

Univerzita Karlova
Pedagogická fakulta
Katedra informačních technologií a technické výchovy

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Lokalizace zvuku jako princip prostorového zvuku Sound localization as a principle of surround sound

Michael Mally

Vedoucí práce: PhDr. Tomáš Jeřábek, Ph.D.
Studijní program: Informační technologie se zaměřením na vzdělávání
Studijní obor: B IT 20

2024

Odevzdáním této bakalářské práce na téma Lokalizace zvuku jako princip prostorového zvuku potvrzují, že jsem ji vypracoval pod vedením vedoucího práce samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále potvrzují, že tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Mariánských Lázních, 10. 7. 2024

Mé poděkování patří PhDr. Tomáši Jeřábkovi, Ph.D., za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování této práce věnoval.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na zkoumání a analýzu principů, které umožňují vnímání a lokalizaci zvuku v prostoru, společně s technologiemi a metodami pro záznam, úpravu a reprodukci prostorového zvuku. Cílem práce je představit ucelený přehled této problematiky a na základě toho vytvořit bázi pro výrobu výukových materiálů s mezioborovým přesahem. Teoretická část je věnována fyzikálním a psychoakustickým jevům, které jsou klíčové k pochopení principů lokalizace zvuku v prostoru. Dále popisuje konkrétní technologie a metody, které dané principy využívají s cílem vytvoření realistického a imerzivního zážitku. Praktická část zahrnuje návrh tří námětů na výukové aktivity zaměřených na demonstraci principů a technologií popsanych v teoretické části. Tyto náměty přináší nový pohled na interdisciplinární zařazení akustiky do kontextu vzdělávání.

KLÍČOVÁ SLOVA

prostorový zvuk, interaurální rozdíl času, interaurální rozdíl intenzity, binaurální zvuk, head-related transfer function, kvadrofonie

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the exploration and analysis of principles that enable the perception and localization of sound in space, along with technologies and methods for recording, editing and reproduction of spatial sound. The aim of the thesis is to present a comprehensive overview of this topic upon which a foundation for the production of educational materials with interdisciplinary overlap shall be based. The theoretical part is devoted to physical and psychoacoustic phenomena that are crucial for understanding the principles of sound localization in space. It then describes specific technologies and methods that utilize these principles to create realistic and immersive experience. The practical part includes the design of three educational activity proposals focused on demonstrating the principles and technologies described in the theoretical part. These proposals offer a new perspective on the interdisciplinary integration of acoustics into the educational context.

KEYWORDS

spatial sound, interaural time difference, interaural level difference, binaural sound, head-related transfer function, quadrophonic sound

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Cíle a metody práce.....	9
TEORETICKÁ ČÁST.....		10
3	Základy prostorového zvuku.....	11
3.1	Definice a význam.....	11
3.2	Principy lokalizace zvuku.....	11
3.2.1	Interaurální rozdíl intenzity.....	12
3.2.2	Interaurální rozdíl času.....	12
3.2.3	Head-Related Transfer Function.....	12
3.2.4	Haasův jev.....	13
3.2.5	Dopplerův jev.....	13
3.3	Stereo a surround.....	14
3.4	Kvadrofonní zvuk.....	14
4	Technologie prostorového zvuku.....	15
4.1	Nahrávací technika.....	15
4.1.1	Binaurální zvuk.....	17
4.1.2	Soundfield a Ambisonics.....	19
4.2	Přehrávací technika.....	19
4.3	Formáty prostorového zvuku.....	21
4.4	Software.....	22
PRAKTICKÁ ČÁST.....		24
5	Náměty na výukové aktivity.....	25
6	Pohyb zvuku v kvadrofonním prostoru pomocí topografických ploch.....	26
6.1	Topografické plochy.....	26
6.2	Princip.....	26
6.3	Lineární zvukově-topografická mapa.....	27
6.4	Umístění a pohyb zvuku v rovině.....	27
6.4.1	Podélný profil.....	29
6.4.2	Realizace.....	31
6.5	Omezení lineárního modelu.....	31
6.6	Diskuze.....	31
7	Zvukové kulisy.....	33
7.1	Analýza zvukové scény.....	33
7.2	Návrh zvukové scény.....	34
7.3	Příprava zvukových nahrávek.....	36
7.4	Realizace.....	37

7.5	Diskuze	37
8	Zvukové bludiště	38
8.1	Vytvoření herního motivu	38
8.2	Grafický návrh herního prostoru.....	38
8.3	Výběr a zpracování zvukových signálů	40
8.4	Realizace	40
8.5	Diskuze	41
9	Závěr.....	42
10	Seznam použitých informačních zdrojů	43
11	Sezam obrázků	45

1 Úvod

V době stále se zvyšující technologické vyspělosti a digitální propojenosti našich životů se prostorový zvuk stává významnou součástí mnoha aspektů naší každodennosti. Od zlepšení zážitků ve virtuální a rozšířené realitě přes inovace v kinematografii a hudebním průmyslu až po aplikace v simulacích a vzdělávacích technologiích, prostorový zvuk formuje způsob, jakým vnímáme a interagujeme s digitálním světem. Současným technologickým trendem je neustálá snaha přiblížení se realitě, což vyžaduje důkladné pochopení nejen samotných technologií, ale především principů akustiky a psychoakustiky. Proto se tato práce zaměřuje na zkoumání principů lokalizace zvuku, které jsou klíčem hlubšího porozumění tomuto fenoménu.

Vzhledem k všudypřítomnosti prostorového zvuku v našem digitálním životě a jeho rostoucímu významu v širokém spektru aplikací je důležité, aby akademický výzkum reflektoval jeho potenciál a předkládal návrhy pro jeho praktické využití. Tato bakalářská práce přispívá k diskurzu tím, že nabízí nové pohledy na vzdělávací potenciál prostorového zvuku a podporuje jeho další integraci do mezioborových výukových praxí.

2 Cíle a metody práce

Hlavním cílem bakalářské práce je rozpracovat problematiku prostorového zvuku s důrazem na jeho aplikaci v kontextu vzdělávání. Tento hlavní cíl je dále rozdělen do cílů dílčích:

- zmapovat principy lokalizace zvuku v prostoru a zasadit tyto principy do kontextu vnímání a zpracování prostorového zvuku;
- představit ucelený přehled technologií z oblasti prostorového zvuku a popsat principy těchto technologií z pohledu lokalizace zvuku;
- vytvořit bázi, na které lze stavět a rozpracovat výukové aktivity s cílem pochopení problematiky prostorového zvuku praktickou i analytickou cestou v kontextu různých technik lokalizace a vizualizace zvuku.

Práce se skládá ze dvou částí. Teoretická část práce je koncipována jako teoretická studie a k naplnění cílů užívá adekvátních analyticko-syntetických výzkumných metod, primárně analýzu a komparaci primárních a sekundárních pramenů a syntézu znalostí. Praktická část je řešena formou aplikace teoretických východisek k vytvoření vlastních námětů pro výukové aktivity a zamyšlení se nad jejich mezioborovým přesahem.

TEORETICKÁ ČÁST

3 Základy prostorového zvuku

Prostorový zvuk, někdy také nazývaný 3D audio či imerzivní zvuk, představuje koncept záznamu a reprodukce zvuku, který se snaží vytvářet realistické zvukové prostředí. Oproti monofonnímu zvuku se snaží v posluchači vyvolat pocit umístění, směru a vzdálenosti zvuku v prostoru. Hlavním cílem zkoumání prostorového zvuku je poskytnout posluchači zážitek, který je co nejbližší reálnému poslechu v přirozeném prostředí. Toho je dosahováno zkoumáním lidských principů lokalizace zvuku v prostoru a jejich využití k simulování těchto parametrů, a to buď pomocí hardwarového řešení (například rozmístěním reproduktorů) nebo softwarově (například pluginy). (Zhang et al., 2017)

3.1 Definice a význam

Přímo definovat prostorový zvuk je obtížné v důsledku přímé závislosti na kontextu, ve kterém definici chceme provést. Relevantní zdroje se shodují na tom, že prostorový zvuk má za cíl imitovat přirozené vnímání zvukového prostoru člověkem. Pomyslná hranice toho, co už je prostorový zvuk, je však velmi nestabilní. Dolby Laboratories, které od svého vzniku v 60. letech představují silný hlas na poli audio technologií, definují prostorový zvuk jako „... proces umístění různých zvuků na různá místa v místnosti...“ a dodávají, že „...tím se liší od surround zvuku, kde zvuk stále působí, jako by přicházel ze směrových reproduktorů.“¹ (Dolby, 2024) Naproti tomu článek publikovaný v periodiku *Applied Sciences* zařazuje mezi techniky prostorového záznamu zvuku pro soundscape design také stereo a surround nahrávání (Hong et al., 2017). Pro účely této práce se více hodí širší definice, jelikož stereo a surround technologie jsou vybudovány na stejných základních principech lokalizace zvuku v prostoru a jejich zařazením tak práce pokrývá širší oblast nástrojů využitelných v kontextu vzdělávání.

Význam prostorového zvuku je zřejmý v mnoha oblastech. Ve virtuální realitě a rozšířené realitě je autentický prostorový zvuk nezbytný pro vytvoření plně imerzivního zážitku. V kinematografii a herním průmyslu prostorový zvuk přispívá k vytvoření hlubšího emocionálního zážitku, případně umožňuje kvalitnější orientaci v prostoru. Živé koncerty využívají principy prostorového zvuku k obohacení uměleckého prožitku. Ve všech případech jde o snahu přiblížení multimediálních technologií realitě, což je trend, který není žádnou novinkou ani mimo oblast zvuku. Vzhledem k tomuto trendu a obecně stále se zrychlujícímu technologickému pokroku patří téma prostorového zvuku více než kdy jindy také do oblasti vzdělávání, a to jak jako nástroj imerzivní výuky, tak jako téma, se kterým žáky seznamovat. (Zhang et al., 2017)

3.2 Principy lokalizace zvuku

Záznam a reprodukce prostorového zvuku jsou založeny na principech lokalizačních systémů, které lidem zajišťují schopnost vnímání směru a vzdálenosti zdroje zvuku s velkou přesností.

¹ Překlad autora. Původní text: „Spatial audio refers to the process of placing different sounds in different locations around the room. This differs from surround sound where sound still feels like it comes from directional speakers.”

Hardwarové i softwarové technologie pracující s prostorovým zvukem se nejčastěji opírají o dva hlavní mechanismy – interaurální rozdíl intenzity (Interaural Level Difference) a interaurální rozdíl času (Interaural Time Difference).

3.2.1 Interaurální rozdíl intenzity

Interaurální rozdíl intenzity (dále ILD) vzniká a sílí s úhlem, pod kterým zvuk letí k lidské hlavě. Zvukové vlny dorazí do jednoho ucha s větší intenzitou než do druhého, protože druhé ucho je blokováno hlavou, za kterou vzniká akustický stín. Rozdíl v intenzitě se projeví rozdílem vnímané hlasitosti a posluchač ho vyhodnotí jako údaj o směru. Tento efekt vzniká pouze u vyšších frekvencí, nejvíce znatelný začíná být, když je vlnová délka menší než průměr hlavy, skrz kterou zvuk musí projít. (Students of PSY 3031, 2022, s. 71)

Přesnou hranici vzniku ILD nelze zcela určit vzhledem k individualitě posluchačů a spojitě podstaty tohoto efektu, je však možné aproximovat frekvenci, při které se začíná projevovat výrazněji. Pro průměrnou šířku mužské hlavy $d = 6,06 \text{ in} = 0,153924 \text{ m}$ (The Ergonomics Center of North Carolina, 2017) a rychlost zvuku ve vzduchu $c = 343 \text{ m/s}$ lze použít rovnici

$$f_{ILD} = \frac{c}{d} = \frac{343}{0,153924} \doteq 2228 \text{ Hz},$$

kde f_{ILD} představuje frekvenci, jejíž vlnová délka šířce hlavy odpovídá. Podle Students of PSY 3031 (2022, s. 71) začíná být ILD znatelné již od frekvence 1 kHz s odpovídající vlnovou délkou 34,3 centimetrů, jiné zdroje (např. Loisel et al., 2016) uvádějí efektivní hranici dominance ILD nad ITD od 1,5 kHz.

3.2.2 Interaurální rozdíl času

Interaurální rozdíl času (dále ITD) vzniká díky odlišné vzdálenosti zdroje zvuku od obou uší a tím vzniklým časovým odstupem způsobeným rychlostí šíření zvuku ve vzduchu. Tento rozdíl vzdáleností může být nejvýše roven délce trajektorie mezi oběma ušima v situaci, kdy zvuk přichází přímo zleva nebo zprava od posluchače. Největší možný ITD tak odpovídá přibližně 0,676 milisekundám (Students of PSY 3031, 2022, s. 70). Nejmenší možný ITD je limitován schopností lidského ucha registrovat nepatrné časové rozdíly. Obecně uznávaná hodnota této hranice je $10 \mu\text{s}$ (Thavam a Dietz, 2019) neboli 0,01 ms.

3.2.3 Head-Related Transfer Function

Stereo i surround technologie dovedou zajistit velice přesvědčivý zážitek z 3D zvukového prostoru, k dokonalosti jim však chybí ostatní jemnější parametry, díky kterým máme tak dobrou zvukovou orientaci. Tyto parametry se týkají především tvaru, objemu a hustoty lidské hlavy, tvaru a umístění uší a jiných drobných anatomických specifikací, které jsou převážně individuální. Pro věrnější reprodukci prostorového zvuku se proto dá využít takzvané HRTF (Head-Related Transfer Function), tedy přenosové funkce závislé na specifikách hlavy posluchače.

HRTF je funkcí upravující zvuk podle vlastností, které by získal přenosem od zdroje zvuku až do posluchačova zvukovodu, a to ve volném prostoru (bez vlivu místnosti). Vzhledem ke komplexní povaze všech relevantních parametrů je logické, že její součástí jsou také ILD a ITD, které jsou ovšem doplněny metodami, které simulují například odraz zvuku od ušních boltců nebo vnitřní vibrace hlavy. Li a Peissig (2020, s. 30) z Leibnizovy univerzity v Hannoveru ve svém review *Measurement of Head-Related Transfer Functions: A Review* popisují různé způsoby, jakými je HRTF možné měřit, a docházejí k závěrům, že tato měření jsou zatím velice náročná vzhledem k silné individualitě posluchače a prostoru, ačkoliv zmiňují naději některých studií v možný technologický posun k měření potřebných parametrů snadno a rychle přímo uživatelem pro potřeby stále se rozvíjejícího průmyslu VR a AR.

3.2.4 Haasův jev

Pojmenován po doktoru Helmutu Haasovi, tento jev rozšiřuje princip ITD. Zvuk přicházející z pravé strany k posluchači dorazí do jeho uší s rozdílem odpovídajícím vzdálenosti uší, do obou uší však také dorazí zvuk odražený od okolí, a to v ještě pozdější čas. Prvních 35 milisekund vnímáme tyto rozdíly jako informaci o směru, který je určen prvním zaregistrovaným zvukem. V intervalu zpoždění od 50 do 80 ms už dochází k separaci obou zdrojů zvuku, tzv. Haasova zóna (zóna, ve které dva zdroje monofonního zvuku se zpožděním jednoho z nich výstupem splývají do jednoho vnímaného zvuku přicházejícího z jedné strany) však jde rozšířit ztišením zdrojů zvuku. Při zpoždění větším než 80 ms dochází k fázovému rušení a efektu ozvěny. (Mantione, 2024)

3.2.5 Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje změnu vnímané frekvence zvuku pozorovatelem v závislosti na pohybu a relativní rychlosti zdroje zvuku nebo pozorovatele. V kontextu lokalizačních principů je důležitý pro vnímání rychlosti zdrojů zvuku v prostoru, čímž doplňuje důležité informace o jejich poloze.

Tento fyzikální jev je založen na principu zvuku jako mechanického vlnění. Když se zdroj zvuku pohybuje směrem k pozorovateli, vlnová délka zvuku se zkracuje, což způsobuje zvýšení frekvence a tím vyšší tón. Naopak, když se zdroj zvuku vzdaluje, vlnová délka se prodlužuje, což způsobuje snížení frekvence a nižší tón. Typickým příkladem tohoto efektu je zvuk projíždějící sanitky, na kterém je dobře pozorovatelný díky velkému rozdílu rychlostí zdroje zvuku a pozorovatele. Zvuk sirény se mění v závislosti na tom, zda se sanitka přibližuje či oddaluje. (Sanny et al., 2016)

Matematicky lze vliv Dopplerova jevu na pozorovanou frekvenci zvuku vyjádřit rovnicí

$$f_o = f_s \left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_s} \right),$$

Kde f_o představuje pozorovanou frekvenci zvuku, f_s představuje skutečnou frekvenci zdrojového zvuku, v je rychlost zvuku ve vzduchu, v_o je rychlost pozorovatele a v_s je rychlost zdroje zvuku. (Sanny et al., 2016)

3.3 Stereo a surround

Základním, i když často naprosto postačujícím, systémem záznamu a reprodukce prostorového zvuku je stereofonní technologie, při níž se prostorovosti dosahuje využitím ILD nebo kombinací ILD a ITD. Stereofonní nahrávka je schopná imitovat přirozený proces změny intenzity zvuku různým nastavením hlasitostí levého a pravého kanálu a vytvořit tím kolem posluchače pole, ve kterém se zvuky mohou pohybovat. Toto pole má tvar oblouku a vzhledem k tomu, že hlasitost kanálů je prominentním faktorem při představě prostorovosti, je tato technologie nejen snadno dosažitelná, ale také relativně efektivní. (Hancock, 2011)

Většího přiblížení realistického zážitku z 3D zvukového prostoru lze dosáhnout posílením stereo systému více kanály. Ty pak mohou zvukové pole kolem posluchače roztáhnout z oblouku do kruhu, a dokonce i přidat třetí rozměr v podobě zvuku přicházejícího shora, to vše stále pouze s apelem na rozdíl intenzit zvuku z jednotlivých směrů, případně drobný časový odstup kanálů (Mathias, 2024a). Je zde zřejmá korelace mezi počtem kanálů (a tím pádem i zdrojů reprodukce zvuku) a počtem možných směrů, ze kterých je posluchač schopen zvuk vnímat. Tomuto systému se říká „surround“ a využívá se především ve filmovém průmyslu, méně pak v průmyslu hudebním, kde se nejčastěji lze setkat se stereo nahrávkami. Kromě samotné nahrávky připravené k přehrávání pomocí surround technologie ovlivňuje zvuk také prostor, ve kterém je nahrávka přehrávána, předně počet a rozmístění reproduktorů, nebo také vhodné odhlučnění místnosti.

3.4 Kvadrofonní zvuk

Jedním z nejstarších přístupů k surround technologii byl kvadrofonní zvuk, který se objevil v 70. letech a k zachycení pohybu a umístění zvuků v prostoru využíval čtyři reproduktory, které byly rozmístěny v každém rohu místnosti. Navzdory své inovativnosti byl drahý a těžkopádný, což vedlo k jeho úpadku s nástupem CD a praktičtějších stereofonních systémů.

Kvadrofonní systémy pracovaly s několika technickými přístupy. Nejjednodušší byly odvozené formáty (2–2–4), které přidávaly nebo extrahovaly zadní ambience nebo reverb zvukové kanály ze stereo nahrávek. Následovaly sofistikovanější maticové formáty (4–2–4), které kódovaly čtyři kanály do dvou a pak je dekódovaly zpět do čtyř kanálů při přehrávání. Nejpokročilejší byly diskrétní formáty (4–4–4), které nabízely plnou separaci kanálů, ale byly technologicky náročné na realizaci. Přestože kvadrofonie nezískala širokou popularitu, její technologie položily základy pro moderní surround systémy, které jsou dnes standardem v domácích kinech a profesionálních audio systémech. (Martin, 2024)

I přes obtížnou realizaci v profesionální sféře nabízí diskrétní kvadrofonie překvapivý potenciál ve sféře edukativní díky symetrickému vztahu všech kanálů, což usnadňuje sledování toho, co změny hladin jednotlivých kanálů dělají s výsledným zvukem. Problematikou využití kvadrofonie ve vzdělávání se zabývá kapitola „Pohyb zvuku v kvadrofonním prostoru pomocí topografických ploch“ této práce.

4 Technologie prostorového zvuku

Prostorový zvuk není jen fyzikálním či psychoakustickým fenoménem, ale také technologickým oborem, který se zaměřuje na sofistikované možnosti záznamu a reprodukce zvuku. V této kapitole jsou prezentovány různé technologie, díky kterým lze prostorový zvuk zachytit, reprodukovat a analyzovat za účelem poskytnutí co nejvěrnějšího zážitku. Popisované metody zahrnují jak tradiční stereo a surround systémy, tak i novější přístupy, jako je binaurální záznam nebo soundfield, které umožňují hlubší manipulaci se zvukovým polem a jeho percepcí.

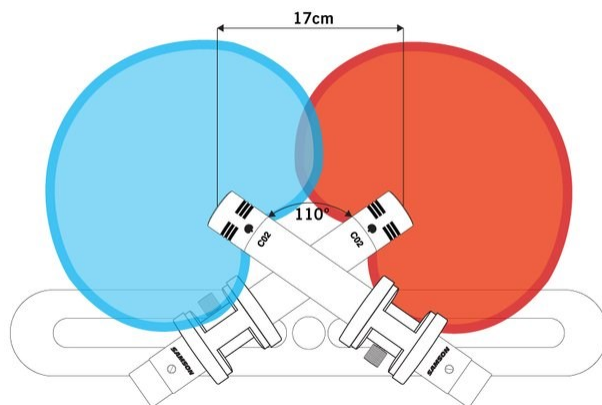
4.1 Nahrávací technika

Zvuk může svou „prostorovost“ získat v různých fázích své existence. Už při samotném nahrávání je možné zachytit nejen základní zvukový signál, ale také jeho prostorové vlastnosti, což výrazně ovlivňuje výslednou podobu a věrnost reprodukce. Pro dosažení tohoto efektu se využívají různé techniky a zařízení, které umožňují nahrát zvuk tak, aby měl posluchač pocit, že je přímo uprostřed dění.

Jedním z nejběžnějších a nejdostupnějších způsobů záznamu prostorového zvuku jsou techniky stereofonního nahrávání pomocí různých konfigurací mikrofonů. Mezi ně patří:

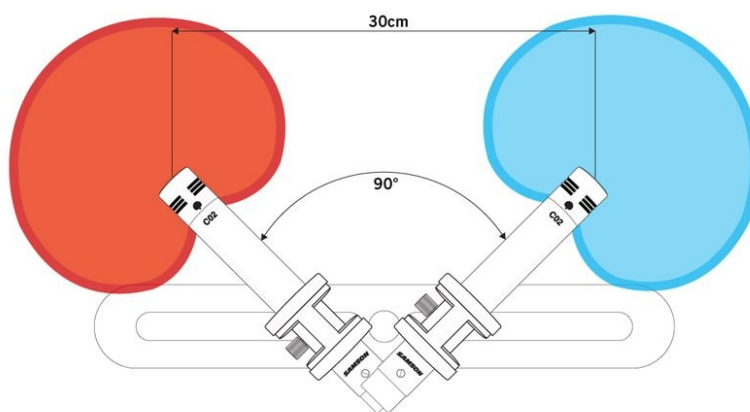
- **XY konfigurace.** XY, také nazývané náhodné stereo, zahrnuje dva mikrofony umístěné křížem přes sebe pod úhlem, který se může pohybovat od 90 do 130 stupňů. Mikrofony jsou umístěny tak, aby byly stejně daleko od zdroje zvuku, jinak by docházelo k fázovému rušení. Oba mikrofony musí být stejného typu a mít úplně totožné pole snímání, XY konfigurace je tak poměrně citlivá na různé problémy způsobující fázové rušení. Tato technika má výbornou mono kompatibilitu, je snadno realizovatelná na malou i velkou vzdálenost, ale nevytváří příliš široký stereo obraz. (Vanacoro, 2019)
- **AB konfigurace.** AB konfigurace používá dva mikrofony umístěné paralelně a směřující přímo vpřed. Vzdálenost mezi mikrofony je obvykle třikrát větší než vzdálenost od zdroje zvuku. Tato konfigurace poskytuje široký stereo obraz, ale může mít problémy s fázovými rozdíly při míchání do mona, kromě ILD se u ní totiž výrazněji projevuje také ITD. Využity mohou být kardioidní nebo všesměrové mikrofony, důležitá je hlavně vzdálenost mikrofonů od sebe a od zdroje zvuku. (Vanacoro, 2019)
- **ORTF konfigurace.** Vyvinutá v 60. letech pro Radio France, ORTF metoda je principiálně velice podobná XY konfiguraci. Hlavním rozdílem je přesné umístění dvou kardioidních mikrofonů pod úhlem 110° právě 17 centimetrů od sebe. Tato specifika se snaží imitovat umístění uší na lidské hlavě, což pomáhá posilovat stereofonní efekt. ORTF se potýká s podobnými obtížemi jako XY, nabízí však o trochu širší zvukový obraz. Snaha napodobení podmínek lidské hlavy není specifická pouze pro ORTF, tento

koncept dovádí k dokonalosti takzvané binaurální nahrávání, které už však nestojí pouze na konfiguraci běžných mikrofonů. (Vanacoro, 2019)



Obrázek 1 - ORTF konfigurace (Převzato z: <https://samsontech.com/blog/4-stereo-microphone-recording-techniques/>)

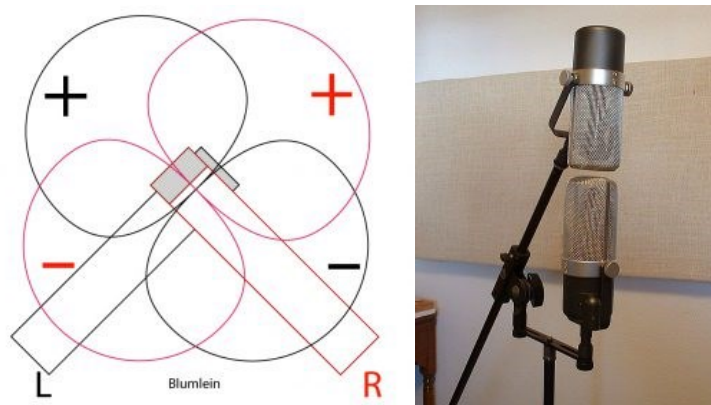
- **NOS konfigurace.** NOS je dalším pomyslným kompromisem mezi XY a AB konfiguracemi, tedy mezi zachováním mono kompatibility a širší zvukovou scénou. Mikrofony jsou umístěny přesně 30 centimetrů od sebe a pod úhlem 90°. Právě tato technika je oblíbená pro nahrávání akustických nástrojů, jako například koncertní piano, díky možnosti zachycení ambience místnosti. (Vanacoro, 2019)



Obrázek 2 - NOS konfigurace (Převzato z: <https://samsontech.com/blog/4-stereo-microphone-recording-techniques/>)

- **Blumlein Pair.** Blumlein konfigurace využívá dva mikrofony s osmičkovou (figure-8) směrovou charakteristikou, které jsou umístěny proti sobě pod úhlem 90 stupňů. Technika Alana Blumleina vyvinuta ve 30. letech 20. století byla původně zamýšlena pro vytvoření realistického stereo obrazu při nahrávání v Abbey Road Studios. V Blumlein konfiguraci jsou mikrofony umístěny tak, aby jejich kapsle byly co nejbliže

sobě, což minimalizuje fázové rozdíly. Tato metoda je známá svou schopností zachytit jak přímý zvuk, tak přirozenou akustiku místnosti, což vytváří bohatý a realistický zvukový obraz. (Music Production Nerds, 2023)



Obrázek 3 - Blumlein Pair (Převzato z: <https://musicproductionnerds.com/blumlein-mic-technique>)

- **Mid/Side (M/S).** M/S technika kombinuje jeden kardioidní mikrofon směřující přímo na zdroj zvuku s druhým mikrofonem s osmičkovou směrovou charakteristikou, který je umístěn kolmo na první. Mid mikrofon zachycuje přímý zvukový signál, zatímco Side mikrofon snímá prostorové a polohové informace. Díky této konfiguraci je možné v postprodukcí upravit šířku stereo obrazu změnou úrovně Side mikrofonu, což umožňuje větší kontrolu nad výsledným zvukem. Tento přístup také zajišťuje dobrou mono kompatibilitu, protože pokud se smíchají signály do mona, Side kanály se navzájem vyruší, což zanechá pouze čistý signál z Mid mikrofonu. (McAllister, 2023)

Stereofonní techniky mají potenciál pořídit přesvědčivě prostorové nahrávky, pro dosažení maximálního přiblížení realitě jsou však za potřebí sofistikovanější metody, které s realističností na druhou stranu přináší také komplexitu a vyšší náklady na realizaci. Mezi takové metody patří předně záznam binaurálního zvuku a soundfield technologie.

4.1.1 Binaurální zvuk

Pro záznam binaurálního zvuku pracujícího s HRTF je možné využít nahrávacích technologií, které co nejvěrněji simulují podmínky, za kterých se zvuk dostává od zdroje do lidské hlavy. K tomu slouží speciálně uzpůsobené mikrofony v podobě maket figurín, které se nejčastěji snaží hlavně anatomicky co nejvíce přiblížit. Dva mikrofony bývají umístěny v umělých sluchovodech doplněných o ušní boltce, při reprodukci nahrávky pořízené takovýmto zařízením je tedy v ideálních podmínkách zvukové pole posluchače rozšířeno do teoretického maxima, tedy včetně



Obrázek 4 - Binaurální mikrofon Neumann KU 100 (Převzato z: <https://audiouniversityonline.com/binaural-audio/>)

vertikálních rozdílů. Protipólem kvalitativních hodnot velkých binaurálních mikrofonů je jejich obtížná manipulovatelnost vzhledem k rozměrem a hmotnosti. Pořizovací cena takovéto sofistikované techniky se pohybuje ve stovkách tisíc českých korun, využití je tedy převážně v profesionální sféře, například sound design imerzivních scén virtuální reality.

Levnější alternativou mohou být mikrofonové kity, které se vkládají přímo do uší a využívají tak výhod HRTF bez nutnosti figuríny. Kvalitní binaurální nahrávky lze tak pořídit i za cenu desítek, případně i jednotek tisíc, tento přístup má však také svá úskalí. Hlavní charakteristikou, kterou je třeba mít na paměti, je fakt, že sama nahrávající osoba je součástí nahrávací soupravy, každý neopatrný zvuk či pohyb tak může nenávratně znehodnotit nahrávku. Levnější mikrofony mohou mít nedostatečné odhlučnění kabelu a nahrávající osoba tak musí při pořizování záznamu zůstat zcela bez pohybu pro dosažení kýženého výsledku. Oproti mikrofonům s figurínami, které jsou normované podle průměrných a co nejuniverzálnějších parametrů pro HRTF, nahrávání zvuku mikrofony určenými do uší také riskuje to, že záznam bude příliš specificky reflektovat HRTF nahrávající osoby a pro následné posluchače tak může být výsledný efekt narušený.

Střední cestou jsou binaurální mikrofony, které místo kompletní figuríny tvoří pouze dva umělé ušní boltce fixované do vhodné vzdálenosti od sebe. Tento přístup stále kvalitní stereofonní nahrávce dodává znatelný binaurální efekt díky HRTF získané odražením a lámáním zvuku o umělé boltce a nutným vstupem zvuku do umělých zvukovodů, odpadají však problémy s přenosností a cenou nedosažitelnou pro běžného uživatele. (Mathias, 2024b)



Obrázek 5 - Binaurální mikrofon 3Dio FS XLR (Převzato z: <https://3diosound.com/products/free-space-xlr-binaural-microphone>)

Využití HRTF pro věrnou reprodukci prostorového zvuku by se vzhledem k výsledkům mohlo zdát jako přirozený krok kupředu, který by měl být adoptován celým audio průmyslem, významným omezením celé binaurální technologie je však nutnost přehrávání ve sluchátkách. Kvalita efektu je poté také závislá na kvalitě a vlastnostech sluchátek jako takových, neboť využití HRTF zapříčiňuje vyzdvižení a potlačení některých frekvencí v závislosti na tvaru uší, ve kterých byly nahrávány. Pokud

však binaurální nahrávka není zcela kompatibilní s posluchačovou individuální anatomíí, sluchátka s nevyváženým zvukovým profilem mohou tyto frekvence zveličít a kvalitu poslechu tím paradoxně zhoršit. V ideálním případě je proto k binaurálnímu přehrávání vhodné používat sluchátka s co nejvyváženější frekvenční odezvou, což je žádaný faktor u Hi-Fi sluchátek, ale rozhodně není samozřejmostí. Kvalitně nahraný stereo záznam tak může ve sluchátkách nakonec znít lépe než binaurální záznam s nevhodnými podmínkami.

4.1.2 Soundfield a Ambisonics

Zcela odlišným přístupem k pojetí autentického prostorového zvuku je koncept pořizování a reprodukce nahrávek zvaný soundfield (zvukové pole). Tato technika využívá k zachycení všech drobných nuancí chování zvuku ve 3D prostoru pole několika mikrofonů v různých konfiguracích a při následné reprodukci zvuků v dostatečně velkém vícekanálovém systému reproduktorů dosahuje vysoké imerzivity. Soundfield nahrávání využívá sférických harmonických funkcí a sférických Besselových funkcí k reprezentaci zvukového pole. Tyto matematické nástroje umožňují přesnou dekompozici a analýzu zvukových vln v prostoru. (Zhang et al., 2017)

Konkrétní reprezentací tohoto přístupu je metoda a formát Ambisonics. Speciální mikrofony určené k nahrávání touto metodou jsou opatřeny signálovými procesory, které mají za úkol transformaci nahrávaného signálu. Mikrofonní kit tvoří dvě sady signálů známé jako A-Format a B-Format. Mikrofon sám o sobě produkuje A-Format, což jsou čtyři signály z mikrofonních kapslí umístěných ve tvaru pravidelného čtyřlístku. Tyto signály se však bez dalšího zpracování nepoužívají. Transformací A-Formátu do B-Formátu vznikají čtyři nové signály, které nesou prostorové vlastnosti zvuku:

- W - tlakový signál z všesměrového mikrofonu,
- X – směr vpřed a vzad, mikrofon s osmičkovou směrovou charakteristikou,
- Y – směr vpravo a vlevo, mikrofon s osmičkovou směrovou charakteristikou,
- Z – směr vzhůru a dolů, mikrofon s osmičkovou směrovou charakteristikou.

Tato konfigurace umožňuje flexibilní rekonstrukci třírozměrného zvukového pole, kde lze kombinací signálů simulovat jiné druhy mikrofonů, například kardioidní nebo hyperkardioidní, a to jak při živém záznamu, tak v postprodukci. B-Format nahrávky lze dekódovat pro jakoukoli konfiguraci reproduktorů, což umožňuje flexibilní přehrávání v různých prostorových uspořádáních, a to jak horizontálně, tak vertikálně. (RØDE, 2022)

4.2 Přehrávací technika

Jednou z tradičních a stále velmi populárních metod přehrávání je použití stereofonního systému. I přes svou jednoduchost může tento systém efektivně simulovat směrovost zvuku a poskytovat posluchači základní prostorový zážitek. Jeho hlavní předností je snadná implementace a nízké náklady ve srovnání s komplexnějšími systémy. Prostorovosti je dosahováno nastavením parametrů jednotlivých kanálů, které označujeme jako interchannel level differences (dále ICLD) a interchannel time differences

(dále ICTD). Tyto pojmy na první pohled připomínají základní lokalizační principy ILD a ITD, jelikož s nimi úzce souvisí – ICLD a ICTD využívají toho, jakým způsobem člověk určuje směr a vzdálenost zdroje zvuku, a pomocí toho mění intenzitu a časování obou kanálů tak, aby apelovaly na posluchačův ILD a ITD a vytvořily tak iluzi zvuku umístěného v prostoru. Ačkoliv je vliv ICLD a ICTD na domnělý směr zdroje zvuku intuitivní, podle článku *Perceptual Spatial Audio Recording, Simulation, and Rendering* je přesný vztah mezi těmito veličinami a vnímáním směru závislý na rozsáhlých psychoakustických měřeních. (Hacihabiboglu et al., 2017)

V případě vícekanálových systémů se používá označení standardizované Mezinárodní telekomunikační unií (ITU) sestávající ze dvou čísel, kde první označuje počet hlavních kanálů a druhé počet nízkofrekvenčních kanálů. V běžné praxi se tak setkáme se systémy 3.1 (3 hlavní kanály a jeden nízkofrekvenční reprodukován tzv. subwooferelem), 5.1, 7.1 nebo třeba také 22.2. Množství kanálů a tím pádem reproduktorů propůjčuje systému větší flexibilitu z hlediska směřování zvuků, hlavní práci však obvykle vykonávají přední reproduktory, hlavně v případě, že je zvuk doplněn vizuálního média. Levý a pravý přední kanál standardně nesou plnohodnotnou stereo informaci kvůli oboustranné kompatibilitě. (Hacihabiboglu et al., 2017)

Stereo i surround technologiemi je možné ozvučit místnost reproduktory, vhodným využitím jsou však také sluchátka. U běžných sluchátek je stereofonní záznam efektivnější než při přehrávání z reproduktorů, protože do každého ucha přichází pouze ten kanál, který je mu určený, naproti tomu z reproduktorů se signály mísí a efekt ztrácí na síle v závislosti na povaze přehrávaných signálů. Zvuk přehrávaný surround soustavou reproduktorů zaplňuje prostor zvukem z více stran, kýžený efekt je tak snadněji dosažitelný a nedochází k tak velkému zkreslení. Také sluchátka mohou přehrávat surround zvuk, musí k tomu však být uzpůsobena větším množstvím reproduktorů a kanálů. (DH Audio & Home Theater, 2020)

Binaurální nahrávku, jak již bylo zmíněno, lze pořídit pouze za specifických okolností a za pomoci speciálně uzpůsobené nahrávací techniky. Z hlediska přehrávání je tato technologie výrazně dostupnější, vyžaduje totiž pouze běžná stereo sluchátka. Prostorovost zvuku v podobě komplexní HRTF je zakódována ve dvou kanálech, stereofonní sestava reproduktorů by však v tomto případě nebyla dostačující kvůli vzájemnému rušení kanálů. Nejlepšího binaurálního zážitku tak posluchač dosáhne při využití kvalitních sluchátek s co nejpřesnější frekvenční odezvou. (Mathias, 2024b)

V kontrastu s přehráváním binaurálních nahrávek je technologie soundfield, jejíž reprodukce je realizovaná vytvořením zvukové scény v předem definovaném prostoru za pomoci několika reproduktorů po okraji tohoto prostoru. Návrh zvukové scény je nutnou součástí celého procesu a může využívat různé principy, některé na vektorové bázi (VBAP – Vector Based Audio Panning) nebo méně komplikované poziční bázi (DBAP – Distance Based Audio Panning). Zcela odlišným přístupem k soundfield reprodukci je technika Wave-Field Synthesis (WFS), která využívá nepřetržitou distribuci sekundárních zvukových zdrojů rozmístěných po obvodu určeného prostoru, což umožňuje přesně

reprezentovat zvukové pole jako spojitý řetězec zvuku kolem posluchače a dosáhnout detailní kontroly nad směrem a rozložením zvuku. (Zhang et al., 2017)

4.3 Formáty prostorového zvuku

Na základě výše představených technologií určených k záznamu a reprodukci prostorového zvuku je zřejmá existence různých nekompatibilních metod, které mají speciální požadavky na způsob kódování a ukládání zvukových dat. V případě stereo a surround technologií nenarazíme na větší problémy než podporovaný počet kanálů a vystačíme si s formáty jako MP3, WAV, AAC, nebo FLAC. Když však přejdeme k sofistikovanějším metodám prostorového zvuku, které vyžadují více informací o směrovosti a umístění zvukových zdrojů, narazíme na potřebu speciálnějších formátů.

Binaurální zvuk, ač komplexní ve své výrobě, nepotřebuje speciální audio formáty pro ukládání nebo reprodukci. Jelikož je binaurálního efektu dosaženo prostřednictvím specifických nahrávacích technik, které simulují zvukové prostředí tak, jak je vnímáno lidskými ušima, výsledné nahrávky mohou být uloženy v jakémkoliv běžném stereofonním formátu, jako je MP3 nebo WAV. Tyto formáty jsou schopné zachovat zvukovou informaci potřebnou pro binaurální reprodukci. Výsledné nahrávky jsou pak kompatibilní s obvyklými audio přehrávači a nevyžadují žádné speciální zpracování nebo dekódování, což činí binaurální nahrávky univerzálně použitelnými a snadno přístupnými pro širokou veřejnost.

Komplikovanější jsou formáty objektově orientované, které se stereofonními daty nemají mnoho společného. Přístupy jako VBAP nebo WFS ukládají monofonní stopu společně s velkým množstvím metadat, které popisují polohové vlastnosti zvuku. Naproti tomu soundfield metoda Ambisonics pracuje s kanály, jako stereo nebo surround, jsou to však čtyři kanály B-Formátu značené jako W, X, Y a Z, které nejsou se surround kanály kompatibilní bez dalšího zpracování. Výhodou tohoto přístupu jsou zajímavé možnosti manipulace těchto čtyř signálů matematickými metodami, například rotace pomocí rotační matice. Flexibilita a dynamičnost Ambisonics z něj činí užitečný nástroj pro aplikace ve virtuální realitě a jiných imerzivních médiích. (Arteaga, 2023)

Výraznou postavou na poli prostorového zvuku jsou Dolby Laboratories se svým formátem Dolby Atmos. Ten je známý především z kin, je však aktuálně prezentován jako formát, ve kterém by uživatel mohl chtít poslouchat a produkovat hudbu či sledovat filmy z pohodlí domácího kina. Atmos využívá jak tradiční kanály, tak objektově orientované audio, které umožňuje zvukovým inženýrům manipulovat se zvukem jako s jednotlivými objekty. Specifikace tohoto formátu zahrnují podporu až 128 zvukových stop včetně 118 audio objektů nezávisle manipulovatelných v reálném čase. (Dolby Laboratories, 2024)

Navzdory technickým inovacím a širokému přijetí mezi profesionály i spotřebiteli, marketingové strategie Dolby kolem jejich formátu Atmos vyvolaly určitou kontroverzi. Někteří kritici, včetně profesionálních hudebních producentů, tvrdí, že Dolby Atmos je prezentován více jako marketingový tah než skutečný průlom ve zvukové technologii, a kritizují odvážná tvrzení Dolby.

Hudební producent a popularizátor vědy Benn Jordan ve své video eseji *Gaslighting Your Fans w/ Dolby ATMOS™* upozorňuje na dle jeho slov klamavou techniku prezentovanou na webových stránkách společnosti Dolby:

Pokud navštívíte webové stránky společnosti Dolby a vyzkoušíte si Atmos, setkáte se s některými rozpoznatelnými skladbami, jako je *What's Going On* od Marvinu Gaye, kde si ji můžete poslechnout ve verzi Atmos oproti staré nudné stereo verzi. Nejenže to absolutně nedává smysl, protože byste neměli systém Atmos, na kterém byste ji mohli poslouchat, ale většina prohlížečů ani nemá podporu Atmos. Co je však ještě horší, stereo verze, se kterou to porovnáváte, není skutečný mix, který najdete na streamovací platformě, ale místo toho nahrávka s opravdu špatným mixováním a panningem. Takže aby bylo jasno, zvukově se ani jeden z těchto dvou souborů ani zdaleka neblíží skladbě, kterou schválil Marvin Gaye nebo jeho zvukový technik, není tam ani hvězdička nebo skrytý text, prostě vám přímo drze lžou (Jordan, 2023)².

Jordan zároveň dodává, že jeho video nemá za cíl zpochybnit a znevažít přínos Dolby Laboratories do oblasti technologií prostorového zvuku ani se nesnaží tvrdit, že vyvinutí Atmosu nestálo Dolby velké množství úsilí a prostředků, dodává však, že toto úsilí může být vyplýváno na neadaptivním licencovaném modelu (Jordan, 2023). Diskurz v tomto tématu je rozsáhlý a v kontextu Atmosu se ozývají skeptické i optimistické hlasy, což zdůrazňuje potřebu kritického přístupu k marketingovým tvrzením.

4.4 Software

Pro práci s prostorovým zvukem se využívá řada softwarových nástrojů, díky kterým ho lze manipulovat, ale také vytvářet. Základním nástrojem je typ software označovaný jako Digital Audio Workstation (DAW) sloužící k nahrávání, úpravám a vytváření zvuků, jejich následné kompozici a mixu. Profesionální software jako Logic Pro, Ableton Live, FL Studio nebo CakeWalk by BandLab nabízí široké spektrum nástrojů pro práci s mono, stereo i surround zvukem, lze je však také doplnit nespočtem pluginů pro pokročilejší práci s binaurálním či Ambisonics zvukem.

- **THX Spatial Creator.** Tento plugin pomáhá mono a stereo signál přeformovat v binaurální audio. Pomocí grafického rozhraní může uživatel virtuálně přesunout zdroj zvuku na libovolné trojrozměrné souřadnice a plugin pak na základě HRTF algoritmů upraví parametry zvuku tak, aby ve sluchátkách vznikla požadovaná iluze směru a vzdálenosti. (THX Ltd., 2024)
- **Harpex.** Plugin oblíbený a široce využívaný pro svou všestrannost v kontextu Ambisonics. Kromě převodu A-Format na B-Format zvládá také tyto formáty překonvertovat do běžných surround a 3D surround formátů, binaurálního stera nebo AmbiX určeného pro virtuální realitu. (Harpex, 2024)

² Překlad autora.

- **Waves Nx.** Nx od společnosti Waves je inovativní plugin, který umožňuje mixování a poslech prostorového zvuku přes obyčejná stereo sluchátka. Nabízí emulaci prostorového poslechu prostřednictvím virtuální realistické akustiky místnosti, což posluchačům poskytuje iluzi poslechu v ideálně nastaveném monitorovacím prostoru. Waves Nx také nabízí možnosti pro sledování pohybu hlavy, což zlepšuje realističnost poslechové zkušenosti a pomáhá v dosažení přesnějšího vnímání prostorového zvuku. (Waves, 2024)

Kromě speciálních funkcí pro prostorový zvuk tyto pluginy také umožňují snadnou integraci do běžných pracovních postupů v DAW. Umožňují zvukovým designérům a hudebním producentům experimentovat s prostorovými zvukovými efekty při zachování efektivity jejich standardních pracovních procesů. To je zvláště užitečné v oblastech jako filmová produkce nebo virtuální realita, kde je realistická zvuková scéna nezbytná pro imerzivní zážitek.

PRAKTICKÁ ČÁST

5 Náměty na výukové aktivity

Téma prostorového zvuku se prolíná do mnoha různorodých oblastí a je komplexním jevem, který může být v mnoha případech těžko uchopitelný. Prostorový zvuk vyžaduje pochopení fyzikálních principů, akustických vlastností prostředí a technologických aspektů vícekanálových zvukových systémů, ve své podstatě ovšem stojí na relativně snadných základech, které ve zjednodušené podobě kvalitně reflektují reálný svět. Zvuk je také vzhledem k jeho výjimečně snadno prezentovatelným vlastnostem, všudypřítomnosti a familiárnosti velice atraktivním a snadno uchopitelným tématem k výuce. Kromě obvyklého propojení zvuku s fyzikálními principy nebo multimediálními technologiemi jej lze také zkoumat v kontextech jiných oblastí, jako jazyk, architektura, biologie, umění, psychologie, nebo například geometrie.

Následující kapitoly popisují tři pohledy na problematiku prostorového zvuku v mezioborových kontextech, staví na principech popsaných teoretické části práce a vytváří robustní základ, na kterém lze rozpracovat konkrétní výukové aktivity, úkoly, prezentace či pracovní listy, které problematiku přiblíží žákům základní nebo střední školy.

6 Pohyb zvuku v kvadrofonním prostoru pomocí topografických ploch

Kvadrofonní zvuk je sice technologicky spíše okrajovým tématem, díky jeho snadné implementaci je však zajímavým nástrojem pro vizualizaci prostorového zvuku. Návrh topografických ploch v kvadrofonním prostoru je vizualizační pomůcka, díky níž žák geometrickými metodami pochopí, jak může ILD vytvořit iluzi zvuku pohybujícího se v prostoru. Na základě těchto postupů je pak také schopen geometrický model snadno realizovat a ověřit si tak teorii v praxi.

6.1 Topografické plochy

Topografie, vědní obor zabývající se grafickým znázornění terénu a povrchu Země, zdánlivě nemá s tématem prostorového zvuku mnoho společného. Topografické plochy a pohyb zvuku v prostoru však konvergují v jednom společném bodě, kterým je geometrie.

Topografická plocha znázorňuje terén pomocí vrstevnic, křivek spojujících body se stejnou nadmořskou výškou. V takovéto ploše je možné zkonstruovat křivku představující cestu terénem a k této cestě následně vytvořit takzvaný podélný profil, který je rozvinutím této křivky do roviny a zobrazuje stoupání a klesání průběhu celé trasy. Vrstevnice jsou ve své podstatě ukazatele hladiny veličiny (v případě topografie nadmořské výšky) v ploše. Zaměníme-li tuto veličinu za vlastní vhodně zvolenou veličinu s podobnými vlastnostmi ve 2D prostoru, lze na ni obdobně aplikovat všechny nástroje.

6.2 Princip

Šíření zvuku v prostoru lze popsat různými veličinami, jako frekvence nebo vlnová délka, jak již však bylo zmíněno v kapitole „Principy lokalizace zvuku“, jedním z nejdůležitějších parametrů pro lokalizaci zvuku v prostoru je jeho intenzita (příp. hlasitost). Představíme-li si zvuk vysílaný z jednoho bodu v prostoru, hladina jeho intenzity bude klesat s přibývajícím vzdáleností. Po zakreslení hladin intenzity do plochy v podobě vrstevnic dostaneme plochu s obdobnými vlastnostmi, jako má plocha topografická. Pro zachycení pohybu však potřebujeme více než jeden zdroj zvuku, model popisovaný v této kapitole se tak opírá o princip diskrétní kvadrofonie.

Při rozmístění čtyř reproduktorů do jednotlivých rohů čtvercové nebo obdélníkové místnosti získáme zvukově-topografickou mapu místnosti se čtyřmi sadami protínajících se čtvrtkružnicových vrstevnic, kde každá vrstevnice představuje hladinu jednoho ze čtyř diskrétních kanálů. Získáme tak čtyřdimenzionální plochu, ve které souřadnice každého bodu přímo ukazují procentuální hladiny hlasitosti jednotlivých reproduktorů. Do této plochy následně máme možnost vkreslit bod, úsečku nebo křivku, které budou představovat umístění nebo případně pohyb zdroje zvuku v prostoru. V případě bodu jednoduše určíme jeho čtyři souřadnice, v případě úsečky či křivky provedeme nárys podélného profilu pro každou soustavu vrstevnic, na který následně aplikujeme časovou masku a získáme tak podrobný návod pro nastavení kanálů k vytvoření iluze pohybu zvuku v prostoru po dané trajektorii.

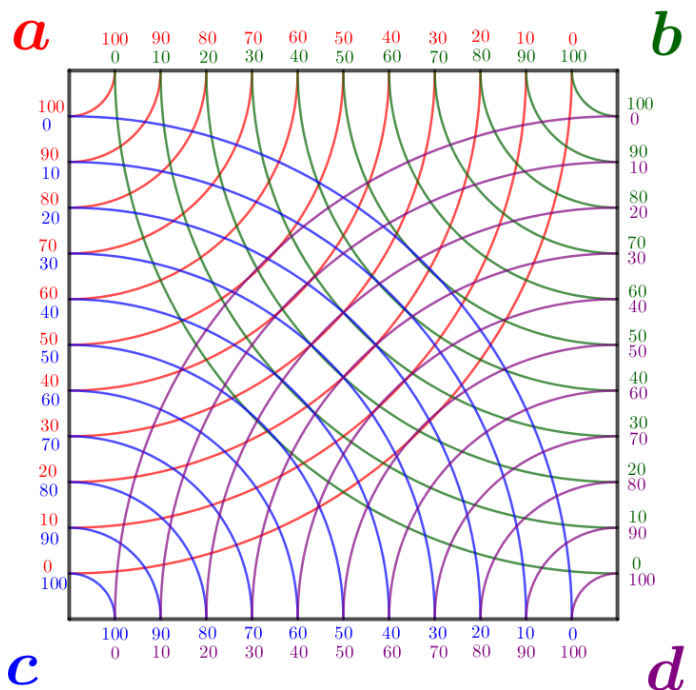
Nárys podélného profilu s aplikovanou časovou maskou je možné ručně převést do reality za pomoci jednoduchého softwaru schopného pracovat s více kanály, jako je například Audacity. Po exportování zvukového souboru lze otestovat věrnost prostorového efektu v místnosti vybavené příslušnou konfigurací reproduktorů, případně v omezené podobě také ve sluchátkách.

6.3 Lineární zvukově-topografická mapa

Jako jedna z možných reprezentací výše popsaného systému je zvukově-topografická mapa sestavená z vrstevnic s lineárním inkrementem určujícím procentuální hladinu každého ze čtyř kanálů. Rozteč mezi jednotlivými oblouky je arbitrární a jejím hlavním účelem je grafická přehlednost, která přichází na úkor realističtější reprezentaci skutečnosti. Stejnému účelu slouží čtvercová místnost, ačkoliv daný model by fungoval stejným způsobem i v místnosti obdélníkové.

Na obrázku 6 je každý kanál opatřen jedenácti vrstevnicemi s hodnotami od 100 do 0, které postupně klesají od zdroje a představují procentuální hladinu hlasitosti reproduktoru v případě, že je zdroj zvuku v dané vzdálenosti.

Model je realizován v interaktivním geometrickém software GeoGebra, je však možné nárys provést ručně na papír ve vhodném měřítku. Jednotlivé rohy modelu jsou označeny písmeny *a* až *d*, které odpovídají označení kanálů v diskrétní kvadrofonické konfiguraci.



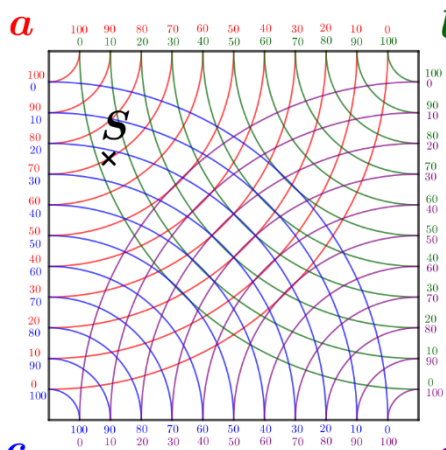
Obrázek 6 - Lineární model zvukově-topografické mapy

6.4 Umístění a pohyb zvuku v rovině

V případě umístění stacionárního bodu do tohoto systému lze dosáhnout pouze omezených výsledků simulace umístění zvuku do prostoru a efekt je výraznější, čím blíže je zvolený bod jednomu z rohů. Souřadnice bodu, které následně převedeme na hladiny hlasitostí jednotlivých kanálů, získáme následujícím způsobem:

- V rovině je dán bod S (viz obrázek 7) o souřadnicích $S = [S_a; S_b; S_c; S_d]$. Souřadnice S_a a S_d vyplývají přímo z obrázku, bod je umístěn na vrstevnici kanálu a s číslem 70 a za vrstevnicí kanálu d s číslem 0, souřadnice proto doplníme na $S = [70; S_b; S_c; 0]$. Pro zbylé

souřadnice použijeme aproximaci v daném intervalu a zvolíme nejvhodnější přirozené číslo. Vzhledem ke zvolenému rozpětí intervalu v podobě deseti jednotek je nejvyšší



očekávaná odchylka ± 3 jednotky za předpokladu, že jsme schopni určit, ve které polovině intervalu se bod nachází, a zda není zcela uprostřed. V takovém případě nám v každé polovině intervalu zbydou čtyři přípustné přirozené hodnoty, je tedy možné se mýlit nejvýše o 3 jednotky (například nejbližší hodnota danému bodu je ve skutečnosti 31, víme s jistotou, že ji najdeme mezi čísly 30 a 35 a nejde o ani jednu z těchto hodnot, nejhorší chyba

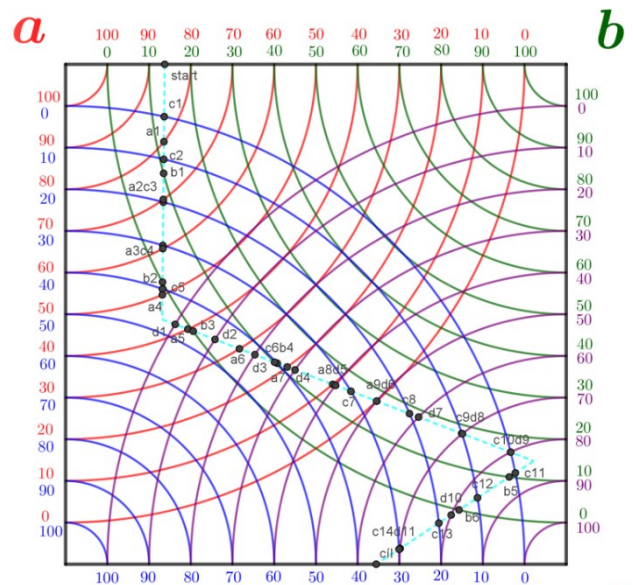
c **d**
Obrázek 7 - Umístění bodu do roviny

tak může nastat zvolením čísla 34). Tato odchylka není v kontextu skutečné hlasitosti reproduktoru signifikantní. Tímto způsobem aproximujeme zbylé souřadnice:

$$S = [70; 3; 22; 0]$$

Znázornění bodu je pro tento model zásadním krokem pro pochopení jeho fungování, primárním účelem je však reprezentace pohyblivého zdroje zvuku. Tento pohyb lze do modelu zakreslit úsečkou, lomenou čarou nebo křivkou, a to v závislosti na požadované komplexitě, která každou další variantou znatelně roste.

Zakreslení trajektorie je provedeno v závislosti na médiu, ve kterém máme zvukově-topografickou mapu realizovanou. V prostředí GeoGebra je možné pro úsečku nebo lomenou čáru využít jednoduše nástroje „úsečka“, v případě trajektorie tvaru obecné křivky se potom nabízí pouze nástroj „pero“. Pokud ovšem model realizujeme v jiném software, vhodným nástrojem mohou být Bézierovy křivky nebo jiné nástroje spojené s vektorovou grafikou. V případě nárysu na papír nejsme omezeni nástroji a trajektorii můžeme zhotovit libovolně. V každém případě je však výhodné co nejvíce využívat body se snadno stanovitelnými souřadnicemi, kterými jsou například průsečíky vrstevnic.



c **d**
Obrázek 8 - Umístění lomené čáry do roviny

Po zanesení trajektorie označíme body všechny průsečíky úsečky, lomené čáry nebo křivky s vrstevnicemi a důkladně každý z nich popíšeme.

System popisování bodů by měl být co nejintuitivnější a nejpréhlednější, vhodné je například každý bod označit písmenem korespondujícím s konkrétním relevantním kanálem společně s číslem označujícím jeho pořadí od počátku trajektorie, jak je ukázáno na obrázku 8.

6.4.1 Podélný profil

Vytvoření podélného profilu je jen jedna z možností reprezentace souřadnicových dat zanesených ve zvukově-topografické ploše. Cílem tohoto kroku je zachovat grafickou podobu výstupu a křivkou nebo lomenou čarou znázornit změny hladin jednotlivých kanálů v průběhu času. Alternativní metodou reprezentace dat by byla tabulka hodnot, vhodnější nástroj závisí na následné metodě realizace.

Oproti skutečným topografickým plochám je nutné pro jednu trajektorii vytvořit celkem čtyři podélné profily, jeden pro každý kanál. Profily zanášíme do soustavy souřadnic, kde osa y představuje procentuální hodnotu nastavení hlasitosti kanálu a osa x posun v čase. Vzhledem k tomu, že trajektorie není přímo závislá na rychlosti pohybu daného zdroje zvuku, osa x zatím v grafu není třeba popisovat, umístění do časového intervalu bude provedeno až dodatečně pomocí časové masky.

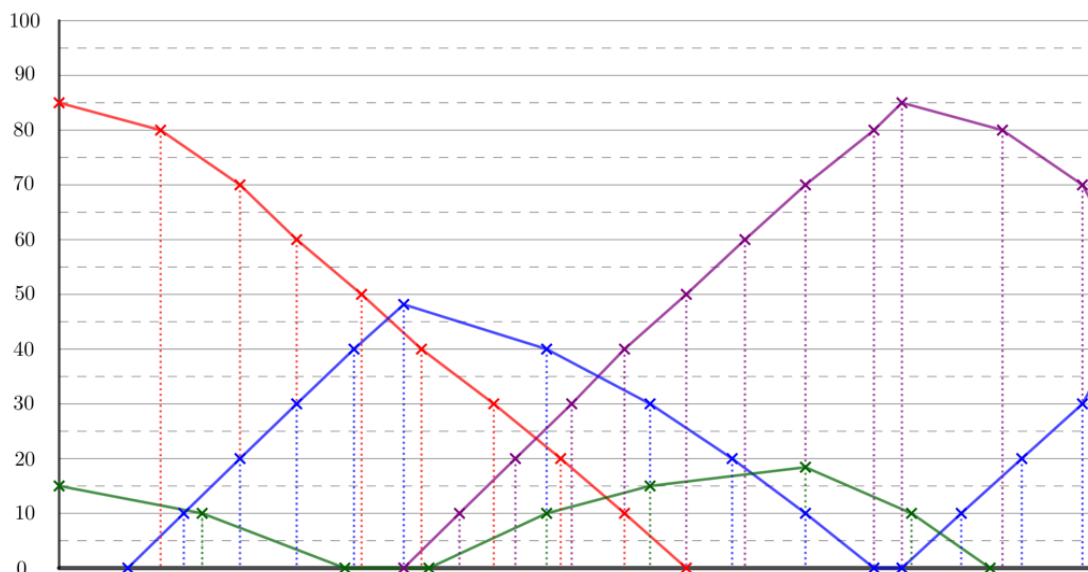
Nejprve je však potřeba zanést do soustavy souřadnic všechny vyznačené body. Pro každý bod jsou důležité tři jeho vlastnosti – jakému kanálu patří (označeno písmenem), jaká je jeho příslušná



Obrázek 9 - Soustava souřadnic bez dat a časové masky

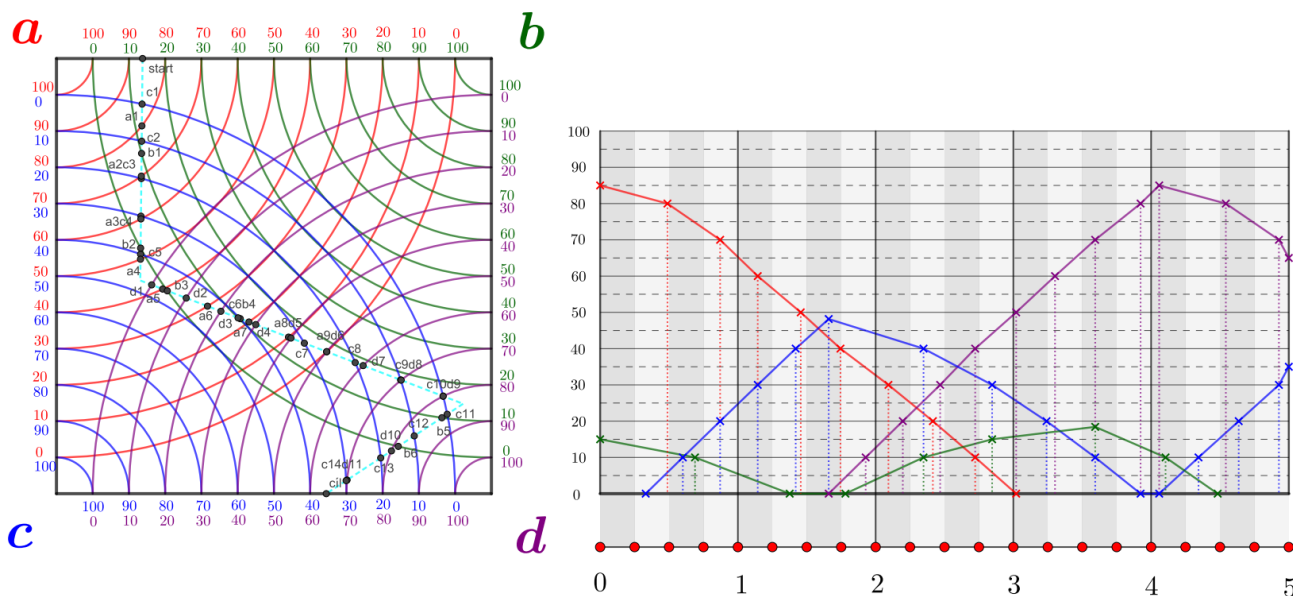
souřadnice (vyčteme z vrstevnic) a jak daleko leží od předchozího bodu. Právě poslední vlastnost je klíčová při zanášení bodů do příčného profilu. Na osu x nanese kružátkem nebo jiným relevantním digitálním nástrojem všechny body z topografické plochy, a to do jedné přímky a v příslušných vzdálenostech odpovídajících jejich vzdálenostem v topografické ploše. Následně každému z těchto bodů přiřadíme hodnotu odpovídající jeho souřadnici v daném kanálu, nanese ji na osu y a bod popíšeme nebo barevně označíme. Po zanesení všech bodů každou ze čtyř sad bodů pospojujeme do

lomené čáry nebo křivky a získáme tak podélný profil odpovídající grafické reprezentaci hlasitosti jednotlivých kanálů, stále však v neznámém čase.



Obrázek 10 - Soustava souřadnic se zanesenými daty

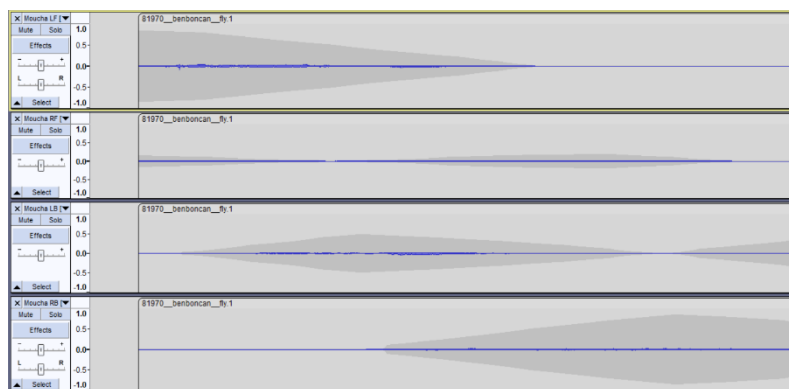
Pro dokončení finálního podélného profilu je potřeba aplikovat časovou masku, která zdánlivému zdroji zvuku dodá rychlost. Časový interval lze zvolit na základě různých požadavků, nejtypičtěji přímo známe požadovanou dobu trvání zvuku v sekundách nebo chceme dosáhnout požadované rychlosti v na základě délky trajektorie s a času t výpočtem $t = \frac{s}{v}$. Vypočtený nebo předem určený čas t rozdělíme na relevantní stejně velké intervaly a aplikujeme ho na celou šíři grafu, každá hodnota do grafu zanesená tak dostane své umístění v čase.



Obrázek 11 - Zvukově-topografická mapa s podélným profilem a časovou maskou

6.4.2 Realizace

Pro dosažení kýženého edukačního cíle je důležité výslednou zvukově-topografickou mapu společně s příčným profilem a časovou maskou aplikovat na zvukovou nahrávku a vhodně realizovat. Vzhledem k velice mechanickému přístupu k úrovním hlasitostí jednotlivých kanálů není na škodu použití jednoduchého software pro práci se zvukem, jako je například open source multiplatformní editor Audacity. Do editoru importujeme nebo přímo nahrajeme nahrávku zvuku požadované délky a tento zvuk nakopírujeme tak, aby byl zároveň přítomný ve čtyřech různých kanálech. Kanály pojmenujeme tak, aby bylo zřejmé, kterému kanálu přísluší který příčný profil, prostředí přiblížíme tak, aby časová osa editoru odpovídala časovým úsekům v časové masce nebo alespoň byla jejich násobkem, nakonec pomocí nástroje Envelope Tool ručně nanese hodnoty z příčného profilu na celý průběh nahrávky. Pro větší přesnost a komfort je vhodné co nejvíce přiblížit právě upravovaný úsek a zvýšit rozlišení svislé osy tak, aby více odpovídala procentuálním hodnotám v příčném profilu. Takto to provedeme s každou ze čtyř stop. Nakonec vše exportujeme do formátu



Obrázek 12 - Aplikace příčných profilů na kanály v editoru Audacity

podporujícího více kanálů (například FLAC) a za pomoci pokročilých nástrojů každou stopu propojíme v exportu s daným kanálem. Výsledkem je zvukový soubor, který při reprodukci ve vhodných podmínkách imituje pohybující se zdroj zvuku po dané trajektorii.

6.5 Omezení lineárního modelu

Lineární model zvukově-topografické mapy je především nástrojem pro vizualizaci a základní pochopení principu rozpoohybování zvuku v diskretně kvadrofonním prostoru, v důsledku zjednodušení celého procesu však dochází také k nepřesným interpretacím některých fyzikálních principů. Nejdůležitějším prvkem, kterým se tento model liší od reality, je jeho lineárnost. Intenzita zvuku klesá s druhou mocninou vzdálenosti, lineární model tak ztrátu intenzity značně zjednodušuje. Dostatečným důvodem pro toto zjednodušení je nejen nepoměrně snadnější odměřování a realizace oblouků na papíře i v digitálním prostředí, ale také výrazně lepší pokrytí prostoru místnosti vrstevnicemi. Kvadratický model tak je možný a teoreticky by lépe vystihoval fyzikální podstatu intenzity zvuku, jeho realizace by však představovala další překážku v už tak relativně komplexním procesu.

6.6 Diskuze

Klíčové principy popsané v této kapitole vychází především z pochopení lokalizační techniky ILD, kterou žáci při realizaci prakticky ovládají v příslušném softwaru nastavováním intenzit kanálů,

čímž uvádějí do praxe využití parametrů ICLD. Teoretická východiska potřebná k realizaci výukové aktivity založené na těchto principech tak zahrnují základní pochopení lokalizačních principů, důležitý je však také přesah do geometrie, ať už prováděné na papír nebo digitálně. Na základě toho je vhodné případné aktivity koncipovat spíše pro žáky pozdního druhého stupně a střední školy.

Výukové aktivity vybudované na celé problematice nebo jen jejích částech lze zařadit do předmětů fyzika z pohledu akustického, matematika z pohledu geometrického a informatika z pohledu práce s multimediálními daty. V případě středních škol je také možné přesáhnout až do předmětu deskriptivní geometrie, který se okrajově zabývá topografickými plochami a příčnými řezy.

7 Zvukové kulisy

Návrh zvukové kulisy nabízí jednoduchý a praktický způsob, jak prezentovat složitý vícekanálový systém pomocí diskrétních zvukových zdrojů. Vytvářením zvukových kulis ve školní třídě si žáci prakticky vyzkoušejí, z jakých prvků se skládá zvuková scéna a jak pomocí nich replikovat reálné zvukové prostředí.

7.1 Analýza zvukové scény

Prvním krokem při vytváření prostorového zvuku je analýza zvukové scény v reálném prostředí. To zahrnuje identifikaci a zaznamenání různých zvukových prvků, které se v daném prostředí nacházejí, včetně jejich četnosti, směru a hlasitosti. V lese lze například slyšet zvuky ptáků, větrem ševelící listy, kroky nebo vzdálený zvuk tekoucího potoka. V případě replikování scény, ve které nemáme možnost přímo být a analýzu provést, je třeba spolehnout se na co nejpřesnější znalosti daného prostředí. Analýza tropické džungle by prakticky byla náročná, na základě znalostí však můžeme tvrdit, že uslyšíme vodu stékající z vrchních stromových pater, cvrlikání hmyzu nebo vzdálené volání opic.

Zvuková scéna nemusí být komplikovaná co do počtu jednotlivých zvuků, pro co nejlepší následný efekt je však vhodné zaznamenat co nejvíce charakterizujících vlastností zvuků, hlavně směru a hlasitosti. Důležité je, jak se zvuky navzájem překrývají, nebo jak na sebe navazují. Analýza by proto měla probíhat v časovém úseku alespoň několika minut. Pozorování je možné zaznamenávat souvislým textem, body, jednoduchou mapkou nebo třeba hlasovými poznámkami, v každém případě je výhodné pořídit také několikaminutový nerušený zvukový záznam prostředí pro přesnější dohledávání jednotlivých zvuků.

Příklad poznámek z 15 minutového pozorování rušné ulice u přechodu pro chodce:

- Nepřetržitý hukot projíždějících aut z dálky, přichází z různých směrů, mění se podle rychlosti a vzdálenosti.
- Blízké hlasy chodců, tlumené rozhovory a kroky, slyšitelné hlavně z chodníku napravo.
- U přechodu: pravidelné tikání semaforu, pomalu, každých pár minut rychleji při zelené, přímo přede mnou.
- Zvuk aut se mění z plynulé jízdy na hlubší bublání čekajících motorů, když mají červenou, většinou zleva, občas vpravo vepředu.
- Občasné vzdálené houkání klaksonu z ulice za mnou, velmi slabé.
- Zvuk otevírání a zavírání dveří obchodů po pravé straně.
- Cinkání nádobí a příborů, když se v kavárně vpravo otevrou dveře. Slabé.
- Zvonění tramvaje daleko za mnou.

Samotná analýza může být výstupem konkrétní výukové aktivity zaměřené na poznání prostorů v blízkosti školy z hlediska akustiky. Žáci mohou místo slovních popisů zvukové scény vytvořit diagram umisťující konkrétní zvuky do mapy a následně porovnávat pozorování z různých zvukových prostředí.

7.2 Návrh zvukové scény

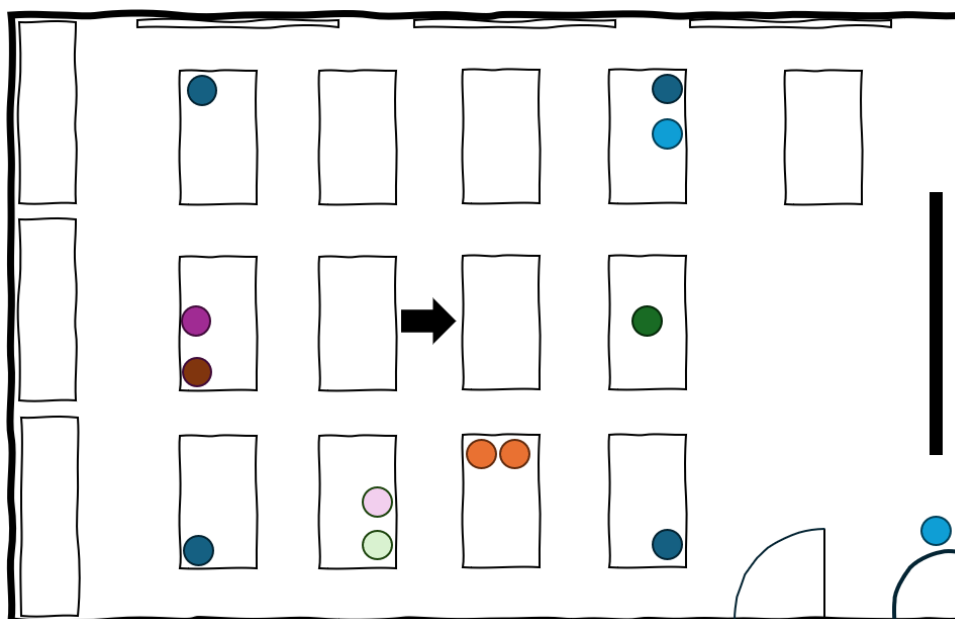
Analýza prostoru společně s nahrávkou by nám měla poskytnout dostatek informací k návrhu zvukové scény. Ten se skládá z několika důležitých kroků:

- **Identifikace klíčových zvukových prvků.** Na základě provedené analýzy identifikujeme klíčové zvukové prvky, které budou tvořit základ naší zvukové scény. V případě předchozího příkladu se jedná o následující zvuky:
 - Hukot projíždějících aut,
 - hlasy a rozhovory chodců,
 - kroky,
 - pomalé a rychlé tikání semaforu,
 - bublání motorů čekajících aut,
 - klakson auta,
 - otevírání a zavírání dveří,
 - cinkání nádobí a příborů,
 - zvonění tramvaje.
- **Rozmístění zdrojů zvuku do prostoru.** Každý identifikovaný zvukový prvek bude přehráván z jednoho nebo více míst ve třídě pro co nejbližší napodobení přirozeného umístění ve skutečném prostředí. Uprostřed místnosti zvolíme umístění posluchače a zakreslíme místnost v rozumném měřítku digitálně nebo na velkoformátový papír. Zdroji reprodukce zvuků budou mobilní telefony žáků, je tak možné v diagramu třídy pracovat s velkým množstvím kanálů, které ovšem zvyšuje komplexitu celé scény. V tomto kroku je důležité vyhodnotit, s kolika kanály je neefektivnější pracovat, jejich počet by však neměl být menší než osm - čtyři zdroje umístěny v kardinálních směrech (sever, jih, východ, západ) a další čtyři v mezilehlých směrech (severovýchod, jihovýchod, jihozápad, severozápad). Díky tomu, že každý žák může obsluhovat jeden kanál, se však nabízí využití mnohem většího počtu, což sice představuje větší výzvu v plánovací fázi, ale výměnou za pestrou a komplexní zvukovou scénu. Nejvyšší počet kanálů by měl být omezen na polovinu počtu žáků, aby každý kanál mohl být ovládán dvěma žáky a jeden z nich vždy měl možnost vstoupit do prostoru posluchače.
- **Určení intenzity zdrojů zvuku.** Po rozmístění zdrojů zvuku do prostoru lze na základě popisu z pozorování určit, jakou intenzitou by zvuky měly být přehrávány. V potaz je potřeba vzít nejen poznámka samotná, ale také vzdálenost zdroje zvuku od posluchače. Pokud byl například semafor umístěn tři metry od posluchače při pozorování, není třeba nijak snižovat intenzitu přehrávaného zvuku, pokud bude také umístěn tři metry od středu místnosti. Právě intenzita (příp. hlasitost) zvuků je hlavní parametr, který bude ve třídě tvořit iluzi výrazně většího prostoru, není však možné a ani nutné vše

naplánovat dokonale dopředu. Každý kanál bude neustále pod kontrolou žáků, kteří mohou tento parametr snadno upravovat přímo za běhu.

- **Plánování časových sekvencí.** Zvuková scéna musí být dynamická a každý kanál musí mít své individuální časování. Můžeme rozlišit čtyři typy časování:
 - Konstantní ruch – zvuk je přehráván nepřetržitě, například hukot aut.
 - Pravidelný ruch – zvuk je přehráván v pravidelných intervalech, například zvuk semaforu, zvuk motoru stojících aut.
 - Nahodilý ruch – zvuk je přehráván v nepravidelných intervalech s danou četností, například kroky chodců cinkání příborů a nádobí, zvonek tramvaje.
 - Jednorázový ruch – zvuk je přehrán pouze jednou, v přesně daný čas nebo náhodně, například konkrétní rozhovor, klakson auta.

Jedním z možných přístupů je naplánovat celou časovou osu přehrávání zvuků najednou, v závislosti na počtu ruchů a reproduktorů se však může jednat o velice náročný úkol. Příhodnější je každému zvuku přiřadit pravidlo, podle kterého bude operátor daného kanálu postupovat. V případě konstantního ruchu zvuk bude nastaven ve smyčce a není třeba ho ovládat. Pravidelný ruch opatříme daným intervalem, po kterém se bude opakovat. U nahodilého ruchu určíme rozmezí časových prodlev, čímž stanovíme četnost. U jednorázového ruchu stanovíme čas, ve který bude přehrán, relativní k začátku prezentace. U některých zvuků navíc můžeme přidat vazbu, například zvuk motorů čekajících aut bude přehráván vždy zároveň s rychlým tikáním semaforu. Takto sestavíme tabulku, podle které lze celou prezentaci zvukové scény realizovat.



Obrázek 13 - Návrh rozložení zvukových zdrojů do prostoru

Legenda	hlasitost	typ	časování
➔ posluchač			
● hukot aut	30 %	konstantní	
● chodci – hlasy a kroky	80 %	konstantní/nahodilý	20 s (± 5 s)
● semafor	100 %	pravidelný	2 minuty / 30 s
● motory čekajících aut	80 %	pravidelný	30 s
● klakson	20 %	jednorázový	4 minuty
● otevírání dveří	100 %	nahodilý	5 – 30 s
● zvuky nádobí a příborů	50 %	nahodilý	5 – 30 s
● zvonění tramvaje	20 %	jednorázový	7 minut

Obrázek 14 - Legenda návrhu rozložení zvukových polí

7.3 Příprava zvukových nahrávek

Každý identifikovaný zvuk by měl být buď nahrán v přirozeném prostředí nebo nahrán dodatečně. Důležité je, aby co nejvíce odpovídal realitě, jeho původ však může být libovolný a celý proces pořizování zvukových nahrávek může sloužit jako samostatná komplexní aktivita. V případě obtížnosti (například průjezd sanitky – nepravděpodobné) nebo nevhodnosti (například rozhovory cizích lidí) pořízení některých zvuků je vždy možné využít vhodně licencované knihovny zvuků a ruchů. Tato možnost se může také hodit v případě nízké časové dotace.

Každá zvuková nahrávka musí být přizpůsobena způsobu jejího následného využití. V přípravné fázi je možné rovnou vyřešit některá specifika následné zvukové prezentace, například načasování

jednorázových nebo pravidelných ruchů tak, že po jejich spuštění již nebude třeba je ovládat. V krajním případě lze takto předpřipravit všechny nahrávky a zvuková prezentace tak bude zcela automatizována, což může být přínosné pro imerzivnější zážitek, odebírá to však z procesu jeden krok, který je přínosným zážitkem pro zúčastněné žáky.

Nahrávky je třeba kvalitně pojmenovat, případně označit metadaty pro jednodušší realizaci. Vzhledem k očekávané nižší kvalitě přehrávání z reproduktorů mobilních telefonů je preferovaná spíše vyšší komprese pro zaručení bezproblémového přesouvání do zařízení.

7.4 Realizace

Po provedení detailní analýzy zvukového prostoru a návrhu zvukové scény zbývá jen realizovat výslednou prezentaci. Každý žák musí být seznámen se svou rolí, zařízení musí být připravená, otestovaná a na svých místech. V případě zvolení varianty s maximálním počtem kanálů má vždy polovina žáků možnost přemísťovat se tiše po třídě a zažívat imerzivní zážitek na vlastní kůži.

Aby byly dodrženy všechny důležité prvky, které z tohoto systému dělají imerzivní prostorový zážitek, je třeba zaručit správné hlasitosti a časování. Hlasitosti je možné nastavit před začátkem prezentace a v průběhu je měnit jen pro dosažení věrnějšího efektu. Náročnějším úkolem je zaručit správné načasování, čemuž je možné dopomoci umístěním hodin, digitálních stopek nebo jiných vizuálních způsobů udržování přehledu o probíhajícím čase.

V případě přizpůsobování konkrétní aktivity žákům prvního stupně je realizaci možné provést alternativní metodou bez využití technologií. Zdroji zvuků se stávají samotní žáci rozmístění po místnosti a zvukovou kulisu vytváří vlastními hlasy.

7.5 Diskuze

Návrh a realizace zvukové kulisy se opírají o základní principy prostorového zvuku a vzhledem k většímu počtu kanálů, které mohou být rozmístěny až několik metrů od posluchače, se výrazněji projevuje nejen lokalizační metoda ILD, ale také ITD, které ovšem žáci přímo neovlivňují nad rámec rozmístění jednotlivých reproduktorů.

Teoretická východiska pro realizaci aktivit na základě tohoto námětu zahrnují základní pochopení prostorovosti zvuku z hlediska návaznosti směru na hlasitost, jinak se ovšem opírá především o intuitivní principy založené na pozorování. Nejnáročnější součástí celé metody je pravděpodobně kvalitní záznam reálného prostředí a následná syntéza potřebných dat, celý proces je však možné přizpůsobit možnostem žáků, aktivity vybudované na celém námětu nebo jeho částech jsou tak možné koncipovat v různých podobách pro žáky prvního i druhého stupně nebo střední školy. Analýza zvukové scény je ve zjednodušené podobě aplikovatelná do předmětu prvouka, v plné podobě s přesahem do českého jazyka se zaměřením na sloh. Části námětu mají přesah do fyziky z hlediska akustiky, informatiky z hlediska práce se zvuky a grafikou, případně také do výtvarných a pracovních činností v kontextu návrhu a realizace zvukové scény.

8 Zvukové bludiště

Návrh zvukového bludiště využívá principů Haasova efektu k vytvoření cesty virtuálním zvukovým prostředím. Žáci si vyzkouší, jaký vliv má ITD na lokalizaci zvuku, pokud ho izolujeme od snadněji simulovatelného ILD, a pomocí drobných časových rozdílů navrhnu a následně otestují vlastní čistě zvukovou nebo audiovizuální hru.

8.1 Vytvoření herního motivu

Prvním krokem v celém procesu je vytvořit slovně nebo graficky návrh prostoru, ve kterém se bude posluchač pomocí zvukové nahrávky pohybovat, a také návrh motivu a principu výsledné hry. Možnosti komplexity tohoto prostoru jsou flexibilní, mezi možné implementace patří například:

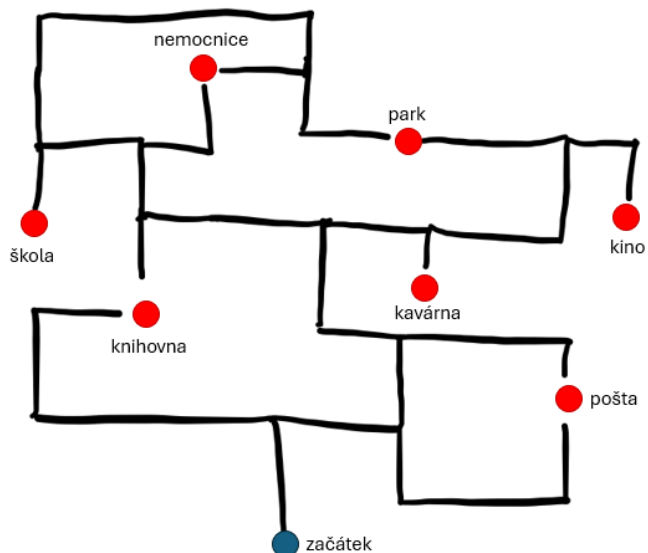
- běžné bludiště s pravoúhlými křižovatkami, kterým se hráč orientuje tak, že následuje zvuk, který ho navádí k cíli;
- jednoduchá mapa města, kterou je hráč proveden a následně na fyzické mapě zakreslí cestu, kterou byl veden;
- statický obraz náměstí, uprostřed kterého je hráč umístěn, a místo toho, aby se náměstím pohyboval, kolem něj se pohybují jednotlivé zdroje zvuku a on jich má za úkol co nejvíce identifikovat a rozpoznat, v jaké části náměstí se nacházejí;
- automobilový závod, ve kterém hráč následuje závodníka před ním a na základě zvuků auta, které následuje, má za úkol odhadnout tvar závodní trati.

Slovo „bludiště“ tak v tomto případě spíše nabývá významu „prostor, ve kterém je třeba se zorientovat“. Klíčové je uvědomit si omezené možnosti toho, čeho lze Haasovým efektem docílit, a jaké technologie jsou nám k dispozici. Haasův efekt při správné aplikaci zajistí rozpoznatelnost směru zvuku, převážně však pouze z hlediska pravo-levé orientace. Vhodná je tedy jakákoliv situace bludiště, která vyžaduje rozhodování o odbočení vlevo nebo vpravo. Na omezení technologické narazíme například tehdy, pokud bychom chtěli z průchodu bludiště udělat interaktivní hru reagující na hráčova rozhodnutí. Nejsnadnější implementace využívá pouze předem připravenou nahrávku, kterou si hráč celou poslechne a na základě toho identifikuje cestu, kterou procházel, případně zvuky, které cestou slyšel. V této kapitole bude blíže popsán námět hry, ve které posluchač jde po ulici několik metrů za skupinou lidí a podle toho, z jakého směru je slyší, má za úkol v mapce města určit, jakou cestou šel a kam došel.

8.2 Grafický návrh herního prostoru

Grafická reprezentace prostoru, ve kterém jsou zvuky zasazeny, poskytuje vizuální kontext, který pomáhá posluchači lépe se orientovat a interpretovat zvukové signály. Design prostoru by měl být koncipován s jasně definovanou směrovostí, typicky omezenou pouze na možnosti vpravo a vlevo, což reflektuje schopnosti Haasova efektu rozlišovat směr zvuku. Toto omezení směrovosti přispívá k udržení deterministického a srozumitelného charakteru hry.

Cesty v plánu by měly být jasně čitelné a jednoznačně definované, aby každá zvuková nahrávka korespondovala pouze s jednou specifickou trasou. Problémy by mohly nastat v případě častého využívání křižovatek, ve kterých je kromě odbočení vlevo a vpravo možné pokračovat rovně. Tato informace se zvukovými signály přenáší obtížně, jedním z možných řešení je zapojení času, tedy informace o tom, jak dlouho trvá projít každý úsek plánu. Tento přístup dodává celému modelu na komplexitě a jeho realizace je omezená schopností žáků

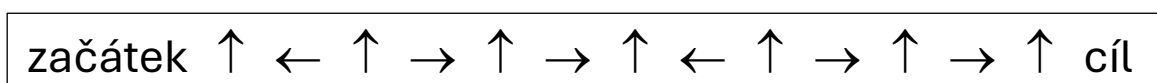


Obrázek 15 - Grafický návrh herního prostoru - plánek města

věnovat pozornost více parametrům najednou. Jednodušší alternativou je vyhnout se těmto problematickým úsekům, nahradit je specifickými zvukovými signály, případně vytvořit logicky konzistentní trasy, kde i přes přítomnost složitějších křižovatek bude jasné, jaký směr má hráč následovat.

Poslední zmíněný přístup je zobrazen na přiloženém obrázku, ve kterém je každá cesta z počátečního bodu do jednoho z koncových bodů jednoznačná. V případě, že se hráč nachází v místě s rovným úsekem, slyší signál pro změnu směru vpravo, ale po pravé straně jsou dvě možné odbočky, zaznamená si obě možnosti a na základě dalšího jednoho až dvou signálů jednoznačně determinuje, která z cest byla ta správná, protože jedna z možností nedává smysl kvůli neexistující odbočce nebo nemožného dosažení cílové destinace.

Následující posloupnost šipek představuje posloupnost zvukových signálů, které se hráče snaží navést do destinace, která v tomto případě odpovídá kavárně:



Tato posloupnost kroků prochází dvěma kritickými momenty. Jedním z nich je výběr správné odbočky vpravo po opuštění knihovny, druhý nastává hned poté při výběru správné odbočky vpravo ke kavárně. Oba tyto momenty jsou determinovány bez použití časování zvuků. První situaci lze vyřešit na základě faktu, že po odbočce vpravo následuje další odbočka vpravo, což je možné jen u jedné ze dvou cest. Druhá situace využívá toho, že po odbočení vpravo, což je možné provést na dvou různých místech, posloupnost kroků končí a hráč se tedy musí nacházet v cílové destinaci, což nechává pouze jednu validní možnost.

8.3 Výběr a zpracování zvukových signálů

Konkrétní zvuky, které budou přetvořeny ve zvukové indikátory směru, jsou zcela závislé na vybraném motivu hry, měly by však obecně splňovat základní zásady. Nahrávka musí být souvislá, dostatečně dlouhá na to, aby se v průběhu jejího přehrávání mohly dít potřebné změny směru, a měla by mít konstantní hladinu hlasitosti, kolísání hlasitosti by totiž mohlo narušovat efektivitu Haasova jevu. Problémem naopak není stereofonní povaha nahrávky, při implementaci Haasova jevu je nutné nahrávku převést do monofonní stopy, což eliminuje veškeré původní lokalizační indikátory.

Zvuk, který bude sloužit k orientaci v prostoru, nikdy nevychází přímo z místa hráče, který ovšem při svém pohybu v prostoru také nějaký zvuk může vydávat. V závislosti na motivu hry může být výhodné lokalizační zvuk doplnit ještě jedním konstantním zvukem bez směrových charakteristik pro komplexnější zvukovou scénu. Tyto dva typy zvuků by spolu neměly interferovat a vzájemně se rušit, je proto třeba zvolit kvalitní nahrávky bez přebytečného šumu.

V případě výše popisovaného motivu hledání cesty v městském prostředí slouží jako hlavní lokalizační zvuk tlumený rozhovor skupiny lidí, které hráč po městě následuje. Doplnkovým zvukem vytvářejícím zajímavější zvukovou scénu jsou konstantní kroky umístěny přímo u hráče, které slouží k upevnění iluze pohybu. Obě tyto nahrávky jsou očištěny od šumu a délkou se blíží ke třem minutám s možností zacyklit je do smyčky.

8.4 Realizace

Primární i sekundární nahrávky je potřeba exportovat do vhodného DAW, jednoduchou variantou je open source editor Audacity. Stopu sloužící k lokalizaci směru převedeme na mono a duplikujeme ji tak, že získáme dvě totožné monofonní stopy přímo nad sebou. Jednu ze stop nastavíme tak, aby hrála pouze do levého kanálu, druhou do pravého. Podle předem rozmyšleného plánu rozřežeme obě stopy na požadovaný počet úseků, každý z nich bude představovat jeden ze tří směrů. U všech úseků, které mají být slyšitelné zleva, posuneme stopu pravého kanálu o 1 ms až 10 ms dál po časové ose, pravý kanál přehrává to samé, jen s drobným zpožděním. To vytvoří Haasův jev a iluzi směřování zvuku. Přesná hodnota časového odstupu je závislá na povaze zvuku a je potřeba ji prakticky vyzkoušet. V případě zvuku přicházejícího zprava provedeme přesně opačný proces. Mezi těmito úseky vždy necháme pasáže bez časového posunu pro lepší přehled, Haasův jev se totiž nemusí projevit výrazně. Tímto způsobem provedeme navržený průchod mapou a otestujeme sílu efektu. U některých zvuků může v místech přechodů vzniknout rušivé praskání, které lze potlačit vyplněním drobných mezer vzniklých posunutím stopy tak, aby na sebe všechny části stop vždy navazovaly.

Doplnkový zvuk přeneseme do vlastní monofonní stopy pro zamezení nechtěných směrových signálů a upravíme její hlasitost tak, aby nerušila primární stopy. Exportujeme do libovolného stereofonního formátu a realizujeme danou aktivitu. K přehrávání zvuků je nutné použít sluchátka kvůli separaci levého a pravého kanálu.

8.5 Diskuze

Principy námětu popsaného v této kapitole vycházejí z lokalizační techniky ITD a na ni navazujícího Haasova jevu, který žáci v průběhu mají šanci přímo nasimulovat a otestovat zcela bez interference ILD. Teoretická východiska nutná pro realizaci aktivit založených na tomto námětu zahrnují pouze pochopení ITD jako principu lokalizace zvuku v prostoru, z tohoto hlediska by tak bylo možné aktivity v omezené podobě zařadit již na první stupeň základní školy. V případě využití plného potenciálu námětu je však vyžadována pokročilá manipulace se zvukovým editorem, která hranici posouvá spíše na pozdní druhý stupeň či střední školu.

Koncept zvukového bludiště je téměř stejným způsobem aplikovatelný na ILD, žáci by jen místo změny načasování monofonních stop měnili jejich intenzitu. Vzhledem k tomu, že v reálné situaci využíváme pro lokalizaci zvuků všechny zmíněné principy zároveň, nabízí tato aktivita také možnost porovnání vlivu jednotlivých lokalizačních principů v izolovaném prostředí s jejich vlivem současným. Žáci tak mohou na jednom modelu otestovat nejen ILD a ITD, ale také vztahy mezi nimi.

Výukové aktivity vybudované na celém konceptu nebo jeho částech je možné zařadit do předmětů fyzika z hlediska akustiky, informatika z hlediska algoritmizace, logiky a práce s multimediálními daty, případně také výtvarné a pracovní činnosti v kontextu s grafickým návrhem herního prostoru.

9 Závěr

Tato bakalářská práce usiluje o ucelený pohled na problematiku prostorového zvuku na rovině teoretické i aplikační. Teoretická část objasňuje hlavní principy lokalizace zvuku v prostoru a fyzikální a psychoakustické jevy k nim přidružené. Popisuje také technologie, které provázejí záznam, úpravu a reprodukci prostorového zvuku, a díky kterým se profesionální i uživatelské audio stává stále imerzivnějším. Na základě těchto předpokladů byly dále v praktické části práce navrženy tři náměty, které rozpracovávají konkrétní dílčí témata prostorového zvuku tak, že je lze využít k vytváření mezioborových výukových aktivit pro žáky základních a středních škol.

Znalost principů lokalizace prostorového zvuku představuje klíčové teoretické východisko pro pochopení důležitých aspektů akustiky a přidružených technologií, se kterými běžně přicházíme do styku. Žáci i učitelé potřebují držet krok se stále zrychlujícím se světem technologií, který je nezastavitelný a není tak možné každou inovaci okamžitě zařazovat do výukových materiálů. Tato práce podává v dané situaci pomocnou ruku v podobě báze, jejíž aplikace lze zařadit do existujících vyučovaných předmětů a rozšířit tak povědomí o jednom z nespočtu fascinujících témat každodenních technologií.

Náměty na výukové aktivity jsou koncipovány tak, aby byly nejen poučné, ale také zábavné a praktické, což napomáhá lepšímu pochopení teoretických konceptů prostřednictvím praktických zkušeností. Žáci si tak mohou osvojit složitější akustické principy, jako je Haasův efekt, ILD nebo ITD skrze interaktivní a participativní metody reflektující snahy o moderní vzdělávací přístupy.

Přestože téma prostorového zvuku není zcela novým směrem akustiky a technologií, právě teď se nachází v největším rozkvětu vzhledem k dosud neprobádaným možnostem moderní doby. Vývoj v oblasti digitálních technologií, pokročilých algoritmů a zvýšeného výpočetního výkonu umožňuje vytvářet stále sofistikovanější zvukové systémy, které dokážou přesněji a realističtěji simulovat skutečné zvukové prostředí. S přispěním umělé inteligence a virtuální a upravené reality se otvírají další možnosti, které mohou radikálně transformovat způsob, jakým interagujeme se zvukovým prostředím, což otevírá nové obzory pro výzkum i praktické aplikace v oblasti akustiky.

10 Seznam použitých informačních zdrojů

- [1] ARTEAGA, Daniel. *Introduction to Ambisonics*. Online. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7963106>. [cit. 2024-07-06].
- [2] DHAudio & Home Theater. *Surround Sound or Stereo: Which is Better for You?* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.dhaudioandhometheater.com/surround-sound-or-stereo/>. [cit. 2024-04-11].
- [3] Dolby Laboratories. *Dolby Atmos Specifications*. Online. 2024, č. 4. Dostupné z: <https://professional.dolby.com/siteassets/cinema-products---documents/dolby-atmos-specifications.pdf>. [cit. 2024-07-06].
- [4] Dolby. *What is Spatial Audio?* Online. In: Dolby. C2024. Dostupné z: <https://www.dolby.com/experience/home-entertainment/articles/what-is-spatial-audio/>. [cit. 2024-07-05].
- [5] Ergonomics Center of North Carolina. *Anthropometric Data for U.S. Adults*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.ergocenter.ncsu.edu/wp-content/uploads/sites/18/2017/09/Anthropometric-Summary-Data-Tables.pdf>. [cit. 2024-04-11].
- [6] HACIHABIBOGLU, Huseyin; DE SENA, Enzo; CVETKOVIC, Zoran; JOHNSTON, James a SMITH III, Julius O. *Perceptual Spatial Audio Recording, Simulation, and Rendering: An overview of spatial-audio techniques based on psychoacoustics*. Online. IEEE Signal Processing Magazine. 2017, roč. 34, č. 3, s. 36-54. ISSN 1053-5888. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2666081>. [cit. 2024-07-05].
- [7] HANCOCK, Terry. *Understanding Surround and Binaural Sound*. Online. 2011. Dostupné z: <http://fsmsh.com/3536>. [cit. 2024-06-22].
- [8] Harpex. *Harpex*. Online. C2011-2024. Dostupné z: <https://harpex.net/>. [cit. 2024-07-07].
- [9] HONG, Joo; HE, Jianjun; LAM, Bhan; GUPTA, Rishabh a GAN, Woon-Seng. *Spatial Audio for Soundscape Design: Recording and Reproduction*. Online. Applied Sciences. 2017, roč. 7, č. 6. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app7060627>. [cit. 2024-07-05].
- [10] JORDAN, Benn. *Gaslighting Your Fans w/ Dolby ATMOS™*. In: YouTube. Online. 2023. Dostupné z: <https://youtu.be/5Dw3aKbw5Wo?si=dMtW48LGFvUqphei>. [cit. 2024-07-06].
- [11] LI, Song a PEISSIG, Jürgen. *Measurement of Head-Related Transfer Functions: A Review*. Online. Applied Sciences. 2020, roč. 10, č. 14. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10145014>. [cit. 2024-04-14].
- [12] LOISELLE, Louise H.; DORMAN, Michael F.; YOST, William A.; COOK, Sarah J. a GIFFORD, Rene H. *Using ILD or ITD Cues for Sound Source Localization and Speech Understanding in a Complex Listening Environment by Listeners With Bilateral and With Hearing-Preservation Cochlear Implants*. Online. Journal of Speech, Language, and Hearing Research. 2016, roč. 59, č. 4, s. 810-818. ISSN 1092-4388. Dostupné z: https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-H-14-0355. [cit. 2024-04-11].
- [13] MANTIONE, Philip. *Haas Effect in Audio Production (+ creative mixing tips)*. Online. In: Wave Informer. 2024. Dostupné z: [Haas Effect in Audio Production \(+ creative mixing tips\)](https://waveinformer.com/haas-effect-in-audio-production/). [cit. 2024-07-08].
- [14] MARTIN, Jamie. *What is Quadraphonic Sound? How to set up Quadraphonic Speakers*. Online. C2024. Dostupné z: <https://audiocurious.com/how-to-set-up-quadraphonic-speakers/>. [cit. 2024-06-22].

- [15] MATHIAS, Kyle. *STEREO MICROPHONE TECHNIQUES: The Ultimate Guide*. Online. Audio University. C2024a. Dostupné z: <https://audiouniversityonline.com/stereo-microphone-techniques/>. [cit. 2024-04-14].
- [16] MATHIAS, Kyle. *Surround Sound In Headphones? | HRTF & Binaural Audio Explained*. Online. Audio University. C2024b. Dostupné z: <https://audiouniversityonline.com/binaural-audio/>. [cit. 2024-04-14].
- [17] MCALLISTER, Max. *Decoding Mid/Side Miking Techniques*. Online. In: Produce Like A Pro. 2023. Dostupné z: <https://producelikeapro.com/blog/mid-side-miking-techniques>. [cit. 2024-07-03].
- [18] Music Production Nerds. *The Blumlein Mic Technique Explained - Stereo Recording 101*. Online. C2023. Dostupné z: <https://musicproductionnerds.com/the-blumlein-mic-technique-explained/>. [cit. 2024-07-03].
- [19] RØDE. *The Beginner's Guide To Ambisonics*. Online. In: RØDE. 2022. Dostupné z: <https://rode.com/en/about/news-info/the-beginners-guide-to-ambisonics>. [cit. 2024-07-04].
- [20] SANNY, Jeff; LING, Samuel a MOEBS, William. *University Physics Volume 1*. Online. OpenStax, 2016. ISBN 978-1506698175. Dostupné z: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_\(OpenStax\)/17%3A_Sound/17.08%3A_The_Doppler_Effect](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_(OpenStax)/17%3A_Sound/17.08%3A_The_Doppler_Effect). [cit. 2024-07-08].
- [21] Students of PSY 3031, OLMAN, Cheryl (ed.). *Introduction to Sensation and Perception*. Online. University of Minnesota Libraries Publishing, 2022. ISBN 978-1-946135-80-3. Dostupné z: <https://pressbooks.umn.edu/sensationandperception/>. [cit. 2024-04-01].
- [22] THAVAM, Sinthiya a DIETZ, Mathias. *Smallest perceivable interaural time differences*. Online. The Journal of the Acoustical Society of America. 2019, roč. 145, č. 1, s. 458-468. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.5087566>. [cit. 2024-04-11].
- [23] THX Ltd. *THX Spatial Creator*. Online. THX. C2024. Dostupné z: <https://www.thx.com/thx-spatial-creator/>. [cit. 2024-07-07].
- [24] VANACORO, Matt. *4 Stereo Microphone Recording Techniques*. Online. In: Samson Tech. 2019. Dostupné z: <https://samsontech.com/blog/4-stereo-microphone-recording-techniques/>. [cit. 2024-07-03].
- [25] Waves. *Nx – Virtual Mix Room over Headphones*. Online. Waves. C2024. Dostupné z: <https://www.waves.com/plugins/nx>. [cit. 2024-07-07].
- [26] ZHANG, Wen; SAMARASINGHE, Parasanga; CHEN, Hanchi a ABHAYAPALA, Thushara. *Surround by Sound: A Review of Spatial Audio Recording and Reproduction*. Online. Applied Sciences. 2017, roč. 7, č. 5. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app7050532>. [cit. 2024-07-04].

11 Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - ORTF KONFIGURACE (PŘEVZATO Z: HTTPS://SAMSONTECH.COM/BLOG/4-STEREO-MICROPHONE-RECORDING-TECHNIQUES/).....	16
OBRÁZEK 2 - NOS KONFIGURACE (PŘEVZATO Z: HTTPS://SAMSONTECH.COM/BLOG/4-STEREO-MICROPHONE-RECORDING-TECHNIQUES/).....	16
OBRÁZEK 3 - BLUMLEIN PAIR (PŘEVZATO Z: HTTPS://MUSICPRODUCTIONNERDS.COM/BLUMLEIN-MIC-TECHNIQUE)	17
OBRÁZEK 4 - BINAURÁLNÍ MIKROFON NEUMANN KU 100 (PŘEVZATO Z: HTTPS://AUDIOUNIVERSITYONLINE.COM/BINAURAL-AUDIO/).....	17
OBRÁZEK 5 - BINAURÁLNÍ MIKROFON 3Dio FS XLR (PŘEVZATO Z: HTTPS://3DIOSOUND.COM/PRODUCTS/FREE-SPACE-XLR-BINAURAL-MICROPHONE).....	18
OBRÁZEK 6 - LINEÁRNÍ MODEL ZVUKOVĚ-TOPOGRAFICKÉ MAPY	27
OBRÁZEK 7 - UMÍSTĚNÍ BODU DO ROVINY	28
OBRÁZEK 8 - UMÍSTĚNÍ LOMENÉ ČÁRY DO ROVINY.....	28
OBRÁZEK 9 - SOUSTAVA SOUŘADNIC BEZ DAT A ČASOVÉ MASKY.....	29
OBRÁZEK 10 - SOUSTAVA SOUŘADNIC SE ZANESENÝMI DATY.....	30
OBRÁZEK 11 - ZVUKOVĚ-TOPOGRAFICKÁ MAPA S PODÉLNÝM PROFILEM A ČASOVOU MASKOU	30
OBRÁZEK 12 - APLIKACE PŘÍČNÝCH PROFILŮ NA KANÁLY V EDITORU AUDACITY	31
OBRÁZEK 13 - NÁVRH ROZLOŽENÍ ZVUKOVÝCH ZDROJŮ DO PROSTORU	36
OBRÁZEK 14 - LEGENDA NÁVRHU ROZLOŽENÍ ZVUKOVÝCH POLÍ	36
OBRÁZEK 15 - GRAFICKÝ NÁVRH HERNÍHO PROSTORU - PLÁNEK MĚSTA	39