s orientačními výsledky, které pilotní ověření přineslo.





# Kapitola 1

## Ambisonie a ambisonické mikrofony

### 1.1 Historie ambisonie

Počátky ambisonie jsou spjaty s britským inženýrem Michaelem Gerzonem v 70. letech 20. století. Ten tehdy přišel s myšlenkou možnosti přizpůsobení zvukového pole posluchači tak, aby mu přinesl výsledný vjem co nejbližší původnímu efektu zachycenému mikrofony, jak zmiňuje [1].

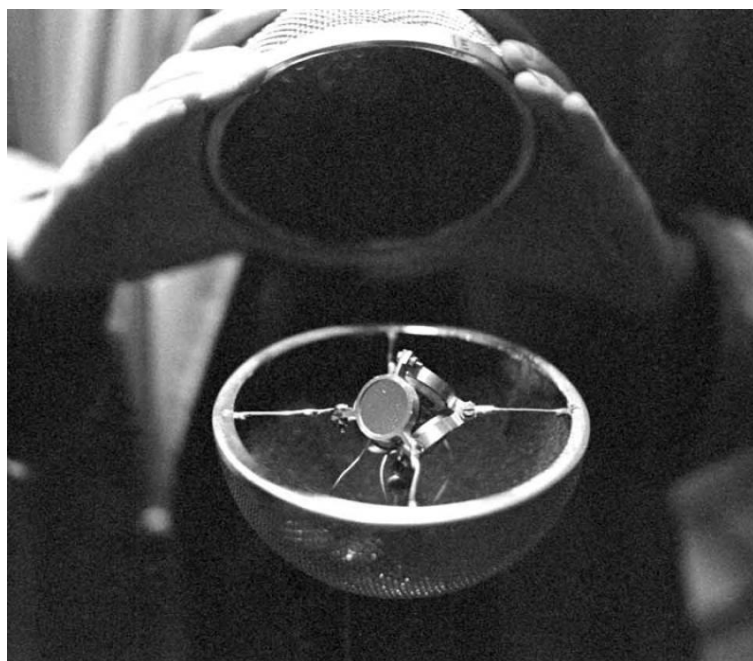
Výhodou oproti tradičním formátům prostorového zvuku je dle [2] nezávislost na výsledném rozložení reproduktorů posluchače. U ostatních formátů totiž každý kanál odpovídá signálu pro konkrétní reproduktor, přičemž u ambisonie obsahují jednotlivé kanály informace o určitých fyzikálních vlastnostech akustického pole. Informace z těchto kanálů jsou později dekodovány pro požadované reproduktory.

Prototyp prvního ambisonického mikrofону, zvaného *Soundfield microphone*, se objevil v únoru 1975. Na jeho vývoji se za podpory NRDC (*National Research Development Corporation*) podíleli Michael Gerzon a Peter Craven (více viz [1]). Mikrofon můžeme vidět na obrázku 1.1.

V 90. letech 20. století se již objevuje ambisonie vyšších řádů (viz [3]), avšak stále je tato technika známá primárně pouze ve vědeckých kruzích. Díky rozvoji virtuální reality a sférických videí se však v posledních letech dostává ambisonii větší pozornost i v komerční sféře, jak zmiňuje např. [2].

### 1.2 Základy teorie ambisonie

Ambisonie je technika zpracování zvukových signálů s cílem zachycení informací o celkovém zvukovém poli. Je založena na promítání zvukového pole do sférických harmonických funkcí, které lze považovat za sadu trojrozměrných ortogonálních polárních vzorů. Jak uvádí [4], každá sférická harmonická funkce představuje jedinečnou směrovou charakteristiku daného zvukového pole, přičemž je nezávislá na charakteristikách ostatních sférických harmonických.



**Obrázek 1.1:** Prototyp prvního ambisonického mikrofonu *Soundfield*, převzato z [1]

### 1.2.1 Sférická soustava souřadnic

Jelikož jsou podle [5] sférické harmonické funkce řešením úhlové části Laplaceovy rovnice ve sférických souřadnicích, je potřeba si nejprve představit používanou sférickou soustavu souřadnic – tu ukazuje obrázek 1.2. Soustava je tvořena osami  $x$ ,  $y$  a  $z$ , kde osa  $x$  směřuje od čela posluchače,  $y$  doleva od něj a  $z$  nahoru nad posluchače.

Dále se zde určuje azimut  $\varphi$ , a to od roviny tvořené osami  $x$  a  $z$ . Jeho nulová hodnota se nachází ve směru osy  $x$  (čelní pohled posluchače) a úhel narůstá proti směru hodinových ručiček ( $\varphi \in [-\pi; \pi]$ ). Výškový úhel  $\vartheta$  má nulovou hodnotu v horizontální rovině a pohybuje se v rozsahu  $[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ , tedy s kladnými hodnotami nad touto rovinou a zápornými pod ní<sup>1</sup> (viz [6]).

### 1.2.2 Sférické harmonické funkce

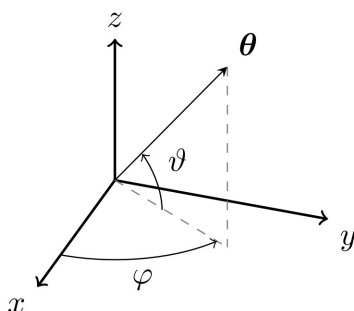
Reálné části sférických harmonických funkcí bývají podle [6] zapisovány ve tvaru rovnice

$$Y_n^m(\varphi, \vartheta) = N_n^{|m|} \cdot P_n^{|m|}(\sin(\vartheta)) \cdot \begin{cases} \sin(|m|\varphi), & \text{pro } m < 0 \\ \cos(|m|\varphi), & \text{pro } m \geq 0 \end{cases}, \quad (1.1)$$

ve které  $m$  značí stupeň dané funkce a  $n$  její řád<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>V některých publikacích se můžeme setkat s odlišnou konvencí, kde je např. úhel  $\vartheta$  určován od osy  $z$ .

<sup>2</sup>Označování řádu a stupně sférické harmonické také není všeobecně jednotné. Některé publikace např. označují řád jako  $l$  místo  $n$  (pro odlišení od řádu ambisonie  $N$ ) nebo přímo



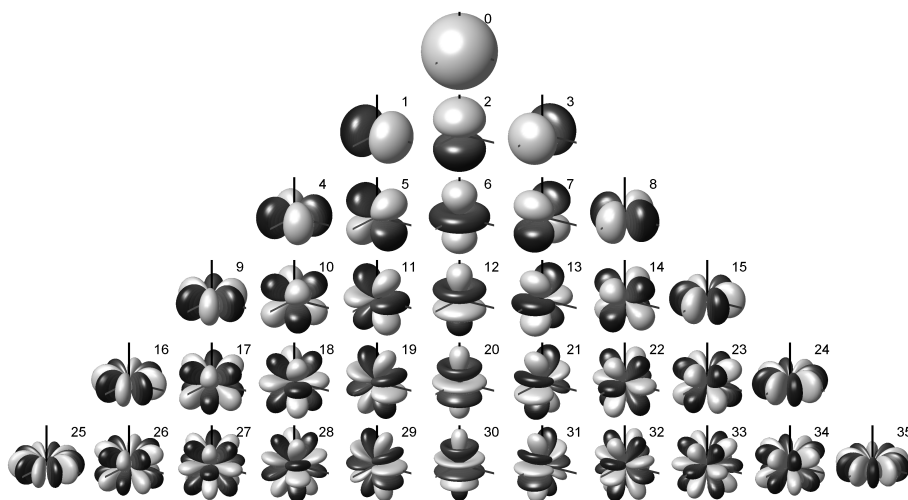
**Obrázek 1.2:** Použitá sférická soustava souřadnic, převzato z [6]

Člen  $N_n^{|m|}$  zde figuruje jako normalizační koeficient a člen  $P_n^{|m|}$  značí přidruženou Legendrovu funkci. Podle [8] se řád sférické harmonické  $n$  pohybuje v rozsahu  $0 \leq n \leq N$ , kde velké  $N$  značí řád ambisonie (viz sekce 1.2.4), a stupeň  $m$  je v závislosti na řádu  $n$  v rozsahu  $-n \leq m \leq n$ .

Ze stupně  $m$  a řádu  $n$  dané funkce v ambisonii vychází číslování jednotlivých funkcí tzv. ACN (z angl. *Ambisonics Channel Numbering*, více viz sekce 1.2.6), které je určeno vztahem

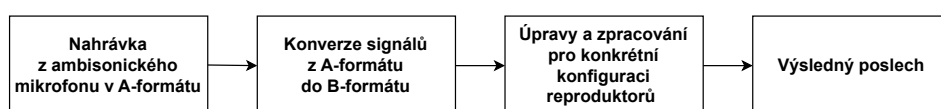
$$\text{ACN} = n^2 + n + m. \quad (1.2)$$

Funkci  $Y_n^m(\varphi, \vartheta)$  můžeme tedy zapsat i jako  $Y_{\text{ACN}}(\varphi, \vartheta)$ . Takto očíslované sférické harmonické můžeme vidět na obrázku 1.3, konkrétně od 0. do 5. řádu (vzestupně po řádcích). Např.  $\text{ACN} = 5$  zde odpovídá sférické harmonické řádu  $n = 2$  a stupně  $m = -1$ , tedy  $Y_2^{-1}(\varphi, \vartheta) = Y_5(\varphi, \vartheta)$ .



**Obrázek 1.3:** Sférické harmonické funkce od 0. do 5. řádu, světle jsou označeny jejich kladné části, číslo značí ACN, převzato z [9]

zaměňují pojmy řád (angl. *order*) a stupeň (*mode*), jako např. [7].



Obrázek 1.4: Typický záznamový řetězec v ambisonii

### 1.2.3 Ambisonie prvního řádu (FOA)

Ambisonie se dělí na řády, přičemž čím vyšší řád, tím přesnější rozlišitelnost směrů ve zvukovém poli přináší. Zároveň společně s řádem roste i počet mikrofonních kapslí, které soustava musí obsahovat, resp. počet sférických harmonických funkcí.

Základním a principiálně nejjednodušším typem je ambisonie prvního řádu, zkráceně FOA (z angl. *First-order Ambisonics*). Využívá sférických harmonických funkcí nultého a prvního řádu, tedy celkem čtyř funkcí ( $ACN = 0$  až  $3$ ). Jak je patrné z obrázku 1.3, sférická harmonická nultého řádu má kulovou charakteristiku, tedy popisuje zvuk přicházející ze všech směrů okolo. U prvního řádu jsou využity charakteristiky osmičkové a popisují zvukové složky ve směrech jednotlivých os  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Jednotlivým sférickým harmonickým funkcím zde v B-formátu odpovídají čtyři kanály označené  $W$ ,  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  (viz např. [4]).

### 1.2.4 Ambisonie vyššího řádu (HOA)

Přesnější zmapování zvukového pole lze získat při využití ambisonie vyšších řádů (HOA – *High-order Ambisonis*). Jak již bylo zmíněno, vyšší řády používají oproti prvnímu řádu větší počet sférických harmonických funkcí a jim odpovídajících kanálů. Např. u ambisonie druhého řádu jsou použity sférické harmonické 0., 1. a 2. řádu, čemuž odpovídá 9 kanálů. Obecně je (např. dle [10]) počet kanálů  $K$  dán řádem ambisonie  $N$  podle vztahu

$$K = (N + 1)^2. \quad (1.3)$$

Se zvyšujícím se řádem ambisonie roste náročnost na zpracování dat a je obtížnější zkonstruovat daný ambisonický mikrofon.

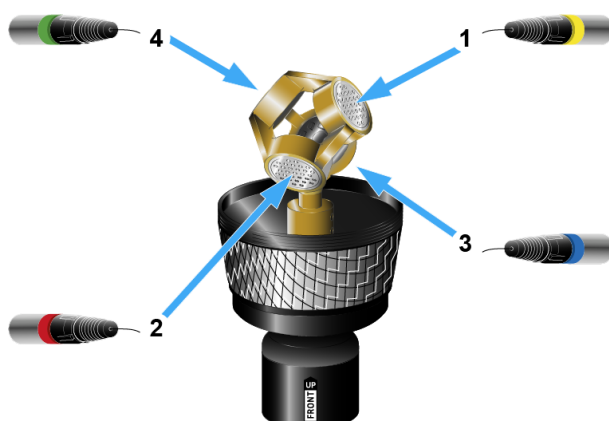
### 1.2.5 Kódování záznamu (A-Format a B-Format)

Samotný nezpracovaný záznam z ambisonického mikrofonu je proveden v tzv. A-formátu, který v ambisonii sám o sobě není možné použít (o tom více později v sekci 1.3). Kanály A-formátu proto prochází kódováním, aby se získaly směrové informace v odpovídajících sférických harmonických. Výsledkem tohoto zpracování je signál v B-formátu, se kterým se již v ambisonii dále pracuje a podle potřeb upravuje. Před konečným přehráváním musí projít výsledná nahrávka dekódováním pro konkrétní konfiguraci reproduktorů (viz [4]). Typický záznamový řetězec při použití ambisonie ukazuje obrázek 1.4.

A-formát je svázan s konkrétním ambisonickým mikrofonem, tedy konverze do B-formátu se u různých mikrofonů může lišit. Ke komerčně dostupným

**Tabulka 1.1:** Označení výstupů mikrofonu *Sennheiser Ambeo VR Mic*

Kanál	Označení	Význam
1	<i>FLU</i>	Front Left Up
2	<i>FRD</i>	Front Right Down
3	<i>BLD</i>	Back Left Down
4	<i>BRU</i>	Back Right Up

**Obrázek 1.5:** Struktura ambisonického mikrofonu Sennheiser AMBEO VR Mic, převzato z [12]

ambisonickým mikrofonům proto bývá přímo dodáván nástroj na konverzi vytvořený pro daný model mikrofonu. Například u mikrofonu *Sennheiser Ambeo VR Mic* (a jemu podobným mikrofonům 1. řádu) probíhá dle [11] převod z A-formátu do B-formátu za použití následujících rovnic

$$W = FLU + FRD + BLD + BRU, \quad (1.4)$$

$$X = FLU + FRD - BLD - BRU, \quad (1.5)$$

$$Y = FLU - FRD + BLD - BRU, \quad (1.6)$$

$$Z = FLU - FRD - BLD + BRU. \quad (1.7)$$

V těchto rovnicích *FLU*, *FRD*, *BLD* a *BRU* odpovídá signálům z jednotlivých výstupů mikrofonu, jak ukazuje tabulka 1.1 spolu s obrázkem 1.5.

Do B-formátu však můžeme převést i např. mono nebo stereo nahrávky, případně zvuk syntetizovat. V takovém případě se při kódování zvolí, odkud má daný zvuk přicházet v rámci zvukového pole. Tímto způsobem je možné i přidat do existující ambisonické nahrávky další zvuky, které ve zvukovém poli umístíme na požadované místo (viz [13]).

### 1.2.6 FuMa vs. AmbiX

Pro zpracování ambisonických dat v B-formátu se používají dva různé způsoby reprezentace dat – *AmbiX* a *FuMa*. Jejich rozdíly spočívají především v odlišném řazení kanálů a typu váhování.

**Tabulka 1.2:** Značení kanálů u formátů AmbiX a FuMa do 2. řádu

řád $n$	stupeň $m$	AmbiX ACN	FuMa označení
0	0	0	W
1	-1	1	Y
1	0	2	Z
1	1	3	X
2	-2	4	V
2	-1	5	T
2	0	6	R
2	1	7	S
2	2	8	U

Historicky starším formátem je *FuMa*, vynalezený dvojicí Furse a Malham, podle jejichž jmen je označován. Kanály jsou zde řazeny abecedně, konkrétně tedy v případě ambisonie prvního řádu jako *W*, *X*, *Y*, *Z*, a je využito tzv. *MaxN* normalizace. To podle [14] a [15] znamená aplikaci váhovacích faktorů na jednotlivé signály tak, aby jejich hodnota zisku nepřekročila [1]. Odlišným váhováním prochází pouze signál kanálu *W*, kde je normalizační koeficient  $N_n^{|m|}$  ze vztahu (1.1) roven  $1/\sqrt{2}$ . Nevýhodou tohoto formátu je, že dokáže zpracovat maximálně 16 kanálů a velikost souboru je omezena na 4 GB. To umožňuje jeho použití pro ambisonii maximálně třetího řádu.

Řešení těchto omezení si vzal za cíl novější formát zvaný *AmbiX* (*Ambisonics exchangeable*). Oproti předchozímu tedy není omezen počtem kanálů ani velikostí souboru. Používá řazení kanálů podle ACN (viz rovnice (1.2)) a normalizaci *SN3D*, kde je ve výrazu (1.1) podle [8] využit normalizační koeficient ve tvaru

$$N_n^{|m|} = \sqrt{\frac{2 - \delta_m (n - |m|)!}{4\pi (n + |m|)!}} \quad (1.8)$$

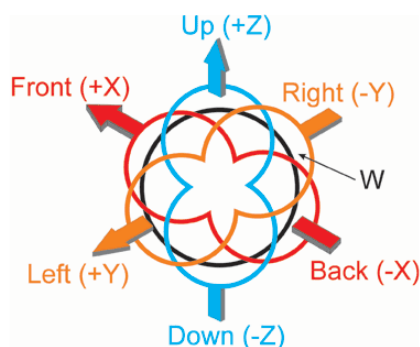
V tomto výrazu se nachází Kroneckerovo delta  $\delta_m$ , které je rovno jedné pro  $m = 0$  a nule v ostatních případech.

Porovnání značení kanálů u obou formátů můžeme vidět v tabulce 1.2.

### 1.3 Mikrofony pro snímání ambisonie

Ambisonické mikrofony jsou typicky složeny z několika mikrofonních kapslí. Tyto kapsle bývají buďto osmičkové charakteristiky nebo všesměrové (kulové), případně kardioidní (ledvinové).

Počet mikrofonních kapslí, které musí daný mikrofon minimálně obsahovat je dán požadovaným řádem ambisonie  $N$  jako  $(N + 1)^2$ . Pro vytvoření ambisonického mikrofonu prvního řádu by tedy dle [16] teoreticky měly stačit čtyři mikrofonní kapsle, kde pokud se podíváme na tvary sférických harmonických nultého a prvního řádu, jednalo by se o kulovou (*W*) a tři osmičkové charakteristiky (*X*, *Y*, *Z*). Tento typ mikrofonu se nazývá *Native B-format microphone*,

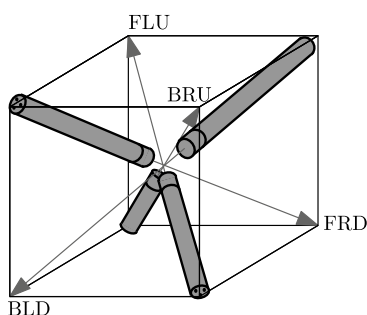


**Obrázek 1.6:** Charakteristika native B-format mikrofonu, převzato z [16]

jelikož charakteristiky jeho kapslí přímo odpovídají sférickým harmonickým v B-formátu, jak ukazuje obrázek 1.6. Problémem této konstrukce však je, že ve skutečnosti není možné umístit všechny mikrofonní kapsle přímo do středu souřadnic.

V praxi se proto u ambisonických mikrofonů prvního řádu nejčastěji používá spíše konfigurace v podobě sady čtyř mikrofonních kapslí kardioidní charakteristiky v uspořádání do čtyřtěnu, jak ukazuje obrázek 1.7. U tohoto typu mikrofonů samotné mikrofonní kapsle přináší signál v A-formátu, tedy jak již bylo zmíněno v sekci 1.2.5, signály musejí projít zpracováním do podoby B-formátu. Těto konfigurace využíval i již zmiňovaný první ambisonický mikrofon *Soundfield* (viz [4]). V případě ambisonických mikrofonů vyšších řádů se však setkáváme spíše s využitím kapslí všesměrové charakteristiky.

Přehled vybraných komerčně dostupných mikrofonů pro snímání ambisonie, včetně odkazů na weby výrobců, ukazuje tabulka 1.3.



**Obrázek 1.7:** Kardioidní mikrofony v uspořádání do čtyřtěnu, převzato z [17]

**Tabulka 1.3:** Přehled vybraných komerčně dostupných mikrofonů pro snímání ambisonie

název mikrofonu	ambisonický řád	web výrobce
<b>Sennheiser Ambeo VR Mic</b>	1. řád	[18]
<b>Rode NT-SF1</b>	1. řád	[19]
<b>Soundfield SPS200</b>	1. řád	[20]
<b>NEVATON VR</b>	1. řád	[21]
<b>Voyage Audio - Spatial Mic</b>	2. řád	[22]
<b>Core Sound OctoMic</b>	2. řád	[23]
<b>Zylia PRO</b>	3. řád	[24]
<b>Eigenmike</b>	4. řád	[25]



## Kapitola 2

### Lokalizace zdroje zvuku člověkem

Schopnost člověka lokalizovat zdroj zvuku v prostoru je založena především na využití poslechu oběma ušima (angl. *binaural hearing*) a rozdílech mezi signály, které dorazí do levého a do pravého ucha (viz [26]). Tyto rozdíly vznikají proto, že v závislosti na azimutu zdroje zvuku vůči hlavě posluchače nejsou vzdálenosti od zdroje k oběma uším stejné (kromě azimutu  $0^\circ$  a  $180^\circ$ ). Vzhledem k tomu se podle duplexní teorie setkáváme zejména se dvěma diferencemi mezi oběma ušima – interaurální časovou diferencí (ITD) a interaurální úroňovou diferencí (ILD).

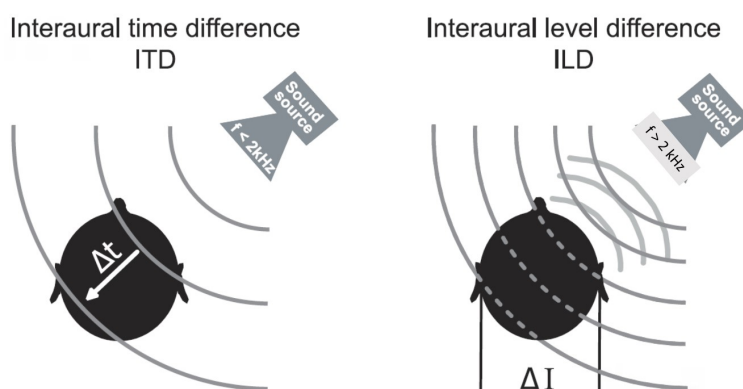
Na základě těchto diferencí je podle [27] možné popsat prostorové vnímání přicházejícího zvuku za pomoci přenosové funkce vztažené k hlavě (HRTF – z angl. *Head Related Transfer Function*). Tato funkce je závislá na anatomických vlastnostech hlavy konkrétního člověka, především na jejím rozměru nebo tvaru ušního boltce.

#### 2.1 Interaurální časová diference

ITD (z angl. *Interaural Time Difference*) značí časové rozdíly, tedy že zvuk podle azimutu přichází do jednoho ucha o něco dříve než do druhého. Uplatnění nachází především při lokalizaci nižších frekvencí (dle [26] pod 1 kHz).

#### 2.2 Interaurální úroňová diference

Druhým rozdílem mezi signály je intenzita, se kterou přichází do jednotlivých uší. Tento rozdíl se značí ILD (z angl. *Interaural Level Difference*), případně IID (*Internaural Intensity Difference*). Na diferenci intenzity má vliv nejenom odlišná dráha k levému a pravému uchu, ale i akustický stín hlavy. Intenzitní rozdíly hrají roli při určování směru šíření zvuku vyšších kmitočtů (podle [26] nad 1,5 kHz). V případě středních kmitočtů jsou využívány obě zmíněné diference zároveň.



**Obrázek 2.1:** Ilustrace meziušní difference při lokalizaci zvuku, převzato z [28]

### 2.3 Určování elevace

Zmíněné difference se uplatňují při horizontální lokalizaci, tedy azimutu. V případě určování elevace se využívá faktu, že ušní boltec funguje v závislosti na elevaci jako frekvenční filtr. Lokalizace ve vertikálním směru je však obecně méně přesná než v horizontálním (viz [29]).

### 2.4 Přesnost lokalizace

Přesnost lokalizace zvuku při binaurálním poslechu se za ideálních podmínek uvádí okolo  $2^\circ$ . Označuje se MAA (z angl. *Minimum Audible Angle* a označuje nejmenší postřehnutelný rozdíl ve směru šíření dvou zdrojů zvuku. MAA se liší v závislosti na frekvenčním rozsahu poslouchaného zvuku. Přesněji lokalizovatelné bývají zvuky širokopásmové. Záleží také na azimutu vůči zdroji zvuku, přičemž nejmenší rozdíly jsou postřehnutelné přímo před posluchačem, po stranách se MAA zvyšuje (viz [27]).

### 2.5 Přesnost lokalizace zvuku v ambisonii

Přesnost lokalizace v závislosti na řádu ambisonie byla zkoumána např. v článku [30]. Ten ukazuje, že s růstem řádu ambisonie se zvyšuje i přesnost lokalizace zdrojů zvuku, jak ilustruje tabulka 2.1.

**Tabulka 2.1:** Průměrné lokalizační chyby ( $^\circ$ ) v závislosti na řádu ambisonie uváděné v článku [30]

ambisonický řád	poslech na reproduktory	poslech na sluchátka
1.	25,58	23,88
2.	15,44	16,54
5.	12,96	14,92

## Kapitola 3

### Testování ambisonických mikrofonů v literatuře

Testování mikrofonů pro snímání ambisonie se již v minulosti zabývaly některé publikace, a to s různými přístupy. V některých případech se můžeme setkat se subjektivním hodnocením kvality zvuku nahrávek současně s hodnocením schopnosti lokalizovat jeho zdroj. Jiné experimenty tyto dva aspekty rozdělují, nebo řeší pouze jeden z nich. I v takovém případě mohou být tyto dílčí testy pojety rozličnými způsoby.

V této kapitole si představíme některé z nich, na které jsem narazil v rámci rešeršní práce.

#### 3.1 Metoda autorů Kurz et al.

Jako první můžeme zmínit článek [31], ve kterém spojili testování lokalizace i kvality zvuku do jednoho experimentu. Provedli nahrávky orchestru o šesti hudebnících za současného použití více ambisonických mikrofonů prvního řádu (SoundField ST450, SoundField SPS200, Oktava MK4012) a referenčního stereo mikrofonu Schoeps MTSC64. Tyto nahrávky poté dekodovali pro poslech na soustavu reproduktorů (šest ve výšce posluchače, čtyři nad jeho úrovní).

Posluchači, kteří byli poté postupně usazováni doprostřed této reproduktorové soustavy, měli na stupnici hodnotit nahrávky z několika atributů:

- V prvním případě měli posoudit, jak dobře se jim lokalizují jednotlivé hudební nástroje.
- Druhým bodem byla prostorová hloubka, kde se měla hodnotit schopnost vnímat vzdálenost jednotlivých nástrojů.
- Ve třetím bodě měli posluchači zhodnotit, jak se cítí být obklopeni přehrávanou sekvencí.
- Čtvrtým hodnoceným aspektem byla kvalita zvuku.
- V posledním případě měli za úkol seřadit jednotlivé nahrávky podle svých preferencí.

Korelace mezi výsledky hodnocení jednotlivých atributů ukázaly, že zvyšující se preference nahrávky byly převážně svázány s dobrým hodnocením lokalizace a kvality zvuku. Ostatní hodnocené aspekty, jako jsou obklopení a prostorová hloubka, tedy nehrály takovou roli pro celkové preference nahrávky.

## 3.2 Metoda autorů Paquier et al.

Velmi podobně, jako v předchozí zmiňované metodě (sekce 3.1), řešili hodnocení ambisonických mikrofonů i v publikaci [32]. Autoři popisují, že byl nahráván orchestr 20 hudebníků za současného využití čtyř mikrofonních polí. Prvním testovaným mikrofonem byl zástupce ambisonie vyšších řádů o 20 všesměrových kapslích, druhým čtyřkapslový ambisonický mikrofon prvního řádu a pro srovnání dále i dvě neambisonické mikrofonní techniky OCTsurround a WCSA.

I v tomto případě byly poté zpracované nahrávky přehrávány jednotlivým posluchačům usazeným doprostřed soustavy reproduktorů (tentokrát v rozložení 5.0), přičemž bylo hodnoceno pět obdobných aspektů jako v článku popisovaném v sekci 3.1. Rozdílný však byl způsob hodnocení, kde se porovnávaly vždy dva systémy vůči sobě stylem lepší/horší, přičemž postupně byly ohodnoceny všechny dvojice. Opět i zde se ukázalo, že s aspektem preference nahrávky nejvíce korelují aspekty lokalizace a kvalita zvuku.

## 3.3 Metoda autorů Bates et al. – díl první

Odlíšný přístup testování zvolili v článku [33], kde prováděli experimenty s pěti komerčně dostupnými mikrofony (Soundfield MKV, Core Sound TetraMic, MH Acoustics Eigenmike a Zoom H2n). V tomto případě bylo hodnocení rozděleno na dvě části – porovnání subjektivní kvality zvuku nahrávek jednotlivých mikrofonů a poté testování přesnosti lokalizace zdroje zvuku.

### 3.3.1 Hodnocení kvality zvuku

Nahrávky byly prováděny pro každý mikrofon zvlášť, přičemž pro hodnocení kvality zvuku přehrávali testovací sekvence z reproduktoru vzdáleného 1 metr od mikrofonu. Sekvence se skládaly z lidské řeči, růžového šumu a různých hudebních vzorků. Kromě testovaných mikrofonů se k nahrávání využil i všesměrový mikrofon DPA 4006, jehož mono nahrávky poté posloužily jako reference. Pro výsledný poslech nahrávky převedli do B formátu a z něj využili právě všesměrový W kanál.

Hodnocení zpracovaných nahrávek probíhalo modifikovanými subjektivními testy MUSHRA (viz [34]) při poslechu na sluchátkách Sennheiser HD650. Posluchači měli za úkol ohodnotit kvalitu jednotlivých nahrávek vůči referenci na pětibodové stupnici.

### ■ 3.3.2 Přesnost lokalizace zdroje zvuku

Ve druhém experimentu, který se zabýval přesností lokalizace zdroje zvuku, byly mikrofony postupně umísťovány do středu sférické soustavy 16 reproduktorů. Nahrávání probíhalo v místnosti s nízkou dobou dozvuku, přičemž z jednotlivých reproduktorů byly postupně přehrávány pětisekundové vzorky růžového šumu. Přesnost lokalizace zdroje zvuku autoři ověřovali pomocí směrové analýzy DirAC (viz [35]), pro niž musely být jednotlivé nahrávky nejprve převedeny do ambisonického B formátu. Jako reference opět posloužil všesměrový mikrofón, jehož nahrávky byly synteticky zakódovány v B formátu na azimutové a elevační pozice skutečných reproduktorů.

Směrová analýza poté porovnávala umístění každého reproduktoru, jak jej zaznamenaly jednotlivé ambisonické mikrofony, vůči jejich skutečným pozicím. Výsledkem testu pro každý mikrofón byla průměrná chyba lokalizace úhlu.

## ■ 3.4 Metoda autorů Bates et al. – díl druhý

Na předchozí zmiňovaný článek (viz sekce 3.3) přímo navazuje jeho druhý díl [36] od stejné skupiny autorů. Oproti prvnímu dílu se liší pouze v pozměněném experimentu pro hodnocení kvality zvuku a v tom, že přibyl další testovaný mikrofón (Sennheiser Ambeo VR Mic). Část týkající se lokalizace zde tedy zůstala nezměněna.

Tentokrát byly provedeny nahrávky vystoupení akustického kvarteta, kde každý nástroj měl vlastní monofonní mikrofón, aby poté tyto nahrávky mohly být přehrávány na reproduktorech ve sférickém poli. Pole reproduktorů bylo poté využito pro nahrávání s testovanými ambisonickými mikrofony, které do něj byly jednotlivě umísťovány.

Rozdíl se týkal i samotného výsledného poslechu, kdy již nebyl využit pouze samotný všesměrový W kanál, ale celá ambisonická nahrávka. Ta byla poté binaurálním downmixem zpracována pro poslech na sluchátkách spolu se zařízením pro sledování polohy hlavy. Posluchači v tomto případě neměli k dispozici referenci, ale pouze hodnotili barvu zvuku jednotlivých nahrávek z ambisonických mikrofónů mezi sebou.

## ■ 3.5 Metoda autorů Sagasti et al.

Z dalších článků, které se zabývaly hodnocením přesnosti lokalizace zdroje zvuku při nahrávání ambisonickými mikrofony, můžeme zmínit [37]. V tomto článku autoři popisují experiment provedený ambisonickým mikrofónem prvního řádu Sennheiser Ambeo VR Mic a mikrofónem třetího řádu Zylia. Nahrávání probíhalo s každým mikrofónem zvlášť v bezodrazové komoře, kde byly na několika pozicích o různém azimutu a elevaci okolo mikrofónu umístěny reproduktory, do nichž se přehrávaly stimuly v podobě růžového šumu a v druhém případě zvuku zvonku na kole.

Nahrávky autoři následně zpracovali pro poslech na sluchátkách za použití



## Kapitola 4

### Návrh metodiky – vymezení

Dle zadání práce je cílem připravit metodiku, díky které bude možné otestovat rozdíly mezi ambisonickými mikrofony s ohledem na prostorový vjem z jejich nahrávek při výsledném poslechu na sluchátka. Hlavní motivací při tom je možnost otestování chystaného sférického mikrofону 3. řádu, který je vytvářen v rámci katedry. Navržená metodika by se měla věnovat zejména nahrávací části, ve které by měla být realizovatelná přímo na katedře v podmínkách místního audiovizuálního studia.

Před návrhem metodiky je potřeba si ujasnit, z jakého aspektu chceme mikrofony testovat a podle toho si zvolit metodu, pro kterou bude navrhován postup realizace.

Jak ukazuje předchozí kapitola, možností, jak pojmout hodnocení ambisonických mikrofonů, je celá řada. Při volbě metody, kterou použijeme, jsme však omezeni konkrétními podmínkami pracoviště katedry, tedy především dostupnou technikou a stavebními podmínkami nahrávacích prostor.

Podobně jako v článku shrnutém v sekci 3.3 jsem se rozhodl, že testování bude rozděleno na dvě části – hodnocení kvality zvuku a přesnosti lokalizace směru zdroje.

Vzhledem k tomu, že nás zajímá, jaký bude mít výsledný posluchač vjem při poslechu na sluchátka, navrhuji tomu přizpůsobit i lokalizační část. I ta by měla být připravena pro vyhodnocení z binaurálního zpracování, obdobným způsobem, jaký využívali v případě článku z oddílu 3.5. Rozdílem oproti němu by mělo být to, že se snažíme přiblížit nahrávacími podmínkami více reálnému použití, tedy nebude využita bezodrazová komora.

#### 4.1 Směrová lokalizace

Ohledně směrové lokalizace vycházíme z toho, že u každého ambisonického mikrofónu se dá očekávat odlišná přesnost zaznamenání směrů šíření zvuku. Jak již bylo dříve zmiňováno v sekci 2.5, předpokládá se, že s růstem řádu ambisonie by se měla zvyšovat i přesnost lokalizace zdroje zvuku. Největší rozdíly se dají očekávat mezi ambisonickými mikrofony různých řádů. Avšak ani u mikrofonů stejných řádů se nemusí jednat o identickou přesnost, když uvážíme, že mohou být rozdílných konstrukcí. Prvním zvoleným kritériem pro hodnocení z pohledu výsledného poslechu nahrávek mikrofonů na sluchátka

je tedy přesnost lokalizace zdrojů zvuku.

Na základě poznatků popisovaných v oddílu 2.3, kdy je člověk schopen rozpoznat elevaci přicházejícího zvuku s větší nepřesností, než když má určovat jeho azimut, jsem došel k závěru, že při poslechu na sluchátka by přesnost určení elevace nebyla vypovídající. To potvrzuje i článek ze sekce 3.5, jejichž testy ukázaly velké nepřesnosti v určování elevace nehledě na řád mikrofonu. Pro provedení nahrávání s různými elevacemi zdrojů zvuku by zároveň bylo komplikovanější zajistit potřebné vybavení v nahrávacích prostorech.

Pro hodnocení přesnosti lokalizace jsem se rozhodl navrhnout dvě metody, kdy každá posuzuje lokalizaci jiným způsobem.

#### ■ 4.1.1 Test směrové lokalizace A

První navržená metoda určení, s jakou přesností dokáže daný ambisonický mikrofon zaznamenat směr přicházejícího zvuku, je podobná té, která byla použita v metodě popsané v sekci 3.5, avšak její hlavní myšlenka mě napadla dříve, než jsem na tento článek narazil.

Navržená metoda tedy spočívá v tom, že je potřeba provést nahrávky testovaným mikrofonem během toho, co budou z definovaných pozic přehrávány testovací stimuly. Z poznatků, které byly zmíněny v oddílu 2.4 je zřejmé, že pro přesnost lokalizace zvuku jsou vhodnější zvuky širokopásmového charakteru, jelikož zapojují obě hlavní meziušní difference ITD i ILD. Obecně se při lokalizačních testech ukázal jako vhodný růžový šum, tedy navrhuji jej využít i v tomto případě. Jelikož je však člověku přirozenější poslech např. lidské řeči, rozhodl jsem se zařadit jako druhou testovanou možnost i krátkou nahrávku lidské řeči.

V rámci vyhodnocení budou posluchači do sluchátek pouštěny nahrávky, ve kterých bude znít zvuk z konkrétních směrů, a on bude mít za úkol vyjádřit, z jakého směru zvuk slyší. Směr, který oznámí posluchač, se poté porovná se skutečnou pozicí a od něj bude možné vyhodnotit odchylku.

Pro porovnání výsledků bude použit zároveň mikrofon kulové charakteristiky, jehož nahrávky poté budou synteticky zpracovány do ambisonického B formátu, aby směrem šíření zvuku odpovídaly reálnému umístění reproduktorů při nahrávání. Toto může být teoreticky provedeno pro ambisonii až 7. řádu, jelikož dostupné pluginy umožňující syntetické vytvoření ambisonické nahrávky z mono, typicky pracují většinou právě až do tohoto řádu (viz např. [38] a [39]). V tomto bude spočívat též hlavní rozdíl od článku popsaném v sekci 3.5, jelikož zde byly porovnávány pouze samotné ambisonické mikrofony.

#### ■ 4.1.2 Test směrové lokalizace B

Druhá navržená metoda spočívá v určení nejmenšího postřehnutelného rozdílu mezi dvěma směry (MAA), ze kterých je šířen zvuk. Pokud se podíváme na sekci 2.5, věnující se přesnosti lokalizace v rámci různých řádů ambisonie, jsou patrné lokalizační chyby pohybuující se okolo 15° pro třetí a pátý řád ambisonie a dokonce okolo 25° pro první řád (viz oddíl 2.5). Hypotézou tedy



je, že se dají očekávat odlišné výsledky pro mikrofony s různými řády i ve schopnosti člověka z jejich nahrávek rozeznat rozdíly směrů šíření zvuku.

Podle informací zmíněných v sekci 2.4 je člověk nejlépe schopen rozlišovat mezi směry, odkud přichází zvuk, přímo před sebou. Po stranách je tato schopnost nižší. Abychom tedy využili potenciál vnímání člověka, navrhuji nahrávat mikrofony situaci, kdy budou využity dva stejné reproduktory, které se umístí na pomyslnou kružnici okolo mikrofonu, přičemž budou vůči sobě zrcadlově se středem v úhlu  $0^\circ$  (čelní pohled člověka), např.  $45^\circ$  vlevo a  $-45^\circ$  vpravo. Vždy bude přehrán zvuk z jednoho reproduktoru a poté z druhého, přičemž postupně budou oba reproduktory posouvány blíže středu  $0^\circ$ , až jej dosáhnou. Tato situace bude po zpracování posluchači přehrávána do sluchátek. Očekává se, že při výsledném poslechu v jistém bodě již posluchač nebude schopen rozeznat mezi mírně odlišnými směry.

Stejně jako v předchozím případě (sekce 4.1.1) se jako testovací stimul použije růžový šum, avšak s kratší délkou, aby bylo možné posuzovat rozdíly mezi dvěma nahrávkami rychle za sebou.

Posluchač ze sluchátek vždy zaslechne nahrávku, ve které se šíří zvuk z jedné pozice a ihned poté z druhé zrcadlové. Ve chvíli, kdy již mezi nimi neuslyší směrový rozdíl, odkud zvuk slyší, označí tuto nahrávku jako konečnou. Z takto označené nahrávky bude možné zjistit rozdílový úhel, který již z nahrávky není možné postřehnout.

Je nutné, aby toto nahrávání bylo provedeno pro všechny testované mikrofony za stejných podmínek, tedy je potřeba umístit reproduktory i při opakování do stejných odpovídajících pozic. Dále je potřeba zajistit, aby oba reproduktory použité pro tuto metodu zněly pro člověka nerozlišitelně a nebyl je z mikrofonních nahrávek schopen rozeznat již na základě např. odlišné barvy tónu či hlasitosti. Reproduktory by tedy měly být stejného typu se stejnými frekvenčními charakteristikami.

Stejně jako v případě metody A bude jako reference použita mono nahrávka ze všesměrového mikrofonu, která bude zpracována do ambisonického B formátu v umístění odpovídajícímu skutečné pozici reproduktoru pro danou situaci.

## 4.2 Kvalita zvuku

Výsledný prostorový vjem z poslechu nahrávky zřejmě nejvíce utváří posluchačovu schopnost lokalizovat zdroje zvuku. Právě tato vlastnost přináší výhodu ambisonie pro použití např. do virtuální reality. Avšak i pokud bychom byli schopni lokalizovat např. každý hudební nástroj v rámci přehrávané scény, vjem z nahrávky by nebyl tak dobrý, pokud i samotný zvuk nebude kvalitní. Rozhodl jsem se proto kromě přesnosti lokalizace otestovat mikrofony i z pohledu kvality zvuku. Tento experiment navrhuji provést tak, že budou vybrány testovací sekvence z oblasti zvuků hudebních nástrojů, hudby i řeči, které se budou přehrávat do reproduktorů. Tato scéna bude nahrávána testovaným mikrofonom a jeho zpracovanou nahrávku si poslechne posluchač prostřednictvím sluchátek a ohodnotí její kvalitu oproti ostatním.



## Kapitola 5

### Návrh metodiky – technická stránka

#### 5.1 Podmínky nahrávacích prostor

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, metodika by měla být přizpůsobena místním podmínkám katedry radioelektroniky. Cílem této kapitoly tedy je popsat, s čím je nutné se vypořádat z technické stránky věci.

Prostory audiovizuálního studia na katedře radioelektroniky jsou akusticky upraveny jako poslechová místnost s akustickými deskami na stěnách. Studio disponuje mimo jiné následující technikou:

- Reprodukory *M-Audio Studiophile BX8* – 4 ks (označené čísla 1 – 4),
- Mixážní pult *Behringer X32 Compact*,
- Stagebox *Midas DL32*,
- Mikrofon *Rode NT2-A*,
- Mikrofon *Neumann KU100* (umělá hlava),
- Ambisonický mikrofon *Sennheiser Ambeo VR Mic*.

##### 5.1.1 Frekvenční charakteristiky reproduktorů

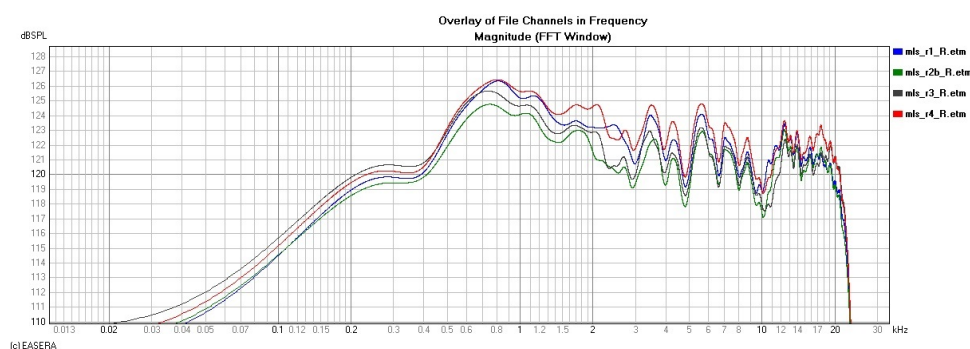
Vzhledem k tomu, že navržený lokalizační test B (viz 4.1.2) vyžaduje dva reproduktory, které „znějí stejně“, musely být u dostupných reproduktorů (*M-Audio Studiophile BX8*) změřeny frekvenční charakteristiky, aby bylo možné vybrat co nejpodobnější pár.

Měření impulzové odezvy metodou MLS probíhalo za pomoci softwarového elektroakustického analyzátoru *Easera 1.2.13* a měřicího mikrofону *iSEMcon EMX-7150*, který byl připojen k počítači prostřednictvím zvukové karty *RME Fireface UCX*. Reprodukory se měřily ve dvou pozicích, a to ve vzdálenosti 1,5 metru mikrofon–reproduktor. Dvě pozice v azimutu  $45^\circ$  a  $-45^\circ$  byly vybrány na základě toho, že reprezentují jedno z umístění, odkud bylo poté plánováno provádět nahrávání (viz obrázek 5.1).

Z měření vyplynulo, že ve frekvenčních charakteristikách jednotlivých reproduktorů jsou rozdíly zejména v oblasti kolem 3 kHz, jak ukazuje obrázek 5.2.



**Obrázek 5.1:** Měření impulzové odezvy reproduktorů



**Obrázek 5.2:** Frekvenční charakteristiky dostupných reproduktorů (při umístění na pravé straně)

Při jejich porovnání subjektivním poslechem růžového šumu se však ukázalo, že rozdíly mezi všemi dvojicemi jsou natolik zásadní, že by je zřejmě bylo možné rozeznat již na základě odlišné barvy zvuku, nehledě na umístění. Na základě toho bylo rozhodnuto, že pro lokalizační část bude pro zaručení stejných podmínek všech nahrávek využít pouze jeden reproduktor, jehož pozice se bude měnit. Pro část subjektivní kvality zvuku byly vybrány charakteristikou nejpodobnější reproduktory, označené č. 2 a 3.

Frekvenční charakteristiky jednotlivých reproduktorů, včetně původních souborů s naměřenými daty ze SW EASERA, jsou k dispozici v datové příloze.

### 5.1.2 Měření doby dozvuku nahrávací místnosti

Z impulzových odezví, kterými se zabývala předchozí sekce, byla orientačně stanovena doba dozvuku místnosti. Výsledky měření ukazují tabulky v příloze A.1. Bylo zjištěno, že podle měření na obou reproduktorových pozicích má místnost relativně vyrovnanou dobu dozvuku. Hodnota T30 se v rámci pásma 250 Hz–8 kHz pohybovala okolo 0,27 sekundy s odchylkou do  $\pm 20\%$ . (Dle [40] zmiňuje norma ČSN 73 0526 toleranci  $\pm 20\%$  v rámci sledovaného rozsahu, aby bylo možné považovat dobu dozvuku za vyrovnanou).



**Obrázek 5.3:** Ověřování vlivu dvou mikrofonů vedle sebe

### ■ 5.1.3 Možnosti umístění testovaných mikrofonů

Před provedením nahrávacího experimentu je jako první potřeba rozhodnout, jak umístit testované mikrofony. Pro zajištění identických podmínek, bez nutnosti opakování pro každý mikrofon, se nabízí myšlenka nahrávat se všemi mikrofony zároveň. V takovém případě však narážíme na možné ovlivnění mikrofonů navzájem v podobě tvorby překážky a především faktu, že není možné umístit více mikrofonů do stejného bodu zároveň. Mikrofony by v takovém případě musely být každý v mírně odlišné poloze, což by znamenalo i jejich odlišnou pozici vůči zdroji zvuku, a tudíž nemožnost přímo porovnávat výsledky mezi sebou.

Vzájemné ovlivnění mikrofonů proto bylo ověřeno nahrávkou s využitím dostupného ambisonického mikrofonu Sennheiser Ambero VR Mic a umělou hlavou Neumann KU100. Mikrofony byly umístěny vedle sebe tak, že každý v určitém azimutu stínil druhý vůči okolo nich posouvanému reproduktoru. Experiment byl zopakován i za podmínek, kdy se pozice mikrofonů navzájem zaměnily (viz obrázek 5.3).

Podle očekávání se ukázalo, že umělá hlava měla kvůli svým větším rozměrům zásadnější vliv na zastínění mikrofonu Ambeo, než naopak. Tento vliv byl patrný již při pohledu na nižší úroveň signálu z mikrofonních kapslí mikrofonu Ambeo oproti nezastíněnému stavu. Dále byl proveden zběžný poslechový test, který ukázal snížení subjektivní schopnosti lokalizovat zdroj zvuku ze zpracované nahrávky při poslechu na sluchátka, pokud je mikrofon zastíněn druhým.



- 05 Female Speech (English),
- 06 Flute (melodious phrase),
- 07 Accordion (melodious phrase),
- 08 Oboe (melodious phrase),
- 09 Xylophone (melodious phrase),
- 10 Organ (melodious phrase),
- 11 Puccini: O mio babbo caro,
- 12 Strauss: Also sprach Zarathustra,
- 13 Oscar Lindberg: Konsertfantasi.

### ■ 5.2.2 Testovací sekvence - směrová lokalizace

Pro směrově lokalizační experimenty byly vytvořeny testovací sekvence v podobě růžového šumu, k čemuž byl využit zvukový editor Audacity. V případě experimentu A (4.1.1) byla zvolena délka trvání 1 sekunda, z níž 0,3 sekundy tvoří postupný náběh a 0,3 sekundy postupné zeslabování. Pro experiment B (4.1.2) byla vytvořena sekvence o délce 10 sekund s postupným náběhem a postupným zeslabováním o délce 2,5 sekundy. Jako druhá testovací sekvence pro experiment B byla zvolena lidská řeč, pro což byla využita nahrávka č. 05 ze seznamu skladeb pro experiment testující kvalitu zvuku (5.2.1). V tomto případě byla nahrávka zkrácena na délku 6 sekund, s ohledem na to, jak bylo možné rozdělit řeč na celé věty. Stejně jako v předchozí sekci jsou testovací sekvence součástí datové přílohy.





## Kapitola 6

### Navržená metodika – realizace

V této kapitole bude popsán postup realizace metodiky, včetně konkrétních pomůcek a prostředků, což může sloužit jako návod pro případné pokračovatele v navržených experimentech.

#### 6.1 Příprava místnosti

K samotné přípravě místnosti budou využity následující pomůcky: úhломěrová šablona, metr, lepicí páska, permanentní popisovač, provázek, připínáček nebo malý vrut a kus kartonu.

Postup přípravy místnosti:

1. Vytvoření dostatečného prostoru pro kruh s poloměrem 1,5 metru.
2. Určení středu kruhu a umístění pomocné úhломěrové šablony na jeho místo.
3. Fixace šablony na podlaze lepicí páskou.
4. Vytyčení obvodu kruhu za pomoci napnutého provázku, jehož jeden konec je přichycen do středu šablony. Provázkem je udržována konstantní vzdálenost od středu 1,5 metru a lepicí páskou jsou označovány body po obvodu kruhu s rozestupy  $10^\circ$ .
5. Speciálně okolo bodu  $0^\circ$  jsou sousední body označeny v rozestupu po  $5^\circ$ .

#### 6.2 Příprava techniky

Experimenty je možné provést např. s následujícím technickým vybavením. Zejména mixážní pult a stagebox však lze nahradit libovolnou zvukovou kartou s dostatečným počtem kanálů.

- Ambisonické mikrofony, které chceme testovat
- Mixážní pult *Behringer X32 Compact*
- Stagebox *Midas DL32*

- Mikrofon *Rode NT2-A*
- Mikrofon *Neumann KU100* (umělá hlava)
- Dva kusy reproduktorů *M-Audio Studiophile BX8* s označením č. 2 a 3
- Stojany pro veškeré mikrofony a reproduktory

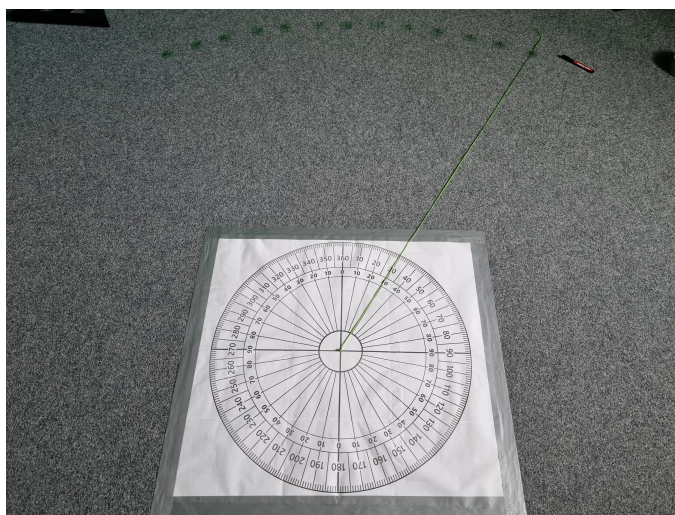
### 6.3 Pozice reproduktorů

Pro oba lokalizační experimenty je nutné kolem pozice pro mikrofon vytvořit pomyslný kruh a zaměřit na něm testované azimuty. To je možné provést pomocí úhloměrové šablony, která se umístí doprostřed nahrávací plochy a bude tvořit střed pro umísťování mikrofonů.

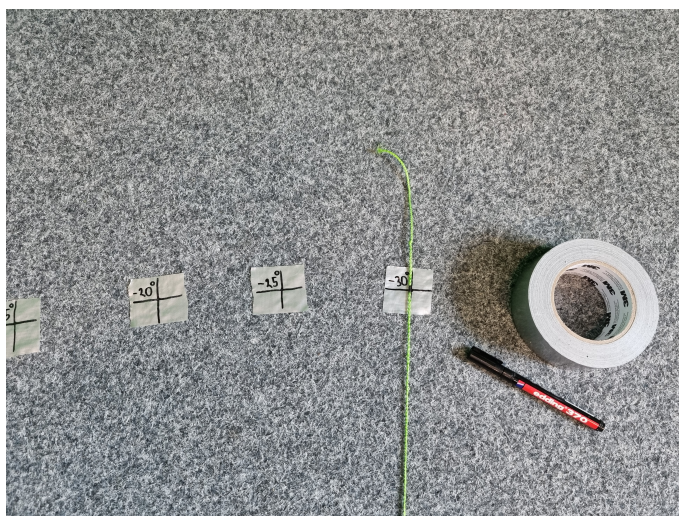
Úhloměrových šablon je k sehnání celá řada, pro navržené experimenty byla připravena šablona z webu [45]. Aby s ní bylo možné snadněji vyměřovat s co největší přesností, je vytištěna do velikosti kruhu s poloměrem přibližně 40 cm. Šablonu je potřeba připevnit k podkladu lepicí páskou, aby s ní nebylo možné pohybovat.

K vyměření jednotlivých pozic pro reproduktory se spolu s úhloměrovou šablonou použije provázek, jehož jeden konec se uváže na vrut či připínáček, který se poté zachytí do středu šablony. Pro správné uchycení je vhodné pod šablonu umístit např. kus kartonu jako podložku.

Od středu šablony se provázek natáhne a podle požadovaného poloměru kruhu se naměří a označí délka provázku. S označenou délkou provázku je již možné protahovat jednotlivé úhly na šabloně a vyměřovat díky nim požadované pozice pro umístění reproduktorů. Vyměřené pozice se označí kusem lepicí pásky, na kterou se kromě zakreslení bodu zapíše hodnota daného úhlu. (viz obrázky 6.1 a 6.2).



**Obrázek 6.1:** Vyměrování pozic pro reproduktory



**Obrázek 6.2:** Označené pozice pro reproduktory

Poloměr kruhu je potřeba navrhnout na základě požadavků na rozestupy mezi jednotlivými body a možnostmi nahrávací místnosti. Pokud uvažujeme nejmenší rozdíly mezi úhly  $5^\circ$  a mezi body má být pro nenulové rozměry reproduktorů alespoň 10 cm, nabízí se využít poloměr kruhu 1,5 m. V takovémto případě bude délka pětistupňového oblouku mezi body rovna přibližně 13 cm. Vzhledem k rozměrům nahrávací místnosti, kde je nejmenší vzdálenost mezi stěnami 4 m, je tento poloměr kruhu realizovatelný.

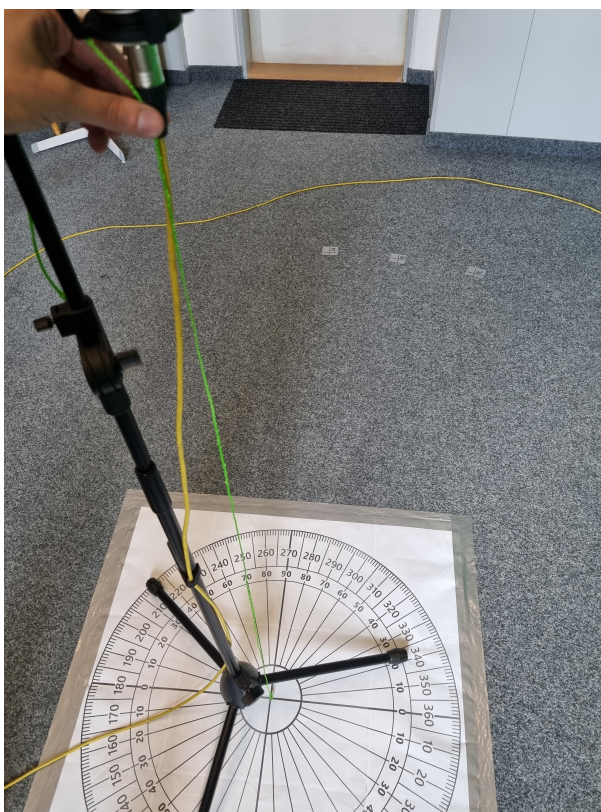
Pro směrově lokalizační experiment B (4.1.2) je navrženo využívat přední polovinu kruhu, kde budou pozice symetricky napravo i nalevo (kladné i záporné hodnoty stejných úhlů). Rozestupy mezi nimi jsou po  $10^\circ$  v části bodů s azimuty od  $\pm 90^\circ$  do  $\pm 50^\circ$  a dále od bodu  $\pm 45^\circ$  do  $0^\circ$  s menšími rozestupy  $5^\circ$ .

V experimentu A (4.1.1) je kromě bodů z předchozí zmiňované části potřeba označit také azimuty, které jsou zvoleny v zadní polovině kruhu. Celkem je navrženo testovat šest pozic reproduktorů, kdy jednotlivé pozice musí být po kruhu rozptýleny tím způsobem, aby se zbytečně nevyskytly dvě zrcadlové pozice (např.  $20^\circ$  a  $-20^\circ$ ). Konkrétní navržené pozice reproduktorů jsou tedy s azimuty  $120^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-70^\circ$ ,  $-90^\circ$  a  $-165^\circ$ .

Při nahrávkách pro testování kvality zvuku se využijí dva reproduktory v režimu stereo na pozicích  $30^\circ$  a  $-30^\circ$ .

## 6.4 Pozice mikrofonů

Postupné střídání jednotlivých mikrofonů na stejné pozici se dá zajistit pomocí vyznačeného bodu na zemi, nastavení stejné výšky mikrofonů na stativu a poté jejich zaměření na vyznačený bod pomocí olovnice, kterou může tvořit provázek s drobným závažím, jež se vystředí na požadovanou pozici (viz obrázek 6.3).



Obrázek 6.3: Zaměřování polohy mikrofonu

## 6.5 Zapojení reproduktorů a mikrofonů

Veškerá použitá zvuková technika se zapojí do mixážního pultu prostřednictvím stageboxu, který usnadňuje a zpřehledňuje nastavení více zapojených mikrofonů a reproduktorů zároveň. Pro mikrofony je potřeba zapnout fantomové napájení. U ambisonických mikrofonů je pro správnou funkci potřeba nastavit stejný zisk pro všechny jejich výstupy. Vše však záleží na konkrétních požadavcích testovaných mikrofonů.

## 6.6 Postup nahrávání

Na PC připojeném k mixážnímu pultu si v DAW Reaper nastavíme zvukové stopy z jednotlivých kanálů vstupů mikrofonů a výstupů do reproduktorů. Doprostřed nahrávacího prostoru umístíme první testovaný mikrofon.

### 6.6.1 Nahrávání testu směrové lokalizace A

Test směrové lokalizace A (viz bod 4.1.1) bude nahráván následovně. V DAW si do zvukové stopy nakonfigurované pro výstup do reproduktorů vložíme testovací sekvenci, v tomto případě růžový šum a nahrávku lidské řeči. Před-



připravený projekt pro DAW Reaper je k dispozici v datové příloze (viz obsah v příloze C).

Reproduktor umístíme na první pozici, v DAW aktivujeme nahrávání a současně s tím spustíme přehrávání testovací sekvence do reproduktoru. Po dokončení přehrávání sekvence nahrávání zastavíme a reproduktor přemístíme na další vyznačenou pozici a opakujeme stejný postup jako u první pozice. Jednotlivé nahrávky průběžně ukládáme, přičemž je vhodné nastavit číslování pořadí nahrávek a tato čísla evidovat, aby bylo jasné, jaké číslo nahrávky odpovídá jaké pozici reproduktoru.

Když provedeme tento postup pro všechny požadované pozice reproduktorů, vyměníme testovaný mikrofon za další a celý postup opakujeme. Přičemž v případě referenčního mikrofonu stačí nahrávat pouze v pozici reproduktoru 0°.

## ■ 6.6.2 Nahrávání testu směrové lokalizace B

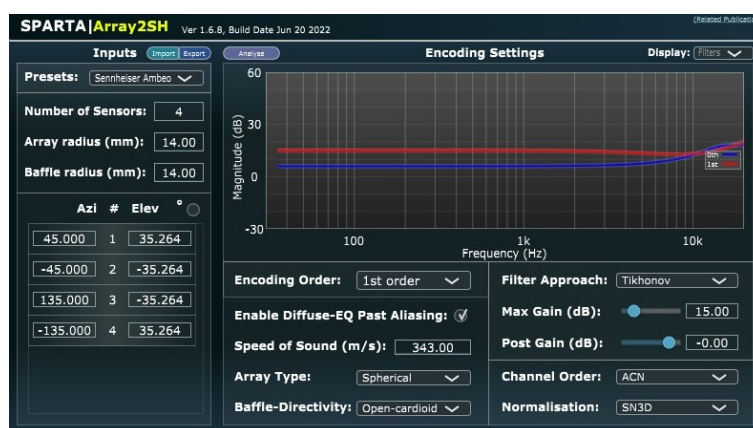
Druhý test směrové lokalizace (viz bod 4.1.2) bude mít postup obdobný jako v předchozím případě, s tím, že však bude využita jiná testovací sekvence a nahrávání bude nutné provést ve více pozicích reproduktorů.

## ■ 6.7 Zpracování nahrávek

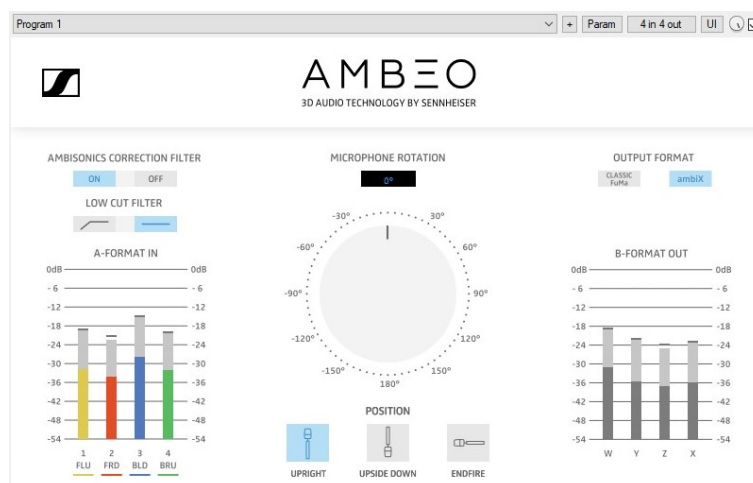
Před samotným poslechem nahrávek na sluchátka je potřeba provést jejich zpracování. To je možné provést v prakticky libovolném DAW (*Digital audio workstation*), který umožňuje práci s pluginy, avšak postup je otestován v DAW *Reaper*. Před hlavním zpracováním je vhodné veškeré nahrávky sestříhat, aby neobsahovaly přebytečné části.

### ■ 6.7.1 Konverze do B formátu

Veškeré nahrávky z ambisonických mikrofonů bývají zaznamenány v A formátu, ve kterém jednotlivé kanály odpovídají výstupům mikrofonních kapslí. Abychom s nimi mohli dále pracovat, je nutné je převést do ambisonického B formátu. Takové zpracování se liší v závislosti na konkrétním ambisonickém mikrofonu. Je možné ho provést pomocí pluginů dodaných přímo výrobcem mikrofonu, případně některým z univerzálních jako je např. *Array2SH* ze sady pluginů *SPARTA* (na obrázku 6.4, více viz [46]). Na obrázku 6.5 je možné vidět plugin *AMBEO A-B Converter*, který je výrobcem dodáván k mikrofonu *Sennheiser AMBEO VR Mic*. První zmiňovaný plugin je možné použít i pro již dříve zmiňovaný prototyp ambisonického mikrofonu, který je připravován na katedře.



Obrázek 6.4: Plugin SPARTA Array2SH



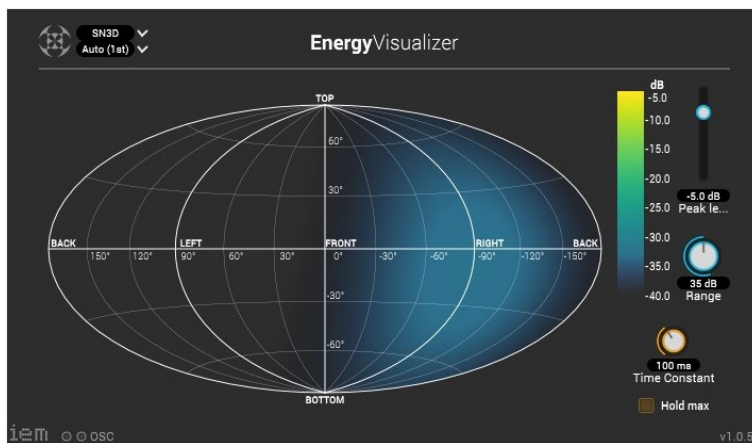
Obrázek 6.5: Plugin Sennheiser AMBEO A-B Converter

### 6.7.2 Ověření nahrávek v B formátu

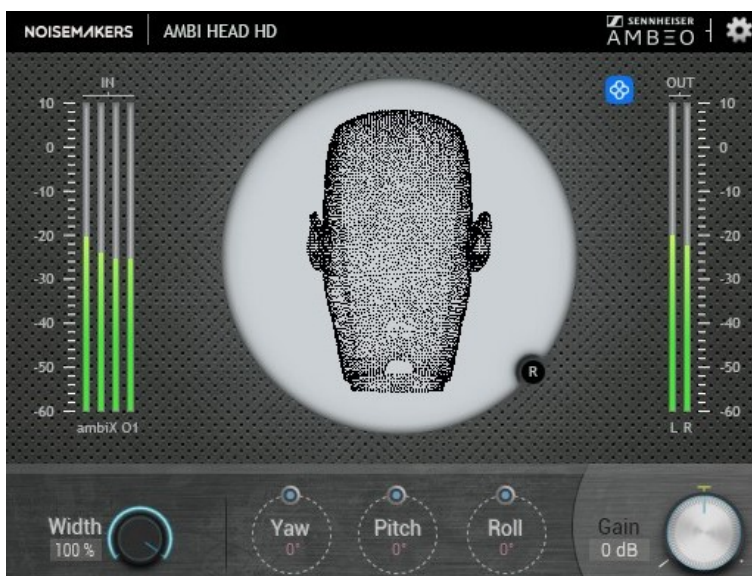
Pokud již máme nahrávky převedeny do ambisonického B formátu, je možné např. pomocí pluginu *Energy Visualizer* ze sady *IEM* (viz [47]) vizuálně ověřit, zda se zobrazuje šíření zvuku ze správných směru, jako tomu bylo při nahrávání (viz obrázek 6.6).

### 6.7.3 Binauralizační konverze

Poslední úpravou, kterou je nutné provést před poslechem na sluchátka, je využití binauralizačního pluginu. Mezi takové patří např. *AmbiHead* ze sady *NoiseMakers* (viz obrázek 6.7). V konfiguraci pluginu je potřeba zvolit ambisonický řád nahrávky. Zároveň je možné vybrat využitou HRTF, která je ve výchozím nastavení z umělé hlavy Neumann KU100.



Obrázek 6.6: Plugin IEM Energy Visualizer



Obrázek 6.7: Plugin AmbiHead





## Kapitola 7

### Ověření metodiky

Navržená metodika, jak ji popisují předchozí kapitoly, byla ověřena s dostupnou technikou audiovizuálního studia katedry radioelektroniky. Nahrávání bylo naplánováno s využitím ambisonického mikrofonu prvního řádu Sennheiser Ambeo VR Mic a sférického mikrofonu 3. řádu, jenž je vytvářen v rámci katedry (viz obrázek 7.1). Druhý zmiňovaný mikrofon se však, ani přes veškerou snahu jeho autora, nepodařilo z technických důvodů zprovoznit. Metodika tedy mohla být ověřena pouze s jediným ambisonickým mikrofonem Ambeo VR Mic, přičemž bylo rozhodnuto, že se pro možnost porovnání nahrávky provedou i binaurálním mikrofonem Neumann KU 100 ve tvaru umělé hlavy.

Ověření bylo též doplněno nahrávkami mikrofonu Rode NT2-A v režimu kardioidní charakteristiky, které po zpracování posloužily jako simulace ambisonické nahrávky 3. řádu. Toto zpracování probíhalo za pomoci pluginu NoiseMakers AmbiPan, s nímž byl zvuk z nahrávek postupně napolohován do jednotlivých pozic skutečných reproduktorů, které byly využity pro směrově lokalizační experimenty 4.1.1 a 4.1.2.

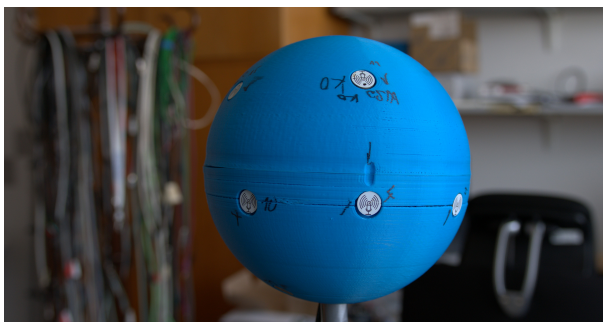
Veškeré nahrávání probíhalo do počítače s DAW Reaper, k němuž byl jakožto zvuková karta přes USB zapojen mixážní pult Behringer X32 Compact. Jednotlivá zvuková zařízení byla zapojena do stageboxu Midas DL32, přičemž z něj byl do mixážního pultu přenášen signál prostřednictvím protokolu AES50.

Všechny mikrofony, se kterými bylo prováděno nahrávání, jsou pro ilustraci vidět pohromadě na obrázku 7.2. Během experimentů byl však v souladu s navrženou metodikou využíván vždy pouze jediný mikrofon v jeden čas, kdy byl umístěn doprostřed nahrávacího prostoru.

Veškeré nahrávky, včetně verzí po zpracování pluginy, jsou k dispozici v datové příloze (viz její obsah v příloze C).

#### 7.1 Přehrávání pro posluchače

Pilotního ověření se zúčastnili celkem tři posluchači, kteří neměli žádné předchozí zkušenosti s poslechovými testy. K poslechu byla využita sluchátka Sennheiser HD 200.



**Obrázek 7.1:** Ilustrační fotografie sférického mikrofonu vyvíjeného na katedře



**Obrázek 7.2:** Ilustrační pohled na všechny použité mikrofony

### 7.1.1 Ověření směrově lokalizačního experimentu A

Nejprve byly hodnoceny nahrávky experimentu A (4.1.1), při kterých byl posluchač usazen za stůl, na kterém byla umístěna úhломěrová šablona. Posluchač byl seznámen s tím, že mu budou do sluchátek přehrávány testovací sekvence a jeho úkolem bude po vyslechnutí dané nahrávky označit do šablony směr, odkud slyší zvuk přicházet. Posluchači nebyly známy polohy reproduktorů, při kterých byly nahrávky pořízeny, tedy nemohl dedukovat, kde by se která sekvence mohla směrově nacházet.

Hodnocení proběhlo celkem pro šest sad nahrávek, přičemž se jednalo o různý šum a lidskou řeč pro každý ze tří mikrofonů. Délka přehrávání záležela na samotném posluchači, který si mohl nahrávku poslechnout tolikrát, kolikrát chtěl, aby byl schopen označit směr, odkud zvuk slyší. Jednotlivé pozice, které posluchač označoval, byly očíslovány (1–6), přičemž čísla se náhodně měnila pro každou sadu nahrávek, aby posluchač nebyl ovlivněn volbou mezi sadami. Stejně tak bylo vždy náhodné pořadí v testování jednotlivých sad nahrávek.

Po vyhodnocení všech sad nahrávek byly do šablon zaznamenány také skutečné pozice reproduktorů, jako tomu bylo při nahrávání, aby bylo zřejmé, jaké jsou odchylky od posluchačem určených pozic. Oskanované šablony po vyplnění od posluchačů jsou k dispozici v datové příloze (viz obsah v příloze C).

### 7.1.2 Ověření směrově lokalizačního experimentu B

Ověření experimentu B (4.1.2) probíhalo způsobem, že posluchači byly postupně přehrávány nahrávky vždy ze dvou směrů těsně po sobě a jeho úkolem bylo oznámit, zda mezi nimi v danou chvíli vnímá rozdíl z pohledu směru. Nejprve byly přehrávány směry s úhlovým rozdílem  $180^\circ$  (azimuty  $90^\circ$  a  $-90^\circ$ ) a postupně se rozdíl zmenšoval až do nuly, přičemž od azimutu  $45^\circ$ , resp.  $-45^\circ$  byl krok přibližování  $5^\circ$  po obou stranách. Nejmenším nenulovým rozdílem mezi směry, které byly testovány, byl rozdíl  $5^\circ$  u nahrávek s azimuty  $5^\circ$  a  $0^\circ$ . Jak již bylo dříve zmíněno (5.2.2), jako testovací stimul byl využit různý šum.

### 7.1.3 Ověření kvality zvuku

Poslech nahrávek týkajících se kvality zvuku probíhal stylem porovnání záznamu mikrofonem Ambeo a umělé hlavy Neumann KU100, kdy posluchač měl za úkol označit, kterou ze dvou nahrávek preferuje více. Nebylo mu známo, která nahrávka je ze kterého mikrofonu, pouze mu bylo sděleno, že se jedná o dva záznamy stejných skladeb dvěma mikrofony. Vždy mu byla podle seznamu skladeb (viz 5.2.1) přehrávána nahrávka z jednoho mikrofonu a vzápětí z druhého, přičemž si mohl říci o opětovné přehrávání, kolikrát uznal za vhodné. Když si byl svou preferencí jistý, označil svou volbu na papír se seznamem skladeb. Možnou volbou bylo i konstatování, že mezi nahrávkami posluchač není schopen rozlišit, tedy žádnou preferenci při poslechu dané skladby nemá.

## 7.2 Výsledky pilotního ověření

Kompletní výsledky z provedeného pilotního ověření jsou k dispozici v příloze B. V souladu se zadáním se jedná pouze o orientační ověření, data pro případné podrobnější analýzy poskytuje datová příloha `vysledky_exp.xlsx`.

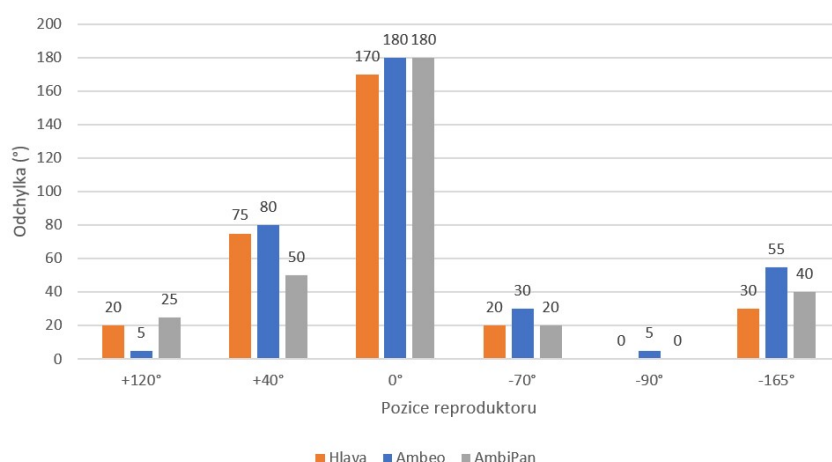
### 7.2.1 Výsledky z ověření experimentu A

Z vyhodnocení experimentu A (4.1.1), které nalezneme v příloze B.1, je patrné, že mezi výsledky přesnosti určení směru přicházejícího zvuku jsou podle očekávání rozdíly napříč testovanými mikrofony i mezi jednotlivými posluchači. Vzhledem k tomu, že se jednalo pouze o pilotní ověření, kterého se účastnili pouze tři lidé, nedají se z výsledků dělat statistické závěry, což však ani není předmětem této práce. Avšak i přesto je možné pozorovat některé předpokládané tendence, že odchylky určených azimutů jsou blíže realitě v případě nahrávek z umělé hlavy, poté synteticky vytvořené ambisonické nahrávky 3. řádu a jako nejméně přesné u ambisonického mikrofону 1. řádu Sennheiser Ambeo VR Mic. Jsou zde také patrná velmi častá předozadní zmatení, kdy posluchači např. zaměnili azimut  $0^\circ$  a  $180^\circ$  nebo jinou dvojici azimutů, jež má stejnou meziuší diferenci (viz kapitola 2). Co se týče vlivu rozdílného testovacího stimulu (růžový šum nebo lidská řeč), tak rozdíly mezi jejich výsledky se z ověřovacího experimentu nejeví jako příliš zásadní.

Chyby v určení směru z nahrávek umělou hlavou Neumann KU100 mohly být z velké části způsobeny odlišností její HRTF od HRTF daného posluchače. Vzhledem k tomu, že i ambisonické nahrávky z mikrofónu Ambeo a syntetické z pluginu AmbiPan byly pro poslech na sluchátka zpracovány s využitím HRTF právě tohoto typu umělé hlavy, je možné uvažovat výsledky z umělé hlavy jako referenci, vůči které by nemělo být dosaženo lepších výsledků. Pokud bychom tedy určovali odchylky měření z ambisonických nahrávek vůči měření z hlavy, dá se uvažovat, že chyby jsou způsobeny pouze daným mikrofónem, resp. ambisonickým řádem, nikoliv rozdílnou HRTF. Tabulky s odchylkami azimutů, které byly určeny jednotlivými subjekty pro nahrávky Ambeo a AmbiPan, vůči nahrávkám z umělé hlavy, jsou k dispozici v příloze B.1.3 (tabulky B.13 až B.17). I z nich je patrné, že odchylky jsou větší u ambisonie prvního řádu, než u nahrávek řádu třetího<sup>1</sup>.

Na obrázku 7.3 můžeme pro ilustraci vidět porovnání odchylek azimutů, které určil subjekt A vůči skutečnému azimutu reproduktoru v případě stimulu růžový šum. Porovnání odchylek pro ostatní subjekty, stejně tak jako pro stimul lidská řeč, nalezneme v příloze B.1.

<sup>1</sup>Vysoká průměrná odchylka AmbiPan u subjektu B je způsobena záměnou  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .



**Obrázek 7.3:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu A (růžový šum)

## 7.2.2 Výsledky z ověření experimentu B

U směrově lokalizačního experimentu B se bohužel nepotvrdila očekávaná hypotéza, že mezi mikrofony budou rozdíly i z pohledu rozlišitelnosti dvou směrů, odkud přichází zvuk. Posluchači byli u nahrávek ze všech mikrofonů schopni rozeznat rozdíly do obdobné přesnosti (viz příloha B.2).

Konkrétně do druhého nejmenšího rozdílu azimutů ( $10^\circ$ ), se kterým byly nahrávky provedeny (pozice  $5^\circ$  a  $-5^\circ$ ), byli všichni posluchači schopni rozeznat rozdíl u mikrofonu Ambeo i umělé hlavy. Rozeznání i nejmenšího nenulového rozdílu ( $5^\circ$ ) mezi pozicemi  $0^\circ$  a  $5^\circ$  uváděli dva ze tří posluchačů, a to v případě nahrávek z umělé hlavy.

Ukázalo se tedy, že ačkoliv mezi výsledky pro mikrofon Ambeo a pro umělou hlavu rozdíly shledáváme, jsou natolik malé (v řádu jednoho testovaného kroku), že se z nich nedají dělat závěry.

Z tohoto důvodu nakonec nebylo přistoupeno ke stejnému ověření pro syntetickou nahrávku 3. řádu z pluginu AmbiPan, jelikož by se výsledek nacházel zřejmě někde mezi zmiňovanými kroky ( $5^\circ$ ;  $-5^\circ$ ) a ( $0^\circ$ ;  $5^\circ$ ), tedy by z testu nebylo možné skutečnou hranici určit.

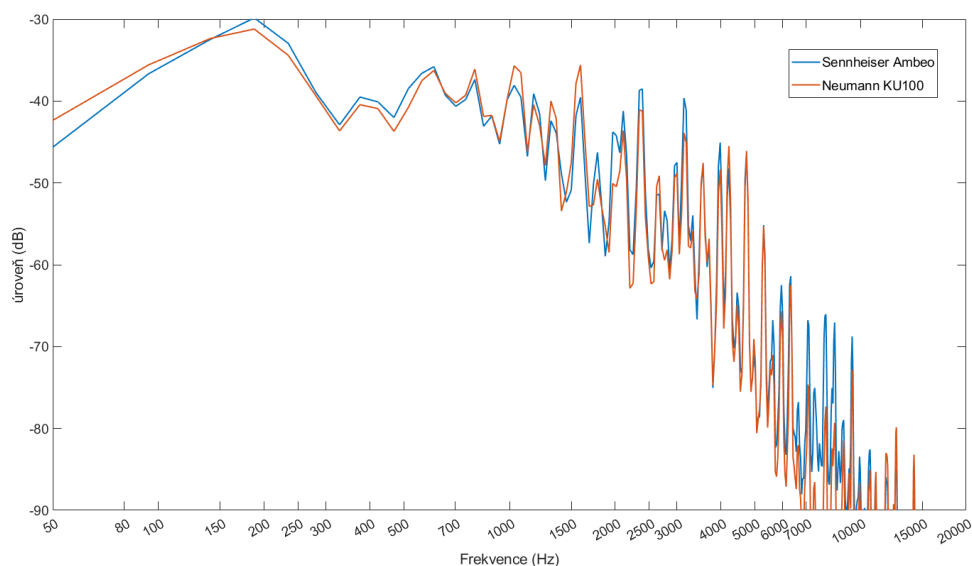
Přesnějších výsledků by bylo možné docílit pouze v případě, pokud by bylo provedeno nahrávání s menšími rozestupy mezi pozicemi reproduktorů. Zvolené rozestupy  $5^\circ$  však již byly nejmenší, které bylo za prostorových podmínek místnosti (maximální poloměr kruhu a daná velikost reproduktorové soustavy) možné vyměřit s dostatečnou přesností (viz 6.3).

Nahrávky z mikrofonu Ambeo byly pro kontrolu analyzovány v pluginu IEM Energy Visualizer, který orientačně umožňuje vizualizovat směry, odkud byl zaznamenán zvuk. Při porovnání tohoto grafického znázornění nahrávek z azimutů  $5^\circ$ ,  $0^\circ$  a  $-5^\circ$ , je patrné, že se i mezi nimi objektivně nacházejí drobné směrové rozdíly. Tyto rozdíly jsou však natolik nepatrné, že je možné je postřehnout pouze v případě přepínání mezi jednotlivými obrázky. Proto jsou tyto obrázky k dispozici pouze v adresáři datové přílohy `energy-visualizer`.

### 7.2.3 Výsledky z ověření kvality zvuku

Ověření kvality zvuku ukázalo (viz příloha B.3), že vybraní posluchači nebyli příliš schopni rozeznat rozdíly mezi nahrávkami. Pouze jeden ze tří posluchačů u většiny skladeb určil jednu z nahrávek jako preferovanou. Zbylí dva posluchači uváděli, že vnímají rozdíly pouze u skladeb č. 10 a 13, kde preferovali v obou případech nahrávky z mikrofonu Ambeo. V obou případech se jednalo o skladby, kde dominovaly varhany, tedy hudební nástroj s relativně širokým frekvenčním rozsahem.

Frekvenční spektrum dotyčných nahrávek bylo zanalyzováno v SW Audacity, z čehož bylo zjištěno, že v případě umělé hlavy jsou potlačeny vyšší střeďy, resp. výšky od 6 kHz, které jsou u těchto skladeb zřejmě podstatné. Toto potlačení je patrné u všech nahrávek, tedy je zřejmě způsobené charakteristikou daného mikrofonu. Vliv na poslech se však neprojevil při všech skladbách. Na obrázku 7.4 je vidět pro ilustraci porovnání frekvenčního spektra z nahrávek mikrofonem Sennheiser Ambeo VR Mic a umělou hlavou Neumann KU100 pro skladbu č. 10.



**Obrázek 7.4:** Porovnání frekvenčního spektra u skladby č. 10

Z pilotního ověření experimentu je patrné, že mezi mikrofony jsou detekovatelné rozdíly v barvě zvuku. Pro relevantnější zhodnocení kvality zvuku by však bylo vhodné provést propracovanější poslechové testy, např. typu MUSHRA, s větším množstvím subjektů, kde by byli zastoupeni i zkušenější posluchači.



## Závěr

V souladu se zadáním bylo cílem práce se seznámit s ambisonickými mikrofony a navrhnout metodiku na jejich testování. Práce se měla zaměřit na přípravu a nahrávací část testů. Ověření metodiky mělo být provedeno na dostupných mikrofonech.

Domnívám se, že zadání práce se podařilo splnit. V první řadě jsem se nastudováním literatury seznámil s ambisonií a mikrofony k jejímu snímání. Dále jsem provedl rešerši existujících přístupů k jejich testování a na základě toho navrhl metodiku o třech dílčích experimentech. První experiment se zabývá určováním přesnosti směrové lokalizace při poslechu nahrávek z testovaných mikrofonů. Druhý spočívá ve zjišťování, jaký minimální úhlový rozdíl mezi dvěma směry šířeného zvuku je z nahrávek rozeznatelný. Třetí část hodnotí mikrofony z pohledu kvality nahraného zvuku.

Metodiku jsem ověřil v podmínkách audiovizuálního studia katedry. Původně bylo plánováno provést nahrávací experimenty s ambisonickým mikrofonom 3. řádu, jenž je vyvíjen na katedře, a porovnat ho s komerčně dostupným mikrofonom prvního řádu Sennheiser Ambeo VR Mic. Z technických důvodů však bylo nahrávání provedeno pouze s druhým zmíněným mikrofonom.

V rámci ověření druhého experimentu se nepodařilo prokázat hypotézu, že mezi nahrávkami z ambisonických mikrofonů budou patrné natolik zásadní rozdíly, aby je odhalil zvolený krok po 5° mezi pozicemi reproduktorů.

Výstupem práce je metodika pro pořizování materiálů z ambisonických mikrofonů za účelem jejich otestování, která může v budoucnu posloužit k ohodnocení nejen mikrofону vyvíjeného na katedře.







## Seznam použitých zkratk

<b>DAW</b>	<i>Digital audio workstation</i>
<b>FOA</b>	<i>First-order Ambisonics</i> , (ambisonie prvního řádu)
<b>HOA</b>	<i>High-order Ambisonics</i> , (ambisonie vyššího řádu)
<b>HRTF</b>	<i>Head Related Transfer Function</i> , (přenosová funkce vztažená k hlavě)
<b>ILD</b>	<i>Interaural Level Difference</i> , (Interaurální úroňová diference)
<b>ITD</b>	<i>Interaural Time Difference</i> , (Interaurální časová diference)
<b>MAA</b>	<i>Minimum Audible Angle</i>





## Literatura

- [1] Ambisonics. *Into The Soundfield* [online]. [cit. 2023-02-01]. <https://intothesoundfield.music.ox.ac.uk/ambisonics>
- [2] ARTEAGA, Daniel. *Introduction to Ambisonics* ResearchGate, 2018 [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/280010078\\_Introduction\\_to\\_Ambisonics](https://www.researchgate.net/publication/280010078_Introduction_to_Ambisonics)
- [3] HOLLERWEGER, Florian. *An Introduction to Higher Order Ambisonic* [online]. 2005 (2013) [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [http://decoy.iki.fi/dsound/ambisonic/motherlode/source/HOA\\_intro.pdf](http://decoy.iki.fi/dsound/ambisonic/motherlode/source/HOA_intro.pdf)
- [4] What is ambisonics B-format and spherical harmonics?. In: Youtube [online]. 2021-09-09 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_YYmCYKQw1o](https://www.youtube.com/watch?v=_YYmCYKQw1o) Kanál ODEON Room Acoustics Software.
- [5] PLESSAS, Peter. *Rigid Sphere Microphone Arrays for Spatial Recording and Holography* [online]. Graz, 2009 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.marshallplan.at/images/All-Papers/MP-2009/plessas.pdf>
- [6] KRONLACHNER, Matthiasa Franz ZOTTER. *Spatial transformations for the enhancement of Ambisonic recordings* [online]. January 2014 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/262826740\\_Spatial\\_transformations\\_for\\_the\\_enhancement\\_of\\_Ambisonic\\_recordings](https://www.researchgate.net/publication/262826740_Spatial_transformations_for_the_enhancement_of_Ambisonic_recordings)
- [7] YUE, Cedric a Teun DE PLANQUE. *3-D Ambisonics Experience for Virtual Reality* [online]. 2017 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: [https://web.stanford.edu/class/ee267/Spring2017/report\\_yue\\_planque.pdf](https://web.stanford.edu/class/ee267/Spring2017/report_yue_planque.pdf)
- [8] NACHBAR, Christian, Franz ZOTTER, Etienne DELEFLIE a Alois SONTACCHI. *AMBIX - A SUGGESTED AMBISONICS FORMAT* [online]. Lexington, 2011 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266602800\\_AMBIX\\_-\\_A\\_SUGGESTED\\_AMBISONICS\\_FORMAT](https://www.researchgate.net/publication/266602800_AMBIX_-_A_SUGGESTED_AMBISONICS_FORMAT)
- [9] ZOTTER, Franz. *Image: Spherical Harmonics up to degree 5, as used in fifth-order Ambisonics* Wikimedia Commons 2013-12-19 [cit. 2023-03-12]



- [21] NEVATON VR – AMBISONIC MICROPHONE [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <http://nevaton.eu/product/nevaton-vr-ambisonic-microphone/>
- [22] Spatial Mic – USB - Voyage Audio [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: [https://voyage.audio/shop/spatial\\_mic\\_usb/#specifications](https://voyage.audio/shop/spatial_mic_usb/#specifications)
- [23] Core Sound OctoMic 2nd-order Ambisonic Microphone — Core Sound [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.core-sound.com/products/octomic>
- [24] ZYLIA PRO - 3rd Order Ambisonics Microphone [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.zylia.co/shop/zylia-pro-have-it-all-zylia-pro-have-it-all-216>
- [25] MH Acoustics Eigenmike Microphone [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://mhacoustics.com/products#eigenmike1>
- [26] Sound localization. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_localization](https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_localization)
- [27] NOVOTNÝ, Martin. *Vliv HRTF na polohu zdroje zvuku ve VR*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/101971>
- [28] ROBERTS, Michael T. *Sound localization with binaural cues* [online]. In: . University of Michigan, 2022 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: [https://health.uconn.edu/meds5377/wp-content/uploads/sites/151/2022/06/Roberts\\_Sound-localization-lecture.pdf](https://health.uconn.edu/meds5377/wp-content/uploads/sites/151/2022/06/Roberts_Sound-localization-lecture.pdf)
- [29] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [30] THRESH, Lewis, Cal ARMSTRONG a Gavin KEARNEY. A Direct Comparison of Localization Performance When Using First, Third, and Fifth Ambisonics Order for Real Loudspeaker and Virtual Loudspeaker Rendering. *AES* [online]. October 2017 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19261>
- [31] KURZ, Eric, Felix PFAHLER a Matthias FRANK. *Comparison of first-order Ambisonic microphone arrays* [online]. September 2015 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/315797204\\_Comparison\\_of\\_first-order\\_Ambisonic\\_microphone\\_arrays](https://www.researchgate.net/publication/315797204_Comparison_of_first-order_Ambisonic_microphone_arrays)
- [32] PAQUIER, Mathieu, Vincent KOEHL, Rozenn NICOL a Jérôme DANIEL. Subjective assessment of microphone arrays for spatial audio recording. *Forum Acusticum 2011* [online]. Aalborg, Denmark, June 2011, (pp.2737-2742) [cit. 2023-04-02]. <https://hal.univ-brest.fr/hal-00606210/>

- [33] BATES, Enda, Marcin GORZEL, Luke FERGUSON, Hugh O'DWYER a Francis M. BOLAND. Comparing Ambisonic Microphones — Part 1. *AES* [online]. July 2016 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18317>
- [34] *Recommendation ITU-R BS.1534-3: Method for the subjective assessment of intermediate quality level of audio systems*. 10/2015. ITU-R. Dostupné z: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1534-3-201510-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1534-3-201510-1!!PDF-E.pdf)
- [35] VILKAMO, Juha, Tapio LOKKI a Ville PULKKI. Directional Audio Coding: Virtual Microphone-Based Synthesis and Subjective Evaluation. *AES* [online]. September 2009 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.aes.org/e-lib/online/browse.cfm?elib=14838>
- [36] BATES, Enda, Sean DOONEY, Marcin GORZEL, Hugh O'DWYER, Luke FERGUSON a Francis M. BOLAND. Comparing Ambisonic Microphones—Part 2. *AES* [online]. May 2017 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18607>
- [37] SAGASTI, Amaia; PIETRZAK, Agnieszka Paula; MARTIN, Ricardo San. Localization of Sound Sources in Binaural Reproduction of First and Third Order Ambisonics. *Vibrations in Physical Systems*. 2022, vol. 33, no. 2, s. 2022214–8. Dostupné z: <https://sin.put.poznan.pl/publications/details/i50911> [cit. 2023-04-20]. ISSN 0860-6897. DOI 10.21008/j.0860-6897.2022.2.14.
- [38] IEM Plug-in Suite. *IEM* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://plugins.iem.at/>
- [39] Spatial Audio Real-Time Applications. *SPARTA* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://leomccormack.github.io/sparta-site/>
- [40] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2460-1.
- [41] *Recommendation ITU-R BS.1284-2: General methods for the subjective assessment of sound quality*. 01/2019. ITU-R. Dostupné z: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-1!!PDF-E.pdf)
- [42] AES TD1004.1.15-10: *Recommendation for Loudness of Audio Streaming and Network File Playback* 2015. Dostupné také z: [https://www.aes.org/technical/documents/AESTD1004\\_1\\_15\\_10.pdf](https://www.aes.org/technical/documents/AESTD1004_1_15_10.pdf)
- [43] *Sound Quality Assessment Material recordings for subjective tests (SQAM)*. [online]. EBU [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications/sqamcd>

- [44] *Parameters for the Subjective Evaluation of the Quality of Sound - Music (PEQS)*. [online]. EBU [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: [https://tech.ebu.ch/publications/PEQS\\_FLAC](https://tech.ebu.ch/publications/PEQS_FLAC)
- [45] Printable Protractor - World of Printables [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://worldofprintables.com/wp-content/uploads/2022/03/Protractor-PDF-360-A4.pdf>
- [46] MCCORMACK, Leo, Symeon DELIKARIS-MANIAS, Angelo FARINA, Daniel PINARDI a Ville PULKKI. Real-time conversion of sensor array signals into spherical harmonic signals with applications to spatially localised sub-band sound-field analysis [online]. May 2018 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://leomccormack.github.io/sparta-site/docs/help/related-publications/mccormack2018real.pdf>
- [47] *IEM Plug-in Suite - Plug-in Descriptions* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://plugins.iem.at/docs/pluginDescriptions/#energyvisualizer>





# Příloha A

## Měření při přípravě místnosti

### A.1 Doba dozvuku místnosti

**Tabulka A.1:** Orientační doba dozvuku (v sekundách) měřená při pozici reproduktoru vlevo (azimut +45°)

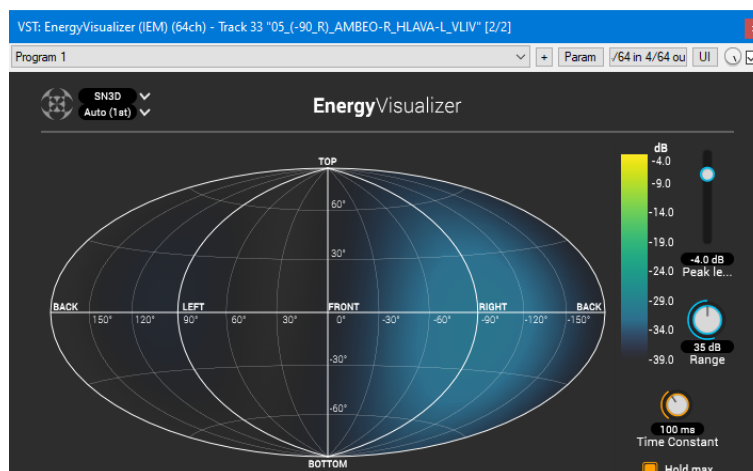
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	250Hz-2kHz	500Hz-4kHz
T10	0,3	0,33	0,3	0,38	0,25	0,27	0,25	0,32	0,3
T20	0,43	0,3	0,26	0,28	0,26	0,25	0,22	0,27	0,26
T30	0,43	0,39	0,26	0,27	0,26	0,25	0,22	0,29	0,26
EDT	0,24	0,38	0,16	0,08	0,17	0,24	0	0,2	0,16

**Tabulka A.2:** Orientační doba dozvuku (v sekundách) měřená při pozici reproduktoru vpravo (azimut -45°)

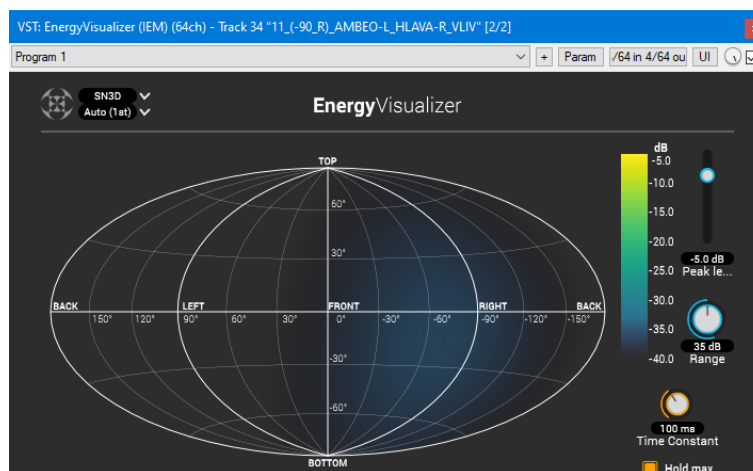
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	250Hz-2kHz	500Hz-4kHz
T10	0,43	0,36	0,25	0,29	0,28	0,24	0,22	0,29	0,26
T20	0,45	0,37	0,25	0,28	0,26	0,25	0,21	0,29	0,26
T30	0,42	0,38	0,26	0,26	0,27	0,25	0,21	0,29	0,26
EDT	0,34	0,29	0,19	0,16	0,15	0,22	0,00	0,20	0,18

## A.2 Vliv zákrytu mikrofonů

Následující obrázky znázorňují pomocí pluginu IEM Energy Visualizer vliv zastínění mikrofonu Ambeo.



**Obrázek A.1:** Směrová vizualizace zvuku přicházejícího k nezastíněnému mikrofonu Ambeo z azimutu  $-90^\circ$



**Obrázek A.2:** Směrová vizualizace zvuku přicházejícího k zastíněnému mikrofonu Ambeo z azimutu  $-90^\circ$

## Příloha B

### Kompletní výsledky experimentů

#### B.1 Experiment A

##### B.1.1 Určené azimuty - tabulky

Tabulky B.1 až B.6 ukazují výsledky určovaných azimutů v experimentu A.

**Tabulka B.1:** Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů  
- mikrofon Ambeo (růžový šum)

skutečný azimut ( $^{\circ}$ )	subjekt A	subjekt B	subjekt C
<b>120</b>	115	105	85
<b>40</b>	120	80	70
<b>0</b>	180	15	180
<b>-70</b>	-100	-45	-95
<b>-90</b>	-95	-90	-90
<b>-165</b>	-110	115	80

**Tabulka B.2:** Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů  
- umělá hlava Neumann KU100 (růžový šum)

skutečný azimut ( $^{\circ}$ )	subjekt A	subjekt B	subjekt C
<b>120</b>	100	120	100
<b>40</b>	115	80	120
<b>0</b>	170	0	180
<b>-70</b>	-90	-90	-90
<b>-90</b>	-90	-90	-95
<b>-165</b>	-135	0	-135

**Tabulka B.3:** Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů  
- AmbiPan 3. řád (růžový šum)

skutečný azimut ( $^{\circ}$ )	subjekt A	subjekt B	subjekt C
<b>120</b>	95	100	90
<b>40</b>	90	120	90
<b>0</b>	180	10	180
<b>-70</b>	-90	-90	-95
<b>-90</b>	-90	-90	-100
<b>-165</b>	-125	180	-130

**Tabulka B.4:** Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů  
- mikrofon Ambeo (řeč)

skutečný azimut ( $^{\circ}$ )	subjekt A	subjekt B	subjekt C
<b>120</b>	145	90	90
<b>40</b>	120	100	60
<b>0</b>	180	55	55
<b>-70</b>	-90	-90	-90
<b>-90</b>	-90	-90	-90
<b>-165</b>	-100	-105	-100

**Tabulka B.5:** Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů  
- umělá hlava Neumann KU100 (řeč)

skutečný azimut ( $^{\circ}$ )	subjekt A	subjekt B	subjekt C
<b>120</b>	105	100	100
<b>40</b>	95	80	110
<b>0</b>	180	0	180
<b>-70</b>	-90	-90	-100
<b>-90</b>	-90	-90	-90
<b>-165</b>	-105	180	-115

**Tabulka B.6:** Azimuty ( $^{\circ}$ ), které určili posluchači a skutečné pozice reproduktorů  
- AmbiPan 3. řád (řeč)

skutečný azimut ( $^{\circ}$ )	subjekt A	subjekt B	subjekt C
<b>120</b>	120	90	100
<b>40</b>	100	80	90
<b>0</b>	175	0	180
<b>-70</b>	-90	-90	-90
<b>-90</b>	-90	-90	-100
<b>-165</b>	-145	-150	-120

## ■ B.1.2 Odchylyky od skutečných azimutů reproduktorů

### ■ Tabulky odchylek určených azimutů

Tabulky B.7 až B.12 ukazují odchylyky určených azimutů pro mikrofon Ambeo, umělou hlavu a syntetickou nahrávku AmbiPan 3.řádu od skutečných pozic reproduktorů.

**Tabulka B.7:** Odchylyky (°) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů  
- subjekt A (růžový šum)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>	<b>Hlava</b>
<b>120</b>	5	25	20
<b>40</b>	80	50	75
<b>0</b>	180	180	170
<b>-70</b>	30	20	20
<b>-90</b>	5	0	0
<b>-165</b>	55	40	30
prům. všech pozic	59,17	52,50	52,50

**Tabulka B.8:** Odchylyky (°) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů  
- subjekt B (růžový šum)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>	<b>Hlava</b>
<b>120</b>	15	20	0
<b>40</b>	40	80	40
<b>0</b>	15	10	0
<b>-70</b>	25	20	20
<b>-90</b>	0	0	0
<b>-165</b>	50	15	165
prům. všech pozic	24,17	24,17	37,50

**Tabulka B.9:** Odchylyky (°) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů  
- subjekt C (růžový šum)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>	<b>Hlava</b>
<b>120</b>	35	30	20
<b>40</b>	30	50	80
<b>0</b>	180	180	180
<b>-70</b>	25	25	20
<b>-90</b>	0	10	5
<b>-165</b>	85	35	30
prům. všech pozic	59,17	55,00	55,83

**Tabulka B.10:** Odchyly (°) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů  
- subjekt A (řeč)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>	<b>Hlava</b>
<b>120</b>	25	0	15
<b>40</b>	80	60	55
<b>0</b>	180	175	180
<b>-70</b>	20	20	20
<b>-90</b>	0	0	0
<b>-165</b>	65	20	60
prům. všech pozic	61,67	45,83	55,00

**Tabulka B.11:** Odchyly (°) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů  
- subjekt B (řeč)

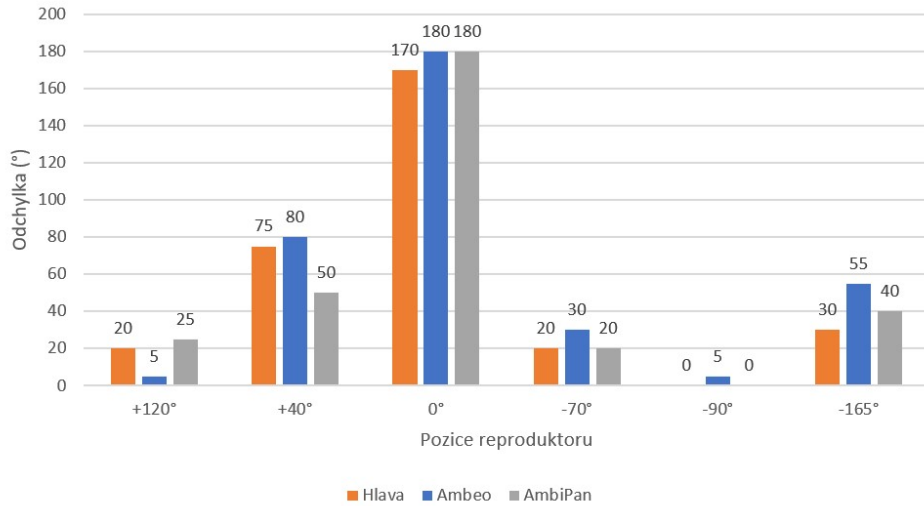
pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>	<b>Hlava</b>
<b>120</b>	30	30	20
<b>40</b>	60	40	40
<b>0</b>	55	0	0
<b>-70</b>	20	20	20
<b>-90</b>	0	0	0
<b>-165</b>	60	15	15
prům. všech pozic	37,50	17,50	15,83

**Tabulka B.12:** Odchyly (°) určených pozic od skutečných azimutů reproduktorů  
- subjekt C (řeč)

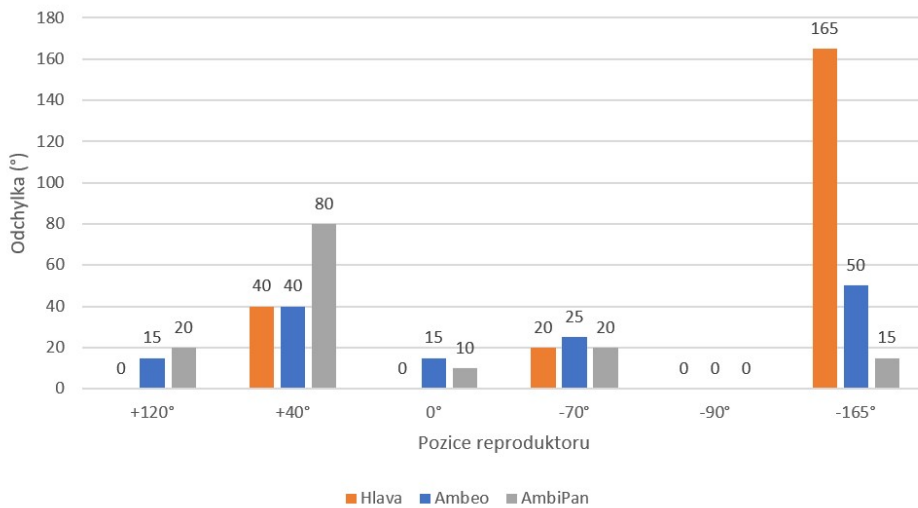
pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>	<b>Hlava</b>
<b>120</b>	30	20	20
<b>40</b>	20	50	70
<b>0</b>	55	180	180
<b>-70</b>	20	20	30
<b>-90</b>	0	10	0
<b>-165</b>	65	45	50
prům. všech pozic	31,67	54,17	58,33

## Grafy odchylek určených azimutů

Obrázky grafů B.1 až B.6 znázorňují odchylky určených azimutů od skutečných pozic reproduktorů pro jednotlivé subjekty, které vycházejí z předchozích tabulek v této sekci (B.1.2).

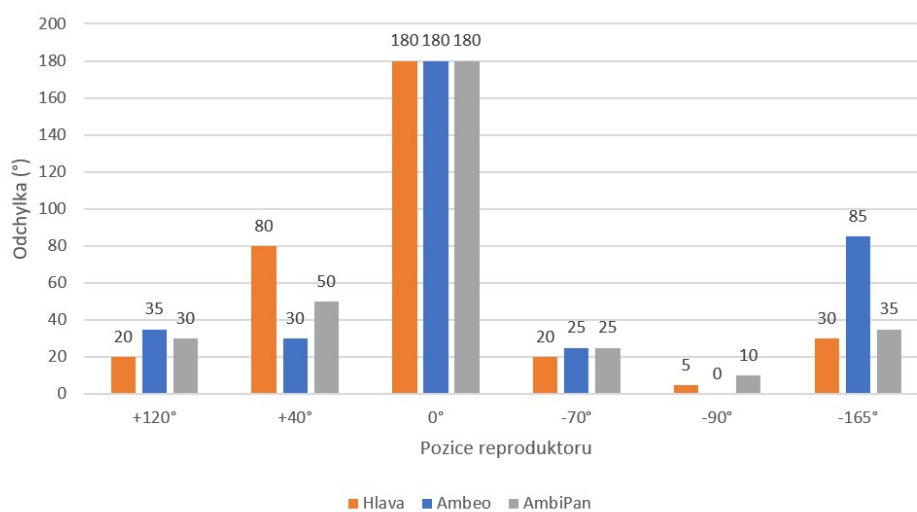


**Obrázek B.1:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu A (růžový šum)

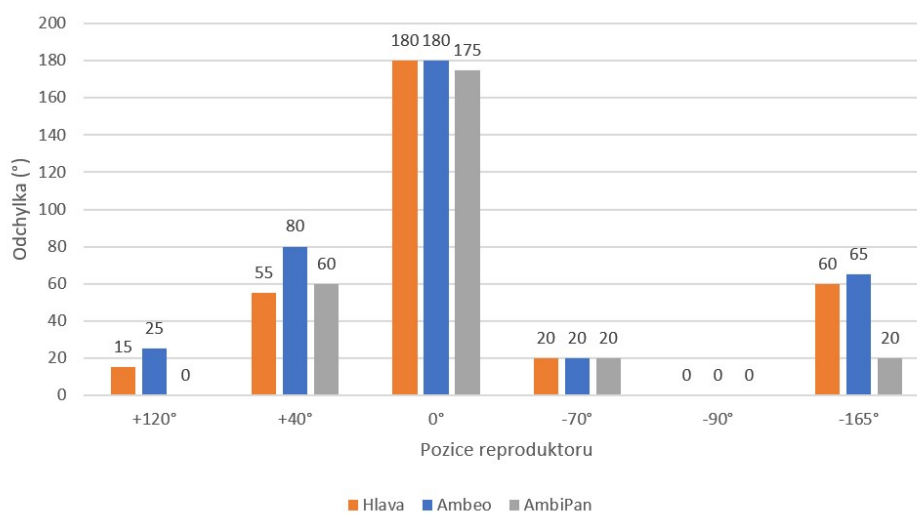


**Obrázek B.2:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu B (růžový šum)

B. Kompletní výsledky experimentů

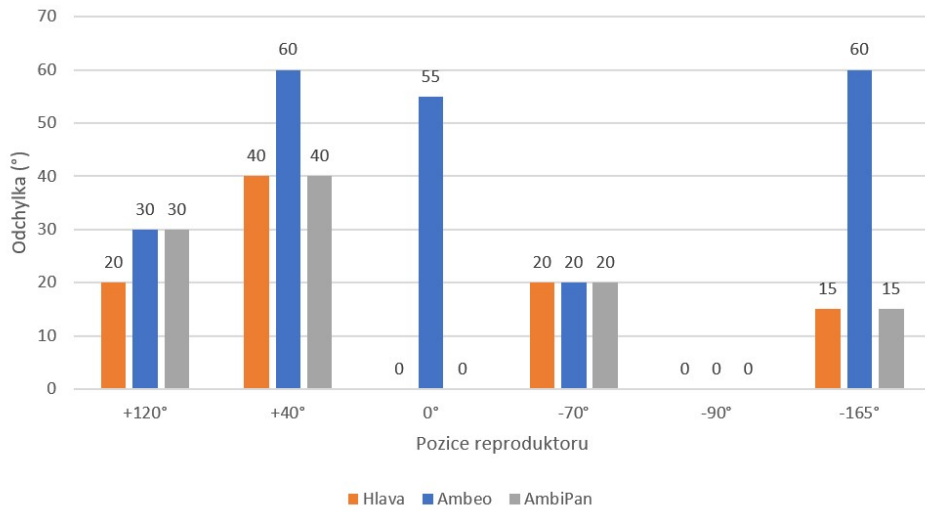


**Obrázek B.3:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu C (růžový šum)

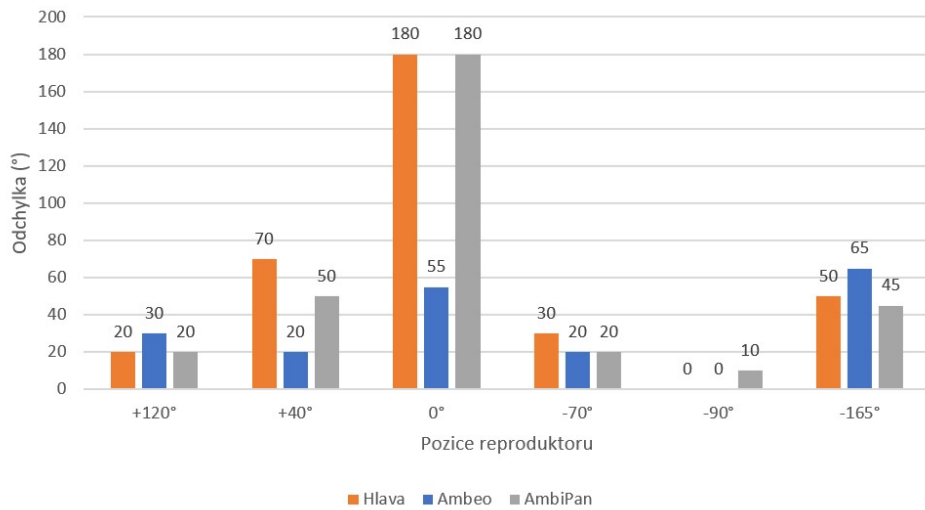


**Obrázek B.4:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu A (řeč)





**Obrázek B.5:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu B (řeč)



**Obrázek B.6:** Porovnání odchylek určeného azimutu vůči skutečnému azimutu reproduktoru u subjektu C (řeč)

### ■ B.1.3 Odchyly od azimutů určených z nahrávek umělé hlavy

Tabulky B.13 až B.18 ukazují odchyly azimutů určených daným subjektem v případě nahrávek Ambeo/AmbiPan oproti azimutu určenému u nahrávek z umělé hlavy.

**Tabulka B.13:** Odchyly (°) vůči umělé hlavě - subjekt A (růžový šum)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>
<b>120</b>	15	5
<b>40</b>	5	25
<b>0</b>	10	10
<b>-70</b>	10	0
<b>-90</b>	5	0
<b>-165</b>	25	10
prům. všech pozic	11,67	8,33

**Tabulka B.14:** Odchyly (°) vůči umělé hlavě - subjekt B (růžový šum)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>
<b>120</b>	15	20
<b>40</b>	0	40
<b>0</b>	15	10
<b>-70</b>	45	0
<b>-90</b>	0	0
<b>-165</b>	115	180
prům. všech pozic	31,67	41,67

**Tabulka B.15:** Odchyly (°) vůči umělé hlavě - subjekt C (růžový šum)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>
<b>120</b>	15	10
<b>40</b>	50	30
<b>0</b>	0	0
<b>-70</b>	5	5
<b>-90</b>	5	5
<b>-165</b>	55	5
prům. všech pozic	21,67	9,17

**Tabulka B.16:** Odchylky (°) vůči umělé hlavě - subjekt A (řeč)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>
<b>120</b>	40	15
<b>40</b>	25	5
<b>0</b>	0	5
<b>-70</b>	0	0
<b>-90</b>	0	0
<b>-165</b>	5	40
prům. všech pozic	11,67	10,83

**Tabulka B.17:** Odchylky (°) vůči umělé hlavě - subjekt B (řeč)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>
<b>120</b>	10	10
<b>40</b>	20	0
<b>0</b>	55	0
<b>-70</b>	0	0
<b>-90</b>	0	0
<b>-165</b>	75	30
prům. všech pozic	26,67	6,67

**Tabulka B.18:** Odchylky (°) vůči umělé hlavě - subjekt C (řeč)

pozice reproduktorů (°)	<b>Ambeo</b>	<b>AmbiPan</b>
<b>120</b>	10	0
<b>40</b>	50	20
<b>0</b>	125	0
<b>-70</b>	10	10
<b>-90</b>	0	10
<b>-165</b>	15	5
prům. všech pozic	35,00	7,50

## B.2 Experiment B

Tabulky B.19 a B.20 ukazují výsledky experimentu B.

**Tabulka B.19:** Odpovědi, zda posluchač rozlišil mezi dvěma azimuty - mikrofon Sennheiser Ambeo VR Mic

azimuty (°)	Subjekt A	Subjekt B	Subjekt C
90, -90	rozlišil	rozlišil	rozlišil
60, -60	rozlišil	rozlišil	rozlišil
45, -45	rozlišil	rozlišil	rozlišil
40, -40	rozlišil	rozlišil	rozlišil
35, -35	rozlišil	rozlišil	rozlišil
30, -30	rozlišil	rozlišil	rozlišil
25, -25	rozlišil	rozlišil	rozlišil
20, -20	rozlišil	rozlišil	rozlišil
15, -15	rozlišil	rozlišil	rozlišil
10, -10	rozlišil	rozlišil	rozlišil
5, -5	rozlišil	rozlišil	rozlišil
0, 5	nerozlišil	nerozlišil	nerozlišil
0, 0	nerozlišil	nerozlišil	nerozlišil

**Tabulka B.20:** Odpovědi, zda posluchač rozlišil mezi dvěma azimuty - mikrofon Neumann KU100 (umělá hlava)

azimuty (°)	Subjekt A	Subjekt B	Subjekt C
90, -90	rozlišil	rozlišil	rozlišil
60, -60	rozlišil	rozlišil	rozlišil
45, -45	rozlišil	rozlišil	rozlišil
40, -40	rozlišil	rozlišil	rozlišil
35, -35	rozlišil	rozlišil	rozlišil
30, -30	rozlišil	rozlišil	rozlišil
25, -25	rozlišil	rozlišil	rozlišil
20, -20	rozlišil	rozlišil	rozlišil
15, -15	rozlišil	rozlišil	rozlišil
10, -10	rozlišil	rozlišil	rozlišil
5, -5	rozlišil	rozlišil	rozlišil
0, 5	rozlišil	rozlišil	nerozlišil
0, 0	nerozlišil	nerozlišil	nerozlišil

## B.3 Experiment kvalita zvuku

Tabulka B.21 ukazuje výsledky experimentu kvalita zvuku.

**Tabulka B.21:** Výsledky porovnání preferencí v kvalitě nahrávek

číslo skladby	Subjekt A	Subjekt B	Subjekt C
01.	stejné	stejné	Ambeo
02.	stejné	stejné	hlava
03.	stejné	stejné	stejné
04.	stejné	stejné	Ambeo
05.	stejné	stejné	Ambeo
06.	stejné	stejné	hlava
07.	stejné	stejné	stejné
08.	stejné	stejné	Ambeo
09.	stejné	stejné	hlava
10.	Ambeo	Ambeo	Ambeo
11.	stejné	stejné	Ambeo
12.	stejné	stejné	Ambeo
13.	Ambeo	Ambeo	Ambeo



## Příloha C

### Obsah datové přílohy

Datová příloha se skládá z následujících částí:

- **01\_priloha.zip** obsahuje adresáře a soubor:
  - **energy\_visualizer**, kde jsou k dispozici obrázky z pluginu *IEM Energy Visualizer*,
  - **frek\_spektra\_nahravek** s obrázky frekvenčních spekter nahrávek z experimentu na kvalitu zvuku,
  - **frek\_char\_repro**, kde nalezneme frekvenční charakteristiky jednotlivých reproduktorů včetně původních souborů s daty ze SW EASERA,
  - **vyplnene\_sablony**, ve kterém jsou k dispozici vyplněné šablony od posluchačů z experimentu A,
  - **vysledky\_exp.xlsx**, kde nalezneme kompletní výsledky z experimentů pro možnost dalšího zpracování,
- **02\_reaper\_test\_sekvence.zip** obsahuje nahrávací projekt v DAW Reaper společně s použitými testovacími sekvencemi pro všechny experimenty,
- **03\_testA\_ambeo\_pink\_noise.zip** obsahuje nahrávky z mikrofonu Sennheiser Ambeo VR Mic pro test A (růžový šum), jak v původním A-formátu, tak ve zpracované verzi pro poslech na sluchátka (binaural),
- **04\_testA\_ambeo\_speech.zip** obsahuje nahrávky z mikrofonu Sennheiser Ambeo VR Mic pro test A (řeč), jak v původním A-formátu, tak ve zpracované verzi pro poslech na sluchátka (binaural),
- **05\_testB\_ambeo.zip** obsahuje nahrávky z mikrofonu Sennheiser Ambeo VR Mic pro test B, jak v původním A-formátu, tak ve zpracované verzi pro poslech na sluchátka (binaural),
- **06\_testAB\_umela\_hlava.zip** obsahuje nahrávky z mikrofonu Neumann KU100 (umělá hlava) pro testy A i B,

- `07_rode_ambipan.zip` obsahuje nahrávky ze všesměrového mikrofonu Rode NT2-A, včetně nahrávek po zpracování pluginy AmbiPan (ambisonie 3. řádu do odpovídajících azimutů) a poté AmbiHead pro poslech na sluchátka,
- `08_quality_ambeo_A-format_part1.zip` obsahuje první část nahrávek z mikrofonu Sennheiser Ambeo pro experiment týkající se kvality zvuku v původním A-formátu,
- `09_quality_ambeo_A-format_part2.zip` obsahuje druhou část nahrávek z mikrofonu Sennheiser Ambeo pro experiment týkající se kvality zvuku v původním A-formátu,
- `10_quality_ambeo_binaural.zip` obsahuje nahrávky z mikrofonu Sennheiser Ambeo VR Mic pro experiment týkající se kvality zvuku po zpracování pro poslech na sluchátka,
- `11_quality_umela_hlava.zip` obsahuje nahrávky z mikrofonu Neuman KU100 (umělá hlava) pro experiment týkající se kvality zvuku.