

UNIVERZITA KARLOVA
FARMACEUTICKÁ FAKULTA V HRADCI KRÁLOVÉ
KATEDRA BIOFYZIKY A FYZIKÁLNÍ CHEMIE



BAKALÁRSKA PRÁCA

AKUSTIKA

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Monika Kuchařová, Ph.D.

HRADEC KRÁLOVÉ, 2021

Dominika Papinčáková

Poďakovanie

Chcela by som sa poďakovať svojej vedúcej bakalárskej práce pani Mgr. Monike Kuchařovej, Ph.D. za jej cenné rady, pripomienky ako aj za usmerňovanie pri písaní tejto práce. V druhom rade by som sa chcela poďakovať svojej rodine za ich neustálu podporu pri celom štúdiu.

„Prehlasujem, že táto bakalárska práca je mojím pôvodným autorským dielom. Literatúru a ďalšie zdroje, z ktorých som pri jej spracovaní čerpal, sú uvedené v zozname použitej literatúry a v práci sú riadne citované. Práca nebola použitá k získaniu iného alebo rovnakého titulu.“

V Hradci Králové, dňa 13.5.2021

Podpis

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Akustika.....	7
2.1	História.....	7
2.2	Delenie akustiky	8
2.2.1	Stavebná akustika.....	8
2.2.2	Fyzikálna akustika.....	8
2.2.2.1	Zvuk	8
2.2.2.2	Zdroje zvuku.....	10
2.2.2.3	Šírenie zvuku	10
2.3	Fyziologická akustika	14
2.3.1	Základné veličiny fyziologickej akustiky	14
2.3.2	Hlasitosť a hladina hlasitosti	15
2.3.3	Sluchové pole	16
3	Sluch	17
3.1	Vonkajšie ucho	18
3.2	Stredné ucho	19
3.3	Vnútorňé ucho	22
3.4	Prenos zvuku - ako počujeme	25
4	Ultrazvuk.....	28
4.1	História.....	28
4.2	Charakteristika	29
4.3	Fyzikálne vlastnosti ultrazvuku	29
4.4	Generátory ultrazvuku.....	31
4.5	Účinky ultrazvuku	32
4.6	Diagnostické využitie ultrazvuku.....	34
4.7	Ultrazvuková technika v diagnostike.....	35
4.7.1	Ultrazvukové sondy	35
4.7.2	Zobrazovacie módy ultrazvuku	36
4.8	Dopplerov efekt.....	38
5	Nové metódy v oblasti ultrazvukových vyšetrení	40
5.1	Kontrastný ultrazvuk	40
5.2	Ultrazvuková elastografia - SWE (<i>shear wave elastography</i>).....	41

5.3	High intensity focused ultrasound (HIFU)	42
6	Infrazvuk	43
7	Záver	45
8	Použité skratky	47
9	Zoznam obrázkov	47
10	Zoznam tabuliek a grafov	47
11	Použitá literatúra	48

1 Úvod

V tejto bakalárskej práci som sa zamerala na tému akustika. Akustika je veľmi široký odbor s ktorým sa stretávame v bežnom živote bez toho aby sme si to uvedomovali. Hlavným javom, ktorý akustiku študuje je zvuk. V tejto práci sa zaoberám hlavne tým čo je to zvuk, ako zvuk vzniká, ako sa šíri a ako ho vnímajú ľudia. Vedný odbor akustika sa rozdeľuje do niekoľkých kategórii medzi, ktoré môžeme zaradiť fyzikálnu, fyziologickú a aj hudobnú akustiky. Tieto odbory sa väčšinou zaoberajú zvukom počuteľným pre ľudské ucho. Sú aj zvuky také, ktoré človek zachytiť nemôže a využívajú sa napríklad pri diagnostických metódach, patrí tam ultrazvuk. Iný druh zvuku, ktorý je nebezpečný pre ľudský organizmus a je vnímaný nervovou sústavou je infrazvuk.

Ak ide o fyzikálnu akustiku, tak tá sa zaoberá predovšetkým zvukom, jeho vznikom a jeho šírením, ktoré sa popisujú základnými fyzikálnymi veličinami. Obecne sa zvuk považuje za akékoľvek periodické alebo neperiodické vibrácie častíc v prostredí. Prostredie v ktorom sa zvuk šíri je plynného, kvapalného alebo pevného stavu. Podľa toho v akom prostredí sa zvuk šíri odpovedá aj jeho rýchlosť.

Fyziologická akustika sa prevažne zaoberá ako vzniknutý zvuk vníma ľudské ucho. Uši sú párový orgán, ktorý sa rozdeľuje do 3 základných častí a to na vonkajšie, stredné a vnútorné ucho. Každá časť ľudského ucha plní pri prenose zvukovej vlny funkciu, ktorá je pre danú časť charakteristická. Pre fyziologickú akustiku sú tiež dôležité pojmy ako prah počutia a prah bolesti.

Okrem zvuku počuteľného sa v tejto práci zaoberám aj ultrazvukom a infrazvukom. Ultrazvuk predstavuje zvukové vlny nad frekvenciu 20 000Hz čo je pre ľudské ucho nepočuteľné. Lekári majú k dispozícii veľké množstvo zobrazovacích nástrojov ako počítačová tomografia (CT), pozitronová emisná tomografia (PET), magnetická rezonancia (MRI). Ultrazvuk patrí medzi najefektívnejšie a najbezpečnejšie zobrazovacie a terapeutické metódy. Taktiež, každý rok pribúdajú rôzne nové metódy vyšetrení pomocou ultrazvuku. Ide napríklad o kontrastný ultrazvuk, ultrazvukovú elastografiu alebo vysokoúčinný ultrazvuk.

Okrem ultrazvuku, ktorý napomáha pri diagnostike sa stretávame aj s druhom zvuku, ktorý nie je pre človeka zdravý . Ide o infrazvuk. V jednej z kapitol sa budeme venovať ak tomuto druhu zvuku. Tento zvuk má nízku frekvenciu a často má negatívny dopad na ľudský organizmus.

Infrazvuk je zvuk s frekvenciou pre človeka nepočuteľnou. Presná hranica medzi infrazvukom a počuteľným zvukom nie je presne stanovená ale udáva sa menej ako 16 Hz. Taktiež sa vykonávajú aj niektoré štúdie, ktoré skúmajú využitie infrazvuk aj v medicíne a niektoré z týchto štúdií budú spomenuté aj v tejto bakalárskej práci.

2 Akustika

Akustika je veda, ktorá sa zaoberá vznikom, kontrolou, prenosom a príjmom zvuku. Termín akustika je odvodený od gréckeho slova *akoustos*, čo znamená „počuť“. (Berg,2019)

Ak sa povie slovo „akustika“ veľa ľudí označí tento termín ako vlastnosť miestností alebo prostredia ako napr. akustika miestností je dobrá alebo zlá. Tento termín má ale oveľa väčší význam. Zaoberá sa samozrejme akustickými vlastnosťami koncertných siení, kancelárií, tried, tovární a rôznych stavieb. Veľmi dôležitú úlohu zohráva pri popise tvorby reči, stretáva sa s kompletným spracovaním sluchového nervového systému, jeho anatómiou, genetikou a fyziológiou. Zaoberá sa tiež príliš nízkymi alebo príliš vysokými vibráciami a vlnami tak aby boli počuteľné. Zvuk a jeho vlny sa používajú napr. ako ultrazvuk na snímanie vlastností materiálov alebo v medicíne na zobrazovanie a diagnostiku. Akustika tiež zahŕňa infrazvuk-vibrácie Zeme. Vtedy hovoríme o zvuk, ktorý človek sluchovým orgánom nepočuje. (Xiang a Sessler, 2015)

2.1 História

Ako každé iné vedné odvetia aj akustika sa začala postupne vyvíjať. Ako prvý sa ňou zaoberal Pythagoras v 6. storočí pred našim letopočtom. Začal študovať pôvod hudobných zvukov a ich rozdiely medzi rôznymi kombináciami hudobných zvukov. Poukázal na to, že najvyššie výšky tónov produkujú najkratšie struny a struny, ktoré sú o polovicu dlhšie vydávajú výšku tónu a oktávu vyššie. (Anselmet a Mattei,2016)

Ďalším gréckym filozofom, ktorý významne zasiahol do štúdia zvuku bol Aristoteles, ktorý predstavil koncept kompresíí a zriedkavých útvarov vzduchu. Tieto faktory sú prítomné vo zvuku a dopadajú na častice vzduchu, čím sa veľmi podobajú na chovanie vlnového pohybu. (History of Acoustics,2021)

Moderné štúdium vln a akustiky pochádza od Galilea Galileiho (1564-1642), ktorý úroveň poznatkov obohatil o štúdium a korelácie medzi výškou a frekvenciou zdroja zvuku. Jeho záujem o zvuk bol čiastočne inšpirovaný jeho otcom, ktorý bol matematik a hudobný skladateľ. Po práci Galilea bol pokrok v akustike pomerne rýchly. Francúzsky matematik Marin Mersenne študoval vibrácie napätých strún a výsledky svojho skúmania zhrnul v troch Merssenových zákonoch. Akustika ako veda sa postupne dostavala dopredu a na konci 17.storočia a začiatku 18. storočia vytvoril francúzsky fyzik Joseph Sauveur podrobné štúdie o vzťahu frekvencie a výšky tónu a vln v napätých strunách. Vytvoril tak akustické termíny, ktoré sa používajú dodnes. (Berg,2019)

Jeden z najznámejších a často nesprávne interpretovaných experimentov histórii akustiky je zvon vo vakuu (bell in vacuum). V tomto experimente je vzduch čerpaný z nádoby, v ktorej je umiestnený zvoniaci zvon. Pri odčerpaní vzduchu sa zvuk znižuje, až sa stane

nepočítateľným. Prvý experiment uskutočnil nemecký Athanasius Kircher, ktorý to popísal vo svojej knihe *Musurgia Universalis*. I po odčerpaní vzduchu bol zvon stále počuť a preto dospel k nesprávnemu záveru, že vzduch nie je potrebný pre prenos zvuku. V skutočnosti nebola jeho nádoba dostatočne uzavretá. V roku 1660 anglo-írsky vedec Robert Boyle, vylepšil tento experiment a pozoroval ako intenzita zvuku klesá prakticky na nulu pri odčerpaní vzduchu. Dospel teda k záveru, že na prenos zvukových vln je potrebný vzduch ale skutočným dôvodom pre zníženie hladiny zvuku pri odčerpaní vzduchu z nádoby je, že zvon nie je schopný prenášať vibrácie efektívne na zostatkový menej hustý vzduch a že vzduch nie je schopný efektívne prenášať zvuk do nádoby. Aj keď sú v tomto experimente nejasnosti môžeme povedať, že zvuk vnímame skôr ako vlnu a nie ako časticu. (Berg,2019)

2.2 Delenie akustiky

Akustiku ako vedu, môžeme rozdeliť do niekoľkých vetiev

1. Stavebná akustika
2. Fyzikálna akustika
3. Fyziologická akustika
4. Hudobná akustika

2.2.1 Stavebná akustika

Táto oblasť sa predovšetkým zaoberá akustikou priestorov a budov. Cieľom je dosiahnutie optimálnych podmienok pre kvalitu priestoru. (Jiříček,2002)

Pri stavebnej akustike sa kladie dôraz na to aby nebol prenášaný hluk z jednej miestnosti do druhej. Hrá veľmi dôležitú úlohu pri navrhovaní budov, pretože to môže mať výrazný vplyv na komunikáciu, zdravie alebo produktivitu človeka. Taktiež sa dbá na kvalitu zvuku napríklad v koncertných sálach alebo hudobných štúdiách. (Building acoustics,2020)

2.2.2 Fyzikálna akustika

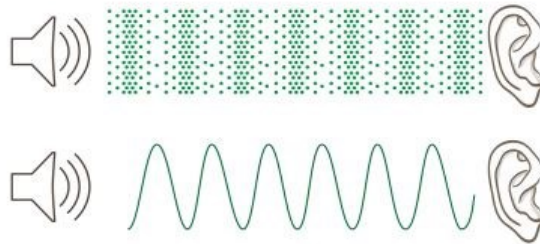
Fyzikálna akustika zahŕňa štúdium vzniku, šírenie a absorpciu zvuku vo vzduchu a iných plynch, kvapalinách, polotuhých látkach a pevných látkach. Zaoberá sa počítateľným zvukom, infrazvukom a ultrazvukom. Fyzikálna akustika zahŕňa lineárne procesy ako je napríklad šírenie zvuku z premávky tak aj nelineárnymi procesmi ako sú rázové procesy, ktoré sú vytvárané lietadlami, ktoré letia rýchlejšie ako rýchlosť zvuku. (Thiessen,2014)

2.2.2.1 Zvuk

Pod pojmom zvuk rozumieme tlakové zmeny, ktoré sa šíria v prostredí a môžeme ich vnímať sluchovým orgánom. V staršej literatúre sa vyskytuje, že pojem zvuk je to čo počujeme ale v dnešnej dobe vieme, že ak hovoríme o zvuku tak to zahŕňa pojmy ako zvukové vlny, energia zvuku alebo intenzita zvuku. (Jiříček,2002). Prostredie v ktorom sa zvuk šíri môže byť

rôzneho druhu, napríklad kvapalina, plyn a aj pevné látky. Zvuk prechádza z prostredia do druhého prostredia a môže sa opakovať periodicky ale aj neperiodicky v závislosti na čase, poprípade má pulzný charakter. (Navrátil a Rosina,2019)

Je známe, že pri šírení zvuku nedochádza k prenosu látky ako takej ale k prenosu energie. Každý jedinec vníma zvuk individuálne v závislosti na veku a aj zdravotnom stave. S rastúcim vekom sa vnímanie zvuku znižuje hlavne v oblasti s vyššou frekvenciou ale nemusí to byť pravidlom. (Rosina,2013)



Obrázok 1 Zvuk ako vlnenie

Zdroj : Ptáček,2018

Kmitajúce teleso vytvára mechanické vlnenie-zvuk. (Obrázok 1) Vlnenie sa šíri v prostredí, čo je spôsobené väzbami medzi časticami, atómami a molekulami. Tie sa nachádzajú v rovnovážnej polohe. Pôsobením vonkajšej sily a po dodaní energie sa častica vychýli zo svojej pôvodnej polohy a dodanú energiu predáva častici susednej. Takto postupne prechádza vlnenie od svojho zdroja. Na základe prostredia môže byť vlnenie stojaté alebo sa šíri postupne. (Obrázok 2)(Pejchal,2013)

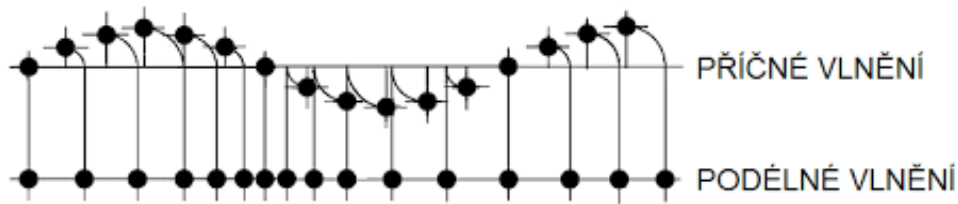
1. Postupné šírenie sa rozdeľuje na 2 typy:

- Vlnenie pozdĺžne (longitudinálne)
- Vlnenie priečne (transverzálne)

2. Stojaté vlnenie

- Pozdĺžne
- Priečne

Postupné pozdĺžne vlnenie je také, kde častice kmitajú v smere vlnenia a priečne vlnenie, keď častice kmitajú kolmo na smer kmitajúcej vlny. Hlavné rozdiely medzi týmito dvoma vlneniami sú, že priečne vlnenie môže vznikáť len v prostredí, kde je šmykové napätie ide najčastejšie o povrch kvapaliny alebo pevné prostredie. Longitudinálne vlnenie sa šíri v plynom a kvapalnom prostredí. Ak ide o rýchlosť šírenia pozdĺžne vlnenie sa šíri prostredím rýchlejšie ako priečne. (Beneš et al.,2015) Zvláštnym druhom vlnenie je vlnenie stojaté. Ide o dve vlnenia, ktoré majú rovnakú frekvenciu a amplitúdu a postupujú oproti sebe a následne vznikne vlna, ktorá už nepostupuje. Najčastejšie vzniká odrazom zvukovej vlny od prekážky, kedy pôvodná a odrazená vlna postupujú oproti sebe.(Beneš et al., 2015)



Obrázok 2 Pozdĺžne a priečne vlnenie

Zdroj: Havránek, 1990

2.2.2.2 Zdroje zvuku

Každé chvejúce teleso môže byť zdrojom zvuku. Zdrojom zvuku môže byť hudobný nástroj, ladičky, u človeka to sú prevažne hlasivky. Zo zdroja zvuku sa šíri vlnenie do prostredia, ktoré je ako vodič. Hlavnou úlohou vodiča je zabezpečenie spojenia medzi zdrojom zvuku a prijímačom zvuku ako je napríklad sluchový orgán. (Pejchal,2013). Uvediem pár príkladov:

Ladička: patrí medzi najjednoduchší zdroj zvuku. Vytvára jednoduché pravidelné kmity.

Struny: ide o vlákna, ktoré sú upevnené na oboch koncoch a pomocou nárazu dochádza ich rozochvetiu. Z miesta sa začne šíriť priečne vlnenie k obom koncom struny.

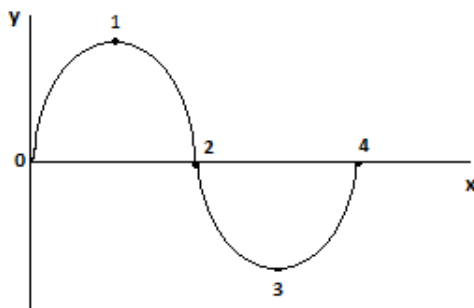
Píšťaly: ide o predmet oválneho tvaru, kde sa môže nachádzať vzduchový stĺpec. Prostredníctvom fúkania vzniká chvenie proti ostrej oblasti napr. pery. Pery sú ako zdroj a vzduchový stĺpec ako zosilňovač zvuku. (Pejchal,2013)

2.2.2.3 Šírenie zvuku

Na to aby sme mohli popísať šírenie zvuku a jeho vlastnosti musíme sa oboznámiť zo základnými pojmi a veličinami s ktorými sa stretávame v obore akustiky. Pri akustických podnetoch sa stretávame s dvoma základnými veličinami a to s frekvenciou a intenzitou. Okrem týchto dvoch veličín hrajú dôležitú úlohu pojmy ako kmit, akustický tlak, akustická výchylka a rýchlosť zvuku.

Kmit:

Je to pohyb kmitajúceho bodu, ktorý prechádza z rovnovážnej polohy. Ako môžeme vidieť na obrázku nižšie tak kmitajúci bod prechádza z rovnovážnej polohy (0) do maximálnej výchylky (1). Následne prechádza cez rovnovážny stav (2) do opačnej maximálnej výchylky (3) a opäť sa vracia do rovnovážneho stavu (4) Osa x nám môže zobrazovať čas a osa y veľkosť výchylky. Častica vykonáva tento pohyb v priebehu jedného kmity. Doba za, ktorú častica vykoná tento pohyb je čas T . (Bargár a Kollár,1986; Dršata,2016)



Obrázok 3 Ukážka kmitavého pohybu

Zdroj: Bargár a Kollár,1986

Frekvencia:

Frekvencia (kmitočet) patrí medzi fyzikálne veličiny a udáva nám počet kmitov za jednotku času. Ak trvá jeden kmit približne 1/100 sekundy tak to môžeme formulovať ako kmitočet so 100 periódami za 1 sekundu (c/s). Uznávanou a doporučenou jednotkou je Hertz, táto jednotka bola pomenovaná podľa nemeckého fyzika Heinricha Hertze, jej fyzikálnym rozmerom je s^{-1} (Lejska a Havlík,2019)

Medzi hlavné veličiny ,ktoré popisujú šírenie zvuku resp. zvukovej vlny patrí frekvencia kmitavého pohybu f , rýchlosť šírenia zvukovej vlny c a vlnová dĺžka λ . Tieto veličiny sú v nasledujúcom vzájomnom vzťahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Intenzita:

Pre šírenie zvuku prostredím (najčastejšie ide o vzduch) je potrebné dostatočné množstvo energie potrebnej na rozkmitanie častíc v prostredí. Intenzita je potom vlnenie, ktoré prechádza jednotkou plochy za 1 sekundu. Je to energie prechádzajúca prostredím o určitom výkone [W], preto sa intenzita zaznamenáva v jednotkách $W.m^{-2}$. (Lejska a Havlík,2019)

Pre porovnanie intenzity viacerých zvukov, bol zavedený pojem hladina intenzity. Namiesto lineárneho pomeru dvoch intenzít sa zaviedol logaritmický. Tu sa využíva fyzikálna jednotka bel [B] ale v bežnej praxi sa používa jednotka 10-krát menšia a to decibel [dB]. (Hrazdira a Mornstein,1998)

Akustický tlak:

Ide o mechanický tlak, ktorý vytvára častica pri kmitavom pohybe v dôsledku šírenie zvuku. Väčšinou pri vzniku tlakových zmien sa predpokladá, že podobne ako zvuk majú harmonický priebeh. Hodnota akustického tlaku sa udáva buď v newtonoch na meter štvorcový [$N.m^{-2}$] alebo v pascaloch [Pa], kde $1 N.m^{-2} = 1 Pa$. (Jandová,2015)

Rýchlosť šírenia zvuku:

Rýchlosť šírenia zvukovej vlny závisí hlavne na prostredí a sekundárnych podmienkach (teplota, tlak, hustota, vlhkosť prostredia). Rýchlosť šírenia zvuku v rôznych látkach je odlišná. Príklady niektorých materiálov sú uvedené v tabuľke nižšie. (Beneš et al.,2015)

Prostredie	Rýchlosť zvuku c (m/s)
vzduch 0 °C	332
vzduch 20 °C	344
vodík	1270
voda 13 °C	1441
ľad 0°C	3200
guma	1440
oceľ	5000
sklo	6000

Tabuľka 1 Šírenie zvukových vln v rôznych prostrediach

Zdroj: Navrátil a Rosina, 2019

Rýchlosť zvuku za normálnych podmienkach rastie so zvyšujúcou sa teplotou lineárne a môžeme to popísať nasledujúcim vzťahom:

$$c_{(\text{vzduch})} = 331,5 + 0,61 \cdot t \quad (2)$$

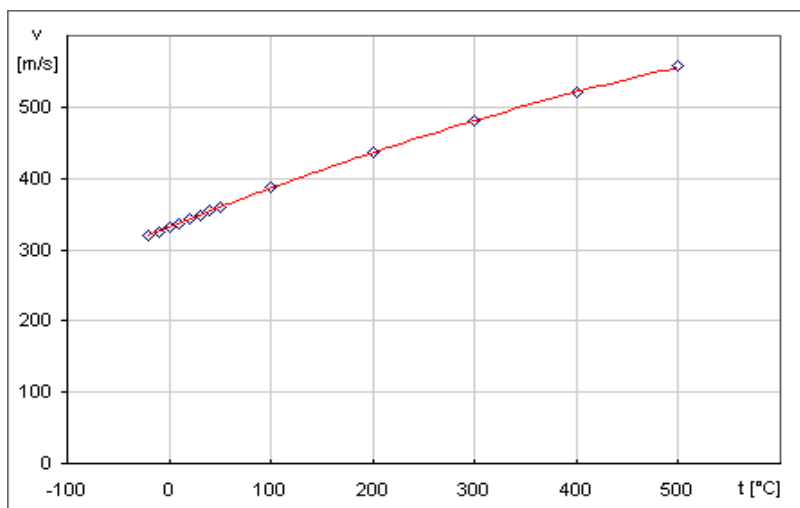
t = teplota v °C

Tabuľka 2 a Graf 1 nám ukazujú závislosť medzi teplotou a rýchlosťou šírenia zvuku vo vzduchu

t (°C)	c (m/s)
-20	319
-10	325
0	331
10	337
20	343
30	349
40	355
50	360
100	387
200	436
300	480

Tabuľka 2 Závislosť rýchlosti zvuku na teplote

Zdroj: Bureš, 2002



Graf 1 Závislosť rýchlosti zvuku na teplote

Zdroj: Bureš,2002

Šírenie zvukovej vlny je spojené aj s prenosom energie, ktorá sa šíri rovnakou rýchlosťou ako vlnenie. Energia na rozdiel od rýchlosti rastie s časom. Ak ide o priestorové vlnenie, tam hraje dôležitú úlohu aj veľkosť plochy. Na základe toho sa na výpočet energie používa plošná hustota. Označuje sa ako N a udáva sa v jednotkách $W.m^{-2}$. Na výpočet platí vzťah:

$$N = \frac{dP}{dS \cos \alpha} \quad (3)$$

kde dP je výkon prechádzajúci plochou dS , α je uhol medzi normálou a plochy a smerom šírenia a dS je priemet tejto plochy do kolmej roviny k smeru šírenia vlnenia. (Ďoubal a Kučová,1997)

Zvuky sa rozdeľujú na 2 základné kategórie:

- zvuky jednoduché
- zvuky zložené

Jednoduché zvuky alebo tóny sú tie, ktoré majú harmonicky priebeh. Ak tento priebeh znázorníme pomocou grafu, tak závislosť intenzity zvuku na čase bude sínusová. (Reich a Všeticka,2021). Tento druh zvuku môžeme vidieť na obrázku na str. 11

Sínusový priebeh najčastejšie vzniká pôsobením sily, ktorá je priamo úmerná výchylke hmotnej častice z rovnovážnej polohy. To môžeme vyjadriť rovnicou kmitavého pohybu a (Kabátová a Profant,2012) Pre akustickú výchylku α platí vzťah:

$$\alpha = \alpha_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) = \alpha_{\max} \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t) \quad (4)$$

kde α_{\max} je amplitúda kmitavého pohybu, α je okamžitá výchylka, t je čas a ω je uhlová frekvencia.

Pomocou predchádzajúceho vzorca sa dá odvodiť akustická rýchlosť, ktorá nám udáva rýchlosť pohybu častice v závislosti na zmene jej polohy v čase. Platí vzťah:

$$v = v_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) = v_{\max} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (5)$$

kde v_{\max} nám udáva maximálnu hodnotu okamžitej rýchlosti. (Navrátil a Rosina,2019)

O zložených zvukoch sa hovorí vtedy ak ide o periodicky opakujúce sa tóny ale časový priebeh nemá tvar sínusoidy. Môže obsahovať zložky o rôznych frekvenciách a tým pádom časový priebeh je súčtom jednotlivých zložiek. Obrázok 4 nám znázorňuje zložený zvuk s rôznym časovým priebehom. (Kabátová a Profant,2012)



Obrázok 4 Zložený zvuk s rôznym časovým priebehom

Zdroj: Kabátová a Profant,2012

2.3 Fyziologická akustika

Fyziologická akustika je odvetvie, ktoré sa zaoberá spracovaním zvukového impulzu pomocou sluchového orgánu a následne nervovým systémom. Veľmi dôležitú úlohu zohráva sluchový orgán, pomocou ktorého sa zvuk premení na nervové vzruchy a tie sú vedené pomocou nervov do kôrových častí mozgu. Ako bolo zmienené tak zvuk z fyzikálneho hľadiska je charakterizovaný frekvenciou a intenzitou. Vo fyziológii intenzite odpovedá hlasitosť a frekvencii výška tónu. Tón je charakterizovaný farbou zvuku, pomocou ktorej rozlišujeme tóny s rovnakou frekvenciou a intenzitou ale líšia sa tvarom zvukovej vlny. Fyzikálne a fyziologické veličiny sa od seba líšia a nenachádzame medzi nimi priamu úmernosť. Fyziologická akustika sa prevažne uplatňuje v medicínskej oblasti ale môžeme sa s ňou stretnúť aj pri posúdení napríklad hudby, pri konštrukcii zariadení pre príjem alebo prenos zvuku alebo odstraňovaní hluku na pracovisku. (Kolmer a Kyncl,1982)

2.3.1 Základné veličiny fyziologickej akustiky

V tejto časti si vysvetlíme základné veličiny, ktoré sa týkajú fyziologickej akustiky.

Tón:

Ide o zvuk s pravidelným (periodickým) kmitočtom. Tóny sa rozdeľujú na čisté a zložené. Čistý tón nazývaný aj harmonický, má pravidelné kmity v tvare sínusoidy, ide vlastne

o jednoduchý zvuk ako je uvedené v predchádzajúcej kapitole. Tento druh tónu sa v prírode často nevyskytuje ale môžeme sa s ním stretnúť napríklad v audiometrii pri vyšetrení sluchu. Ak spojíme niekoľko harmonických kmitov spolu, vtedy hovoríme o zloženom tóne. Vyskytujú sa prevažne v prírode a zložené tóny sa od seba navzájom odlišujú počtom a pomerom kmitočtov. (Bargár a Kollár,1986) Okrem toho sa v prírode môžu vyskytovať aj nepravidelné (neperiodické) kmitočty, vtedy hovoríme o šume. Tie majú nesínusový priebeh (Lejska a Havlík,2019)

Výška tónu:

Pri vnímaní zvuku, zohráva veľmi dôležitú úlohu jeho výška. Je charakterizovaná tým, že čím je zvuk vyšší tak aj kmitočet je vyšší. Tóny s vysokou frekvenciou sa nazývajú vysoké a s nízkou frekvenciou sa nazývajú hlboké. Normálny zdravý človek počuje zvuky o frekvencii 16 – 20 000 Hz. (Bargár a Kollár,1986)

Farba tónu:

Ak zahráme 2 rôzne zvuky o rovnakej výške s rovnakou intenzitou napríklad prostredníctvom dvoch rôznych hudobných nástrojov, nebudú rovnaké ale budú sa líšiť farbou tónu. Pomocou farby tónu môžeme rozoznávať hlasy ľudí, hudobných nástrojov alebo odlišovať zvuky od seba navzájom. (Jiříček,2002) Taktiež farba hlasu je pre každého jedinca individuálna, pretože veľkosť a tvar rezonančných dutín (kam patrí dutina ústna, dutina nosná a hltanová) je odlišná. (Lejska a Havlík,2019)

2.3.2 Hlasitosť a hladina hlasitosti

Weberov-Fechnerov zákon

Tento zákon platí pre sluchový vnem a hovorí nám o logaritmickej závislosti fyziologického vnemu na jeho fyzikálnej príčine. To znamená, že ak stúpa napríklad akustická intenzita geometrickou radou tak sluchový vnem bude stúpať aritmetickou radou čiže o určitú hodnotu. (Schauer,2008)

Človek pomocou svojich zmyslov hodnotí akustické impulzy. Pomocou zmyslov nedokáže posúdiť intenzitu alebo akustický tlak ale vníma ich ako hlasitosti, preto hlasitosť môžeme zaradiť medzi subjektívne veličiny. Ako referenčná hodnota hlasitosti bol vybraný tón o frekvencii 1000 Hz s akustickým tlakom okolo 40dB a hlasitosť tohto tónu bola definovaná ako 1 son. Tým, že hlasitosť neodpovedala hladinovým vyjadreniam akustických veličín bola zavedená hladina hlasitosti. (Jiříček,2002)

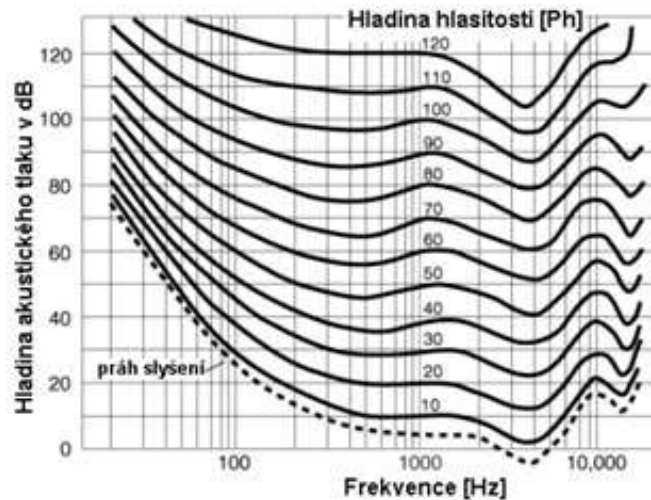
Pre tón s kmitočtom 1kHz môže platiť, že hladina hlasitosti je rovná akustickému tlaku,

$$L_N = L_p \quad (6)$$

a vtedy môžeme hovoriť o referenčnom zvuku. Pre inú frekvenciu ako 1kHz, je nutné stanoviť hladinu hlasitosti porovnaní s referenčným zvukom. (Schauer,2008) Hladina hlasitosti sa

označuje miera hlasitosti zvuku, ktorá sa nevyjadruje v dB ale bola zavedená iná jednotka, fón (Ph). (Ďoubal a Kučová,1997)

Zvuky rovnakej intenzity nemusia mať rovnakú hlasitosť a tiež zvuky rovnakej hlasitosti nemusia mať rovnakú intenzitu. Citlivosť sluchového orgánu závisí na frekvencii. To si môžeme pozrieť na obrázku nižšie. (Dršata et al.,2016)



Obrázok 5 Fletcher-Musonov graf

Zdroj:Minář,2014

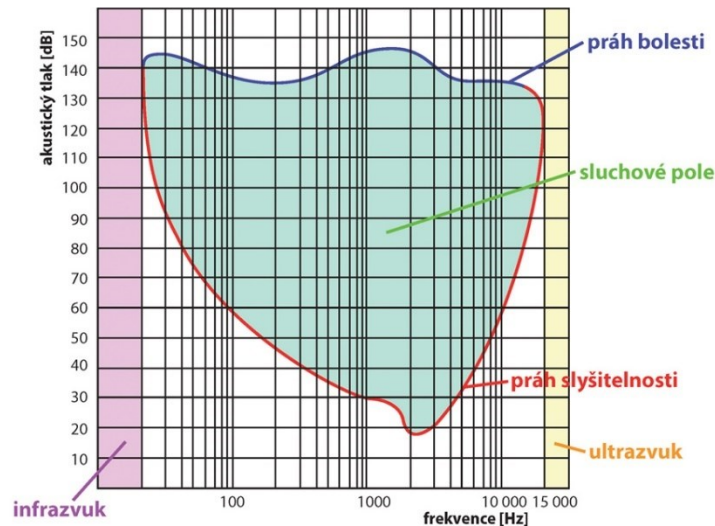
Za základ hlasitosti bola zvolená frekvencia 1kHz, čo je základ pre meranie hlasitosti vo fónoch. (Dršata et al.,2016) Jednotka fón (Ph) je definovaná tak, že pri intenzite 1000 Hz odpovedá hladine hlasitosti 1 fon a hladina intenzity 1 dB. Ide o kvantitatívne vyjadrenie, kde došlo u zdravých osôb k meraniu sluchu o určitej frekvencii. Tým, že človek dokáže rozoznať keď počuje dva zvuky rovnako silno, si môžeme pomocou grafu znázorniť krivkami, ktoré nazývame izofóny (Obrázok 5). Tieto krivky nám dávajú informácie, že zvuky príslušnej frekvencie a intenzity vníma človek rovnako silno čiže izofóny sú krivky rovnakej hlasitosti, potrebnej na vyvolanie rovnakého zvukového vnemu pri rôznych frekvenciách. Izofóny znázorňujú aká musí byť hladina intenzity zvuku, aby sa tón javil rovnako hlasitý pri rôznej frekvencii. Čím viac je hlasitosť väčšia tým viac krivka vyzerá lineárne. (Navrátil a Rosina,2019)

2.3.3 Sluchové pole

Ľudské ucho vníma najčastejšie prirodzené zvuky ako sú hlas, hudba alebo hluk. Tieto prirodzené zvuky vstupujú do sluchového orgánu a sú vnímané u každého jedinca inak. (Hahn,2019)

Frekvencia zvuku, ktorú vníma človek je iná hlavne u starších ľudí alebo u ľudí, ktorí majú poškodenie sluchu. Zdravý človek prevažne vníma zvuk v oblasti od 16-20 000 Hz, sluchový orgán je najcitlivejší v oblasti 1-5kHz. (Navrátil a Rosina,2019)

Oblasť, ktorou človek vníma prirodzené zvuky sa nazýva sluchové pole. Sluchové pole zobrazuje oblasť frekvencií [Hz] a intenzít [dB]. Ako môžeme vidieť na obrázku nižšie tak oblasť sluchového poľa, oblasť reči a hudby sú ohraničené hore prahom bolesti a dole prahom počutia. Vpravo sa nachádza oblasť ultrazvuku, ide o oblasť najčastejšie nad 20 000 Hz, ktorú človek nevníma sluchovým vnemom. Vľavo je oblasť infrazvuku, podobne ako ultrazvuk nie je počuteľná a pohybuje sa v oblasti pod 16Hz. (Navrátil a Rosina,2019; Beneš et al.,2015)



Obrázok 6 Sluchové pole závislosti intenzity na frekvencii zvuku

Zdroj: Čapka, 2018

V predchádzajúcom obrázku je znázornený prah bolesti a prah počutia. Ak ide o prah počutia je to najmenšia intenzita zvuku, ktorú ešte ľudské ucho zachytí. (Rosina,2013) Medzi prahom počutia a bolesti sa nachádza ešte prah nepríjemného počutia. Ide o najnižšiu intenzitu tónu, ktorá môže byť pre človeka nepríjemná a väčšinou sa nachádza v oblasti okolo 100 dB. Ak pri vnímaní zvuku prekročí intenzita hladinu nad 140 dB, tak vzniká intenzívnejší akustický tlak, ktorý môžeme vnímať pomocou sluchových buniek ako bolesť. (Lejska a Havlík,2019)

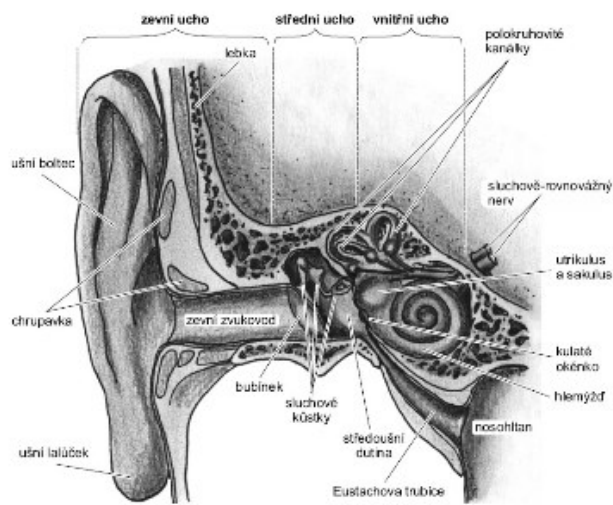
3 Sluch

V nasledujúcich odstavcoch si vysvetlíme ako človek vníma zvuk a ako ho spracováva prostredníctvom sluchového orgánu. Aby sme to pochopili najskôr si popíšeme anatomickú stavbu ucha, jeho časti a ich funkciu a v neposlednom rade si vysvetlíme fyziológiu ľudského sluchového vnímania.

Základným zmyslom, ktorým človek dokáže vnímať zvuky z okolitého prostredia je sluch. Sluch rovnako ako chuť, čuch alebo zrak neustále podáva informácie nielen z vonkajšieho prostredia ale monitoruje aj vlastné zvukové prejavy. To je veľmi dôležité pri vzniku reči. (Langmeier,2009)

Ucho je sluchový orgán, ktorým prijímame mechanické vlnenie, ktoré sa následne prenesie na nervový vzruch. (Beneš et al.,2015) Je prispôsobené tak aby mohlo vnímať mechanické vlnenie o frekvencii 16 – 20 000Hz. Vnímame verbálnu a paraverbálnu komunikáciu. Pod verbálnou komunikáciou si môžeme predstaviť slovo a paraverbálna komunikácia závisí na výške a tóne hlasu, rýchlosti reči či intonácii.(Fiala et al.,2015) Ľudské ucho je párový orgán pozostávajúci z 3 základných častí: (Obrázok 7)

1. Vonkajšie ucho
2. Stredné ucho
3. Vnútorné ucho



Obrázok 7 Stavba sluchového orgánu

Zdroj: Orel,2019

Vonkajšie ucho má za úlohu prevažne ochrannú, slúži ako ochranný filter, následne stredné ucho umožňuje prenášať vibrácie do vnútorného ucha, kde dochádza k premene zvukovej energie na elektrochemický impulz. Následne táto energie prechádza do nervovej dráhy a to do sluchového nervu ktorý je súčasťou sluchovej dráhy a vyúsťuje až do mozgovej kôry. Mechanické vibrácie vytvorené prostredníctvom zdroja prijímajú predovšetkým vonkajšie a stredné ucho, kde vnútorné ucho pracuje skôr s elektrochemickým dejom. (Hahn,2019) V nasledujúcich kapitolách si podrobnejšie popíšeme anatomickú stavbu ucha a ich základné funkcie pri spracovaní zvukovej vlny.

3.1 Vonkajšie ucho

Zvuk vznikajúci zo zdroja zvuku sa prenáša vo forme zvukových vln. Vlny sú zachytené ušným boltcom, ďalej dopadajú na vonkajší zvukovod a následne na membránu bubienka. Energia, ktorá vzniká pri prenose zvuku sa premení na mechanické vibrácie, čo má za následok rozpočybovanie membrány bubienka. (Kittnar,2011)

Ušnica (*auricula*), je umiestnená po stranách hlavy a je tvorená prevažne z elastickej chrupavky. Tvar a poloha ušnice ovplyvňuje to ako človek vníma prichádzajúce zvuky a preto je na strane hlavy uložená v uhle 20 – 40°. (Dylevský,2009)

Poloha nám napomáha rozpoznať odkiaľ daný zvuk prichádza. Na rozlíšení sa podieľa zvukový tieň (Beneš et al.,2015). Pri binaurálnom počúvaní zvuku sa nikdy nemôže stať, že by obe uši ležali v akustickom tieni hlavy, pretože jedno ucha sa vždy nachádza mimo a prijíma plnohodnotný signál, to znamená, že uši prijímajú rozdielnu zvukovú energiu. Taktiež ako vnímame zvuk závisí aj na časovom omeškaní, to ako prvé ucho prijíma zvuk vzhľadom k druhému (Kabátová,2012)

Vonkajší zvukovod (*meatus acusticus externus*) je časť ucha, ktorá má tvar presýpacích hodín a smerom k strednému uchu sa zužuje na priemer okolo 4,6-4,7mm. (Sommerauer et al.,2012) Vonkajšia časť zvukovodu (laterálna) tvorí 1/3 celého zvukovodu. Je tvorená chrupavkou, ktorá je obalená kožou. Na povrchu sa nachádzajú malé mazové žľazy (*glandulae sebaceae*) a tiež apokrinné potné žľazy (*glandulae ceruminosae*) ktoré napomáhajú tvoriť ušný maz a tým zabraňujú prenikaniu nečistoty do stredného ucha. (Orel,2019) Vnútorňá časť (mediálna) tvorí 2/3 zvukovodu a na rozdiel od laterálnej časti nie je tvorená chrupavkou ale kosťou, ktorá je pokrytá kožou. V mieste kde prechádza chrupavková časť na kosť sa nachádzajú malé diery, prostredníctvom ktorých sa môže šíriť infekcia a spôsobiť zápal zvukovodu. VII. a IX. hlavový nerv sa podieľajú na inervácii (Orel,2019; Šlapák a Uhrík,2019)

Vonkajšie ucho a stredné ucho oddeľuje tympanická membrána (bubienok) ktorá je rozdelená na tuhšiu časť *pars tensa* nachádzajúca sa hore a tenšiu časť, ktorá je dole a to je *pars flaccida*. (Munir et al.,2013) Zvukovod z fyzikálneho hľadiska môžeme nazývať tzv. akustickým rezonátorom. Zvuky s kmitočtom rovnakým alebo podobným s rezonančným prechádzajú na zvukovodom a vytvárajú energiu väčšiu v porovnaní s kmitočtom ležiacim mimo rezonančnú časť. Preto výška rezonančného kmitočtu závisí na vlastnostiach zvukovodu a to na prievite a dĺžke. (Kabátová a Profant,2012)

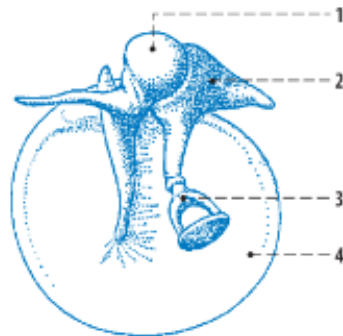
3.2 Stredné ucho

Stredné ucho je tvorené, bubienkom, stredoušnou dutinou pozostávajúcej zo sluchových kostičiek a Eustachovej trubice. Medzi sluchové kostičky zaradzujeme kladivko (*malleus*), nákovku (*incus*) a strmienok (*stapes*).

Bubienok

V niektorých zdrojoch sa uvádza že bubienok je súčasťou stredného ucha, v niektorých je súčasťou vonkajšieho. Ja si dovoľím zaradiť bubienok do časti strednej. Ak ide o bubienok (*membrana tympani*) tak je to väzivová prepážka s priemerom okolo 9 mm. (Fiala et al.,2015) Postavenie bubienka je sklonené, nachádza sa v uhle približne 40-50°, kde predná strana smeruje do stredného ucha a zadná strana smerom do vonkajšieho ucha-zvukovodu.(Čihák,2016) Na bubienok je napojená jedna z troch sluchových kostičiek a to kladivko. Tým, že je kladivko prífahlé k bubienku tak prostredníctvom chvenia spôsobené

zvukovými vibráciami dochádza k rozpohybovaniu kladivka a ďalších dvoch kostičiek. (Beneš et al.,2015) Obrázok 8 znázorňuje tvar bubienka.



Obrázok 8 Bubienok a napojená sluchové kostičky

1.kladivko, 2. nákovka, 3. strmienok, 4. bubienok

Zdroj: Dylevský,2009

Stredoušná dutina

Za bubienkom sa nachádza stredoušná dutina, tiež inak nazývaná aj bubienková dutina (*cavum tympani*). Má tvar hranolu a jej objem je okolo 0,75-1,0 cm³. Nachádza sa v spánkovej kosti a hlavným charakteristickým znakom je, že je vyplnená vzduchom. (Lejska a Havlík,2019) Stredoušná dutina sa delí na *mezotympanum*, *epitympanum* a *hypotympanum*.

- a) *Epitympanum* alebo horná nadbubienková dutina. Ležia v nej menšie časti sluchových kostičiek.
- b) *Mezotympanum* nachádza sa na rovnakej úrovni ako bubienok. V hornej časti sa nachádza miesto oválneho tvaru. Toto miesto predstavuje vstup do vnútorného ucha.
- c) *Hypotympanum* -nachádza sa pod okrajom bubienka a ústi v ňom sluchová trubica (Lejska a Havlík,2019)

V stredoušnej dutine sa nachádzajú aj 2 svaly, ktoré regulujú napätie bubienku. Prvým svalom je *musculus stapedius*. Patrí medzi najmenšie svaly ľudského tela, jeho dĺžka sa pohybuje okolo 7 mm a upína sa na zadnej strane sluchovej kostičky strmienka. Druhým svalom je *musculus tensor tympani*. Jeho poloha je v kostenom kanáliku a upína sa na rameno kladivka (Bargár a Kollár,1986).

Eustachová trubica

Z prednej strany bubienkovej dutiny odstupuje sluchová trubica nazývaná aj Eustachová trubica (*tuba auditiva*). Táto trubica spája nosohltan so stredoušnou dutinou. Jej dĺžka sa pohybuje okolo 4 cm a šírka je okolo 2mm. (Trojan,2003) Je tvorená z kostenej časti

uloženej laterálne a mediálne sa nachádza chrupavkovito väzivová časť.(Hybašek et al.,2020) Eustachová trubica je pokrytá sliznicou tvorenou z cylindrického epitelu s riasinkami ktoré sa pohybujú smerom do nosohltanu. (Čihák,2016) Funkcia Eustachovej trubice spočíva vo vyrovnávaní tlaku. U detí je dĺžka trubice kratšia a tiež je širšia, čo môže spôsobovať infekcie stredného ucha z nosohltanu. K prenosu infekcie často bráni to, že pri vyústení Eustachovej trubice do nosohltanu sú prítomné lymfatické tkanivá, ktorá tvorí nosohltanové mandle. (Křivánková a Hradová,2009)

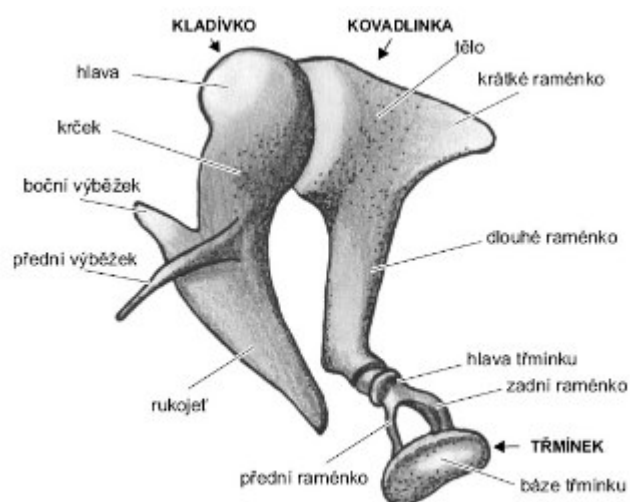
Sluchové kostičky

Sluchové kostičky sú uložené v stredoušnej dutine a sú navzájom spojené jednak prostredníctvom syndesmos, ktoré majú charakter kĺbov a tiež sú pripojené k okolitému prostrediu pomocou ligamenta. Vytvárajú pohyblivý reťazec, ktorý zabezpečuje prenos zvuku od bubienka po oválne okienko. (Obrázok 9)(Čihák,2016; Křivánková a Hradová,2009)

- Kladičko (*malleus*) – je tvorené z niekoľkých častí a to hlavičky, tá je uložená v epitympane, krčku, rukoväti a výbežku. V mozotympane je umiestnená rukoväť a je spojené s vnútornou stranou bubienka. Horná vrstva kladička je pevne spojená s väzovou vrstvou bubienka, stredná časť sa spája so sliznicou (*stria mallearis*) a zadná časť, čiže hlavička je spojená z telom nákovky.

- Nákovka (*incus*)- pozostáva z tela a z dvoch výbežkov. Ako môžeme vidieť na obrázku nižšie tak koniec dlhého výbežku (*processus lenticularis*) je pripojený na hlavičku strmienka.

- Strmienok (*stapes*)- hlavička strmienka sa pripojuje na platničku strmienka, ktorá je napojená na oválne okienko pomocou zadného ramena. (Šlapák a Urík,2019; Dršata et al.,2016)



Obrázok 9 Sluchové kostičky

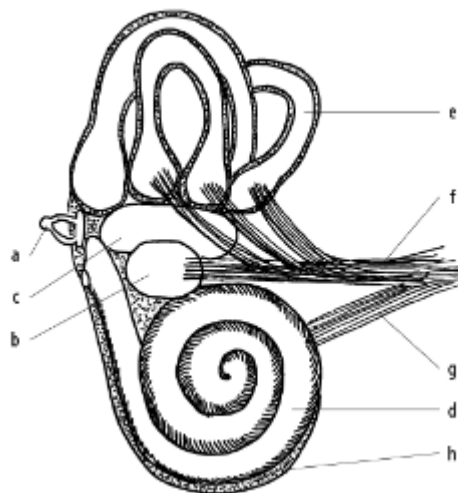
Zdroj: Orel,2019

Kostičky sú navzájom spojené a vďaka svojmu pohybu môžu vykonávať jednu z hlavných funkcií a to zosilnenie akustického zvuku. Pohyb zabezpečuje kladivko spojené s bubienkom. Zvukové vlny vyvolávajú pohyb bubienka regulovaného ťahom spomínaných svalov *musculus tensor tympani* a *musculus stapedius*. Tie sprostredkujú prenos kmitov do perilymfy v labyrinte vnútorného ucha. (Čihák,2016)

Ďalšou funkciou sluchových kostičiek môže byť aj zníženie strát energie, pretože pohyb kostičiek zabezpečuje ochranu vnútorného ucha. Ak do sluchového orgánu prichádza príliš silný zvuk, dochádza k pohybu kostičiek a tie čiastočne môžu svojím pohybom spomaliť alebo utlmiť zvukové vlny. Pohyb kostičiek na druhej strane môže spomaliť napríklad zmena tlaku. V stredoušnej dutine sa nachádza tlak rovnaký atmosferickému tlaku a pri zmene nadmorskej výšky sa môže vychýľovať od normálu a tým pádom nepôsobí na kostičky rovnako. (Dylevský a Ježek,b.r.)

3.3 Vnútorné ucho

Vnútorné ucho (*auris interna*) (Obrázok 10) je uložené v skalnej kosti, ktorá patrí medzi najtvrdšie kosti v ľudskom tele a chráni vnútorné ucho pred poškodením alebo pred otrasmi. (Šlapák,1995) Ide z cela o uzatvorený priestor v ktorom sa nachádza vlastný sluchový orgán. Vnútorné ucho sa skladá z časti kostenné kanálky a dutiny označované ako kostený labyrint (*labyrinthus osseus*). Väčšinou ide o vláknitú kosť. Vo vnútri kosteného labyrintu sa nachádza jednovrstevný plochý až kubický epitel, ktorý tvorí blanitý labyrint (*labyrinthus membranaceus*) (Čihák,2016).



Obrázok 10 Stavba vnútorného ucha

a.) Strmienok b.) saculus c.) utriculus d.) cochlea e.)polkruhovité kanáliky f.)vlákna vestibulárneho nervu g.)vlákny sluchového nervu h.) perilymfa

Zdroj: Křivánková,2019

Kostený labyrint

Ide o súbor chodieb a dutiniek v spánkovej kosti v ktorom sa nachádza blanitý labyrint. Ten je oddelený od kosteného prostredníctvom tekutiny - perilymfy. Tým pádom je zaistené to, že blanitý labyrint „pláva“ v perilymfe čo zabezpečuje tzv. hydraulický efekt, ktorý chráni citlivé bunky pri normálnych činnostiach človeka aby nedošlo k poškodeniu sluchu napríklad pri skokoch do vody alebo pri údere hlavy pri boxe. (Šlapák,1995) Kostený labyrint sa skladá z predsiene, z troch polkruhovitých kanálikov a slimáka (hlemýžď). (Bargár a Kollár,1986)

Blanitý labyrint:

Vo vnútri blanitého labyrintu sa nachádza tekutina zvaná endolymfa. Ide o tekutinu s vysokým obsahom K^+ iontov a v tom sa líši od ostatných extracelulárnych tekutín, pretože tie obsahujú prevažnú časť Na^+ iontov. (Langmeier,2009) Blanitý labyrint plní 2 základné funkcie a to polohovú a sluchovú funkciu. (Bargár a Kollár,1986)

Predsieň (*vestibulum*)

Predsieň, časť kosteného labyrintu má oválny tvar, a tvorí spojenie so stredným uchom. Vo vnútri môžeme nájsť 2 časti blanitého labyrintu a to väčšiu časť *utrículus*, ktorá má vajčkovitý tvar a menšiu časť *sacculus*, okrúhleho tvaru. (Čihák,2016) Zozadu sú napojené *canales semicirculares* – tri polkruhovité chodby, ktoré ležia v dvoch navzájom kolmých rovinách. Dve kanáliky ležia horizontálne a jeden vertikálne. Tieto kanáliky obsahujú bunky zodpovedné za rovnováhu tela. (Hybášek et al.,2020; Lejska a Havlík,2019)

Slimák (*cochlea*):

Dĺžka cochley dosahuje okolo 35 mm, ide o výčnelok stočený špirálovite v $2\frac{1}{2}$ závitú. Má hlavnú úlohu pri spracovaní zvukov. Má kostnú štruktúru v tvare ulity slimáka obsahujúcu vlastný sluchový orgán. V trubici kosteného slimáka sa nachádza blanitý slimák. Priečne sa delí na dve poschodia horné (*scala vestibuli*) a dolné (*scala tympani*), ktoré sú od seba oddelené prepážkou tvorenej z kostenej doštičky. (Kabátová a Profan,2012; Hála a Sovák,1941)

Scala vestibuli, je miesto, ktoré sa vyskytuje nad blanitým slimákom a začína v blízkosti oválneho okienka na ktorý nalieha časť strmienka. *Scala vestibuli* komunikuje a odovzdáva si informácia so *scala tympani* prostredníctvom malého otvoru nazývanom helikotrema. V strednej časti blanitého slimáka sa nachádza *scala media*, ktorá na priečnom priereze má tvar trojuholníka. Zhora je ohraničená prostredníctvom Reissnerovej membrány a zdola prostredníctvom bazilárnej membrány. *Scala tympani* je uložená dole pod blanitým slimákom. (Orel,2019)

Vo vnútri blanitého slimáka sa nachádzajú vláskové bunky Cortiho orgánu. Blanitý slimák pozostáva z troch typov membrán:

- a) Blanitá membrána-napomáha rozdeľovať priestor blanitého slimáka nad Cortiho orgánom

- b) Bazilárna membrána-na membráne sú napojené zmyslové bunky
- c) Krycia membrána nazývaná aj *membrana tectoria* chráni zmyslové bunky Cortiho orgánu a na ktoré sú napojené aj vlákna sluchového nervu (Křivánková,2009)

Cortiho orgán:

Cortiho orgán inak nazývaný aj vlastný sluchový orgán sa nachádza v blanitom slimákoví. Jeho základom sú vysoké Cortiho stĺpce, ktoré sa nachádzajú po celej dĺžke a vytvárajú tzv. tunel. (*Obrázok 11*) Mikroskopickú štruktúru Cortiho orgánu tvoria tri typy buniek a to vonkajšie a vnútorné vláskové bunky a podporné bunky. (Hála a Sovák,1941; Orel,2019)

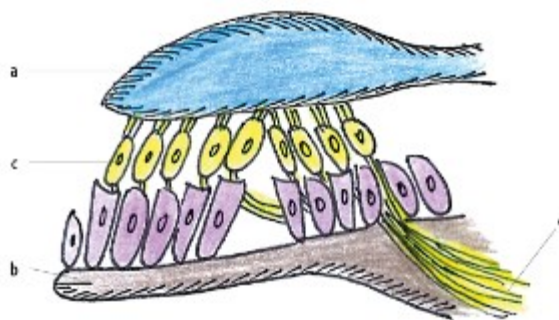
Podporné bunky:

Tieto bunky majú tvar hranolu, obsahujú tonofibrily usporiadané vo zväzkoch. Hlavnou funkciou týchto buniek je metabolická, podieľajú sa na výžive vláskových buniek a tiež zabezpečujú mechanickú ochranu. Vnútorné podporné bunky nazývané aj falangeálne Deitersovy obaľujú vláskové bunky. Vonkajšie podporné bunky sú tvorené rôznymi typmi buniek a to Hensenové cylindrické bunky, kubické bunky Claudiusové a Boettcherové bunky. (Groh,2010)

Vláskové bunky:

Zaraďujeme ich do kategórie akustické receptory, ktoré sú zodpovedné za premenu mechanickej energie o určitej vlnovej dĺžke na bioelektrické prúdy a tie spôsobujú nervové podráždenie. Vlásokové bunky sú usporiadané v štyroch radoch. Vonkajšie bunky sú usporiadané v troch radoch a u človeka sa nachádza približne 12 000 takýchto buniek a vnútorné bunky tvoria jeden rad a dospelý človek má okolo 3 500 buniek. Obidve typy buniek majú na svojej apikálnej strane stereocílie, ktoré sú obklopené endolymfou a ostatné časti buniek sú obklopené perilymfou. Pri nervovom podráždení, za ktoré sú zodpovedné vlásokové bunky vedú nervové vlákna tvoriace sluchovú dráhu a tá ústi do centra mozgovej kôry, kde sú tieto signály zaznamenávané a spracované. (Groh,2010; Rokyta,2015; Šlapák,1995;)

Jedno vonkajšia vlásoková bunka má na svojom apikálnom póle približne 100 – 200 stereocílii, ktoré sú zoradené rovnobežne a pripomínajú tvar písmena W. Najdlhšie stereocílie sa dotýkajú tektoriálnej membrány. Strana týchto buniek je tvorená proteínmi ako aktín, myozin a prestin (zodpovedný za skracovanie alebo predlžovanie stereocílii po chemickom alebo nervovom stimule). Ak ide o vnútorné vlásokové bunky tak tie obsahujú približne 50 stereocílii a na rozdiel od vonkajších sú o niečo kratšie. Na každej bunke sa nachádza iontový kanál, ktorý sa otvorí v prípade ohnutia vlásokových buniek stimulom, to si vysvetlíme v ďalšej podkapitole. (Groh,2010)



Obrázok 11 Cortiho orgán

Zdroj: Křivánková,2019

V niektorých prípadoch okrem premeny energie sa vlásokové bunky môžu podieľať aj na tvorbe zvuku a to tak, že sa môžu zmešovať až o 1/4 svojej dĺžky pričom dochádza k tvorbe vibrácii. Tieto vibrácie môžu byť zaznamenané vonkajším zvukovodom a označujú sa ako otoakustické emisie. Vyšetrenie otoakustických emisií patrí medzi základne vyšetrenia v klinickej praxi. (Šlapák,1995)

3.4 Prenos zvuku - ako počujeme

V predchádzajúcich kapitolách sme si postupne rozobrali jednotlivé časti ľudského ucha, kde sme sa venovali anatomickým vlastnostiam. V tejto podkapitole sa budeme venovať predovšetkým fyziologickým vlastnostiam a to ako sa prenáša zvuk z vonkajšieho prostredia do ľudského ucha a ako ho vníma daný jedinec.

Vnímanie zvuku je proces, ktorý obsahuje jednotlivé stupne:

- Prenos zvukových vln k zvukovým bunkám
- Podráždenie zvukových buniek
- Premena zvukovej energie a následné nervové podráždenie
- Spracovanie nervových impulzov v sluchovom centre (Lejska a Havlík,2019)

Ak ide o vedenie zvuku tak rozlišujeme vzdušné a kostené vedenie. Hlavná cesta alebo inak nazývaná aerotympanálna cesta, je cesta pri ktorej dochádza k vzdušnému vedeniu zvuku za fyziologických podmienok. Akustická energia prechádza vonkajším zvukovodom, bubienkom až sa dostane k sluchovým kostičkám. Tie sa rozkmitajú, dochádza k pohybu perilymfy a energia ďalej prechádza cez *Reissnerovu membranu* do endolymfy, ďalej do *ductus cochlearis*, kde sa nachádza Cortiho orgán, kde nakoniec dochádza k podráždeniu vlásokových buniek. (Jandová,2015)

Okrem vedenia zvuku prostredníctvom stredoušnej dutiny sa zvuk, prenáša do vnútorného ucha rozkmitaním lebečných kostí. Tie sa môžu rozkmitať prostredníctvom ladičky vtedy hovoríme o kostenom vedení. Chvenie spôsobené rozkmitaním prechádza priamo do

blanitého slimáka. Tento prevod je hlavným ukazovateľom správnosti funkcie vnútorného ucha, pretože pôsobí priamo na slimáka. Rozdiel medzi vzdušným a kostným vedením je ten, že kostné ma väčší prah počutia, ktorý sa pohybuje okolo 40 dB a vyššie. (Myslivoček,2020)

Vonkajšia časť ucha a stredné ucha sa z fyziologického hľadiska nazýva aj „prevodné ústrojenstvo“, pretože ich úlohou je prevod zvuku čiže zvukovej energie z vonkajšieho prostredia do tekutiny vo vnútornom uchu. (Bargár a Kollár,1986).

Transport zvuku začína ušnicou pomocou ktorej dochádza k nasmerovaniu zvukových vln a z časti sa uplatňuje aj pri priestorovom počutí. Pri poškodení alebo odstránení ušnice nedochádza k poruche alebo strate sluchu. Dôležitosť ušnice je u niektorých zvierat, ktoré nimi môžu rôzne pohybovať, čo umožňuje lepšie počutie a prežitie v prírode. (Bargar a Kollár,1986; Lejska a Havlík,2019)

Následne zvuková energia prechádza zvukovodom, ktorý slúži ako rezonátor, čiže zosilňuje niektoré tóny. Najčastejšie ide o vysoké alebo vlastné tóny. Ak sa vrátíme k ušnici tak v istej miere aj ona môže slúžiť ako rezonátor. Je to podporované aj tým, že ušnica je tvorená elastickou chrupavkou a tá lepšie vedie zvuky ako kosť. Zvukovod má aj ochrannú funkciu, pretože obsahuje vlásky, mazové žľazy, ktoré zachytávajú nečistoty. Prechodu nečistôt tiež zabraňuje aj to, že zvukovod nie je rovný ale mierne zakrivený. (Hála a Sovák,1941)

Zvukovod je zakončený bubienkom. Zvukové vlny dopadajú na membránu bubienka, dochádza k jej rozkmitaniu. Frekvencia kmitov sa pohybuje okolo 200 kmitov za sekundu a následne sa energia premení na mechanické vibrácie spôsobené pohybom membrány. (Groh,2010) Tým, že kladivko je fixované na membránu, jej pohybom sa dá do pohybu aj kladivko a následne aj ostatné sluchové kostičky a chvenie sa prenáša na oválne okienko. (Kittnar,2011) Ak by medzi vonkajším a vnútorným uchom nebola stredná časť slúžiaca ako zosilňovač, väčšina vln by sa odrazila a do vnútorného ucha by sa vôbec nedostala. Z toho vyplýva, že sluchové kostičky redukujú straty, ktoré by boli spôsobené odrazom a tiež napomáhajú zlepšeniu zvuku o 15-20 dB. (Rokyta,2015)

Zvukové kmity sa neprenášajú tak ako dopadajú na membránu bubienka, za to môže prevodný systém. Pri prenose energie nastáva premena, čo umožňuje lepšie uplatnenie kmitov. Bubienok zachytáva kmity, ktoré sa prenášajú na kladivko a nákovku a následne o čosi menšiu plochu strmienka. Dochádza k zvýšeniu tlaku, ktorý je potrebný aby došlo k prekonaní odporu tekutín vo vnútornom uchu. Ak by človek nemal prevodný systém, tak by sa odrazila väčšia časť energie. (Bargár a Kollár,1986)

Vyšší odpor, ktorý vzniká je spôsobený aj reflexom svalov a to *musculus tensor tympani* a *musculus stapedius*. *Tensor tympani* tlačí kladivko dovnútra a tým pádom strmienok ide proti oválnemu okienku a naopak *musculus stapedius* odťahuje strmienok. Dochádza k zníženiu vibrácii kostičiek a tým pádom sa zhorší prenos zvuku. (Rokyta,2015) Tento proces chráni sluchový orgán pred poškodením pri silnejších zvukoch. (Trojan,2003) Ak dôjde k defektu stredného ucha tak človek môže trpieť čiastočnou stratou sluchu (Groh,2010)

Kmity, ktoré rozpoxybovali sluchovú kostičku strmienok sa prenášajú na tekutinu perilymfu v ktorej sa nachádza blanitý slimák. (Šlapák,1995) Vieme, že všetky priestory v blanitom slimákoví sú vyplnené tekutinou ale zloženie je odlišné v rôznych miestach. Zloženie môžeme vidieť v nasledujúcej Tabuľka 3 (Myslivoček a Riljak,2020)

	Sodík (mmol/l)	Draslík (mmol/l)	Chlór (mmol/l)	Bielekovinové anionty (mmol/l)
S. vestibuli (perilymfa)	150	5	125	0
S. tympani (perilymfa)	150	3	125	0
S. media (endolymfa)	1	150	130	0
vláskové bb. (cytoplazma)	12	155	4	155

Tabuľka 3 Zloženie perilymfy a endolymfy

Zdroj: Rokyta,2015

Ako môžeme vidieť v Tabuľka 3 tak *scala media* je vyplnená endolymfou. Má nízku koncentráciu Na⁺ iontov a vysokú koncentráciu K⁺ iontov a neobsahuje žiadne bielkovinové anionty. Toto zloženie sa podoba intracelulárnej koncentrácii bunkového prostredia. *Scala vestibuli a tympani* sú vyplnené perilymfou. Má vyššiu koncentráciu Na⁺ a nižšiu koncentráciu K⁺ iontov, podobá sa extracelulárnej tekutine. Endolymfa vzniká v *stria vascularis* a perilymfa je tvorená filtrátom plazmy. Filtrát vzniká prostredníctvom kapilár v kostenom labyrinte. (Myslivoček a Riljak,2020)

Membránový pohyb oválneho okienka sa prenáša na tekutinu v hornom kanále v blanitom slimákoví (*scala vestibuli*) vyplnenom perilymfou. Tekutina je nestlačiteľná, čo spôsobuje prenos mechanickej energie na tekutinu v ductus *cochlearis*, rozpoxybuje sa bazilárna membrána a energia prechádza na perilymfu v spodnom kanáliku *scala tympani*. V tomto hrá dôležitú úlohu aj kruhové okienko, ktoré je blanité a je pružným elementom, ktorý umožňuje prenos vln v kvapalnom nestlačiteľnom prostredí. (Rokyta, 2015)

Hlavnou úlohou vnútorného ucha je od seba rozpoznať zvuky a premeniť mechanickú energiu na telu vlastnú čiže bioelektrickú energiu. Ide o perцепciu zvuku. Na bazilárnej membráne sú miesta alebo body, ktoré rozoznávajú jednotlivú výšku tónu. Vysoké tóny podnecujú zmyslové bunky k pohybu najčastejšie na báze slimáka a hlboké tóny dráždia zmyslové bunky v oblasti apexu, inak povedané v oblasti vrcholu slimáka. (Bargár a Kollár,1986)

Podráždením bazilárnej membrány dochádza k chveniu vláskových buniek za vzniku sluchového vnemu. Na tom sa podieľajú predovšetkým vnútorne usporiadané vláskové bunky, ktoré sú spojené neurónmi sluchovej aferentnej dráhy. Pri pohybe bazilárnej membrány sa ohýbajú vnútorné vláskové bunky (stereocilie), ktoré sú napojené na iontové kanály, tie sú mechanicky riadené a to môže meniť permeabilitu membrány. (Langmeier,2009)

Vibrácie oválneho okienka spôsobené zvukovou vlnou, vytvoria tlak v *scala vestibuli* a tento tlak sa šíri pozdĺžnym smerom. Pôsobením priečného a pozdĺžneho tlaku sa začne pohybovať Cortiho orgán a následne sa začnú ohýbať vláskové bunky a ich stereocílie. Tým dochádza k aktivácii iontového kanála, v ktorom vo veľkej časti prúdi K^+ iont. Ionty neprúdia vďaka koncentračnému gradientu ale prostredníctvom elektrického spádu. A tu nám vzniká receptorový potenciál. (Myslivoček,2020)

Tým, že vnútorné vláskové bunky otvorili K^+ kanál, dochádza k uvoľneniu neurotransmiterov na bazálnej strane bunky. Neurotransmitery spôsobia vznik akčného potenciálu na synaptickom dendride neurónu spinálneho ganglia. Tak dochádza k premene alebo transformácii akustickej energie na bioelektrický signál, ktorý sa ďalej transportuje pomocou sluchových nervov. Na prenose sa zúčastňuje sluchový nerv (*n. cochlearis*), ktorý je súčasťou VIII. hlavového nervu. Signál pomocou nervov prenáša zvukové informácie do sluchového centra v mozgu. Po tomto procese dochádza k hyperpolarizácii, uzatvoreniu iontových kanálov, ustáleniu koncentrácií a vláskové bunky sa vrátia do pôvodnej polohy. (Dršata et al.,2016)

4 Ultrazvuk

4.1 História

Technológia ultrazvuku sa neustále vyvíja a v súčasnosti prispieva k dôležitým vylepšeniam v diagnostike a liečbe pacientov. Veda a technológie používané v sonografii majú dlhú a zaujímavú históriu.

Prvým impulzom bol v roku 1880 objav piezoelektrického javu Pierrem Curie. Nasledovalo postupné rozvíjanie ultrazvuku v oblasti priemyslu a na prelome 40. až 50 rokov 20. storočia sa využívanie ultrazvuku dostalo aj do oblasti medicíny. (Malíková,2019)

V rokoch 1947-1948 predstavili rakúsky lekár Karl Dussik a jeho brat Friederick, fyzik, hyperfonografiu, techniku, ktorá pomocou ultrazvuku vizualizovala mozgové komory a pokusili sa diagnostikovať mozgové nádory. (Bell et al.,2020; Newman at al.,1998)

Ako ďalšieho, môžeme uviesť vojenského lekára Georga Ludwiga, ktorý pomocou ultrazvuku zisťoval prítomnosť žlčových kameňov u námorníkov. Ďalšou významnou osobnosťou, ktorá sa zaslúžila vývoj bol Angličan John Wild, ktorý využíval ultrazvuk na diagnostiku poškodenia cievnej steny. (Malíková,2019)

Donald zaviedol ultrazvuk v diagnostike a medicíne v roku 1956, keď pomocou jednorozmerného A-režimu (režim amplitúdy) zmeral temenný priemer hlavy plodu. O dva roky neskôr Donald a Brown predstavili ultrazvukový obraz nádoru ženských pohlavných orgánov. Brown vynašiel takzvaný „dvojrzmerný zložený skener“, ktorý umožnil vyšetrujúce mu vizualizovať hustotu tkaniva, a ten sa často označuje ako zlom v aplikácii ultrazvuku v medicíne. Komerčné použitie ultrazvukových prístrojov sa datuje do roku 1963,

keď boli skonštruované prístroje v režime B („režim jasu“), ktoré umožnili vyšetrujúcemu vizualizovať dvojrozmerný obraz. V polovici sedemdesiatych rokov bola zavedená „šedá škála“ (Kossoff, Garrett), ktorá viedla k zavedeniu ultrazvukových skenerov v reálnom čase. O desať rokov neskôr Dopplerov jav slúžil ako základ pre konštrukciu prístroja, ktorý umožňoval vizualizáciu krvného obehu, Dopplerovho ultrazvuku s farebným tokom. (Bell et al.,2020)

4.2 Charakteristika

Ultrazvuk sú zvukové vlny s frekvenciou nad 20 000 Hz. Tieto zvukové vlny sú pre človeka nepočuteľné a sluchový orgán ich nezachytí. Napriek tomu na Zemi žijú zvieratá, ktoré tieto zvuky zachytia a počujú zvuky aj o vyššej frekvencii. (Rosina,2013) Napríklad pes vníma zvukové vlny do 30 000 Hz a mačka až do 50 000Hz. (Beneš et al.,2015) Neobvyklým príkladom je netopier, ktorý prostredníctvom jazyka vytvára krátkodobé ultrazvukové vlny vo frekvencii nad 100 000Hz. Tieto vlny dopadnú na prekážku, kde sa odrazia a netopier zachytí odrazené vlny a inštinktívne môže určiť v akej vzdialenosti sa daná prekážka môže vyskytovať. Okrem zvierat, sa systém odrazených vln môže využívať pri rybárskych sondách, kde dochádza k vysielaniu ultrazvukových vln a následne sa meria čas odrazeného signálu. Tieto sondy môžu skúmať morské dno. (Rosina,2013; Beneš et al.,2015)

Ultrazvuk sa môže uplatniť aj v rôznych oblastiach v zdravotníctve a v porovnaní s röntgenovými metódami ide o neinvazívnu a dostupnú diagnostickú metódu. Podľa účinku sa môže rozdeliť na pasívny a aktívny. Pasívny ultrazvuk sa najčastejšie využíva pri diagnostike makroskopických štruktúr. Aktívny ultrazvuk narozdiel od pasívneho využíva väčší akustický výkon a pri šírení ultrazvukovej vlny prostredím sa prejavujú jeho fyzikálne a chemické účinky. Sem zaradíme napríklad ultrazvukové čistenie alebo ultrazvukové terapie. (Valkovičová et al.,2016)

4.3 Fyzikálne vlastnosti ultrazvuku

Z fyzikálneho hľadiska je ultrazvuk mechanické vlnenie, pri ktorom sa častice v prostredí rozkmitajú a predávajú si navzájom energiu. Šírenie ultrazvukovej vlny závisí hlavne na prostredí ktorým prechádza. (Malíková,2019) Môže ísť o pozdĺžne vlnenie, to sa z medicínskeho hľadiska šíri prevažne v mäkkom tkanive a teľných tekutinách. Priečne vlnenie sa šíri v pevných látkach ako sú kosti alebo na povrchu kvapaliny. (Hrazdira,2011) V medicíne, hlavne pri diagnostike sa využíva pozdĺžne vlnenie o frekvencii radovo 10^5 - 10^7 Hz. V prostredí sa dané ultrazvukové vlnenie popisuje vzťahom, ktorý sme tu už zmienili a to vzorcom 1 (Navrátil a Rosina,2019)

Ďalšou dôležitou veličinou je rýchlosť šírenia. Obecne platí, že vlnenie sa najlepšie šíri v hmotnom prostredí a častice, ktoré tvoria prostredie majú voľné väzby a nemajú medzi sebou veľkú vzdialenosť. Najhoršie sa šíri ultrazvuková vlna v plynnom prostredí dôsledkom

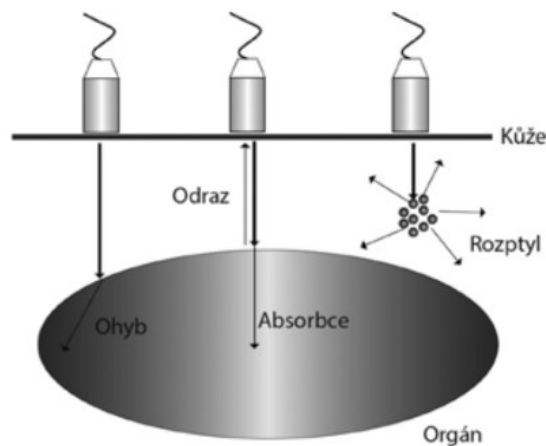
veľkej vzdialenosti medzi časticami a tým pádom nemôže dochádzať k predaniu energie. (Malíková,2019)

Rýchlosť závisí aj na teplote, hustote prostredia, pretože čím väčšia je hustota tým je vyššia rýchlosť. Ak sa vlna šíri v biologickej matrici , tak rýchlosť závisí na jej vlastnostiach. Vyjadruje sa to vzťahom:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \quad (7)$$

kde v je rýchlosť šírenia vlny, κ modul objemovej pružnosti a ρ je hustota v kg/m^3 (Pejchal,2013)

Pri svojom šírení sa vlna na rozhraní 2 prostredí sa môže odrážať, ohýbať, lomiť, rozptyľovať alebo absorbovať (Obrázok 12) (Bellew et al.,2016)



Obrázok 12 Interakcie ultrazvukovej vlny v tkanive

Zdroj: Malíková,2019

Závisí to hlavne na vlastnostiach prostredia. K odrazu ultrazvukovej vlny väčšinou dochádza na odrazových plochách inak povedané na akustickom rozhraní, ak existuje rozdiel hustôt na rozhraní oboch prostredí čiže ak ide prostredím s rôznou akustickou impedanciou. Uhol odrazu je rovný uhlu dopadu a intenzita odrazu je väčšia čím je rozdiel hustôt väčší.

K lomu dochádza, ak ultrazvuková vlna nedopadá na prostredie kolmo a prostrediami prechádza rôznou rýchlosťou. Prvým prostredím prechádza rýchlosťou v_1 a druhým prostredím rýchlosťou v_2 , tým pádom sa zmena rýchlosti môže prejavovať aj ako zmena smeru. Ak ultrazvuková vlna prichádza z akusticky redšieho prostredia do akusticky hustejšieho tak vlna sa láme od kolmice a ak vlnenie prechádza z akusticky hustejšieho do akusticky redšieho prostredia tak sa láme ku kolmici. Je to naopak ako pri optike.(Hrazdira,2011; Malíková,2019; Jüttnerová a Bryjová,2015/16)

Ak sa ultrazvuková vlna absorbuje v prostredí, automaticky stráca svoju energiu a mení sa na energiu tepelnú. Pri diagnostickom stanovení je absorpcia nevýznamná. (Hrazdira,2011)

V neposlednom rade, dochádza k rozptylu zvyčajne ide o Rayleighov rozptyl. Ultrazvuková vlna, smeruje všetkými smermi v dôsledku toho, že vlnová dĺžka je väčšia ako rozhranie na ktoré dopadá ultrazvuková vlna. Malé rozhranie môžu tvoriť v tele napríklad erythrocyty. (Musil et al.,2008)

Najväčšiu úlohu hrá rozptyl a odraz vlny, pomocou nich dochádza k vzniku ultrazvukového obrazu zatiaľ čo pri absorpcii a ohybe, môžu vznikať ultrazvukové artefakty. Ide o zmeny v obraze, ktoré neodpovedajú skutočnosti. Pri vyšetrení ultrazvukom vnikajú rôzne druhy artefaktov, ktoré je vedieť rozoznať od skutočného obrazu. (Jüttnerová a Bryjová,2015/16)

4.4 Generátory ultrazvuku

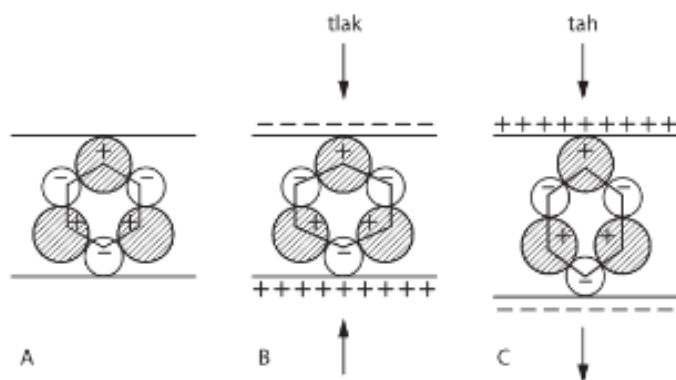
Ultrazvukové generátory sú hlavným zdrojom ultrazvukového vlnenia, ktoré vzniká prostredníctvom pravidelne sa opakujúceho elektrického prúdu, dochádza k rozpínaniu a zmenšovaniu vln a následnému vzniku mechanického vlnenie. Ultrazvukové generátory sú doštičky vyrábané z kremeňa alebo syntetického materiálu. (Seidl,2012) Zaraďujeme tam mechanické, piezoelektrické a magnetostrikčné generátory, ktoré sa líšia svojimi vlastnosťami.

Mechanické generátory sa v diagnostike veľmi nepoužívajú. Najčastejšie ide o píšťaly alebo ladičky, ktoré vykazujú frekvenciu do 40 000Hz. Princípom mechanického generátora je rotácia súčiastky uloženej excentricky, ktorá pôsobí mechanicky na ďalšie časti ultrazvukovej hlavice. Dochádza k opakovanej kolízii, ktorá je mechanická za vzniku akustickej vlny. Akustická vlna má rovnakú frekvenciu ako frekvencia excentrickej súčiastky. (Valkovičová et al.,2016)

Magnetostrikčné generátory vykazujú magnetostrikciu. Ide o fyzikálny jav feromagnetických materiálov, kde môžeme zaradiť železo, nikel alebo ich zliatiny a tieto materiály sú schopné meniť svoje vlastnosti, hlavne rozmery v magnetickom poli. (Musil et.al.,2008) Princípom týchto generátorov je prítomnosť tyče z feromagnetu, ktorá je umiestnená v magnetickom poli elektromagnetu napojenom na striedavý prúd a dochádza k dĺžkovej zmene tyče. Generujú ultrazvukové vlny o frekvencii niekoľko tisíc Hz. Využívať sa môžu najmä v stomatológii na odstránení zubného povlaku alebo kazu, alebo v ultrazvukovej chirurgii.(Beneš et.al.,2015; Pejchal,2013; Kabeš,2007)

Ďalším typom je piezoelektrický generátor, ktorý využíva k svojej funkcii piezoelektrický jav. Ten sa môže deliť na priamy alebo nepriamy, v diagnostike sa najviac využíva nepriamy typ generátora. Aby sme si vysvetlili ako funguje tento druh ultrazvukového generátora musíme si vysvetliť základný princíp piezoelektrického javu.

Pri piezoelektrickom jave dochádza k vzniku elektrickej polarizácii látky. Látka je tvorená prevažne polárnymi molekulami a k polarizácii dochádza buď stlačením alebo roztiahnutím danej látky ak je látka umiestnená vo vhodnom elektrickom poli. Môžeme to vidieť na Obrázok 13.



Obrázok 13 Ukážka piezoelektrického javu

A-normálny stav molekuly B-stlačenie molekuly C- roztiahnutie molekuly

Zdroj: Chudáček,1993

Tým pádom vznikajú oproti sebe na stranách dielektrika, čiže látky ktoré sú polarizované opačným nábojom. Ide teda o priamy piezoelektrický jav. Ak na dielektrikum vložíme vysokofrekvenčný striedavý prúd, tak látka sa pod vplyvom náboja zmršťuje alebo rozpína a vykonáva kmitavý pohyb. Vtedy hovoríme o nepriamom piezoelektrickom jave. (Rosina,2013)

Piezoelektrické generátory najviac využívajú nepriamy piezoelektrický jav. Ako látka s nábojom sa v minulosti využívala Siegetova soľ. V dnešnej dobe sa využívajú väčšinou výbrusy kremenných kryštálov alebo keramické výbrusy (z titaničitanu bárnateho). (Ďoubal a Kučová,1997)

Pomocou doštičky z kremeňa, alebo aj iného piezomateriálu má generátor na svojich koncoch pripevnené elektródy, pomocou ktorých je privádzané vysokofrekvenčné striedavé napätie dochádza ku kmitaniu doštičky a premene chemickej energie na mechanickú o určitej frekvencii. Frekvencia závisí na frekvencii privádzajúceho napätia. Pomocou vzniknutej mechanickej energie dochádza k rozkmitaniu prostredia v ktorom sa nachádza doštička. Dochádza k deformácii a vysielajú sa ultrazvukové vlny. Intenzita zvuku vysielanej vlny sa môže pohybovať v okolí 10 W.cm^{-2} . Tento dej sa môže diať aj opačne a to tak, že ultrazvukové vlny môžu dopadať na piezomateriál, ktorý sa deformuje a vzniká elektrické napätie. (Beneš et al.,2015; Chudáček 1993)

4.5 Účinky ultrazvuku

Účinky ultrazvuku môžeme popísať ako absorpciu energie prostredníctvom tkaniva. Ako sme už v predchádzajúcich kapitolách zmienili tak absorbovaná energia závisí hlavne na prostredí, na frekvencii resp. na vlnovej dĺžke a na ploche. (Rosina,2013)

Účinky ultrazvuku sa dajú rozdeliť do dvoch základných skupín a to na biologické a fyzikálne. Tiež rozlišujeme priame a nepriame účinky ultrazvukového poľa. Priame účinky sú také, ktoré vznikajú pôsobením ultrazvuku a nepriame môžu vznikať aj bez prítomnosti

ultrazvukového poľa a pôsobia na tkanivá napríklad prostredníctvom ozvučeného prostredia. K fyzikálnym zaraďujeme tepelné, mechanické a disperzné účinky. (Hrazdira a Mornsstrein,2004)

Biologické účinky:

Tieto účinky popisujú ako biologické tkanivo reaguje s ultrazvukovými vlnami. V závislosti od intenzity ultrazvukovej vlny pôsobiacej na tkanivo, môžu mať pozitívny, reverzibilný alebo ireverzibilný vplyv na funkciu. Intenzitu od $0,1 \text{ W.cm}^{-2}$ do $1,5 \text{ W.cm}^{-2}$ radíme do skupiny s pozitívnym vplyvom. Účinky ešte s reverzibilnými vlastnosťami sú do 3 W.cm^{-2} a k ireverzibilným zmenám dochádza pri intenzite viac ako 3 W.cm^{-2} . (Navrátil a Rosina,2019)

Ide o komplexný jav vznikajúci hlavne kombináciou mechanických, tepelných a chemických účinkov, ktoré si popíšeme neskôr. Pôsobením ultrazvukových vln môže dochádzať k negatívnym a aj pozitívnym reakciám ako je stimulácia alebo inhibícia čoho výsledkom môžu byť aj štruktúrne zmeny ako sú rozpad erytrocytov, zhlukovanie bielkovín poprípade zmena konformácie biomakromolekúl. (Beneš et al.,2015) Ďalej dochádza k zmenám pH, poruche vodivosti nervov alebo zvýšeniu permeability tkanív. (Ďoubal a Kučová,1997)

Tepelné účinky:

Tepelné účinky sa môžu vyskytovať pri bežnom vyšetrení ultrazvukom. Dochádza k ohriatiu tkaniva na základe absorpcie energie, ktorá je následne premenená na teplo. Ohriatie tkanív je bezprahové. (Hrazdira,2008) Množstvo tepla uloženého v tkanive sa dá vyjadriť vzťahom

$$Q=2.\alpha_A.l \quad (8)$$

kde Q je množstvo tepla, α_A absorpčný koeficient daného prostredia a l je akustická intenzita. Tento vzťah nám vyjadruje, množstvo tepla za jednotku času v danom prostredí, ktoré je úmerné absorpčnému koeficientu a intenzite. (Navrátil a Rosina,2019)

Chemické účinky:

Pomocou ultrazvuku môže dochádzať napríklad k urýchlení chemických reakcii, štiepení väzieb vysokomolekulárnych látok alebo k polymerizácii látok. Pomocou vysokej intenzity ultrazvukových vln, môže ultrazvuk napomáhať k rozpustnosti málo rozpustných látok ako sú napríklad liečivá vo vode alebo k rozptýleniu iných látok. Ultrazvuk sa môže taktiež využívať aj na tvorbu emulzii, suspenzií v inhalačných prístrojoch. (Rosina,2013)

Mechanické účinky:

V neposlednom rade medzi fyzikálne účinky ultrazvuku zaraďujeme aj mechanické. Ak prostredím prechádza ultrazvuková vlna tak tá môže spôsobovať zmeny, ide hlavne o zmeny

lokálneho charakteru kam patria tlakové zmeny. Zmeny v tlaku dosahujú prevažne radovo až niekoľko MPa/mm. (Beneš et al.,2015)

Mechanické účinky, môžu mať nie len na ľudský organizmus nežiaduci efekt. Medzi hlavné nežiadúce vplyvy sa zaraďuje kavitácia. Ak sa zvolí nesprávna hodnota intenzity ultrazvukovej vlny (kavitácia je prahovým javom) ktorou pôsobíme, môže dochádzať k ireverzibilným zmenám. Pri kavitácii v prvom rade dochádza k tvorbe dutiniek väčšinou v kvapalnom prostredí pri zmene okolitého tlaku spôsobeného prostredníctvom mechanických ultrazvukových vln. (Hrazdira,2008; Valkovičová et al.,2016)

Rozoznávame dva druhy kavitácie a to pseudokavitáciu a kolabsovú. Pri pseudokavitácii nedochádza k ireverzibilným efektom ale môže dochádzať k periodickým zmenám v objeme a tlaku. Pri kolapsovej kavitácii dochádza k zániku dutinky pričom sa uvoľní väčšie množstvo energie, stúpne teplota až k hodnotám 3000 K, zvýši sa tlak a vznikajú voľné radikály, ktoré môžu poškodzovať biologické štruktúry. (Valkovičová et al.,2016)

4.6 Diagnostické využitie ultrazvuku

Uplatnenie ultrazvuku je hlavne v lekárskej oblasti. Využíva sa hlavne na diagnostiku ale môže mať aj terapeutické využitie. V diagnostických metódach sa pracuje s pojmom ultrasonografia. Využíva predovšetkým nepriame metódy čo znamená, že registruje len akustické rozhranie. Akustické rozhranie sa najlepšie zobrazí ak dve prostredia majú rozdielne fyzikálne vlastnosti. (Sucharda a Zlatohlávek,2015)

Lekári majú k dispozícii veľké množstvo zobrazovacích nástrojov ako počítačová tomografia (CT), pozitronová emisná tomografia (PET), magnetická rezonancia (MRI). Zo všetkých týchto techník patrí ultrazvuk medzi najefektívnejšie a najbezpečnejšie. Ultrazvuk môže poskytovať snímky v reálnom čase (približne 15-20 snímok za sekundu) bez toho aby pacient bol vystavovaný opakovaným dávkam žiarenia ako je tomu napríklad pri CT. Preto patrí ultrazvuk medzi prvé možnosti, ktoré lekári využívajú k hodnoteniu, diagnostike a liečbe pacienta. (De Leon et al., 2018)

Udáva informácie o tvare, veľkosti skúmanej štruktúry, ohraničení, uložení orgánov v tele človeka. Tiež nám môže ukázať patologické stavy ale nenahrádza úlohu histológie alebo cytológie. Využíva sa na vyšetrenie brušnej dutiny, žalúdka, pankreasu, tenkého a hrubého čreva. Zaisťuje zobrazenie srdca, kde lekár môže odhaliť nedomykavosť chlopne alebo určí hrúbku ciev poprípade prúdenie krvi v jednotlivých tepnách a žilách. Ultrasonografia má širokú škálu uplatnenia. (Sucharda a Zlatohlávek,2015)

Výšetrovacie metódy môžu byť invazívne alebo neinvazívne. Neinvazívne metódy sa používajú pri zobrazení parenchymatóznych orgánov alebo oblasti vyplnenej tekutinou. Pri parenchymatóznych orgánoch sa podľa polohy sondy orgán ukazuje v priečnych, pozdĺžnych alebo iných priestorových zobrazeniach. Pre oblasti vyplnených tekutinou, slúži často na odhalenie patologických stavov, ako je napríklad cista alebo aneurizmy. Ak ide o invazívne

vyšetrovacie metódy, tie sú využívané pri terapeutických metódach. Tam sa zaraďuje endokavitálne vyšetrenie, kde sa používajú malé sondy zavedené do oblasti malej panvy. Tiež sa využívajú rektálne, vaginálne a vezikálne sondy. Ďalšie uplatnenie je pri biopsii kde ultrazvuk napomáha správne zavedeniu ihly a získaniu tkaniva pre histologické vyšetrenie. (Kukurová a Kráľová,2004)

4.7 Ultrazvuková technika v diagnostike

V diagnostickom obore sa využívajú rôzne typy ultrazvukov. Obecne ale platí, že každý ultrazvuk pozostáva z počítačovej jednotky obsahujúcej monitor a ovládací panel, ultrazvukové sondy a gél. Na monitore sa zobrazí obraz, ten má rôzne druhy módov, ktoré si popíšeme v nasledujúcich kapitolách. (Malíková,2019)

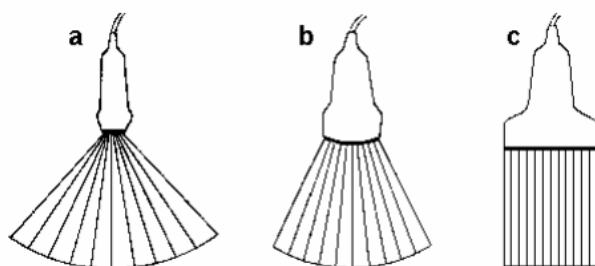
4.7.1 Ultrazvukové sondy

Väčšina ultrazvukových sond pracuje na princípe piezoelektrického javu. Sonda obsahuje kryštály, ktoré vysielajú ultrazvukové vlnenie do tela. Pôsobením striedavého elektrického prúdu sa kryštál deformuje a tým dochádza k tvorbe vibrácii, čiže dochádza k tvorbe mechanického vlnenia. Mechanické vlnenie sa v tele odráža a odrazené vlny zachytáva sonda, ktorá slúži ako vysielateľ a zároveň ako prijímač. (Ferda et al.,2015) Sonda z celkové diagnostického času vysielala približne v 1% vlnenia a 99% svojho času zachytáva odrazené ultrazvukové vlny. (Nalos a Mach,2010) To, že ultrazvuková sonda vysielala elektrický signál a mení ho na akustický a pri zachytávaní je to naopak je prostredníctvom meniča v sonde. (Navrátil a Rosina,2019)

Sondy majú rôzny tvar čo hrá dôležitú úlohu pri diagnostike. Podľa tvaru rozoznávame lineárne, konvexné a sektorové sondy (*Obrázok 14*). Medzi najjednoduchšie typy sond zaraďujeme lineárne a to z dôvodu, že obsahuje meniče ktoré sú lineárne uložené za sebou ako môžeme vidieť na obrázku *Obrázok 14c*. (Valkovičová et al.,2016) Tento druh sondy sa využíva na zobrazenie štruktúr nachádzajúcich sa v blízkosti povrchu napríklad na zobrazenie lymfatických uzlín alebo prsných žliaz (Jüttnerová a Bryjová,2015/16)

Ďalším typom je sektorová sonda. Využíva frekvenciu v oblasti 2-3MHz. Má vejárovitý tvar a používa sa na zobrazenie orgánov, kde sa dostane malé množstvo ultrazvukových vln. Najčastejšie ide o medzirebrený priestor na zobrazenie srdca alebo pečene. (Ferda et al.,2015;

Medzi ďalší druh sondy sa môže zaradiť konvexná sonda. Najčastejšie sa používa vo frekvencii okolo 3,5-5 MHz. Použitie endobronchiálneho ultrazvuku s konvexnými sondami prinieslo revolúciu v bronchoskopii. Poskytuje možnosť relatívne bezpečného a minimálne invazívneho prístupu k hodnoteniu rôznych ochorení. V súčasnej praxi má výrazný vplyv na diagnostiku a stanovenie štádia rakoviny pľúc. (Avasarala et al.,2020)



Obrázok 14 Druhy ultrazvukových sond

a-sektorová sonda; b-konvexná sonda; c-lineárna sonda

Zdroj: Hrazdira,2008

Následne sa v medicíne využívajú špeciálne typy sond ako je transesofageálna na vyšetrenie srdca, transrektálna- vyšetrenie konečníka a prostaty, transvaginálna – na vyšetrenie ženských pohlavných orgánov a oblasti malej panvy. Špecifickým typom sondy sú miniatúrne, ktoré využívajú vysoké hladiny frekvencie medzi 30-40 MHz a zavádzajú sa do dutých orgánov a pozoruje sa ich stena. (Hrazdira a Mornstein,2004)

Ak dochádza k vyšetreniu tak medzi sondou a povrchom tela je daný gél. Je potrebné vytvoriť kvapalné prostredie inak by sa medzi sondou a telom vytvorila vrstva vzduchu a tá by neumožnila aby ultrazvuková vlna prešla skrz kožu. (Ferda et al.,2015)

Ďalším dôležitým faktorom pri zobrazení pomocou ultrazvuku je pohyb sondy. Rozlišuje 3 základné pohyby:

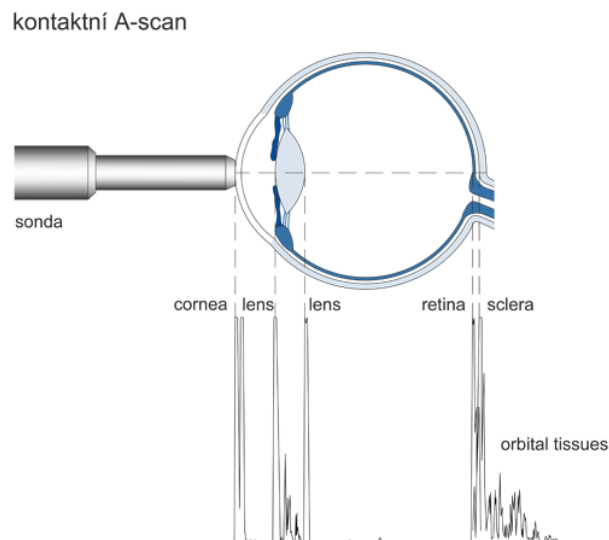
- Statický- sonda sa priloží na miesto, ktoré chceme zobraziť a nehýbeme s ňou. Tento princíp sa používa čo najmenej, pretože nie vhodným diagnostickým ukazovateľom
- Semistatický- sondou sa krúži okolo postihnutého miesta, čo nám prezradí viac o štruktúre tkanív, ktoré pozorujeme
- Dynamický- tento spôsob je najpoužívanejší, pretože sonda sa môže pohybovať napríklad aj po väčšej časti tela. (Beneš et al.,2015)

4.7.2 Zobrazovacie módy ultrazvuku

Ako sme si v predchádzajúcich kapitolách popísali, tak ultrazvukový prístroj obsahuje monitor na ktorom sa nám graficky zobrazí daná štruktúra alebo orgán, ktorý hodnotíme. Využívajú sa rôzne druhy módov na základe toho akú štruktúru hodnotíme.

Medzi najzakladanejší a najjednoduchší typ zobrazenie patrí jednorozmerné zobrazenie. Tam sa zaraďuje zobrazenie v A-móde (z anglického slova *amplitude mode*). Hlavným charakteristickým znakom tohto módu je záznam amplitúdy, čiže výchylky, ktorý sa zobrazí vo forme píkov na časovej ose. (Penhaker a Augustynek,2013) Princípom je, že sonda vyšle signál, ktorý sa odráža na rozhraniach v rôznej vzdialenosti a odrazené signály vrátia

k sonde. Veľkosť píku nám udáva množstvo energie, ktorá bola odrazená a poloha píku zodpovedá miestu odrazu. (Rosina,2013) Tento typ zobrazenia sa najčastejšie využíva v oftalmológii. (Malíková,2019) Pre lepšiu predstavu je daný mód vyobrazený na obrázku nižšie.



Obrázok 15 A-mod pri vyšetrení oka

Zdroj: Jüttnerová a Bryjová,2015/16

Ultrazvuk je užitočným nástrojom na diagnostiku oka. Je lacný, ľahko prístupný, neškodný, presný, nevyužíva žiadne žiarenie. Využíva sa aj pri štúdiu stavov oka. Jeho hlavnou indikáciou pre použitie je napríklad krvácanie do sklovca alebo extrémna mióza, kedy sa nemôžu využívať oftalmoskopické metódy. (Lorente-Ramos et al.,2006)

Kontraindikácia pri vyšetrení oka ultrazvukom nie je častá. Medzi minimálne kontraindikácie sú prasknutie očnej gule hlavne u pacientov s traumou alebo u pacientov, ktorý nedávno podstúpili operáciu. V takýchto prípadoch sa nevolí ako prvá voľba ultrazvuk ale počítačová tomografia. (Lorente- Ramos et al.,2006)

Pri ultrazvuku s A-módom je niekedy obtiažné hodnotiť a popísať vzťahy medzi jednotlivými časťami oka. Pri vyšetrení oka je sonda priložená na povrch oka, kde je nanosené väčšie množstvo gélu. Preto bol vyvinutý 3D ultrazvuk, ktorý umožní precíznejšie vyšetrenie hlavne predného segmentu oka a ktorý nám ukáže polohu šošovky. Taktiež ak sme v počítači nastavili rôzne druhy parametrov, je možné pomocou softwarových úprav získať virtuálny obraz oka, ktorý nám poskytne údaje, ktoré by sa bežným ultrazvukom nedali zistiť. (Čmelo,2008)

Ultrazvuk oka poukazuje na rôzne ochorenia. Táto technika je efektívnejšia ako iné diagnostické techniky a je dobre tolerovaná. Rutinné vyšetrenie oka pomocou ultrazvuku sa nevykonáva často ale môže slúžiť o doplnenie informácii u pacientov. (Bedi DG et al.,2006)

Ďalším typom zobrazenia patrí B-mód. Tu rozlišujeme statické alebo dynamické zobrazenie. Hlavným rozdielom je, že pri statickom zobrazení sa stále využíva jednorozmerný obraz, zatiaľ čo pri dynamickom došlo k modifikácii a využíva sa dvojrozmerné zobrazenie. Taktiež statický B-mód sa od klasického A-módu líši tým, že odrazené vlny od jednotlivých štruktúr sú zachytené prijímačom (sondou) a zobrazujú sa na obrazovke ako body, ktoré majú rôzny jas. Čím je väčší jas na monitore tým je väčšia intenzita ultrazvukových vln, ktoré boli odrazené od skúmanej štruktúry alebo orgánu. (Navrátil a Rosina,2019; Pejchal,2013)

Medzi dvojrozmerné zobrazenie zaraďujeme dynamický B-mód (z anglického slova *brightness*). Má podobný princíp ako zobrazovanie v A-móde ale obsahuje prvok navyše, ktorým je pozdĺžne skenovanie čo umožňuje získať niekoľko záznamov vedľa seba v reálnom čase. (Resl et al.,2008) Tento druh zobrazenia, patrí medzi najčastejšie využívané. Hlavným charakteristickým znakom je, že vzniknutý obraz je vo forme pixelov inak povedané vo forme svetelných bodov. (Rosina,2013) Tieto svetelné body majú, niekoľko odtieňov sivej (128-256 odtieňov). Každý odtieň zodpovedá intenzite odrazu. Pri hodnotení sa zameriava hlavne odraz. Ak daná štruktúra nevytvára žiaden odraz, označuje sa ako anechogenna. Môže ísť o štruktúry ako sú napríklad cysty, ktoré sú vyplnené tekutinou.(Ferda et al.,2015) Tento druh zobrazenia sa využíva aj v dermatologickom výskume a stále viac sa uplatňuje v klinickej praxi. V dermatológii sa prevažne zaoberá zobrazovaním echografického obrazu kožnej štruktúry, ktorý znázorňuje príslušnú oblasť kože. Rozlišuje *epidermis*, papilárny alebo *horný dermis*, *subcutis* a podľa hrúbky kože môže dosiahnuť až na kosť. (Resl et a., 2008)

C-mód vytvára trojrozmerný obraz a princípom sú generované ultrazvukové vlny, ktoré vznikajú podobne ako pri B-móde, plus obsahujú ešte ďalšie vlny, ktoré sa zameriavajú predovšetkým na oddelené hĺbky. Každý signál poskytuje odraz paralelne s povrchom kože a vytvára tak 3D obraz. Tento obraz sa môže získať aj spojením niekoľkých obrazov z B-módu. Tieto obrazy však musia byť paralelné. Tento typ skenu sa najčastejšie využíva pri rekonštrukcii tumorov. (Resl et al., 2008)

M-zobrazenie (z anglického slova *motion mode*) sa využíva hlavne k zachyteniu pohybujúcich sa štruktúr. Sleduje predovšetkým rýchlosť a rozsah tkáňových štruktúr. (Pejchal,2013; Panhaker a Augustynek,2013)Princípom je, že využíva predovšetkým dáta B-módu nasledujúce za sebou v čase. (Rosina,2013) Tento typ zobrazovanie sa využíva najčastejšie v kardiológii na zobrazenie a stanovenie činnosti srdca a srdечných chlopní. Tento typ záznamu môže byť u modifikovanejších prístrojoch doplnený aj o krivku EKG, čo nám dáva komplexnejšie informácie a tým pádom dochádza k lepšej diagnostike. (Panhaker a Augustynek,2013)

4.8 Dopplerov efekt

Ďalším typom ultrazvukového zobrazenia, ktorý sa využíva je Dopplerov jav. Ako prvý tento efekt popísal, rakúsky fyzik Christian Johann Doppler. V roku 1842 sa Dopplerov jav prvýkrát použil v medicíne na výpočet rýchlosti krvného toku. (Musil et al.,2008)

Dopplerov efekt, je fyzikálny jav, ktorý sa využíva pre kvantitatívne a kvalitatívne vyšetrenie krvného obehu. Tento jav popisuje ako sa mení frekvencia zvuku, ktorý je produkovaný určitým objektom vzhľadom k detektoru. Objekt, ktorý produkuje zvuk sa pohybuje a môže sa vzdďaľovať alebo približovať. V reálnom živote to môžeme popísať na príklade húkajúcej sanitky, ktorá ak sa k nám približuje počujeme zvuk o vyššej frekvencii a keď sa vzdďaľuje tak počujeme zvuk o nižšej frekvencii. (Maliková,2019)

Z fyzikálneho hľadiska, je to daná vlnová dĺžka elektromagnetického alebo mechanického charakteru (zvuk, ultrazvuk) vysielaná zdrojom a prijímač ju vníma inak (znížené alebo zvýšene). To závisí predovšetkým od toho, že zdroj a prijímač menia svoju vzdialenosť. Pri ultrazvukových vyšetreniach, ultrazvuková sonda vysielala do tela vlny s konštantnou frekvenciou a od pohyblivých štruktúr ako sú napríklad erytrocyty v krvi sa vlny odrážajú a dochádza k zmene frekvencie. Tento jav sa nazýva frekvenčný posun a ide o rozdiel frekvencii prijímaných a odrazených vln. Frekvenčný posun je priamo úmerný rýchlosti pohybujúcich sa štruktúr. (Musil et al.2008)

Ak ide o Dopplerovo zobrazenie tak tam sa využívajú 2 typy a to spektrálne a farebné. Zatiaľ čo spektrálne sa využíva na zobrazenie krivky závislosti rýchlosti toku na čase tak farebné nám umožňujú semikvantitatívne stanovenie a to nám dá informácie o rýchlosti a smere pohybujúcich sa častíc, napríklad pohyb krvi v cievach (Maliková,2019)

Spektrálne

- **CW (*continuous wave*)**- ide o jednoduchú variantu zobrazenia, ktorá môže merať aj rýchlo pohybujúce sa štruktúry ale nedokáže rozoznať cievy podľa hĺbky a nerozoznáva artefakty
- **PW(*pulse wave*)**- umožňuje sledovať frekvenčný a časový posun odrazených ultrazvukových vln (Rosina et al.,2006)

Farebné

- **CDI (*color doppler imaging*)**- ide o farebné mapovanie, kedy sa zisťuje smer a rýchlosť toku.
- **CDE(*color doppler energy*)**- pomáha nám zistiť smer, rýchlosť toku podobne ako pri CDI ale má jednu zásadnú výhodu a to, že dokáže zachytiť množstvo krviniek v danej oblasti pomocou dopplerovej amplitúdy a to nám dá informácie či daná oblasť je dobre alebo zle prekrvená (Maliková,2019)

V medicíne sa môžeme stretnúť s rôznymi typmi Dopplerovho ultrazvuku. Medzi jeden z nich patri transkraniálny dopplerov ultrazvuk označovaný aj ako TCD. Tento druh ultrazvuku sa s spolu s ďalšími testami podieľa na diagnostike viacerých cerebrovaskulárnych porúch. (Purkavastha et al.,2012)

Na získanie informácia o krvnom obehu v mozgu sa používa ultrazvuková sonda o frekvencii 2MHz. Pri vyšetrení transtemporálna časti hlavy nám dáva informácie o prietoku v prednej časti mozgu, kde sa nachádza veľmi potrebné zásobenie (intrakraniálna krčná tepna, stredná mozgová tepna, predná mozgová tepna). Pri transcervikálne časti sa lekár zameriava

predovšetkým na vizualizáciu extrakraniálnej vnútornej krčnej tepny a transformálnou časťou sa zobrazuje vertebrálna a bazilárna artéria (Blanco a Abdo-Cuza, 2018)

Tento druh ultrazvuku sa tiež používa pri výskume demencie. Jedna z novších štúdií ukázala, že pacienti trpiaci Alzheimerovou chorobou alebo demenciou mali nižší prietok krvi v mozgu v porovnaní so zdravými jedincami (Purkavastha et al., 2012)

5 Nové metódy v oblasti ultrazvukových vyšetrení

Ultrazvukové vyšetrenia patria medzi základné vyšetrovacie metódy, ktoré sa často využívajú v klinickej praxi a to vďaka svojej neinvazívnosti a dostupnosti. Ide o lacné a bezpečné vyšetrenie, ktoré sa za posledných 20 rokov posunulo svoje hranice. V dnešnej dobe sa okrem ultrazvuku ako ho poznáme používajú nové a prepracovanejšie metódy, ktoré uľahčia prácu a diagnostiku. Medzi nové metódy môžeme zaradiť kontrastnú ultrasonografiu, ultrazvukovú elastografiu (SWE) a high focused ultrasound. Tieto vyšetrenia sa používajú v rôznych klinických odvetviach.

5.1 Kontrastný ultrazvuk

Ide o ultrazvukovú metódu, ktorá zahŕňa vyšetrenie pomocou kontrastných látok. Táto metóda sa dostáva do popredia a pomocou nej sa môže stanovovať široké spektrum ochorení. Do popredia sa predovšetkým dostáva dynamická kontrastná ultrasonografia (*CEUS-contrast-enhanced ultrasound*). Ide pomerne o novú metódu ktorou sa môže diagnostikovať ochorenia parenchýmových orgánov brušnej dutiny. (Ungermann et al., 2009)

Princíp:

Na stanovenie sa využívajú kontrastné látky. Chemickým základom kontrastných látok, využívaných pri vyšetreniach sú stabilizované plynné mikrobubliny, ktoré na svojom povrchu sú opatrené stabilizačným obalom. Veľkosť mikrobublin sa pohybuje okolo 1-10 mikrometrov a vďaka tomu ľahko prenikajú do krvného riečišťa. (Ungermann et al., 2009; Mechl et al., 2018) V krvi sa veľmi ťažko rozpúšťajú a sú eliminované pomocou pľúc- dýchaním zatiaľ čo stabilizačný obal sa môže metabolizovať v tele. Tieto eliminačné vlastnosti sú príčinou toho, že kontrastný ultrazvuk čoraz viac nachádza svoje využitie. Vďaka svojej netoxicity sú vhodné aj pre pacientov s renálnou nedostatočnosťou, pacientov na dialýze alebo po transplantácii. (Kazmierski et al., 2018)

Aplikácia KL:

Aplikácia kontrastných látok nie je zložitá. Najskôr sa zmieša prášok s fyziologickým roztokom a hotovú zmes aplikuje vyškolený personál. K nasýteniu jednotlivých tkanív dochádza takmer okamžite a môže pretrvávajú niekoľko sekúnd až minút v závislosti od toho aká kontrastná látka sa použila. Taktiež to závisí aj na pôsobení samotného ultrazvuku. Pri práci s ultrazvukom s kontrastnými látkami si lekár musí nastaviť prístroj a predovšetkým

mechanický index (MI). Mechanický index vyjadruje stupeň poškodenia tkaniva. Závisí na frekvencii vysielanej ultrazvukom. Ak by sa mechanický index nachádzal vo vyšších hodnotách mohlo by dôjsť k rozbitiu mikrobublin kontrastných látok. (Mechl et al., 2018)

Využitie:

Ako príklad môžeme uviesť využitie CEUS v obličkách. Vylepšenie ultrazvuku používaním kontrastných látok sa viac využíva na stanovenie neurčitých renálnych lézií, pri transplantácii alebo pri biopsii.

Pri transplantácii:

U pacientov po transplantácii obličiek je vyššie riziko vzniku karcinómu v dôsledku predĺženej imunosupresie. Niekedy sa môžu vyskytnúť cysty ale je potrebné správne vyhodnotenie všetkých rizík. U pacientov s glomerulopatiou sa využíva ultrazvuk ako počiatočná zobrazovacia metóda, CT sa veľmi nevyužíva ak nie je na ultrazvuku viditeľná abnormalita. Preto sa využíva kontrastný ultrazvuk, ktorý môže poskytnúť ďalšie informácie. Zosilnenie nodulárnych septických miest alebo výskytu pevných zložiek to môže znamenať, že sa zvyšuje podozrenie na malignitu. Taktiež pomocou kontrastných látok sa môže dokázať, že sa nedosiahlo žiadne zlepšenie. Kontrastný ultrazvuk sa využíva aj na zistenie prietoku krvi do transplantovaných obličiek. (Kazmierski et al., 2018)

Pri biopsii:

V prípade kedy obličková hmota vyžaduje odber vzorku tkaniva, sa kontrastný ultrazvuk využíva na nasmerovanie ihly do najlepšieho možného miesta. Cielene sa vyhne oblastiam, kde sa už môže vyskytovať potencionálne nekrotické tkanivo a tým pádom dochádza k rýchlejšiemu stanoveniu diagnózy. (Kazmierski et al., 2018)

Zhodnotenie:

Dynamická kontrastná ultrasonografia je veľmi hodnotná zobrazovacia metóda. Pomáha poskytnúť informácie ktoré pri bežnom ultrazvukovom vyšetrení nie sú možné a tiež znižuje radiačnú záťaž pacienta. (Kazmierski et al., 2018)

5.2 Ultrazvuková elastografia - SWE (*shear wave elastography*)

Ultrazvuková elastografia patrí medzi nové a pomerne rýchlo rozvíjajúce sa metódy. Ide o zobrazovaciu metódu, ktorá sa predovšetkým zameriava na meranie elastického tkaniva. Nové metódy sa zameriavajú na elastografiu šmykovej vlny (*shear wave- SWE*), pomocou ktorej sa umožňuje kvantitatívne meranie tuhosti. Kombinácia elastografie a ultrazvuku dosahuje presnejšie výsledky pre stanovení ochorení postihujúce tkanivo ako samotný ultrazvuk. (Heřman et.al., 2015) Táto technika sleduje zmenu mechanických vlastností mäkkého tkaniva v rôznych patologických stavoch a z toho vyvodzuje kvalitatívne a kvantitatívne informácie, ktoré sa môžu použiť na diagnostické účely. Ultrazvuková

elastografie ukazuje veľmi dobré výsledky pri hodnotení fibrózy pečene a v dnešnej dobe sa osvedčila aj pro vyšetřovani štítnej žľazy, prostaty a lymfatických uzlinách. (Sigrist et al.,2017)

Princíp SWE (*shear wave elastography*)

Ultrazvuková elastografia využíva zmenu vlastností elastického mäkkého tkaniva, vyplývajúcich zo špecifických patologických alebo fyziologických procesov. Je známe, že nádory sa mechanicky líšia od zdravej okolitej tkáňe . Podobne je to aj u fibrózy. Tá je spojená s chronickým ochorením pečene a to spôsobí, že pečeň ztuhne. Táto metóda sa využíva k odlíšeniu postihnutého od zdravého tkaniva. (Sigrist et al.,2017) Tlakové akustické vlny používané pri konvenčnom ultrazvuku v zobrazovacom režime B prechádzajú do tkáňe rýchlosťou okolo 1450-1550 m/s. Oproti ultrazvuku so šmykovými vlnami je to rýchlosť 1-10 m/s. Kvantitatívne prístroje pre SWE sa objavili nedávno a prvé výsledky pre klinickú štúdiu pre oblasť hlavy a krku sa objavili len v roku 2011. Tento typ ultrazvuku sa využíva špeciálny typ sondy, ktorá vytvára fokusované tlakové pulzy. Sonda vysiela strižne vlny, dochádza k minimálnej deformácii tkáňe ale je to stále v merateľnej oblasti. (Heřman et al.,2015)

Zhodnotenie:

Techniky, ktoré sú založené na šmykových vlnách majú oproti statickým technikám silné výhody, pretože sú reprodukovateľnejšie, kvantitatívne, spoliehajú sa na automaticky generované šmykové vlny a poskytujú dobrý kontrast pružnosti. Tieto výhody by mali viesť k novým poznatkom a postupne sa budú uplatňovať v diagnostike. Vlastnosti týchto techník by mali dopomôcť k postupnému vývoju 3D elastografického zobrazenia čo by mohlo pomôcť pri detekcii, terapii a monitorovaniu v bežnej klinickej praxi. (Correas et al.,2013)

5.3 High intensity focused ultrasound (HIFU)

Bežný ultrazvuk je schopný vytvárať obrazy bez toho aby došlo k poškodeniu tkaniva. Ak dochádza k šíreniu ultrazvukových vln vyššej energie, intenzity a frekvencie živými tkanivami môže to vyvolať mechanické a tepelné účinky, ktoré sa môžu využiť pri klinickej terapii. (Phenix et al.,2014)

Ak ide o mechanický účinok tak ten vzniká pôsobením negatívneho tlaku vln na dané tkanivo alebo štruktúru. Tlak spôsobí, že v daných bunkách vznikne bublina, ktorá má tendenciu sa zväčšovať. Po náhlom zničení týchto bublín sa vytvorí vysoký tlak (20 000 – 30 000 barov) a tým pádom dochádza k poškodeniu buniek a tkaniva. V prípade tepelného účinku, tak ultrazvuk vytvára vysokú energiu, ktorú bunky pohltia a premenia ju na tepelnú energiu. Pôsobením ultrazvukových vln dochádza k zvýšeniu teploty okolo 70-100°C a to spôsobí koaguláciu a čo vedie ku koagulačnej nekróze a ireverzibilným zmenám . (Thüroff a Chaussy, 2014)

HIFU je dosiaľ dostupná neinvazívna ablačná technika, ktorá bola použitá k liečbe nádorov prostaty a myómov maternice, nádorov pečene, obličiek, kostí alebo aj mozgu. Ultrazvuk vytvára vlny s vysokou intenzitou, ktoré sa zameriavajú na malú oblasť. Keď sa

ultrazvukové vlny blížia k danej štruktúre, tak dochádza k zblížovaniu akustických vln čo vedie k zvýšeniu energie. Táto energie sa absorbuje tkanivom čím sa zvyšuje teplota na 60-85 °C a to môže viesť až k nekróze nádorových buniek. Vrchol apoptózy sa dosiahne až keď dochádza k mitochondriálnemu poškodeniu. Vizualizácia liečby sa vykonáva buď ultrazvukom v B-móde alebo pomocou magnetickej rezonancie. (Phenix et al.,2014)

Zhodnotenie:

HIFU je dôležitou metódou, ktorá sa používa pri neinvazívnej ablačnej liečbe. Tepelné účinky sa už aplikujú v rôznych klinických prostrediach. Negatívum je, že v niektorých prípadoch dochádza k recidíve primárneho nádoru alebo dochádza k vzniku metastáz. Na prekonanie týchto problémov sa robia štúdie o kombinovanej liečbe a to ablacia s adjuvanciami aby sa u pacientov vytvorila protinádorová imunita. (van der Bijgaart et al.,2017)

6 Infrazvuk

V predchádzajúcich kapitolách sme hovorili o zvuku počuteľnom a nepočuteľnom o vysokej frekvencie. V tejto kapitole sa budeme venovať zvuku, ktorý je pre ľudské ucho nepočuteľné a má nízku frekvenciu a často má negatívny dopad na ľudský organizmus.

Infrazvuk je zvuk s frekvenciou pre človeka nepočuteľnou. Hranica medzi infrazvukom a počuteľným zvukom nie je presne stanovená ale udáva sa menej ako 16 Hz. Niektoré zvieratá podobne ako pri ultrazvuku, využívajú infrazvuk na dorozumievanie. Zvieratá generujú a detekujú zvuky v širokom rozsahu frekvencii. Napríklad slony používajú infrazvuk na komunikáciu aj do veľkých vzdialeností čo je nevyhnutné pre reprodukciu alebo na vyhýbanie sa predátorom. (Garstang et al.,2017)

Infrazvuk je súčasť nášho života a čoraz viac dostáva pozornosť v oblasti klinickej medicíny, preventívnej medicíny a vojenskej medicíny. Infrazvuk má taktiež aj negatívny vplyv na naše zdravie. Niektoré štúdie poukazujú na to, že ľudia ktorý žijú v blízkosti infraštruktúry veternej energie tak sú tým negatívne ovplyvnený, čo sa prejavuje napríklad poruchami spánku a inými zdravotnými problémami, ktoré súvisia so stresom. Súčasné štúdie potvrdili, že infrazvuk môže mať vplyv na poruchy funkcie orgánov a dokonca môže vyvolať aj poškodenie tkaniva. (Zhao et al.,2018)

Väčšina štúdií sa zameriava na účinky infrazvuku na nervový, kardiovaskulárny, sluchový, reprodukčný a respiračný systém. Štúdií, ktoré sa zaoberajú gastrointestiálnym traktom je pomerne málo. GIT je relatívne veľmi citlivý na infrazvuky a cieľom štúdie Zhaa z roku 2018 bolo sledovať účinky infrazvuku na žalúdočnú motilitu a morfológiu a tiež posúdiť syntézu oxidu dusnatého po expozícii infrazvuku o 8 Hz a 130 dB po dobu 2 hodín každý deň v intervale 2 týždne. Väčšina štúdií sa zatiaľ vykonali len na laboratórnych potkanoch a to ukázalo, že potkany, ktoré boli vystavované účinkom infrazvuku sa znížil prietok krvi žalúdočnej sliznice. (Zhao et al.,2018)

Niektorí vedci sa zaoberali aj vyvinutím liekov a cieľom týchto štúdií bolo zistiť nový druh anti-infrazvukových liekov. Infrazvuk spôsobuje funkčné poruchy a štrukturálne poškodenie centrálného nervového systému. Existuje len málo liekov proti infrazvuku ale tie nie sú veľmi účinné. Nitronyl nitoroxidové radikály sú dobrými antioxidantami, ktoré pôsobia ako superoxid dismutáza (SOD) a môžu reagovať priamo s vzniknutými radikálmi ako sú $\text{OH}\bullet$, H_2O_2 . Výsledkom tejto štúdie bolo navrhnutý a syntetizovaný radikál chlorid kyanurový nitronylnotroxidový (NRbt). Boli skúmané ochranné účinky pre antioxidantnú obranu v hipokampanej tkáni potkanov a ukázalo sa, že tento novo syntetizovaný radikál môže byť terapeuticky účinný pre tkanivo, ktoré bolo vystavená infrazvukovým vlnám. (Wang et al.,2015)

Doteraz sme sa zaoberali len negatívnym vplyvom infrazvuku na ľudský organizmus ale infrazvuk môže mať aj pozitívny vplyv. Tento vplyv bol predmetom štúdie, ktorá sa zaoberala, účinkom infrazvuku s nízkou hladinou intenzity na fibroblasty srdca. Srdcové fibroblasty potkana boli vystavené frekvencii zvuku 4-20 Hz a 79,75 -86,11 dB. Je známe, že srdcová fibróza je kľúčovým procesom zodpovedným za zlyhanie srdca pri hypertenzii a srdcových chorobách Srdcové fibroblasty sú hlavným zdrojom kolagénu a zohrávajú dôležitú úlohu v tomto procese. Touto štúdiou sa dokázalo zistiť, že infrazvuk s hladinou intenzity 79,75-86,11 dB má ochranné účinky na srdce. Frekvencia a intenzita sú kľúčovými faktormi. To naznačuje, že infrazvuk s nízkym decibelom môže pôsobiť ako nová a účinná stratégia pri prevencii a liečbe srdcových porúch spojených s fibrózou ale stále je to predmet skúmania. (Jin W et al., 2017)

Súčasný stav výskumu poukazuje aj na sľubné výsledky cieleného infrazvuku pri liečbe rakoviny. Infrazvuk môže priamo ovplyvňovať ultraštruktúru nádorových buniek a tiež môže senzibilovať niekoľko druhov rakoviny v dôsledku priepustnosti membrány. Aplikácia infrazvuku na nádorové bunky bez ďalších terapeutických látok demonštruje rôzne účinky, ktoré závisia od typu bunky, použitej frekvencie a hladiny akustického tlaku a tiež do závisí na čase expozície. Mechanizmus infrazvuku na rakovinové bunky ešte nie je úplne známy a preto sa vykonávajú neustále štúdie na ujasnenie ultraštruktúrlnych a metabolických zmien vo vnútri nádorových buniek. Dobrým vývojovým postupom by bol vývoj vhodného infrazvukového generátora, ktorý by sa dal použiť v klinickej praxi. (Vahl et al.,2021)

7 Záver

V tejto bakalárske práci som sa snažila zhrnúť poznatky o akustike ako vede, o zvuku a jeho vlastnostiach. Zaoberala som sa ako človek vníma zvuk, stavbou a fyziológiou zvukového orgánu. Tiež som zhrnula poznatky o počuteľnom ale aj nepočuteľnom zvuku kde zahrňujeme ultrazvuk a infrazvuk, pričom sa s nimi stretávame v bežnom živote.

V úvode bakalárskej práce som sa zamerala čo je to vlastne akustika od minulosti až po súčasnosť. Z fyzikálneho hľadiska bol popísaný zvuk ako vlnenie a tiež ako sa zvuk šíri v závislosti na prostredí, rozdelenie jednotlivých zvukov a kde sa s nimi môžeme stretávať v bežnom živote.

V ďalšej časti boli zhrnuté poznatky o fyziologickej akustike a stavbe sluchového orgánu. Fyziologická akustika sa predovšetkým uplatňuje v medicíne a klinickej praxi, zaoberá sa tým ako človek vníma zvuk, jeho farbou, výškou a hlasitosťou. Bolo popísané sluchové pole, ktoré graficky znázornilo aká intenzita zvuku je ešte prijateľná pre človeka a aká už môže spôsobovať bolesti. To ako človek vníma zvuk závisí aj od stavby sluchového orgánu, ktorý pozostáva z vonkajšieho, stredného a vnútorného ucha. Každá táto časť plní svoju úlohu a prispieva k premene mechanického vlnenia o určitej vlnovej dĺžke na signály, ktoré sú prenášané do mozgovej kôry kde sa zaznamenávajú a spracovávajú.

V ďalšej časti som sa zamerala ako môže byť zvuk využívaný aj inak ako prostriedok na dorozumievanie. Väčšinou ide o ultrazvuk pre človeka nepočuteľný s frekvenciou nad 20 000 Hz. Ultrazvuk sa uplatňuje v rôznych oblastiach medicíny na diagnostiku a v niektorých prípadoch má aj liečebné účinky. Bolo popísané ako sa vlnenie o takej vysokej frekvencii získava, aké môže mať účinky.

V predposlednej kapitole som zhrnula nové metódy v oblasti ultrazvuku. Tieto metódy sú oveľa prepracovanejšie a ich hlavnou výhodou je jednoduchšia práca a rýchlejšia diagnostika. Medzi tieto nové metódy zaraďujeme kontrastný ultrazvuk, ultrazvukovú elastografiu a high intensity focused ultrasound (HIFU). Kontrastný ultrazvuk využíva na stanovenie kontrastné látky. Môže sa využívať pri transplantácii či dochádza k správne prietoku krvi v obličkách alebo pri biopsii. Ďalšou technikou je ultrazvuková elastografia, ktorá sa predovšetkým zameriava na zmeny mäkkého tkaniva. Udáva kvantitatívne a kvalitatívne informácie, ktoré napomáhajú lepšej diagnostike napríklad fibrózy pečene. Treťou technikou je high intensity focused ultrasound ide o dôležitú metódu využívanú najmä v ablačnej liečbe. Pôsobením ultrazvukových vln dochádza k zvýšeniu teploty a tým môže dochádzať koagulačnej nekróze. Využíva sa to hlavne k liečbe nádorov.

V poslednej kapitole som zhrnula poznatky o infrazvuku a tiež jeho negatívne a pozitívne účinky na ľudský organizmus. Negatívny vplyv môže mať hlavne na ľudí, ktorý žijú v oblasti veternej energie alebo blízko miesta kde prebiehajú stavebné práce. Tiež sa robilo niekoľko pokusov na potkanoch, ktorý boli dlhšiu dobu vystavovaný infrazvuku a došlo k zníženiu prietoku krvi v ich žalúdočnej sliznici. Ak išlo o pozitívny vplyv tak to je ešte

v priebehu štúdií ale boli prezentované pozitívne výsledky v oblasti prevencie a liečby srdcových porúch použitím infrazvuku s nízkou hladinou intenzity.

Túto bakalársku prácu som sa snažila napísať aby bola čo najviac zrozumiteľná aj pre bežného čitateľa. Snažila som sa objasniť základné poznatky z oblasti akustiky či už z fyzikálneho a fyziologického hľadiska. Snažila som sa poukázať aj na to, že veda ide neustále dopredu a stále sa vymýšľajú nové štúdie, ktoré môžu uľahčiť diagnostiku a aj liečbu závažných ochorení pomocou ultrazvuku a infrazvuku.

8 Použité skratky

cm³- centimeter kubický
dB- decibel, jednotka hladiny hlasitosti
HIFU vysokofrekvenčný ultrazvuk
Hz -hertz, jednotka frekvencie
L_N – hladina hlasitosti
L_p- hladina akustického tlaku
mm- milimeter, jednotka dĺžky
N.m⁻² – newton na meter štvorcový
Pa – pascal, jednotka tlaku
Ph- fón, jednotka hladiny hlasitosti
SOD – superoxid dismutáza
W- watt
W.m⁻² – watt na meter štvorcový

9 Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Zvuk ako vlnenie	9
Obrázok 2 Pozdĺžne a priečne vlnenie.....	10
Obrázok 3 Ukážka kmitavého pohybu	11
Obrázok 4 Zložený zvuk s rôznym časovým priebehom	14
Obrázok 5 Fletcher-Musonov graf.....	16
Obrázok 6 Sluchové pole závislosti intenzity na frekvencii zvuku	17
Obrázok 7 Stavba sluchového orgánu	18
Obrázok 8 Bubienok a napojená sluchové kostičky	20
Obrázok 9 Sluchové kostičky.....	21
Obrázok 10 Stavba vnútorného ucha	22
Obrázok 11 Cortiho orgán.....	25
Obrázok 12 Interakcie ultrazvukovej vlny v tkanive.....	30
Obrázok 13 Ukážka piezoelektrického javu	32
Obrázok 14 Druhy ultrazvukových sond.....	36
Obrázok 15 A-mod pri vyšetrení oka.....	37

10 Zoznam tabuliek a grafov

Tabuľka 1 Šírenie zvukových vln v rôznych prostrediach	12
Tabuľka 2 Závislosť rýchlosti zvuku na teplote	12
Tabuľka 3 Zloženie perilymfy a endolymfy	27
Graf 1 Závislosť rýchlosti zvuku na teplote.....	13

11 Použitá literatura

ANSELMET, Fabien a Pierre-Olivier MATTEI. *Acoustics, Aeroacoustics and Vibrations: A Bit of History* [online]. John Wiley, 2016 [cit. 2021-02-04]. ISBN 978-111-9178-392. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cuni/reader.action?docID=4332412&ppg=15>

AVASARALA SK, Aravena C, Almeida FA. Convex probe endobronchial ultrasound: historical, contemporary, and cutting-edge applications. *J Thorac Dis.* 2020 Mar;12(3):1085-1099. doi: 10.21037/jtd.2019.10.76. PMID: 32274177; PMCID: PMC7139045.

BARGÁR, Z., KOLLÁR, A. *Praktická audiometria*. Martin: Osveta, 1986.

Bedi DG, Gombos DS, Ng CS, Singh S. Sonography of the eye. *AJR Am J Roentgenol.* 2006 Oct;187(4):1061-72. doi: 10.2214/AJR.04.1842. PMID: 16985158.

Bellew, James, et al. *Michlovitz's Modalities for Therapeutic Intervention, 6th Edition*, F. A. Davis Company, 2016. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cuni/detail.action?docID=4509300>

BENEŠ, Jiří, Daniel JIRÁK a František VÍTEK. *Základy lékařské fyziky*. 4. vydání. V Praze: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2015. ISBN 978-802-4626-451.

BENEŠ, Jiří, Jaroslava KYMPLOVÁ a František VÍTEK. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2015, str. 119-140. ISBN 978-802-4747-125.

BENEŠ, Jiří, Jaroslava KYMPLOVÁ a František VÍTEK. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2015, str. 119-140. ISBN 978-802-4747-125.

BERG E., Richard. Acoustics: Acoustics. *Encyclopedia Britannica* [online]. 20 Aug. 2019 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/acoustics>

Blanco P, Abdo-Cuza A. Transcranial Doppler ultrasound in neurocritical care. *J Ultrasound.* 2018 Mar;21(1):1-16. doi: 10.1007/s40477-018-0282-9. Epub 2018 Feb 10. PMID: 29429015; PMCID: PMC5845939.

Building acoustics: Introduction [online]. In: . 2 Sep 2020 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Building_acoustics

BUREŠ, Jiří. Závislost rychlosti šíření zvuku ve vzduchu na teplotě. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-vzduch.htm>

CORREAS, ROUMY a GRENIER. Ultrasound elastography: A new modality in routine practice. *Diagnostic and Interventional Imaging.* 2013, 94(5), 483-484. ISSN 2211-5684.

ČIHÁK, Radomír. *Anatomie*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Praha: Grada, 2016, str. 605-620. ISBN 978-80-247-5636-3

ČMELO, Jozef. 3D – trojrozmerná ultrazvuková diagnostika oka a očnice. *Česká a slovenská oftalmologie*. 2008, **64**(5), 188-192. ISSN 1805-4447. Dostupné také z: <https://www.prelekara.sk/casopisy/ceska-slovenska-oftalmologie/2008-5/3d-trojrozmerna-ultrazvukova-diagnostika-oka-a-ocnice-654>

DE LEON, AI, Reshani PERERA, Pinunta NITTAYACHARN, Michaela COOLEY, Olive JUNG a Agata EXNER. Ultrasound Contrast Agents and Delivery Systems in Cancer Detection and Therapy. *Cancer Nanotechnology*. 2018, (139), 57-84. ISSN 0065-230X. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/bs.acr.2018.04.002>

ĎOUBAL, Stanislav a Daria KUČOVÁ. *Vybrané kapitoly z fyziky a biofyziky*. Dot. Praha: Karolinum, 1997, str. 144. ISBN 80-706-6947-0.

Dr Daniel J Bell © and Ass. Pr. Mirjan M. Nadrljanski et al. History of ultrasound in medicine. In: *Radiopaedia.org* [online]. 2020 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/history-of-ultrasound-in-medicine?lang=us>

DRŠATA, Jakub, Radan HAVLÍK a a kol. *FONIATRIE-SLUCH*. Tobiáš, 2016. ISBN 978-80-7311-159-5.

DYLEVSKÝ, Ivan a Petr JEŽEK. Základy funkční anatomie člověka: Nervové řízení organismu. *Palestra* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://vos.palestra.cz/skripta/anatomie/15a2a3.htm>

DYLEVSKÝ, Ivan. *Funkční anatomie* [online]. Praha: Grada, 2009 [cit. 2021-02-06]. ISBN 978-80-247-7030-7. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/kniha/funkcni-anatomie-1888/>

FERDA, Jiří, Hynek MÍRKA, Jan BAXA a Alexander MALÁN. *Základy zobrazovacích metod*. Praha: Galén, [2015]. ISBN 978-807-4921-643

FIALA, Pavel, Jiří VALENTA a Lada EBERLOVÁ. *Stručná anatomie člověka* [online]. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2015 [cit. 2021-02-06]. ISBN 9788024627052. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/kniha/strucna-anatomie-cloveka-5480/>

FIALA, Pavel, Jiří VALENTA a Lada EBERLOVÁ. *Stručná anatomie člověka* [online]. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2015 [cit. 2021-02-09]. ISBN 978-80-246-2705-2. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/strucna-anatomie-cloveka-405829/#>

GARSTANG M, Kelley MC. Understanding Animal Detection of Precursor Earthquake Sounds. *Animals : an Open Access Journal From MDPI*. 2017 Aug;7(9). DOI: 10.3390/ani7090066.

GROH Daniel: Základní souhrn anatomie a fyziologie sluchového analyzátoru, sluchová dráha, teoretické základy vyšetření sluchu a experimentální modely na zvířatech, regresivní změny v oblasti sluchového analyzátoru.. Multimediální podpora výuky klinických a zdravotnických oborů :: Portál 2. Lékařské fakulty [online], 2010 [cit. 01. 03. 2021]. Dostupný z WWW: <https://mefanet-motol.cuni.cz/clanky.php?aid=64>

HAHN, Aleš. *Otorinolaryngologie a foniatrie v současné praxi* [online]. 2., doplněné a aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, [2019?] [cit. 2021-02-08]. ISBN 978-80-271-2607-1.

HÁLA, Bohuslav a Miloš SOVÁK. *Hlas - řeč - sluch : základní věci z anatomie, fyziologie a hygieny hlasového mluvícího i sluchového ústrojí, z foniatrie, orthoepie, orthofonie atd.* Praha: Nákladem České grafické Unie, 1941

HEŘMAN, Jan, Zuzana HEŘMANOVÁ, Jaroslav VOMÁČKA a Ivo STÁREK. Ultrazvuková elastografie a její využití v oblasti hlavy a krku. *Časopis lékařů českých*. 2015, (5), 222-226. ISSN 1805-4420. Dostupné také z: <https://www.prolekare.cz/casopisy/casopis-lekaru-ceskych/2015-5-7/ultrazvukova-elastografie-a-jeji-vyuziti-v-oblasti-hlavy-a-krku-56548>

History of Acoustics. *Did you know science* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://didiyouknowscience.com/history-of-acoustics/>

HRAZDIRA, Ivo a Vojtěch MORNSTEIN. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Brno: NEPTUN, 2004, 396 s. ISBN 80-902896-1-4

HRAZDIRA, Ivo a Vojtěch MORNSTEIN. *Úvod do obecné a lékařské biofyziky*. Brno: Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1822-4.

HRAZDIRA, Ivo. ÚVOD DO ULTRASONOGRAFIE: V OTÁZKÁCH A ODPOVĚDÍCH [online]. Brno: Klinika zobrazovacích metod LF MU, Fakultní nemocnice u Sv. Anny v Brně, 2008 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: https://docplayer.cz/4239393-Uvod-do-ultrasonografie.html#show_full_text

HRAZDIRA, Ivo. *Biofyzikální základy ultrasonografie: jak pracovat s ultrazvukovým diagnostickým přístrojem : praktická příručka s teoretickým úvodem pro stáž připravenou v rámci projektu: "Prohloubení odborné spolupráce a propojení ústavů lékařské biofyziky na lékařských fakultách v České republice"* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011 [cit. 2021-02-10]. ISBN 978-80-244-2895-6

Hybášek Ivan, Jan Vokurka a kol.: *eOtorinolaryngologie. Multimediální podpora výuky klinických a zdravotnických oborů :: Portál Lékařské fakulty v Hradci Králové* [online], 2020 [cit. 10. 03. 2021]. Dostupný z WWW: <https://mefanet.lfhk.cuni.cz/clanky.php?aid=18>. ISSN 1803-280X.41

HYBÁŠEK, Ivan. *EOtorinolaryngologie: Klinická anatomie, fyziologie a patologie ucha, nosu a krku* [online]. 2019 [cit. 2021-02-26]. ISSN 1803-280X. Dostupné z: <file:///C:/Users/papin/Desktop/KNIHY/01-ORL-ANATOMIE-FYZIOLOGIE-PATOLOGIE.pdf>

CHUDÁČEK, Zdeněk. *Pánev v AP projekci. Radiodiagnostika*. Martin, SR: Osveta, 1993, s. 217. ISBN 80-217-0571-X.

JANDOVÁ, Kateřina. *PRAKTICKÁ CVIČENÍ „VYŠETŘENÍ SLUCHU“*. 2015 Dostupné také z: <https://docplayer.cz/amp/72167-Prakticka-cviceni-vysetreni-sluchu-mudr-katerina-jandova-ph-d.html>

Jin W, Deng QQ, Chen BY, et al. Inhibitory effects of low decibel infrasound on the cardiac fibroblasts and the involved mechanism. *Noise & Health*. 2017 May-Jun;19(88):149-153. DOI: 10.4103/nah.nah_14_16.

JIRŤÍČEK, Ondřej, Úvod do akustiky, Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1

JÜTTNEROVÁ, Sandra a Iveta BRYJOVÁ. Ultrasonografie. *INTERAKTIVNÍ UČEBNICE ULTRASONOGRAFIE* [online]. 2015/16 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: http://www.jtarchitekt.cz/lekarske_vyuziti.html

KABÁTOVÁ, Zuzana a Milan PROFANT. *Audiológiá: Základy akustiky pre potreby audiológie* [online]. Praha: Bratislava, 2012 [cit. 2021-02-05]. ISBN 978-80-247-7888-4. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/audiologia-404742/>

KABEŠ, Karel. *AUTOMA: Magnetostrikční snímače vzdálenosti* [online]. 13. Praha: Send, 2007 [cit. 2021-02-11]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/magnetostrikcni-snimace-vzdalenosti-2007_04_34229_2684/

Kazmierski, B., Deurdulian, C., Tchelepi, H. et al. Applications of contrast-enhanced ultrasound in the kidney. *Abdom Radiol* **43**, 880–898 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00261-017-1307-0>

KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-802-4730-684.

KOLMER, Félix, KYNCL, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 2, vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s., ISBN 0451480

KŘIVÁNKOVÁ, Markéta a Milena HRADOVÁ. *Somatologie* [online]. Praha: Grada, 2009 [cit. 2021-02-13]. Sestra (Grada). ISBN 978-80-247-2988-6. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/kniha/somatologie-399/>

KŘIVÁNKOVÁ, Markéta. *Somatologie: pro střední zdravotnické školy*. 2., doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2019. Sestra (Grada). ISBN 978-80-271-0695-0. (obrázky)

KUKUROVÁ, Elena a Eva KRÁLOVÁ. *Lékařská fyzika a biofyzika pre medicínsku prax*. Bratislava: Vydavateľstvo UK, 2004. ISBN 80-223-1824-8.

LANGMEIER, Miloš. *Základy lékařské fyziologie*. Praha: Grada, 2009, str. 239. ISBN 978-802-4725-260.

LEJSKA, Mojmir a Radan HAVLÍK. *Základy praktické audiology a audiometrie*. Vydání: druhé rozšířené. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2019. ISBN 978-80-7013-599-0.

Lorente-Ramos RM, Armán JA, Muñoz-Hernández A, Gómez JM, de la Torre SB. US of the eye made easy: a comprehensive how-to review with ophthalmoscopic correlation. *Radiographics*. 2012 Sep-Oct;32(5):E175-200. doi: 10.1148/rg.325115105. PMID: 22977037.

MALÍKOVÁ, Hana. *Základy radiologie a zobrazovacích metod*. 2019. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2019. ISBN 978-80-246-4036-5

- MECHL, Marek, Andrea ŠPRLÁKOVÁ-PUKOVÁ, Jakub FOUKAL, Miriam ŠMAJEROVÁ, Šárka BOHATÁ a Vlastimil VÁLEK. ČASOPIS LÉKAŘŮ ČESKÝCH. *Ultrazvukové vyšetření s kontrastní látkou* [online]. 2018. 175-180 [cit. 2021-04-20]. ISSN 1803-6597. Dostupné z: <https://www.prolekare.cz/casopisy/casopis-lekaru-ceskych/2018-4-3/ultrazvukove-vysetreni-s-kontrastni-latkou-105293>
- XIANG, Ning a Gerhard M. SESSLER. *Acoustics, Information, and Communication*. 1. Springer, Cham, 2015. ISBN 978-3-319-05660-9.
- Munir, Nazia, and Ray Clarke. *Ear, Nose and Throat at a Glance*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2013. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cuni/detail.action?docID=1120555>
- MUSIL, Dalibor, Jiří HERMAN a Ivo HOFÍREK. *Ultrazvukové vyšetření žil dolních končetin* [online]. Praha: Grada, 2008 [cit. 2021-02-11]. ISBN 978-80-247-6375-0. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/ultrazvukove-vysetreni-zil-dolnich-koncetin-407612/#>
- MYSLIVEČEK, Jaromír a Vladimír RILJAK. *Fyziologie: repetitorium*. Praha: Stanislav Juhaňák - Triton, 2020, str.260-264. ISBN 978-80-7553-818-5.
- NALOS, Daniel a Dušan MACH. *Periferní nervové blokády: pro klinickou praxi včetně ultrazvukového navádění*. Praha: Grada, 2010. ISBN 978-80-247-3280-0.
- NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika. 2., zcela přepracované a doplněné vydání*. Praha: Grada Publishing, 2019, str. 199-233. ISBN 978-802-7102-099.
- NEWMAN G., Paul a Grace S. Rozycki S. ROZYCKI. *THE HISTORY OF ULTRASOUND* [online]. Surgical Clinics of North America. 1998, 179 s. [cit. 2021-02-03]. ISSN 0039-6109. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003961090570308X>
- OREL, Miroslav. *Anatomie a fyziologie lidského těla: pro humanitní obory* [online]. Praha: Grada, 2019 [cit. 2021-02-07]. Psyché (Grada). ISBN 978-80-271-1179-4. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/anatomie-a-fyziologie-lidskeho-tela-405840/>
- PEJCHAL, Jaroslav. *Biofyzika pro záchranáře*. [Hradec Králové]: Univerzita obrany, 2013, str. 55. ISBN 978-807-2313-525.
- PENHAKER, Marek a Martin AUGUSTYNEK. *Zdravotnické elektrické přístroje 2*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3108-4.
- Phenix CP, Togtema M, Pichardo S, Zehbe I, Curiel L. High intensity focused ultrasound technology, its scope and applications in therapy and drug delivery. *J Pharm Pharm Sci*. 2014;17(1):136-53. doi: 10.18433/j3zp5f. PMID: 24735765.
- Plural, PI, & Price, LL 2016, *The Hearing Sciences*, Third Edition, Plural Publishing, Incorporated, San Diego. [8 March 2021]. Available from: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cuni/detail.action?docID=5446032&query=physiology+of+hearing#>

Purkayastha S, Sorond F. Transcranial Doppler ultrasound: technique and application. *Semin Neurol.* 2012 Sep;32(4):411-20. doi: 10.1055/s-0032-1331812. Epub 2013 Jan 29. PMID: 23361485; PMCID: PMC3902805.

REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Multimedialní Encyklopedie Fyziky: Základní dělení zvuků.* 2021. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/186-zakladni-deleni-zvuku>

RESL, Vladimír, Martin LEBA, Ivan RAMPL a Ján ŘÍČAŘ. Vyšetřování kůže vysokofrekvenčním ultrazvukem. *Praktický lékař.* 2008, **88**(1), 6-13. ISSN 1805-4544.

ROKYTA, Richard. *Fyziologie a patologická fyziologie: pro klinickou praxi.* Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-4867-2.

ROSINA, Jozef, Hana KOLAŘOVÁ a Jiří STANEK. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů.* Praha: Grada, 2006, 92 s. ISBN 978-80-247-1383-0.

ROSINA, Jozef. *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory.* Praha: Grada, 2013, str. 74-82. ISBN 978-802-4742-373.

SEDLÁK, Vratislav a Petr VANÍK. *Ultrazvuk hrudníku v klinické praxi.* Praha: Maxdorf, [2016]. Jessenius. ISBN 978-80-7345-349-7.

SEIDL, Zdeněk. *Radiologie pro studium i praxi* [online]. Praha: Grada, 2012 [cit. 2021-02-11]. ISBN 978-80-247-4108-6. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/kniha/radiologie-pro-studium-i-praxi-833/>

SCHAUER, P. Vybrané statě z akustiky [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2008 [cit. 01. 03. 2021]. Dostupné z http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf

Sigrist RMS, Liau J, Kaffas AE, Chammas MC, Willmann JK. Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications. *Theranostics.* 2017 ;7(5):1303-1329. DOI: 10.7150/thno.18650.

Sommerauer, S., Muelling, C.K.W., Seeger, J. and Schusser, G.F. (2012), Anatomy and Anaesthesia of the Equine External Ear Canal. *Anat. Histol. Embryol.*, 41: 395-401. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0264.2012.01148.x>

Sucharda, Petr, and Lukás Zlatohlávek. *Základy Klinické Medicíny*, Karolinum Press, 2015. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cuni/detail.action?docID=4395918>.

ŠLAPÁK, Ivo a Milan URÍK. *Dětská otorinolaryngologie. 2.,* přepracované a doplněné vydání. Praha: Mladá fronta, 2019. Aeskulap. ISBN 978-80-204-5426-3.

ŠLAPÁK, Ivo. *Kapitoly z otorinolaryngologie a foniatrie.* Brno: Paido, 1995. Edice pedagogické literatury. ISBN 80-859-3113-3.

Thiessen, G.j. and A.c.c. Warnock. "Acoustics". The Canadian Encyclopedia, 25 July 2014, Historica Canada. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/acoustics>. Accessed 03 November 2020

THÜROFF, Stefan a Christian CHAUSSY. Transrektální cílený ultrazvuk o vysoké intenzitě při léčbě lokalizovaného karcinomu prostaty. *Urologické listy*. 2014, **12**(2), 6-18. ISSN 1801-7584.

TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. Vyd. 4., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0512-5.

UNGERMANN, L., ELIÁŠ, P., RYŠKA, P., MICHL, A., ŽIŽKA, J., KLZO, L. 2009. Dynamická kontrastní ultrasonografie jater. *Česká radiologie*. 2009, 63(1), 34-41. ISSN 1210-7883. Dostupné z: <http://www.cesradiol.cz/detail.php?stat=233>

VAHL JM, von Witzleben A, Reiter R, Theodoraki MN, Wigand M, Hoffmann TK, Goldberg-Bockhorn E. Infrasonnd a new weapon in cancer therapy? *Explore (NY)*. 2021 Mar 9:S1550-8307(21)00052-5. doi: 10.1016/j.explore.2021.03.001. Epub ahead of print. PMID: 33745848.

VALKOVIČOVÁ, Jiřina, Vladan BERNARD a Erik STAFFA. *ZÁKLADY BIOFYZIKY PRO OBOR FYZIOTERAPIE: Ultrazvuk* [online]. In: . 2016 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: file:///C:/Users/papin/Desktop/KNIHY/skripta_fyziolo.pdf

VAN den Bijgaart RJ, Eikelenboom DC, Hoogenboom M, et al. Thermal and mechanical high-intensity focused ultrasound: perspectives on tumor ablation, immune effects and combination strategies. *Cancer Immunology, Immunotherapy* : CII. 2017 Feb;66(2):247-258. DOI: 10.1007/s00262-016-1891-9.

VLACHOVÁ, Magda. *MECHANICKÉ KMITÁNÍ A VLNĚNÍ: Vznik a druhy zvuku* [online]. In: . [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/F1141/um/superzabavnejucebntext.pdf>

WANG, H., Wang, J., Yang, Q. *et al.* Synthesis of a Novel Nitronyl Nitroxide Radical and Determination of its Protective Effects Against Infrasonnd-Induced Injury. *Neurochem Res* **40**, 1526–1536 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11064-015-1602-5>

ZHAO Ju Hui, WANG Jin Hai, LUO Jin Yan, GUO Xiao Yan, WANG Yan, CHENG Yan. Effects of Infrasonnd on Gastric Motility, Gastric Morphology and Expression of Nitric Oxide Synthase in Rat[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2018, 31(5): 399-402. doi: 10.3967/bes2018.052

Zdroje obrázky:

Obrázok č.1:

PTÁČEK, Ladislav. Technické kukátko - Co je to zvuk? Prostě zvuk! In: *Muzikus* [online]. 20.2.2018 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-serialy/Technicke-kukatko-Co-je-to-zvuk-Proste-zvuk~20~unor~2018/#prettyPhoto>

Obrázok č.2

HAVRÁNEK J. Hluk a zdraví, 1. vyd. Praha: Avicenum, 1990. 278 s. ISBN 80-201-0020-2.

Obrázok č.3

BARGÁR, Z., KOLLÁR, A. *Praktická audiometria*. Martin: Osveta, 1986.

Obrázok č. 4

KABÁTOVÁ, Zuzana a Milan PROFANT. *Audiológia: Základy akustiky pre potreby audiológie* [online]. Praha: Bratislava, 2012 [cit. 2021-02-05]. ISBN 978-80-247-7888-4. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/audiologia-404742/>

Obrázok č. 5

MINÁŘ, Jakub. Reprodukce zvuku aneb základy teorie. In: *AVmania* [online]. CZECH NEWS CENTER, 7. července 2014n. l., 7. července 2014 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://avmania.zive.cz/reprodukce-zvuku-aneb-zaklady-teorie>

Obrázok č. 6

ČAPKA, Radomír. *Moderní okna jako účinná ochrana proti hluku*. 2018. Dostupné také z: <https://drevmag.com/cs/2018/12/04/moderni-okna-jako-ucinna-ochrana-proti-hluku/>

Obrázok č. 7

OREL, Miroslav. *Anatomie a fyziologie lidského těla: pro humanitní obory* [online]. Praha: Grada, 2019 [cit. 2021-02-07]. Psyché (Grada). ISBN 978-80-271-1179-4. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/anatomie-a-fyziologie-lidskeho-tela-405840/>

Obrázok č. 8

DYLEVSKÝ, Ivan. *Funkční anatomie* [online]. Praha: Grada, 2009 [cit. 2021-02-06]. ISBN 978-80-247-7030-7. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/kniha/funkcni-anatomie-1888/>

Obrázok č. 9

OREL, Miroslav. *Anatomie a fyziologie lidského těla: pro humanitní obory* [online]. Praha: Grada, 2019 [cit. 2021-02-07]. Psyché (Grada). ISBN 978-80-271-1179-4. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/anatomie-a-fyziologie-lidskeho-tela-405840/>

Obrázok č. 10

KŘIVÁNKOVÁ, Markéta. *Somatologie: pro střední zdravotnické školy. 2., doplněné vydání*. Praha: Grada Publishing, 2019. Sestra (Grada). ISBN 978-80-271-0695-0

Obrázok č. 11

KŘIVÁNKOVÁ, Markéta. *Somatologie: pro střední zdravotnické školy. 2., doplněné vydání*. Praha: Grada Publishing, 2019. Sestra (Grada). ISBN 978-80-271-0695-0

Obrázok č. 12

MALÍKOVÁ, Hana. *Základy radiologie a zobrazovacích metod*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2019. ISBN 978-80-246-4036-5

Obrázok č. 13

CHUDÁČEK, Zdeněk. Pánev v AP projekci. Radiodiagnostika. Martin, SR: Osveta, 1993, s. 217. ISBN 80-217-0571-X.

Obrázok č.14

HRAZDIRA, Ivo. ÚVOD DO ULTRASONOGRAFIE: V OTÁZKÁCH A ODPOVĚDÍCH [online]. Brno: Klinika zobrazovacích metod LF MU, Fakultní nemocnice u Sv. Anny v Brně, 2008 [cit. 2021-02.16]. Dostupné z: https://docplayer.cz/4239393-Uvod-do-ultrasonografie.html#show_full_text

Obrázok č. 15

JÜTTNEROVÁ, Sandra a Iveta BRYJOVÁ. Ultrasonografie. *INTERAKTIVNÍ UČEBNICE ULTRASONOGRAFIE* [online]. 2015/16 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: http://www.jtarchitekt.cz/lekarske_vyuziti.html

Zdroj tabulky:

Tabuľka č. 1

NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika. 2.*, zcela přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2019, str. 199-233. ISBN 978-802-7102-099.

Tabuľka č.2

BUREŠ, Jiří. Závislost rychlosti šíření zvuku ve vzduchu na teplotě. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-vzduch.htm>

Tabuľka č.3

ROKYTA, Richard. *Fyziologie a patologická fyziologie: pro klinickou praxi*. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-4867-2.

Zdroj grafy:

Graf č.1

BUREŠ, Jiří. Závislost rychlosti šíření zvuku ve vzduchu na teplotě. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-vzduch.htm>