

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Biologické a fyzikální aspekty smyslového
vnímání



Vypracovala:	Bc. Štěpánka Ošmerová
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	7504T055 Učitelství fyziky pro střední školy 7504T000 Společný základ učitelských oborů 7504T029 Učitelství biologie pro střední školy
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí diplomové práce:	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
Termín odevzdání práce:	srpen 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením pana doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc. a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne 12. srpna 2019

.....
Bc. Štěpánka Ošmerová

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Bc. Štěpánka Ošmerová
Název práce	Biologické a fyzikální aspekty smyslového vnímání
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
Rok obhajoby práce	2019
Abstrakt	Diplomová práce se zabývá mezipředmětovými vazbami fyziky a biologie v rámci tématu „smyslové vnímání“. Využívá integrace pojmů u mechanického a elektromagnetického vlnění, popisuje jejich šíření v prostředích oka a ucha a zabývá se jejich detekcí. Jsou zde uvedeny zajímavosti schopností slyšení a vidění u vybraných živočichů i popis přenosu informace z oka a ucha do CNS na základě vztahu podnětu a počítku. Vybrané pokusy, na základě klasické fyziologie a moderních výukových přístupů s využitím smartphonů, ukazují potenciál lepšího pochopení vzájemných souvislostí ve výuce fyziky a biologie.
Klíčová slova	smyslové vjemy, fyzika, biologie, mezipředmětové vztahy, zrak, sluch, experimenty, vzdělávání
Počet stran	73
Počet příloh	0
Jazyk	český

Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Bc. Štěpánka Ošmerová
Title	Biological and Physical aspects of sensory perception
Type of thesis	Master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
The year of presentation	2019
Abstract	<p>This diploma thesis deals with interdisciplinary relations in physics and biology within the subject of "sensory perception". It makes use of the integration of terms in mechanical and electromagnetic waves, describes their propagation in the eye-and-ear environments, and their detection. Interesting features of hearing and vision in selected animals are introduced, and the transmission of information from the eye and ear to the CNS, based on the relationship of stimulus and sensation, is described. Experiments selected by classical physiology and modern teaching approaches using smartphones, show the potential for a better understanding of the interrelationship between teaching physics and biology.</p>
Keywords	sensory perception, physics, biology, interdisciplinary relations, vision, hearing, experiments, education
Number of pages	73
Number of appendices	0
Language	czech

Obsah

Úvod	7
1 Smyslové vjemy ve výuce fyziky a biologie	9
1.1 Receptory a jejich rozdělení	9
1.2 Zrak	10
1.3 Sluch	14
1.4 Hmat	17
1.5 Chuť	17
1.6 Čich	18
1.7 Termoreceptory a nocireceptory	19
2 Porovnání smyslového vnímání vybraných živočichů	20
2.1 Zrak	20
2.2 Sluch	22
3 Akční potenciál	25
3.1 Akční potenciál - princip přenosu informace do CNS	25
4 Zákony popisující vztah počítka a podnětu	28
4.1 Weberův zákon	28
4.2 Fechnerův zákon	29
4.3 Stevensův vztah	29
5 Fyzikální aspekty zraku	30
5.1 Elektromagnetické záření	30
5.2 Světlolomný aparát oka	33
5.3 Světločivný aparát oka	37

5.4	Fotometrické veličiny	40
5.5	Vyšetření refrakčních vad	41
6	Fyzikální aspekty sluchu	43
6.1	Mechanické vlnění	43
6.2	Zvuk	44
6.3	Ucho	48
7	Experimenty ve výuce fyziky a biologie	52
7.1	Měření amplitudy akomodace push-up a push-down metodou	52
7.2	Důkaz slepé skvrny (Mariottův pokus)	54
7.3	Pokusy s ladičkou - Weberova a Rinneho zkouška	55
7.4	Stanovení simultánního prostorového prahu na různých částech těla	56
7.5	Audiometrické měření s využitím chytrého telefonu	57
7.6	Testování sluchu pomocí OnlineToneGenerator ve skupině	59
7.7	Test periferního vidění	60
7.8	Prostorové vidění a prostorové slyšení	62
7.9	Důkaz spojení chuťových a čichových vjemů	64
7.10	Sakadické oční pohyby	64
7.11	Vyšetření zraku pomocí mobilní aplikace Eye Test	65
	Závěr	67
	Literatura	69

Úvod

Mezipředmětové vztahy přírodovědných oborů jsou jednou z možností, jak zkvalitnit a zefektivnit vyučování na základních a středních školách. Ve školách v České republice jsou předměty převážně izolovány a ani v rámci těchto předmětů se učitelé nezaměřují na integraci pojmů v rámci znalostí dané disciplíny. Téměř vůbec se nevyužívá propojení přírodovědných předmětů mezi sebou. Přitom propojení fyziky, chemie, biologie a věd o Zemi a vesmíru se přímo nabízí. Zejména v rámci fyziky i matematiky, kterou se fyzika exaktně vyjadřuje.

Jako studentku učitelské kombinace Fyziky a Biologie mě tyto vazby vždy zajímaly, a proto jsem si vybrala i toto téma své diplomové práce. Téma smyslového vnímání je vhodným příkladem využití mezipředmětových vazeb fyziky a biologie, protože je možné integrovat pojmy v rámci mechanického vlnění u zvuku a slyšení, stejně jako elektromagnetického u světla a vidění. Vedle popisu vlastních analyzátorů (zrakového a zvukového) z biologického pohledu, se nabízí realizace praktických cvičení, které vyžadují fyzikální znalosti orientované především na šíření světla z pohledu geometrické i vlnové optiky. Případně u zvuku šířením zvuku ve vzduchu ve vnějším zvukovodu a v kapalině, což odpovídá prostoru vnějšího a vnitřního oka. Oba druhy smyslového vnímání jsou zajímavé i z pohledu detekce světla a zvuku. Zde je potom důležité vysvětlit základní vlastnosti smyslových buněk a jejich převodní systém. Tedy přeměny energie působícího podnětu na akční potenciály, které se šíří nervovým systémem do příslušného centra v mozku, kde vzniká vjem vidění či slyšení.

Mým záměrem bylo popsat smyslové vnímání, základní přístupy k jeho popisu a zaměřit se zejména na slyšení a vidění z pohledu šíření světla v oku, šíření zvuku v uchu i na jeho detekci smyslovými buňkami, v případě oka tyčinkami a čípkami na sítnici a v Cortiho orgánu vláskovými buňkami v blanitém hlemýždi vnitřního ucha.

Současně bylo mou snahou najít vhodné pokusy, které by na úrovni základní či střední školy přiblížily žákům vlastnosti oka a ucha. Tyto experimenty jsem volila

tak, aby se prolínaly jak tradiční fyziologické experimenty, jako je například Mariotův pokus nebo Weberova a Rinneho zkouška, ale i modernější pokusy s chytrým telefonem – audiometrické měření a oční test.

Hlavním cílem však bylo ukázat na konkrétních příkladech propojení fyziky a biologie (mezipředmětové vazby), že jejich správné použití ve výuce vede k lepšímu pochopení vzájemných souvislostí.

Cíle diplomové práce

- Na základě rešerše literatury porovnat schopnosti vidění a slyšení u vybraných živočichů.
- Zpracovat detailní popis lidského zraku a sluchu z biologického a fyzikálního pohledu.
- Popis přenosu informace ze sensorických buněk oka a ucha do CNS a uvedení psychofyzikálních zákonů vztahu podnětu a počítku.
- Vytipovat vhodné experimenty z tématu smyslového vnímání do předmětů fyzika a biologie.

Kapitola 1

Smyslové vjemy ve výuce fyziky a biologie

1.1 Receptory a jejich rozdělení

Člověk a ostatní živočichové získávají informace o vnějším světě prostřednictvím smyslových ústrojí. Buňky smyslových orgánů s vysokou citlivostí vůči podnětům nazýváme receptory. Exteroreceptory převádějí energii podnětů z vnějšího prostředí v nervovou aktivitu. Interoreceptory reagují na změny a informace ve vnitřních orgánech a proprioreceptory plní tuto funkci v pohybové soustavě. Nervový vzruch, vzniklý podrážděním smyslových buněk - receptorů, se šíří v podobě různě uspořádaných akčních potenciálů. Konečné zpracování nastává ve smyslových centrech v mozku a vzniká smyslový vjem.

Podněty, na které jsou smyslové buňky specializované a na které reagují s vysokou citlivostí, se nazývají adekvátní podněty. Podle typu podnětů rozlišujeme smyslové buňky na tři základní typy:

1. **Mechanoreceptory** - podnětem je mechanická deformace zakončení smyslových buněk.
2. **Fotoreceptory** - podnětem je světelné záření.
3. **Chemoreceptory** - podnětem je chemická látka.

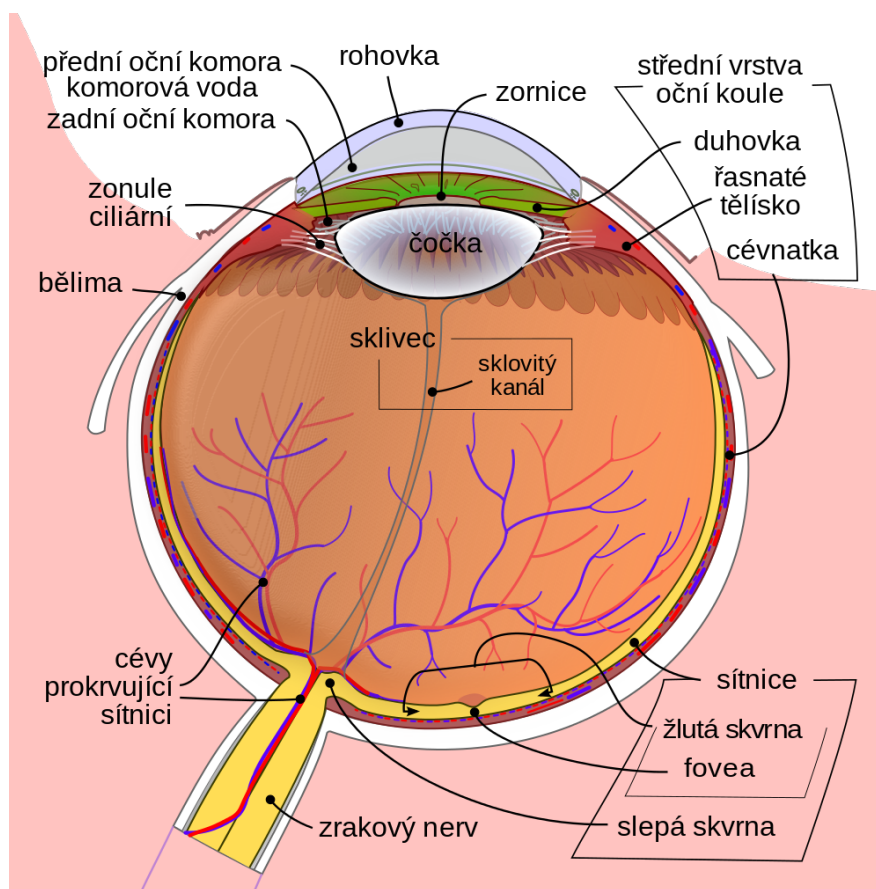
Kromě těchto základních typů ještě rozlišujeme termoreceptory (teplo) a nocireceptory (bolest).

Smyslové buňky jsou součástí smyslových ústrojí, které jsou tvořeny dalšími přídatnými orgány. [1]

1.2 Zrak

Zrakové ústrojí zaznamenává elektromagnetické vlnění o vlnové délce 400 až 800 nm, které se v oku transformuje na nervové signály. Zrakový analyzátor se skládá z **oční koule, optické soustavy oka a přídatných očních orgánů**. Oko můžeme považovat za spojnou optickou soustavu s měnitelnou ohniskovou vzdáleností.

Oční koule je uložena v tukové tkáni zvané očníce. Skládá se ze tří vrstev: povrchové, střední cévnaté a vnitřní vrstvy.



Obrázek 1.1: Schéma oka [9]

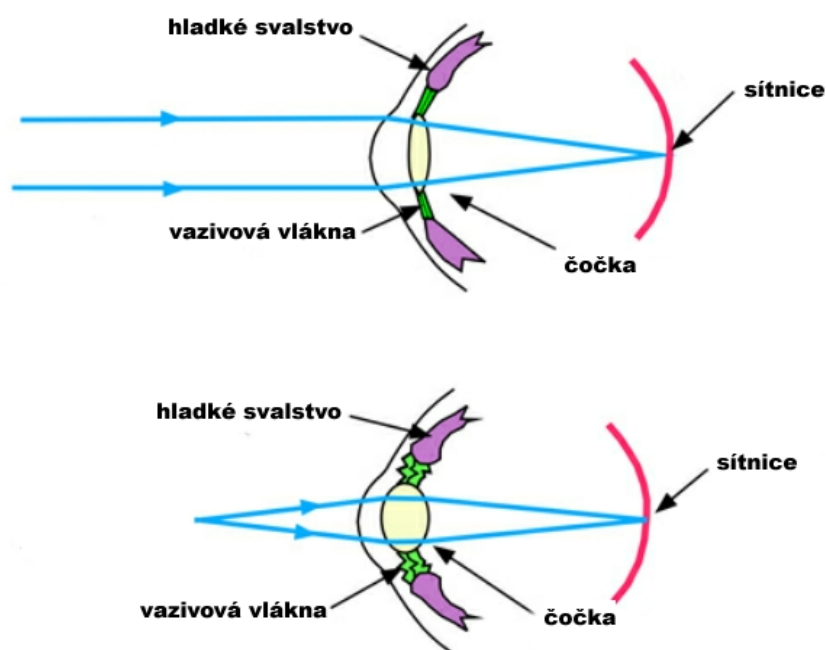
Povrchová vrstva je tvořená bělimou a rohovkou. Bělina je tuhá bílá vazivová blána tlustá 0,3 až 1 mm. Tvoří zhruba 3/4 povrchu oční koule a udržuje její tvar. Na bělimu se upínají okohybné svaly a v její zadní části prostupuje zrakový nerv. V přední části oka přechází v průhlednou rohovku, jejíž povrch je chráněn tenkou vrstvou slz.

Do **střední cévnaté části** patří cévnatka, řasnaté těleso a duhovka. Cévnatka je zbarvena červenohnědě a vystýlá zadní část oční koule. Je protkána cévami zásobující zevní vrstvy sítnice a obsahuje buňky s hnědým pigmentem, který zabraňuje rozptylu světla uvnitř oka. Vpředu přechází cévnatka v prstenec složený z hladkých svalů a vazivových vláken - řasnaté těleso s výběžky, na nichž je zavěšena čočka. Pomocí stahů hladkého svalstva řasnatého tělesa má dvojnásobná čočka schopnost zakřivení - zploštění nebo vyklenutí (akomodace). Před řasnatým tělesem se nachází kruhovitá duhovka tvořená hladkým svalstvem, v jejímž středu je kruhovitý otvor - zornice. Otvor má schopnost rozšíření či zúžení se, čímž řídí intenzitu světla, která vstupuje do oka. Zornice má při intenzivním osvětlení průměr asi 2 mm a při velmi slabém osvětlení se může rozšířit až na 8 mm. V epitelu duhovky jsou buňky obsahující pigment, který dává oku jeho barvu. Modré oči mají pigmentu méně. Oblast mezi rohovkou a čočkou rozdělujeme na přední a zadní komoru oční. Komory jsou vyplněny komorovou vodou, která se tvoří z krve protékající kapilárami řasnatého tělesa. Mezi čočkou a sítnicí je sklivce - vodnatá, řídká, rosolovitá výplň.

Vnitřní vrstvu oční koule tvoří sítnice vystýlající vnitřní povrch cévnatky. Je silná 0,2 - 0,4 mm a tvoří ji čtyři vrstvy buněk. Vnitřní vrstva přiléhající k cévnatce je vrstva pigmentová a pod ní jsou smyslové buňky (tyčinky a čípky). Výběžky těchto smyslových buněk se spojují ve vrstvě bipolárních buněk, které převádějí vzruch z tyčinek a z čípků na čtvrtou vrstvu, kterou tvoří nervové buňky. Neurity těchto buněk prostupují stěnou oční koule ve zrakovém nervu a vedou vzruchy do zrakových ústředí v mozku. Místo, kde vystupuje zrakový nerv z oční koule se nazývá slepá skvrna, jelikož se zde nenacházejí tyčinky ani čípky. Naopak největší zastoupení čípků je v okolí průsečíku s optickou osou čočky, tzv. žlutá skvrna - místo nejostřejšího vidění. Čípky umožňují barevné vidění a rozdělujeme je na tři druhy podle citlivosti na světlo o vlnových délkách 440 nm, 540 nm a 575 nm, tedy světlo modré, zelené a červené barvy. Vzájemným kombinováním vznikají barevné vjemy. Současným stejně intenzivním drážděním všech tří druhů čípků vzniká vjem bílého světla. Porucha barevného vidění (barvocitu) se nazývá barvoslepost. Lidé s normálním barevným viděním se označují jako trichomati. Pokud nerozlišují červenou od zelené nebo modrou od žluté, označují se jako dichromati. Barvoslepi jedinci s černobílým viděním jsou monochromati. Tyčinky umožňují vidění za šera, jelikož jsou citlivé na světlo (rozlišují intenzitu světla), ale nerozlišují barvy. Obsahují rhodopsin, což je rudě zbarvený pigment citlivý na světlo. Poté, co rhodopsin

absorbuje světlo, ztrácí barvu a rozpadá se na dvě podjednotky: opsin (bezbarvý protein) a retinal (derivát vitamínu A). Chemickými změnami vzniká akční potenciál ve zrakovém nervu. Za tmy se z opsinu a retinalu opět syntetizuje rhodopsin. Nedostatek vitamínu A ve stravě má za následek zhoršení vidění za šera, takzvanou šeroslepost. Tyčinky jsou umístěny převážně v okrajových částech sítnice. Ve žluté skvrně se nenachází.

Optickou soustavu oka tvoří rohovka, komorová voda, čočka a sklivce - průhledná prostředí, jejichž indexy lomu n se navzájem liší. Ze všech částí oka má největší index lomu čočka (ve střední části čočky 1,41). Paprsek po průchodu čočkou prochází sklivcem, který má naopak nejmenší index lomu (1,34), což je přibližně stejně jako index lomu komorové vody. Světelný paprsek se láme na rozhraní těchto prostředí a na sítnici se promítá jako skutečný, zmenšený a převrácený obraz pozorovaného předmětu. Oční čočka, díky její akomodaci, vytváří obraz předmětů, které se nacházejí v různých vzdálenostech před okem, stále ve stejné vzdálenosti uvnitř oka - na sítnici. V případě předmětů ve velké vzdálenosti je zakřivení, a tedy i optická mohutnost čočky φ , menší. Ohnisková vzdálenost čočky je od jejího středu k sítnici a je rovna přibližně 1,6 cm.

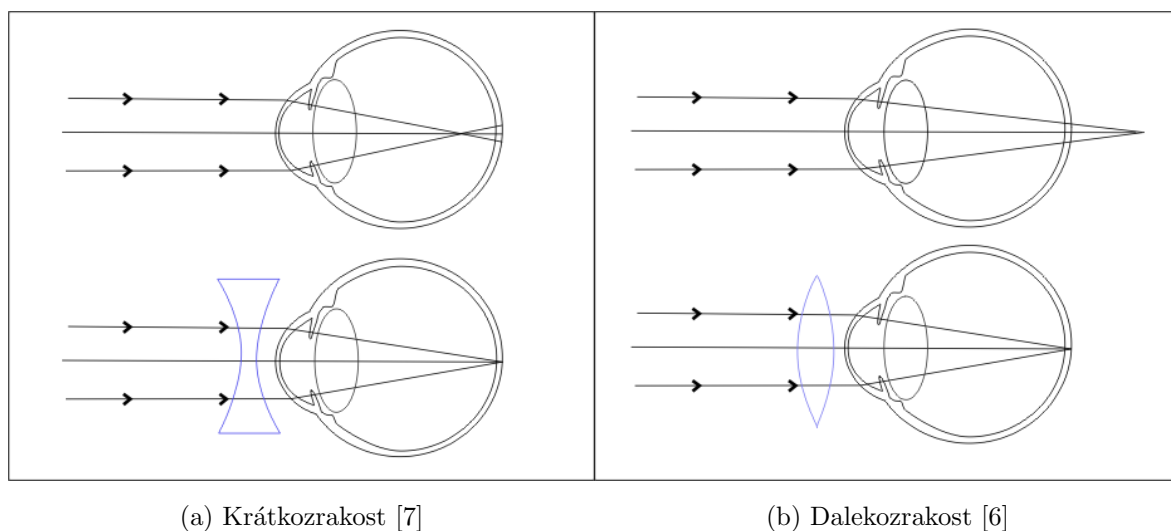


Obrázek 1.2: Akomodace oka na předmět v dálce a na blízku [5]

Nejvzdálenější bod, na který je oko schopné akomodace se nazývá **daleký bod** a v takovém případě, je akomodace minimální. Pokud pozorujeme předmět, který je v blízké vzdálenosti, oko se akomoduje zvětšením zakřivení optických ploch tak, aby se

obraz vytvořil na sítnici. Ohnisková vzdálenost čočky se zmenší. Nejmenší vzdálenost bodu, který oko ještě zobrazí ostře, určuje **blízký bod**. Akomodace oka je v takovém případě maximální. U zdravého oka je daleký bod v nekonečně velké vzdálenosti a blízký bod může být i ve vzdálenosti 15 cm, ale s věkem se mění. Při delším pozorování takto blízkých předmětů se oko brzy unaví. Bez velké námahy je možné pozorovat objekty po delší dobu ve vzdálenosti 25 cm. Tato vzdálenost byla stanovena jako blízký bod dohodou a nazýváme ji **konvenční zraková vzdálenost d** .

Běžně se můžeme setkat s poruchami lomivosti dopadajících paprsků - refrakčními vadami. Mezi tyto poruchy patří krátkozrakost a dalekozrakost. **Krátkozrakost** (myopie) je způsobená zmenšením ohniskové vzdálenosti čočky nebo prodloužením osové délky oka a obraz vzniká před sítnicí. Takové oko má daleký bod v konečné vzdálenosti od oka a blízký bod je posunut blíže k oku. Optická soustava oka se doplňuje o další čočku - rozptylku (pomocí brýlí), která zmenší optickou mohutnost soustavy na požadovanou hodnotu. **Dalekozrakost** (hypermetropie) je způsobená nedostatečným vyklenutím čočky nebo zkrácením osové délky oka. Daleký bod oka je v nekonečnu a blízký bod je vzdálenější, než u oka bez vad. Obraz vzniká za sítnicí a tato vada se napravuje spojkami.



Obrázek 1.3: Refrakční vady

Aby se na sítnici vytvořil ostrý obraz, je také zapotřebí přiměřené osvětlení pozorovaného předmětu a dostatečná doba trvání zrakového vjemu. V případě výrazného poklesu intenzity světla, vidění není zřetelné a schopnost rozlišit pozorované předmětu se snižuje. Při velmi intenzivním světle nevidíme zřetelně a hrozí i poškození sítnice.

K ochraně nám slouží sluneční brýle. Čím je pozorovaný předmět lépe osvětlen, tím je kratší potřebná doba trvání zrakového vjemu, aby bylo vidění zřetelné. Zrakový vjem se uchovává asi o 0,1 s déle než samotné zobrazení předmětu na sítnici. Při pozorování signálů o frekvenci větší než 10 Hz nám tyto impulzy budou splývat. Setrvačnosti zrakového vjemu se využívá při filmové projekci. Jednotlivé statické obrazy se promítají rychle za sebou, ale okem je vnímáme jako plynulý pohyb. Frekvence filmové projekce je 24 snímků za sekundu.

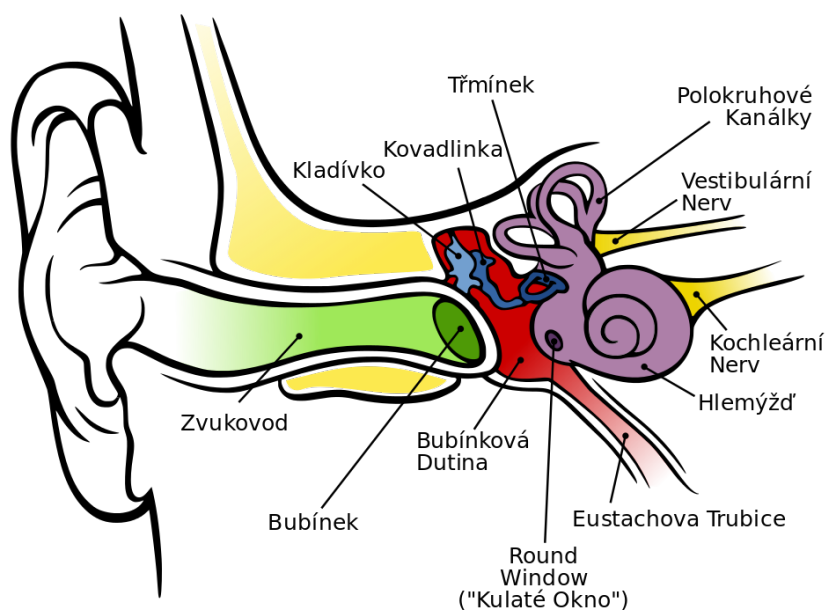
Přídavné orgány oka jsou víčka, spojivka, slzní ústrojí a okoohybné svaly. Zepředu chrání oko víčka, jejichž vnitřní stranu pokrývá spojivka, která kryje bělimu až po okraj rohovky. Slzná žláza je uložena v oční dutině a sekretuje slzy, které chrání rohovku před vysycháním. Pohyby oční koule zajišťuje 6 příčně pruhovaných svalů (okoohybné svaly) prostřednictvím nervových signálů z mozku tak, že obě oči mohou sledovat stejný směr. [1], [2], [3], [11]

1.3 Sluch

Zvuk člověku zprostředkovává informace o okolním světě. Tento přenos informací můžeme rozdělit na tři části: zdroj zvuku, prostředí, kterým se zvuk šíří a přijímač zvuku, kterým je v nejjednodušším případě lidské ucho. Zdrojem zvuku je chvění pružných těles. To se přenáší do okolního prostředí a vzbuzuje v něm zvukové vlnění, které je tak přenášeno ke sluchovému ústrojí. Zvuk se nešíří ve vakuu. Sluchový orgán reaguje na tlak a řadí se mezi mechanoreceptory. Ucho se anatomicky dělí na tři části: **vnější, střední, vnitřní**.

Vnější ucho se skládá z boltce a zevního zvukovodu. Boltce je tvořeno pružnou chrupavkou. Zevní zvukovod je trubice o délce asi 2,5 cm a o šířce 7 mm a je vystlán jemnou kůží s četnými mazovými žlázami. Zvukovod je akustický rezonátor, jež zesiluje frekvence s maximem okolo 3500 Hz a jeho rezonanční křivka je plochá. Ušní boltce nejprve zachytí zvukové vlnění, slouží jako trychtýř. Tlaková zvuková vlna dále pokračuje zevním zvukovodem zakončeným bubínkem, který odděluje vnější a střední ucho. Bubínek je pružná 0,1 mm silná blána, která se zvukovými vlnami rozkmitá a prohýbá se do středního ucha.

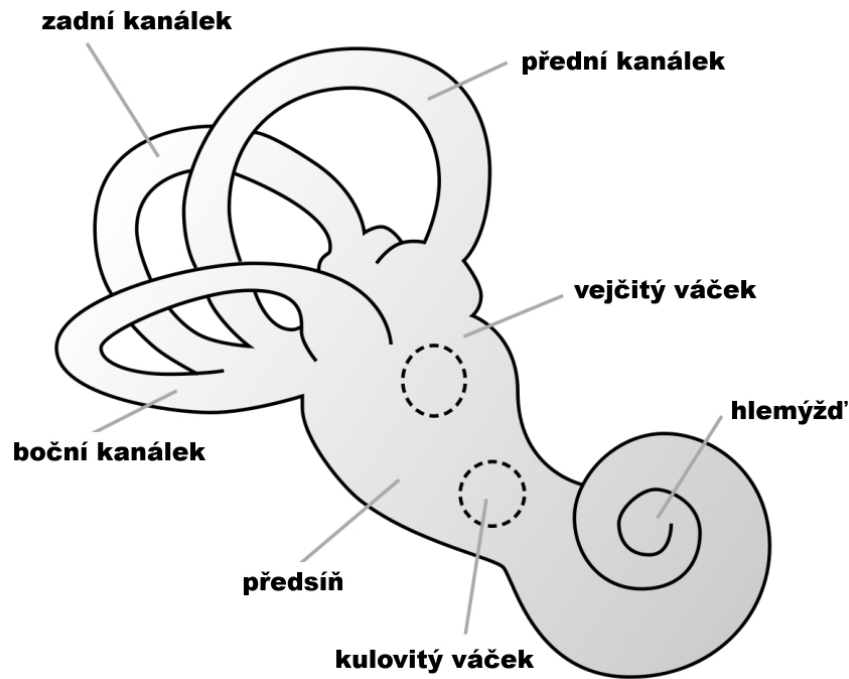
Střední ucho je dutina ve spánkové kosti, spojená s Eustachovou trubicí s nosohltanem. Dutina je vystlána tenkou sliznicí. Funkcí středního ucha je převod akustického vlnění zachycené bubínkem do tekutiny ve vnitřním uchu. Tímto hydrodynamickým



Obrázek 1.4: Schéma ucha [10]

přenosem se vyrovnávají rozdíly akustického tlaku mezi vnějším a vnitřním prostředím. Tlak zvukového vlnění se při vstupu do vnitřního ucha zvětšuje. Vlnění se převádí dutinou středního ucha soustavou tří sluchových kůstek - kladívko, kovadlinka a třmínek - na membránu oválného okénka vnitřního ucha. Kladívko je přirostlé k bubínku hlavičkou je kloubně spojeno s kovadlinkou. Ta je spojena s třmínkem, jenž je zasazen do oválného okénka kosti skalní. Plocha bubínku je 50 až 90 mm² a ploška třmínku vyplňující oválné okénko je 3 mm². Kůstky fungují jako systém pák, který koncentruje pohyby bubínku na malou plochu. Působící síly se tak zvětší až 30 krát.. Střední ucho také chrání vnitřní ucho před příliš hlasitým zvukem - umožňuje útlum silného zvuku až 15 dB v čase 15 ms.

Vnitřní ucho je systém chodbiček, kde jsou umístěny dva analyzátoři - vestibulárního a sluchového. Je to útvar ohraničený kostěným pouzdrem v kosti skalní, který nazýváme kostěný labyrint. Skládá se ze tří polokruhovitých kanálků, z předsíně a hlemýždě. Do předsíně vedou ze středoušní dutiny dvě okénka - oválné a kulaté. Do oválného je vsazen třmínek. Kulaté je uzavřeno tenkou vazivovou blánou. Dutina kostěného labyrintu je vyplněna tekutinou perilymfou, v níž se vznáší blanitý labyrint, což je vlastní smyslový orgán tvořený dvěma váčky: vejčítým se třemi polokruhovitými chodbami a váčkem kulatým, na který se napojuje hlemýžď. Blanitý hlemýžď je tvořen vazivovou slepě uzavřenou trubičkou stočenou 2,5 závitů do tvaru ulity, která je vy-



Obrázek 1.5: Schéma vnitřního ucha [10]

plněná endolymfou. Kostěný hlemýžď je tvořen dvěma patry - předšíňovým a bubínkovým, které se spojují ve vrcholu hlemýždě. Na bazilární membráně blanitého hlemýždě (dolní stěna) jsou uloženy sluchové receptory, které představují vlastní sluchové ústrojí - Cortiho orgán. Receptory zvukových vln jsou vláskové buňky. Zvuková vlna přenášená sluchovými kůstky na oválné okénko rozechvěje perilymfu v kostěném hlemýždi. Vlnění se přenáší na endolymfu v blanitém hlemýždi. Nastává posun krycí membrány oproti bazilární membráně s vláskovými buňkami. Dochází tak k přeměně zvukového signálu na signál elektrický, který je veden do CNS a tam dále zpracován. Vyklenutím kulatého okénka do bubínkové dutiny středního ucha se vyrovná vlnění perilymfy. Vlášková buňka obsahuje asi 100 vlásků (cilií), které jsou v kontaktu s krycí membránou. Pohyb obou membrán proti sobě vede k ohybu cilií - podráždění receptorových buněk. Mechanický podnět způsobuje smyslové podráždění, které se přenáší na nervová vlákna hlavového nervu sluchověrovnovázného. Vzniklé vzruchy - akční potenciály - vedou přes mozkový kmen do sluchového centra, které se nachází ve spánkovém laloku mozkové kůry.

Ucho je citlivý orgán. Změna tlaku $20 \mu\text{Pa}$ při frekvenci 1000 Hz způsobí vychýlení bubínku řádově o 10^{-11} cm a vychýlení smyslových buněk ve vnitřním uchu jen asi o 10^{-12} cm . K tomu, abychom dobře slyšeli nám stačí jedno správně fungující ucho.

Obě uši jsou nutné k určení původu zvuku a vzdálenosti jeho zdroje. Na bubínek vzdálenějšího ucha dopadne zvuk s jistým nepatrným zpožděním. Toto zpoždění pak umožňuje lokalizovat zdroj a vzdálenost. Sluchový analyzátor je schopen přesně zachytit časový rozdíl až 10^{-5} s.

Zvuková vlna může dosáhnout k receptorům ve vnitřním uchu i jiným způsobem než kůstkovým vedením a to přenosem akustických vibrací lebeční kosti přímo do tekutiny uvnitř ucha. Kostní vedení se uplatňuje při silných zvucích.

Součástí vnitřního ucha je **vestibulární orgán (rovnovážný orgán)**. Skládá se z vejčitého a kulovitého váčku a tří polokruhových kanálků vzájemně na sebe kolmých. V obou váčcích jsou ve vnější vrstvě rosolovité hmoty krystalky uhličitanu vápenatého, zvané otolity. Síly vychylující rosolovitou substancí proti vláskovým buňkám stimulují receptorové buňky. Činnost vestibulárního ústrojí si uvědomujeme jen za určitých nepříjemných okolností. Zaznamenává se odchylka postavení hlavy a celého těla vzhledem k působení gravitační síly a změna rychlosti směru pohybu hlavy a těla v prostoru při pohybu zrychleném nebo při pohybu po kružnici. Rovnoměrný pohyb si pomocí sluchově-rovnovážného ústrojí neuvědomujeme. Rovnovážné ústrojí registruje tedy zrychlení. [13], [11], [1], [2], [14]

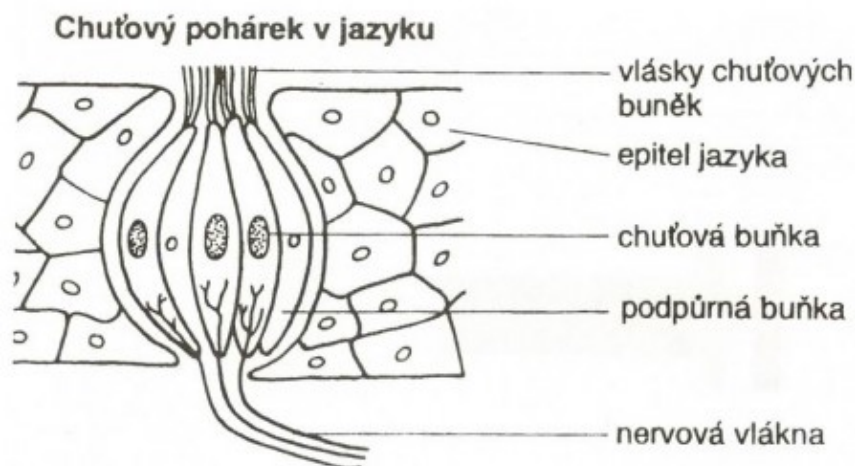
1.4 Hmat

Hmat je smyslový vjem, který zaznamenáváme prostřednictvím hmatových receptorů, reagujících na dotyk a tlak. Mechanický podnět malé intenzity vyvolává pocit doteku, při větší intenzitě vzniká pocit tlaku. Hmatové receptory jsou jednoduché struktury, v některých případech pouze volná nervová zakončení. Někdy obsahují vazivové pochvy zvyšující jejich citlivost, například Paciniho hmatová tělíska. Hustota a citlivost hmatových receptorů je v různých částech těla odlišná. Nejcitlivější je špička jazyka a konečky prstů, nejméně citlivá je kůže zad. [1], [11], [2]

1.5 Chuť

Chemoreceptory reagují na přítomnost chemických látek v prostředí a jsou to hlavní čidla pro chuť a čich. U obou smyslů je nutné, aby se substance dostala do přímého kontaktu s receptory.

Chuťové ústrojí je tvořeno **chuťovými pohárky**, uloženými ve slizničním epitelu na jazyku, měkkém patře a horní části hltanu, v největším množství na špičce a okrajích



Obrázek 1.6: Chuťový pohárek [12]

jazyka. V pohárcích se nachází **chuťové buňky**. Rozlišujeme čtyři základní chuťové pocity: sladký, hořký, slaný, kyselý. Těmito čtyřem chutím odpovídají i čtyři druhy receptorů, které jsou na jazyku soustředěny do pásů. Například na hrotu jazyka převažují receptory pro sladké a slané, na okrajích jsou receptory pro vnímání kyselé a sladké chuti a kořen jazyka je citlivý na hořké látky.

Citlivost chuťových receptorů je pro různé látky odlišná. Například alkaloid chinin zjistí chuťové buňky při koncentraci $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ v roztoku a NaCl při koncentraci $1 \cdot 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$.

Význam chuti spočívá i v řízení činnosti trávicího ústrojí - reflexní vylučování slin, žaludeční a pankreatické šťávy. [1], [11], [2]

1.6 Čich

Čichové ústrojí je drážděno pachovými látkami rozptýlenými ve vzduchu. Receptory jsou tyčinkovitého tvaru s vláskovitými výběžky a jsou součástí sliznice horní a zadní části nosní dutiny. Výběžky čichových buněk procházejí otvory v čichové kosti do lebeční dutiny a vstupují do čichového centra v mozku, kde se připojují.

Rozličné vjemy různých čichových kvalit jsou vyvolávány drážděním receptorů různých typů. Citlivost na jednotlivé typy látek je odlišná. Například sirná sloučenina methylmerkaptan může být zjištěna již v množství $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ mg}$ na 1 litr vzduchu. Naopak oxid uhelnatý nejsme schopni čichem detekovat.

Čichové vnímání se vyznačuje schopností snížení citlivosti receptorů vůči podnětu

delšího působení. Nastává adaptace na pach, kterému jsme aktuálně vystaveni. Některé látky mohou zabránit vnímání jiných látek. [1], [11], [2]

1.7 Termoreceptory a nocireceptory

Termoreceptory a nocireceptory nejsou samostatné smyslové buňky, ale jsou to volná zakončení dostředivých nervových vláken. Termoreceptory zaznamenávají teplo a chlad. Nejvíce se vyskytují v kůži obličeje a na hřbetu ruky, nejméně na zádech. Chladových receptorů je v kůži více než tepelných a jsou uloženy povrchově na rozdíl od hlouběji uložených tepelných receptorů.

Na bolest reagující nocireceptory získávají informace o ohrožení nebo poškození organismu. Reagují na chemické látky uvolňované z poškozených tkáňových buněk. Některé bolestivé podněty vyvolávají reflexní odpovědi, tzv. obranné reflexy. Například při styku s horkým nebo ostrým předmětem se daná část těla rychle oddálí. Receptory bolesti podávají zprávu také z hrudní a břišní dutiny a rozvňž ze svalů, šlach, kloubů a okostice. Jejich citlivost se při delším působení nesnižuje - neadaptují se. Termoreceptory a nocireceptory uložené v kůži označujeme spolu s hmatovými receptory jako kožní čidla. [1]



Obrázek 1.7: Příklady termoreceptorů [15]

Kapitola 2

Porovnání smyslového vnímání vybraných živočichů

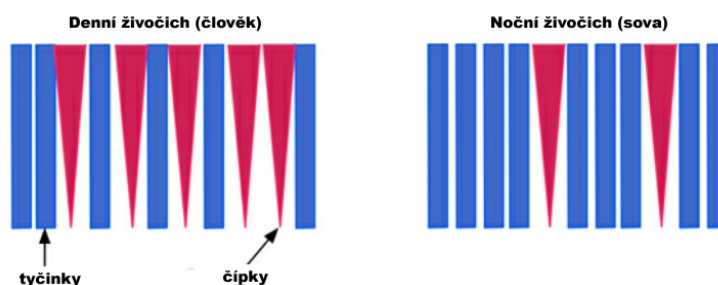
2.1 Zrak

Světlo a jeho periodické změny jsou významným biologickým faktorem, který podmiňuje orientaci živočichů v prostoru a čase. Prostřednictvím světla živočichové získávají informace o okolním prostředí. Již u některých jednobuněčných živočichů (například u krásnooček) je světlo detekováno **světločivnou skvrnou** zvanou stigma. Specializovanější fotosenzitivní orgány, které přinášejí informaci o tvaru pozorovaného objektu nebo o intenzitě a barvě světla vyžadují přítomnost čočky. U medúzovců a ploštěnců najdeme **miskovité oči**, u plžů **váčkovité oči** a **komorové oko** dokonalejší stavby podobné obratlovcům pozorujeme u hlavonožců.

Nejostřejší zrak mají dravci a to zejména orli, jestřábi a kánata. Počet tyčinek na sítnici mají vyšší než člověk. U některých živočichů (nočních šelem, přežvýkavců, žraloků či žab) se může vyskytovat odrazivá vrstva zvaná tapetum lucidum. Tato vrstva se nachází mezi cévnatkou a sítnicí. Světlo je touto odrazivou vrstvou odraženo zpátky na sítnici, kterou prochází ještě jednou. Zvířatům tak umožňuje maximálně využít i malé množství světla. Odražené světlo je příčinou jevu svítících očí těchto zvířat.

Poměr mezi čípkami a tyčinkami se výrazně liší u nočních a denních živočichů. U nočních živočichů je větší výskyt tyčinek, což umožňuje například sovám vidění v noci. Ptáci a obojživelníci rozlišují všechny barvy spektra, zatímco u zástupců savců je barevné vidění omezené. Na sítnici většiny savců jsou pouze dva typy čípků - dichromatické

vidění. Zvířata, která jsou aktivní v noci, pravděpodobně barvy téměř nerozlišují. Ze savců mají trichromatické vidění primáti. [18]



Obrázek 2.1: Schématické znázornění poměru čípků a tyčinek u člověka a sovy [5]

Kočky mají velkou koncentraci tyčinek a malou koncentraci čípků na sítnici, což jim umožňuje kvalitnější vidění ve tmě, ale mají slabší schopnost rozlišování barev. Za sítnicí se nachází odrazivá vrstva tapetum lucidum, jež umožňuje světlu, které prošlo mezi fotoreceptory, odrazit se zpět. Zvyšuje se tak schopnost kočičího oka detekovat co nejvíce světla. Kočky jsou trichromati (mají tři typy čípků), ale rozpoznávají pouze odstíny modré a zelené barvy. Červenou, oranžovou a růžovou barvu nerozlišují. Mají také širší zorné pole - kolem 200 stupňů, což je v porovnání zhruba o 20 stupňů více než u lidského zraku. Zraková ostrost kočky se udává v rozmezí 20/100 až 20/200, což znamená, že to, co kočka vidí ve vzdálenosti 20 stop, vidí průměrný člověk ostře při vzdálenosti 100 až 200 stop. Lepšího schopnosti vidění na blízko využívají k lovu kořisti. [16], [19]



Obrázek 2.2: Znázornění rozdílu ve zraku člověka a kočky [16]

Psí oči jsou plošší než lidské oči. Jejich čočka nezaostřuje stejně dobře jako u lidí, a to hlavně u předmětů na krátkou vzdálenost. Mají pouze dva typy čípků - žlutý a modrý. Takovému vidění říkáme dichromatické. Nerozlišují zelenou, oranžovou, žlutou

a vnímají je jako odstíny žluté. Červenou barvu vidí jako šedou až černou. Modrou barvu nerozlišují od fialové. Ostrost u psů se pohybuje okolo 20/75. Za sítnicí se nachází odrazivá vrstva tapetum lucidum, která jim umožňuje lepší vidění za šera. Oči mají nejčastěji položené na stranách hlavy, a proto mají dobré periferní vidění.[16], [20]

Králíci jsou ve volné přírodě kořistí mnoha predátorů. Jejich zrak je uzpůsoben především k tomu, aby rychle zjistili blížící se nebezpečí. Oči mají posazeny na stranách hlavy poměrně vysoko, což jim dává možnost vidět skoro v rozsahu 360 stupňů i nad sebe. Nevýhodou takového postavení je slepý bod přímo před jejich nosem a bradou a malý překryv zorných polí obou očí. Výsledkem je slabé vnímání trojrozměrného prostoru a omezená schopnost určování vzdáleností objektů. Králíci mají rovněž omezené vidění barev. Mohou například rozlišovat mezi vlnovou délkou, kterou vnímáme jako zelenou a modrou. Je ale možné, že tyto barvy nerozlišují tak dobře jako lidé. Za horších světelných podmínek vidí králík naopak lépe než člověk. Jeho dobré vidění v potměných podmínkách je způsobeno převahou tyčinek nad čípky, ale jelikož chybí tapetum lucidum, králík nevidí dobře v noci. Králíci vidí nejlépe za soumraku a svítání a v této době jsou nejaktivnější. [20]

Delfín vidí stejně dobře ve vodě jako na vzduchu. Oči jsou umístěny po stranách hlavy a oční bulva je kulovitá s průměrem asi 5 cm. Duhovka má clonu, která způsobuje, že se v oku při jasném světle ukazuje štěrbina tvaru U. Rohovka nad touto U-štěrbinou je jinak tvarovaná než uprostřed. Tato štěrbina je užívána k vidění na vzduchu. Ve vodě se vzhledem k menší intenzitě světla clona duhovky rozevře. Za sítnicí se nachází tapetum lucidum. [22]

2.2 Sluch

U bezobratlých živočichů je na zvuk nejcitlivější hmyz. U některých druhů se vyskytuje Johnstonův orgán ve spodní části mohutně větvených tykadel, například u komára, nebo tympanální orgán u kobylek a sarančat. U kobylek je uložen po stranách holeně, u sarančat na bocích prvního článku zadečku. Chvění membránovitého bubínku se zde přenáší na uspořádané sensily, podobně jako u savců. Hmyz reaguje na frekvence, které vnímá i člověk. Některé druhy jsou však citlivé i na ultrazvuk.

U obratlovců je sluch vyvinutý na různých úrovních. Ryby nemají zevní zvukovod, ale zvukové vlny z vnějšího prostředí přenáší lebeční kostra - kostní vedení. U některých ryb se vyskytuje Weberův orgán, který propojuje sluchové ústrojí s plynovým měchýřem.

Plynový měchýř pak zastává funkci jakéhosi rezonátoru a jeho vibrace jsou přenášeny do Weberova aparátu. Ten zajišťuje přenos zvuku do vnitřního ucha. Plazi nemají dobře vyvinutý sluch, někteří zástupci jsou téměř hluchí. Obojživelníci, plazi i ptáci mají ve středním uchu vyvinutou pouze jedinou kůstku - kolumelu. U ptáků a savců jsou sluchové orgány tvořeny společně s polohovými. Savci mají převážně dobře vyvinutý sluch. [18]

Sluch a lokalizace zvuku je u **koček** lepší než u člověka. Horní hranice sluchu je u dospělé kočky asi 50 000 Hz. V nižších frekvencích je kočičí sluch srovnatelný s lidským, s růstem frekvence je kočičí sluch lepší. Pohyb uší zajišťuje 27 různých svalů, což společně s jejich umístěním nad profilem hlavy způsobuje, že kočka může své uši natáčet za zvukem, aniž by musela hýbat hlavou, a s velkou přesností určit a lokalizovat zdroj zvuku. Citlivost na vysoké frekvence kočky umožňuje detekovat komunikaci své kořisti a proto je sluch pro lov stejně důležitý jako zrak. [19]

Sluchové schopnosti **psa** závisí na plemeni. Psi vnímají frekvence od 40 do asi 40 000 Hz, což je více než u člověka ale méně než u kočky. Psi mají nejen lepší sluch než člověk, ale mají také schopnost uzavřít vnitřní ucho a zaměřit se pouze na jeden zvuk. Ušní boltec psa se skládá z chrupavky a je obepínán 17 svaly, díky nimž může pes hýbat ušima. Pohybem uší si psi stejně jako kočky pomáhají k lepší lokalizaci zdroje zvuku. Pokud mají uši svěšené, napomáhají si nadzvedáním boltců. [20], [21]

Králíčí sluch je jejich nejdůležitější smysl sloužící k detekci predátora. Dlouhé uši dokáží detekovat zvuky z velké vzdálenosti. Klíčem ke sluchovým schopnostem králíků je však jejich schopnost otáčet svoje uši ve velkém rozsahu. Rozmezí frekvencí je od 40 do asi 42 000 Hz. Přestože některá plemena domácích králíků mohou mít trochu horší sluch, jejich slyšení je stále mnohem lepší než u lidí. [20], [21]

Sluch **delfína** je velmi dobrý, zejména pod vodou. Rozsah frekvence je od 40 Hz do 100 kHz. Vnější sluchový otvor je umístěn za okem a je velmi malý. Zvukovod má jen malý průměr a obvykle bývá ucpaný. Jeho jedinou funkcí je vyrovnávání tlaku vody. Zvukové vlny jsou k bubínku vedeny přes měkké a kostní tkáně, hlavní úlohu zde nejspíš hraje dolní čelist. Uvnitř sluchového orgánu se nachází Eustachova trubice, která vyrovnává tlak oproti dutinám dýchací soustavy. Hlemýžď je charakteristický tím, že ke každé smyslové buňce vede jedno samostatné nervové vlákno, na rozdíl např. od člověka, u nějž na každé nervové vlákno připadá několik smyslových buněk. Akustický nerv je dvojnásobně silnější než u člověka. Hlemýžď je umístěn ve zvláštním

kostěném útvaru vně lebky, ve sluchových výdutích, a je od ní oddělen. Sluchová výduť má s lebkou pohyblivé spojení pomocí vazů a svalů, které mu umožňují rotační pohyb vzhledem k lebce. Delfín tak může sluchové výdutě uvádět do pohybu. Účelem tohoto uspořádání je schopnost vyhledat co nejvhodnější postavení sluchové výdutě pro zachycení odražených zvuků, které zvíře vysílá, když používá svůj echolokátor. [22]

Echolokace je schopnost vysílat zvuk a zpětně ho zachytit po odrazu od objektu. Pomocí echolokace mohou delfíni určit vzdálenost daného objektu za špatných světelných podmínek i v kalných vodách na větší vzdálenosti. Vydávají echologické akustické signály, tzv. cvakání v rozsahu od 10 kHz do 280 kHz. Dokáží vyslat až 800 cvaknutí za sekundu. Podle vzdálenosti zkoumaného objektu mohou měnit frekvenci impulsů. Pokud je např. delfín od kořisti vzdálen několik desítek metrů, vysílá jen 15 až 20 sérií impulsů za sekundu, když už kořist uchvacuje, dosahuje počet sérií 190 až 200 za sekundu. Ve vodě se zvuk šíří rychlostí 1440 m s^{-1} . Aby se zvuk od daného předmětu odrazil, musí být jeho vlnová délka menší než tento předmět. Získaný signál závisí také na povrchu předmětu. Ve vodě je tělo živočicha svou akustickou vodivostí blízké vodě a kytovci ho vidí slabě. Avšak plynový měchýř ryb je akusticky zřetelnější, nastává odraz na rozhraní voda - vzduch a získaný signál je dobře rozpoznatelný. Signál je přijímán přes kůži, svalové i kostní tkáň, převážně kostí dolní čelisti. [23]

Kapitola 3

Akční potenciál

3.1 Akční potenciál - princip přenosu informace do CNS

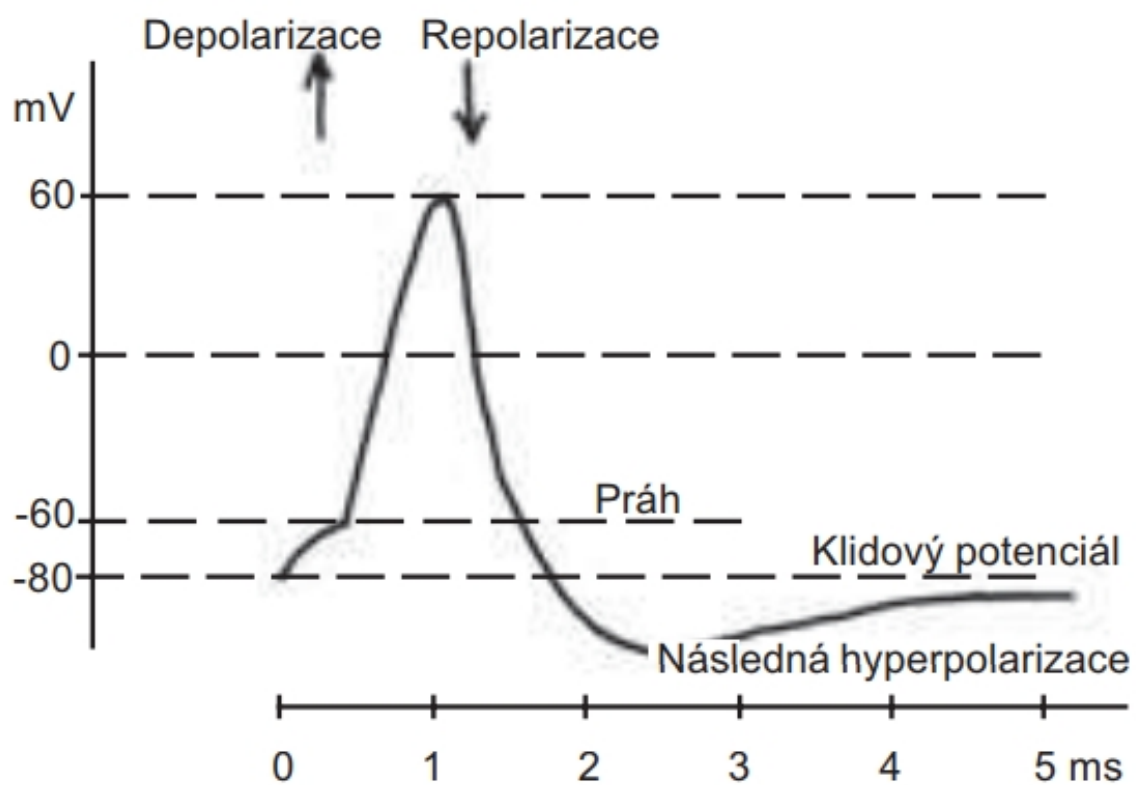
Vlastností živých buněk je existence membránového potenciálu. Různá koncentrace kationtů a aniontů ve vnitrobuněčném a mimobuněčném prostoru způsobuje potenciálový rozdíl na membráně. Vevnitř buňky je membránové napětí záporné díky organickým iontům (glutamát, aspartát) a vně buňky kladné. Nervové a svalové buňky využívají iontového gradientu ke generování změn membránového napětí a přenáší se tak informace. Smyslové receptory mají schopnost převádět vjem na receptorový potenciál, ten vyvolá v senzoričných nervech potenciál akční. Akční potenciál AP se pomocí nervových vláken (axonů) dostává do CNS, kde je zpracován. AP je krátký okamžik, kdy se membránový potenciál buňky rychle zvýší a zase sníží. Tato změna se dále šíří jedním směrem.

AP vzniká změnou klidové rovnováhy na membráně. Šířící se napětí vyvolá změnu polarizace pomocí napěťově řízených iontových kanálů. Tyto kanály se otevírají a zavírají při určitých hodnotách membránového potenciálu. Většinou je však vztah mezi potenciálem a stavem kanálu jen pravděpodobnostní a zahrnuje časovou prodlevu. Hlavní charakteristikou AP je, že vzniká principem vše nebo nic a také, že se přenáší bez zeslabení signálu. Se vzrůstající vzdáleností od místa vzniku se jeho vlastnosti nemění. AP začíná podrážděním receptoru. Vzruch vznikne pouze dostatečně intenzivním podnětem, který nazýváme prahový podnět. Iontové kanály se otevřou a membrána je propustná pro ionty sodíku a draslíku. Nastává rychlý tok kladných iontů Na^+ z mimobuněčného

prostředí do buňky. Na vnitřní straně membrány převládá kladnější náboj oproti straně vnější. Tento jev nazýváme **depolarizace**. Opožděně se otvírají i draslíkové kanály. Otevření těchto kanálů dosahuje svého maxima při uzavření Na^+ kanálů. Prouděním K^+ iontů po směru jeho koncentračního gradientu se polarita začíná vracet k původním hodnotám a nastává **repolarizace**. Pokud dojde ke zmenšení potenciálu na hodnotu menší než původní klidový potenciál, jedná se o **hyperpolarizaci**. Původní hodnoty získává buňka činností Na^+/K^+ ATP-ázy. Ty ovlivňují iontové složení v blízkosti membrány a obnovují iontové poměry po proběhlém akčním potenciálu, čímž umožňují průběh dalších potenciálů. Pumpa přenáší 3 Na^+ extracelulárně výměnou za 2 K^+ intracelulárně. energii k překonání koncentračních gradientů poskytuje štěpení vazeb v ATP.

Každá vzrušivá část membrány má dvě důležité hodnoty membránového potenciálu: klidový potenciál, což je hodnota membránového potenciálu po dobu, kdy buňku nic nerozrušuje, a vyšší hodnotu, zvanou prahový potenciál. Na iniciálním segmentu neuronu je hodnota potenciálu klidového asi -70 mV a prahového -55 mV. Rozdíl mezi prahovým a klidovým potenciálem činí většinou 5 až 15 mV. Doba, kdy jsou iontové kanály otevřené je kratší než 1 ms. Snížil-li se depolarizací hodnota klidového potenciálu pod určitou prahovou hodnotu, odpoví nervové vlákno vznikem AP. Rychlost šíření AP je pro dané nervové vlákno konstantní veličinou a závisí na struktuře a elektrických vlastnostech buněčné membrány a vlastnostech vnitřního a vnějšího prostředí. Průměrná hodnota šíření AP je hodnota rychlosti 100 ms. Zvětšuje se, je-li průměr nervového vlákna větší. [24], [18]

Pro kvantitativní popis AP se používají různé matematické modely. Vytváří se předpoklady, které jsou experimentálně testovány. Nejznámější model je Hodgkinův a Huxleyův. Ten popisuje AP jako sadu čtyř diferenciálních rovnic. I když je to značné zjednodušení oproti skutečnosti, tak komplexnost modelu inspirovala další, ještě přesnější modely, např. Morris-Lecarův nebo FitzHugh-Nagumo. [25]



Obrázek 3.1: Grafické znázornění akčního potenciálu [18]

Kapitola 4

Zákony popisující vztah počítku a podnětu

4.1 Weberův zákon

Weberův zákon popisuje vztah mezi reálnou změnou stimulu a vnímanou změnou. Vyrůstá-li intenzita podnětu řadou geometrickou, pak roste intenzita počítku řadou aritmetickou. Zákon lze napsat vztahem:

$$\Delta S = kS, \quad (4.1)$$

kde S je intenzita počátečního stimulu, ΔS je nejmenší rozdíl intenzity stimulu, který člověk dokáže poznat a k je konstanta, která závisí na typu podnětu. Weberův zákon nefunguje pro nízké intenzity podnětu a většinou ani pro vysoké intenzity. Jeho použití je tedy relevantní pouze ve středním rozsahu intenzit. [26]

Příklad použití Weberova zákona: Máme dvě závaží o hmotnostech 100 kg a 105 kg. Ze vztahu 4.1 vypočítáme konstantu k .

$$k = \frac{\Delta S}{S} = \frac{105-100}{100} = \frac{1}{20}$$

Vypočítanou konstantu k použijeme k výpočtu rozdílu hmotností dvou závaží, za předpokladu, že hmotnost lehčího závaží je 300 kg.

$$\Delta S = kS = \frac{1}{20}300 = 15$$

Druhé závaží by muselo mít o 15 kg více. Kromě vnímání hmotnosti se Weberův zákon může popsat na příkladech vnímání intenzity zvuku nebo vnímání osvětlení.

4.2 Fechnerův zákon

Fechnerův zákon vychází z poznatku, že u intenzivnějších podnětů je složitější poznat rozdíl jejich intenzit než u slabších podnětů. Matematicky to Fechner vyjádřil pomocí přirozeného logaritmu:

$$p = k \ln \frac{S}{S_0}, \quad (4.2)$$

kde p je vnímaná intenzita podnětu, S je intenzita podnětu, S_0 je největší možná intenzita podnětu a k je konstanta, která závisí na typu podnětu.

Fechnerův zákon se dá vysvětlit na mnoha případech ze života. Například pokud rozsvítíme světlo v temné místnosti, hned poznáme rozdíl. Pokud za denního světla rozsvítíme prosvícený pokoj, rozdíl nebude tak znatelný. [26]

4.3 Stevensův vztah

Americký psycholog Stanley Smith Stevens vycházel z výsledků svého výzkumu, kde testované osoby odhadovaly velikost plošných obrazců. Zavedl vztah:

$$R = cS^n, \quad (4.3)$$

kde R je intenzita vjemu, S je intenzita podnětu a c a n jsou konstanty, které závisí na typu podnětu. Po zlogaritmování vztahu 4.3 dostáváme:

$$\log R = n \log S + c. \quad (4.4)$$

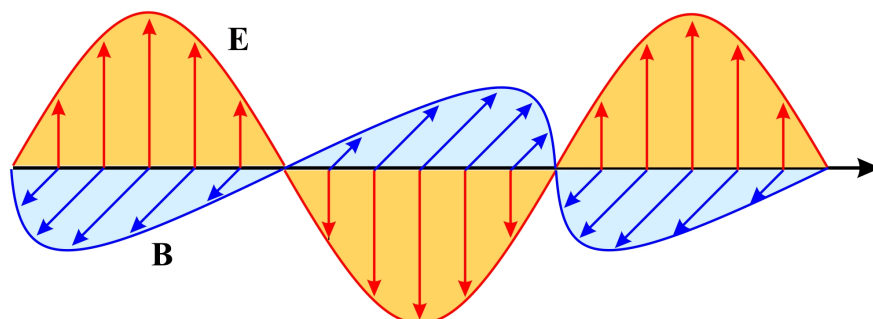
Příklady exponentů n pro různé stimuly: hlasitost 0,67, jas 0,5, vizuální délka přímky 1, vizuální plocha čtverce 0,7. [26]

Kapitola 5

Fyzikální aspekty zraku

5.1 Elektromagnetické záření

Viditelné světlo, které detekujeme okem, je pouze malá část elektromagnetického spektra. **Elektromagnetické záření** je příčné postupné vlnění magnetického a elektrického pole, které se ve vakuu šíří rychlostí $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Vektory elektrické intenzity \mathbf{E} a magnetické indukce \mathbf{B} jsou na sebe kolmé a zároveň jsou oba vektory kolmé na směr šíření vlny. Vektorový součin \mathbf{E} a \mathbf{B} udává směr šíření vlny.



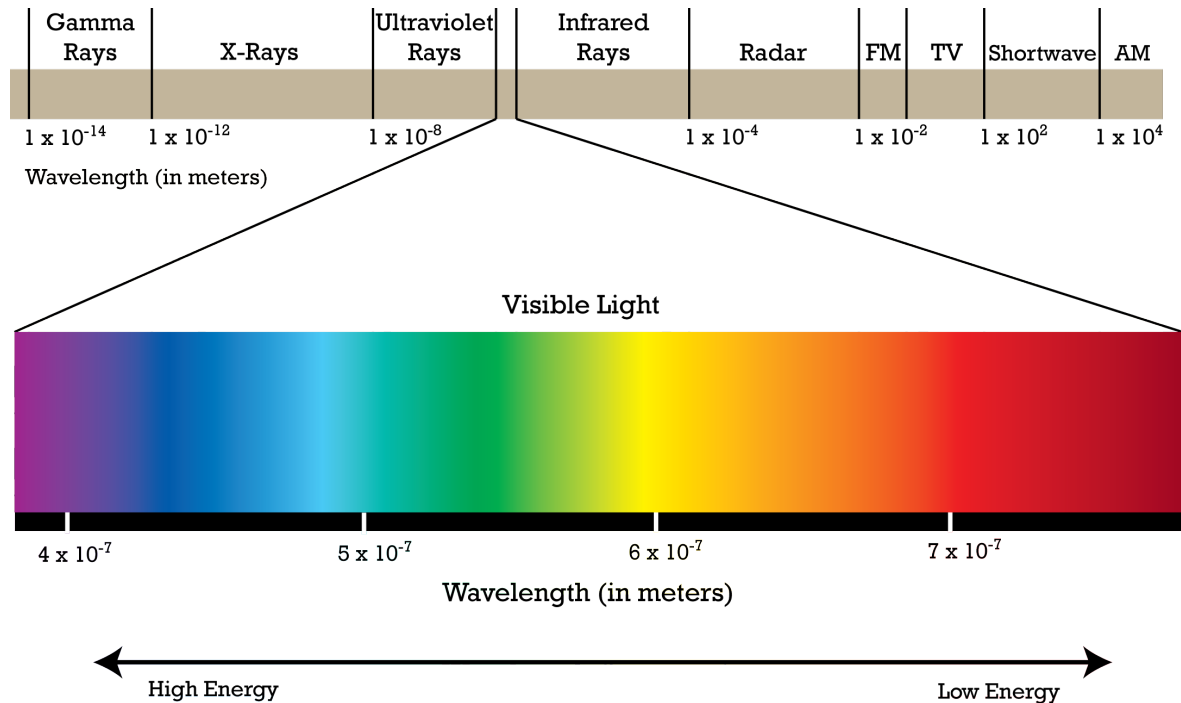
Obrázek 5.1: Elektromagnetické vlnění - vektor elektrické intenzity \mathbf{E} a magnetické indukce \mathbf{B} [27]

Na světlo můžeme pohlížet jako na elektromagnetické vlnění nebo jako na proud fotonů. Vlnu charakterizuje rychlost šíření, vlnová délka λ a frekvence f . Elementární částici zvanou foton popisujeme jako kvantum elektromagnetické energie. Pro energii fotonu platí:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (5.1)$$

kde h je Planckova konstanta, jejíž hodnota je $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$. Každý druh elektromagnetického záření má odlišný rozsah vlnových délek λ (frekvence f). Vlnová délka λ

je vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění ve stejné fázi. Mezi jednotlivými druhy není ostrá hranice a částečně se překrývají. Viditelné světlo je složka elektromagnetického záření, kterou lidské oko vnímá a detekuje, ale vliv na lidský organismus mohou mít i ostatní oblasti spektra. [5], [4]



Obrázek 5.2: Spektrum elektromagnetického záření [28]

Gama záření má nejkratší vlnovou λ délku a největší frekvenci f z celého elektromagnetického spektra. Vzniká při radioaktivním rozpadu jader. Při interakci gama záření s lidským organismem, může podle energie dojít k popáleninám, k rakovině nebo ke genovým mutacím.

Rentgenové záření částečně zasahuje i do spektrálního pásma gama záření, ale liší se vznikem. Foton rentgenového záření vzniká při vysoce energetických interakcích v elektronovém obalu. Rentgenové záření dělíme na tvrdé a měkké. Tvrdé rentgenové záření má vyšší energii a stejně jako gama záření může způsobit rakovinu.

Ultrafialové záření při styku s kůží aktivuje pigment melanin, což vede ke tmavnutí pokožky. Pokud je vystavení UV záření příliš dlouhé, na kůži mohou vzniknout popáleniny nebo v krajním případě i rakovina kůže. UV záření se podle vlnové délky dělí na UVA, UVB a UVC. Nejkratší vlnovou délku má UVC záření, které je pro živé organismy je karcinogenní.

Infračervené záření má vlnovou délku větší než viditelné záření. Toto záření okem nevidíme, vnímáme ho tepelnými receptory.

Mikrovlny mají schopnost ohřevu živých tkání do hloubky.

Rádiové vlny mají nejdelší vlnovou délku a využívají se v radiokomunikaci, námořní navigaci, přenosu rozhlasového vysílání, telekomunikaci, radarech a mnoho dalších. Účinky dlouhodobé expozice lidského organismu vůči radiofrekvenčnímu elektromagnetickému poli je předmětem mnoha studií. [5]

Viditelné elektromagnetické záření zaujímá pouze úzkou oblast spektra. Při dopadu na fotoreceptory vyvolává zrakový vjem. Hlavním zdrojem viditelného světla je Slunce. Nejdůležitější fyziologický děj, kde se využívá viditelného světla, je fotosyntéza. Využitím energie světelného kvanta se tvoří energeticky bohaté organické sloučeniny. Další fyziologický účinek viditelného světla je stimulace suprachiasmatického jádra v hypotalamu (propojen se sítnicí) a řízení cirkadiánního rytmu organismu.

Dopadem viditelného záření na molekulu světločivných buněk sítnice (rhodopsin, iodopsin) vzniká elektrochemický signál. Přes optický nerv se neurony šíří informace do mozku. Celý proces vidění můžeme rozdělit do čtyř kroků: optické zobrazení pozorovaného předmětu na sítnici, absorpce světla buňkami (molekulami) sítnice, vedení elektrického signálu a proces, kterým je informace zpracována v mozku. [8], [4], [5]

Tabulka 5.1: Barvy viditelného spektra a jejich vlnové délky [5]

barva	vlnová délka λ [nm]
fialová	350-400
indigo	400-450
modrá	450-500
zelená	500-550
žlutá	550-620
oranžová	620-670
červená	670-750

5.2 Světlolomný aparát oka

Optický aparát oka dělíme na světlolomný a světločivný. Světlolomný aparát je tvořen rohovkou, čočkou, komorovou vodou a sklivcem. Světlo prochází jednotlivými částmi oka a na rozhraní dvou prostředí se láme. Velikost obrazu na sítnici je určena indexy lomu a zakřivením jednotlivých částí oka, kterými světlo prochází. Naměřené indexy lomu n jednotlivých částí optického aparátu oka (podle [8]) jsou:

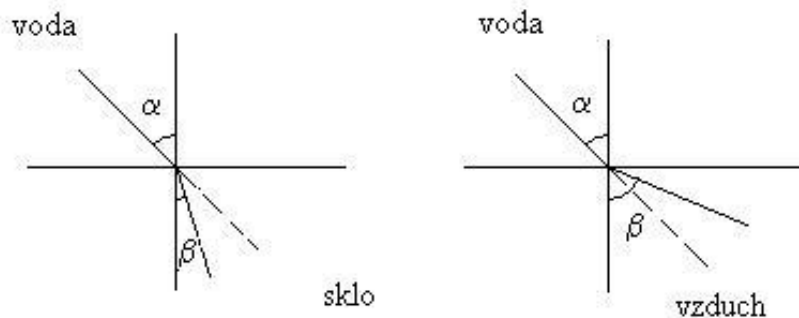
- sklivec: $n_1 = 1,336$
- komorová voda: $n_2 = 1,337$
- rohovka: $n_3 = 1,377$
- čočka: n_4 v rozmezí 1,385 až 1,410

Čočka má heterogenní strukturu a tudíž index lomu u ní není jednotný. Po průchodu světlolomným aparátem paprsek prochází přes nervová ganglia a dopadá na fotoreceptory sítnice - čípky a tyčinky.

Při dopadu na rozhraní dvou prostředí se světlo částečně odrazí a částečně prochází do druhého prostředí. Nastává odraz a lom světla. Při průchodu světla do jiného prostředí dochází ke změně směru šíření vlnění (lom světla). Snellův zákon popisující přechod vlnění z jednoho prostředí do jiného, kde se mění optické vlastnosti prostředí:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (5.2)$$

kde α je úhel dopadu na rozhraní, n_1 je index lomu prvního prostředí, β je úhel lomu a n_2 je index lomu druhého prostředí. Používané indexy lomu jsou 1 pro vzduch, 1,33 pro vodu a v rozmezí 1,5 - 1,6 pro sklo.



Obrázek 5.3: Znázornění lomu světla na rozhraní voda-sklo a voda-vzduch

V optickém aparátu oka rozeznáváme dvě osy - vizuální a optickou. Optická osa prochází středem rohovky a čočky a vizuální (zraková) osa oka je přímka, která spojuje optický střed oka se žlutou skvrnou. S optickou osou oka svírá úhel asi 5° , to znamená, že žlutá skvrna není v obrazovém ohnisku oka, ale je od něho odchylena asi 1,5 mm směrem ke spánku. Slepá skvrna se nachází v rozmezí 13° až 18° od žluté skvrny směrem k nosu. Slepou skvrnu běžně nevnímáme, jelikož ve chvíli, kdy se obraz předmětu nachází v jednom oku v místě slepé skvrny, v druhém oku dopadají paprsky do funkční oblasti.

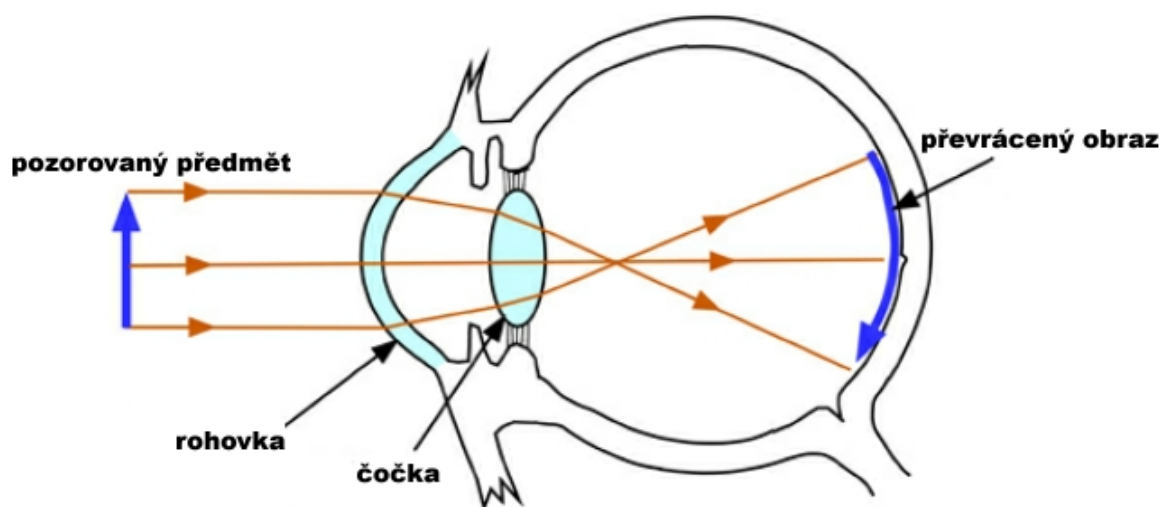
Součástí optického aparátu je spojná čočka, která mění rovnoběžný paprsek ve sbíhavý. Čočka je transparentní heterogenní těleso se dvěma lámavými plochami, jejichž centrální osy splývají. Pro tenkou čočku platí zobrazovací rovnice:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}, \quad (5.3)$$

kde f je ohnisková vzdálenost čočky, d_1 je předmětová vzdálenost a d_2 je obrazová vzdálenost. V případě, že je tenká čočka obklopena vzduchem, platí také vztah:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (5.4)$$

kde r_1 je poloměr křivosti povrchu bližšího k předmětu a r_2 je poloměr křivosti druhého povrchu. Spojná čočka má kladnou ohniskovou vzdálenost a pokud je vzdálenost pozorovaného předmětu d_1 větší než ohnisková vzdálenost čočky f , obraz na sítnici je skutečný, převrácený a zvětšený.



Obrázek 5.4: Zobrazení předmětu na sítnici po průchodu světlořadným aparátem.[5]

V oční optice se používá veličina optická mohutnost φ a je definována jako převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti f :

$$\varphi = \frac{1}{f}. \quad (5.5)$$

Jednotkou optické mohutnosti je dioptrie D. Optická mohutnost čočky není stálá, je upravována pomocí řasnatého tělíska. Naopak rohovka má neměnnou optickou mohutnost φ v rozmezí 42 až 43 D. Lom světla je po průchodu rohovkou nejvýraznější. Ve zjednodušeném modelu očního zobrazovacího systému (Standard eye model, [8]) je oko považováno za tenkou čočku s ohniskovou vzdáleností 17 mm, což odpovídá optické mohutnosti 59 D. U oka bez refrakční vady se paprsky procházející optickou soustavou protínají v ohnisku na ploše sítnice. Takové oko se nazývá emetropické. Oko je kombinací čtyř různých zakřivených rozhraní a pokud zobrazení na sítnici není dokonalé, jsou zvoleny korekční čočky (dvě další zakřivené rozhraní ke každému oku) k úpravě obrazu.

Pouze 50 % světla procházejícího přes komorovou vodu, čočku a sklivec dopadá na sítnici. Při průchodu dochází částečně k odrazu světla na rozhraní dvou prostředí a k jeho absorpci a rozptylu. Velikost úhlu odraženého paprsku se rovná velikosti úhlu jeho dopadu. Odražený paprsek leží v rovině dopadu (v rovině dané dopadajícím paprskům a kolmicí dopadu). Odraz vlnění můžeme rozdělit na dva typy - pravidelný a rozptýlený. Pravidelný odraz nastává při rovném povrchu a rozptýlený odraz v případě na povrchu nerovném, na kterém se světlo odráží do více směrů. Pro odrazivost R daného rozhraní dvou prostředí o indexech lomu n_1 a n_2 platí vztah:

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2. \quad (5.6)$$

Odrazivost je optická vlastnost materiálu, která udává, jaké množství světla se odrazilo od materiálu v poměru k množství, které na materiál dopadlo. Po dosazení za $n_2 = 1,377$ a $n_1 = 1$ dostáváme odrazivost pro rozhraní vzduch/rohovka 2,5 %, což je největší hodnota odrazivosti v oku. Odrazivost se zvětšuje s rostoucím úhlem, tudíž její hodnota je ve skutečnosti o něco větší. Přesto odraz světla tvoří malou část ze ztrát dopadajících paprsků. Pokud ve slabě osvětlené místnosti držíme asi 30 cm před okem testované osoby zapálenou svíčku, pozorujeme Purkyňovy obrazce. V lidském oku se vyskytují čtyři světlolomné plochy – přední a zadní plocha rohovky, přední a zadní plocha čočky. Světelný zdroj tedy v oku vytváří čtyři odrazy – Purkyňovy obrazce. Obrazec vytvořený přední stranou rohovky je ze všech nejjasnější a přímý. Obrazec, který vznikl odrazem

zadní plochou rohovky je naopak velmi nejasný. Obrazec vytvořený přední konvexní plochou čočky je ze všech obrazců největší, přímý a při pohledu do dálky nejasný a také mění svoje vlastnosti při akomodaci – stává se jasnějším a zmenšuje se. Obrazec vytvořený zadní konkávní plochou čočky je jako jediný převrácený a je ze všech obrazců nejmenší.

Absorpce světla je jev, kdy dochází k pohlcení a zeslabení záření v průběhu jeho šíření prostorem. Většina absorbovaného světla je v rozmezí vlnových délek od 300 do 400 nm a nastává na xantofylech v čočce.

Největší část ztrát nastává v důsledku rozptylu světla vlivem nehomogenity indexů lomu jednotlivých komponentů oka. Rozptyl světla na částech podstatně menších než vlnová délka světla se nazývá Rayleighův rozptyl. Krátké vlny (modrého světla) jsou rozptylovány více než dlouhé vlny světla červeného.

Prostor, ze kterého do oka přicházejí paprsky, se nazývá zorné pole. Číselně se zorné pole vyjadřuje pomocí zorného úhlu, což je úhel dvou spojnic, které míří z nejzazších míst na obraze pozorovaného ve vodorovné rovině do středu optické soustavy. Zorné pole jednoho oka má tvar elipsy, která je omezena vertikálním úhlem 150° a horizontálním úhlem 210° . Binokulární zorné pole má tvar kruhu o průměru přibližně 130° , ale ostrý obraz získáváme v užší elipsovité oblasti, na kterou zaostřujeme. Mozek spojí obrazy z obou sítnic a vytvoří sjednocené zobrazení. Vzniklé binokulární vidění nám umožňuje vnímat hloubku prostoru. Oko je schopné neustále přeastřovat z místa na místo. Jelikož je rychlost svalů v oku dostatečně rychlá, neustálé přeastřování běžně nevnímáme. Vzniká tak pocit, že vidíme stále ostře.

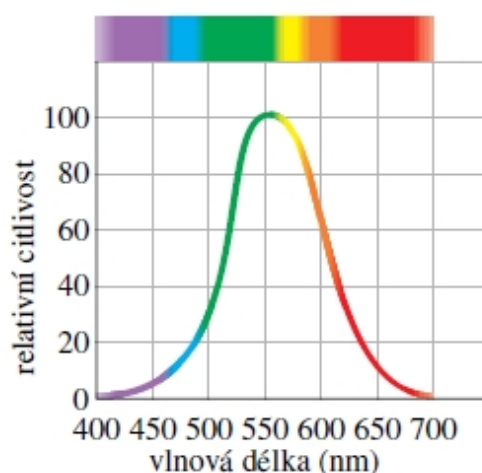
Akomodace je proces, kdy se zvětšuje zakřivení čočky (mění se ohnisková vzdálenost) a dochází k zaostřování bližších předmětů. U člověka je akomodace oka způsobena větší zakřivením přední plochy čočky a současnou změnou její tloušťky. Je zapříčiněna kontrakcí m. ciliaris. Akomodaci umožňuje elasticita obalu a poddajnost jádra čočky. Závěsný aparát (ligamenta lensis) udržuje napětí v klidu a plochý tvar čočky. Kontrakcí m. ciliaris se okraje řasnatého tělíska koncentricky přiblíží, uvolní se tah závěsného aparátu a čočka se vlastní pružností vyklene do konvexnějšího tvaru (3.1). Její optická mohutnost a lomivost paprsků se zvýší. Funkce řasnatého tělíska i čočky ovšem s opotřebením a stářím organismu rovněž ochabuje a dochází tak ke snížení tzv. akomodačního rozsahu oka. Akomodačním rozsahem oka se rozumí optická vzdálenost mezi blízkým

a vzdáleným bodem. U dospělého člověka je blízký bod ve vzdálenosti 25 cm, což odpovídá akomodační šíři 4 D. [5], [8], [4]

5.3 Světločivný aparát oka

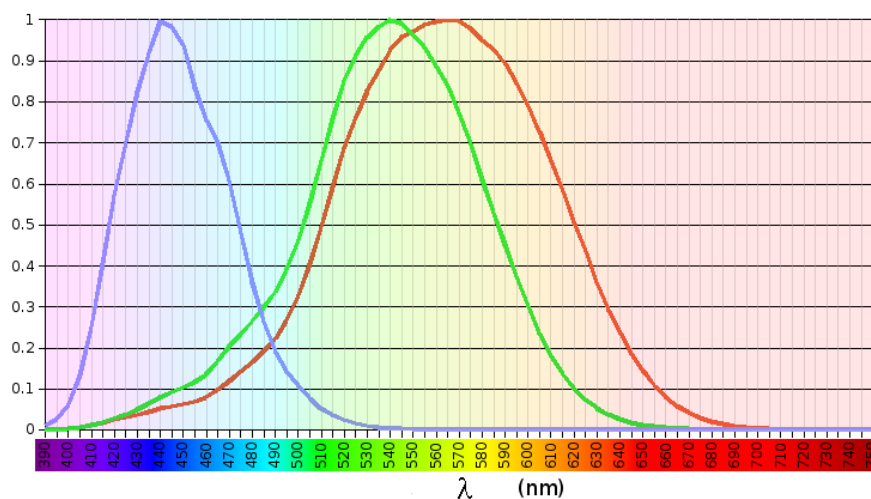
Lidské oko vnímá část spektra elektromagnetického záření o vlnové délce od 380 nm do 760 nm. Nejvýznamnějším zdrojem je Slunce, které vyzařuje v celém elektromagnetickém spektru. Maximum vyzařování má ve viditelné části spektra, nejvíce v oblasti žlutozelené. Na tuto oblast je nejcitlivější i lidské oko.

Světločivné buňky (tyčinky a čípky) absorbují foton a tím stimulují nervová vlákna. Světločivnou buňku dělíme na vnější fotosenzitivní část, jádro a synapsi. Z vnější části vede výběžek, ve kterém se nachází pigment rhodopsin u tyčinek a iodopsin u čípků.



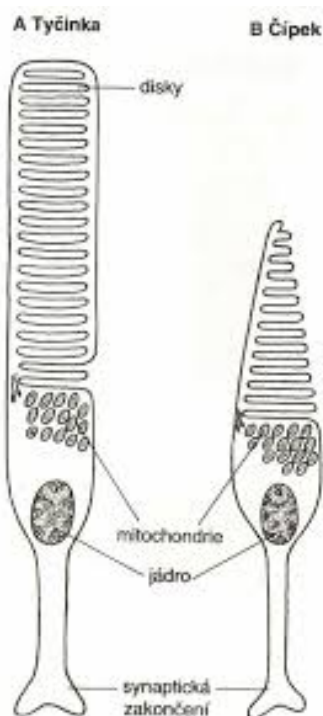
Obrázek 5.5: Relativní citlivost oka k elektromagnetickým vlnám různých vlnových délek.[4]

Tyčinky a čípky se nachází na sítnici za nervovými buňkami. Na sítnici se nachází přibližně 120 milionů protáhlých tyčinek o průměru 2 μm , které se vyskytují převážně v periferní části sítnice. Tyčinek je dvacetkrát více než čípků. Vnější část tyčinky obsahuje oční purpur rhodopsin, díky kterému dochází k elektrickému impulsu. Rozpadem rhodopsinu na části vzniká receptorový potenciál a následně akční potenciál v očním nervu. Tyčinky mají vysokou citlivost a nízkou prostorovou ostrost. Vrchol spektra citlivosti tyčinek je kolem vlnové délky 500 nm. Reagují na nižší intenzitu osvětlení než čípky, ale nejsou schopny rozeznávat barvy. Při ubývání světla nastává posun ve vnímání barev. Červené předměty se zdají tmavší a odstíny modré se naopak jeví jasnější. Tato adaptace na šero se nazývá Purkyňův jev, který spočívá ve ztrátě



Obrázek 5.6: Spektrální citlivost čípků.[4]

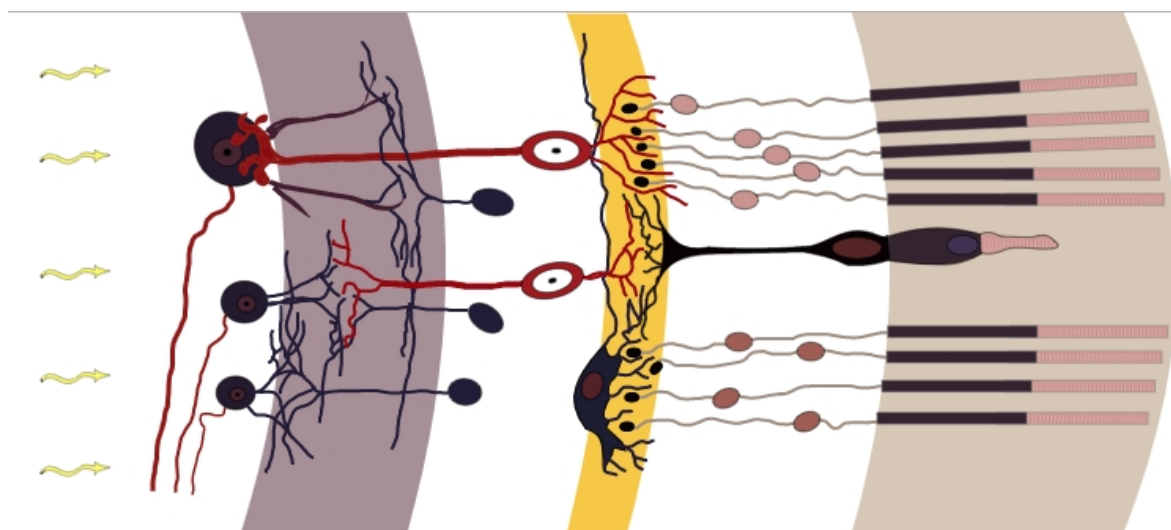
citlivosti sítnice k barvám při posouvání se směrem k periferní části jak sítnice, tak i barevného spektra. Vidění založené pouze na tyčinkách by bylo pouze v odstínech šedé.



Obrázek 5.7: Tyčinka a čípek [38]

Čípků je v lidském oku okolo 6,5 milionů, jejich průměr je 1,5 μm a nejpočetněji se vyskytují v oblasti žluté skvrny. Směrem k okrajům sítnice jejich hustota klesá. Jsou citlivé na různé vlnové délky světla různé intenzity. Zajišťují vysokou prostorovou ostrost. Rozlišujeme tři funkční typy čípků s vrcholy spektra 445 nm (modrá), 535 nm

(zelená) a 570 nm (červená). Označujeme je jako S, M, a L čípky (z angličtiny short, medium, long). Pouze kombinací těchto základních barev tak můžeme vnímat všechny ostatní z viditelného spektra - lidské vidění je tzv. trichromatické. Jednotlivé typy čípků se neliší tvarem buňky, ale typem pigmentu opsinu světločivných proteinů, přičemž každý má jiné absorpční maximum. Čípky potřebují ke své práci poměrně hodně velké osvětlení, ale na druhou stranu zajišťují vnímání obrysů a barev. Barva objektu záleží na jeho fyzikálních vlastnostech a na vnímání pozorovatele. Z hlediska fyzikálního můžeme říci, že povrch má barvu světla, které odráží nebo vyzařuje. Člověk je schopen vidět až 168 milionů barev. Navíc je schopen vnímat barevné body jen do určité velikosti. Pokud se jejich rozměr zmenší pod určitou mez, barevné body splývají a tvoří barevné plochy. Při aditivním (nebo také součtovém) míchání barev se sčítají jednotlivé světelné toky a výsledné spektrum záření je poté vnímáno zrakem jako celek. Pokud vystavíme oči celému viditelnému spektru rovnoměrně, vidíme bílou barvu.



Obrázek 5.8: Schéma sítnice oka s nervovými buňkami, s čípkem a s tyčinkami [18]

V jednom oku je asi 1 milion nervových vláken, takže některé čípky, stejně jako tyčinky, jsou spojeny v jedno nervové vlákno. Absorpce světla čípkami a tyčinkami je kvantově mechanický jev, při kterém je foton absorbován pigmentem rhodopsinem. Energie jednoho fotonu je dána vztahem 5.1. Přeměňuje se na energii pohybu atomů a vyvolává uvolnění neurotransmiteru do synaptického prostoru mezi světločivnou buňkou a bipolárním neuronem. Pokud buňka není stimulována elektromagnetickým zářením, udržuje se v ní membránový potenciál pomocí iontových kanálů. Molekuly absorbují fotony vždy pouze v daném rozmezí hodnot energie. Absorpce vyvolává bio-

chemickou reakci, která vede ke vzniku nervových impulzů. Rhodopsin se skládá z chromoforu (nebílkovinná složka zvaná retinal) kovalentně vázanému k proteinu opsinu. Retinal je schopen cis-tras izomerie, což vede k biochemickým procesům a vzniku akčního potenciálu v očním nervu. U čípků se nachází pigment iodopsin, který má opsinovou část rozlišnou pro různé vlnové délky.

Při přechodu ze světla do tmy rozeznáváme předměty až se oko adaptuje na tmu. Předměty, jejichž obraz vzniká v periferních oblastech sítnice, jsou rozlišovány dříve. Adaptace na přechod ze tmy na světlo je kratší než ze světla do tmy. Po náhlém osvětlení se zornice rychle přizpůsobuje. Snížená schopnost adaptace se nazývá šeroslepost. [18], [8], [5]

5.4 Fotometrické veličiny

Fyzikální veličiny kvantitativně popisující vizuální vjem viditelného záření se označují jako fotometrické veličiny. Mezi fotometrické veličiny patří světelný tok ϕ , svítivost I , osvětlení E . Světelný tok vyjadřuje intenzitu zřakového vjemu normálního oka, vyvolaného energií světelného záření, které projde za jednotku času určitou plochou v prostoru, kterým se světlo šíří. Jednotkou je lumen, značí se lm. Světelný tok ϕ udávaný v lumenech odpovídá zářivému toku udávanému ve wattech s tím, že je uvažována citlivost lidského oka na jednotlivá světla barevného spektra. Svítivost I udává prostorovou hustotu světelného toku ϕ zdroje v různých směrech. Svítivost určujeme pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj, který má zanedbatelné rozměry v porovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu. Svítivost I bodového zdroje v daném směru definujeme jako podíl světelného toku $\Delta\phi$ vyzářeného v tomto směru do malého prostorového úhlu $\Delta\alpha$ a velikosti tohoto prostorového úhlu:

$$I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\alpha}. \quad (5.7)$$

Jednotkou svítivosti je kandela, značí se cd. Osvětlení E závisí na části světelného toku $\Delta\phi$, který dopadá kolmo na plochu o obsahu S . Je definováno vztahem:

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta S}. \quad (5.8)$$

Jednotkou je lux, značí se lx. Pro kolmé osvětlení dané plochy ve vzdálenosti r od zdroje platí:

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (5.9)$$

Abychom mohli zavést fotometrické veličiny, musíme definovat průměrného pozorovatele a jeho vidění. Citlivost lidského oka je za denního světla jiná než v noci. Na základě toho jsou zavedeny dvě citlivosti: fotopická pro denní světlo a skotopická pro noční vidění. Pro všechny fotometrické veličiny a jejich jednotky, které popisují světlo, se používá pouze fotopická citlivost oka. Oko má schopnost přizpůsobit se na různé hladiny osvětlení. Zdravé lidské oko je schopno registrovat předmět, jehož osvětlení je minimálně 2 nlx. Při nízkém osvětlení reagují pouze tyčinky, s narůstajícím osvětlením reagují i čípky. Ve dne, kdy je na obloze jasno, jsou předměty osvětleny přibližně hodnotou 0,1 Mlx. Pro čtení je doporučeno osvětlení 100 lx. [3]

5.5 Vyšetření refrakčních vad

Jestliže se světelné paprsky neprotínají na sítnici, mluvíme o refrakční vadě. Mezi nejnámější refrakční vady patří krátkozrakost (myopie), dalekozrakost (hypermetropie), astigmatismus a vetchozrakost (presbyopie). Čočkami a brýlemi zajišťujeme korekci těchto vad. Astigmatismus je cylindrická vada, která způsobuje nepřesné zaostření světla na sítnici. Příčinou této nepřesnosti je nepravidelný tvar rohovky - není kulový, ale v minimálně jedné ose je zakřivený. Paprsky se vlivem této nepřesnosti nespojují v jednom ohnisku. Vetchozrakost je snížená schopnost pozorovat ostře předměty v malé vzdálenosti. Příčinou je zhoršení pružnosti čočky s přibývajícím věkem.

K celkovému zjištění refrakčního stavu oka se používá autorefraktometr, který rychle a objektivně změří refrakci zkoumaného oka. Testovaná osoba opře hlavu o opěrku a pozoruje danou značku, která navozuje představu nekonečna. Během měření je důležité zaměřit se na tento bod, aby nedošlo k akomodaci oka na blízké předměty a tím znehodnocení tohoto měření. Autorefraktometr měří také nitrooční tlak a zakřivení rohovky (zjištění astigmatismu). Toto vyšetření slouží jako první krok k dalšímu stanovení refrakce a nazývá se objektivní vyšetření. Po objektivním vyšetření by mělo probíhat subjektivní vyšetření, kde se ověřují získané hodnoty měřené autorefraktometrem. Testovaný má za úkol přečíst z určité vzdálenosti optotyp. Poté optometrista nasadí testovací obrubu a upraví ji do správné polohy. Před jedno oko se dá clona a před druhé se vkládá korekce. Zjišťuje se sférická složka korekce, přítomnost astigmatismu, osa cylindru a optická mohutnost cylindru. Následně se provede výměna a clona se dá před druhé oko. Nakonec se vyšetřuje i binokulární vidění (bez clony). Měření je založené na vzájemné komunikaci mezi optometristou nebo lékařem a testovaným jed-

incem, kdy se optometrista (lékař) po každém přiložení korekce ptá, zda je obraz horší nebo stejný. Podle odpovědi optometrista volí zesílení nebo zeslabení vkládané čočky a hledá vhodnou korekci. Po určení sférické korekce se stanovuje optická mohutnost a osa cylindru. Cylindr určuje míru astigmatismu a koriguje ho tak, že srovnává špatný lom světla, který je způsobený nerovností na rohovce. Osa určuje orientaci cylindru a zaručuje žádoucí lomivost paprsků ve správném sklonu, aby se eliminovala nerovnost astigmatismu. Cylindr se většinou pohybuje v intervalu od -0,75 až 0,5. [40], [41], [47]

Příklad výsledků z vyšetření refrakčních vad v optometristické laboratoři na Katedře optiky

Subjektivní měření autorefraktometrem:

Pravé oko: sph - 0,25 s cylindrem -0,5 v ose 104°

Levné oko: sph -0,25 s cylindrem -0,5 v ose 71°

Nitrooční tlak: v pravém oku 15 Torr, v levém oku 13,7 Torr.

Objektivní měření:

Pravé oko: sph -0,25 s cylindrem -0,25 v ose 104°

Levé oko: sph -0,25

Sférická korekce -0,25 je pro levé i pravé oko stejná u obou metod měření. Tento výsledek vypovídá o slabé krátkozrakosti, ale jelikož nedosahuje ani 0,5 dioptrie, neprovádí se korekce. Hodnoty cylindru se liší u jednotlivých měření, ale jsou také nízké a korekce zde není nutná.

Kapitola 6

Fyzikální aspekty sluchu

6.1 Mechanické vlnění

Mechanickým vlněním dochází k přenosu energie kmitavého pohybu látkovým prostředím. Kmitání jedné částice se přenáší na druhou částici přes jejich vzájemnou vazbu. Mechanické vlnění se šíří v plynech, v pevných látkách i v kapalinách. Částice kmitají buď kolmo na směr, kterým se vlnění šíří (postupné vlnění příčné) nebo kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje (postupné vlnění podélné). Akustické vlnění je jedním z typů postupného vlnění podélného. Postupné podélné vlnění můžeme popsat jako zhušťování a zředňování kmitajících částic, kdy jednotlivá místa zhuštění nebo zředění jsou od sebe vzdálená o hodnotu vlnové délky λ . Mezi další veličiny popisující mechanické vlnění patří frekvence f , rychlost šíření v a perioda T . Pro tyto veličiny platí vztah:

$$\lambda = \frac{v}{f} = vT. \quad (6.1)$$

Vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází. Postupné mechanické vlnění popisuje rovnice postupné vlny, která má tvar:

$$y = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (6.2)$$

kde y je okamžitá výchylka daného bodu, y_m je amplituda výchylky a x je vzdálenost tohoto bodu od zdroje v čase t . Z uvedeného vztahu je zřejmé, že veličiny, které popisují vlnění jsou funkcemi času i vzdálenosti. [14]

6.2 Zvuk

Jako zvuk označujeme mechanické vlnění, které vnímáme sluchem. Fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku se sluchem, se zabývá akustika. Frekvence zvuku leží přibližně v intervalu 16 Hz až 16 000 Hz [14], respektive 20 Hz až 20 000 Hz ([5]). Oblast slyšitelnosti se nazývá sluchové pole.

Zdravé lidské ucho je schopno rozlišit 1500 jednotlivých frekvencí a 400 000 různých zvuků. Nejcitlivější pro lidské ucho je oblast frekvencí přibližně od 1 do 5 kHz. Frekvence zvuku mluveného slova je v rozsahu od 1 do 3 kHz. Akustické vlnění o nižší frekvenci se nazývá infrazvuk. Přejídné pásmo mezi zvukem a infrazvukem leží mezi 16 až 20 Hz. Lidské ucho toto zvukové vlnění nevnímá, ale infrazvuk může způsobit dezorientaci či kolaps. Akustickému vlnění nad hranicí slyšitelnosti (přibližně 20 000 Hz) říkáme ultrazvuk. Ultrazvuk produkují a zároveň vnímají některá zvířata, například netopýři a delfíni.

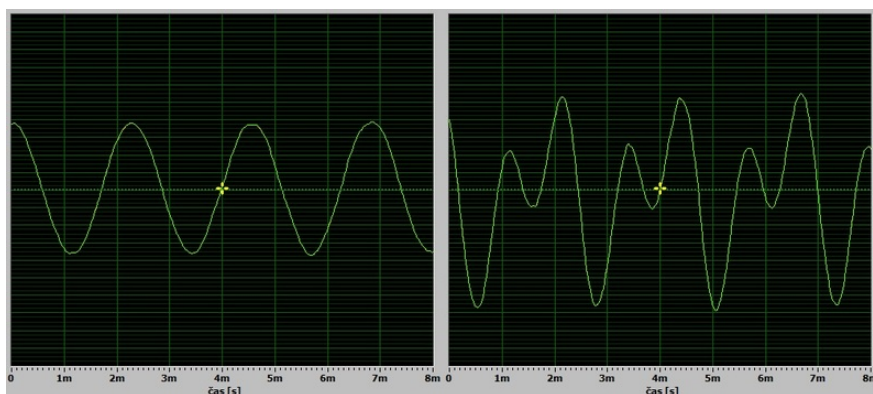
Zvuk se ve vzduchu šíří jako podélné postupné vlnění a jeho přenos je možný pouze v pružném látkovém prostředí. Se snižujícím se tlakem vzduchu slábne i zvuk a ve vzduchoprázdnu již zvukové vlnění nevzniká. Zvukové vlnění se šíří nejen ve vzduchu, ale například i ve vodě, betonu, oceli, skle, aj. Rychlost zvuku ve vzduchu v závisí na složení vzduchu a jeho teplotě. Pro závislost rychlosti zvuku na teplotě platí vztah:

$$v = (331 + 0,6t), \quad (6.3)$$

kde teplota t je uvažována ve stupních Celsia. Z uvedeného vztahu vyplývá, že rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě 0°C je 331 m s^{-1} . V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu. Například rychlost zvuku v lebečních kostech je přibližně 4800 m s^{-1} a ve vodě při 20°C je 1480 m s^{-1} . [5], [44], [14]

Zvuky se dělí na tóny a hluky. Grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase u tónu je periodická funkce. U hluku tato závislost naopak není periodická. Hluk může u člověka vyvolat poruchy v oblasti sluchu, v nervové soustavě nebo v celkové regulaci člověka. Faktory ovlivňující účinek zvuku na organismus jsou intenzita zvuku, frekvence, rozložení zvuku v čase a psychický vztah člověka k hluku. Zvuky, v nichž převládají určité frekvence, jsou škodlivější než zvuky, jejichž frekvence mají širší rozmezí.

Tón je zvuk s periodickým průběhem kmitů. Je dostatečně hlasitý, má konstantní frekvenci a trvá dostatečně dlouho, aby ho sluchové ústrojí rozlišilo. Je charakterizován výškou, hlasitostí a u složených tónů i barvou. Barva umožňuje odlišit tón od ostatních tónů stejné základní frekvence a hlasitosti. Tóny dělíme na jednoduché a složené. Jednoduché jsou harmonické, tudíž jejich grafem je sinusová funkce. Výška tónu je dána jeho frekvencí, u jednoduchého tónu mluvíme o absolutní výšce tónu. Složené tóny jsou periodické, ale časová závislost jejich intenzity neodpovídá sinusové funkci. Jsou složeny ze základního tónu o základní frekvenci, která určuje absolutní výšku složeného tónu a z vyšších harmonických tónů, jejichž frekvence jsou násobky základní frekvence. Lidské ucho vnímá složený tón jako celek a nerozlišuje jednotlivé jednoduché tóny. Barva je určena vyššími harmonickými frekvencemi a jejich amplitudami a dává tónu charakteristický zvuk, který usnadňuje uchu rozlišit dva složené tóny. Základní tón o nejnižší frekvenci má nejvyšší amplitudu a určuje výšku celého složeného tónu. Hudební tóny jsou složené tóny vzniklé superpozicí několika harmonických kmitání o různé frekvenci a amplitudě.



Obrázek 6.1: Grafické znázornění jednoduchého a složeného tónu [39]

Výška tónu je určena frekvencí vibrací zvukového zdroje a platí, že čím je vibrace rychlejší, tím je výška tónu vyšší. Tóny o malé vlnové délce mají vysokou frekvenci a vnímáme je jako vysoké tóny. Naopak hluboké tóny vnímáme u vlnění velkých vlnových délek s nízkou frekvencí. Vysoké tóny se nám zdají hlasitější než tóny nižší o stejné intenzitě.

Zvukové vlnění se šíří jako periodické stlačování a rozpínání vzduchu (nebo jiného pružného prostředí) a dochází tím ke změnám tlaku. Čím větší jsou tyto změny tlaku, tím ucho detekuje zvuk o vyšší hlasitosti. Hlasitost (síla zvuku) je subjektivní veličina závislá na citlivosti sluchu. Hlasitost je určena amplitudou zvukové vlny. Oblast slyšitel-

nosti u člověka s přibývajícím věkem výrazně klesá. U starých lidí se práh slyšitelnosti vlivem přirozených fyziologických změn rapidně zhoršuje a dochází k tzv. stařecké nedoslýchavosti. Pro popis hlasitosti zvuku používáme veličinu intenzita zvuku I . Platí vztah:

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (6.4)$$

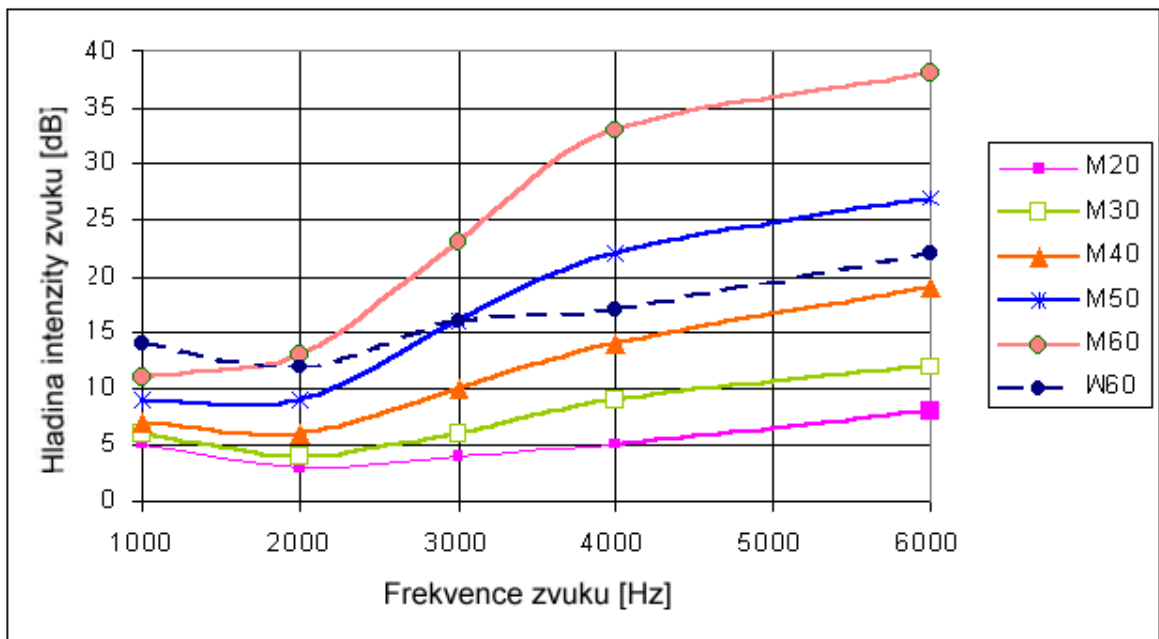
kde ΔP je akustický výkon zvukového vlnění a ΔS je plocha, kterou vlnění prochází. Pro akustický výkon zvukového vlnění platí:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (6.5)$$

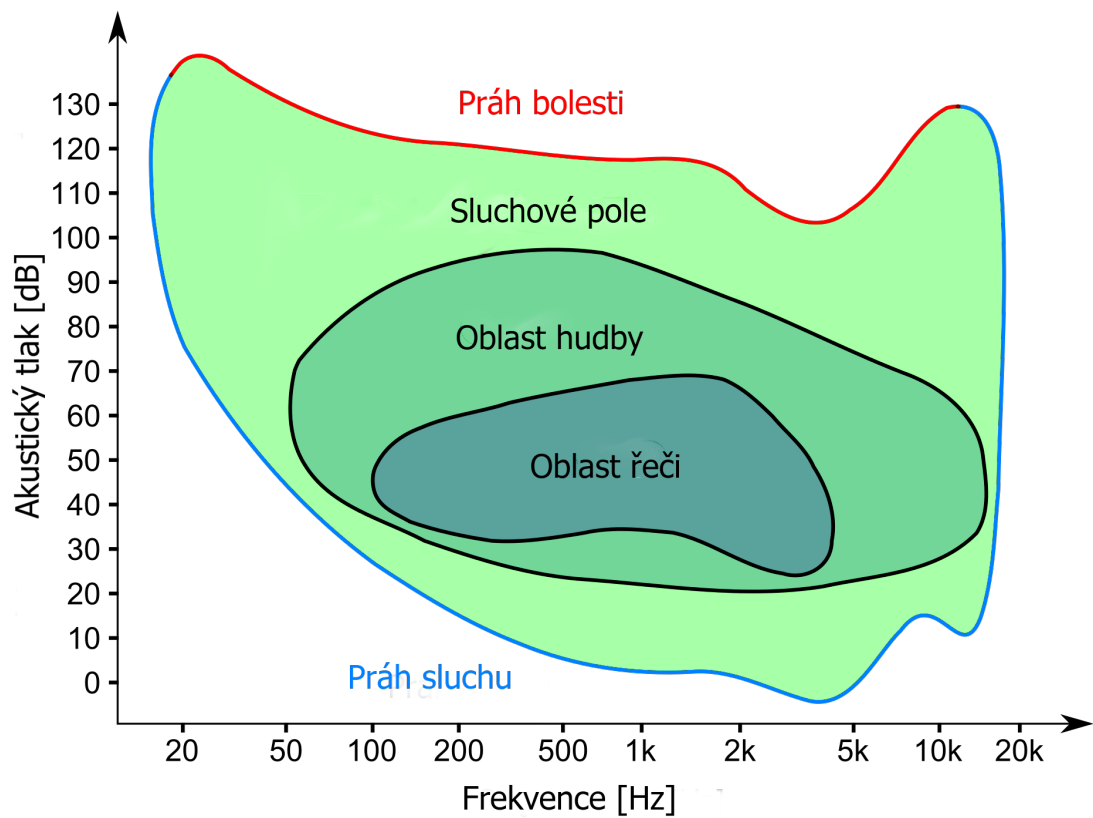
kde ΔE je energie zvukového vlnění, která se přenese od zdroje zvuku do daného místa za dobu Δt . Intenzitu zvuku měříme v jednotkách W m^{-2} . Intenzita zvuku se s rostoucí vzdáleností od zdroje zvuku zmenšuje s druhou mocninou. Rozsah intenzity zvuku, které lidské ucho vnímá je od $10^{-12} \text{ W m}^{-2}$, tzv. práh slyšení, do 1 W m^{-2} , tzv. práh bolesti. Jelikož je rozdíl tohoto rozmezí velký, pro praktické použití byla zavedena veličina zvaná hladina intenzity zvuku L využívající logaritmické stupnice. Pro hladinu intenzity zvuku platí:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (6.6)$$

kde $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ je intenzita zvuku na prahu slyšení. Je to nejnižší detekovatelná intenzita čistého tónu o frekvenci 1 kHz. Jednotka hladiny intenzity zvuku je decibel, značí se dB. Hladiny intenzity zvuku registrované lidským uchem je v rozmezí 0 dB až 130 dB. Hladina intenzity zvuku řeči ve vzdálenosti 1 m je přibližně 40 až 60 dB. Práh sluchu je závislý na stavu sluchového ústrojí, na frekvenci zvuku a na věku. Smluvní vztahná hodnota u dospělého člověka 0 dB platí pro frekvenci 1000 Hz. Při déle trvajícím zatížení sluchového ústrojí zvukem o větších intenzitách může být toto ústrojí poškozeno. [5], [44], [14], [45]



Obrázek 6.2: Práh slyšitelnosti pro různé frekvence a různé věkové kategorie [43]



Obrázek 6.3: Sluchové pole [43]

Naše vnímání hlasitosti má několik zajímavých aspektů. Například nejmenší znatelný rozdíl dvou zvuků je různý při různých frekvencích a různých hlasitostech zvuku. Naše sluchová citlivost je mírně odlišná u každého ucha. Pokud je dobře slyšitelný zvuk přehráván hlasitějším zvukem, tyto dva zvuky od sebe rozeznáme pouze, pokud jsou jejich frekvence značně rozdílné. Pokud se frekvence hlasitějšího zvuku blíží k frekvenci druhého zvuku, slabší zvuk není slyšet. [5]

Šířením vlny vznikají místa s nařazením a nahuštěním částic a s tím související kolísání tlaku. Akustický tlak závisí na hustotě prostředí, rychlosti zvukové vlny a frekvenci zvuku. Akustická impedance Z je poměr akustické rychlosti v a akustického tlaku p :

$$Z = \frac{p}{v}. \quad (6.7)$$

Jednotka akustické impedance je $\text{kg m}^{-4} \text{s}^{-1}$. Prahový akustický tlak p_0 je konvenčně stanovená hodnota, jakou je ještě lidské ucho schopné detekovat u čistého tónu o frekvenci 1 kHz. Platí $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Hladinu intenzity zvuku můžeme vyjádřit i pomocí akustického tlaku:

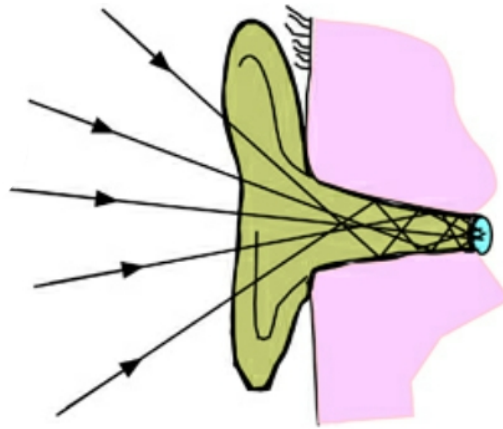
$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}. \quad (6.8)$$

Na rozhraní prostředí dochází k odrazu zvuku. Speciální případ je ozvěna, při které dochází k odrazu od rozlehlé překážky, například budovy. Lidské ucho rozlišuje dva po sobě jdoucí zvuky, mezi kterými uplyne minimálně 0,1 s. Za tuto dobu zvuk urazí 34 m. Delfíni a netopýři využívají odrazu zvuku k prostorové orientaci.

6.3 Ucho

Zvuk je zachycen ušním boltcem a je tak usměrňován do zvukovodu, který funguje jako soustředný reflektor (prostor s odraznými stěnami). Energie zvukové vlny se koncentruje a postupuje k bubínku, který se rozkmitá frekvencí až 200 kmitů za sekundu. Nejužší místo zvukovodu má průměr přibližně 7 mm a celková délka zvukovodu je přibližně 30 mm. Na bubínek o tloušťce 0,1 mm se napojuje kladívko. Ve středním uchu se nachází napínač bubínku a třmínkový sval, které mají ochranou funkci. Pokud do ucha přichází hlasitý zvuk, svaly se smršťují, zvýší se tak napětí bubínku i oválného okénka a přenos tónů je tak obtížnější. Zvuk vysoké intenzity může být utlumen až o 15 %. Činnost těchto svalů je reflexní. [5], [44], [18]

Zvuk je přenášen sluchovými kůstkami ve středním uchu na oválné okénko a tím se zvyšuje účinnost přenosu energie ze vzduchu do kapaliny. Zvýšení síly vibrací je



Obrázek 6.4: Znázornění zvukovodu jako reflektoru[5]

způsobeno mechanismem rovnoramenné páky sluchových kůstek a soustředěním energie z velké plochy bubínku na malou plochu oválného okénka. Akustický tlak na ploše oválného okénka je tak mnohonásobně větší. Třmínek se nepohybuje pouze ve směru jedné osy, ale částečně vykonává i rotaci. Pohyb třmínku a rozkmitání oválného okénka způsobí vibrace endolymfy, rozechvěje se blanitá chodbička a krycí (tektoriální) membrána se posouvá vůči bazilární membráně a ohýbá cilie vláskových buněk. Střední ucho funguje jako akustický transformátor mezi vzduchem a tekutinou labyrintu. Zvuková energie z velké plochy bubínku se přenáší na oválné okénko, jehož plocha je mnohem menší. Přenos funguje na hydraulickém principu, kdy se zvýší zvukový tlak a zvuková energie se přenáší do perilymfy. Na bazilární membráně se nachází místa, která reagují vždy na konkrétní frekvenci. Platí, že čím vyšší frekvence tónu, tím je konkrétní oblast rozkmitání bazilární membrány blíže k oválnému okénku. Podrážděním vláskových buněk se uvolňuje mediátor, vzniká receptorový potenciál a vzruch se šíří do CNS. Mechanické vlnění je tak převedeno na elektrické impulzy. Rozkmitání tekutiny ve vnitřním uchu může být způsobeno přenosem vibrací lebečními kostmi. Jedná se o kostní vedení, které má sluchový práh vyšší než vedení vzdušné. [5], [44], [18], [45]

Převod zvukové energie z plynného prostředí do kapalného je spojen se ztrátou energie. Tato ztráta je vyrovnána zesilovací schopností převodního systému sluchových kůstek ve středním uchu. Převod energie popisuje koeficient přenosu β , pro který platí:

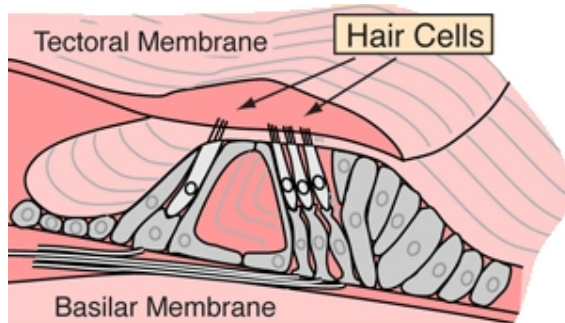
$$\beta = \frac{4r}{(r + 1)^2}, \quad (6.9)$$

kde r je poměr vlnových odporů vzduchu a perilymfy. Pro $r = 4000$ je koeficient přenosu $\beta = 0,1 \%$, což se rovná ztrátě energie přibližně 30 dB. Ztráta energie je

vyrovnávána třemi mechanismy a to převodem zvukové energie z velké plochy bubínku na malou plochu oválného okénka, dále pákovým systémem kůstek ve středním uchu a pákovým převodem zapříčiněným nerovnoměrným zakřivením bubínku. Pákový systém tří kůstek ve středním uchu zvyšuje silový účinek asi 1,3 násobně.

Cortiho orgán je soustava podpůrných a smyslových (vláskových) buněk ve vnitřním uchu. V jednom uchu se nachází přibližně 1 500 až 3 500 vnitřních vláskových buněk, 15 000 až 20 000 vnějších vláskových buněk a přibližně 30 000 nervových vláken, která tvoří svazek sluchových nervů.

Dlouhodobá sluchová zátěž je příčinou opotřebení vláskových buněk. Tato porucha sluchu se nazývá presbyakuze. [5], [44], [18], [45]



(a) Cortiho orgán



(b) Mikroskopický obrázek vláskových buněk

Obrázek 6.5: Cortiho orgán a vláskové buňky

Nervový signál směřující do sluchového centra v mozku prochází přes několik nervových struktur, které slouží k přenosu informací zpátky do ucha. Například, když ucho detekuje příliš hlasitý zvuk, mozek pošle informaci k bubínku. Ten změní svůj tvar tak, aby měl vyšší tuhost a snížil riziko svého poškození. Tato změna nenastává okamžitě. Při nečekaném intenzivním zvuku (například při výstřelu) může dojít k poruše. Příkladem informační nervové struktury je cochlear nucleus complex.

Pokud do ucha přichází čistý tón, vibrace tekutiny v hlemýždi dráždí pouze jednu oblast bazální membrány. Amplituda vibrací a jejich umístění dává CNS informaci o frekvenci a intenzitě zvuku. Při zaznění jiného čistého tónu reaguje jiná část bazální membrány. Pokud mají oba tóny blízkou frekvenci, budou se dvě vibrační oblasti bazální membrány překrývat a mozek detektuje pouze hlasitější tón.

Sluchovou analýzu popisuje více teorií. Například Helmholtzova rezonanční teorie popisuje Cortiho orgán jako řadu rezonátorů, z nichž je každý naladěn na rozdílný tón.

Jeden nebo více rezonátorů naladěných na dané tóny se rozkmitá a podráždí nerv pro příslušné rozmezí frekvence. [49]

Békésyho hydromechanická teorie považuje bazilární membránu za pružnou stěnu, po které se šíří vzruch malou rychlostí a jeho vlnová délka je vždy menší než délka bazilární membrány. Vznikají tak rezonance s maximem určité frekvence na určitém místě.

Frekvenční teorie je založená na tom, že tón je rozpoznán podle frekvence nervových impulsů. Wever a Bray potvrdili soulad frekvence nervových vzruchů s frekvencí zvuku v určitém rozmezí zápisem akčních potenciálů ve sluchovém nervu.

Ani jedna z teorií plně nevysvětluje rozlišovací schopnosti sluchového ústrojí, ale je dokázáno, že rozlišení výšky tónu se odehrává na konkrétních místech bazilární membrány. [46], [5], [44], [18]

Poruchy sluchu mají mnoho příčin. Některé případy snížené schopnosti sluchu jsou trvalé a některé naopak vratné vhodnou léčbou. Ke zmírnění problémů se často používají kochleární implantáty, které částečně nahrazují vláskové buňky. Implantát se skládá z elektrodové části, která je pod kůží a z řečového procesoru, který mění zvuk na elektrický signál. Podmínkou pro zavedení kochleárních implantátů je funkčnost sluchové dráhy od hlemýždě až do CNS. Slyšení s kochleárním implantátem nedosahuje kvality normálního slyšení, ale sluchově postiženým lidem do určité míry pomáhá. [48]

Speciální vadou sluchového ústrojí je Tinnitus, což je tzv. zvonění v uších. Zdroj zvonění je buď ušní nebo mimo ušní, ale ne ve vnějším prostředí. Může způsobovat závratě a úzkosti. Příčin může být mnoho, například špatné prokrvení vnitřního ucha, úraz ucha nebo záněty. [5]

Kapitola 7

Experimenty ve výuce fyziky a biologie

7.1 Měření amplitudy akomodace push-up a push-down metodou

Teoretický úvod: Akomodační amplituda A udává, do jaké míry je oko schopné změnit optickou mohutnost oka.

Principem metody push-up/push-down je nalezení bodu, ve kterém dochází k rozmazání čteného textu. Převrácená hodnota nalezené vzdálenosti je hodnota amplitudy akomodace a platí vztah:

$$A = \frac{1}{a}. \quad (7.1)$$

Akomodační amplitudu měříme v dioptriích. [42]

Pomůcky: papír s tištěným textem, pravítko (pásmo)

Postup:

1. Pokus provádíme při dostatečném osvětlení. Asi 40 cm před očima držíme papír s textem a zavřeme jedno oko.
2. Pomalu přibližujeme papír k obličejí a až text vidíme rozmazaně, chvíli počkáme až oko zaostří.
3. Po zaostření opět přibližujeme a hledáme polohu, kde bude rozmazání trvalé. Vzdálenost papíru od oka a_1 změříme a zapíšeme.

4. Papír přiblížíme téměř k oku a pomalu oddalujeme. Ve chvíli kdy zaznamenáme zaostřený obraz textu, změříme vzdálenost papíru od oka a_2 a zapíšeme.
5. Vypočítáme průměrnou hodnotu a z naměřených vzdáleností a_1 a a_2 .
6. Dosadíme do vztahu pro amplitudu akomodace.

Podstata experimentu: Schopnost oka akomodace závisí na věku. Průměrnou amplitudu akomodace můžeme vypočítat ze vztahu $18,5 - 1/3$ věku. Minimální amplituda akomodace by neměla být menší než hodnota $15 - 1/4$ věku.

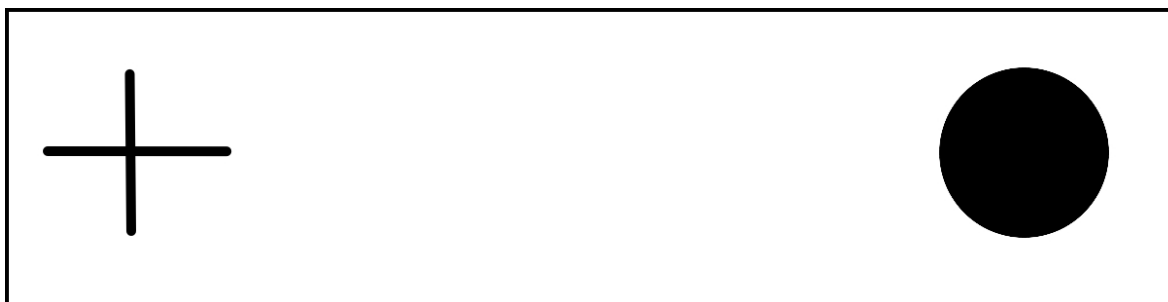
U měření je nutné provádět pohyb pomalu a za dostatečného osvětlení.

7.2 Důkaz slepé skvrny (Mariottův pokus)

Teoretický úvod:

Tyčinky a čípky jsou na sítnici uspořádány nerovnoměrně. Tyčinky jsou nejpočetněji zastoupeny v periferní části sítnice a čípky v centrální části, kterou označujeme jako žlutá skvrna. V místě, kde se výběžky gangliových buněk sbíhají a přechází ve zrakové nervy, se tyčinky a čípky nevyskytují. Toto místo se nazývá slepá skvrna. [17]

Pomůcky: papír a fix nebo vytištěný obrazec (obdélník s černým křížkem na levé straně a s černým kruhem na pravé straně)



Obrázek 7.1: Grafická předloha pro Mariottův pokus

Postup:

1. Zakryjeme si levé oko a pravým se soustředíme na černý křížek ve vzdálenosti 30 cm.
2. Pohybujeme grafickou předlohou pomalu k sobě i od sebe, dokud ze zorného pole nezmizí černé kolečko.

Podstata experimentu: V pozici, ve které nám zmizí obraz kruhu ze zorného pole, dopadají paprsky z oblasti kruhu do místa bez světločivných buněk.

Pokus vyžaduje maximální soustředěnost a zaostření na daný křížek. Ne vždy se provedení důkazu slepé skvrny povede napoprvé, protože zrak má tendenci sledovat i kolečko.

7.3 Pokusy s ladičkou - Weberova a Rinneho zkouška

Teoretický úvod:

Tekutina ve vnitřním uchu se rozkmitá i přímým přenosem vibrací přes lebeční kosti. Kostní vedení má sluchový práh vyšší a uplatňuje se především tam, kde je porušeno vedení vzdušné. Weberova zkouška umožňuje srovnání vedení zvuku v obou uších a Rinneho zkouška dokazuje rozdílnou úroveň kostního a vzdušného vedení zvuku u stejného ucha. [17]

Pomůcky: ladička



Obrázek 7.2: Ladička vhodná k provedení Weberovy a Rinneho zkoušky

Postup pro práci ve dvojicích:

1. Weberovu zkouška: ladičku úderem rozezvučíme a kulatou patkou ji přiložíme do středu temene hlavy vyšetřovanému studentovi.
2. Rinneho zkouška: ladičku rozezvučíme a kulatou patkou ji přiložíme za ucho na výběžek spánkové kosti. Ve chvíli, kdy vyšetřovaný student přestane ladičku slyšet, přiložíme před ucho ke vzdušnému vedení.

Podstata experimentu: Pokud během Weberovy zkoušky vyšetřovaný student slyší zvuk uprostřed hlavy, zvuk není lateralizován. Pokud slyší zvuk ladičky pouze v jednom uchu, zvuk je lateralizován. Pokud vyšetřovaná osoba trpí asymetrickou poruchou sluchu, při převodní vadě zvuk lateralizuje do nemocného ucha (případně více postiženého), v případě percepční vady do ucha zdravého (případně méně postiženého). Pokud zvuk nelateralizuje, vyšetřovaná osoba má sluch v pořádku, ale může mít i stejnou vadu na obou uších.

Během Rinneho zkoušky by měl vyšetřovaný student po přiložení ladičky k ušnímu boltci zvuk ještě slyšet. Pokud by zvuk neslyšel, značí to narušené vzdušné vedení.

7.4 Stanovení simultánního prostorového prahu na různých částech těla

Teoretický úvod:

Simultánní prostorový práh je nejmenší vzdálenost dvou bodů, které po dotyku kůže ještě vyvolávají dva vjemy. Tato hodnota závisí na rozmístění a hustotě dotykových receptorů v kůži. Čím je vzdálenost mezi dvěma body menší, tím je rozložení receptorů hustější. [17]

Pomůcky: kružítko a pravítko

Postup pro práci ve dvojicích:

1. Testovaný student zavře oči nebo se dívá jiným směrem. Přiřkládáme mu současně oba konce kružítko na břicho prstu. Začínáme s větší vzdáleností konců a postupně je po každém dotyku přibližujeme. Testovaný student hlásí, zda cítí dotyk ve dvou bodech nebo v jednom bodu. Změříme pravítkem nejmenší vzdálenost dvou bodů, při které testovaný student cítí ještě dva podněty a zapíšeme hodnotu do tabulky.
2. Opakujeme na dalších částech těla: hřbet, předloktí, šíje, záda, čelo.

Tabulka 7.1: Tabulka pro zápis výsledků

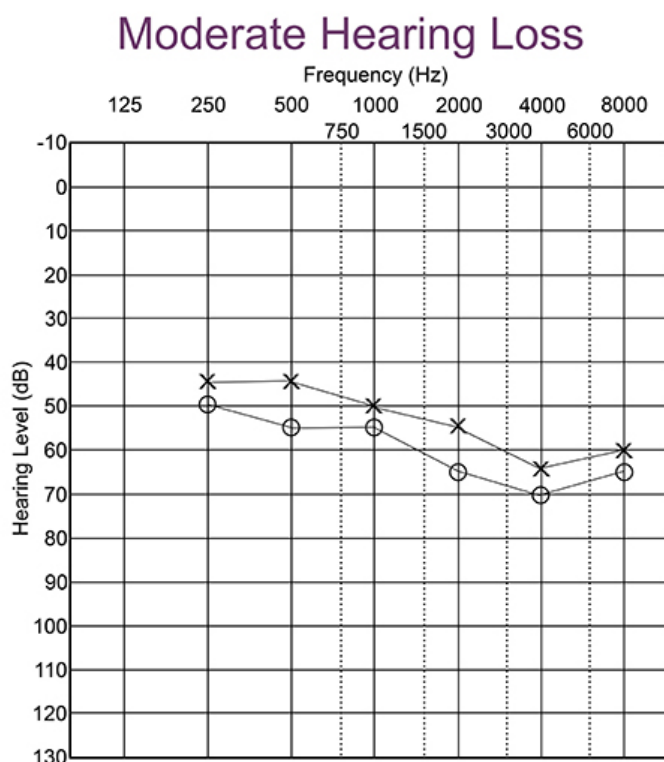
část těla	vzdálenost [mm]
břicho prstu	
hřbet ruky	
předloktí	
šíje	
záda	
čelo	

Podstata experimentu: Receptory nejsou rozmístěny rovnoměrně po celém těle a hodnoty simultánního prahu jsou odlišné na různých částech těla. Z tabulky vyhodnotíme nejmenší a největší hodnotu simultánního prahu.

7.5 Audiometrické měření s využitím chytrého telefonu

Teoretický úvod:

Audiometrické měření je vyšetřovací metoda sluchu, kdy se pomocí tónového generátoru testuje citlivost sluchu na jednotlivé tóny. Během měření se postupně zesiluje intenzita čistého tónu, dokud vyšetřovaný student tón slyší. Měření se opakuje pro další tóny. Sluch se měří v rozmezí 250 až 10 000 Hz a od -10 do 100 dB. Výsledek se zapisuje do audiogramu, kde je na vertikální ose hladina intenzity zvuku a na horizontální ose frekvence zvuku. Audiometrické měření by mělo probíhat za velmi tichých podmínek.



Obrázek 7.3: Ukázka audiogramu [37]

Základní audiometrické vyšetření lze provést v chytrém telefonu s použitím vhodné aplikace. Příkladem je aplikace Hearing test, kde si můžeme vyšetřit každé ucho zvlášť.

Pomůcky: chytrý telefon, sluchátka

Postup:

1. Po spuštění aplikace Hearing test je nutné provést kalibraci, pokud využíváme sluchátka od jiného výrobce, než je výrobce chytrého telefonu. Podle pokynů na obrazovce stiskneme a držíme tlačítko vždy, když slyšíme daný zvuk.

2. Před spuštěním testu si v nastavení Settings zvolíme frekvence 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000 a 10 000 Hz.
3. Spustíme experiment. Pokud slyšíme daný zvuk, zvolíme možnost "I can hear". Pokud daný zvuk neslyšíme, zvolíme možnost "I cannot hear".
4. Opakujeme pro jednotlivé frekvence (posun šipkami).
5. Měření provedeme i pro druhé ucho.
6. Vyhodnotíme jednotlivé audiogramy.

Podstata experimentu: Aplikace Hearing test nabízí naměřené audiogramy ve více provedeních. Základní audiogram Degrees of hearing loss vykresluje audiometrickou křivku a obsahuje barevně rozdělené části grafu podle rozsahu poškození sluchu. Na první pohled je viditelné, v jakém rozmezí se nachází naměřená křivka. Další typ grafu je Age norms, kde je srovnání úrovně rozdílných věkových kategorií od 20 do 90 let. Poslední možností je Speech banana. V tomto grafu vidíme příklady frekvencí pro dané hladiny intenzity různých druhů zvuků, například zvuk motorky, ledničky nebo sekačky.

Audiometrické měření pomocí chytrého telefonu nenahrazuje lékařské vyšetření, ale je vhodné k určení, zda je sluch v pořádku a také slouží ke srovnání s ostatními studenty.

Podobná měření lze provést i využitím online webových aplikací, jedna z nich je <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>.

7.6 Testování sluchu pomocí OnlineToneGenerator ve skupině

Teoretický úvod:

Online aplikaci <http://onlinetonegenerator.com/> můžeme využít k otestování více osob najednou. V aplikaci je nastavitelná frekvence zvuku v rozsahu 1 až 20 000 Hz a hlasitost, jejíž stupnice není číselně označena. Není tedy možné vytvořit audiogram.

Pomůcky: počítač s přístupem k internetu, reproduktory

Postup pro práci ve skupině:

1. Spustíme web <http://onlinetonegenerator.com/> a zapneme reproduktory. Hlasitost nastavíme přibližně na 50 %.
2. Frekvenci zvuku nastavíme na 12 000 Hz a klikneme na Play. Po pár vteřinách zvuk vypneme tlačítkem Stop.
3. Spuštění zvuku opakujeme pro frekvence 14 000, 15 000, 15 500, 16 000, 16 500, 17 000, 17 500, 18 000 Hz.
4. Každý ze skupiny si zaznamená nejvyšší frekvenci zvuku, kterou ještě slyšel. Porovnáme výsledky skupiny.

Podstata experimentu: Vnímání zvuku je u člověka omezeno slyšitelnými frekvencemi přibližně 16 až 20 000 Hz. S rostoucím věkem dochází k absenci nebo poškození drobných vláskových buněk v hlemýždi, které pak již neposílají signály do mozku, což má za následek posun prahu sluchu. V případě testování osob různých věkových kategorií, pozorujeme značné rozdíly v maximální slyšitelné frekvenci zvuku. Pokud tónový generátor využijeme ve třídě stejně starých žáků, rozsah frekvence nebude tak významný.

Na webu OnlineToneGenerator můžeme zvolit i Hearing test, kdy se během 60 sekund zvyšuje frekvence z 300 Hz do 20 000 Hz. U experimentu je nutné sledovat obrazovku s aktuální hodnotou frekvence zvuku. Na tento experiment je vhodné snížit hlasitost reproduktorů.

7.7 Test periferního vidění

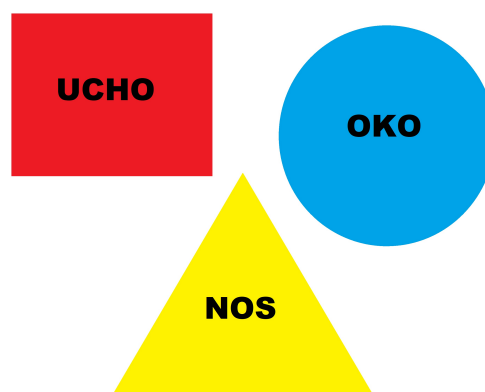
Teoretický úvod:

Předměty v centrální části našeho zorného pole se zobrazují ve středu sítnice, kde je převaha čípků, které jsou citlivé na barvy a potřebují dostatek světla. V periferní části sítnice převažují tyčinky, které jsou citlivé na pohyb a změny osvětlení. [36]

Pomůcky: tvrdý papír ve tvaru kruhové výseče s vyznačenými úhly, 3 kartičky různých tvarů a barev s krátkým nápisem (např. oko, ucho, nos)



(a) Kruhová výseč se stupnicí



(b) Objekty různých tvarů a barev s krátkým nápisem

Obrázek 7.4: Pomůcky k testu periferního vidění

Postup pro práci ve dvojicích:

1. Půlkruh držíme v horizontální rovině, tak aby střed byl u nosu. Do pozice 0° zapíchneme špendlík, na který zaostříme svůj zrak.
2. Druhý z dvojice vezme jednu z kartiček, tak aby testovaný neviděl kterou. Kartičku umístí doprava na 90° . Posouvá s ní podél kruhu směrem ke špendlíku.
3. Ve chvíli, kdy testovaný zaznamená pohyb, nebo rozezná barvu, tvar a text, zahlásí slovy: POHYB, BARVA, TVAR, TEXT a druhý z dvojice zapíše příslušný úhel do tabulky.
4. Opakujeme pro levé oko.

Podstata experimentu: Vnější část zorného pole tvoří informativní vidění, které neumožňuje rozeznat jednotlivé předměty, ale je důležité pro orientaci. Rychle odhalí

předmět vstupující do našeho zorného pole, ale slabě rozlišuje barvy, tvary a detaily. Pravděpodobně bude barva rozpoznána dříve než tvar. K přečtení textu je potřeba využít centrální vidění.

Tabulka 7.2: Periferní vidění: zápis úhlů

	levé oko [°]	pravé oko [°]
pohyb		
barva		
tvar		
text		

7.8 Prostorové vidění a prostorové slyšení

Teoretický úvod:

Jedno zdravé ucho by stačilo k tomu, abychom dobře slyšeli, ale ne k určení zdroje zvuku. Zvuk z jednoho zdroje přichází do každého ucha v jiný okamžik - ke vzdálenějšímu uchu od zdroje dopadne zvuk se zpožděním. Podle časového rozdílu dopadu zvuku mozek určí polohu a vzdálenost zdroje zvuku. Prostorová orientace sluchem je naučená. [34]

Pro prostorové vidění a odhad vzdáleností je nutné vidění oběma očima. Zorná pole obou očí se centrálními částmi překrývají. Prostorové vidění je výsledkem pohledu oběma očima a vymezuje se hlavně v binokulárním zorném poli. [33]

Pomůcky: špunty do uší, dvě tužky, bílý papír s kruhem



Obrázek 7.5: Grafická předloha pro pokus č. 3

Postup:

1. Práce ve skupinách (4-5 osob): Jeden ze skupiny si stoupne doprostřed a zavře oči. Ostatní členové jednotlivě zatleskají a testovaný student ukazuje směr zdroje zvuku. Pokus opakujeme se špuntem v jednom uchu a zakrytým rukou.
2. Držíme dvě tužky obrácené hroty k sobě ve vzdálenosti asi 50 cm. Pomalu k sobě tužky přibližujeme tak, aby se navzájem dotkly. Pokus opakujeme s jedním okem zavřeným.

3. Umístíme papír s malým kruhem ve vzdálenost asi 50 cm od očí. Zdvihneme jeden prst mezi kruh a oči. Zaostríme na kružnici a poté zaostríme na prst své ruky.

Podstata experimentu: Při určování zdroje zvuku jedním uchem mozek nemůže využít časového rozdílu v příjmu zvukových vln. Stanovení směru zdroje je v takovém případě často mylné. Pokus lze provést i s celou třídou, kdy žáci mají zavřené oči a učitel chodí po místnosti a občas zatleská.

Pro správný odhad vzdálenosti dvou tužek je nutné vidění oběma očima. Při pokusu jedním okem se téměř vždy netrefíme.

Pokud při zaostrování na kruh vidíme v popředí iluzi dvou prstů a při zaostrování na prst vidíme iluzi dvou kružnic, binokulární vidění funguje správně.

7.9 Důkaz spojení chuťových a čichových vjemů

Pomůcky: kousky ovoce a zeleniny, vidlička, šátek

Postup pro práci ve dvojicích:

1. Zavážeme testovanému studentovi oči. On sám si stiskne nos. Vkládáme mu do úst kousky ovoce nebo zeleniny. Testovaný poznává podle chuti druh ovoce a zeleniny. [31]

Podstata experimentu: Chuť a čich jsou spolu propojeny. Pokud člověk přijde o čich, nedokáže při zavřených očích rozeznávat chutě.

7.10 Sakadické oční pohyby

Teoretický úvod: Sakadické pohyby jsou velmi rychlé pohyby, které umožňují nasměrování oka tak, aby se vnímání objektu stalo co nejostřejším. Při rychlém pohybu očí z jednoho předmětu na druhý vzniká vizuální mezera, ve které je obraz rozmazaný. Ve skutečnosti se to projeví pouze na sítnici, jelikož mozek tento zlomek vteřiny vymaže. [30]

Pomůcky: zrcadlo, chytrý telefon

Postup:

1. Postavíme se před zrcadlo a střídavě se díváme na své pravé a levé oko.
2. Vezmeme si chytrý telefon a v režimu fotoaparát přepneme na selfie. Díváme se střídavě z jednoho oka na druhé.

Podstata experimentu: Pozorovatel při pohledu do zrcadla nikdy nedokáže vidět pohyb svých očí, i přesto, že jiným lidem je tento pohyb jasně postřehnutelný. Ačkoliv cítíme, jak hýbeme očima, tento pohyb v zrcadle nevidíme.

Pohyb očí přes selfie fotoaparát vidíme. Je to způsobenou dobou potřebnou ke zpracování obrazu.

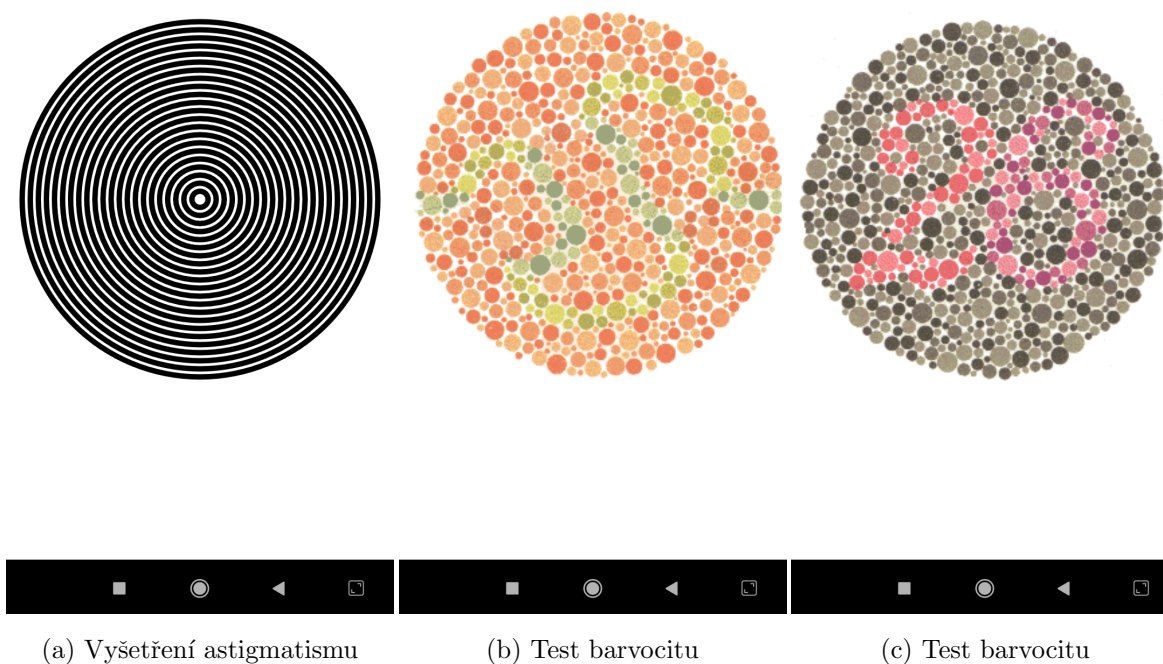
7.11 Vyšetření zraku pomocí mobilní aplikace Eye Test

Teorie:

Mobilní aplikace Eye Test umožňuje provedení několika testů zraku, jako jsou zraková ostrost, vyšetření barvocitu, astigmatismus, nebo vnímání kontrastu. Testování pomocí této aplikace nenahrazuje lékařské vyšetření, ale může poskytnout orientační informaci o stavu zraku. Při všech experimentech by měl být telefon vzdálen od očí na délku paže, hlava vzpřímená a obrazovka telefonu umístěná v úrovni očí.

Postup:

1. Měření zrakové ostrosti: Spustíme možnost Visual acuity, zvolíme libovolně sledované objekty (písmena nebo obrázky) a zavřeme jedno oko. Na obrazovce se ukazuje samostatné písmeno s dotazem, co vidíme. Po správné odpovědi následuje další písmeno, ale o menší velikosti. Měření tak pokračuje, dokud nezodpovíme špatně. Opakujeme pro druhé oko.
2. Vyšetření astigmatismu: Spustíme možnost Astigmatism, umístíme telefon do správné polohy, zavřeme jedno oko a pozorujeme radiálně souměrné čárkované obrazce, u kterých odpovídáme na otázku, zda jsou tyto čáry rozmazané. Měření opakujeme pro druhé oko.
3. Vyšetření barvocitu: Spustíme možnost Color Blindness a umístíme telefon do správné polohy. Pozorujeme obrazce a hledáme v nich barevně odlišené číslice nebo znaky.



Obrázek 7.6: Aplikace - Eye Test: Vyšetření astigmatismu a barvocitu

Zhodnocení aplikace

Aplikace Eye Test umožňuje orientační prověření zraku. Výsledná zraková ostrost je dána v procentech, tudíž samotný výsledek nám nedává konkrétnější informaci o případné korekci našeho zraku, ale může sloužit jako zajímavé srovnání ve skupině lidí. K vyšetření barvocitu aplikace využívá pseudoizochromatické tabulky, které obsahují body různých barev a různého jasů. V obrázcích jsou vytvořeny číslice, které jsou barevně odlišeny od okolí. Tato zkouška prokazuje schopnost vnímání barev. Vyšetření astigmatismu je založené pouze na dvou obrázcích a mírnou vadu nejspíš neodhalí. Aplikace dále nabízí testování vnímání kontrastu nebo možnost testování znalostí, například obecný Eye Quiz, nebo test první pomoci.

Závěr

Hlavním cílem diplomové práce na téma Biologické a fyzikální aspekty smyslových vjemů byl rozbor smyslového vnímání z pohledu biologie a fyziky a nastínění možností začlenění tohoto zajímavého tématu do výuky na základních a středních školách.

V první kapitole jsem zpracovala rešerši středoškolské literatury na dané téma s použitím učebnic fyziky a biologie. Dále jsem zpracovala srovnání vidění a slyšení vybraných živočichů. V úvodním textu této kapitoly zmiňuji evolučně mladší fotosenzitivní orgány bezobratlých živočichů, popisují rozdíl v poměru tyčinek a čípků u nočních živočichů a objasňuji pojem tapetum lucidum. Dále porovnávám vidění vybraných didaktických typů ze skupiny savců - pes, kočka, delfín a králík. U slyšení zmiňuji Johnstonův orgán a tympanální orgán bezobratlých a Weberův orgán u ryb. Detailně popisují slyšení u kočky, psa, králíka, delfína a s ním související echolokaci.

V diplomové práci se také zabývám popisem přenosu informace ze sensorických buněk do CNS. Smyslové receptory, které jsou podrážděny, přenášejí nervový vzruch do CNS. Tyto vzruchy mají elektrický projev a šíří se v podobně akčních potenciálů. Do mozku se tak přenášejí informace, které jsou tvořeny pomocí frekvence a počtem nervových vzruchů. Základní princip akčního potenciálu popisují v kapitole Akční potenciál.

Dále jsem zpracovala rozbor vzájemných vztahů mezi podnětem v reálném světě (fyzikální a chemické povahy) a počítkem v našem vědomí, který je výsledkem psychofyzikálních vztahů, vyjádřených Weberovým, Fechnerovým a Stevensovým zákonem.

Ze smyslových vjemů je z hlediska mezipředmětových vazeb nejzajímavější vidění a slyšení. Na základě české i zahraniční literatury jsem zpracovala kapitoly zabývající fyzikálními aspekty lidského zraku a sluchu, kde popisují základní vlastnosti elektromagnetického a akustického vlnění, světlolomný a světločivný aparát oka a sluchové ústrojí.

V závěrečné kapitole přináším návrh experimentů, které z hlediska přínosu diplo-

mové práce považují za nejcennější. Podle vyučovaného tématu jsou vhodné samostatně do předmětu fyzika nebo biologie, ale z hlediska lepšího pochopení vzájemných souvislostí je vhodné zdůraznit jejich bio-fyzikální dopad na znalost vyučované látky. Ke každému experimentu je uveden teoretický úvod, seznam pomůcek, postup a zhodnocení experimentu na základě vlastních zkušeností. Z klasických fyziologických experimentů to jsou Mariottův pokus, Weberova a Rinneho zkouška a důkaz spojení chuťových a čichových vjemů. Experimenty sloužící k audiometrickému vyšetření sluchu, vyšetření zraku nebo zkoumání očních pohybů lze jednoduše demonstrovat pomocí chytrých telefonů, což může přispět k modernizaci výuky a k větší motivaci žáků. Aplikace jsem na sobě otestovala a popsala jsem jejich využití. U dalších pokusů, jako je prostorové vidění a slyšení, test periferního vidění či měření amplitudy akomodace oka, jsem otestovala více možností a popsala jsem vybrané způsoby provedení. Do své práce jsem zvolila takové metody a pomůcky, aby byly jednoduché na výrobu a rychle zhotovitelné.

Literatura

- [1] JELÍNEK, Jan a Vladimír ZICHÁČEK. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 7., aktualiz. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2004. ISBN 80-7182-177-2.
- [2] NOVOTNÝ, Ivan a Michal HRUŠKA. *Biologie člověka*. 5., rozšířené a upravené vydání. Praha: Fortuna, 2015. ISBN 978-80-7373-128-1.
- [3] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia. Optika*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [5] DE MAYO, Benjamin. *The Everyday Physics of Hearing and Vision* [online]. Morgan and Claypool Publishers, 2015 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1088/978-1-6270-5675-5. ISBN 978-1-6270-5675-5.
- [6] Dalekozrakost. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dalekozrakost>
- [7] Krátkozrakost. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kratkozrakost>
- [8] HERMAN, Irving P. *Light, Eyes and Vision*. HERMAN, Irving P. Physics of the Human Body [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-01-10, s. 731-817 [cit. 2019-07-20]. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. DOI: 10.1007/978-3-319-23932-3-11.

- [9] Stavba oka a princip vidění. NABLA [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/biologie/kapitoly/biologie-cloveka/oko-videni.php>
- [10] Stavba ucha a princip slyšení. In: NABLA [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/biologie/kapitoly/biologie-cloveka/ucho-slyseni.php>
- [11] ROSYPAL, Stanislav. *Nový přehled biologie*. Praha: Scientia, 2003. ISBN 9788086960234.
- [12] Chuť. In: *Lidské smysly* [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.lidske-smysly.wbs.cz/Chut.html>
- [13] Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2019-07-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [14] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia. Mechanické kmitání a vlnění*. 5., přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2018. ISBN 978-80-7196-468-1.
- [15] Wikimedia [online]. [cit. 2019-07-26]. Dostupné z: commons.wikimedia.org
- [16] *Human vs Animals - vision*. Eyesite [online]. [cit. 2019-07-26]. Dostupné z: <https://www.eyesite.co.uk/news/humans-vs-animals-who-has-better-vision/>
- [17] FELLNEROVÁ, Ivana a Jiří BEZDÍČEK. *Praktická cvičení z fyziologie člověka a živočichů*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-3994-5.
- [18] VÁCHA, Martin, Ivana FELLNEROVÁ, Vítězslav BIČÍK, Richard PETRÁSEK a Vladimír ŠIMEK. *Srovnávací fyziologie živočichů*. 2. Brno: Masarykova univerzita, 2010. ISBN 978-80-210-3379-5.
- [19] PINTERA, Albert. *Kočky, kocouři a koťata*. Praha: Práce, 1989. Delfín (Práce). ISBN 80-208-0060-3.
- [20] REECE, William O. *Fyziologie a funkční anatomie domácích zvířat*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3282-4.
- [21] FAY, Richard R. a Arthur N. POPPER. *Comparative hearing*. New York: Springer-Verlag, c1994. Springer handbook of auditory research, v. 4. ISBN 3540978410

- [22] *Senses of bottlenose dolphins*. SeaWorld Parks [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://seaworld.org/animals/all-about/bottlenose-dolphin/senses/>
- [23] KETTEN, Darlene R. Cetacean Ears. AU, Whitlow W. L., Richard R. FAY a Arthur N. POPPER, ed. *Hearing by Whales and Dolphins* [online]. New York, NY: Springer New York, 2000, 2000, s. 43-108 [cit. 2019-07-29]. Springer Handbook of Auditory Research. DOI: 10.1007/978-1-4612-1150-1-2. ISBN 978-1-4612-7024-9.
- [24] KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3068-4.
- [25] LECAR, Harold. Morris-Lecar model. Scholarpedia, 2007 2(10):1333.
- [26] BAIRD, John C. A *COGNITIVE THEORY OF PSYCHOPHYSICS*. II. Scandinavian Journal of Psychology [online]. 1970, 11(1), 89-102 [cit. 2019-08-02]. DOI: 10.1111/j.1467-9450.1970.tb00722.x. ISSN 0036-5564.
- [27] *Spektrum*. Aldebaran [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/tabulky/tb-spektrum.php>
- [28] The Electromagnetic Spectrum Is All Around Us. In: <https://www.clipartmax.com> [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.clipartmax.com/middle/m2H7H7N4m2m2Z5b1-the-electromagnetic-spectrum-is-all-around-us-we-part-of-the-electromagnetic/>
- [29] KUČHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-802-4711-638.
- [30] LINCOLN, James. *Five smartphone experiments that don't need apps*. The Physics Teacher [online]. 2018, 56(9), 652-653 [cit. 2019-08-03]. DOI: 10.1119/1.5080595. ISSN 0031-921X. Dostupné z: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.5080595>
- [31] BAER, Heinz-Werner. *Biologické pokusy ve škole*. 2. vyd. Praha: SPN - Státní pedagogické nakladatelství, 1986.
- [32] LINCOLN, James. *Using online tone generators*. The Physics Teacher [online]. 2017, 55(4), 244-246 [cit. 2019-08-04]. DOI: 10.1119/1.4978728. ISSN 0031-921X.
- [33] *Depth perception test*. Media College [online]. [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <https://www.mediacollege.com/3d/depth-perception/test.html>

- [34] *Prostorové slyšení*. Fyzikální šuplík [online]. [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <http://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/fyzika/prostorove-slyseni.pdf>
- [35] KUBÍNOVÁ, Štěpánka. *Lidské tělo jako předmět fyzikálního měření*. Souhrnný sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky [online]. Hradec Králové [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/18-18-Kubinova.html>
- [36] *Peripheral vision: Discover the outer limits of your eyes*. Exploratorium [online]. 2019 [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <https://www.exploratorium.edu/snacks/peripheral-vision?media=7750>
- [37] *What is an Audiogram?*. Baby Hearing [online]. 2019 [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: <https://www.babyhearing.org/what-is-an-audiogram>
- [38] UŠIAKOVÁ, Marie. *Vrány*. Brno, 2008. Diplomová. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra výtvarné výchovy.
- [39] *Vlastnosti zvuku*. In: ELUC [online]. Olomouc [cit. 2019-08-06]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1671>
- [40] ANTON, Milan. *Refrakční vady a jejich vyšetřovací metody*. 2. přeprac. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993. Učební text (Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví). ISBN 80-7013-148-9.
- [41] BENEŠ, Pavel. *Přístroje pro optometrii a oftalmologii*. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2015. ISBN 978-80-7013-577-8.
- [42] *Clinical Procedures in Primary Eye Care* [online]. Elsevier, 2007 [cit. 2019-08-07]. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8896-3.X5001-9. ISBN 9780750688963.
- [43] *Práh sluchu a sluchové pole*. In: Wikiskripta [online]. [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Pr%C3%A1h-sluchu-a-sluchov%C3%A9-pole>
- [44] HERMAN, Irving P. *Physics of the Human Body* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016 [cit. 2019-08-5]. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. DOI: 10.1007/978-3-319-23932-3. ISBN 978-3-319-23930-9.
- [45] HAWKINS, Joseph E. *Human ear: Anatomy*. In: Britannica [online]. [cit. 2019-08-4]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/ear>

- [46] *Volley theory*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-08-5]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Volley-theory>
- [47] KALA, Miroslav a Roman KUBÍNEK. *Nemocnice, aneb, Rukověť zvládavého pacienta*. Olomouc: Rubico, [2000]. Knížka pro každého (Rubico). ISBN 80-85839-47-4.
- [48] *Kochleární implantát*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kochle%C3%A1rn%C3%AD-implant%C3%A1t>
- [49] In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Place-theory-\(hearing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Place-theory-(hearing))