

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY AKUSTIKY

Diplomová práce

Knihovna JU - PF



3 1 1 5 1 7 1 7 0 0

Autor: Tomáš Zívr

Vedoucí diplomové práce: RNDr. František Špulák

Datum odevzdání: prosinec 2005

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně
s použitím uvedené literatury.

V Českých Budějovicích

Tomáš Hlvr

.....

Abstract

The study was aimed at the investigation of the phenomenon of the...
The results of the research are presented in the following...
The study was conducted in the...
The results of the research are presented in the following...
The study was conducted in the...

Děkuji RNDr. Františkovi Špulákovi za jeho odbornou pomoc při
vypracování této diplomové práce.

Anotace

Tato práce se zabývá fyzikálními základy akustiky, přičemž tuto problematiku popisuje teoreticky z pohledu fyzikálního a zároveň ji doplňuje o vysvětlení některých biologických činitelů v rámci mezipředmětových vztahů. K teoretickému základu je připojen soubor klasických a motivačních experimentů doplňujících teoretické poznatky.

Annotation

The aim of this thesis is to examine physical basis of acoustics. The work describes this phenomenon theoretically from physical point of view and also contains explanation of some biological factors in order to show inter relations between the subjects. The file of classical and motivating experiments is added to the theoretical core to complete the theoretical research.

OBSAH

1. Úvod	1
2. Fyzikální část základů akustiky	2
2.1 Vlnění	2
2.1.1 Druhy vlnění	2
2.1.2 Stojaté vlnění a rezonance	7
2.1.3 Huygensův princip	11
2.1.4 Rychlost šíření vlnění	17
2.1.5 Dopplerův jev	19
2.2 Akustika	22
2.2.1 Vznik a druhy zvuku	22
2.2.2 Šíření a rychlost zvuku	23
2.2.3 Dynamika a barva zvuku	26
2.3 Hudební akustika	33
2.3.1 Tónové soustavy	33
2.3.2 Zdroje hudebních tónů	41
2.4 Ultrazvuk a infrazvuk	52
3. Biologická část základů akustiky	54
3.1 Sluchové ústrojí	54
3.1.1 Zevní ucho	55
3.1.2 Střední ucho	56
3.1.3 Vnitřní ucho	57
3.2 Slyšení	60
3.2.1 Maskování	61
3.2.2 Adaptace, únava a poškození sluchu	62
3.2.3 Binaurální slyšení	65
3.3 Lidský hlas	67

3.4 Vnímání zvuku živočichy	74
3.4.1 Lidský sluch ve vodní říši	75
3.4.2 Delfíni	76
3.4.3 Netopýři	77
3.4.4 Sloni	78
4. Experimenty	81
4.1 Klasické experimenty	81
4.1.1 Chvění ladičky	81
4.1.2 Chvění struny	82
4.1.3 Chvění desek	84
4.1.4 Časové rozvinutí zvukových vln	85
4.1.5 Akustická rezonance dvou stejných ladiček	86
4.1.6 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu (varianta 1)	87
4.1.7 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu (varianta 2)	89
4.1.8 Měření rychlosti zvuku v tyči (Kundtova metoda)	91
4.1.9 Odraz zvuku	93
4.1.10 Hlasitost zvuku	94
4.1.11 Obor slyšitelnosti	95
4.1.12 Práh slyšení a bolesti	96
4.2 Motivační experimenty	96
4.2.1 Akustická rezonance (Stála basa u primasa)	97
4.2.2 Krabička od filmu jako hudební nástroj	98
4.2.3 Píšťalka	99
4.2.4 Kelímkový telefon	99
4.2.5 Malujeme zvukem	100
4.2.6 Jak funguje střední ucho	101
5. Závěr	103
6. Seznam použité literatury	104

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá fyzikálními základy akustiky a následným zpracováním fyzikálních experimentů týkajících se této problematiky, které jsou po didaktické stránce vhodné pro školní praxi.

Teoretickým základem práce je shrnutí vybraných základních fyzikálních pojmů a jevů v akustice a také v hudební akustice. Dále se pro hlubší pochopení zabývá biologickou podstatou slyšení u člověka a některých zvířat, jejichž vnímání zvuku vysvětlené po biologické stránce je, v rámci mezipředmětových vztahů, pro poznání vnímání z fyzikálního hlediska velice užitečné. V této části práce jsou také zahrnuty některé poznatky o lidském hlase, řeči a zpěvu, jako doplnění k hudební akustice.

Poslední část této práce tvoří soubor fyzikálních experimentů z akustiky. Experimenty jsou rozděleny do dvou částí. V první části jsou obsaženy experimenty tzv. klasické, které se z didaktického hlediska řadí mezi experimenty demonstrační, a v druhé části experimenty motivační.

Těžiště práce spočívá v teoretickém výkladu základů akustiky a v následném návrhu souboru fyzikálních experimentů pro výuku akustiky. Přitom se snaží spojit fyzikální a biologická hlediska základů akustiky a uvedenými poznatky tuto problematiku doplnit.

2. Fyzikální část základů akustiky

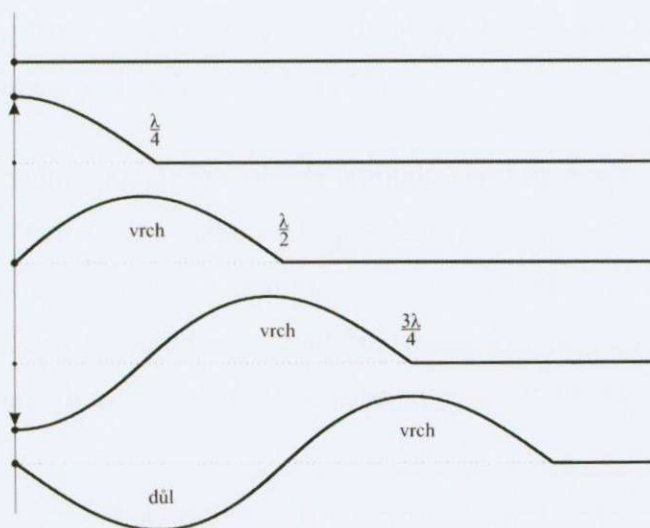
2.1 Vlnění

Je-li malý hmotný element nějakého pružného prostředí uveden v kmitavý pohyb, začne se tento rozruch přenášet v prostředí dál. Tento přenos kmitavého pohybu je dán skutečností, že každý hmotný element je vázán s dalšími hmotnými elementy v prostředí díky pružným molekulovým vazbám. Tím si hmotné elementy prostředí předávají energii svého kmitavého pohybu a v prostředí tak vzniká vlnění, přičemž energie postupuje ve směru šíření vlnění (přenos energie nastává pouze u vlnění postupného, nikoliv u stojatého). Částice tělesa konají periodické pohyby, avšak těleso jako celek zůstává v klidu.

2.1.1 Druhy vlnění

Je-li hmotný bod součástí prostředí, pak jeho kmitání se přenáší postupně stálou rychlostí na všechny částice. Takto vzniklý pohyb celé soustavy hmotných bodů se nazývá postupné vlnění. Nejpřehlednější je tento úkaz v jednorozměrném prostředí, čili v tzv. bodové řadě, jejíž jedna částice začne kmitat. Pro jednoduchost budeme předpokládat, že kmity všech bodů jsou harmonické. Směry kmitání mohou být různé. Zvláštní důležitost mají však dva případy. V prvním případě jsou směry kmitů kolmé k řadě bodové a vzniklé vlnění se nazývá postupné vlnění příčné. V druhém případě se kmity dějí ve směru řady a pak máme vlnění postupné podélné [5].

Vlnění příčné je děj, při kterém částice kmitají pouze napříč směru postupu vlnění kolem svých rovnovážných poloh (obr. 2.1). Vlnění se prostředím šíří konečnou rychlostí v , která je v různých prostředích různá.



Obr. 2.1 Postupná příčná vlna

Je-li v rychlost šíření vlnění, lze ji vyjádřit vztahem:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \text{ nebo } v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda, \quad (2.1)$$

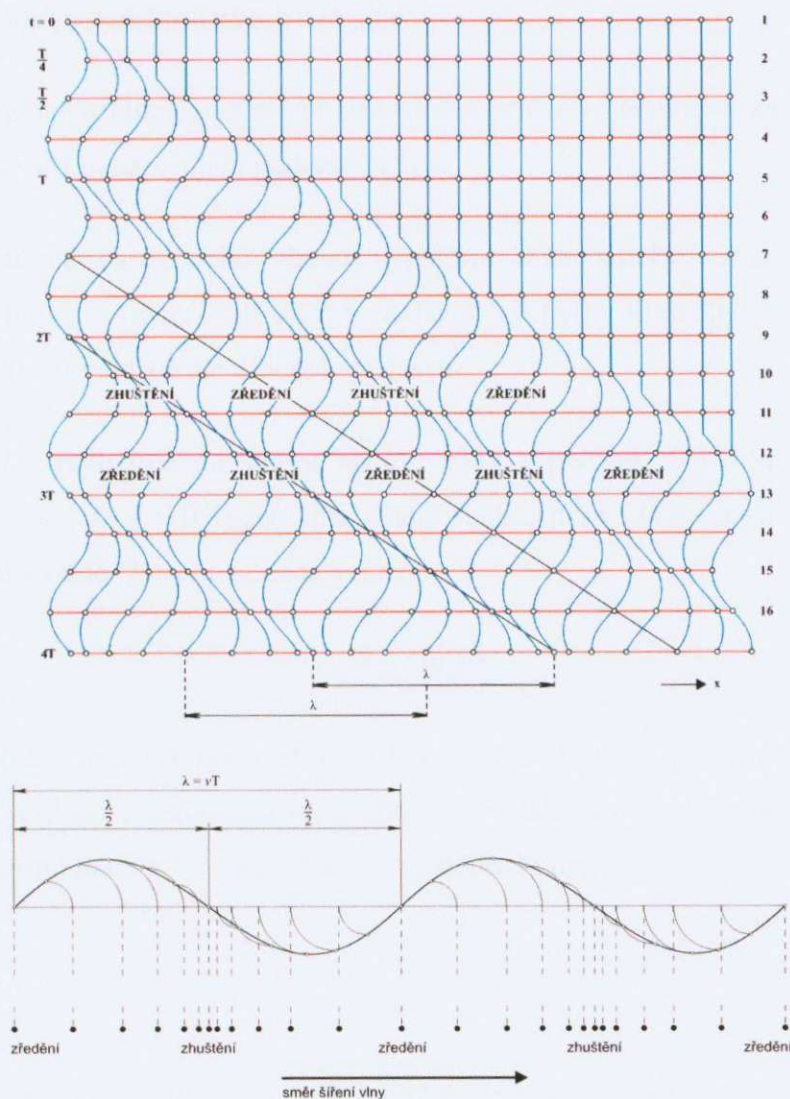
kde f je frekvence vlnění.

Rychlost v nazýváme fázovou rychlostí, protože se jí přemísťuje jistá, ale stejná fáze (např. u příčné vlny se touto rychlostí přemísťuje místo největší výchylky na téže straně bodové řady, tzv. vrch). Není to rychlost kmitajících bodů. Vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších částic, které kmitají se stejnou fází.

Okamžitý tvar příčné vlny v řadě bodové je sinusoida a postup vlnění se jeví tak, jakoby se sinusoida, zhotovená třeba z nepoddajného drátu, posunovala stálou rychlostí v ve směru řady. Je nutné si uvědomit, že žádný postup částic ve skutečnosti nenastává, ale že jde o zevní dojem. Částice jen kmitají napříč směru postupu vlnění kolem svých rovnovážných poloh. Bodová

řada původně přímá nabývá tak tvaru vlnovky, složené ze shodných půlvln, z nichž jedna se nazývá vrch a druhá důl [5].

U postupného podélného vlnění kmitají všechny body řady ve směru šíření vlnění. Výchylka každého bodu pak leží přímo v bodové řadě, na které se netvoří maxima – vrchy a minima – doly, ale v závislosti na přičítání a odčítání výchylky y k souřadnici x zhuštění (místa, kde jsou body blíže u sebe) a zředění (místa, kde jsou body dále od sebe), viz obr. 2.2 [15].



Obr. 2.2 Postupná podélná vlna

Zmíněné jevy u vlnění v bodové řadě lze interpretovat též pro vlnění prostorové s důležitým omezením pro různá prostředí. Přenášení rozruchu při podélném vlnění je závislé na existenci tlakových sil, které existují ve všech druzích prostředí. Stlačit lze jak pevnou látku, tak kapalinu i plyn. Naproti tomu přenášení rozruchu při příčném vlnění je vždy podmíněno existencí tečných (smykových) sil, které existují pouze v pevných látkách. Ohnout lze pouze pevnou látku, avšak nikoliv kapalinu či plyn. Protože vlastnosti pevných látek jsou závislé na uvažovaném směru, tak i rychlost šíření podélných a příčných vln je v těchto látkách rozdílná.

V pevných látkách se může šířit vlnění příčné i podélné, v kapalinách a plynech se šíří pouze vlnění podélné [15].

Postupné harmonické vlnění vyjadřuje matematický vztah, který se nazývá vlnová rovnice. Je jí určena závislost výchylky libovolné částice řady na vzdálenosti x od zdroje vlnění a na čase t .

Osu x položíme do směru bodové řady a počátek O zvolíme v bodě, z něhož se v čase $t = 0$ začne šířit vlnění rychlostí v v kladném směru osy x . Výchylka v bodě O nechť je dána vztahem

$$y(t) = A \sin \omega t.$$

Kmitavé pohyby bodů se však liší ve fázi. Fáze se podle předpokladu přenáší rychlostí v . Znamená to, že bod ve vzdálenosti x je ve fázi zpožděn proti prvnímu bodu v O , a jeho časové zpoždění je rovno

$$\frac{x}{v}.$$

Závislost výchylky tohoto bodu na čase je tedy dána vztahem

$$y_{(x,t)} = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

což je zároveň vztah pro závislost výchylky bodu na vzdálenosti x od počátku O . Je to vlnová rovnice vlnění, které se šíří v přímé bodové řadě rychlostí v [6].

Pomocí rovnice (2.1) a vztahu $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ lze výraz napsat i v jiných používaných tvarech

$$\begin{aligned} y &= A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{v} \right) = \\ &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{vT} \right) \text{ a } \lambda = vT, \text{ potom} \\ y &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Rovnicemi (2.2) je popsáno postupné vlnění příčné a podélné. Rovnice obsahují dvě proměnné veličiny, a to x a t . Proměnná x vystihuje stav v prostoru, její periodou je vlnová délka λ . Druhá proměnná t vystihuje stav jevu v čase t , její periodou je doba kmitu T . Vlnění je tedy dvojnásobně periodicky proměnný jev, a to v čase a v prostoru. Kdyby se vlnění šířilo v záporném směru osy x , bylo by u druhého členu v závorce rovnice (2.2) znaménko plus [5].

Od zdroje kmitavého pohybu se šíří do okolí všemi směry postupné vlnění. Na šíření vlnění má podstatný vliv jakost prostředí. Prostředí, které má všude stejné vlastnosti, se nazývá stejnorodé nebo homogenní. Mění-li se vlastnosti prostředí od místa k místu, je nestejnorodé (heterogenní). Prostředí, v němž se vlnění šíří v různých směrech různou rychlostí, se nazývá

anizotropní. Prostředí, v němž se šíří vlnění ve všech směrech stejnou rychlostí, se nazývá izotropní.

V izotropním prostředí se tedy rozšíří vlnění ze zdroje všemi směry za dobu t do vzdálenosti $r = vt$, tj. body stejné fáze budou vyplňovat kulovou plochu. Množina bodů kmitajících v téže fázi se nazývá vlnoplocha. Směr, v němž vlnění postupuje, se nazývá paprsek. V prostředí izotropním je tedy vlnoplochou plocha kulová a paprskem normála této plochy. Protože v daném případě jsou všechny vlnoplochy soustředěné koule, nazýváme tuto vlnu kulovou. V prostředí anizotropním, kde vlnoplocha má tvar rozdílný od plochy kulové, paprsek a směr normály obecně nesplývají [5].

2.1.2 Stojaté vlnění a rezonance

Šíří-li se bodovou řadou současně dvě různá vlnění, pak se skládají – interferují v jedno vlnění výsledné. Toto vlnění má stejnou rychlost šíření jako vlnění dílčí, která se šíří v téže bodové řadě stejnou rychlostí. V praxi je nejdůležitější interference vlnění shodných frekvencí, kdy dochází k zesílení nebo k zeslabení výsledného vlnění. Nejdůležitějším případem interference vlnění je stojaté vlnění.

Stojaté vlnění vzniká, jestliže se dvě postupná vlnění o stejné frekvenci a amplitudě šíří v lineární bodové řadě opačnými směry. Takového stavu se ideálně dosáhne za předpokladu, že se vlnění odrazí od překážky bez jakékoli ztráty energie. Odražené vlnění má stejnou frekvenci a amplitudu jako vlnění dopadající. Tento interferenční jev si odvodíme matematicky.

Pro výchylku y_1 vlny postupující kladným směrem osy x , v bodě M ve vzdálenosti x od počátku platí

$$y_1 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Výchylka y_2 způsobená vlnou šířící se opačným směrem je

$$y_2 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right).$$

Výchylka výsledného vlnění v bodě M vzniklého interferencí obou postupných vlnění

$$y = y_1 + y_2.$$

Po úpravě uvedených vztahů dále dostaneme rovnici stojatého vlnění

$$y_{(x,t)} = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (2.3)$$

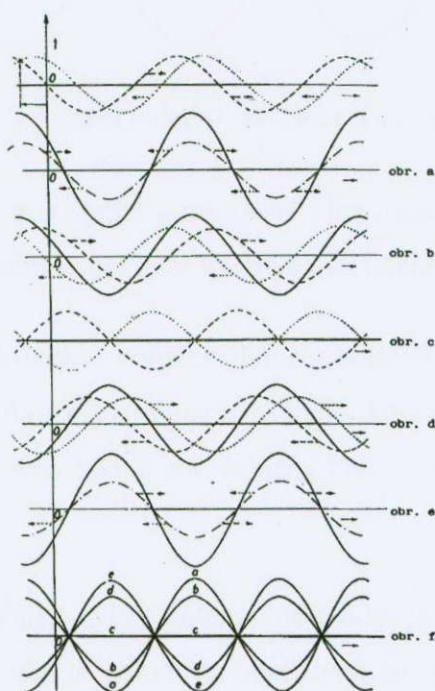
Protože se čas vyskytuje ve výrazu (2.3) v samostatném faktoru neobsahujícím x , znamená to, že výsledné vlnění je harmonické a má všude stejnou frekvenci a stejnou fázi, tj. všechny body procházejí současně nulovou polohou a obsahují největší výchylky [5].

Body s maximální amplitudou kmitání jsou označovány jako kmitny, body s nulovou amplitudou kmitání jako uzly stojatého vlnění. Dvě sousední kmitny i sousední uzly jsou vzdáleny od sebe vždy polovinu vlnové délky. Vzdálenost mezi sousedními kmitnami a uzly činí čtvrtinu vlnové délky.

Upřesněním fázových poměrů lze zjistit, že body ležící mezi sousedními uzly kmitají sice ve fázi, avšak body v sousední půlvlně kmitají s opačnou fází.

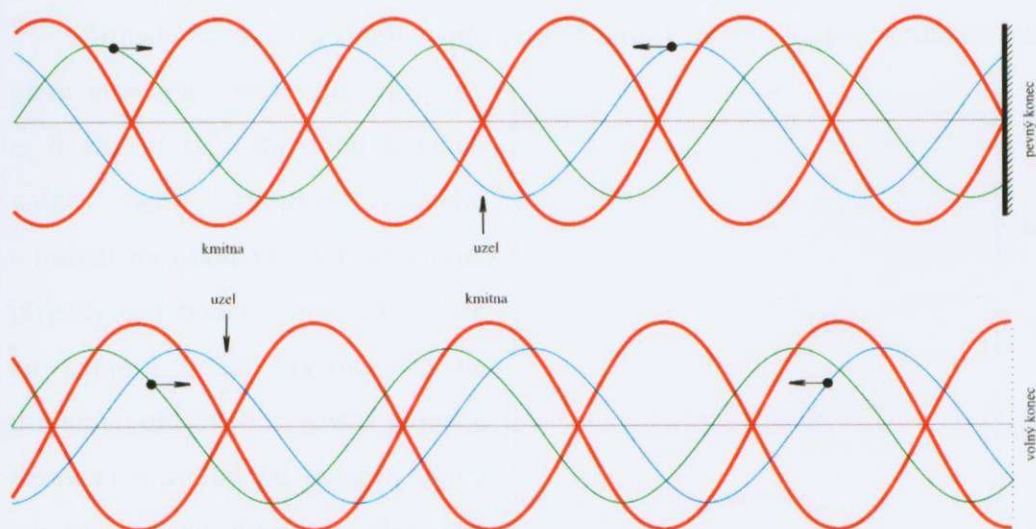
Stojaté vlnění, při kterém uzly vůbec nekmitají, je nazýváno úplným. Jeho vznik je patrný z jednotlivých částí obr. 2.3 [15].

Zásadní rozdíl mezi vlněním postupným a stojatým: Při postupném vlnění kmitají všechny body řady se stejnou amplitudou, avšak s různou fází, tj. každý následující bod kmitá o něco později než bod předcházející; fáze se šíří rychlostí vlnění (fázová rychlost). Při stojatém vlnění kmitají všechny body se stejnou fází ve všech bodech vzdálených o vlnovou délku, s opačnou fází v bodech vzdálených o půl vlnové délky. Amplitudu mají avšak různou, periodicky závislou na poloze bodu. Některé body mají trvale amplitudu největší (kmitny), jiné mají amplitudu trvale rovnou nule (uzly) [5].



Obr. 2.3 Vznik stojatého vlnění

Způsob ukončení bodové řady určuje okrajové podmínky vzniklého stojatého vlnění a tím i rozložení jeho uzlů a kmiten. Na příkladu vzniku příčného stojatého vlnění na obr. 2.4 je zřejmé, že když dospěje výchylka na nepohyblivý pevný konec bodové řady, vznikají v důsledku její snahy tento bod vychýlit reakční (opačně orientované) síly, které odraženou výchylku vrací s opačnou fází.



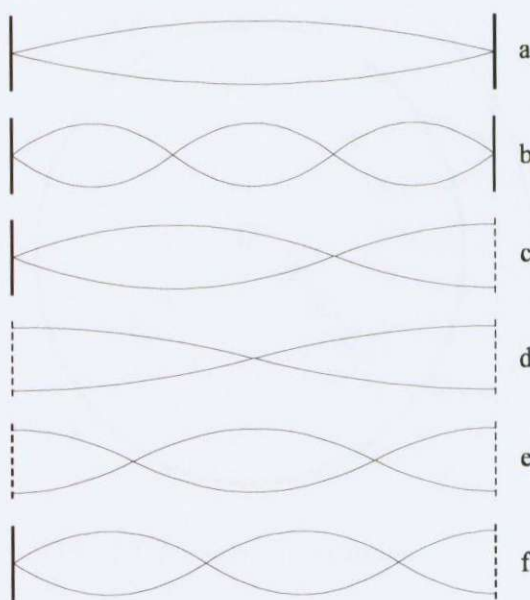
Obr. 2.4 Odraz vlnění na konci bodové řady

Součet výchylek dopadající a odražené vlny bude na konci řady nulový, proto musí být na pevném konci uzel výchylky stojatého vlnění.

V případě pohyblivého volného konce bodové řady nepůsobí žádné reakční síly, které by obracely orientaci výchylky koncového bodu. Dopadající vlna se odráží se stejnou fází a na volném konci vzniká kmitna výchylky stojatého vlnění [15].

Stojaté vlnění vzniká zvláště intenzivně tehdy, je-li prostředí ohraničeno z obou stran, takže se vlnění odráží na obou rozhraních. Pak nejsilněji vzniká stojaté vlnění v případech, jejichž některé příklady jsou schématicky zobrazeny na obr. 2.5a-f, tj. je-li vzdálenost mezi oběma pevnými (a, b) a oběma volnými (d, e) konci bodové řady rovna $\frac{\lambda}{2}$ nebo lichému násobku $\frac{\lambda}{2}$, nebo je-li rovna $\frac{\lambda}{4}$ nebo lichému násobku $\frac{\lambda}{4}$ mezi jedním koncem volným a druhým koncem pevným (c, f).

Případy a, b odpovídají např. chvění struny nebo sloupce vzduchu na obou stranách uzavřeného, případy e, d chvění tyče na obou koncích volné nebo sloupce vzduchu v trubici na obou koncích otevřené, případy c, f podélnému chvění tyče na jednom konci upevněné a na druhém volné nebo chvění sloupce vzduchu v trubici na jednom konci uzavřené a na druhém volné atp. Vznik chvění takového zařízení je způsoben tím, že do něho vstupuje vlnění vhodné frekvence zvnějška.



Obr. 2.5 Chvění pružných těles

Říkáme, že zařízení se rozechvěje rezonancí. Vyhovuje-li těleso nebo zařízení takovým podmínkám, pak se nazývá rezonátor, a příslušná frekvence se nazývá vlastní.

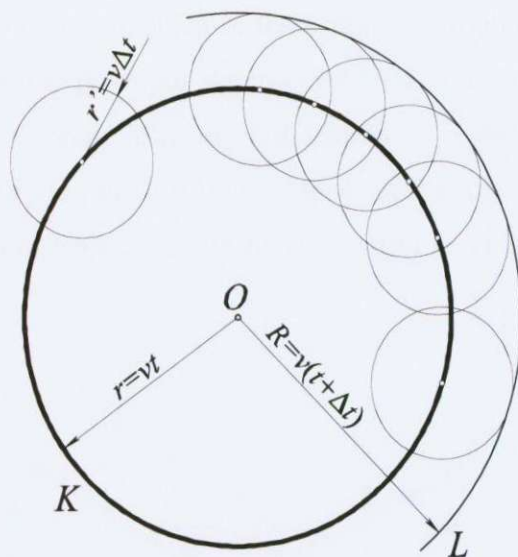
Vznikne-li v takovém případě stojaté vlnění, pak se udrží i po nějakou dobu po zániku budícího vlnění. Nejsou-li podmínky rezonance splněny, vlnění stojaté zaniká okamžitě s budícím vlněním [6].

2.1.3 Huygensův princip

Huygensův princip poskytuje model, kterým je možno šíření vlnění popsat. Podle něho každý bod vlnoplochy se stává zdrojem nového kulového vlnění a vlnoplochu po dalším časovém intervalu Δt je možno sestrojit jako vnější obalovou plochu ke všem těmto elementárním vlnoplochám o poloměrech $v\Delta t$.

Lze teoreticky dokázat, že rozruchy od elementárních vln se všude jinde kromě bodů obalové vlnoplochy ruší interferencí [6].

Pro objasnění Huygensova principu si představme, že se vlnění šíří na všechny strany z jistého zdroje O homogenního izotropního prostředí (obr. 2.6). Za dobu t dospěje vlnění na vlnoplochu K , tj. na plochu kulovou o poloměru $r = vt$, kde v je rychlost šíření vln. Každý bod vlnoplochy se stává zdrojem elementárního vlnění, které se z něho šíří ve tvaru kulových vlnoploch. Po době Δt jsou ele-



Obr. 2.6 Huygensův princip

mentární vlnoplochy koule o poloměru $r' = v\Delta t$. Obálka, obalující tyto elementární vlnoplochy ve směru šíření původního vlnění je koule L soustředná s K , o poloměru $R = r + r' = vt + v\Delta t = v(t + \Delta t)$. V ostatních místech se elementární vlny interferencí ruší. Abychom tedy zjistili vlnoplochu L v okamžiku $t + \Delta t$, stačí, známe-li vlnoplochu v některém předchozím okamžiku t , aniž bychom museli znát původní zdroj O .

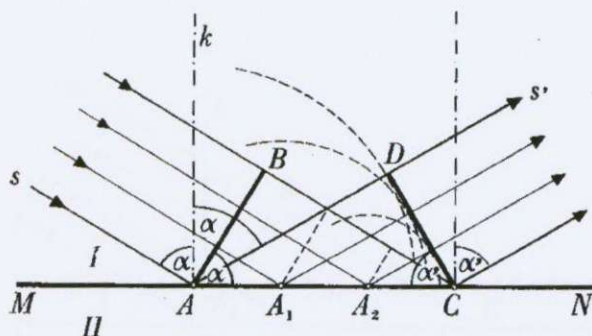
Dopadne-li vlnění šířící se v jednom prostředí na rozhraní druhého prostředí, stává se každý bod rozhraní, k němuž vlnění dospělo, středem elementárních vln. Z místa dopadu se vlnění šíří jednak zpět do prostředí prvního, nastal odraz vlnění, vzniká vlnění odražené, jednak vniká vlnění do druhého prostředí, v němž má ovšem jinou rychlost, vzniká lom vlnění na rozhraní dvou prostředí [5].

Odras vlnění (reflexe)

Uvažujme, že rovinná vlna, jejíž část AB je ohraničena dvěma paprsky s , s_1 (obr. 2.7), dopadá na rovinné rozhraní dvou prostředí I a II . Když čelo

vlnoplochy prochází právě bodem A na rozhraní, stává se tento bod A zdrojem elementární vlny, jež se šíří zpět do prvního prostředí stejnou rychlostí. V témž okamžiku je bod B na vlnoploše od rozhraní ještě ve vzdálenosti $vt = BC$. Během doby t dopadají jednotlivé body vlnoplochy AB postupně na rozhraní. Body A_1, A_2 atd. se stávají zdroji, vysílajícími elementární vlny, šířící se zpět do původního prostředí.

Než pravý konec vlnoplochy, bod B , dosáhne rozhraní MN , rozšíří se vlna vycházející z bodu A a bude mít tvar kruhu o poloměru $vt = AD = BC$. Poloměry ostatních elementárních kruhových vlnoploch vycháze-



Obr. 2.7 Odraz vlnění

jících z bodů A_1, A_2 atd. jsou postupně menší a menší. Obálka těchto elementárních vlnoploch je tečna CD , vedená z bodu C ke kruhu se středem v A a poloměru vt . Trojúhelníky ACD a ACB jsou shodné ($AD = BC = vt$, strana AC je společná, úhly u D resp. u B jsou pravé). Z toho vyplývá, že ostré úhly u A resp. u C jsou shodné. To však znamená, že čelo dopadající vlny svírá s rozhraním MN stejný úhel jako čelo odražené vlny $\alpha = \alpha'$.

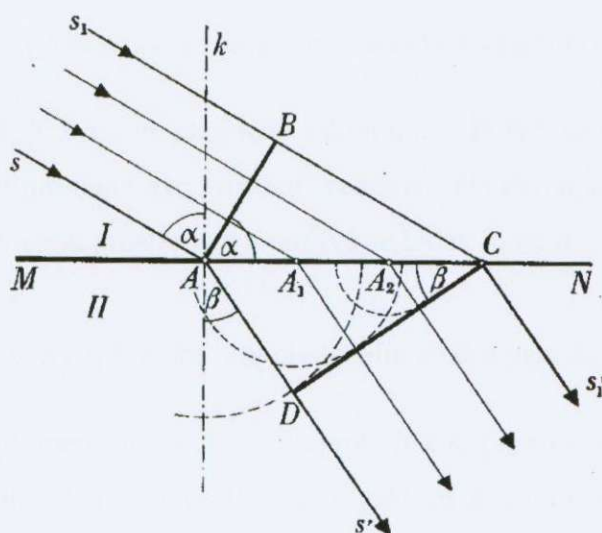
Uvažujme nyní místo vlnoploch paprsek dopadající s a odražený s' . Tyto paprsky svírají s kolmicí dopadu k , což je kolmice vztyčená k rozhraní v bodě dopadu A , na jedné straně úhel dopadu α , resp. na druhé straně k , úhel odrazu α' . Pak zákon odrazu zní: Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu, určené dopadajícími paprsky a kolmicí dopadu, přičemž úhel odrazu se rovná úhlu dopadu ($\alpha' = \alpha$) [5].

Lom vlnění (refrakce)

Uvažujme opět rovinnou vlnu, jejíž část je ohraničena dvěma paprsky s a s_1 (obr. 2.8). Vlna dopadá kose na rozhraní MN dvou prostředí I , II .

Body rozhraní mezi A a C se stávají rovněž středy elementárních vlnoploch, které se šíří také do prostředí II , v němž se šíří vlnění jinou fázovou rychlostí v_2 .

Za dobu t , tj. za dobu, za kterou i bod B vlnoplochy dosáhne rozhraní, vlnoplocha z bodu A bude mít poloměr $v_2t = AD$. Během doby t se stanou postupně i ostatní body rozhraní mezi AC zdroji elementárních vln. Obálka těchto elementárních vln, tj. nová vlnoplocha, je tečnou vedenou z bodu C ke kruhu se středem v A a poloměru



Obr. 2.8 Lom vlnění

$v_2t = AD$. Paprsky v novém prostředí II jsou přímky, kolmé na tuto vlnoplochu CD .

Úhel, který svírá čelo dopadající vlny s rozhráním, je úhel dopadu α a úhel, který svírá čelo vlny lomené, tj. vlny postupující v novém prostředí, je úhel lomu β . Stejné úhly svírají paprsek dopadající s a paprsek lomený s' s kolmicí dopadu k .

Protože obě délky BC a AD byly proběhnuty v témže čase t , jsou v poměru rychlostí vlny v obou prostředích, neboť

$$\frac{CB}{AD} = \frac{v_1 t}{v_2 t} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Vzhledem k tomu, že $BC = AC \sin \alpha$, $AD = AC \sin \beta$, lze postupně psát dále

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{f \lambda_1}{f \lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = n.$$

Podíl rychlostí $n = \frac{v_1}{v_2}$ (přesněji n_{12}) se nazývá index lomu (relativní vzájemný)

pro lom z prostředí *I* do prostředí *II*. Pro lom platí tedy zákon lomu: Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí veličina stálá rovnající se poměru rychlostí šíření vlny v obou prostředích a nazývá se index lomu n .

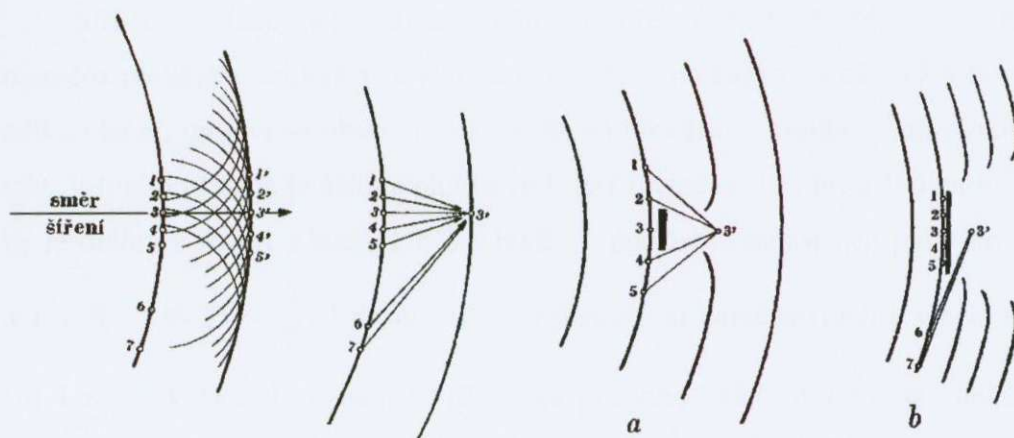
Platí $n_{12} = \frac{1}{n_{21}}$, jak to vyplývá např. z obr. 2.8 obrácením směru paprsku;

s' paprsek dopadající, s paprsek lomený. Je-li $v_2 < v_1$, a proto $\beta < \alpha$, paprsek se láme směrem ke kolmici dopadu. Je-li $v_2 > v_1$, tj. $\beta > \alpha$, pak nastává lom od kolmice. Je-li v posledním případě $n < 1$, k maximálnímu úhlu lomu $\beta_0 = 90^\circ$ patří úhel dopadu $\alpha_0 = \arcsin n$. Je-li nyní úhel dopadu α větší než tento úhel, nastává místo lomu úplný odraz, tj. dopadající paprsek se vrátí pod úhlem odrazu α do prostředí *I*, aniž by předal energii prostředí *II*. Zmíněný úhel α_0 se nazývá mezní úhel; je to největší úhel dopadu. Pro všechny ostatní úhly dopadu $\alpha > \alpha_0$ nastává úplný odraz [5].

Ohyb vlnění (difrakce)

Všimněme si ještě krátce jevů, jež vznikají při šíření vln v případě, když šíření je ovlivněno překážkami, jež jsou ve vlnovém poli. Je-li překážka značně větší než vlnová délka dopadající vlny, pozorujeme, že vlnění nevniká do

prostoru za překážkou, říkáme, že za překážkou vzniká stín. Jsou-li rozměry překážky téhož řádu jako vlnová délka, vlnění se dostává i do prostoru za překážkou, nastává ohyb. Obdobné jevy nastávají, dopadne-li vlna na nekonečně velkou stěnu, v níž je otvor nebo štěrbina. Je-li šířka štěrby velká vzhledem k vlnové délce, vymezuje štěrbina část vlnoploch, jež je ostře ohraničená. Je-li šířka štěrby téhož řádu jako vlnová délka, nastává také ohyb.



Obr. 2.9 Účinná část vlnoplochy

Obr. 2.10 Ohyb vlnění za překážkou

Podle Huygensova principu považujeme jednotlivé body původní vlnoplochy za zdroje rozruchu, z nichž se šíří kulové vlny. Na obr. 2.9 jsou to body 1 až 7 a další. Např. na vznik vlnění v bodě 3' se uplatňuje jen poměrně malá část vlnoplochy v okolí bodu 3, např. body 1 až 5. Body 6 a 7 jsou dosti vzdáleny od bodu 3' a protože intenzita vlnění klesá s druhou mocninou vzdálenosti, uplatní se jejich příspěvek nepatrně. Účinek vlnění ze vzdálenějších bodů 6 a 7 je zeslaben ještě tím, že nová vlnoplocha vzniká interferencí dílčích rozruchů a při interferenci se uplatňují i fázové poměry. U vzdálenějších bodů lze vždy najít dva takové body, pro které je dráhový rozdíl δ roven polovině vlnové délky $\delta = 73' - 63' = \frac{\lambda}{2}$, a taková vlnění se zeslabují. V bodě 3' setkávají se

rozruchy z bodů 1 až 5 s malými fázovými rozdíly a zesilují se. Vlnění v bodě 3' je způsobeno tedy jen jistou částí vlnoplochy v okolí bodu 3, kterou nazýváme účinná část vlnoplochy nebo účinná ploška. Velikost účinné plošky závisí jedinečně na vlnové délce. Čím je vlnová délka větší, tím je větší okolí bodu 3, z něhož přicházejí do bodu 3' rozruchy s menším fázovým posunutím, a tím je větší i účinná ploška. Pro krátké vlnové délky je účinná ploška malá. Průměr účinné plošky má řádově stejnou velikost jako vlnová délka.

Šíří-li se vlnění v prostředí, v němž je překážka, záleží především na rozměru překážky vzhledem k vlnové délce. Je-li překážka menší než vlnová délka vlnění, projeví se ohyb vlnění tak, že za překážkou prakticky nevznikne stín. V tomto případě je účinná ploška větší než překážka a z obr. 2.10a vidíme, že je dráhový rozdíl z bodů 1 a 2 v bodě 3' podstatně menší než půl vlnové délky $\delta = 13'-23' < \frac{\lambda}{2}$. I do prostoru za překážkou vniká rozruch a vlnění se šíří i za překážku. Je-li naopak překážka podstatně větší než vlnová délka, vzniká zřetelný stín. Na obr. 2.10b vidíme, že je dráhový rozdíl z bodů 6 a 7 velký a že lze v jejich okolí vždy najít body, jejichž účinek se v bodě 3' ruší. Vlnění se nedostane za překážku a vzniká stín. Je třeba však upozornit, že i v tomto případě vzniká ohyb vlnění, který se projeví pozvolným přechodem mezi stínem a místy, kde se šíří vlnění [5].

2.1.4 Rychlost šíření vlnění

Šíření prostorového vlnění je zejména charakterizováno svojí rychlostí, která je závislá nejenom na typu prostředí (pevné, kapalné, plynné), ale i na typu vlnění (podélné, příčné). V případě kapalin a plynů se prostorem šíří ve formě podélného vlnění střídané zhuštění a zředění resp. proměnná tlaková složka superponovaná na statický tlak dané kapaliny či plynu. Tato složka je označována jako akustický tlak

$$p = -K \frac{\partial y}{\partial x},$$

kde K je modul objemové pružnosti, y je složka výchylky kmitajících částic ve směru x .

Pro rovinné podélné vlnění v kapalinách a plynech lze odvodit vlnovou rovnici ve tvaru

$$\frac{K}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (2.4)$$

kde ρ je hustota kapaliny či plynu.

Vlnová rovnice prostorového vlnění v plynu či kapalině má následující tvar

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (2.5)$$

kde p je akustický tlak, v je rychlost šíření vlnění.

Porovnáním rovnice (2.4) s rovnicí (2.5) lze dojít k výrazu pro rychlost šíření vlnění v v kapalinách a plynech

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (2.6)$$

Z výrazu (2.6), který platí pro libovolnou vlnoplochu, vyplývá, že v hustších prostředích se podélné vlny šíří pomaleji než v řidších a že rychlost šíření roste se zvětšujícím se modulem pružnosti daného prostředí.

V pevných látkách platí pro rychlost šíření příčných vln vztah

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

kde G je modul pružnosti ve smyku.

Pro rychlost šíření podélných vln v případě tenkých tyčí má vztah tvar

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

kde E je Youngův modul pružnosti v tahu.

Podélné vlny se šíří v pevných látkách rychleji než vlny příčné. Obecně pak platí [15]

$$\frac{v_L}{v_T} > \sqrt{2}.$$

2.1.5 Dopplerův jev

Pohybuje-li se zdroj nebo pozorovatel nebo oba vzhledem k prostředí, jímž se šíří nějaké vlnění, vnímá obecně pozorovatel jiný kmitočet, než který zdroj vysílá. Změna kmitočtu způsobená uvedeným vzájemným pohybem zdroje a pozorovatele je tzv. Dopplerův jev.

V klidném prostředí se např. od zvukového zdroje šíří vlnění frekvence f rychlostí v . V příslušném prostředí, např. ve vzduchu, se vlnění dostane za dobu t až k povrchu koule o poloměru $r = vt$ za předpokladu, že rychlost šíření je ve všech směrech stejná. Všechny vlnoplochy pro jednotlivé časové okamžiky jsou pak soustředné plochy kulové (obr. 2.11a). Toto vlnění přijímá pozorovatel P . Je-li zdroj i pozorovatel v klidu, je vlnová délka $\lambda = \frac{v}{f} = vT$.

Frekvence, kterou pozorovatel vnímá, je dána počtem kmitů, který pozorovatel za sekundu zachytí [5].

Nastanou-li však případy, kdy se zdroj nebo pozorovatel pohybují vzhledem k prostředí, dají se takové situace popsat následujícím způsobem.

1. Zdroj Z je v klidu a pozorovatel P se blíží ke zdroji nebo se od zdroje vlnění vzdaluje.

Pozorovatel se pohybuje ve směru spojnice PZ rychlostí u ($u > 0$), která je menší než rychlost zvuku v ($u < v$). Jestliže se pozorovatel P rychlostí u ke zdroji zvuku přibližuje, dospěje k němu za jednotku času větší počet vlnoploch a pozorovatel registruje vyšší frekvenci zvuku [10]

$$f_1 = \frac{v+u}{\lambda} = \frac{v+u}{v} f = \left(1 + \frac{u}{v}\right) f.$$

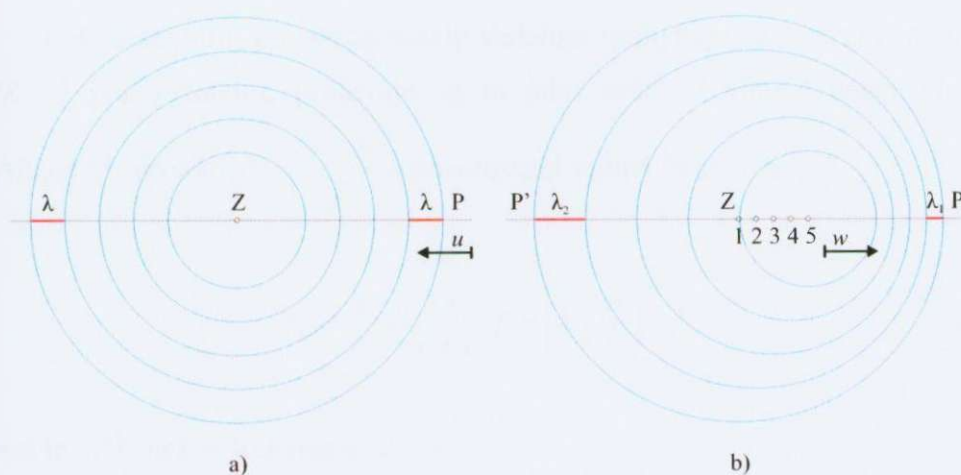
Tato změna kmitočtu je pouze důsledkem pohybu pozorovatele, neboť zdroj vysílá na všechny strany stále vlnění stejné frekvence f a i vlnová délka vysílaného vlnění je ve všech směrech daného prostředí stále stejná $\lambda = \frac{v}{f}$.

Pouze pozorovatel následkem vlastního pohybu přijímá změněnou frekvenci f_1 .

Vzdaluje-li se pozorovatel od klidného zdroje rychlostí u ($u < 0$), zjistí rovněž zdánlivou změnu kmitočtu [5]

$$f_2 = \frac{v-u}{\lambda} = \frac{v-u}{v} f = \left(1 - \frac{u}{v}\right) f.$$

V tomto případě pozorovatel vnímá frekvenci nižší než je frekvence f , kterou zdroj vysílá.



Obr. 2.11 Dopplerův jev: a) při pohybu pozorovatele b) při pohybu zdroje zvuku

2. Pozorovatel P je v klidu a zdroj Z se pohybuje k pozorovateli nebo se od něho vzdaluje.

Zdroj vysílající stále vlnění téhož kmitočtu f se blíží rychlostí w ($w > 0$) směrem spojnice ZP k pozorovateli. Středů kulových vln jsou v místech okamžité polohy zdroje. Protože se okamžitá poloha zdroje mění, mají kulové vlnoplochy různě položené středy a nejsou již soustředné. Ve směru pohybu zdroje jsou více nahuštěny, na opačné straně jsou dále od sebe (obr. 2.11b).

Vlnová délka vlnění vysílaného zdrojem ve směru jeho pohybu $\lambda_1 = \frac{v-w}{f}$ je menší než v případě, že zdroj je v klidu. Pozorovatel přijímá v tomto případě vlnění prostředí s jinou frekvencí f_1 , která se rovná [5]

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{v-w} f = \left(1 - \frac{w}{v}\right)^{-1} f.$$

Tato frekvence je vyšší než frekvence zdroje f .

Pokud se zdroj od pozorovatele vzdaluje (pohybuje se směrem spojnice $P'Z$ od pozorovatele), projevuje se to jako zvětšení vlnové délky vlnění vysílaného zdrojem $\lambda_2 = \frac{v+w}{f}$ a pozorovatel vnímá frekvenci

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{v+w} f = \left(1 + \frac{w}{v}\right)^{-1} f,$$

kteřá je nižší než je frekvence zdroje f .

2.2 Akustika

Akustika neboli nauka o zvuku se zabývá jevy, které souvisí s mechanickými kmity těles a se šířením mechanického vlnění v prostředí, přičemž frekvence jsou v oborech vnímatelných sluchem. Jde tedy o frekvence asi od 16 Hz do 20 kHz. Přitom se do akustiky zahrnují i témata o ultrazvuku, tj. o mechanických jevech, jejichž podstatou jsou kmity o frekvencích vyšších než 20 kHz [6].

2.2.1 Vznik a druhy zvuku

Zvuk lze definovat jako mechanické vlnění šířící se v pružném látkovém prostředí, jenž je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem.

Zdrojem zvuku jsou kmitající tělesa. Mezi zdrojem a přijímačem zvuku musí být pružné hmotné prostředí, které je schopné kmitu tělesa přenášet a šířit. Takové prostředí je vodičem zvuku.

Pokud má zvuk neperiodický průběh, nebo se nepravidelně mění i jeho amplituda, vzniká tak nehudební zvuk (praskot, vrzání aj.). Zvuk, jehož průběh je periodický vnímáme jako tón. Má-li průběh tlakových i rychlostních změn při znění tónu sinusový charakter, jedná se o jednoduchý tón.

U sinusového tónu je kmitavý děj určen rovnicí

$$y_1 = A \sin(\omega t - \varphi_1) = A \sin(2\pi f t - \varphi_1),$$

a u složeného tónu pak rovnicí

$$y = \sum_k A_k \sin(2\pi k f t - \varphi_k), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2.7)$$

kde y_1 je výchylka kmitajícího bodu, A amplituda, f frekvence periodicky proměnného děje, t čas, po který kmitavý děj trvá. Veličiny, určující charakter sinusového tónu jsou: frekvence, vypovídající o absolutní výšce tónu, amplituda, udávající jeho intenzitu (subjektivní hlasitost), a čas určující časové trvání tónu.

Vztahem (2.7) je vyjádřena i barva tónu (jde-li o složený tón) vzniklá díky vlivu vyšších harmonických tónů. Různá barva tónu téže výšky je způsobena tím, že vyšší harmonické tóny mají různé amplitudy a znějí tak s různou intenzitou.

2.2.2 Šíření a rychlost zvuku

Z definice zvuku vyplývá, že zvuk má vlnovou povahu. Proto jeho šíření lze obecně popsat pomocí zákonů o šíření vlnění. Z definice dále vyplývá, že zvuk se ze zdroje šíří jen pružným látkovým prostředím libovolného skupenství. Ve většině případů je tímto médiem vzduch, v němž se zvuk šíří jako podélné postupné vlnění.

Ozvěna

Ozvěna (echo) vzniká, odráží-li se zvuk na dosti rozlehlé překážce, která má určitou nejmenší vzdálenost od pozorovatele. Pozorovatel přitom může být sám zdrojem zvuku. Nejmenší vzdálenost překážky od pozorovatele musí být

aspoň asi 17 m, aby vznikla jednoslabičná ozvěna, neboť pro ucho dva krátkodobé zvuky nespływají tehdy, je-li mezi nimi časový interval delší než 0,1 s. Není-li tato podmínka dodržena, zvuk zdroje splývá se zvukem odraženým.

Dozvuk

Splývání zvuku zdroje s odraženým je běžným jevem v uzavřené místnosti, v níž nastává též odraz na několika stěnách, popř. i několikanásobný. Výsledný sluchový vjem je takový, jakoby původní zvuk dozníval. Tento jev se nazývá dozvuk. Dozvuk je důležitou akustickou charakteristikou místností, koncertních a divadelních sálů apod. Příliš dlouhý dozvuk způsobuje nesrozumitelnost řeči, jestliže však má místnost příliš krátký dozvuk, zní řeč dutě. Krátký dozvuk je způsoben např. velkou zvukovou pohltivostí stěn. Činitel akustické pohltivosti je bezrozměrná veličina, která se měří podílem akustické energie pohlcené a akustické energie dopadající.

Akustický stín, ohyb zvuku

Vlnové délky slyšitelných tónů mají velikost asi od 17 mm do 21 m. Proto i dosti rozměrné překážky jsou vzhledem k vlnovým délkám poměrně malé, takže dokonalý akustický stín nevzniká, naopak ohyb zvuku na překážce je velmi běžným jevem, zejména u hlubších tónů.

Rychlost zvuku

Zvuk se šíří v kapalinách a plynech rychlostí, která je stejná jako rychlost podélného vlnění v daném prostředí. V kapitole 2.1.4 byl uveden vztah pro rychlost zvuku v kapalných a plynných prostředích

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}},$$

kde K je modul objemové pružnosti a ρ hustota prostředí. Tento vztah je vhodný pro výpočet rychlosti zvuku v kapalinách. Pro šíření zvuku v plynech není modul K konstantní, nýbrž závisí na tlaku. Uváželi-li se, že změny tlaku a objemu při šíření zvuku jsou velmi rychlé, takže se mohou považovat za adiabatické, platí pro tuto závislost vztah

$$v = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}},$$

kde κ je Poissonova konstanta. Tlak p a hustota ρ v tomto vztahu jsou průměrné hodnoty těchto veličin v prostředí (při vlnění se mění s časem), tedy hodnoty před vznikem vlnění.

Ve volném prostoru závisí hustota ρ plynu na teplotě t vztahem (ρ_0 je hustota plynu při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$)

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma},$$

takže výsledný vztah pro rychlost zvuku v plynech je [6]

$$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho_0} (1 + \gamma)}.$$

Pro vzduch platí následující přibližný vztah závislosti rychlosti šíření zvuku v_t na teplotě

$$v_t = v_0 + 0,607t,$$

kde v_0 je rychlost šíření zvuku při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ ($v_0 = 331,8 \text{ ms}^{-1}$), t je teplota ve $^\circ\text{C}$. Pro teplotu 20°C je rychlost šíření zvuku $343,9 \text{ ms}^{-1}$ [15].

2.2.3 Dynamika a barva zvuku

Intenzita zvuku

U zvukových vln šířících se prostorem se zpravidla určuje zvukový výkon $P = \frac{E}{t}$, který připadá na plošnou jednotku. Tuto veličinu, danou poměrem energie E , která při vlnivém ději projde libovolnou plochou S kolmou ke směru šíření vlny, a uvažované plochy S a času t , nazýváme intenzitou zvuku I :

$$I = \frac{E}{St}.$$

Intenzitu měříme zpravidla nepřímo tak, že stanovíme efektivní rychlost v_{ef} částic vlnícího se prostředí nebo efektivní tlak p_{ef} akustické vlny. Obě efektivní veličiny jsou definovány jako střední kvadratické hodnoty rychlosti, resp. tlaku v průběhu periody T [5].

Odvozením získáme dva nejdůležitější vztahy pro měření intenzity, když se vlna šíří prostředím o hustotě ρ a prochází normálovou plochou S , tj. plochou kolmou ke směru šíření vlny, rychlostí c po dobu t . Jsou to vztahy:

$$I = v_{ef}^2 c \rho \quad \text{a}$$

$$I = \frac{p_{ef}^2}{c \rho}.$$

Jednotkou intenzity zvuku je Wm^{-2} .

U rovinné vlnoplochy je intenzita tónu stálá, nehledíme-li ke ztrátám vyvolaným příčinami mechanické povahy, neboť akustická energie soustředěná

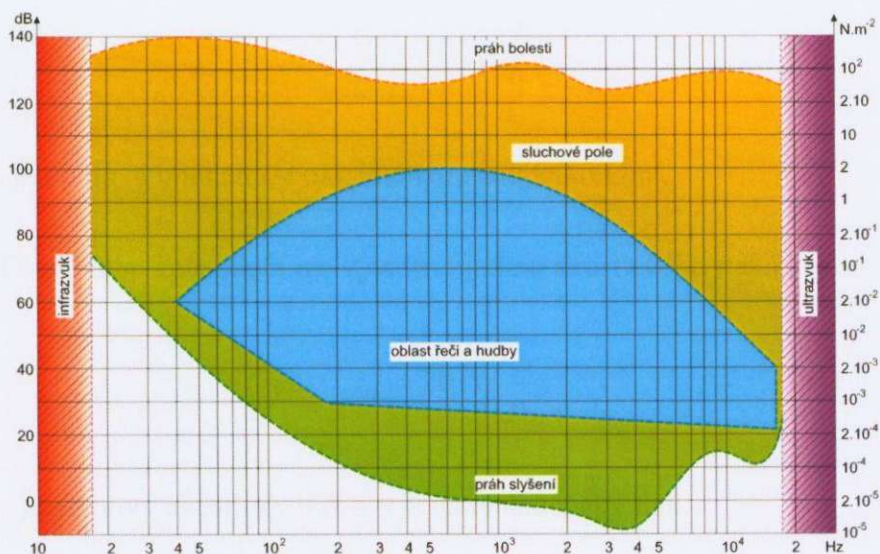
v určitém objemu prostředí se udržuje stále v objemu téže velikosti. U kulové vlnoplochy, kde roste s rostoucím poloměrem vlnoplochy i její povrch, musí se táž energie rozprostírat na stále větší plochu. Jednotkovou plochou proto projde za jednu sekundu ve vzdálenosti n -krát větší od zdroje n^2 -krát méně energie. Ubývá tedy intenzity se čtvercem vzdálenosti vlnivého rozruchu od bodového zdroje [5].

Citlivost sluchu

Jestliže k našemu uchu přicházejí dva tóny stejné fyzikální intenzity, ale různých frekvencí, nevnímáme je jako stejně hlasité, ačkoli tlak vyvolaný akustickým rozruchem v našem uchu (v ušním bubínku) je v obou případech stejný. Tento rozdíl v subjektivní hlasitosti tónu je vyvolán nestejnou citlivostí sluchového orgánu pro různé akustické frekvence. Poměrně největší citlivost se jeví v oblasti kolem 3 kHz. Zde už tlaky nižší než $2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ vyvolávají sluchový vjem [5].

Tyto nejnižší hodnoty hladiny akustického tlaku jsou v diagramu na obr. 2.12 dány křivkou, která se nazývá práh slyšení. Naopak hodnoty hladiny akustického tlaku, jejichž intenzita dosáhne hranice, nad níž v uchu vzniká bolestivý pocit, jsou znázorněny křivkou, která se nazývá práh bolesti.

Oblast zvuků, ohraničená horní a dolní hranicí frekvenčního pásma slyšení a prahy slyšení a bolesti, se nazývá sluchové pole. Ohraničení sluchového pole nezávisí jen na těchto aspektech, ale i na individuálních vlastnostech sluchu pozorovatele, měnících se s věkem, s chorobami sluchového orgánu apod.



Obr. 2.12 Sluchové pole

Hladiny akustického tlaku

Tón 1 kHz, zvaný referenční tón, vnímáme sluchem ve značně širokém tlakovém intervalu. Nejnižší akustický tlak na ušní bubínek, při kterém ještě tón 1 kHz slyšíme, je $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$. Je to prahový tlak, tlak na prahu slyšení. Nejvyšší tlak, při kterém ještě nevzniká v uchu pocit bolesti, je pro tón 1 kHz $p_m = 10^2 \text{ Nm}^{-2}$ (práh bolesti). Rozsah intervalu, v kterém se mění intenzita referenčního tónu, je dán poměrem $\frac{I_m}{I_0}$ [5].

Rozsah tohoto intervalu, který je dán řádově číslem 10^{13} , je nepřehledně veliký. Ale naštěstí zde platí Fechnerův-Weberův zákon, který vyjadřuje, že roste-li fyzikální intenzita tónu řadou geometrickou, roste subjektivně vnímaný stupeň zvukové intenzity tónu řadou aritmetickou [6].

Na základě tohoto zákona se v akustice zavádí veličina L_I , která je vyjádřena v logaritmické stupnici v jednotkách decibel (dB). Touto veličinou je hladina akustické intenzity a platí pro ni následující vztah

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (2.8)$$

kde I_0 je prahová intenzita, I pak intenzita znějícího tónu.

Obdobným způsobem lze vyjádřit hladinu akustického tlaku

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (2.9)$$

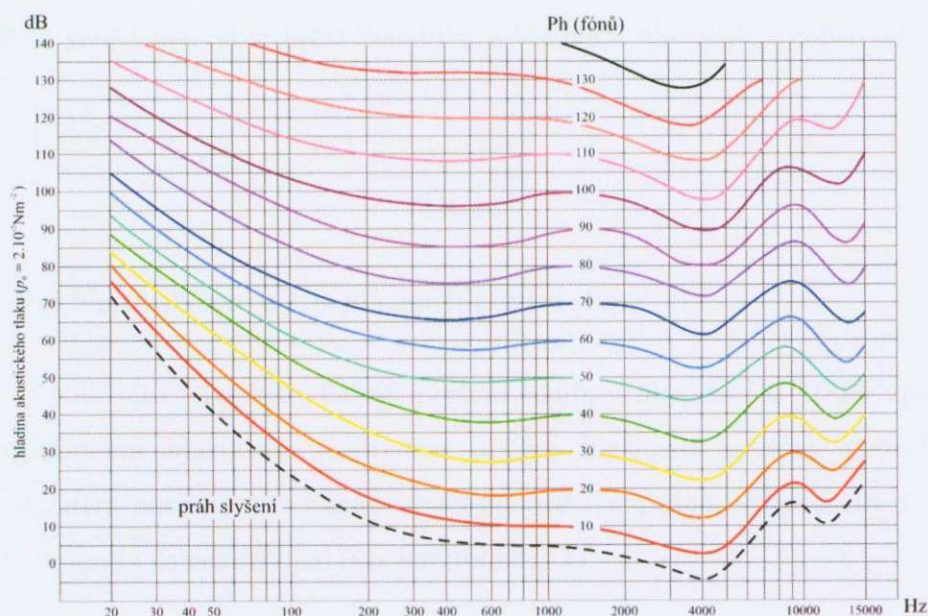
kde p_0 je prahový akustický tlak a p je daný akustický tlak.

Rozsah intervalu pro hladinu intenzity, resp. hladinu tlaku je

$$20 \log \frac{10^2}{2 \cdot 10^{-5}} \approx 130 \text{ dB}.$$

Doposud jsme uvažovali jen o hladinách tlaku pro referenční tón 1 kHz. V akustice se však definuje hladina tlaku stejně, tj. s prahovým tlakem $2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$, i pro tóny všech ostatních frekvencí, je tedy na kmitočtu nezávislá. Ovšem skutečné prahové tlaky různých tónů se od prahového tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ referenčního tónu 1 kHz liší, a to někdy velmi značně. Proto hladiny tlaku nepodávají informaci o skutečné hlasitosti tónů, jsou pouze objektivní fyzikální měrou poměrů v akustickém poli.

Subjektivní vjem hlasitosti tónů či zvuků však Fechnerův-Weberův zákon přesně nesleduje. Vjem hlasitosti je totiž značně závislý na frekvenci vnímaného zvuku a vztahy (2.8) a (2.9) platí pouze pro frekvenci 1 kHz. Zvuky stejné intenzity vykazují pro různé frekvence různou hlasitost, stejnou hlasitost, resp. hladinu hlasitosti lze stanovit pouze subjektivním srovnáním hlasitostí k tónu 1 kHz. Tuto závislost zobrazují standardizované Kingsburyho křivky stejné hlasitosti (obr. 2.13). Tyto křivky platí pouze pro sinusové tóny za daných podmínek.



Obr. 2.13 Křivky stejné hlasitosti

Křivky udávají závislost hladiny hlasitosti tónu na jeho frekvenci ve vztahu k hladině hlasitosti tónu o frekvenci 1 kHz. Numerická hodnota na frekvenci 1 kHz udává hladinu hlasitosti ve fónech (Ph) a souhlasí s hladinou intenzity, resp. akustického tlaku. Pro jiné frekvence tato shoda neplatí, např. tón o frekvenci 30 Hz a hladině akustického tlaku 90 dB má stejnou hladinu hlasitosti jako tón o frekvenci 1 kHz a hladině akustického tlaku 60 dB.

Avšak ani hladiny hlasitosti, ani hladiny akustického tlaku neodpovídají subjektivnímu vjemu hlasitosti. Hladina 80 Ph se vůči hladině 40 Ph nejeví subjektu jako dvojnásobek hlasitosti, stejně jako rozdíl mezi hladinami tlaku 40 dB a 80 dB. Také při současném vjemu několika tónů či složených zvuků neplatí Fechnerův-Weberův zákon pro odvození hladiny hlasitosti.

Proto byla zavedena autonomní jednotka hlasitosti son, jejíž jednotková hodnota odpovídá hladině hlasitosti 40 Ph pro tón o frekvenci 1 kHz. Hlasitost je veličina aditivní a proto výsledná hlasitost více tónů současně vnímaných je rovna součtu dílčích hlasitostí, jako by dílčí tóny působily jednotlivě. Pro

potřeby praxe lze vztah mezi hlasitostí a hladinou hlasitosti vyjádřit vztahem [15]

$$N = 2^{\frac{L-40}{10}},$$

kde N je hlasitost (son) a L je hladina hlasitosti (Ph).

Podle této závislosti každé zvýšení hladiny hlasitosti o 10 Ph způsobí zdvojnásobení hlasitosti. Aditivnost dílčích hlasitostí je však podmíněna dostatečným odstupem frekvencí současně znějících tónů. V opačném případě se již projevívá vliv maskování (viz kapitola 3.2.1).

Z hlediska rozlišovací schopnosti pro hlasitost čistých tónů je největší citlivost soustředěna do oblasti 500 Hz až 4 kHz, kde je lidské ucho schopno rozeznat až 260 stupňů hlasitosti. Mimo tuto oblast se počet stupňů rozlišitelnosti rychle zmenšuje, např. u hlubokých tónů se udávají jenom 3 stupně subjektivního rozlišení hlasitosti [15].

Barva zvuku

Barva zvuku umožňuje sluchem rozlišit dva složené zvuky nebo tóny stejné absolutní výšky (frekvence), které vydávají např. dva různé hudební nástroje. Každý zvuk o určité frekvenci je tedy charakterizován nejen výškou a hlasitostí, ale i barvou zvuku. Na rozdíl od frekvence a amplitudy, resp. výšky a hlasitosti s naprosto převažující kvantitativní povahou zvukové informace, je barva zvuku nejenom kvantitativním identifikátorem jeho původu, ale současně také nejdůležitějším měřítkem jeho kvality.

Jak ukazuje rozbor zvuku v jeho jednotlivé složky, závisí barva zvuku právě na jeho celkovém složení. Způsob rozkladu obecného periodického i neperiodického signálu do podoby řady

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t]$$

pro $k = 1, 2, 3 \dots$ (pořadové číslo harmonické složky o frekvenci $k\omega$)

či integrálu

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

jednoduchých harmonických signálů popsal francouzský matematik Joseph Fourier a poskytnul tak akustice matematické prostředky analýzy a syntézy hudebního resp. zvukového signálu [15].

Touto analýzou lze prokázat, že barva tónu se mění s počtem a intenzitou vyšších harmonických a případně i neharmonických složek, jež znějí spolu s tónem základním. Tón s malým počtem a s malou intenzitou vrchních tónů zní sice příjemně, ale někdy až poněkud dutě, prázdně, tóny s vysokým počtem složek o značné intenzitě jsou plné až ostré.

Velký vliv na barvu tónu mají tzv. přechodové („zákmitové“), vkmitávací a dokmitávací děje, tj. povaha a rychlost časové změny amplitud i frekvence částkových tónů od okamžiku nasazení tónu až do jeho plného rozvinutí a od okamžiku přerušení tónu do jeho úplného doznění. Trvání těchto přechodových jevů bývá v mezích 10 až 600 ms. Tuto skutečnost lze snadno ověřit např. při reprodukci klavírní melodie zpětným směrem (zvuk klavíru připomíná zvuk dřevěných nástrojů) nebo při reprodukci nahrávky dlouze držených tónů různých hudebních nástrojů, kde však byly „odříznuty“ začátky (nasazení) a konce těchto tónů.

Dalším prvkem, který spolurozhoduje o barvě zvuku, jsou formanty. To jsou vlastní tóny rezonančních dutin v nástroji i vlastní tóny pevných

rezonujících součástí nástroje. U lidského hlasu jsou formanty vlastní tóny dutiny ústní, dutiny nosohltanové a dutiny hrudní (více viz kapitola 3.3) [5].

2.3 Hudební akustika

Hudba jako strukturovaný systém nanejvýš organizovaných zvuků je neodmyslitelně spojena v první řadě s organizací tónových výšek. Schopnost determinovat výšku tónu s přesností, která minimálně odpovídá schopnostem lidského hlasu, byla základním předpokladem vývoje naprosté většiny hudebních nástrojů. Nejjednodušší determinace výšky tónu je u strunných nástrojů a souvisí s vlastnostmi oscilátoru, tj. struny, resp. především s její délkou a s tahovým napětím. Proto také vývoj tónových soustav evropské hudby byl z počátku spojen hlavně s vývojem strunných nástrojů [15].

2.3.1 Tónové soustavy

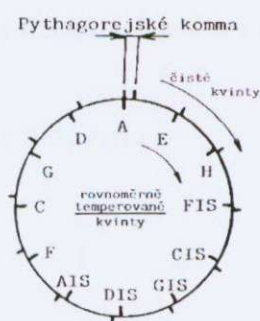
Lidský sluch je schopen vnímat celé spojité spektrum slyšitelných tónů od nejnižších až do nejvyšších frekvencí. V hudbě se však užívá jen určitých tónů. Výběr tónů pro hudební účely se řídí pravidly, které vyplynuly z hudební praxe, přičemž značnou úlohu hraje otázka libozvučnosti tónů, které znějí současně. Takto vybrané tóny tvoří tónovou soustavu [6].

Při fyzikálním ladění se vychází ve stavbě tónové soustavy od tónu C_2 (subkonta-C) o frekvenci 16 Hz. Jeho výhodou je, že kmitočet prvního (základního) tónu každé oktávy je dán celým číslem, jež je mocninou čísla 2.

Při mezinárodním ladění se volí za základ tón a^1 o kmitočtu 440 Hz. Nejhlubší oktáva začíná tónem C_2 a nazývá se subkontraoktávou. Obsahuje sedm základních stupňů, které se podle mezinárodní dohody značí symboly C_2 , D_2 , E_2 , F_2 , G_2 , A_2 , H_2 . Tón C_1 (kontra-C), jenž tvoří vrchní oktávu k C_2 , ukončuje subkontraoktávu a zároveň otevírá kontraoktávu tónové soustavy. Po

ní následuje velká a malá oktáva (první z nich začíná tónem C, druhá tónem c) a po té ještě oktáva jednou čárkovaná, dvakrát, třikrát a čtyřikrát čárkovaná [5].

Ve starověku a ještě ve středověku vycházely tónové soustavy převážně z melodického principu s využitím intervalů: kvinty $\left(\frac{3}{2}\right)$ (kvarty) a oktávy (2), které jsou číselně dány poměry relativních výšek 1:2:3:4. Toto kvintové ladění je také označováno jako pythagorejské a staví na rozvoji kvintového kruhu (obr. 2.14).



Obr. 2.14 Kvintový kruh

Rozdíl mezi tónem A ve vnějším „čistém“ kruhu a tónem A ve vnitřním „temperovaném“ kruhu je dán přibližným poměrem 74:73; tzv. pythagorejské komma. Správnější odvození pythagorejského komma je z rozdílu mezi tónem A jako sedmou oktávou a tónem Gisis jako dvanáctou kvintou ve vnějším „čistém“ kruhu. Z kvintového kruhu je odvozena pentatonická a zejména pak heptatonická stupnice. Rozdělením této stupnice vzniknou skupiny čtyř tónů sevřených intervalem kvarty – tetrachordy, které se staly základem církevních tónin – módů [15].

Chceme-li vytvořit pětitónovou stupnici (pentatoniku), která byla známa už v 3. tisíciletí p. n. l. v Číně, vytvoříme tři kvintové kroky od c směrem vzhůru a jeden dolů

$$F - c - g - d^1 - a^1.$$

Takto vzniklé tóny přeložíme všechny např. do malé oktávy a seřadíme

$$c d f g a c^1.$$

Tón g vznikl jedním kvintovým krokem od c, má tedy relativní výšku $\frac{3}{2}$. Tón

a je tvořen třemi kvintami vzestupně, musí však být snížen o oktávu (z jednočárkované oktávy do malé oktávy), je tedy jeho relativní výška

$\left(\frac{3}{2}\right)^3 \div 2 = \frac{27}{16}$. Tón f vznikl snížením tónu c o kvintu a zvednutím o oktávu, tj.

$\left(1 \div \frac{3}{2}\right) \cdot 2 = \frac{4}{3}$ atd. Dostáváme tedy řadu

$$c \quad d \quad f \quad g \quad a \quad c^1$$

$$1 \quad \frac{9}{8} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{27}{16} \quad 2$$



$$\frac{9}{8} \quad \frac{32}{27} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{32}{27}$$

V třetím řádku jsou propočteny intervaly mezi sousedními členy pentatoniky.

Odtud je zřejmé, že pythagorejská pentatonika je vystavěna v podstatě jen ze

dvou stavebních kamenů – intervalu $\frac{9}{8}$, jenž se nazývá pythagorejský celý tón

(tonos), a intervalu $\frac{32}{27} = \frac{9}{8} \cdot \frac{256}{243}$. Tento druhý interval je vlastně tonos,

zvýšený o interval menší hodnoty $\frac{256}{243}$. Interval $\frac{256}{243}$ je malý pythagorejský půltón (limma). Zmenší-li se tonos o limmu $\left(\frac{9}{8} \div \frac{256}{243}\right)$, vzniká velký pythagorejský půltón (apotomé) o hodnotě $\frac{3^7}{2^{11}}$. Výšková odlehlost apotomé a limmy, která představuje již velice malý hudební interval, tvoří tzv. pythagorejské komma. Jeho velikost, jak si snadno vypočteme, je $\frac{3^{12}}{2^{19}}$.

V průběhu staletí si společenská nutnost vynutila rozšíření pentatoniky o další dva stupně – vznikla heptatonická stupnice z kvintové řady

$$F - c - g - d^1 - a^1 - e^2 - h^2.$$

Po seřazení a analogických výpočtech jako při odvození pentatoniky dostáváme stupnici (pythagorejskou heptatoniku):

c	d	e	f	g	a	h	c ¹
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{243}{128}$	2
							
	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$

I v tomto případě je stavba tvořena intervaly tonos a limma. Fyzikální struktura (odvozená u starořeckých filozofů z poměrů délek strun) je velmi jednoduchá [5].

Začátkem 16. století se v evropské hudbě začalo prosazovat ladění přirozené (čisté), též terciové (aristoxenovské), které na základě harmonického principu rozšiřuje intervaly kvintového ladění ještě o velkou a malou tercii resp. v relativních poměrech výšek 1:2:3:4:5:6. Rozdíl mezi pythagorejskou a přirozenou velkou tercií je dán poměrem $\frac{81}{80}$; tzv. syntonické (didymické) komma [15].

Nad melodickým cítěním nabývalo stále větší převahy cítění harmonické, které souviselo s vývojem vícehlasé hudby. Brzy se ustálily dva typy tónových řad, konstruovaných na tomto harmonickém principu, neboli v tzv. přirozeném ladění. Byla to diatonická stupnice dur (tvrdá) a moll (měkká). První z nich vychází z konsonantních intervalů oktávy, kvinty a velké tercie $\left(2, \frac{3}{2}, \frac{5}{4}\right)$, druhá z intervalu oktávy, kvinty a malé tercie $\left(2, \frac{3}{2}, \frac{6}{5}\right)$. Výchozí situace je tedy poněkud komplikovanější než v pythagorejském systému. Označíme-li stupně ve stupnici dur jako primu (I), sekundu (II), tercii (III), kvartu (IV), kvintu (V), sextu (VI), septimu (VII) a oktávu (VIII), vidíme, že intervaly I, III, V a VIII jsou již dány. Po odvození ostatních intervalů má stupnice dur tuto strukturu:

c	d	e	f	g	a	h	c ¹
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
							
	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$

Stupnici moll odvodíme analogicky jako stupnici dur. Jediný rozdíl je tu v tom, že místo velké tercie se volí jako základní interval malá tercie $\frac{6}{5}$. Pak ovšem i sexta a septima je „malá“, tj. nižší než odpovídající intervaly ve stupnici dur. Nejmenší interval, který se vyskytuje v přirozeném ladění, je syntonické (didymické) komma vyjadřující odchylku mezi intervalem velkého a malého celého tónu.

Stavba stupnice moll:

a	h	c ¹	d ¹	e ¹	f ¹	g ¹	a ¹
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{9}{5}$	2
							
	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$

Je zřejmé, že stavební prvky stupnice moll jsou tytéž jako u stupnice dur, pouze poloha půltónových intervalů je jiná. Někdy bývají stupnice dur a moll označovány společným názvem diatonické stupnice, tj. stupnice složené z celotónových a půltónových intervalů.

Má-li být diatonická stupnice vystavěna od jiného základního tónu než c, je třeba některý z tónů c, d, e, f, g, a, h zvýšit nebo snížit o půltón. Zvyšuje a snižuje se vždycky o malý půltón.

Jestliže vytvoříme v přirozeném ladění stupnici postupující po půltónech vzhůru (c, cis, d, dis, e, f, fis atd.) nebo směrem dolů (c^1 , h, hes, a, as, g, ges atd.), zveme takovouto stupnici chromatickou [5].

Vývoj klávesových a částečně i dechových nástrojů, jejichž konstrukce omezovala nebo zcela vylučovala změnu ladění, vyvolal již v průběhu 16. století první úvahy o kompromisních laděních – temperaturách, které by umožňovaly hrát také v jiných tóninách, než ve které je nástroj naladěn. Temperování (vyrovnávání či zmírňování) intervalů kvintového či terciového ladění bylo nejdříve nerovnoměrné, tzn., že některé intervaly zůstaly v původním přirozeném ladění a některé byly temperovány.

Rovnoměrná temperatura přinesla do ladění hudebních nástrojů na jedné straně stále diskutovaný kompromis, ale na druhé straně podstatně zasáhla do dalšího vývoje jejich konstrukce. Rovnoměrně temperované ladění ponechává jediný čistý interval – oktávu, kterou dělí na 12 stejných půltónů. Frekvenční poměr sousedních tónů svírajících půltón činí

$$x = \sqrt[12]{2} = 1,05946309$$

Rovnoměrná temperatura představuje úplné uzavření kvintového kruhu beze zbytku pythagorejského komma, které rovnoměrně rozdělí mezi čisté kvinty jejich snížením.

Pro vyjádření malých odchylek ladění se používá Ellisovo dělení oktávy na 1200 centů, přičemž jeden temperovaný půltón vykazuje 100 centů. Vztah

mezi odchylkou v centech a frekvencí tónů, jejichž vzdálenost v centech je nutno určit, je dán výrazem

$$y = \frac{1200}{\log 2} \log \frac{f}{f_0} .$$

Tabulka 2.1 přináší přehled frekvenčních poměrů a odchylek v centech vůči tónu C pro čisté (přirozené) a rovnoměrně temperované ladění [15].

TÓN	Čisté ladění		Temper. ladění	
	poměr	centy	poměr	centy
C	1,0	0	1,0	0
Cis	1,04166	71	1,05946	100
Des	1,08	132		
D	1,125	204		
Dis	1,17187	274	1,18921	300
Es	1,2	315		
E	1,25	387		
Fes	1,28	428	1,25992	400
Eis	1,30208	457		
F	1,33333	498		
Fis	1,38889	569	1,33484	500
Ges	1,44	632		
G	1,5	702		
Gis	1,5625	773	1,41421	600
As	1,6	814		
A	1,66667	884		
Ais	1,73611	955	1,49831	700
Hes	1,8	1018		
H	1,875	1088		
Ces	1,92	1129	1,58740	800
His	1,95313	1159		
C	2	1200		

Tab. 2.1

2.3.2 Zdroje hudebních tónů

Prostředky, kterými se budí tóny, jsou buď z pružných tuhých látek, nebo jsou to sloupce vzduchu. Nejběžnější mechanické zdroje tónů v hudbě jsou v podstatě chvějící struny (strunné nástroje – housle, harfa, klavír, kytara), tyče, desky, membrány (bicí nástroje – zvonkohra, xylofon, marimba, vibrafon, buben, tympán, činel, zvon) nebo sloupce vzduchu (dechové nástroje – flétna, trubka, klarinet, ústní harmonika), přičemž struny a tyče řadíme mezi lineární zářiče, u nichž převládá jeden rozměr nad ostatními dvěma, desky a membrány řadíme mezi zářiče plošné, kde třetí rozměr, tloušťka, je relativně malý vzhledem k délce a šířce zářičů, a mezi poslední typ řadíme zářiče s výraznou účastí vzduchových sloupců. V hudební praxi je většina těchto zářičů vázána s dalšími kmitajícími soustavami, na nichž zářič (oscilátor) kmity vynucuje, sám je však ve své frekvenci více či méně takovým rezonančním systémem ovlivňován. Například strunné nástroje představují vázaný systém struna – rezonanční skříňka nebo u dechových nástrojů je tímto systémem ostrá hrana se šterbinou (jazýček) a chvějící se vzduchový sloupec. Rezonátor (ozvučná skříň, vzduchový sloupec v píšťale) má též funkci mechanického zesilovače, přispívá ke zvýšení energie vydávané zdrojem. V takových systémech je pak primárním zářičem struna, jazýček apod. a sekundárním zářičem je rezonanční skříň, rezonující vzduchový sloupec v píšťale.

Struna

Oscilátorem strunných nástrojů je struna, jednoduchá či opředená, kovová, střevovalá, nebo z plastické hmoty. V prvním přiblížení představuje struna pružné prostředí, ve kterém se šíří příčné vlnění, tj. v kolmém směru k převažujícímu rozměru struny – délce. Pro příčnou netlumenou vlnu platí pohybová diferenciální rovnice:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Rychlost šíření příčných vln je dána vztahem

$$v = \sqrt{\frac{F}{d}}, \quad (2.11)$$

kde F je tahová síla struny, d je hmotnost struny na jednotku délky.

Řešení pohybové rovnice (2.10) je pak součtem dvou vln šířících se po struně proti sobě. Na dokonale tuhém upevnění struny dochází k úplnému odrazu vlny. V souladu s obr. 1.4 se od pevného konce odráží vlna s opačnou fází. Pro harmonický pohyb struny, resp. její volné netlumené kmity platí řešení

$$y = \sum_n (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin k_n x,$$

kde $k_n = \frac{\omega_n}{v}$, ω_n je frekvence vlastních kmitů.

Dosazením vztahu (2.1) do rovnice (2.11) vznikne známý Taylorův vztah pro frekvenci n -té harmonické složky kmitů struny

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{d}} = \frac{n}{lD} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}},$$

kde n je pořadí příslušné harmonické, l je délka struny, F je tahová síla struny, D je průměr struny a ρ je hustota materiálu struny [15]. Ze vztahu je patrné, že kmitočet tónu na struně je přímo úměrný druhé odmocnině z napínající síly při neproměnném průřezu, délce a jakosti struny, nepřímo úměrný tloušťce struny a druhé odmocnině z hustoty struny.

Struny se rozechvívají smyčcem (smyčcové nástroje), kladívkem (kladívkové nástroje) nebo drnkutím (drnkací nástroje). K nestandardnímu režimu kmitání strun u smyčcových a drnkacích nástrojů vede technika flažoletů, která obecně představuje cílené tlumení konkrétních frekvenčních složek ve spektru tónu pomocí nedokonalého přitlačení struny k hmatníku nástroje.

Tyč

Tyčemi se v akustice rozumí tuhá pružná tělesa, u nichž převažuje délka nad šířkou a výškou a která (na rozdíl od strun) jsou schopna se rozechvít bez působení vnější napínající síly.

Tyč na obou koncích volná (ve svém středu lehce zavěšená) o délce l se může rozkmitat podélně (např. třením ve směru délky) nebo příčně (např. úderem kladívka).

Vzbudí-li se v tyči volně zavěšené podélné kmity, šíří se postupná vlna tlaková k oběma koncům tyče a tam se odrazí s touž fází. Interferencí původní a odražené vlny vzniká stojatá podélná vlna, jež musí mít na koncích kmitny. Nejjednodušší případ nastane, když se mezi oběma kmitnami vytvoří jeden uzel. Kmitočet f_1 základního tónu, který tak vzniká, je dán vztahem

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}.$$

Pro rychlost podélné vlny v tyči platí vztah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

kde E je modul pružnosti v tahu a ρ hustota materiálu tyče. Tyč se ovšem může rozechvět i tak, že se na ní vytvoří 2, 3, 4, ... k půlvln. Odpovídající tóny mají pak frekvence

$$f_k = k \frac{v}{2l}, k = 2, 3, 4, \dots,$$

neboť na celé délce l se tvoří $k \frac{\lambda_k}{2}$ a odtud $\lambda_k = \frac{2l}{k}$. Tyč na obou koncích volná vydává tedy kromě základního všechny vyšší harmonické tóny.

I u tyče na obou koncích upevněné vzniká kromě základního tónu o kmitočtu f řada harmonických tónů s frekvencí $2f, 3f, \dots kf$.

U tyče na jednom konci volné, na druhém upevněné se tvoří při základním tónu čtvrtina vlny (na pevném konci vzniká uzel, na volném konci kmitna), jeho frekvence je proto

$$f_1 = \frac{v}{4l}.$$

Tyč se však může rozechvět i tak, že se na její délce vytvoří $\frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \dots \frac{2k-1}{4}$

vlnové délky, lze tedy psát $l = \frac{2k-1}{4} \lambda_k$ a

$$f_k = \frac{2k-1}{4l} v, k = 2, 3, 4, \dots$$

Na tyči v uvedeném případě vznikají kromě základního tónu všechny liché harmonické složky [5].

Desky a membrány

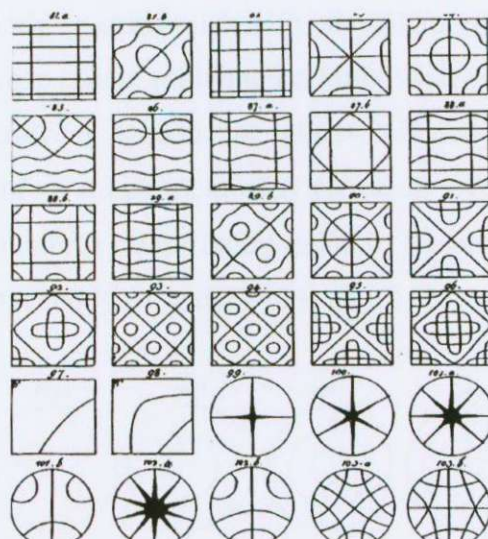
U desek a membrán převládají dva rozměry nad rozměrem třetím. Hlavní zářivá plocha zdroje je v klidové poloze zpravidla rovinná.

Desky se rozechvívají vlastní pružností jako tyče, teorie jejich kmitání je však značně složitější. Nejčastěji konají ohybové kmity. Kmitočet jejich základního tónu je přímo úměrný tloušťce desky d , nepřímo úměrný velikosti plochy zářící desky S a odmocnině z hustoty materiálu, z kterého je deska vyrobena, i odmocnině z modulu pružnosti E , tj.

$$f = konst. \frac{d}{S} \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Kromě základního tónu vydávají desky velmi početnou řadu vyšších, většinou neharmonických tónů. Každý z nich je charakterizován určitou formou kmitání povrchu desky, na němž se tvoří uzlové čáry, tj. čáry, v nichž body desky mají nulové výchylky [5].

U desek nebo membrán dochází ke chvění při každé budící frekvenci, avšak zvlášť silné chvění nastává jen při rezonančních frekvencích, které netvoří obecně harmonickou řadu. Polohu kmiten a uzlů pak lze zjistit posypem desky nebo membrány jemným práškem, který při chvění odskakuje z kmiten a hromadí se v uzlových čarách. Každé rezonanční frekvenci přísluší jiný obrazec uzlových čar. Tyto obrazce se nazývají Chladniho obrazce (obr. 2.15) [15].



Obr. 2.15 Chladniho obrazce

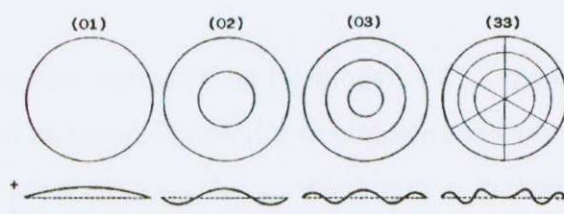
Vyklenuté desky velkých rozměrů a tvaru rotačního tělesa jsou zvony. V hudbě se k napodobování zvonů používá dlouhých dutých kovových tyčí.

Oscilátorem u nástrojů blanozvučných je membrána živočišného či ryze umělého původu. Membrány samy nekladou odpor ohybovým silám, neboť nemají vlastní pružnost. Nabývají jí však, jsou-li podrobeny vnějším napínacím silám. V tom jsou podobny strunám a také závislost frekvence tónu membrán připomínají závislosti pro strunu. Kmitočet je totiž nepřímo úměrný – u kruhové membrány – jejímu průměru d a odmocnině z její tloušťky t a hustoty ρ a přímo úměrný odmocnině z napětí p délkové jednotky obvodu membrány [5];

$$f = \frac{\text{konst.}}{d} \sqrt{\frac{p}{t\rho}}.$$

U membrán se rozlišují rezonanční módy dvojího typu, které jsou určeny tvarem kmitání membrány (odpovídají jim příslušné Chladniho obrazce), a jsou to módy radiální a kruhové, přičemž módy obecně určují charakter výsledného

zvuku. Jednotlivé módy se označují číslem udávajícím pořadí radiálních módů a kruhových módů resp. počet radiálních a kruhových uzlových čar. Intenzita jednotlivých rezonančních módů je silně ovlivňována místem buzení membrány. Při buzení ve středu membrány převažují v kmitání kruhové módy, při buzení u kraje membrány zase módy radiální. Na obr. 2.16 je vyneseno řez kmitem membrány pro módy (01), (02), (03) a (33) [15].



Obr. 2.16 Řez některými rezonančními módy membrány

Chvějící se vzduchové sloupce

Na rozdíl od strunných nástrojů s jednoznačně vymezeným oscilátorem – strunou je determinace základního kmitajícího elementu v případě dechových nástrojů mnohem složitější. U některých jazýčkových dechových nástrojů (harmonia, akordeony, ústní harmoniky, jazykové varhaní píšťaly) je oscilátorem kovový jazýček, jehož volně kmitající délka určuje výšku tónu. U ostatních jazýčkových nástrojů s jednoduchým či dvojitým třtinovým nebo membranózním jazýčkem není již výška tónu dána délkou jazýčku, ale výrazně rezonujícím vzdušným sloupcem.

U flétnových nástrojů je proud vzduchu, usměrněný úzkou štěrbinou, veden proti ostré hraně a jeho ustálený tok se mění v turbulentní

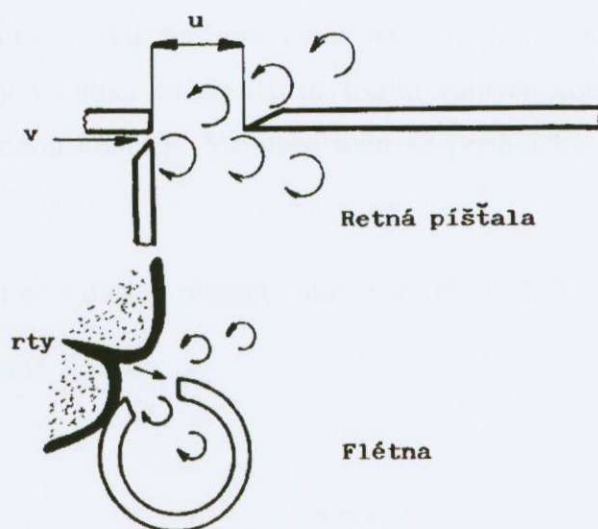


Obr. 2.17 Carrièrový víry

proudění. Za štěrbinou a po obou stranách hrany se tvoří periodicky se opakující víry jako tlakové změny vzduchu, které se zvukově projeví jako tzv. třecí tón (třecí tóny byly pozorovány poprvé českým fyzikem Čeňkem Strouhalem v roce 1878). Podobné periodicky se opakující víry (Carrièrovy víry, viz obr. 2.17) vznikají nejen při průchodu úzkou štěrbinou, ale i při prudkém mávnutí holí nebo bičem, při pohybu vzdušných proudů podél drátů a strun při větru (Aeolova harfa).

Třecí tóny se dále upřesňují na štěrbinové, které vznikají za štěrbinou, a hranové, vznikající na hraně. Frekvence třecího tónu je v obou případech přímo úměrná rychlosti proudění vzduchu v a konkrétně u varhaní píšťaly či příčné flétny (obr. 2.18) ještě nepřímo úměrná vzdálenosti u hrany od štěrbiny

$$f = \text{konst.} \cdot \frac{v}{u}.$$



Obr. 2.18 Vznik třecích tónů

Bez návaznosti rezonátoru – vzdušného sloupce píšťaly stoupá frekvence teoreticky plynule se stoupající rychlostí resp. s druhou odmocninou tlaku

vzduchu. Avšak při dosažení určitého mezního tlaku dochází k rozpadu vírů a frekvence třecího tónu se skokem zdvojnásobí, při dalším zvýšení tlaku ztrojnásobí atd.

Připojení rezonátoru k mechanismu třecích tónů vytváří funkční celek píšťaly či flétny. Se stoupajícím tlakem vzduchu stoupá frekvence třecího tónu až do okamžiku přibližného naladění na první rezonanční mód vzdušného sloupce, kdy se píšťala rozezní. S dalším zvyšováním tlaku vzduchu stoupá frekvence třecího tónu dále, ale výška tónu píšťaly stoupá už podstatně pomaleji. V okamžiku, kdy frekvence třecího tónu dosáhne pozice dalšího rezonančního módu, dojde k přefouknutí, tj. přeskočení výšky tónu píšťaly o oktávu či duodecimu výše v závislosti na vlastnostech vzdušného sloupce [15].

Rozkmitá-li se proudícím vzduchem systém štěrbin, vynucuje si kmity v připojeném vzduchovém sloupci délky l . Rezonance nastane, když frekvence nucených kmitů souhlasí s některou vlastní frekvencí vzduchového sloupce. Tyto vlastní kmitočty však můžeme lehce stanovit. Je-li sloupec z obou stran otevřen, vznikají v trubici po odrazu na těchto volných koncích stojaté vlny s kmitnami na obou koncích. V oblasti uzlu se periodicky střídá zhuštění a zředění.

Ve sloupci se v daném případě může vytvořit 1, 2, 3, ... n půlvln, takže

$$l = n \frac{\lambda_n}{2}. \text{ Poněvadž } \lambda_n = \frac{v}{f_n}, \text{ je}$$

$$f_n = n \frac{v}{2l}. \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Pro základní tón ($n = 1$) je kmitočet dán vztahem

$$f_1 = \frac{v}{2l}.$$

Jak je zřejmé, vydává otevřená píšťala kromě základního tónu všechny vyšší harmonické tóny.

V píšťale uzavřené se při odrazu vlny na nepoddajném prostředí tvoří uzel, na druhém vzniká opět kmitna. Proto se na délce l píšťaly tvoří $(2n-1)\frac{\lambda_n}{4}$, přičemž $n = 1, 2, 3, \dots$ a frekvence uzavřené píšťaly jsou dány obecným vztahem

$$f_n = \frac{2n-1}{4l} v. \quad (2.12)$$

Kmitočet základního tónu ($n = 1$) je

$$f_1 = \frac{v}{4l}. \quad (2.13)$$

Jak je vidět ze vztahu (2.12), vydává uzavřená píšťala pouze liché harmonické tóny. Barva zvuku uzavřené píšťaly je proto chudší než barva zvuku otevřené píšťaly.

Srovnáním rovnic (2.12) a (2.13) zjišťujeme, že základní tón uzavřené píšťaly je vždycky o oktávu nižší, než základní tón píšťaly otevřené. Při zkracování délky píšťaly se výška tónu zvyšuje.

U jazýčkových píšťal je oscilátorem pružná tenká tyčinka – jazýček. Jazýček se nasazuje k otvoru vzduchové dutiny tak, že je na jednom konci upevněn: Jazýček je buď kratší než délka otvoru dutiny a pak při rozkmitání může vnikat volným koncem do dutiny (jazýček průrazný), nebo je jeho délka nepatrně větší než délka otvoru (jazýček nárazný). Kovové jazýčky se používají např. u foukací harmoniky, akordeonu a u harmonia. U dechových nástrojů v orchestru se setkáváme buď s jednoduchým, nebo dvojitým

třtinovým jazýčkem, spřaženým se vzduchovým sloupcem „korpusu“ nástroje (klarinet, saxofon, hoboj, fagot aj.), nebo s dvojitým jazýčkem, reprezentovaným hudebníkovými rty, které se rozechvívají proudem vzduchu z plic (žesťové dechové nástroje – trubka, lesní roh, pozoun apod.). Vlastní frekvence kovového nebo třtinového jazýčku se určuje jako frekvence tyče, která koná ohybové kmity. Závisí přímo na tloušťce jazýčku, nepřímo pak na druhé mocnině jeho délky, tj. [5]

$$f = konst. \frac{d}{l^2}.$$

2.4 Ultrazvuk a infrazvuk

Ultrazvuk

Zvuky s frekvencí nad 20 kHz patří do oblasti ultrazvuku. Ultrazvuk se šíří rychlostí zvuku a vzhledem k vysoké frekvenci jím lze přenášet poměrně vysoký výkon vlnění. Obecně pro ultrazvuk platí stejné fyzikální zákonitosti jako pro zvukové vlnění. Rozdíly mezi ultrazvukem a zvukovým vlněním jsou dány hlavně menší vlnovou délkou ultrazvuku, takže např. šíření ultrazvuku je méně ovlivněno ohybem. Výrazný je odraz ultrazvuku od překážek a méně je pohlcován v kapalinách i v pevných látkách. Na rozdíl od zvukových vln se ultrazvuk silně pohlcuje v plynech, a to tím víc, čím je jeho frekvence vyšší.

Ultrazvuk je velice důležitou částí zvukového spektra. V přírodě je důležitý zejména pro přežití některých druhů zvířat a mnozí živočichové jej dokáží slyšet (psi, netopýři, delfíni) a někteří z nich i vytvářet (netopýři, delfíni). Význam využití ultrazvuku si dobře uvědomuje i člověk, který ultrazvuk hojně využívá.

Ultrazvuk se významně uplatňuje v technické praxi a pronikl do všech odvětví výzkumu i průmyslu, kde se v některých oblastech uplatňuje jako jeden z nejproduktivnějších výrobních postupů. Běžné je nejen zkoušení materiálu ultrazvukem (ultrazvuková defektoskopie), ale existuje mnoho ultrazvukových zařízení obzvláště v měřicí a řídicí technice, jako jsou např. přístroje k měření hladin kapalin v nepřístupných prostředích, k zajišťování lodní plavby hydrolokátory (sonary), užívají se ultrazvuková zařízení, která automaticky s velkou přesností měří a registrují rychlost proudění kapalin a plynů, jež zároveň analyzují. Lze zkoumat a měřit jakost betonu na dokončených stavebních konstrukcích a sledovat jeho eventuální změny, a lze měřit i moduly pružnosti nejružnějších materiálů, jako jsou mnohatunové ocelové odlitky rotorů, turbínové lopatky, nosníky apod. Aktivní ultrazvukové pole umožňuje

snadné a rychlé cínování a pájení hliníku, urychluje chemické reakce, vytváří stabilní emulze atd. Ultrazvukovými vibrátory se dají svářet různé materiály, kovy i plastické hmoty. Velice významné uplatnění nachází ultrazvuk v medicíně, např. v ultrazvukové diagnostice [16].

Infrazvuk

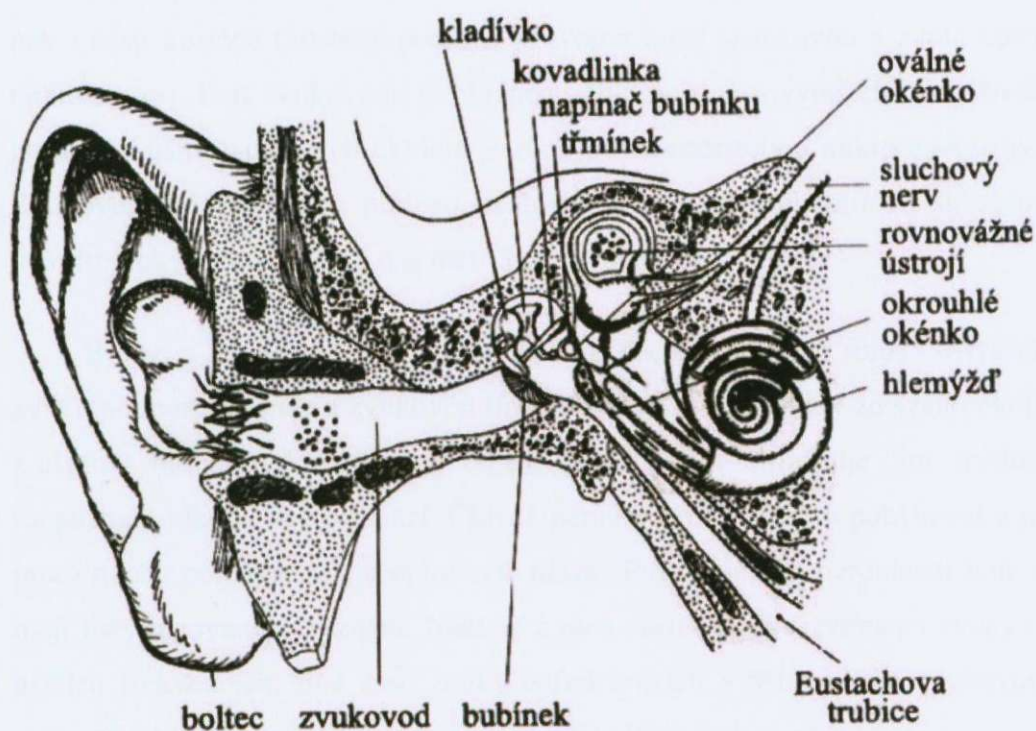
Infrazvuk je označení pro nízkofrekvenční zvuk pod hladinou vnímání lidského sluchu o frekvencích nižších než 16 Hz. Infrazvuk se dobře šíří ve vodě a na rozdíl od ultrazvuku se dobře šíří i ve vzduchu. Vznik infrazvuku v přírodě zapříčiňují jevy, jako jsou např. zemětřesení, erupce sopek, hurikány, bouře, vzdušné víry a turbulence, mořské vlnobití atd. Infrazvuk vnímají i některá zvířata, např. sloni, holubi, velryby, nosorožci apod. Někteří z těchto živočichů dokáží infrazvuk využít ke komunikaci. Mezi umělé zdroje infrazvuku patří např. motory, exploze, nadzvukový třesk apod.

I když člověk infrazvuk přímo neslyší, může při určitých hladinách intenzity infrazvuku (130 dB a výše) cítit tlakové změny infrazvukem vyvolané. Při takových intenzitách a dlouhodobějším působení je člověku škodlivý. Bývá spojen s vestibulárními příznaky, poruchou dýchání, motoriky, vidění a výraznou vegetativní a psychickou symptomatologií. Při hodnotách intenzity infrazvuku nad 140 dB vyvolává vibraci hrudníku a nad 160 dB trhá plicní sklípky.

3. Biologická část základů akustiky

3.1 Sluchové ústrojí

Sluchový orgán se skládá ze tří částí. Z ucha zevního (boltec a zevní zvukovod), středního (bubínek, sluchové kůstky, sluchová tzv. Eustachova trubice a systém dutin ve výčnělku spánkové kosti) a z ucha vnitřního, v němž je uloženo vlastní sluchové ústrojí. Zevní a střední ucho zachycuje a přenáší zvuk a chrání ucho vnitřní. Vlastní sluchový orgán je chráněn tvrdou (tzv. skalní) kostí. Detailnější popis jednotlivých částí sluchového orgánu (obr. 3.1) je uveden v následujících kapitolách.



Obr. 3.1 Sluchové ústrojí

3.1.1 Zevní ucho

Zevní ucho se skládá z nálevkovitého ušního boltce a ze zevního zvukovodu. Boltec má tvar mušle a je přirostlý svou přední částí k hlavě, od níž odstává v úhlu $25 - 45^\circ$. Základem boltce je pružná chrupavka pokrytá jemnou kůží a zevně zprohýbaná několika prohlubinkami. Na zadním horním přehnutém okraji boltce je malý hrbolk, tzv. Darwinův, naznačující místo, na němž u některých savců vybíhá boltec ve hrot. Svaly boltce jsou u člověka zakrnělé a nemají pro pohyblivost boltce žádný význam.

V prohlubině boltce se nachází vchod do zevního zvukovodu. Ten je ve dvou třetinách jeho délky tvořen z části zevní, chrupavčité, a v jedné třetině pak z části kostěné (kostěný podklad je tvořen kostí spánkovou a zdola kostí bubínkovou). Ústí zvukovodu je chráněno chlupy a mazovými žlázami, které produkují ušní maz. Jejich úkolem je zachycovat nečistoty a mikroorganismy. Zvukovod má v příčném průřezu oválný tvar a vede pod mírným sklonem dovnitř lebky. Jeho nejdelší osa měří 3 cm až 4 cm.

Boltec a zvukovod plní jak zvukovou, tak i ochrannou funkci. Slyšení zvuků podporují boltec a zvukovod tím, že vedou zvukové vlny ze svého okolí k ušnímu bubínku. U zvířat je boltec pohyblivý a umožňuje jim snadno rozpoznat, odkud zvuk přichází. Člověk nemůže boltcem takto pohybovat a je proto nucen pomáhat si otáčením celé hlavy. Prohlubinky a nerovnosti boltce mají jistý rezonanční význam. Některé z nich zesilují svou rezonancí zvuky o nižších frekvencích, jiné zase zvuky o frekvencích vyšších. Také zvukovod může působit jako rezonátor, a to hlavně při vyšších frekvencích.

Pro vnitřní části ucha je zvukovod nepostradatelný také z jeho ochranných vlastností. Ochrana je zajištěna tím, že zvukovod není rovný, ale zahnutý, a také tím, že je jeho ústí porostlé chloupky a nachází se zde i mazové žlázy. Takto zvukovod chrání vnitřní ucho před volným vniknutím cizích těles.

Zvukovod může také chránit vnitřní části ucha před náhlými změnami teplot okolí [4].

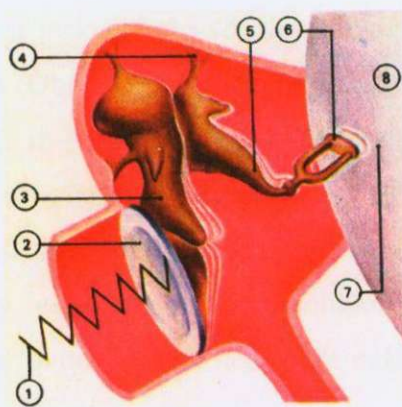
3.1.2 Střední ucho

Zevní zvukovod je od středouší oddělen blanitým bubínkem. Blána bubínku má uprostřed tloušťku 0,1 mm, na okrajích 0,2 mm až 0,4 mm a je postavena šikmo k podélné ose zvukovodu, přičemž s vodorovnou rovinou svírá u dospělých lidí úhel asi $35 - 50^\circ$. U dětí je tento úhel mnohem menší.

Velikost účinné plochy bubínku je asi 85 mm^2 . V jeho střední části je bubínek prohnutý a nálevkovitě vtlačen dovnitř. Skládá se ze tří vrstev. Na okrajích je pokryt vrstvou pokožky, kterou je přichycen ke stěně zvukovodu. Střední vrstva bubínku je vazivová a je složena z vláken probíhajících jednak kruhovitě, jednak paprskovitě. Vnitřní stranu bubínku tvoří tenká sliznice.

Na vnitřní ploše bubínku začíná dutina středního ucha, která je spojena Eustachovou trubicí s nosohltanem. U dospělého člověka činí délka této trubice asi 36 mm, přičemž jsou její stěny částečně kostěné a částečně chrupavčité. Eustachova trubice se při polykání otevírá do hltanu a zajišťuje tak vyrovnání tlaku ve středoušní dutině a regulaci tlaku na bubínek.

Ve středoušní dutině se nacházejí malé kůstky, tzv. sluchové viz obr. 3.2. Kladívko (3) pevně spojené s bubínkem (2), na který dopadají zvukové vlny (1), třmínek (6), uzavírající svou destičkou otvor oválného okénka labyrintu (8), a kovádlíka (5), tvořící spojku obou předešlých (4), přičemž tyto kůstky spojují bubínek s vnitřním uchem (7). Tyto nejmenší kůstky těla přenášejí vibrace bubínku na membránu oválného okénka, která je umístěna ve stěně oddělující vnitřní a vnější ucho.



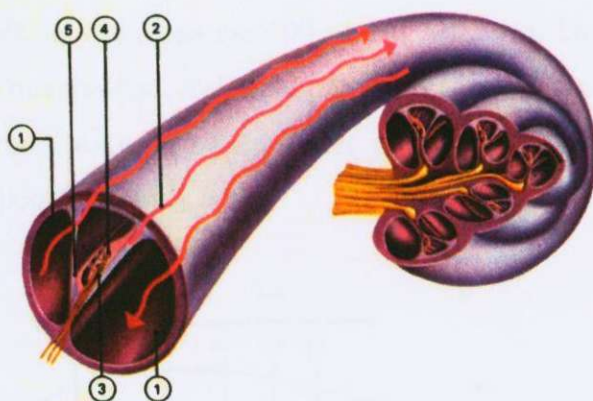
Obr. 3.2 Střední ucho

Středouší tvoří rozhraní mezi zvukovými vlnami a vnímacím ústrojím. Přijímá akustické podněty šířící se vzduchem a upravuje pohotovost sluchového orgánu k přijímání zvukových podnětů různé intenzity. Přijímání zvukových podnětů středouším není jediná cesta sluchového vnímání, neboť i po úplném zničení bubínku anebo po přerušení souvislého řetězu sluchových kůstek je možno slyšet. Zvuk se totiž může také šířit k vlastnímu sluchovému ústrojí přímo lebečními kostmi [4].

3.1.3 Vnitřní ucho

Uvnitř vnitřního ucha se nachází vlastní vnímací ústrojí, jehož hlavními částmi jsou polokruhové chodbičky, hlemýžď a předsíň, jež je oběma jmenovaným částem společná. Tyto tři části se dohromady nazývají labyrint. V pevném kostěném obalu skalní kosti je uložen blanitý labyrint, obsahující smyslové ústrojí. Blanitý labyrint je naplněn vnitřní kapalinou endolymfou a zároveň je zevně obklopen kapalinou, která se nazývá perilymfa. Obě tekutiny mají odlišné koncentrace draslíku a sodíku a tím pádem je mezi nimi elektrický potenciál cca 80 mV (kladná je perilymfa). Polokruhové chodbičky slouží především statickému smyslu, rovnováze a úpravě svalového tělesného napětí. Sluchu slouží hlavně hlemýžďová část labyrintu.

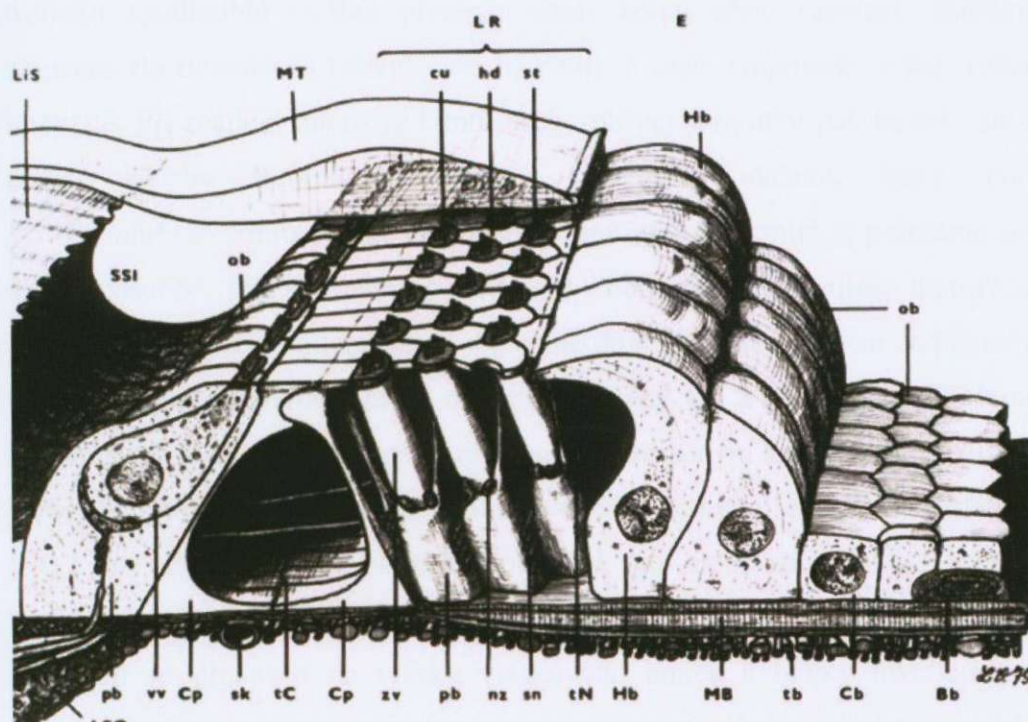
Hlemýžď (kochlea) je kostěný výčnělek dlouhý asi 35 mm stočený ve tvaru ulity do 2,5 závitů (Obr. 3.3). V příčném průřezu se hlemýžď dělí na dvě patra: horní a dolní, jenž jsou od sebe oddělena přepážkou skládající se z kostěné destičky a z bazilární membrány napjaté z volného okraje této destičky přímo k protější stěně. Kromě bazilární membrány vybíhá z volného okraje kostěné destičky ještě vestibulární membrána, připínající se také na protější stěnu kostěného závitů, avšak o něco výše než membrána bazilární.



Obr. 3.3 *Hlemýžď*. (1) horní a dolní patra hlemýždě vyplněná tekutinou, (2) zvukové vlny, (3) bazilární membrána, (4) citlivé buňky Cortiho orgánu, (5) Cortiho orgán

Takto je dutina hlemýždě vlastně rozdělena na tři části. Uprostřed závitů se při jeho vnější stěně táhne dutina blanité části hlemýždě, ohraničena nahoře membránou vestibulární a dole membránou bazilární. Tato dutina obsahuje vlastní smyslové ústrojí a je naplněna endolymfou. Další částí je horní patro, které je na svém začátku odděleno od středního ucha blanou v oválném okénku, do něhož je z druhé strany vklíněna destička třmínku. Třetí částí je dolní patro, které je na svém začátku odděleno od středního ucha blanou v okrouhlém okénku, přičemž prostory obou pater jsou vyplněny perylimfou a jsou spolu propojeny malým otvorem ve vrcholu hlemýždě.

Nejdůležitější částí blanitého labyrintu je bazilární membrána. Skládá se z tuhých příčně uložených vláken, tzv. zvukových strun. Membrána je nejúžší na začátku hlemýždě (0,041 mm; obsahující zvukové struny pro slyšení nejvyšších tónů) a nejširší v jeho vrcholu (0,49 mm). Dlouhá je asi 33 mm. Zvukových vláken je asi 15 000 až 25 000 a jsou dole nejkratší a nahoře nejdelší, v poměru přibližně 1 : 12. Na bazilární membráně je umístěn Cortiho orgán (obr. 3.4), složený z podpůrných a vlastních smyslových buněk, které se svými vláskovitými výběžky těsně dotýkají s krycí membránou. Každá z vláskových buněk je vybavena asi 100 vlásky (ciliemi), které jsou v těsném kontaktu s krycí membránou. Relativní pohyb obou membrán proti sobě vede k nepatrnému ohybu vlásku, což představuje podnět pro vláskové buňky, který vyvolává jejich podráždění [4].

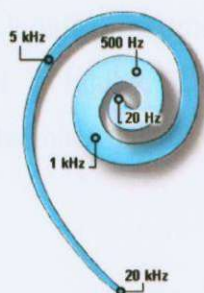


Obr. 3.4 Cortiho orgán. (E) prostředí vyplněné endolymfou, (MT) krycí membrána nad Cortiho orgánem, (MB) bazilární membrána, (st) stereocilie resp. smyslové vlásky sluchových buněk

Vláskové buňky Cortiho orgánu jsou tak citlivé, že mohou zachytit výchylky vlásku blížící se průměru atomu vodíku. Velikost vychylování bazilární membrány a tím i pohyb vlásku se různí podle frekvence vibrací zvukového zdroje a má proto zásadní význam pro rozlišování výšky tónu. Hluboké tóny rozechvívají delší, vysoké tóny kratší vlákna, z nichž je složena bazilární membrána.

3.2 Slyšení

Proces zvukového vnímání začíná příjmem zvukových vln zevním uchem a jejich příchodem na bubínek, který je tím uveden v kmitavý pohyb. Kmity bubínku se přenášejí řetězcem sluchových kůstek do oválného okénka, přičemž se kmity bubínku o velké amplitudě a malé intenzitě mění tak, že na bazi třmínku (podlouhlá oválná ploténka mezi konci obou ramének třmínku zasazená do oválného okénka) jsou to kmity o malé amplitudě, avšak velké intenzitě. Při zesílení intenzity kmitů hraje roli nejen systém pák kůstek, ale i poměr plochy bubínku ku ploše oválného okénka, který činí $70-85 \text{ mm}^2 / 3-5 \text{ mm}^2$, takže celkové zvýšení intenzity kmitů je průměrně asi dvacetinásobné. Tím se rozkmitá perilymfa v horním patře blanitého hlemýžďe a kmity se přenášejí na jeho stěny a přes ně do endolymfy. Chvění endolymfy vyvolá chvění bazilární a krycí membrány. Vede též k prohnutí vestibulární membrány v místě její maximální rezonance s vnímaným kmitočtem. Bazilární i krycí membrána se směrem od oválného okénka ke kopuli hlemýžďe rozšiřuje (z 0,1 mm až na 0,5 mm). Nižší kmitočty pak tyto membrány rozkmitají blíže kopule a vyšší kmitočty je rozkmitají blíž ke třmínku (obr. 3.5). Pohyby membrán se přenášejí na vlásky vláskových buněk a buňky lokalizované v místě maxima mechanické deformace reagují vysíláním nervových vzruchů, které pak pokračují kochleárním nervem a sluchovou dráhou do mozku.



Obr. 3.5 Znáznornění místa vnímání určitých frekvencí v hlemýždi

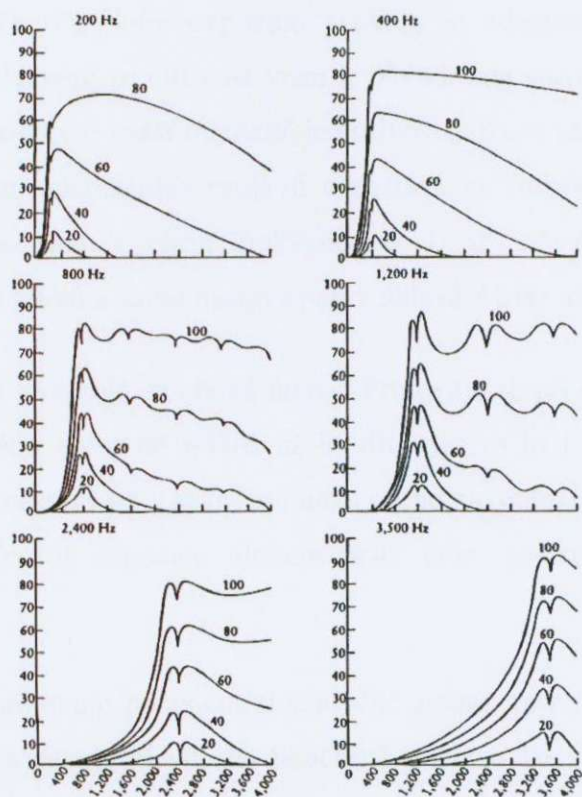
3.2.1 Maskování

Znění určitého tónu či hluku vyvolává současně též posuv sluchového prahu směrem k vyšším hodnotám. Vjem dalšího tónu či hluku o nižší intenzitě může být proto zeslaben nebo přímo potlačen. Tento jev se nazývá maskování.

Maskování souvisí s činností nervových buněk, které se při podráždění ocitnou po dobu několika milisekund ve stavu, kdy nejsou schopny přijmout další podráždění. Maskující tón aktivuje určitou část bazilární membrány v délkovém rozsahu i v počtu podrážděných elementů. Pokud maskovaný tón zasáhne stejnou oblast membrány, dojde k jeho maskování.

Maskovací účinek je většinou nejvyšší kolem vlastní frekvence maskujícího tónu. U maskujícího tónu nebo šumu je účinek maskování souměrný na obě strany frekvenční osy od vlastní frekvence maskujícího zvuku. Tato symetrie platí pro nízké hladiny tohoto zvuku (40 – 50 dB). Při vyšších hladinách se již projeví vliv aurálních (vyšších harmonických) tónů a účinek maskování se rozšíří na vysoké tóny. Nesymetrie maskovacích křivek je také připisována četnější aktivaci nervových buněk pro vyšší frekvence, než kterou má vlastní maskovaný tón, a to v důsledku směru postupující vlny podél Cortiho orgánu od vysokých frekvencí k nízkým. Tvar křivek maskování je silně závislý na frekvenci maskujícího tónu (obr. 3.6).

Maskování patří k základním psychoakustickým jevům s velkým významem při poslechu řeči i hudby. Omezuje totiž velmi užitečným způsobem rozsah zvukové informace ještě před jejím vstupem do primární sluchové kůry [15].



Obr. 3.6 Maskovací křivky.

3.2.2 Adaptace, únava a poškození sluchu

Sluchový vjem je při delší časové expozici doprovázen únavou a svojí následnou adaptací. Sluchová adaptace je změna resp. přizpůsobení citlivosti sluchu způsobené předchozím sluchovým podrážděním.

Adaptace sluchu souvisí s reflexem středoušních svalů, který nastává už při hladinách akustického tlaku 65dB až 85 dB se zpožděním 10 ms až 150 ms.

Stahem středoušních svalů se zvětší tuhost a impedance převodní soustavy pro nízké frekvence (pod 1 kHz). Reflex může být vyvolán nezávisle na frekvenci podnětu a chrání tak ucho před silnými zvuky.

Ve vnitřním uchu se adaptace uskutečňuje zvýšením prahu podráždění smyslových buněk. Po dobu expozice zvukem je adaptace dána velikostí maskování. Po odeznění se citlivost vrací k původnímu stavu během 0,5 s až 1 s; při expozici zvuky o vyšší intenzitě je citlivost snížena až po dobu několik sekund. Maximum adaptačních projevů nenastává na frekvenci, kterou bylo ucho exponováno, ale v okolí frekvence o 1 až 1,5 oktávy vyšší. U širokopásmových hluků a šumu nastává pak v oblasti 3 kHz až 4 kHz.

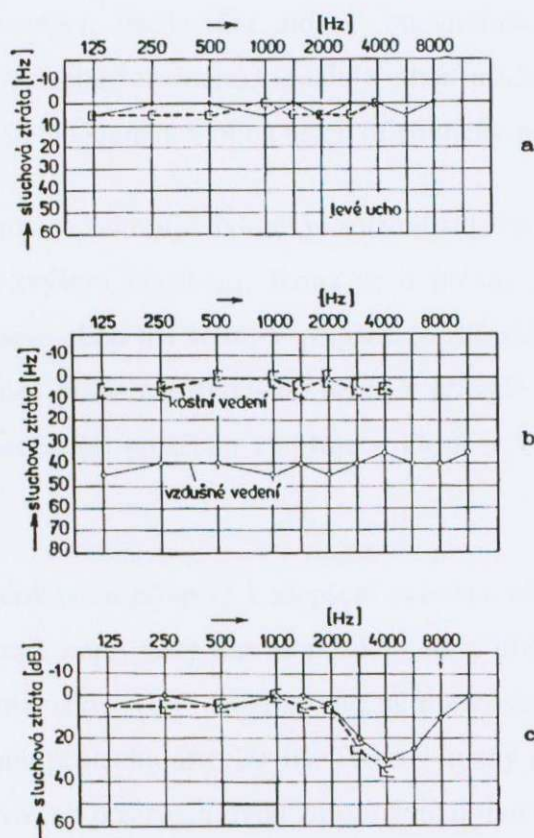
Na adaptaci navazuje sluchová únava. Projevuje se při expozici zvuky o hladině akustického tlaku od 80 dB až 90 dB výše, a to i při krátkodobém působení. Únava nastává již v první minutě a svého nasycení dosahuje v době 7 až 10 minut. Trvá-li expozice hlukem ještě déle, zvětšuje se únava již nevýrazně.

Únava se projevuje posunem sluchového prahu, resp. jeho zvýšením a zvuk je vnímán s menší hlasitostí. Současně dochází ke změně rozlišovací schopnosti výšky, hlasitosti a k posuvu maskovacích prahů. Odeznívání únavy je pomalejší a závisí na spektru zvuku a jeho intenzitě, v menší míře na trvání podnětu, a může trvat od několika desítek minut až do několika hodin i dnů. Únava se projevuje o oktávu výše nad expoziční frekvencí a nedochází-li k opakování, vrací se citlivost sluchu na původní prahové hodnoty.

K základním vyšetřovacím metodám poškození sluchu patří audiometrie jako zjišťování prahu sluchu, resp. jeho posuvu oproti prahu normálnímu. Grafický záznam vyšetření se nazývá audiogram. Podle účelu a způsobu vyšetření může být audiogram tónový pro vzdušné nebo kostní vedení a řečový (slovní) audiogram.

Sluchový práh se nejčastěji stanovuje poslechem čistých tónů sluchátky (vzdušné vedení). K přímému ozvučení labyrintu hlemýždě se používá vibratoru, který se přiloží na kost za ušním boltcem (kostní vedení). Při tomto vyšetření je středoušní převodní systém vyřazen a rozdíl mezi audiogramem pro vzdušné a kostní vedení poskytuje informaci o lokalizaci poruchy. Zjištěné údaje se vyznačují do audiogramu standardními symboly.

Na obr. 3.7a je audiogram osoby s normálním sluchem, na obr. 3.7b pak osoby s převodní poruchou ve středním uchu, vyplývající z rozdílu mezi křivkou pro vzdušné a kostní vedení, na obr. 3.7c je audiogram osoby s typickou poruchou způsobenou nadměrným hlukem a lokalizovanou do vnitřního ucha.



Obr. 3.7 Audiogram normálního sluchu, středoušní a vnitroušní poruchy.

Převážná většina příčin nedoslýchavosti je dána poruchami vláskových buněk Cortiho ústrojí. Nedoslýchavosti v důsledku poruchy sluchového nervu a poruchy centrální jsou méně časté, ale z lékařského hlediska velmi závažné, mohou být dokonce příznakem poškození centrálního nervového systému. Tyto poruchy ovlivňují směrové a prostorové slyšení, vývoj i srozumitelnost řeči, dále schopnost extrakce užitečného signálu ze šumu či hluku apod., a běžným audiometrickým vyšetřením je lze zjistit jenom velmi obtížně [15].

3.2.3 Binaurální slyšení

Zdvojení sluchového orgánu je podobně jako u zrakového vjemu využito pro vnímání prostorovosti. Avšak binaurální slyšení – poslech oběma ušima přináší vedle schopnosti lokalizace zdroje signálu ještě další možnosti sluchové analýzy: binární sumaci, maskování atd. U binaurálního slyšení je nutné rozlišovat případ poslechu totožného signálu v obou uších (diotický poslech) nebo poslechu odlišného signálu v obou uších (dichotický poslech).

Binaurální sumace zahrnuje dva jevy: snížení sluchového prahu (zvýšení ostrosti sluchu) a zvýšení hlasitosti. Jedná se o prosté zdvojení nervového podráždění, které se z obou uší sčítá. V případě rozdílných prahů obou uší je binaurální práh určen prahem citlivějšího ucha, v případě totožných prahů se binaurální práh diotického poslechu zlepšuje – klesá o 3 dB oproti poslechu monaurálnímu.

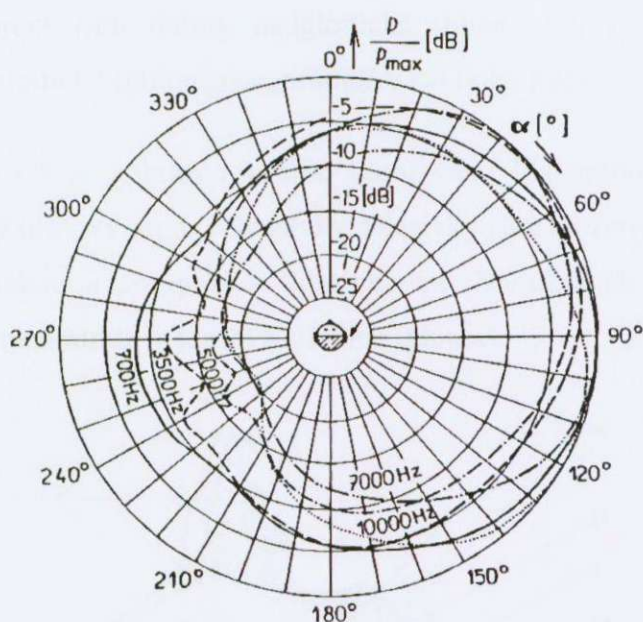
Binaurální maskování přispívá k zlepšení extrakce užitečného signálu ze šumu. Posloucháme-li např. čistý tón na pozadí šumu, přičemž okamžitá fáze šumu je mezi oběma ušima 180° , sníží se značně maskovací práh, až o 15 dB, oproti monaurálnímu poslechu až o 20 dB. Tento výrazný jev nastává vždy při časových nebo fázových posuvech dvou zdrojů zvuku mezi oběma ušima. Tím dochází k odlišení dvou zdrojů zvuku v souvislosti s jejich lokalizací na různých místech.

Binaurální maskování je vysvětlováno existencí buněk na sluchové dráze ve středním mozku, které reagují na časový rozdíl mezi ušima a z nichž některé reagují na předstih jdoucí zprava, jiné reagují na předstih zleva, dále různě reagují na velikost předstihu a tím snižují maskování šumem, který je v obou uších ve stejné fázi.

Lokalizaci zdroje zvuku, tj. určení jeho směru a odhadu vzdálenosti předchází lateralizace – vnímání zvuku na spojnici mezi oběma ušima uvnitř hlavy. Lateralizace je závislá na vzájemných poměrech intenzity a času v obou uších. Při menším časovém rozdílu než 2 ms a shodné fázi a intenzitě v obou uších nastane splývání (binaurální fúze) v jediný vjem, který je subjektivně umístěn uprostřed hlavy. Při předstihu podnětu v jednom uchu se vjem subjektivně posune k tomuto uchu.

Pro čisté tóny kolem 3 kHz je lokalizace velmi nepřesná a ani intenzitní faktor ji nemůže vylepšit. Prakticky se jako minimální postřehnutelná úhlová změna udává 3° až 4° při binaurálním poslechu a 30° při monaurálním poslechu.

Umístění zdroje zvuku mimo mediální rovinu vede též k rozdílu intenzit, danému jednak přivracením jednoho ucha blíže ke zdroji (pro blízké zdroje) a jednak akustickým stínem (pro vzdálené zdroje). Akustický stín se uplatňuje jen u vysokých tónů, cca nad 300 Hz, kde vlnová délka je rovna nebo menší než rozměr hlavy. Přibližně do 200 Hz přicházejí tóny do obou uší se stejnou intenzitou. Pro 3 kHz činí rozdíl intenzit až 8 dB, Pro 5 kHz už 25 dB a pro 10 kHz 30 dB.



Obr. 3.8 Směrová přijímací charakteristika pravého ucha

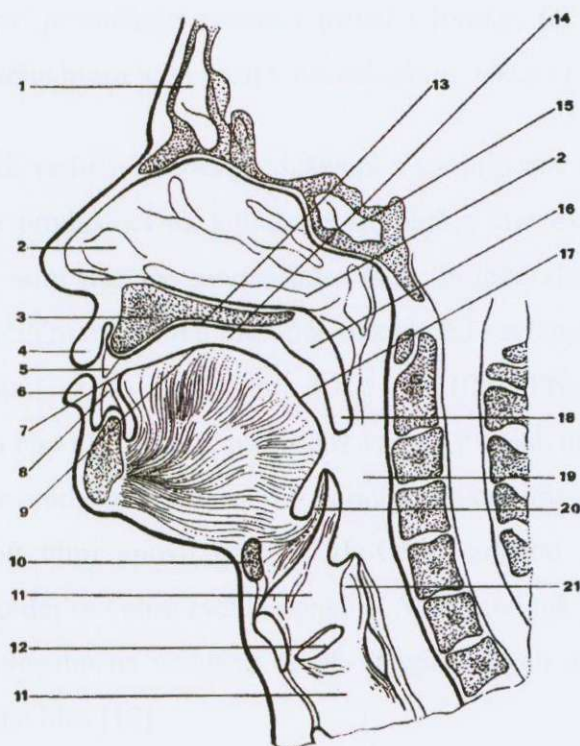
Pouze na základě časového a intenzitního rozdílu není možné rozpoznat polohu zdroje v mediální rovině. Zda zvuk přichází zepředu, shora či zezadu dovolí rozpoznat až pohyby hlavy a s nimi spojené poslechové zkušenosti. Tato lokalizace je doplněna změnou obsahu vysokých frekvencí ve spektru signálu v důsledku směrových účinků vnějšího ucha. Změna vjemu barvy zvuku související s obsahem vysokých frekvencí je velmi důležitým faktorem prostorového slyšení, zvláště pak při odhadu vzdálenosti [15].

3.3 Lidský hlas

Lidské hlasové ústrojí se skládá: z ústrojí dýchacího, které dodává energii: hrudní koš, v němž jsou uloženy plíce, průdušky a průdušnice, mezižební svaly a bránice; z ústrojí fonačního, složeného z hrtanu a rezonátoru; z ústrojí artikulačního (hltan, dutiny ústní a nosní).

Rezonátorem jsou dutiny nadglottické (hltan, dutiny ústní, nosní a lebeční) a podglottické (průdušnice, průdušky i sklípky plic).

Na obr. 3.9 je zobrazen průřez horní částí hlasového ústrojí, které obsahuje lidský hlasový orgán – hlasivky. Hlasivky jsou uloženy v hrtanu mezi štítnou chrupavkou a chrupavkou hlasivkovou. Na okrajích mají hlasivky hlasové vazy, mezi nimiž je hlasová štěrbina (glottis).



Obr. 3.9 Průřez horní částí hlasového ústrojí. (1) dutina čelní, (2) dutina nosní, (3) horní čelist, (4) horní ret, (5) horní zuby, (6) dolní ret, (7) špička jazyka, (8) dolní zuby, (9) plocha jazyka, (10) jazyk, (11) hrtan, (12) pravá hlasivka, (13) tvrdé patro, (14) dutina ústní, (15) dutina kosti klínové, (16) měkké patro, (17) hřbet jazyka, (18) čípek, (19) prostor hrdelní, (20) příklůpek, (21) chrupavka hlasivková

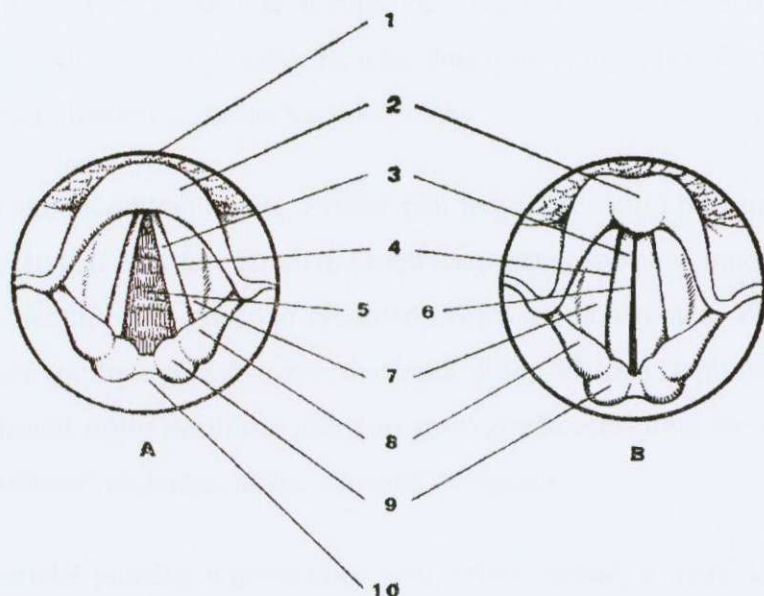
Z obecného hlediska tvorby tónu lze hlasové ústrojí přirovnat k strunnému nástroji, u kterého je výška tónu determinována energeticky převažujícími vlastnostmi oscilátoru a barva tónu převážně pak vlastnostmi tlumeného rezonátoru.

Vznik lidského hlasu

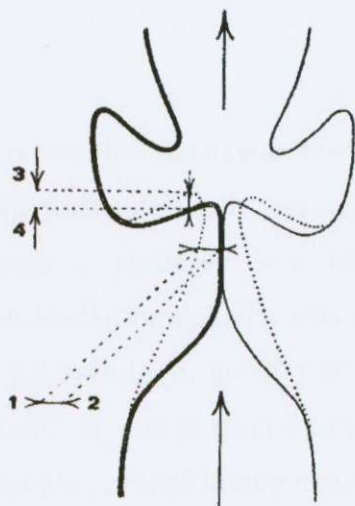
Řeč i zpěv vzniká jednak v hlasovém ústrojí, jednak v ústrojí artikulačním, které proměňuje zvukový proud v hlásky, řeč, po případě i ve zpěv. Vznik lidského hlasu je popsán v následujícím odstavci.

Z plic proudí vzduch dvěma průduškami a spojuje se v průdušnici. Proud vzduchu dospěje průdušnicí až k hlasové štěrbině v tom okamžiku uzavřené hlasivkami. Pod nimi nastane zvyšováním tlaku prudké zhušťování vzduchu (komprese). V určitém okamžiku přemůže tlak napětí sevřených hlasivek, které povolí a rozestoupí se do stran (obr. 3.10a a 3.10b). Přitom vnikne proud vzduchu do dutin nad hlasivkami, na jejichž vzdušný obsah narazí. Tím se však ihned sníží tlak v průdušnici, a hlasivky, jejichž síla odporu převládne, se opět sevrou, čímž pod nimi znovu nastane zhuštění vzduchu k nim proudícího (obr. 3.11). Tento děj se velmi rychle opakuje. Vzniknou tak pravidelné nárazy přerušovaného výdechu na vzdušný obsah nadglottických dutin, který se tím rozkmitá a vznikne hlas [13].

K modifikačním ústrojím upravujícím hlas patří jako část rezonátoru hltan. Dalšími hlavními složkami tohoto ústrojí jsou dutina ústní, ústa s jazykem, dutina nosní a dutiny kostí obličejových. Teprve v ústní dutině se hlas formuje v hlásky (samohlásky – vokály či souhlásky – konsonanty), v řeč, a popřípadě v zpěv.



Obr. 3.10 *Hrtan shora*. A) při dýchání, B) při fonaci. (1) spodní část jazyka, (2) příklůpek, (3) hlasivky, (4) výchlípek Morgagniho, (5) průdušnice, (6) štěrbina hlasová, (7) řasa výchlípková, (8) chrupavka Wrisbergova, (9) chrupavka hlasivková, (10) jícen



Obr. 3.11 *Způsob kmitání hlasivek*. (1-2) vodorovná složka kmitání, (3-4) svislá složka kmitání

V obličejových kostech je několik menších dutin. Všechny ústí do nosu, a nazývají se vedlejší dutiny nosní. Jsou to: dutiny čelistní, dutiny čelní a sklípky čedičné. Nad hltanem je dutina kosti klínové.

Svalstvo stěn hltanu a úst, zvláště pak jazyka, je velmi početné a silné, a svou pohyblivostí dovoluje těmto dutinám zaujímat nespočetné množství forem různého objemu, měnit značnou rychlostí svůj tvar i napětí stěn. Všechny tyto dutiny tvoří spojitou soustavu rezonančních dutin. Příroda doplnila důmyslné zařízení hrtanu tímto nesmírně pohyblivým rezonátorem, jímž lze nepatrnými silami dosáhnout mohutné, nosné a krásné zvučnosti.

Akustické poměry v rezonátoru jsou velice složité, a mění se s každým okamžikem. Hltan s dutinou ústní i s dutinami nosními tvoří spojitý rezonátor, jehož prostor se mění se změnami artikulace i výškami tónu. Jeho rezonanční možnosti jsou ovlivňovány i jeho stěnami. Tuhost stěn se mění na některých místech rezonátoru napětím svalstva, což napomáhá ozvučným možnostem rezonátoru. Hltan je hlavní součástí rezonátoru svou prostorností, pružností stěn a tvárností objemu [13].

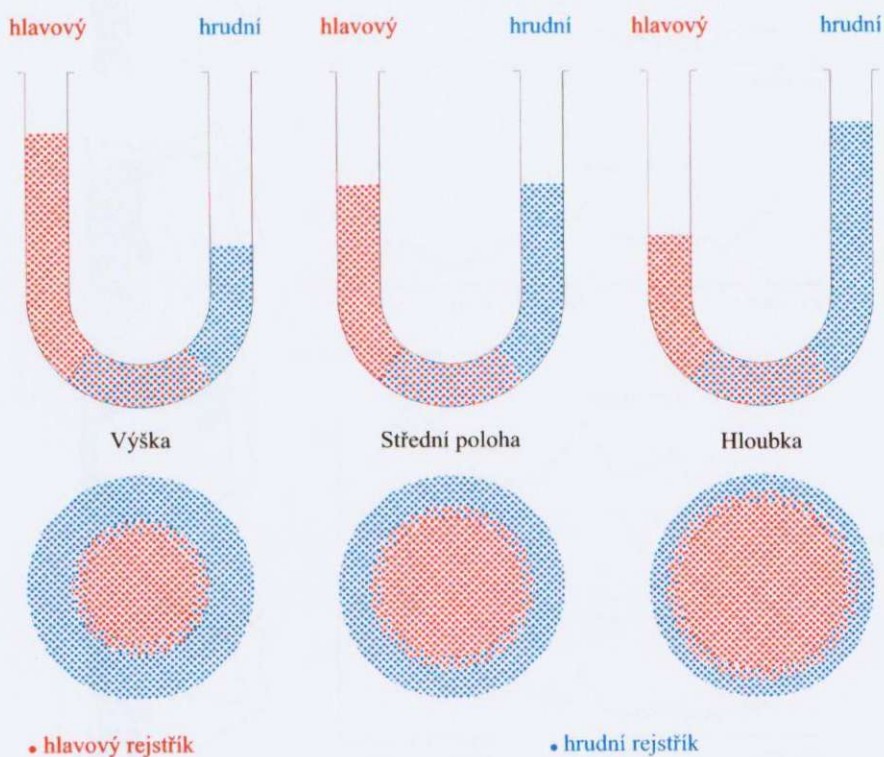
Zpěv

Kromě rezonátoru tvořeného soustavou rezonančních dutin vokálního traktu nad hlasivkami hrají podstatnou roli v rezonanční úloze i dýchací cesty pod hlasivkami. Průdušnice a průdušky jsou také do jisté míry orgány rezonanční, přičemž jejich hladké bronchiální svalstvo a jeho jemná inervace má velký význam v hlasové fyziologii, neboť může tyto trubice rozšiřovat a zužovat, prodlužovat a zkracovat, což je značně důležité pro chápání některých speciálně pěveckých funkcí plic, zvláště hrudní rezonance.

Při zpěvu se využívá ve spojení s určitým nastavením napínačů hlasivek (hlavový a hrudní rejstřík) jak rezonance hlavy, tak rezonance hrudníku.

Hrudní rejstřík dává hlasu zvučnost a typické zabarvení, ale ne sám o sobě, protože při zpěvu se prakticky nikdy nevyskytuje izolovaný hrudní rejstřík nebo izolovaný hlavový. Obrazně by se mohl pěvecký hlas znázornit jako koule s pevným jádrem. Jádrem je hlavový rejstřík a na něj je nabalen hrudní rejstřík. Vzájemný poměr těchto dvou rejstříků se mění. V každé poloze je jiný. Směrem k vyšším tónům nastává převaha rejstříku hlavového, někde uprostřed se rejstříky vyrovnávají, a směrem k hlubokým tónům nastává převaha hrudního rejstříku (obr. 3.12). Podobným způsobem se dá splnutí a souhra rejstříků znázornit pomocí spojených nádob. Dvě ramena spojených nádob jsou dva rejstříky, při zpěvu vysokých tónů je sloupec hlavový značně výše proti sloupci hrudnímu, v hloubce je tomu naopak. Oba tyto rejstříky jsou však navzájem spojeny a propojeny [8].

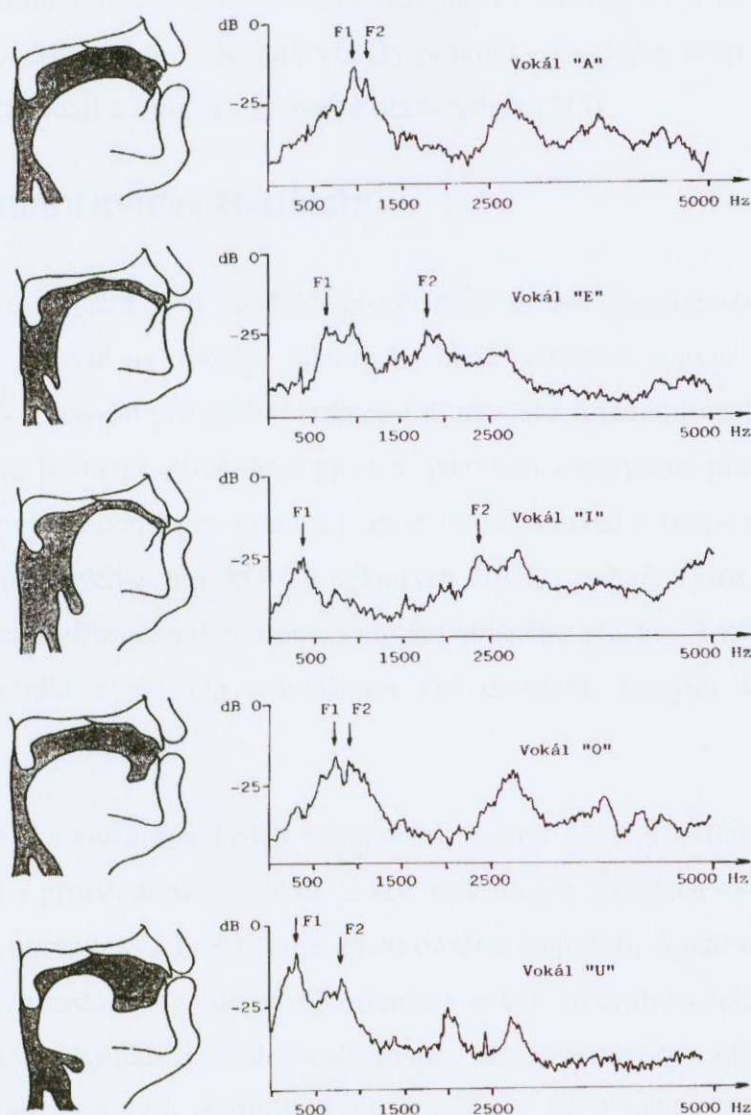
REJSTŘÍK:



Obr. 3.12 *Poměr hlavového a hrudního rejstříku*

Formanty

V řečovém signálu vykazují všechny hlásky své charakteristické formanty, které odpovídají konkrétnímu nastavení vokálního traktu resp. artikulačního ústrojí, tj. jeho tvaru a objemu. Udává se až 7 formantových oblastí s jedním antiformantem aktivně se podílejících na kvantitativních i kvalitativních vlastnostech hlásek.



Obr. 3.13 Nastavení artikulačního ústrojí a spektra vokálů

Na obr. 3.13 jsou zobrazeny tvary artikulačního ústrojí pro české vokály spolu s odpovídajícími frekvenčními spektry s vyznačením základních formantových oblastí F1 a F2. Tato průměrovaná spektra byla získána při buzení rezonančních dutin pouze šumem samotného dechu. Frekvenční poloha formantů F1 a F2 je výrazně závislá na poloze jazyka a míře otevření ústní dutiny. Pro vjem a rozlišení jednotlivých vokálů jsou nejvýznamnější první dva eventuelně tři formanty, a to v pořadí F2, F1, F3. Kromě absolutních hodnot frekvencí hrají značnou roli také intervaly mezi formanty F1 a F2. Formanty F4 a vyšší zůstávají pro všechny vokály prakticky shodné a svojí frekvenční polohou přispívají k informaci o barvě hlasu řečníka [15].

3.4 Vnímání zvuku živočichy

Zvukový vjem je u každého živočišného druhu charakterizován jiným způsobem. Závisí na mnoha faktorech, které většinou souvisí s potřebou využití tohoto vjemu pro přežití jedince i druhu. Sluch jednotlivých živočichů potom může být uzpůsoben třeba pro lov, jako varovný systém před nepřáteli, či jako smysl vhodný pro orientaci apod. S tím souvisí i frekvenční rozsah sluchu jednotlivých zvířat, který u některých druhů zasahuje vysoko nad nebo pod hranici frekvenčního rozsahu vnímání lidského sluchu. Tato schopnost bývá zpravidla využívána k zvláštním dovednostem, kterými tato zvířata disponují.

Jednou z nejzajímavějších schopností, kterou některá zvířata využívají k orientaci v prostředí nebo k lovu, je tzv. echolokace. Živočich vydává zvuky (zpravidla ultrazvuky) a zachycuje jejich ozvěnu (echo), tj. signál odražený od předmětu v prostoru. Tento způsob orientace využívají druhy s noční aktivitou nebo žijící v jeskyních či v kalné vodě (např.: některé druhy ryb, ptáků, savců – hmyzožravci, netopýři, delfíni). Tato dovednost bývá některými živočichy využita i pro lov.

3.4.1 Lidský sluch ve vodní říši

Až do poloviny dvacátého století se lidé mylně domnívali, že ryby jsou němé a že hlubiny jezer a moří jsou říší ticha. Bylo tomu tak z jednoduchého důvodu. Lidské ucho je zařízeno pouze pro slyšení ve vzduchu, proto ani člověk nad hladinou ani potápeč pod vodou nemůže slyšet téměř žádný z nesčetného množství všemožných zvuků, které ryby vydávají. Ve vodě totiž vládnu jiná akustická poměry, pro které není náš sluchový aparát vybaven. Ryby vydávají do vody zvuky, jejichž kmity mají ve vodě i přes svou relativně velkou intenzitu příliš malé amplitudy. Takové kmity dokážou bubínek lidského ucha uvést v kmitavý pohyb jenom naprosto nepatrně. Pokud však zvuk ve vodě překročí určitou hlasitost (takový zvuk mohou vydat některé ryby s velkou silou hlasu), stává se také pro nás slyšitelným, ovšem tento zvuk vnímáme jako tichý.

Ve vývoji Země, trvajícím stamilióny let, se vyvinulo lidské ucho z rybího sluchového orgánu. Nepřekvapuje proto tedy, že vlastní sluchový orgán, vnitřní ucho, zvláštními tekutinami naplněný a naprosto vzduchoprázdný hlemýžď nepředstavuje v podstatě žádný sluchový přístroj, zkonstruovaný na bázi šíření zvuku vzduchem, nýbrž ideální přístroj využívající šíření zvuku kapalinou. Bez použití akustického měniče bychom mohli pod vodou dobře slyšet ryby, na souši však nikoli řeč jiných lidí [3].

Akustickým měničem našeho sluchového orgánu jsou kůstky středního ucha. Právě proto, že bubínek nepředává své kmity přímo akustickým nervům sluchového orgánu, musí zmiňovaný akustický měnič převést vzruchy bubínku, vyvolané šířením zvuku ve vzduchu, na vzruchy šířící se v kapalině, kterou je vyplněn hlemýžď, tak, aby nakonec až zde mohly podráždit vláskové buňky a následně vyvolat zvukový vjem.

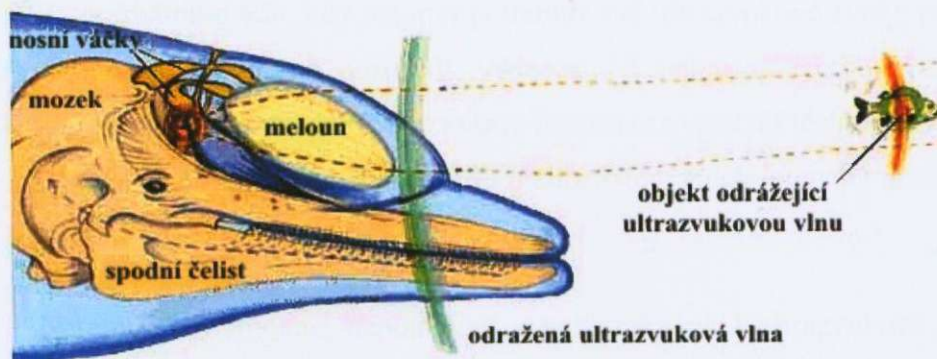
3.4.2 Delfíni



Delfíni vydávají velké množství různých zvuků, obecně v podobě hvizdů nebo „kliků“. Mají přitom pozoruhodnou schopnost vytvářet a vysílat zvuky do okolí s minimálním vkladem energie, ať je to nad hladinou, či v hlubinách pod vodou až do několika stovek metrů. Většinu zvuků využívá jejich velice efektivní, extrémně citlivý a složitý echolokační systém. Frekvence zvuků určených pro echolokaci jsou vyšší než frekvence zvuků užitých pro komunikaci. Při použití pouze svých akustických smyslů, dokáže delfín rozeznat prakticky dva identické objekty, lišící se od sebe jen deseti procenty nebo méně svého objemu či plochou povrchu. Dokonce dokáže objevit, rozeznat a ulovit kořist skrývající se v písčitém dně v hloubce přibližně 0,3 m. Tuto schopnost umí využít i v hlučném prostředí, může vydávat zvuky a zároveň přijímat odrazy a dokáže pomocí echolokace sledovat blízký a vzdálený cíl zároveň. Jelikož se zvuk ve vodě šíří přibližně 4,5krát rychleji než ve vzduchu, musí být mozek delfína extrémně dobře přizpůsoben, aby byl schopen rychle analyzovat složité informace, které získá prostřednictvím odražených zvukových vln.

Pro vytváření ultrazvukových vln v podobě „kliků“ o délce asi 35 μ s až 45 μ s, jejichž frekvence se průměrně pohybuje v rozmezí 140 – 150 kHz a intenzita kolem hodnoty 228 dB, používají delfíni nosní vaky, které jsou

umístěny za tzv. melounem, což je čelní tukové těleso pomáhající s vysíláním signálu do prostoru. Meloun působí jako čočka, která zaostřuje zvuk v úzký paprsek, jenž delfín vysílá přímo před sebe. Odražený echolokační signál delfíni přijímají do středního ucha pomocí spodní čelisti vyplněné tukovou tkání a přilehlými tukovými tkáněmi, které dobře vedou zvukové vlny (obr. 3.14).



Obr. 3.14 Echolokační systém delfína

Frekvenční rozsah sluchu delfína je poměrně široký 75 Hz až 150 kHz, přičemž největší citlivost má jeho sluchový orgán v rozmezí frekvencí 15 kHz až 110 kHz.

3.4.3 Netopýři

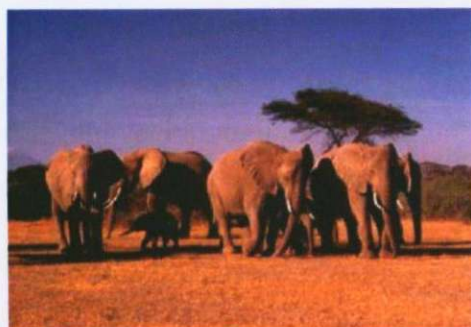


Netopýři využívají k orientaci v prostředí a k lovu potravy echolokaci. Základ této schopnosti spočívá u netopýra ve vyslání ultrazvuku v podobě velice silného skřeku, a následného příjmu jeho odrazu. Již za tisícinu vteřiny po vyslání orientačního signálu je netopýr schopen přijmout jeho první odraz. To znamená, že může určit i polohu blízkých cílů v minimální vzdálenosti 17,5 cm, což je při lovu neobyčejně důležité [3].

Za normálního letu, kdy netopýr potřebuje své ultrazvukové zvuky pouze pro orientaci v prostorném prostředí, vydá asi 12 zvuků za vteřinu. Ovšem blíží-li se netopýr k nějakému cíli, zvyšuje frekvenci vydávání těchto zvuků až na 300 za vteřinu. Navíc jsou tyto skřeky velice silné, jejich intenzita dosahuje až 100 fónů.

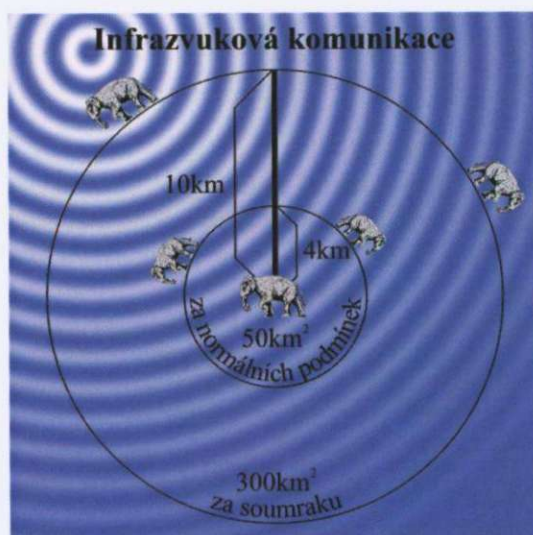
Netopýři k echolokaci nepoužívají vysokofrekvenční ultrazvukové vlny jen náhodou. Mají pro to jasný důvod. Pro netopýra je v noci ultrazvuková echolokace jako pro člověka reflektor. Ultrazvuk se dá oproti nízkofrekvenčnímu zvuku (spadajícímu do slyšitelného pásma) zaměřit a vysílat jedním směrem, což pro netopýra znamená, že získanými odrazy získá detailnější obraz prostoru, který se před ním nachází. Frekvence zvuku vydaného např. netopýrem velkým se pohybuje mezi 50 kHz až 100 kHz, což odpovídá vlnové délce 3 mm až 6 mm. Teprve tak je vůbec fyzikálně možné, že velmi drobné mušky a komáři mají svou postižitelnou ozvěnu.

3.4.4 Sloni



Mezi zvířata, která jsou schopna vnímat zvukové vlny spadající do infrazvukové části zvukového spektra, patří sloni využívající těchto nízkofrekvenčních zvuků ke komunikaci. Sloni mají dobře vyvinutý komunikační systém a infrazvuk je pro ně velice užitečný komunikační nástroj, který využívají z několika důvodů. Vlastnosti infrazvuku totiž slonům dovolují komunikovat na velké vzdálenosti i bez ohledu na členitost terénu, což je z hlediska jejich cestování po rozlehlých oblastech africké krajiny velice důležité.

Sloni většinou dokáží poslouchat hlasitá volání vzdálená několik kilometrů a odpovídat na ně (obr. 3.15). Za normálních denních atmosférických podmínek je tato vzdálenost kolem 4 km, což znamená, že sloni mohou komunikovat v okruhu 50 km^2 . Avšak navečer a v nočních hodinách při zlepšení atmosférických podmínek pro šíření infrazvuku jsou schopni



Obr. 3.15 Komunikace mezi slony

komunikovat i na vzdálenost téměř 10 km při pokrytí oblasti kolem 300 km^2 . V Africe totiž ve večerních hodinách dochází k výraznému snížení teploty vzduchu do výšky asi 300 m nad zemí a tím dochází na rozhraní teplého a studeného vzduchu k odrazu infrazvukových vln zpět k zemi. Za normálních podmínek by se toto vlnění při šíření bez odrazu nikdy zpět k zemi nedostalo. Obecně mohou sloni za soumraku mezi sebou komunikovat na větší vzdálenosti. 96% infrazvukové komunikace slonů určené pro cestování na velké vzdálenosti probíhá ve večerních a ranních hodinách.

Frekvence zvuku sloního volání se pohybuje přibližně okolo hodnoty 15 Hz a normální délka jedné takové sekvence je asi 4 s až 5 s. Díky schopnosti sluchového orgánu slona vnímat infrazvukové vlny, může slonům jejich sluch posloužit nejen ke komunikaci, ale také jako varovný systém upozorňující např. na bouři blížící se ze vzdálenosti 160 km až 240 km.

4. Experimenty

4.1 Klasické experimenty

Experimentem se rozumí činnost, při níž jde o vyvozování nebo ověřování fyzikálních poznatků, především zákonů, a to z pozorování a analýzy přírodních dějů, uměle navozených při vyučování.

Následující experimenty se řadí mezi demonstrační experimenty. Ty patří mezi nejvýznamnější prostředky při výkladu ve fyzice na základních i středních školách.

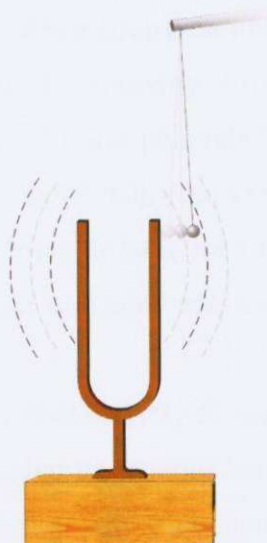
Jelikož současný trend ve fyzice vyžaduje stále větší míru aktivní formy výuky a následující demonstrační experimenty jsou z časového hlediska zastaralé, i když z hlediska metodiky nenahraditelné (i při demonstračních experimentech lze žáky účinně aktivizovat), je proto podle toho zvolen i název souboru následujících experimentů jako klasické experimenty.

4.1.1 Chvění ladičky

Pomůcky: ladička na rezonanční skříňce, stojánek se skleněným korálkem (kuličkou) na niti, pryžové kladívko

Příprava a provedení: Úderem pryžového kladívka rozezvučíme ladičku a pomalu k ní přiblížíme stojánek se zavěšeným korálkem tak, aby se lehce dotýkal horní části ramena ladičky. Kulička od ramena ladičky odskakuje (obr. 4.1).

Závěr: Ladičky vydávající zvuk jsou chvějící se pružná tělesa.



Obr. 4.1 Chvění rozezvučené ladičky

Poznámka: Zavěšený korálek přikládáme k hornímu konci jednoho ramena, jehož body kmitají s největším rozkmitem.

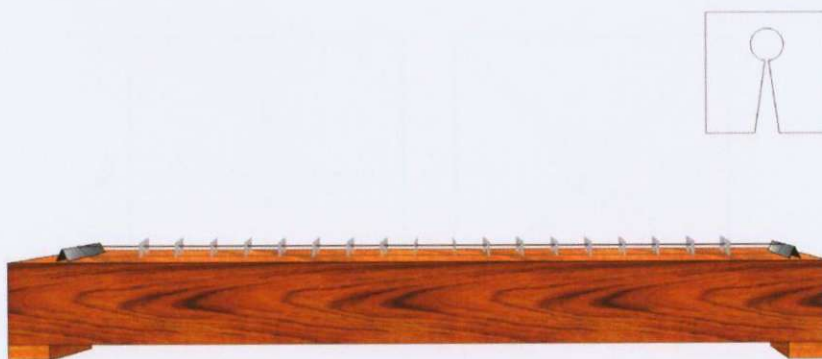
4.1.2 Chvění struny

Pomůcky: polychord, smyčec, papírové jezdce, závaží 1 kg, 1 kg a 2 kg

Příprava a provedení: Experiment je rozdělen do pěti částí podle typu demonstrovaného jevu.

1. Příčné chvění struny. Chvění (vlnění stojaté příčné) struny demonstrujeme na napjaté struně polychordu (obr. 4.2). Strunu napneme tak, aby vydávala jasný tón. Na strunu nasadíme papírové jezdce (tvar jezdce je vyznačen na obr. 4.2 v pravém rohu nahoře), pak strunu rozezvučíme smyčcem. Jezdce odpadnou z míst, kde struna kmitá, pouze v uzlech zůstanou na struně. Kmitání struny s uzlem uprostřed, popř. v jiných místech, zajistíme lehkým dotykem prstů.

2. Závislost výšky tónu na délce struny. Strunu nejprve rozechvíváme celou, pak umístíme kobylku do poloviny struny, pak do třetiny apod., a srovnáváme výšky tónů. Struna poloviční délky zní o oktávu výše než základní tón. Struna třetinové délky zní kvintou druhé oktávy. Vhodné je srovnávat výšky tónů struny, u které měníme délku, s výškou tónu druhé struny, která je naladěna na stejný základní tón a u které délku během experimentu neměníme.
3. Závislost výšky tónu na velikosti síly F , napínající strunu. Strunu, která je vedena přes pevnou kladku na jednom konci polychordu, napneme silou 10 N. Pak naladíme druhou strunu na stejný tón. Nato zvýšíme zatížení první struny na 40 N. Struna pak vydává tón 2krát (o oktávu) vyšší, jak zjistíme srovnáním s tónem druhé struny.
4. Závislost výšky tónu na hmotnosti délkové jednotky struny. Na polychord upevňujeme ocelové struny různého průměru. Při stejném zatížení vydává tenčí struna vyšší tón.
5. Harmonické tóny. Harmonické tóny, které vydává struna, demonstrujeme tak, že silně rozezvučené struny se dotkneme v jedné polovině, v třetině atd. lehce nehtem nebo kartónem. Základní tón se utlumí a je pak slyšet odpovídající vyšší harmonický tón. Struna začne vydávat pouze harmonické tóny, pokud se jí lehce dotýkáme v $1/2$, $1/3$, $1/4$, $3/4$ atd. délky a rozechvíváme-li současně strunu smyčcem (tzv. flažolety).



Obr. 4.2 Rozmístění jezdců na struně polychordu

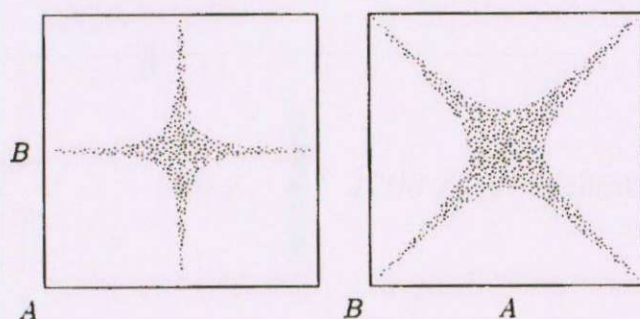
Závěr: Druhá část experimentu dokazuje, že výška tónu struny je nepřímo úměrná délce struny. V třetí části experimentu pozorujeme, že síla, kterou je struna napínána, vzrostla 4krát, výška tónu 2krát $= \sqrt{4}$.

Poznámka: V třetí části experimentu je struna napínána silou, která by neměla překročit určitou hodnotu. Zatížení 9krát větší zpravidla užitá struna nesnese [7].

4.1.3 Chvění desek

Pomůcky: kovové desky různých materiálů a geometrických rozměrů (kruhové, čtvercové, různé tloušťky), svěrka na desky, smyčec, jemný písek, sítko

Příprava a provedení: Do svěrky připevněné na okraji stolu upneme desku v horizontální poloze přímo v jejím středu, eventuálně i mimo něj. Desku rovnoměrně a řídko posypeme ze sítka jemným pískem a rozeznáme třením kolmého tahu smyčce o její okraj. V tomto místě vznikne kmitna. Přidržíme-li v jiném místě okraje desky prst, vznikne v tomto místě uzel. Deska se jako celek rozechvěje a o příčném chvění desky vydávající zvuk svědčí odskakující zrnka písku, která se postupně přemísťují z kmiten do uzlových čar, a tím vytvářejí tzv. Chladniho obrazce (obr. 4.3) [14].



Obr. 4.3 Chladniho obrazce

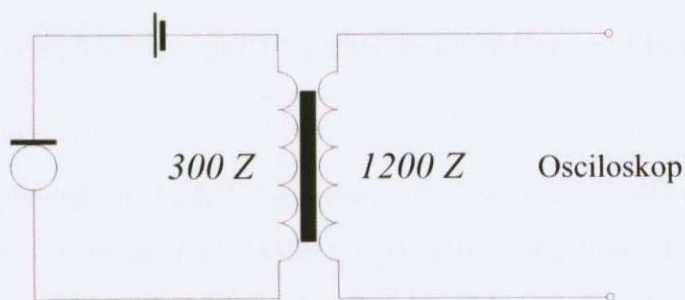
Závěr: Desky vydávající zvuk jsou stejně jako ladičky chvějící se pružná tělesa.

Poznámka: Vytvoření obrazce závisí na místě, kde táhneme smyčcem (obr. 4.3 body A) a kam přiložíme prst (obr. 4.3 body B), i na způsobu tažení smyčcem. Přitlačíme-li na smyčec, vydává deska vyšší tón a obrazec je složitější. Čím nižší tón deska vydává, tím je obrazec jednodušší.

4.1.4 Časové rozvinutí zvukových vln

Pomůcky: osciloskop, uhlíkový mikrofon (nebo dynamický reproduktor s výstupním transformátorem), plochá baterie, transformátor s jádrem o 300závitech primárního vinutí a 1200závitech sekundárního vinutí, spojovací vodiče, ladička na rezonanční skříňce, pryžové kladívko

Příprava: K vertikálnímu vstupu osciloskopu připojíme sekundární vinutí transformátoru, do obvodu s primárním vinutím zapojíme mikrofon a baterii (obr. 4.4). Při použití reproduktoru jej připojíme k vertikálnímu vstupu osciloskopu přes výstupní transformátor (napětí indukované v kmitací cívce reproduktoru při dopadu zvukových vln na jeho membránu se transformuje nahoru). Osciloskop připojíme k síti a zapneme ho. Seřídíme jas a ostrost stopy na obrazovce i šířku časové základny. Její frekvenci nastavíme na nízkou hodnotu.



Obr. 4.4 Schéma zapojení mikrofonu s osciloskopem

Provedení: Nejprve použijeme jako zdroj zvuku ladičku, potom naše hlasivky.

1. Rozezvučíme ladičku a přiblížíme ji k přijímači (mikrofon nebo reproduktor) tak, aby zvuk vycházející z dutiny rezonanční skříňky dopadal přímo na něj. Změnou (zvýšením) frekvence časové základny záznam na obrazovce zastavíme. Změnou vertikálního zesílení upravíme konečnou podobu záznamu. Na obrazovce osciloskopu vidíme periodickou křivku připomínající graf funkce sinus.
2. Analogicky jako při pokusu s ladičkou demonstrujeme časové rozvinutí jednotlivých samohlásek. Vidíme, že záznamy jednotlivých samohlásek jsou různé, nejsou sinusové, ale všechny jsou periodické. Pak do mikrofonu, nebo proti membráně reproduktoru, vyslovíme opakovaně libovolnou souhlásku. Frekvenci časové základny doladíme tak, abychom získali časový průběh tohoto zvuku. Nakonec se pokusíme získat časový průběh zvuku majícího zjevně charakter hluku (tlesknutí, úder dlaní do desky stolu apod.) [14].

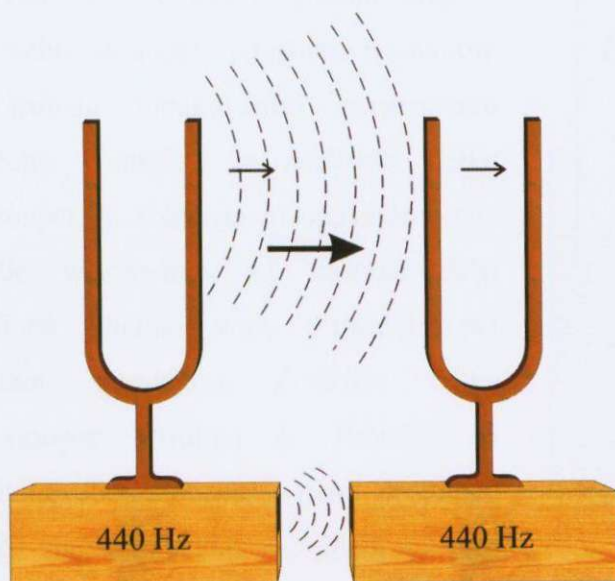
Závěr: První část experimentu dokazuje, že ladička vydává jednoduchý (harmonický) tón. Druhá část experimentu ukazuje, že časový průběh vyslovených samohlásek je periodický, ale není to jednoduchý tón. Časový průběh vyslovených souhlásek a hluků je neperiodický.

4.1.5 Akustická rezonance dvou stejných ladiček

Pomůcky: dvě ladičky o stejné frekvenci na rezonančních skříňkách, pryžové kladívko

Příprava a provedení: Ladičky postavíme do vzájemné vzdálenosti asi 0,4 m tak, aby otvory rezonančních skříněk byly proti sobě (obr. 4.5). Pak jednu ladičku rozezvučíme úderem pryžového kladívka a po chvíli její chvění utlumíme dotekem ruky. Slabší tón téže frekvence, který je slyšet, dokazuje

chvění druhé ladičky vzniklé rezonancí. Utlumíme-li její chvění dotekem ruky, tón zanikne.



Obr. 4.5 *Rezonance dvou stejných ladiček*

Poznámka: Pro přesvědčivější důkaz vynuceného kmitání (chvění) rezonující ladičky zavěsíme malý skleněný korálek (kuličku) na niti tak, aby se lehce dotýkal jednoho ramena ladičky. Vynucené kmitání této ladičky se projeví odskakováním korálku [14].

4.1.6 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu (varianta 1)

Pomůcky: válcová skleněná nádoba 70 cm vysoká, trubice (sklo, kov) o průměru asi 3 cm a délky 70 cm až 80 cm, ladička 440 Hz, pryžové kladívko, délkové měřidlo (1 m) s milimetrovým dělením, dvě gumičky (kroužky), teploměr

Příprava a provedení: Válcovou nádobu umístíme na stole ve svislé poloze, naplníme ji vodou a zasuneme do ní trubici s navléknutými gumičkami. Rozezvučíme ladičku a přidržujeme ji stále u horního konce trubice, kterou

pomalu z nádoby vysouváme (obr. 4.6). Při určité výšce (délce) vzduchového sloupce v trubici nastane rezonance a zvuk ladičky zesílí. Polohu hladiny (délku vzduchového sloupce) označíme posunutím gumičky na trubici. Opakováním experimentu upřesníme polohu gumičky a změříme délku vzduchového sloupce l_1 . Experiment opakujeme tak, že trubici dále vysouváme, až nastane další rezonance. Polohu hladiny vody v trubici opět označíme druhou gumičkou. Změříme délku vzduchového sloupce v trubici l_2 . Protože při rezonanci vzduchového sloupce v něm probíhalo stojaté podélné vlnění s uzlem na hladině vody v trubici, udává rozdíl délek $l_2 - l_1 = l$ vzdálenost dvou sousedních uzlů, tj. polovinu vlnové délky zvukového vlnění buzeného ladičkou. Tedy

$l_2 - l_1 = \frac{\lambda}{2}$. Rychlost zvuku ve vzduchu (tj. rychlost zvukového vlnění ve

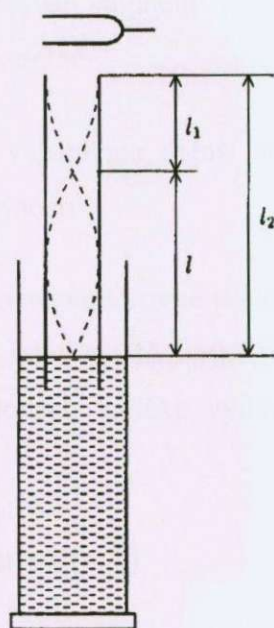
vzduchovém sloupci v trubici) se určí ze vztahu

$$v = f\lambda = 2f(l_2 - l_1) = 2fl,$$

kde f je frekvence ladičky. Nakonec se může porovnat určená rychlost s rychlostí zvuku ve vzduchu vypočtenou ze vztahu

$$v = (331,8 + 0,607\{t\}) \text{ ms}^{-1},$$

kde t je teplota vzduchu, v němž se zvukové vlnění šíří (v našem případě teplota vzduchu v místnosti).



Obr. 4.6 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu

Poznámky: V obr. 4.6 je pro jednoduchost znázorněn průběh stojatého vlnění jako příčného vlnění, i když je to ve skutečnosti vlnění podélné.

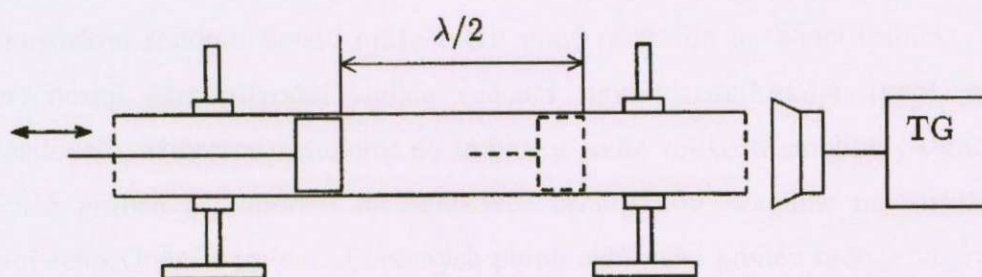
Obecně platí, že rychlost zvuku ve vzduchu je v trubicích menší než rychlost zvuku ve vzduchu např. ve volném prostoru místnosti.

Při provádění experimentu by se měla ladička držet ve vodorovné poloze tak, aby volné konce ramen kmitaly buď ve vodorovné, nebo svislé rovině, ve vzdálenosti menší než 1 cm od trubice. V těchto polohách ladička vydává zvukové vlnění s největší intenzitou [14].

4.1.7 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu (varianta 2)

Pomůcky: skleněná trubice o průměru asi 4 cm a délce 0,7 m až 0,8 m, dva stativy se svěrkami, malý reproduktor, tónový generátor, délkové měřidlo, píst do trubice na tenké tyči, teploměr, spojovací vodiče

Příprava: Skleněnou trubici (rezonátor) s přitmeleným délkovým měřidlem upevníme ve vodorovné poloze pomocí svěrek na dvou stativech (obr. 4.7). Z jedné strany zasuneme do trubice tyč s pístem, z druhé strany přistavíme k otvoru trubice malý reproduktor připojený k tónovému generátoru.



Obr. 4.7 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu

Provedení: Na tónovém generátoru nastavíme frekvenci zvuku např. 1 kHz a jeho intenzitu upravíme během provádění experimentu. Píst posouváme v trubici z polohy u reproduktoru směrem ke vzdálenějšímu konci a sledujeme intenzitu zvuku. Při dosažení rezonance vzduchového sloupce je intenzita zvuku maximální. Polohy čela pístu při první a druhé rezonanci (údaje l_1 a l_2 odečtené na délkovém měřidle) odpovídají dvěma sousedním uzlům stojatého vlnění v trubici. Jejich vzájemná vzdálenost $l = l_2 - l_1$ je rovna polovině vlnové délky $\frac{\lambda}{2} = l_2 - l_1$. Rychlost zvuku ve vzduchu uvnitř trubice určíme ze vztahu

$$v = f\lambda = 2f(l_2 - l_1) = 2fl,$$

kde f je frekvence tónového generátoru. Takto určenou rychlost porovnáme s rychlostí zvuku ve vzduchu vypočtenou ze známého vztahu

$$v = (331,8 + 0,607\{t\}) \text{ ms}^{-1},$$

kde t je teplota vzduchu [14].

Poznámka: Experiment lze provést i s otevřeným rezonátorem (trubicí bez pístu). Po vyladění vzduchového sloupce otevřeného rezonátoru do rezonance změnou frekvence tónového generátoru zjišťujeme rozložení kmiten (uzlů) tzv. akustickou sondou. Sondou může tvořit malý mikrofon na konci trubičky, jíž procházejí jeho přívodní vodiče vedoucí signál k osciloskopu (popř. přes zesilovač). Mikrofon zasuneme do trubice a podle velikosti amplitudy signálu, jehož průběh je zobrazen na obrazovce osciloskopu, soudíme na rozložení stojatého vlnění v trubici. Z určených poloh uzlů nebo kmiten určíme vlnovou délku a následně vypočítáme rychlost zvuku.

Na obr. 4.8 je zobrazeno provedení experimentu s akustickou sondou, která je umístěna uvnitř pístu. Protože píst neuzavírá celý průřez trubice,

nedochází na něm k odrazu zvukové vlny a zvuk se odráží až na protější straně trubice. Stojaté vlnění je tak v trubici zachováno jako kdyby tam píst nebyl. Na obr. 4.8a je píst v poloze kmitny, což dokazuje maximální výchylka amplitudy signálu zobrazeného na obrazovce osciloskopu. Obr. 4.8b pak ukazuje píst v poloze náležící uzlu.



A



B

Obr. 4.8 Měření rychlosti zvuku ve vzduchu při použití akustické sondy

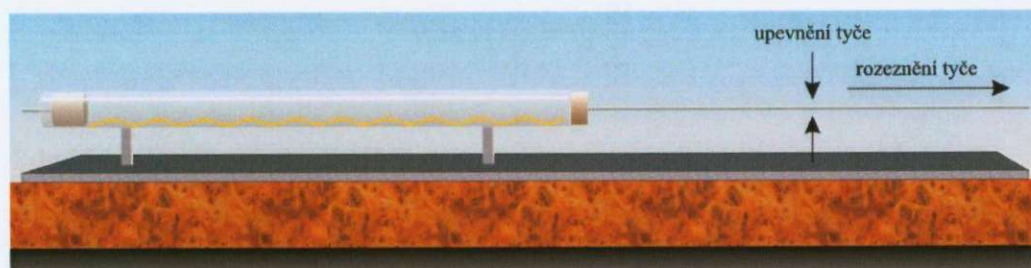
4.1.8 Měření rychlosti zvuku v tyči (Kundtova metoda)

Tato rezonanční metoda umožňuje určit rychlost zvuku v tyči (kov, sklo) na základě znalosti hodnoty rychlosti zvuku ve vzduchu za téže teploty.

Pomůcky: Kundtova trubice s příslušenstvím, korková drť (piliny, prášek), líh, dvě svěrky, délkové měřidlo (1 m), tkanina pro tření kovové tyče

Příprava: Přístroj (viz obr. 4.9) upevníme na základní desku svěrkami na konci stolu a kovovou (skleněnou) tyč připevníme v jejím středu svěrkou. Do skleněné trubice vsypeme trochu korkové drtě a snažíme se jí rovnoměrně rozprostřít do proužku podél co největší části trubice. Pak trubici vrátíme na její místo a upravíme její polohu tak, aby kruhová destička na konci kovové tyče byla v těsné blízkosti (asi 1 mm) otvoru trubice. Kdyby se destička opírala

o trubici, nemuselo by se podařit tyč rozeznít. Do druhého konce trubice zasuneme píst na krátké tyči. Připravíme si láhev s lihem a tkaninu (hadřík) pro tření kovové tyče. Trubicí otočíme kolem její podélné osy o malý úhel (10° až 20°) tak, aby proužek korkové drtě zůstal na nakloněné bočné stěně.



Obr. 4.9 Měření rychlosti zvuku v tyči

Provedení: Navlhčíme připravený hadřík lihem, tyč mírně sevřeme a snažíme se ji třením ve směru od jejího středu k volnému konci rozeznít, tj. vybudit v tyči podélné stojaté vlnění. Při upevnění tyče v jejím středu jsou kmitny na koncích tyče a uzel je v místě jejího upevnění. Délka tyče je tedy rovna polovině vlnové délky λ_1 stojatého vlnění v tyči. Podaří-li se nám tyč rozeznít, pozorujeme korkovou drť. Nejistíme-li žádnou změnu, posuneme (asi o 2 cm) píst do nové polohy a provedení experimentu opakujeme. Po několika pokusech se nám podaří uvést do rezonance vzduchový sloupec v trubici. To nastane při nastavení jeho délky na hodnotu rovnou celočíselnému násobku poloviny vlnové délky podélného stojatého vlnění vzduchu v trubici. Rezonance se projeví rozkmitáním částic korku (nejvíce v kmitnách), které se sesunou po stěně natočené trubice dolů, jen v uzlech a v jejich blízkosti zůstanou na svých místech. Vznikne tak typický obrazec (pro Kundtovu metodu), který umožňuje určit vlnovou délku λ_2 zvukového vlnění vzduchu v trubici. Protože frekvence stojatého vlnění v tyči i vzduchu v trubici je stejná ($f_1 = f_2$), platí

$$f_1 = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} = f_2.$$

Pro rychlost zvuku v tyči v_1 odtud vyplývá

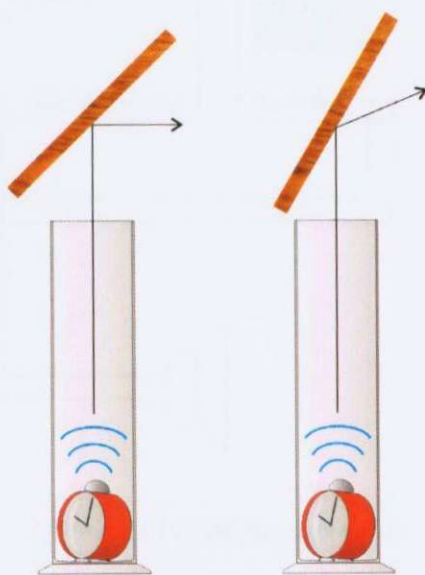
$$v_1 = v_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = v_2 \frac{2l}{\lambda_2},$$

kde l je délka kovové tyče [14].

4.1.9 Odraz zvuku

Pomůcky: vysoký skleněný válec, hodinky s mechanickým strojkem nebo budík, stativ se svěrkou, deska (z překližky apod.)

Příprava a provedení: Na dno vysokého válce vložíme hodinky nebo ještě lépe malý budík. Nad otvorem umístíme desku upevněnou ve svěrcce stativu. Desku natáčíme vhodně tak, že tikot hodinek pozorovatel buď slyší, nebo naopak neslyší (obr. 4.10) [7].



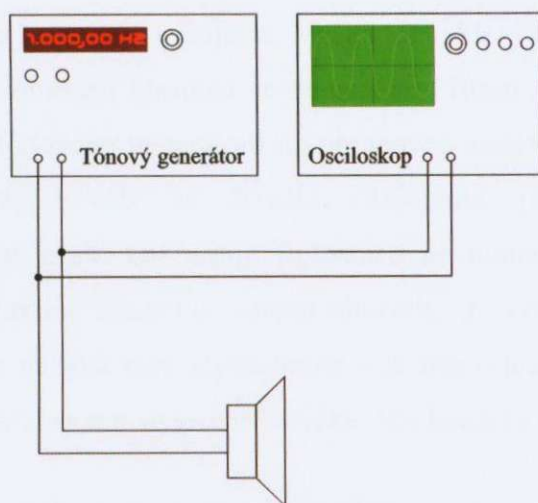
Obr. 4.10 Odraz zvuku

Závěr: Experimentem se dokáže platnost zákona odrazu pro zvukové vlnění.

4.1.10 Hlasitost zvuku

Pomůcky: tónový generátor, reproduktor s výstupním transformátorem, osciloskop, spojovací vodiče

Příprava a provedení: Signál z tónového generátoru přivedeme do reproduktoru a paralelně též na vertikální vstup osciloskopu (obr. 4.11). Při frekvenci 1 kHz nastavíme změnou výstupního napětí tónového generátoru dobře slyšitelný tón a na obrazovce osciloskopu nastavíme změnou vertikálního zesílení dostatečně velkou amplitudu výchylky záznamu. Pak měníme výšku tónu (změnou frekvence signálu tónového generátoru) od nejnižších hodnot k vysokým a zpět; potom měníme výšku tónu také skokem. Fyzikální intenzita zvuku zůstává konstantní, o čemž svědčí stejná amplituda výchylky záznamu na obrazovce osciloskopu. Ovšem subjektivně vnímaná hlasitost zvuku je pro vyšší a nižší frekvence zvuku různá resp. menší.



Obr. 4.11 Schéma zapojení

Závěr: Přestože fyzikální intenzita zvuku zůstává během provádění experimentu prakticky konstantní, subjektivně vnímaná hlasitost (intenzita sluchového vjemu) klesá jak směrem k vysokým, tak směrem k nízkým kmitočtům.

Poznámka: Reproduktor by měl být kvalitní, použitelný do frekvencí až 20 kHz [14].

4.1.11 Obor slyšitelnosti

Pomůcky: tónový generátor, reproduktor s výstupním transformátorem, osciloskop, spojovací vodiče

Příprava a provedení: Zapojení přístrojů je stejné jako v předcházejícím experimentu. Nastavíme frekvenci dobře slyšitelného tónu na hodnotu 1 kHz. Pak frekvenci snižujeme. Po dosažení hodnoty asi 16 Hz pozorujeme, že již přestáváme slyšet z reproduktoru souvislý tón a slyšíme jen sled jednotlivých zvukových impulzů. Potom zvýšíme frekvenci tónového generátoru na hodnotu několik kHz a dále ji spojitě zvyšujeme. Výška tónu, který slyšíme, vzrůstá, ale námi subjektivně vnímaná hlasitost se zmenšuje. Přitom amplituda výchylky záznamu signálu tónového generátoru na obrazovce osciloskopu zůstává beze změny. V rozmezí 10 kHz až 20 kHz zjišťujeme, při které frekvenci přestáváme vnímat zvuk. Od určité frekvence nevnímáme žádný zvukový vjem, i když nastavíme intenzitu signálu tónového generátoru na maximum. Tato frekvence se nazývá mez slyšitelnosti a je individuální charakteristikou každého sluchového orgánu slyšícího člověka. Její hodnota se s věkem snižuje.

Poznámka: Reproduktor by měl být kvalitní, použitelný do frekvencí až 20 kHz [14].

4.1.12 Práh slyšení a bolesti

Pomůcky: tónový generátor, reproduktor s výstupním transformátorem, osciloskop, spojovací vodiče

Příprava a provedení: Experiment je rozdělen do dvou částí, kdy v první části demonstrujeme práh slyšení a v druhé části práh bolesti. Zapojení přístrojů je stejné jako v předcházejícím experimentu.

1. Práh slyšení. Na tónovém generátoru nastavíme frekvenci 1 kHz a postupně zmenšujeme intenzitu zvuku. Při určité hodnotě přestaneme zvuk vnímat, dosáhli jsme prahu slyšení. Snížíme-li frekvenci, nevnímáme ani potom žádný zvuk. Zvýšíme-li však frekvenci při stejné fyzikální intenzitě, uslyšíme opět zvuk, který vnímáme nejsilněji kolem frekvence 3 kHz.
2. Práh bolesti. Na tónovém generátoru nastavíme frekvenci 3 kHz a zvyšujeme intenzitu zvuku na maximum. Vnímání zvuku je provázeno nepříjemným pocitem v uchu. Dalším zvyšováním intenzity zvuku bychom dosáhli prahu bolesti.

Závěr: Obor slyšitelnosti je omezen určitou minimální intenzitou (práh slyšení) a maximální intenzitou (práh bolesti) zvuku, která je závislá na frekvenci zvuku [7].

4.2 Motivační experimenty

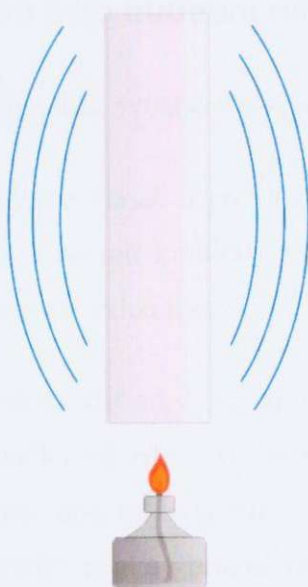
Druhá část souboru experimentů je věnována motivačním experimentům. Motivačním experimentem míníme experiment, který by měl u žáků vyvolat zájem o danou problematiku, přičemž jsou vnitřně motivováni. Takový experiment má zajímavé provedení, vzbuzuje otázky, které chce položit sám

žák, fyzikálně vysvětluje děje, se kterými se běžně setkáváme. Žáci si takový experiment mohou sestavit a vyzkoušet sami.

4.2.1 Akustická rezonance (Stála basa u primasa)

Pomůcky: skleněný válec z obou stran otevřený, stojan, kahan

Příprava a provedení: Do stojanu upevníme skleněný válec, pod kterým zapálíme kahan (obr. 4.12). Plamen ohřeje okolní vzduch, jenž začne skrz válec proudit vzhůru. Při tomto ději je slyšet tiché hučení.



Obr. 4.12 *Rezonance*

Závěr: Vlivem teplého vzduchu se ve válci vytvoří stojaté vlnění. Na obou koncích válce dojde k rozhraní teplého (uvnitř válce) a studeného vzduchu (vně válce). Plamen kahanu neustále dodává vzduchu energii potřebnou pro udržení stojatého vlnění. To se projevuje jednak pulzováním plamene kahanu a hlavně také „hučením“ válce. Tento zvuk je způsoben rezonancí, při níž se válec rozezní a začne vydávat nízkofrekvenční zvuk. Změnou rozměrů válce se změní frekvence vydávaného zvuku.

Poznámka: Pokud se v blízkosti válce vyskytne předmět se stejnou rezonanční frekvencí, může se i on vlivem rezonance rozeznít.

Analogii tohoto děje můžeme hledat i ve známé lidové písni Stála basa u primasa, kde ona basa stojící za kamny začala sama hrát potom, co primaska v kamnech zatopila. Fyzikálně lze tento jev vysvětlit tak, že v komíně proudící teplé spaliny způsobovaly zmiňované hučení, přičemž tento zvuk měl podobnou nízkou frekvenci, na jakou byla naladěna některá ze strun basy stojící za kamny. Ta se pak vlivem rezonance rozezněla.

4.2.2 Krabička od filmu jako hudební nástroj

Pomůcky: krabička od filmu, jehla, rybářský vlasec

Příprava: Do jehly navlékneme vlasec a provlékneme středem dna krabičky od filmu. Vyvlékneme jehlu a zevnitř krabičky zajistíme uzlíkem vlasce proti vytažení. Délku vlasce volíme asi jeden metr.

Provedení: Uchopíme pomůcku do ruky tak, že držíme v obou rukou vlasec tak, aby byl napjatý a krabička od filmu volně visela na jedné straně dolů. Prstem jedné ruky (je dobré, aby to byla ruka, která později nebude držet krabičku kvůli vydání stejného zvuku) brkneme do vlasce. Ozve se sotva slyšitelný zvuk.

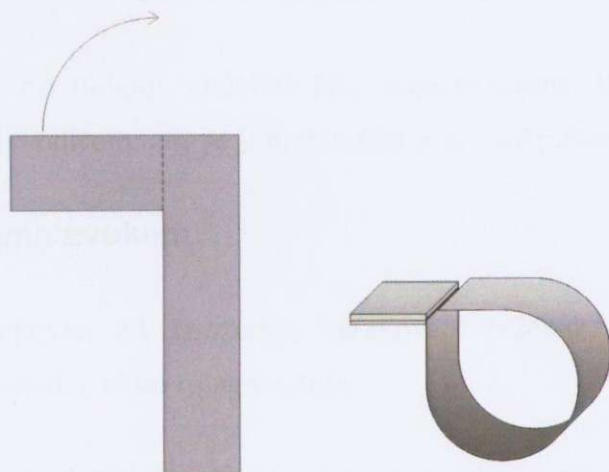
Nyní uchopíme pomůcku tak, že jedna ruka drží lehce, ale přitom pevně krabičku od filmu. Znovu brkneme na vlasce. Tentokrát se ozve podstatně hlasitější zvuk.

Závěr: Chvění vlasce se přeneslo i na krabičku, která funguje jako rezonátor, který chvění vlasce zesílí. Se studenty je možné diskutovat o vnějších parametrech, které ovlivní výšku a barvu výsledného zvuku [22].

4.2.3 Píšťalka

Pomůcky: víčko od zavařovací sklenice OMNIA nebo jiný tenký plech, nůžky

Příprava a provedení: Z plechu vystříhneme polotovar ve tvaru písmene L o šířce 10 mm a délkách: kratší 30 mm a delší 40 až 50 mm (obr. 4.13). Z kratšího dílu vytvoříme stočením šterbinu a z delšího vytvarujeme tělo píšťalky. Foukáním do šterbiny pískáme.



Obr. 4.13 *Píšťalka*

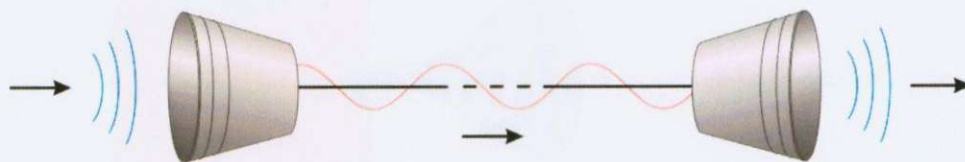
Závěr: Píšťalka píská pouze tehdy, když ji uchopíme mezi palec a ukazováček ze stran uzavřeme a tím dokončíme. Na délce delšího dílu, tedy na velikosti píšťalky, závisí výška tónu [21].

4.2.4 Kelímkový telefon

Pomůcky: dva papírové nebo plastové kelímky, několik metrů dlouhá nit

Příprava a provedení: Ke vnější straně dna jednoho pohárku připevníme jeden konec dlouhé nitě a to samé uděláme i s druhým pohárkem a druhým koncem nitě. Pokud se dva pozorovatelé postaví do vzdálenosti několika metrů

od sebe, neslyší slova pronášená šeptem. Když však použijí kelímkový telefon tak, že je nit mezi kelímky napjata, první pozorovatel do svého kelímku šeptá a druhý ho má přiložen těsně k uchu, jsou slova dobře slyšitelná (obr. 4.14).



Obr. 4.14 Kelímkový telefon

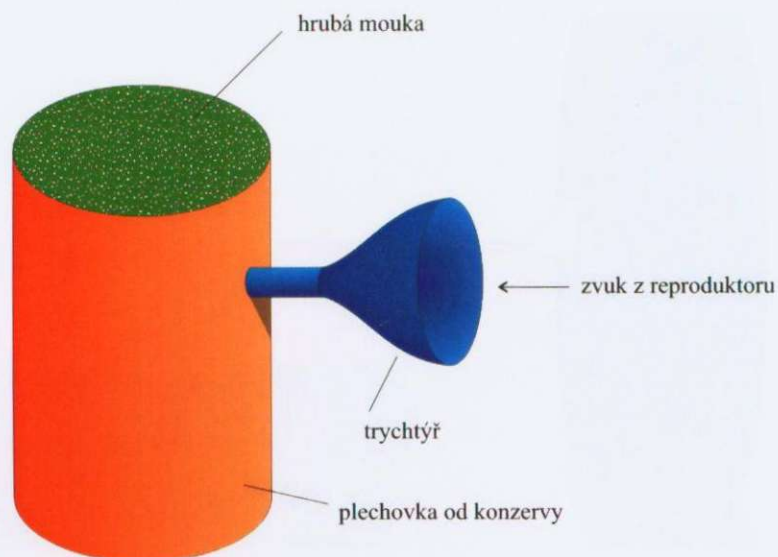
Závěr: Napjatá nit funguje obdobně jako napjatá struna, která nemusí být právě zvukovým vodičem, aby se jí mohlo šířit postupné příčné vlnění [9].

4.2.5 Malujeme zvukem

Pomůcky: plechovka od konzervy, nafukovací balónek, gumičky, malý trychtýř, hrubá mouka, rádio (magnetofon)

Příprava a provedení: Na horní část plechovky natáhneme membránu z nafukovacího balónku a připevníme gumičkami. Do boku konzervy uděláme otvor a strčíme do něj trychtýř. Na membránu nasypeme tenkou vrstvu hrubé mouky. Celou soupravu dáme otočenou trychtýřem k reproduktoru rádia. Na membráně se utváří více či méně pravidelné obrazce, které se mění se změnou melodie (obr. 4.15).

Závěr: Zvuk z reproduktoru je soustřeďován trychtýřem dovnitř plechovky, zvuková vlna se šíří vzduchovým sloupcem v plechovce. Kmitání molekul vzduchu se přenáší na napnutou membránu a z ní na drobné částičky mouky, které v různých místech membrány různě nadskakují do vzduchu a hned padají na membránu. Na povrchu membrány tak vznikají různé obrazce pravidelné i nepravidelné. Obrázek závisí na melodii i na druhu použitého prášku.



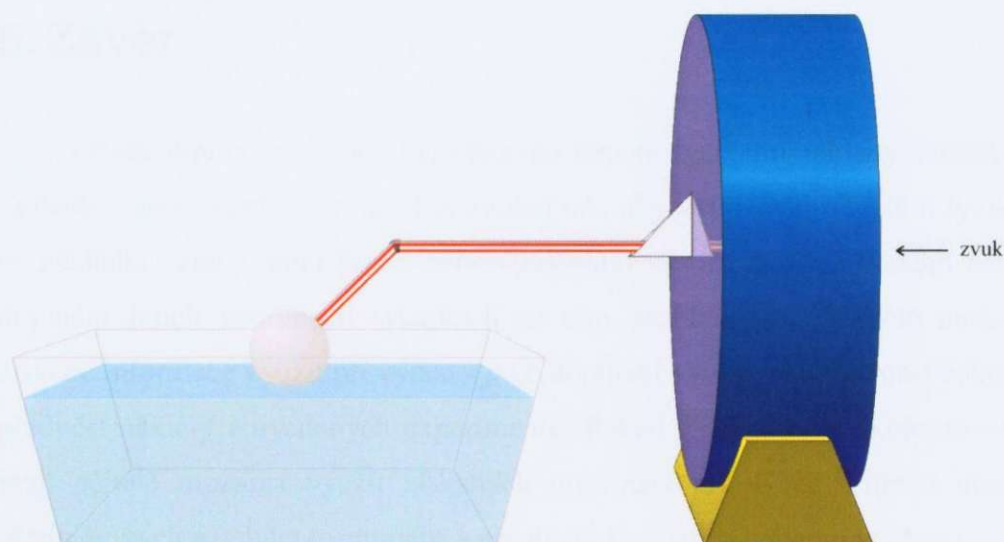
Obr. 4.15 *Malujeme zvukem*

Poznámka: Do trychtýře můžeme i zpívat. Hezké obrazce se získávají u mužského hlasu, klasické hudby a jednoduché melodie lidových písní [20].

4.2.6 Jak funguje střední ucho

Pomůcky: obruč dortové formy, fólie nebo igelit, silná dlouhá gumička, brčko s ohebným kloubem, pingpongový míček, nádoba s vodou, papírový stojan

Příprava a provedení: Na obruč z jedné strany připevníme fólii pomocí gumičky a postupně ji napneme tak, aby tvořila pružnou membránu. Obruč zasadíme ve svislé poloze do stojanu, který jsme si vyrobili např. z kartónu tvrdého papíru. Uprostřed membrány připevníme brčko, ke kterému na jeho druhém konci přilepíme pingpongový míček. Pod míčkem umístíme nádobu, kterou naplníme vodou tak, aby se hladina míčku dotýkala. Do takto vyrobeného modelu (obr. 4.16) můžeme např. mluvit otevřenou stranou obruče nebo zde můžeme umístit reproduktor. Na vodní hladině se pak začnou tvořit vlnky.



Obr. 4.16 *Model mechanismu funkce středního ucha*

Závěr: Obruč s membránou představují bubínek, brčko představuje kůstky středního ucha a pingpongový míček s vodní hladinou představují třmínek s oválným okénkem a kapalinu, kterou je vyplněn hlemýžď. Tento jednoduchý experiment je vhodný pro vysvětlení mechanismu, který zprostředkovává cestu zvuku od bubínku až do hlemýžďe.

5. Závěr

Obsah diplomové práce byl věnován tématu fyzikální základy akustiky. Způsob vypracování této práce byl zvolen tak, aby vyhovoval učitelům fyziky na základní nebo střední škole, nebo studentům vysoké školy, k získání nebo doplnění jejich vědomostí týkajících se této problematiky. Učitelé mohou získané informace využít při výuce a jako doplnění výuky mají možnost žákům předvést některý z uvedených experimentů. Pokud to situace ve škole dovolí, mají učitelé možnost využít získaných informací při výuce v rámci mezi-předmětových vztahů a to zejména s předměty biologie a hudební výchova.

6. Seznam použité literatury

- [1] Busnel, R.-G., Fish, J. F.: Animal sonar systems, Plenum Press, 1980
- [2] Čihák, R.: Anatomie 3, Grada, 1997
- [3] Dröscher, B.: Magie smyslů v říši zvířat, Orbis, Praha, 1970
- [4] Hála, B., Sovák, M.: Hlas Řeč Sluch, Česká grafická Unie a.s., Praha, 1947
- [5] Hlavička, A. a kol.: Fyzika pro pedagogické fakulty I. díl, SPN, Praha, 1971
- [6] Kašpar, E.: Fyzika pro učitelské studium 2. svazek, SPN, Praha, 1976
- [7] Kašpar, E., Vachek, J.: Pokusy z fyziky na středních školách, SPN, Praha, 1967
- [8] Kočí, P.: Základy pěvecké techniky, Editio Supraphon, Praha – Bratislava, 1970
- [9] Kušnerová, M.: Školní pokusy ve fyzice, Ostravská univerzita, 1994
- [10] Lepil, O.: Mechanické kmitání a vlnění, Prometheus, Praha, 2001
- [11] Petty, G.: Moderní vyučování, Portál, Praha, 1996
- [12] Schauer, P.: Akustika: učební texty pro magisterské, bakalářské, distanční a doktorské studium, CERM, Brno, 2002
- [13] Soukup, J.: Hlas, zpěv, pěvecké umění, Supraphon, Praha, 1972
- [14] Svoboda, E. a kol.: Pokusy z fyziky na střední škole 2, Prometheus, Praha, 1997
- [15] Syrový, V.: Hudební akustika, AMU, Praha, 2003
- [16] Taraba, O.: Vybrané stati z fyzikální akustiky I. – Ultrazvuk, ČVUT, Praha, 1972
- [17] http://elephant.elehost.com/About_Elephants/Senses/senses.html
- [18] <http://envi.upce.cz/pisprace/starsi/krato/hluk.htm>
- [19] <http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/bionb424/students/ckr5/neurophysiology.html>

- [20] http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh_02/02_03_Bdinkova.html
- [21] http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh_02/02_24_Slaby.html
- [22] http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh_08/08_19_Reichl.html
- [23] <http://library.thinkquest.org/17963/basic-anatomy.html>
- [24] http://magma.nationalgeographic.com/ngm/0403/resources_cre.html
- [25] http://news.nationalgeographic.com/news/2004/03/0303_040303_elephants.html
- [26] <http://www.21stoleti.cz/view.php?cisloclanku=2004031938>
- [27] <http://www.animalbehavioronline.com/elephants.html>
- [28] http://www.arl.nus.edu.sg/objects/paper_ver1.pdf
- [29] <http://www.audiocity.cz/clanky.php?kat=teorie>
- [30] <http://www.inkokomo.com/dolphin/echolocation.html>
- [31] <http://www.light-science.com/articles1003.html>
- [32] <http://www.ticho.cz/clanky.php?key=718&limn=0&limc=10&sclkat=clanky&cclaut=21&cclkat=&cclser=19&ccltem=>