

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Radomír Vaněk

České Budějovice 2005

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
PEDAGOGICKÁ FAKULTA  
KATEDRA FYZIKY

- 48 -

*2.12. 2005 Bydland*

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**MULTIMEDIÁLNÍ VÝUKOVÝ  
PROGRAM**

Bc. Radomír Vaněk

Knihovna JU - PF



3 1 1 5 1 7 1 6 9 7

Jihočeská univerzita

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

České Budějovice 2005

*Děkuji PaedDr. Jiřímu Tesařovi, Dr. za jeho odbornou pomoc při vypracování této diplomové práce.*

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.*

*Jan E. Adamčík*  
.....

**Obsah:**

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod.....  | 4  |
| 2. Fyzikální mechanického kmitání a vlnění.....           | 5  |
| 2.1. Kmitání mechanického oscilátoru.....                 | 5  |
| 2.2. Rychlost a zrychlení kmitavého pohybu.....           | 8  |
| 2.3. Složené kmitání.....                                 | 9  |
| 2.4. Dynamika harmonického kmitání.....                   | 9  |
| 2.5. Kyvadla.....   | 11 |
| 2.6. Mechanické vlnění.....                               | 17 |
| 2.7. Postupné mechanické vlnění.....                      | 17 |
| 2.8. Rovnice postupného vlnění.....                       | 19 |
| 2.9. Interference vlnění.....                             | 21 |
| 2.10. Stojaté vlnění.....                                 | 23 |
| 2.11. Chvění mechanických soustav.....                    | 26 |
| 2.12. Vlnění v izotropním prostředí.....                  | 29 |
| 2.13. Odraz a lom vlnění.....                             | 30 |
| 2.14. Ohyb vlnění.....                                    | 33 |
| 3. Zvuk a akustika.....                                   | 34 |
| 3.1. Zvukové vlnění.....                                  | 34 |
| 3.2. Hladina intenzity a hlasitost zvuku.....             | 37 |
| 3.3. Detektory a přístroje na měření intenzity zvuku..... | 41 |
| 3.4. Rozdělení akustiky.....                              | 44 |
| 3.5. Základy hudební akustiky.....                        | 45 |
| 3.6. Některé zdroje hudebních zvuků.....                  | 50 |
| 3.7. Vznik, vlastnosti a použití ultrazvuku.....          | 57 |
| 3.8. Odraz a pohlcování zvuku.....                        | 58 |
| 3.9. Akustičnost sálů.....                                | 59 |
| 3.10. Vznik a složení lidského hlasu.....                 | 62 |
| 3.11. Sluchový orgán.....                                 | 63 |
| 4. Využití výpočetní techniky při výuce.....              | 67 |
| 4.1. Multimediální program.....                           | 67 |
| 4.2. Simulační program, modelování.....                   | 67 |
| 4.3. Testovací programy.....                              | 68 |
| 4.4. Výukové programy.....                                | 68 |

---

|  |    |
|--|----|
| 4.5. Informační zdroje.....                                | 69 |
| 4.6. Videokonference.....                                  | 69 |
| 4.7. Distanční formy výuky.....                            | 69 |
| 4.8. Virtuální realita.....                                | 70 |
| 4.9. Projektově orientovaná výuka s počítači.....          | 70 |
| 4.10. Projekt ve škole.....                                | 71 |
| 4.11. Školní vzdělávací program.....                       | 73 |
| 5. Popis multimediálního programu a zařazení do výuky..... | 74 |
| 6. Závěr.....  | 77 |
| 7. Literatura.....   | 78 |
| 8. Příloha   |    |

---

## 1. Úvod

Tématem této diplomové práce je seznámení žáků se základními fyzikálními principy periodických jevů, vlnění a akustiky. S těmito uváděnými principy se žáci setkávají v praxi aniž by si to uvědomovali. Jako je například vlnění na vodní hladině, zvuk, ozvěna apod.

S periodickými jevy souvisí mnoho základních veličin a jevů, které jsou podrobně popsány v první teoretické části práce. Jsou zde popsány veličiny mechanického kmitání jako např. perioda, frekvence, ale veličiny vlnění a akustiky.

Druhá část je zaměřena na užití výpočetní techniky při výuce fyziky na základní škole. Zde jsou uvedeny základní pojmy se kterými se můžeme při užití výpočetní techniky ve výuce fyziky setkat jako např. multimediální program, testovací program, projekt. Dále zde můžeme najít, je-li dobré při výuce používat multimediálních programů nebo ne. Zdali je tato technika efektivnější než běžná výuka za využití běžných pomůcek s klasickým výkladem.

Těžištěm a cílem této diplomové práce je vytvoření multimediálního výukového programu, který by žáci mohli použít při výuce na základní škole. Program by měl ulehčit práci jak vyučujícímu s výkladem fyzikálních dějů, tak i žákům s lepším pochopením daného tématu. Dále popis vlastního programu a jeho zařazení do výuky. Je zde i základní zmínka o Rámcovém vzdělávacím programu.

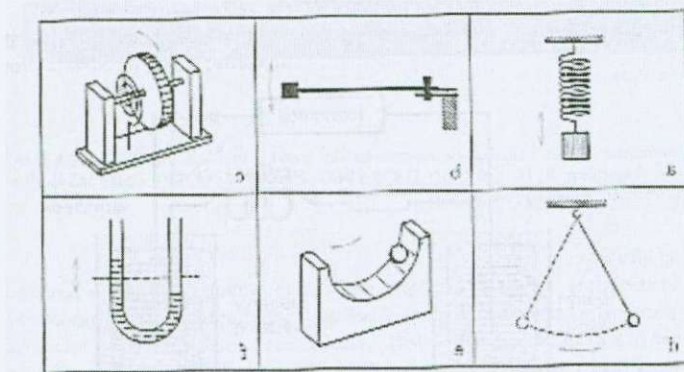
Práci můžeme považovat za první seznámení s velmi širokým tématem, které zahrnuje tak rozličné obory, jako jsou fyzikální vlastnosti a jevy, elektroakustika, vlastnosti lidského ucha atd., proto je v práci uveden seznam odborné literatury, kde je možné získat další podrobnější informace.

## 2. Fyzikální veličiny mechanického kmitání, vlnění a akustiky

Kmitání, vlnění a akustika patří k nejrozšířenějším jevům v přírodě i v technické praxi. Charakteristickým znakem těchto jevů je, že veličiny, kterými jsou kmitání a vlnění popisovány, se s časem mění a tyto změny jsou převážně periodické. Kmitavé a vlnové děje mohou mít různou fyzikální podstatu.

### 2.1. Kmitání mechanického oscilátoru

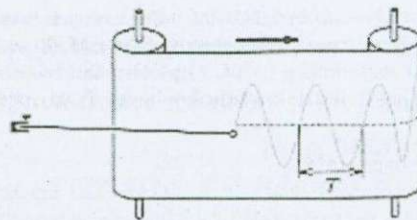
Na obr. 1-1 jsou příklady různých zařízení, která mohou po vychýlení z rovnovážné polohy volně kmitat.



Obr. 1-1 mechanické oscilátory

Takové zařízení nazýváme mechanický oscilátor. Výchylka mechanického oscilátoru se s časem periodicky mění. Jestliže například kmitající těleso spojíme se zapisovacím zařízením, pak na pruhu papíru, který se pohybuje stálou rychlostí, vznikne zápis v podobě sinusoidy (obr. 1-2). Výchylka kmitajícího tělesa závisí na čase podle funkce sinus a grafickým vyjádřením této závislosti je časový diagram kmitavého pohybu.

Kmitavý pohyb, jehož časový diagram má podobu sinusoidy, popř. kosinusoidy, nazýváme jednoduchý kmitavý pohyb nebo harmonický pohyb.



Obr. 1-2 záznam časového diagramu

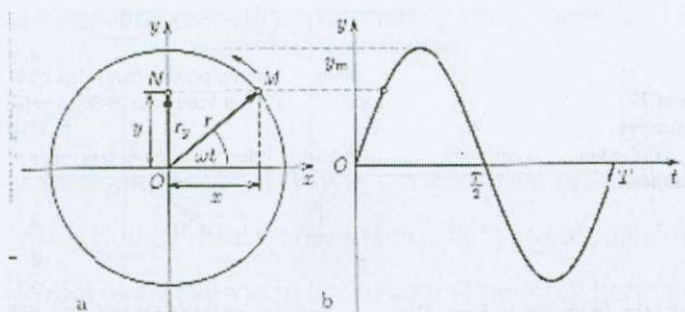
### Kinematika harmonického pohybu

V kinematice popisujeme pohyb pomocí kinematických veličin – polohový vektor, rychlost, zrychlení. U kmitavého pohybu můžeme získat vztahy pro tyto veličiny srovnáním kmitavého pohybu s pohybem po kružnici.

Na obr. 1-3 je naznačena kružnice, po níž se pohybuje hmotný bod M. Její střed leží v počátku 0 vztažné soustavy ( Oxy ). Okamžitou polohu bodu M určuje polohový vektor  $r$ , jehož koncový bod má souřadnice  $x$  a  $y$ . Jestliže se bod M pohybuje úhlovou rychlostí  $\omega$ , svírá polohový vektor s kladným směrem osy  $x$  úhel  $\omega t$  a pro souřadnice platí vztahy :

$$x = r \cos \omega t$$

$$y = r \sin \omega t$$



Obr. 1-3 souvislost rovnoměrného pohybu po kružnici s kmitavým pohybem

Souvislost kmitavého pohybu s pohybem po kružnici je taková, že polohový vektor  $r_y$  bodu N kmitajícího na přímce je vlastně průmětem polohového vektoru bodu M do osy  $y$ . Harmonické kmitání je pak popsáno souřadnicí  $y$  polohového vektoru  $r$ . Tato souřadnice určuje okamžitou výchylku  $y$  kmitajícího bodu. Platí rovnice harmonického kmitání:

$$y = y_m \sin \omega t$$

Veličina  $y_m$  je největší výchylka hmotného bodu z rovnovážné polohy neboli amplituda výchylky. Veličina  $\omega t$  je okamžitá fáze kmitání.

### Perioda a frekvence kmitání

Veličinu  $\omega$ , která má u pohybu rovnoměrného po kružnici význam úhlové rychlosti, nazýváme u kmitavých dějů úhlová frekvence nebo úhlový kmitočet. Je definována vztahem

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

a její jednotka je radián za sekundu ( $\text{rad s}^{-1}$ )



Hmotný bod  $M$  vykoná při rovnoměrném pohybu po kružnici jeden oběh za dobu  $T$ . Kmitající bod  $N$  vykoná za tuto dobu jeden kmit ( obr. 1-3b) a veličinu  $T$  nazýváme doba kmitu nebo perioda.

Počet kmitů, které vykoná kmitající bod za jednu sekundu je, frekvence nebo kmitočet:

$$f = \frac{1}{T}$$

Jednotka frekvence je hertz ( Hz ) a je nazvána na počest německého fyzika H.R. Hertze:

$$[f] = \frac{1}{[T]} = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

V praxi se používají také násobné jednotky – kilohertz ( kHz), megahertz ( MHz ) a gigahertz ( GHz ).

### Počáteční fáze kmitání

V případě znázorněném na obr. 1-3 byla v počátečním okamžiku (  $t_0 = 0$  ) okamžitá výchylka nulová (  $y_0 = 0$  ). Bod  $M$  ležel na ose  $x$  a bod  $N$  byl ve vztažném bodu  $O$ . Často však potřebujeme zapsat rovnici okamžité výchylky nebo jiné veličiny harmonického kmitání v případě, že v počátečním okamžiku není veličina nulová. Počáteční hodnotu veličiny vyjádříme pomocí úhlu  $\varphi_0$ , který nazýváme počáteční fáze kmitání.

Pro okamžitou výchylku hmotného bodu platí vztah

$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Počáteční fáze může mít kladnou i zápornou hodnotu. Na obr. 1- 4 je vyznačen také polohový vektor  $r$  bodu  $M$ , který se pohybuje pohybem rovnoměrným po kružnici. V počátečním okamžiku svírá s osou  $x$  úhel  $\varphi_0$ . obr. 1 – 4 zachycuje dva typické případy, kdy počáteční fáze je kladná (  $\varphi_0 > 0$  ), popř. záporná (  $\varphi_0 < 0$  ).

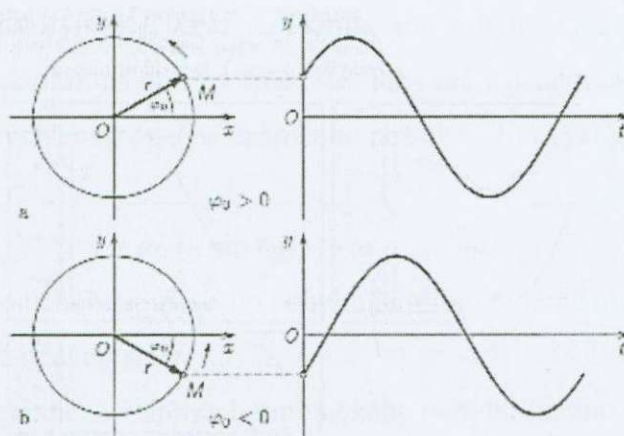
Počáteční fáze je důležitá zejména pro posouzení vzájemných vztahů fyzikálních veličin kmitavého pohybu. Obvykle vyjadřujeme fázový rozdíl těchto veličin. Jestliže dva harmonické pohyby mají stejnou úhlovou frekvenci a počáteční fáze  $\varphi_{01}$  a  $\varphi_{02}$ , platí pro fázový rozdíl  $\Delta\varphi$ :

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_{02}) - (\omega t + \varphi_{01}) = \varphi_{02} - \varphi_{01}$$

Fázový rozdíl dvou harmonických veličin o stejné frekvenci je určen rozdílem jejich počátečních fází.

Zvláštní význam mají případy, kdy mezi dvěma veličinami harmonického pohybu stejné frekvence je fázový rozdíl  $2k\pi$  rad a  $(2k + 1)\pi$  rad, kde  $k = 0, 1, 2, \dots$

V prvním případě mají obě veličiny stejnou fázi, ve druhém opačnou fázi.



Obr 1 - 4 počáteční fáze

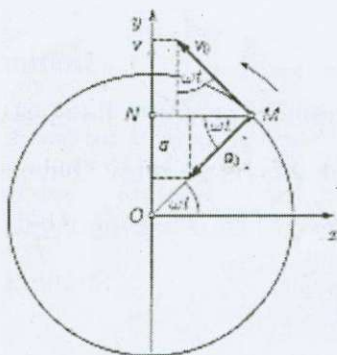
## 2.2. Rychlost a zrychlení kmitavého pohybu

K základním veličinám kinematického popisu harmonického pohybu patří rychlost a zrychlení. Vztahy pro tyto veličiny najdeme opět na základě souvislosti s rovnoměrným pohybem po kružnici.

Vektor rychlosti  $v_0$  pohybu rovnoměrného po kružnici má směr tečny v daném bodě trajektorie ( obr. 1- 5) a je určen vztahem  $v_0 = \omega \cdot r$ . Rychlost  $v$  kmitavého pohybu je průmětem vektoru  $v_0$  do osy  $y$ . Rychlost kmitavého pohybu ve směru osy  $y$  vyjádříme souřadnicí vektoru  $v$ , což je skalární veličina  $v$ . Z obr. 1-5 je patrné, že  $v = v_0 \cos \omega t = \omega r \cos \omega t$ . Poněvadž  $r = y_m$ , je vztah pro rychlost kmitavého pohybu:

$$v = \omega y_m \cos \omega t$$

Z tohoto vyplývá, že v rovnovážné poloze je rychlost kmitavého pohybu největší. Je rovna amplitudě rychlosti  $v_m = \omega y_m$ . Naopak v okamžiku, kdy kmitající bod dosáhne amplitudy výchylky ( $y = y_m$ ), je rychlost nulová.



Obr 1-5 k odvození vztahu pro rychlost a zrychlení

Vektor zrychlení  $a_0$  pohybu rovnoměrného po kružnici směřuje do středu kružnicové trajektorie a jeho velikost  $a_0 = \omega^2 r$ . Zrychlení kmitavého pohybu  $a$  je průmětem vektoru  $a_0$  do osy  $y$ . Vidíme, že vektor  $a$  má opačný směr, než jaký má v daném okamžiku vektor  $r_y$ . Proto má souřadnice zrychlení  $a$  opačné znaménko než okamžitá výchylka  $y$  a z obr 1 – 5 pro ni najdeme vztah:

$$a = a_0 (-\sin \omega t) = -\omega^2 r \sin \omega t$$

Zrychlení harmonického kmitavého pohybu je přímo úměrné okamžití výchylce a v každém okamžiku má opačný směr.

Vztahy pro kinematické veličiny harmonického pohybu snadno odvodíme také pomocí diferenciálního počtu. Jestliže  $y = y_m \sin \omega t$ , pak

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega y_m \cos \omega t = \omega y_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 y_m \sin \omega t = \omega^2 y_m \sin (\omega t - \pi)$$

### 2.3. Složené kmitání

V mechanice jsme poznali, že výsledná poloha tělesa, které současně koná více pohybů, je stejná, jako kdyby tyto pohyby konalo po sobě v libovolném pořadí. Tento poznatek platí i pro kmitavé pohyby a označujeme ho jako princip superpozice: Jestliže hmotný bod koná současně několik harmonických kmitavých pohybů téhož směru s okamžitými výchylkami  $y_1, y_2, \dots, y_k$ , je okamžitá výchylka  $y$  výsledného kmitání

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_k.$$

Okamžité výchylky mohou mít kladnou i zápornou hodnotu.

Superpozicí vzniká složené kmitání. Jeho průběh závisí na směru složek, jejich počtu, amplitudě výchylky, počáteční fázi a frekvenci a může mít značně složitý průběh.

### 2.4. Dynamika harmonického kmitání

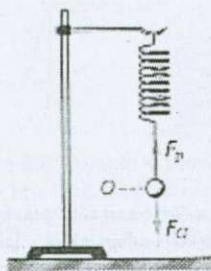
Dynamika zkoumá příčiny pohybu. Příčinou kmitání mechanického oscilátoru je buď síla pružnost, nebo tíhová síla. Poněvadž víme, že zrychlení harmonického kmitavého pohybu  $a = -\omega^2 y$ , můžeme na základě 2. Newtonova zákona ( $F = m a$ ) obecně vyjádřit souřadnici síly, která způsobuje harmonické kmitání:

$$F = -m\omega^2 y$$

Tuto rovnici také označujeme jako pohybovou rovnici harmonického kmitavého pohybu.

U každého konkrétního mechanického oscilátoru je třeba určit souvislost úhlové frekvence kmitání oscilátoru  $\omega$  s jeho konkrétními vlastnostmi, tedy s parametry mechanického oscilátoru. Jako základní model mechanického oscilátoru uvažujeme těleso zavěšené na pružině (pružinový oscilátor). Parametry tohoto oscilátoru jsou hmotnost tělesa  $m$  a tuhost pružiny  $k$ .

Mechanický oscilátor tvoří pružina, která má délku  $l_0$ . Zavěsíme-li na ni těleso o hmotnosti  $m$ , prodlouží se působením tíhové síly  $F_G$  na délku  $l = l_0 + \Delta l$ . ( obr. 1-6 ) Po ustálení v rovnovážné poloze na těleso působí síla pružnosti  $F_p$  o velikosti  $F_p = k\Delta l$ . Tato síla má stejnou velikost, ale opačný směr než tíhová síla  $F_G = mg$ . Platí  $k\Delta l = mg$ .



Obr. 1- 6 kmitání mechanického oscilátoru

Když oscilátor rozkmitáme, síla pružnosti se mění, zatímco tíhová síla zůstává stálá. Pro souřadnici  $F$  výsledné síly dostaneme:

$$F = F_p + F_G = k(\Delta l - y) - mg = k\Delta l - ky - mg = -ky$$

Působením této síly vzniká vlastní kmitání oscilátoru.

Při okamžité výchylce  $y$  z rovnovážné polohy působí na oscilátor výsledná síla  $F$ , která směřuje do rovnovážné polohy. Velikost této síly je přímo úměrná velikosti okamžité výchylky a pro její souřadnici na ose  $y$ , v jejímž směru těleso oscilátoru, platí

$$F = -ky$$

Příčinou harmonického kmitání mechanického oscilátoru je tedy síla, jejíž velikost je přímo úměrná okamžité výchylce oscilátoru a směřuje stále do rovnovážné polohy.

Srovnání získaného výsledku s pohybovou rovnicí harmonického kmitání:

$$-ky = -m\omega^2 y$$

Odtud vyplývá, že vlastní kmitání mechanického oscilátoru probíhá s úhlovou frekvencí  $\omega_0$ , která závisí jen na parametrech oscilátoru, tj. na hmotnosti tělesa  $m$  a tuhosti pružiny  $k$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

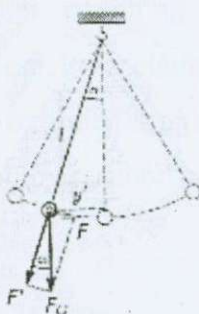
Pro periodu  $T_0$  a frekvenci  $f_0$  vlastního kmitání dostaneme po úpravě vztahy:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

## 2.5. Kyvadlo

Jako kyvadlo se obvykle označuje jakékoli těleso zavěšené nad těžištěm, které se může volně otáčet kolem vodorovné osy procházejícím bodem závěsu kolmo k rovině kmitání. Příkladem nejjednoduššího kyvadla je malé těleso (hmotný bod) zavěšené na pevném vlákně zanedbatelné hmotnosti, jehož délka je  $l$ .

Harmonické kmitání jsme zavedli jako přímočarý pohyb. Aby tato podmínka byla přibližně splněna i u kyvadla, musí být výchylka tak malá, že oblouk, po němž se těleso pohybuje, můžeme s dostatečnou přesností považovat za úsečku. To je splněno, jestliže úhel  $\alpha$ , který vlákno při pohybu svírá se svislým směrem, nepřekročí  $5^\circ$ .



Obr 1-6 kmitání kyvadla

Příčinou kmitavého pohybu kyvadla je pohybová složka  $F$  tíhové síly  $F_G$ , která vzniká při vychýlení kyvadla z rovnovážné polohy. Poněvadž  $\sin \alpha = \frac{y}{l}$ , můžeme veličinu

$k = F |y|$  napsat ve tvaru  $k = \frac{mg}{l}$ . Dosazením do vztahu pro periodu  $T_0$ , popř. frekvenci  $f_0$

vlastního kmitání mechanického oscilátoru dostaneme vztahy platné pro kyvadlo:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Kyvadlo sehrálo významnou úlohu v historii měření času jako jednoduché zařízení, jehož periodu kmitání lze snadno a poměrně přesně nastavit změnou jediného parametru, kterým je délka kyvadla. U kyvadlových hodin bylo kyvadlo tvořeno tyčí a závažím. Kyvadlo svým pohybem řídilo pozvolné otáčení soustavy ozubených kol spojených s hodinovými ručičkami. Konstrukcí mechanismu kyvadlových hodin proslul holandský fyzik Ch. Huygens (1629 – 1695).

### ***Přeměny energie v mechanickém oscilátoru***

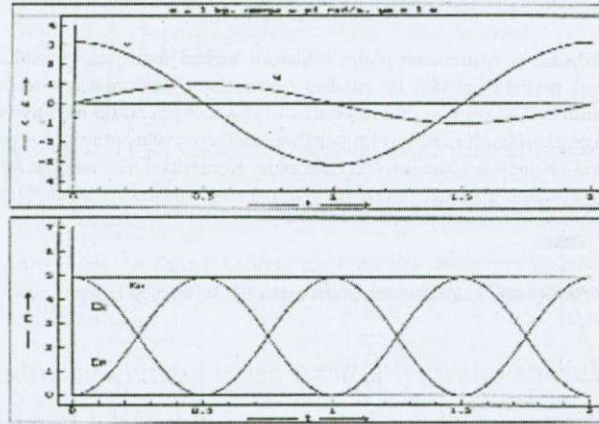
Pro kmitání je charakteristické, že je spojeno s periodickými přeměnami energie. U pružinového oscilátoru se mění kinetická energie tělesa  $E_K = \frac{1}{2} k y^2$ . Když těleso oscilátoru prochází rovnovážnou polohou, má největší rychlost, a tedy i největší kinetickou energii

$$E_{K \max} = \frac{1}{2} m v_m^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 y_m^2$$

kde  $v_m = \omega y_m$  je amplituda rychlosti tělesa. Potenciální energie pružnosti je v tomto okamžiku nulová. Naopak v krajní poloze oscilátoru, tzn. když těleso dosáhne amplitudy výchylky  $y_m$ , je jeho kinetická energie nulová (neboť  $v = 0$ ) a potenciální energie pružnosti oscilátoru je největší:

$$E_p = \frac{1}{2} k y_m^2$$

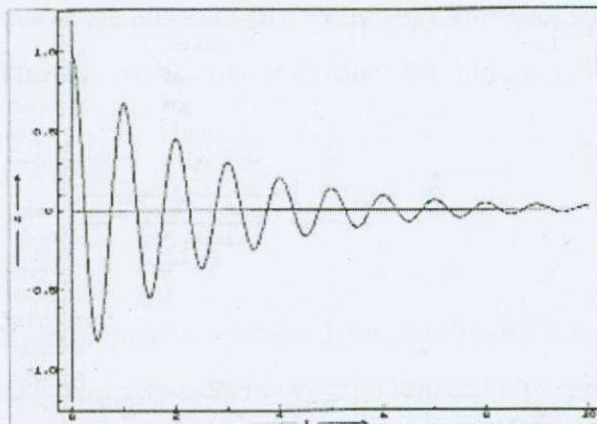
V průběhu periody kmitání oscilátoru probíhá vzájemná přeměna obou energií podle časového diagramu (obr. 1-7). Celková energie kmitání oscilátoru  $E$  se však nemění (uvažujeme oscilátor bez tlumení) a v každém okamžiku platí  $E = E_k + E_p = \text{konst.}$



Obr. 1-7 časové diagramy potenciální a kinematické energie

Při harmonickém kmitavém pohybu se periodicky mění potenciální energie kmitání v energii kinematickou a naopak. Celková energie oscilátoru je konstantní a je rovna součtu klidové energie oscilátoru a energie kmitání dodané oscilátoru při uvedení do kmitavého pohybu. Energie kmitání je přímo úměrná druhé mocnině amplitudy výchylky a druhé mocnině úhlové frekvence vlastního kmitání.

Předcházející úvahy byly provedeny za předpokladu, že mechanický oscilátor kmitá volně, tzn. že na něj v průběhu kmitání nepůsobí žádné vnější vlivy. Za tohoto ideálního předpokladu by se amplituda výchylky neměnila a oscilátor by kmital neomezeně dlouho. Pokusy s mechanickými oscilátory však dokazují, že se amplituda výchylky reálného oscilátoru vždy postupně zmenšuje, až volné kmitání zanikne. Příčinou jsou přeměny mechanické energie oscilátoru v jinou formu energie (např. na vnitřní energii okolního prostředí nebo samotného oscilátoru). Tak dochází ke ztrátám energie oscilátoru, kterým nelze u skutečného oscilátoru nikdy zabránit, a vzniká **tlumené kmitání**. Charakteristický časový diagram tlumeného kmitání je na obr. 1- 8.



Obr. 1-8 časový diagram tlumeného kmitání mechanického kmitání

Netlumené harmonické kmitání je jen určitou fyzikální abstrakcí. Vlastní kmitání oscilátoru je vždy tlumené.

Tlumení nemá vliv jen na amplitudu výchylky kmitavého pohybu, ale ovlivňuje i periodu kmitání. Tlumený oscilátor volně kmitá s poněkud větší periodou, než jakou by měl netlumený oscilátor se stejnými parametry.

### ***Nucené kmitání mechanického oscilátoru***

Vlastní kmitání oscilátoru je vlivem ztrát energie tlumené, a proto kmitání zaniká. Abychom kmitání oscilátoru udrželi, musíme mu zvnějšku dodávat energii. Například tak, že úderem do oscilátoru zvětšíme amplitudu výchylky na původní hodnotu. V tomto případě oscilátor kmitá netlumeně, ale jeho kmitání není harmonické.

Netlumené harmonické kmitání vznikne, když je energie oscilátoru dodávána v průběhu celé periody. Tento případ nastane, jestliže na oscilátor působí nepřetržitě harmonicky proměnná síla, pro kterou platí  $F = F_m \sin \omega t$ . Působením této síly je v oscilátoru vynucováno netlumené harmonické kmitání, které označujeme jako ***nucené kmitání oscilátoru***.

Nucené kmitání však může vzniknout i v soustavě, která nemá vlastnosti oscilátoru a sama o sobě by nekmitala. Můžeme např. působením periodické síly rozkmitat samo těleso nebo pružinu. Frekvence nuceného kmitání v tomto případě neurčuje hmotnost tělesa, popř.



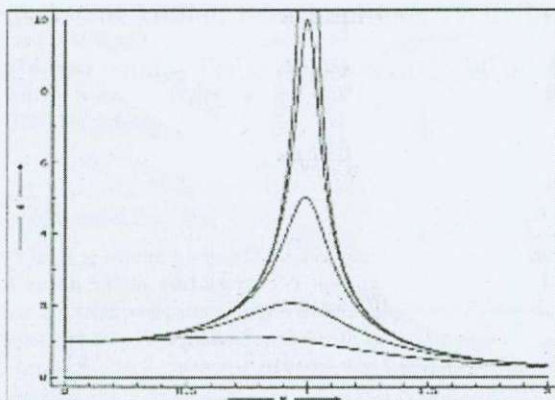
tuhost pružiny, ale jen frekvence působící síly. Parametry kmitající soustavy tedy nemají vliv na frekvenci nuceného kmitání, avšak značně ovlivňují amplitudu a fázi kmitání.

### Rezonance oscilátoru

Uvažujme případ, že na mechanický oscilátor působí vnější harmonická síla a oscilátor nuceně kmitá. Jestliže budeme frekvenci  $\omega$  nuceného kmitání postupně zvětšovat od určité minimální hodnoty, bude se amplituda výchylky zvětšovat a maxima dosáhne u málo tlumeného oscilátoru v okamžiku, kdy  $\omega = \omega_0$ . Jakmile se frekvence nuceného kmitání rovná frekvenci vlastního kmitání oscilátoru, nastává rezonance oscilátoru. Při dalším zvyšování frekvence se amplituda nucených kmitů zmenšuje. U oscilátoru se součinitelem tlumení  $\sigma$  nastává rezonance při nižší úhlové frekvenci  $\omega_r$  pro kterou platí vztah

$$\omega_r = \sqrt{\omega^2 - 2\sigma^2}$$

Graf, který vyjadřuje popsanou závislost amplitudy výchylky nuceného kmitání jako funkci úhlové frekvence ( $y_m = f(\omega)$ ), je rezonanční křivka (obr 1-9). Čím menší je tlumení oscilátoru, tím je maximum rezonanční křivky vyšší a křivka je užší. Naopak při tlumení sice amplituda výchylky dosahuje menších hodnot, ale rezonanční křivka je širší.



Obr. 1-9 rezonanční křivky mech. oscilátoru s různým tlumením

Z průběhu rezonanční křivky je patrný poznatek důležitý zejména pro praktické využití rezonance. Při rezonanční frekvenci dosahuje amplituda nucených kmitů větších hodnoty, než by odpovídalo výchylce způsobené vnější silou při velmi nízké frekvenci.

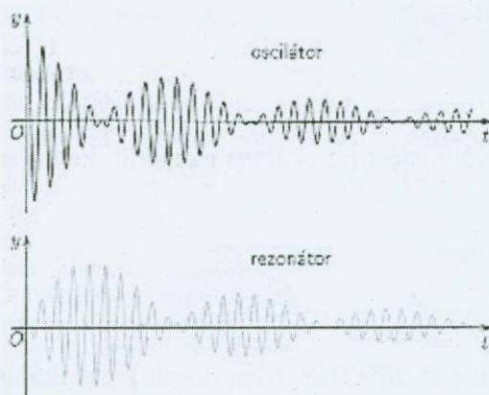
Nastává rezonanční zesílení nucených kmitů. Malou, periodicky působící silou lze v oscilátoru vzbudit kmitání o značné amplitudě výchylky, pokud je perioda vnějšího kmitání působení shodná s periodou vlastního kmitání oscilátoru.

Rezonanci můžeme považovat za vzájemné působení dvou oscilátorů. Jeden je zdrojem nuceného kmitání (oscilátor) a druhý se působením zdroje nuceně rozkmitá (rezonátor). Jednoduchým příkladem soustavy oscilátoru a rezonátoru jsou *spřažená kyvadla* (obr 1-10). Jsou to dvě stejná kyvadla spojená navzájem pružinou, popř. vláknem se závaží Z. Tím se mezi kyvadly vytváří vazba, která umožňuje přenos energie mezi oscilátorem a rezonátorem a naopak.



Obr.1-10 spřažená kyvadla

Jestliže oscilátor *O* rozkmitáme, pozorujeme, že jeho amplituda výchylky se postupně zmenšuje a rezonátor *R* naopak začíná kmitat. Jeho amplituda výchylky dosahuje maxima v okamžiku, kdy kmitání oscilátoru ustalo. Tento děj se periodicky opakuje a kmitání má podobu rázů. (obr. 1-11)



Obr. 1- 11 rázy kmitání spřažených kyvadel

Spřažená kyvadla jsou příkladem výměny energie kmitání mezi oscilátorem a rezonátorem působením vzájemné vazby. Jestliže vazbou vzniká jen malé vzájemné působení, přechází energie z oscilátoru do rezonátoru dále. Mezi oscilátory je **vazba volná**. Je-li vzájemné působení silné, energie přejde do rezonátoru v krátké době, mezi oscilátory je **vazba těsná**.

Praktické využití rezonance spočívá především v rezonančním zesilování. Několik příkladů: rezonanční zesilování zvuků hudebních nástrojů, např. houslí jejich dřevěnou částí a dutinou v jejich vnitřním prostoru, ozvučnice reproduktorů, různé měřicí metody apod.

V řadě případů je však rezonanční zvětšení amplitudy nuceného kmitání nežádoucí. Tak je tomu zejména u strojů, jejichž části se otáčejí. Tím vznikají periodické síly, které se přenášejí nejen na vlastní zařízení, ale i na jeho okolí, např. na podlahu, k níž je stroj připevněn. Vzniku rezonančního kmitání se předchází tím, že se vlastní frekvence zařízení upraví tak, aby se lišila od frekvence sil vynucujících kmitání i od jejich násobků.

Rezananční kmitání může nastat také u mechanismů, které obsahují pružné prvky. Např. pérování automobilu tvoří s mechanismem kol pružnou soustavu, která se vlivem nerovnosti vozovky rozkmitává. Poněvadž kmitání kol je nežádoucí, doplňuje se zavěšení kol tlumiči, které kmitání omezují.

V technické praxi se k potlačení rezonančních kmitů používají v podstatě tři způsoby:

- a) změna vlastní frekvence mechanismu,
- b) doplnění mechanismu tlumičem kmitání,
- c) zvětšení tření mechanismu.

Rezananční jevy se uplatňují i v jiných oborech fyziky, zejména v elektřině, v atomové a jaderné fyzice.

## 2.6. Mechanické vlnění

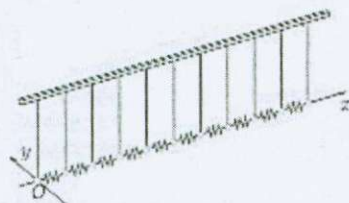
Vlnění je jedním z nejrozšířenějších fyzikálních jevů. Setkáme se s ním v podobě zvuku, světla, rozhlasového či televizního vysílání atd. i když má vlnění různou fyzikální podstatu,

platí pro různé druhy vlnění společné zákonitosti. Kmitání, které vznikne v určitém místě pružného látkového prostředí, se přenáší k dalším bodům prostředí a ty začnou rovněž kmitat.

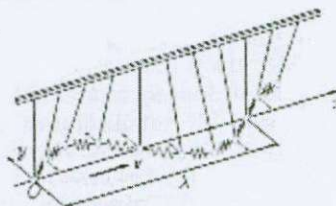
## 2.7. Postupné mechanické vlnění

Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství a jeho příčinou je existence vazebných sil mezi částicemi (atomy, molekulami) prostředí, který se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na další částice. Současně se tak na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí označujeme jako **pružné prostředí**.

Přenosem kmitání mezi částicemi pružného prostředí se vytváří vlna. Jestliže hmotný bod, který je zdrojem vlnění, kmitá harmonicky, vzniká mechanická vlna sinusového průběhu. Na obr 1- 12 je pružné prostředí znázorněno řadou mechanických oscilátorů (spřažených kyvadel). Jestliže první kyvadlo vychýlíme ve směru osy  $y$  a necháme ho volně kmitat, začnou postupně kmitat i ostatní kyvadla. ( obr. 1-13) Kmitání konstantní rychlostí  $v$  postupuje ve směru osy  $x$ . Vzniká **postupné vlnění příčné** a rychlost  $v$  je **rychlost postupného vlnění**.



Obr. 1-12 model pružného prostředí



Obr. 1-13 vznik postupného vlnění

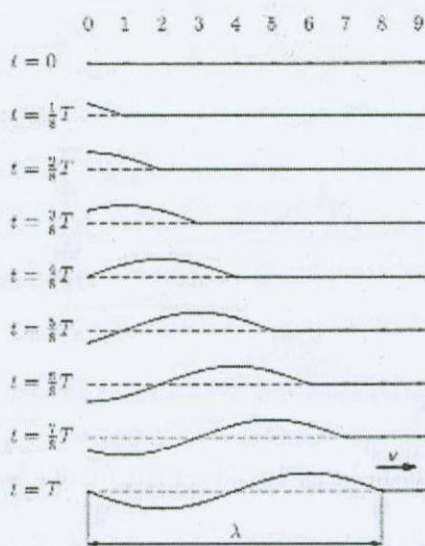
První kyvadlo vykonalo jeden kmit za dobu rovnou periodě kmitání  $T$ . Za tuto dobu se vlnění rozšířilo do vzdálenosti, kterou nazýváme **vlnová délka  $\lambda$** . Vlnová délka je tedy definována vztahem:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

Veličina  $f$  je frekvence kmitání kyvadel ( $f = \frac{1}{T}$ ).

Vlnová délka  $\lambda$  je **vzdálenost, do níž se vlnění rozšíří ze periodu  $T$  kmitání zdroje vlnění**.

Vznik postupné vlny je dobře patrný z obr. 1-14, na němž jsou částice látkového prostředí znázorněny jako hmotné body ležící na přímce ve stejných vzdálenostech od sebe. Všechny body kmitají se stejnou amplitudou výchylky a se stejnou úhlovou frekvencí, ale fáze jejich kmitání se liší. Se stejnou fází kmitají body navzájem vzdálené o vlnovou délku, popř. o její násobky. Tedy vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází.



Obr. 1-14 postupné vlnění v řadě bodů

Rozlišujeme dva základní typy postupného mechanického vlnění:

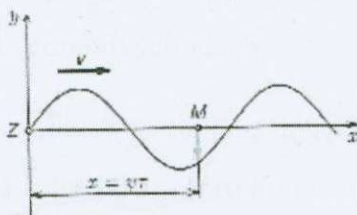
1. **Postupné vlnění příčné**, kdy hmotné body pružného prostředí kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje. Je charakteristické pro pružná pevná tělesa ve tvaru tyčí, vláken apod. Pozorujeme ho také na vodní hladině.
2. **Postupné vlnění podélné**, při němž částice pružného prostředí kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje. Vzniká v tělesech všech skupenství, tedy i v kapalinách a plynech, která jsou pružná při změně objemu (tzn. při stlačování a rozpínání). Postupným vlněním podélným se v pružných látkách šíří např. zvuk. Projevuje se postupným přibližováním a vzdalováním částic.

Rychlost mechanického vlnění závisí na vlastnostech pružného prostředí a je různá pro vlnění příčné a podélné. Zvláštní význam má rychlost podélného postupného vlnění, kterým se v různých prostředích šíří zvuk.

## 2.8. Rovnice postupného vlnění

Postupné mechanické vlnění popujeme vztahem, který umožňuje určit okamžitou výchylku v každém bodě řady, kterou se vlnění šíří. Tato výchylka závisí nejen na čase  $t$ , ale také na vzdálenosti  $x$  od zdroje vlnění (počátečního bodu řady). Tím se vlnění liší od kmitání, k při němž okamžitá výchylka kmitajícího bodu je jen funkcí času podle rovnice:

$$y = y_m \sin \omega t$$



Obr. 1-15 k odvození rovnice postupné vlny

Jestliže se harmonické postupné vlnění šíří rychlostí  $v$  řadou hmotných bodů, dospěje do bodu  $M$  ve vzdálenosti  $x$  od zdroje vlnění  $Z$  za dobu  $\tau = \frac{x}{v}$  (obr 1-15). O tuto dobu je kmitání bodu  $M$  opožděno oproti kmitání zdroje  $Z$ . Pro kmitání bodu  $M$  bude tedy platit vztah:

$$Y = y_m \sin \omega (t - \tau) = y_m \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

Vztah upravíme dosazením  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  a  $\lambda = vT$  a dostaneme **rovnici postupné vlny** pro řadu bodů:

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

Rovnice platí pro příčné i podélné harmonické vlnění v homogenním prostředí. V daném prostředí však tato vlnění mají různou rychlost. Předpokládáme, že při šíření vlnění nevznikají ztráty a vlnění není tlumené.

Veličina  $2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$  je fáze vlnění. Kdyby vlnění postupovalo záporným směrem vzhledem k ose  $x$  (vlevo od zdroje vlnění), bylo by ve výrazu pro fázi znaménko  $+$ . Poněvadž rychlost

v vlnění určuje rychlost, jakou se přemísťuje stejná fáze kmitní jednotlivých bodů pružného prostředí, označujeme rychlost v také názvem **fázová rychlost vlnění**. Mechanické vlnění je děj s dvojitou periodicitou.

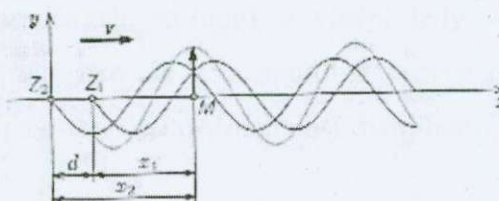
## 2.9. Interference vlnění

Jestliže se pružným prostředím šíří vlnění ze dvou nebo více zdrojů, jednotlivá vlnění postupují prostředím nezávisle. Avšak v místech, kde se vlnění setkávají, dochází k jejich skládání. Nastává **interference vlnění** a kmitání bodu v uvažovaném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění.

Budeme uvažovat dvě vlnění o stejné vlnové délce a amplitudě výchylky  $y_m$ , která se stejnou rychlostí šíří řadou bodů (obr 1-16). Zdroje vlnění  $Z_1$  a  $Z_2$  mají různou polohu, ale kmitají se stejnou počáteční fází. Vzhledem k bodu  $M$  popíšeme složky vlnění rovnicemi:

$$y_1 = y_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right)$$

$$y_2 = y_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$



Obr. 1-16 interference vlnění v řadě bodů

Výsledné vlnění, které vzniká interferencí dvou vlnění, určíme stejným způsobem, jakým jsme prováděli superpozici při skládání kmitavých pohybů. Nejjednodušší je postup, při němž graficky sčítáme okamžité výchylky v jednotlivých bodech. Jsou-li složky harmonické, má harmonický průběh i výsledná vlna.

Pro okamžitou výchylku výsledného vlnění platí vztah

$$y = 2y_m \cos \pi \frac{d}{\lambda} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{\bar{x}}{\lambda} \right)$$

Kde  $d$  je dráhový rozdíl;  $d = (x_2 - x_1)$ ;  $\bar{x} = \frac{1}{2} (x_1 + x_2)$ . V této rovnici je výraz

$2y_m \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} d \right)$  konstantní, nezávisí na čase, a má význam amplitudy  $y_m$  Výsledného vlnění.

Rovnici výsledného postupného vlnění můžeme zapsat v jednoduchém tvaru:

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

Uvedený vztah pro výslednou amplitudu výchylky  $y_m$  platí jen v případě, že  $y_{m1} = y_{m2} = y_m$ . Jestliže  $y_{m1} \neq y_{m2}$ , použijeme pro výpočet amplitudy výchylky výsledného vlnění obecně platný vztah:

$$y_m = \sqrt{y_{2m1}^2 + y_{2m2}^2 + 2y_{m1} y_{m2} \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \right)}$$

Interferencí dvou harmonických postupných vlnění tedy vzniká opět harmonické vlnění stejné vlnové délky a frekvence ale jeho amplituda závisí na **dráhovém rozdílu**  $d$  složek výsledného vlnění,  $d = (x_2 - x_1)$ . Je to vzdálenost dvou bodů, v nichž mají obě vlnění stejnou fázi.

Dráhový rozdíl je tedy funkcí **fázového rozdílu vlnění**  $\Delta\varphi$  v uvažovaném bodě pružného prostředí. Určíme ho jako rozdíl fází obou vlnění v určitém okamžiku:

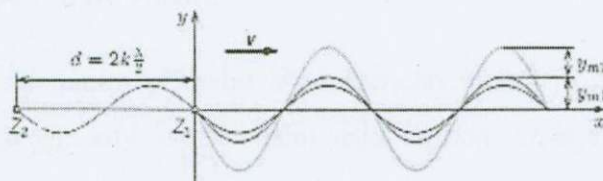
$$\Delta\varphi = 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) - 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d$$

Vidíme, že **fázový rozdíl vlnění je přímo úměrný dráhovému rozdílu vlnění**.

Zvláštní případy interference vlnění nastávají, když dráhový rozdíl je roven celistvému počtu půlvln interferujících vlnění:



1. **Sudý počet půlvln:**  $d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda$  kde  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Interferující vlnění se setkáváme v každém bodě se stejnou fází a vzniká vlnění, jehož výsledná amplituda výchylky je rovna součtu amplitud výchylek složek:  $y_m = y_{m1} + y_{m2}$ . Vzniká **interferenční maximum**. (obr. 1-17)

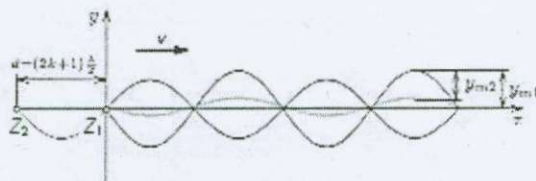


Obr. 1-17 vznik interferenčního maxima

2. **Lichý počet půlvln:**  $d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Interferující vlnění se setkávají s opačnou fází a amplituda výchylky výsledného vlnění je rovna absolutní hodnotě rozdílu amplitud složek  $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$ .

$$y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$$

Vzniká **interferenční minimum**. Při stejné amplitudě výchylek obou složek se vlnění navzájem ruší (obr. 1-18).



Obr. 1-18 vznik interferenčního minima

Jev interference je pro vlnění charakteristický a setkáme se s ním zejména ve vlnové optice. Interference je často důležitým kritériem při rozhodování, zda má fyzikální jev vlnovou povahu.

## 2.10. Stojaté vlnění

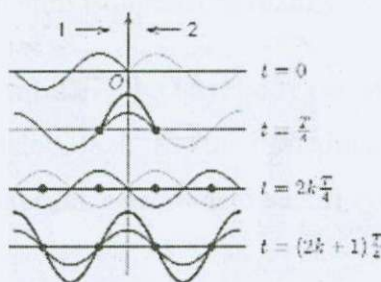
Významný případ interference vlnění nastává, jestliže dvě vlnění o stejné amplitudě výchylky a stejné frekvenci postupují pružným prostředím v opačném směru, tedy proti sobě. K tomu dochází zejména při šíření vlnění v omezeném prostoru (např. v tyči). Vlnění postupuje až k okraji pružného prostředí, tam se odrazí a postupuje v opačném směru. Přímé a odražené vlnění se skládají a vzniká **stojaté vlnění**.

Vznik stojatého vlnění skládáním přímého a odraženého vlnění je znázorněn na obrázku. Superpozice začíná v čase  $t=0$ , kdy se obě vlnění setkají v bodě  $O$ , a je zakreslena pro časové intervaly  $\frac{T}{4}$ . Vidíme, že bod  $O$  a také všechny další body vzdálené od něho o celistvé násobky poloviny vlnové délky kmitají s největší amplitudou výchylky. V těchto bodech vzniká **kmitna stojatého vlnění**.

Naopak body vyznačené na obr. 1-19 tečkami zůstávají ve všech fázích periody stále v klidu.

Jsou to uzly stojatého vlnění. Rovněž uzly jsou ve vzájemné vzdálenosti  $\frac{1}{2} \lambda$ . Poloha kmiten a

uzlů stojatého vlnění se nemění. Kmitna je ve vzdálenosti  $\frac{1}{4} \lambda$  od uzlu.



Obr. 1-19 vznik stojatého vlnění

Stojaté vlnění vzniká skládáním dvou harmonických vln popsaných rovnicemi:

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

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

Kde  $x$  je souřadnice uvažovaného bodu za předpokladu, že počátek soustavy souřadnic  $O$  je v místě, v němž se obě vlnění setkávají v čase  $t = 0$  s fázovým rozdílem  $\Delta\varphi = 0$ . Sečtením okamžitých výchylek dostaneme pro okamžitou výchylku výsledného vlnění vztah

$$y = 2y_m \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

nebo

$$y = Y_m \sin \omega t$$

Vidíme, že všechny body kmitají harmonicky se stejnou fází, ale amplituda kmitů jednotlivých bodů je funkcí jejich souřadnice  $x$ :

$$Y_m = 2y_m \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}$$

Kmitna vzniká v bodech splňujících podmínku  $\cos(2\pi x/\lambda) = 1$ , tedy pro  $x = \pm k\lambda/2$ , kde  $k = 0, 1, 2$ . Uzel vzniká v bodech, v nichž  $\cos(2\pi x/\lambda) = 0$ , tzn. pro  $x = \pm (2k + 1)\frac{\lambda}{4}$ .

Mezi postupným a stojatým vlněním jsou zásadní rozdíly:

1. Při postupném vlnění kmitají všechny body se stejnou amplitudou výchylky, ale s různou, na čase závislou fází. Každý následující bod dosahuje stejné výchylky později než bod předcházející. Fáze vlnění se šíří rychlostí  $v$ , kterou také označujeme fázová rychlost.

Postupným vlněním se přenáší energie.

2. Při stojatém vlnění kmitají všechny body mezi dvěma uzly se stejnou fází, ale s různou amplitudou výchylky, která závisí na poloze bodu.

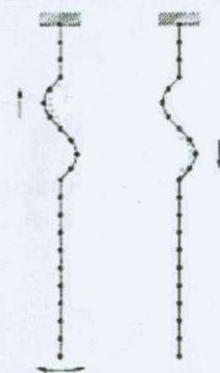
Stojatým vlněním se energie nepřenáší, ale jen se periodicky mění potenciální energie pružnosti v kinetickou energii hmotných bodů.

Stojaté vlnění může být opět příčné nebo podélné. U podélného vlnění dochází k největšímu zhuštění, popř. zředění kmitajících částic v kmitných, kdežto částice v uzlech nekmitají. Typické příklady stojatého vlnění si můžeme ukázat na hudebních nástrojích. U strunných nástrojů (housle, kytara) je vlastně zdrojem zvuku příčné stojaté vlnění struny. U dechových nástrojů (trubka, klarinet) vzniká podélné stojaté vlnění vzduchového sloupce v duté části nástroje. Toto stojaté vlnění označujeme jako *chvění*.

### 2.11. Chvění mechanických soustav

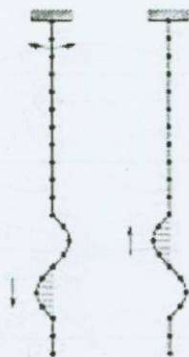
Se stojatým vlněním se setkáváme zejména u těles, která představují prostorově ohraničené pružné prostředí. Vlnění postupuje v tělese až k rozhraní, na němž nastává *odraz vlnění*.

Na obr. 1- 20 je pružné vlákno, kterým se šíří vlnový rozruch směrem vzhůru k připevněnému konci vlákna. Protože koncový bod vlákna je pevný, nemůže se rozkmitat a vzniká síla, která způsobuje výchylku vlákna na opačnou stranu. Vlnový rozruch postupuje od koncového bodu zpět, fáze vlny je však opačná. Na pevném konci nastává **odraz vlnění s opačnou fází**.



Obr. 1-20 odraz vlnění na pevném konci

Obdobný jev nastává na volném konci např. svisle zavěšeného pružného vlákna. (obr. 1- 21) Volný konec vlákna v tomto případě může kmitat a vlnění postupuje od tohoto konce zpět se stejnou fází. Na volném konci nastává *odraz se stejnou fází*.



Obr. 1-21 odraz vlnění na volném konci

Jestliže v tělese, např. v pružné tyči, postupuje vlnění ke konci tyče, dochází na konci tyče k odrazu vlnění. Odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím v původním směru a vzniká stojaté vlnění v podobě chvění. Průběh chvění závisí na tom, jak je tyč upevněna.

Na obr. 1- 22 Jsou příklady chvění pružné tyče upevněné na obou koncích (a,b) uprostřed (c,d) a na jednom konci (e,f). V bodech, v nichž je tyč upevněna, vzniká uzel stojatého vlnění. Ostatní body tyče kmitají s různou amplitudou a v případě, že je tyč délky  $l$  upevněna na obou koncích, vzniká v nejjednodušším případě polovina délky stojaté vlny.....Mohou však vzniknout i další stojaté vlny, které ale musí vždy splňovat podmínku

$$l = k \frac{\lambda}{2} \quad \text{kde } k = 1, 2, 3, \dots$$

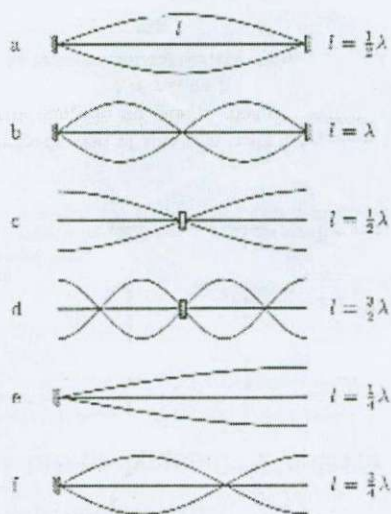
Tato stojatá vlnění vznikají při frekvencích

$$f_k = k f_z$$

Kde  $f_z$  je **základní frekvence**:

$$f_z = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$$

Frekvence, při nichž  $k > 1$ , nazýváme **vyšší harmonické frekvence**.



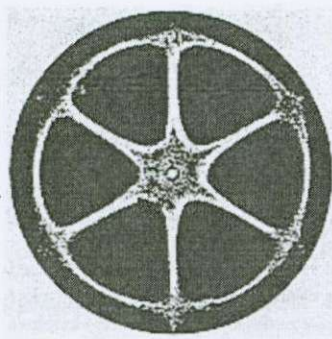
Obr. 1-22 chvění pružných těles

Podobně vzniká chvění u tyčí upevněných uprostřed, jejichž konce jsou volné. Pak je uzel vždy uprostřed tyče a na koncích tyče vznikají kmitny. ( obr. 1-22c ) Snadno zdůvodníme, proč v tomto případě nevzniká chvění při všech násobcích základní frekvence, ale jen při lichých násobcích ( obr. 1-22d ).

Ještě složitější je průběh chvění v případě, kdy je jeden konec pružného tělesa volný a druhý pevný. Pak chvění se základní frekvencí odpovídá vlnová délka  $\lambda = 4l$  ( obr. 1-22e ) a možné jsou opět jen liché násobky základní frekvence  $f_z$ . Takto probíhá např. chvění vzduchového sloupce ve válci, který je na jednom konci otevřen a na druhém uzavřen. Chvění pevných těles (např. tyčí) s jedním pevným a druhým volným koncem má složitější teorii a popsání průběhu stojaté vlny je jen přibližným modelem tohoto děje.

Chvění je charakteristické zejména pro zdroje zvuku, např. hudební nástroje, ale i lidské hlasivky. Zdroje zvuku tedy plní funkci oscilátoru, z něhož se kmitání přenáší do okolního prostředí, nejčastěji do vzduchu. Ve vzduchu vznikají periodické změny tlaku vzduchu a prostředím se šíří postupné podélné zvukové vlnění.

Chvění však nevzniká jen v pružných tělesech s jedním převládajícím rozměrem. Zajímavý průběh má chvění desek různého tvaru. Můžeme to demonstrovat na desce upevněné uprostřed, kterou posypeme jemným pískem, a pak její okraj rozkmitáme pomocí smyčce. Vzniká chvění, při němž se zrnka písku shromáždí v uzlech a vzniknou charakteristické obrazce, kterým říkáme **Chladního obrazce**. ( obr. 1- 23 )



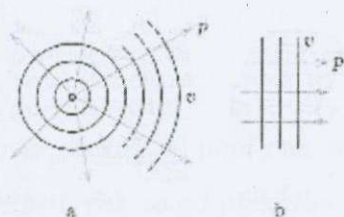
Obr. 1-23 Chladního obrazce

Studium chvění desek, blan a jiných podobných objektů má značný praktický význam zejména pro konstrukci různých elektroakustických zařízení (membrány reproduktorů, sluchátek, mikrofónů apod.), u nichž požadujeme vysokou kvalitu přenosu zvukových signálů.

## 2.12. Vlnění v izotropním prostředí

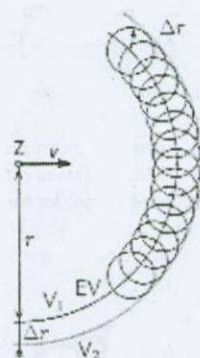
Jako izotropní prostředí označujeme takové látkové prostředí, které má ve všech směrech stejné fyzikální vlastnosti. Jestliže je v takovém prostředí zdroj mechanického vlnění, šíří se vlnění ve všech směrech stejně velikou rychlostí  $v$ . Body ležící na povrchu koule o poloměru  $r = vt$  ( $t$  je čas, za který vlnění dospěje ze zdroje do uvažovaného bodu na povrchu koule) kmitají se stejnou fází a tvoří **vlnoplochu**. Směr šíření vlnění v daném bodě vlnoplochy určuje kolmice k vlnoploše, která se nazývá **paprsek** ( obr. 1-24a )

Je-li zdroj vlnění rovinný, popř. je-li zdroj vlnění ve velké vzdálenosti, můžeme vlnoplochu považovat za část roviny. Je to **rovinná vlnoplocha**. V tomto případě jsou paprsky navzájem rovnoběžné (obr. 1-24b).



Obr. 1- 24 vlnoplocha a paprsek

Způsob, jakým se vlnění šíří, objasnil v roce 1678 Ch. Huygens. V čase  $t_1$  má vlnoplocha  $V_1$  vlnění ze zdroje  $Z$  poloměr  $r$ . (obr. 1-25) Podle Huygense z každého bodu této vlnoplochy vychází další vlnění v podobě elementárních vlnoploch. Za dobu  $\Delta t$  mají elementární vlnoplochy poloměr  $\Delta r = v\Delta t$ . Vlnění se navzájem skládají, přičemž výsledné vlnění je nulové ve všech bodech prostoru kromě bodů, které leží na vnější obalové ploše elementárních vlnoploch. Tato obalová vlnoplocha tvoří novou vlnoplochu  $V_2$  v čase  $t_2 = t_1 + \Delta t$ .



Obr. 1-25 Huygensův princip

Tento poznatek je obsahem **Huygensova principu**: Každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch ve směru, v němž se vlnění šíří.

Význam Huygensova principu spočívá především v tom, že umožňuje konstrukci vlnoplochy v určitém okamžiku, je-li známa její plocha a tvar v některém předcházejícím okamžiku. Přitom poloha zdroje vlnění nemusí být známa. Pomocí Huygensova principu vyložíme například dva důležité jevy – odraz a lom vlnění.

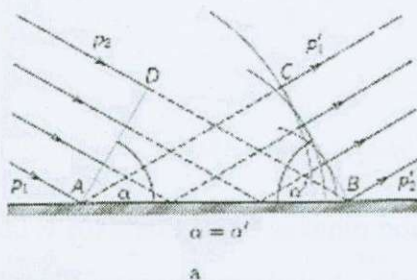
### 2.13. Odraz a lom vlnění

Jestliže vlnění dospěje k rozměrné překážce, popř. na rozhraní mezi dvěma prostředími, v nichž se vlnění šíří různou rychlostí, pak se od překážky vlnění odráží, nebo rozhraní dvou prostředí prochází. Na překážce nastává odraz a lom vlnění.

Uvažujeme, že k rozměrné překážce postupuje rovinná vlnoplocha (AD na obr. 1-26), která s překážkou svírá úhel  $\alpha$ . Vlnoplocha dospěje k překážce nejprve v bodě  $A$  a ten se stane



zdrojem elementárního vlnění. Postupně se stávají zdroji elementárního vlnění i ostatní body překážky, až vlnění dospěje z bodu D do bodu B. Podobně jako v předcházejícím případě najdeme obalovou plochu všech elementárních vlnoploch a získáme tak odraženou vlnoplochu  $BD$ .



Obr. 1-26 odraz rovinné vlnoplochy

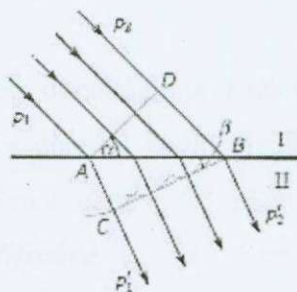
Poněvadž vzdálenost  $|DB|$  je stejná jako poloměr  $|AD|$  první elementární vlnoplochy, je zřejmé, že úhel  $\alpha'$ , který s překážkou svírá odražená vlnoplocha, je stejný jako úhel  $\alpha$ , který s překážkou svírá dopadající vlnoplocha ( $\alpha' = \alpha$ ).

Obvykle však neprovádíme konstrukci vlnoploch, ale šíření vlnění vyznačíme pomocí paprsků. Dopadající vlnění je vyznačeno paprskem  $p_1$ , který svírá úhel dopadu  $\alpha$  s kolmicí vztyčenou k rovinné překážce v místě dopadu vlnění (kolmice dopadu  $k$ ). Úhel odrazu  $\alpha'$  svírá obdobně s kolmicí dopadu paprsek  $p_2$  odraženého vlnění. Rovina určená kolmicí dopadu a dopadajícím paprskem je rovina dopadu.

Pro odraz mechanického vlnění platí **zákon odrazu**:

Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu dopadu. Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Lom vlnění se projevuje změnou směru, kterým se vlnění po průchodu rozhraním dvou prostředí šíří. Obdobným způsobem jako při výkladu odrazu vlnění sestrojíme vlnoplochu vlnění po průchodu rozhraním. Předpokládáme, že rychlost vlnění v prvním prostředí je  $v_1$  a v druhém prostředí  $v_2$ . Budeme uvažovat případ, kdy rychlost vlnění v druhém prostředí je menší ( $v_1 > v_2$ ).



Obr. 1-27 lom rovinné plochy

Jakmile vlnění dospěje do bodu  $A$  rozhraní, stává se tento bod zdrojem elementárního vlnění (obr. 1-27). Za dobu  $\tau$ , než vlnění v prvním prostředí dospěje z bodu  $D$  do bodu  $B$ , vznikne v druhé prostředí elementární vlnoplocha o poloměru  $|AC| = v_2\tau$ . Z bodů na úsečce  $AB$  vycházejí další elementární vlnoplochy a jejich obalová plocha  $CB$  je rovinnou vlnoplochou lomeného vlnění v druhém prostředí. Dopadající a lomené paprsky jsou kolmé na vlnoplochy  $AD$  a  $CB$ . Podle obr. 1-27 platí

$$\frac{|DB|}{|AC|} = \frac{v_1\tau}{v_2\tau} = \frac{v_1}{v_2}$$

Poněvadž  $|DB| = |AB| \sin\alpha$  a  $|AC| = |AB| \sin\beta$ , dostaneme

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n,$$

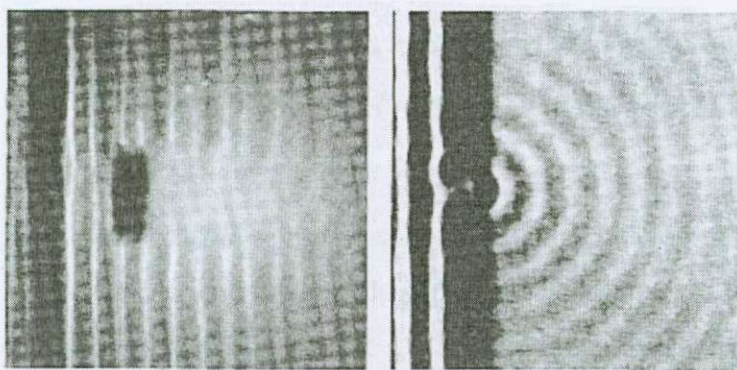
Kde  $\alpha$  je úhel dopadu a  $\beta$  je úhel lomu vlnění.

Platí **zákon lomu vlnění** :

Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí stálá veličina a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Nazývá se index lomu  $n$  pro daná prostředí. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.

## 2.14. Ohyb vlnění

Často nastává situace, kdy vlnění dopadá na překážku malých rozměrů. Demonstrační zařízení, kterým lze modelovat vlnové děje na vodní hladině, umožňuje pozorovat situaci, v níž na překážku dopadá rovinná vlna ( obr. 1-28 )Pozorujeme, že vlnění dospělo i za překážku, Nastal *ohyb vlnění* neboli *difrakce*.



Obr. 1-28 ohyb vlnění na vodní hladině

Obr. 1-29 šíření vlnění otvorem v překážce

Podobný jev pozorujeme také, je-li v překážce velkých rozměrů malý otvor. I v tomto případě pozorujeme, že za překážkou se vlnění šíří všemi směry, ačkoli bychom očekávali, že po průchodu otvorem bude vlnění postupovat jen původním směrem, kterým se šířila rovinná vlna.( obr. 1-29 ) Pokus je rovněž důkazem, že nastal ohyb vlnění, v jehož důsledku se vlnění za překážkou odchyluje od svého původního směru.

Ohyb vlnění je poměrně složitý jev a pomocí Huygensova principu objasníme jen jeho podstatu. Ta spočívá v tom, že každý bod vlnoplochy, která dospěla k překážce, je zdrojem elementárního vlnění, který se šíří všemi směry, tedy i do prostoru za překážku. Tam tato vlnění navzájem interferují a to vede k zvětšení, popř. k zmenšení amplitudy výchylky výsledného vlnění v jednotlivých bodech, což se projevuje jako ohyb vlnění.

Ohyb souvisí jak s rozměrem překážky, tak s vlnovou délkou vlnění, které na překážku dopadá. Obecně platí, že ohyb je při určitém rozměru překážky a poloze pozorovatele tím výraznější, čím větší je vlnová délka vlnění. Význam ohybu vlnění vyplyne např. ze srovnání zvuku a světla. Směr, kterým se vlnění šíří, vyznačujeme přímkou – paprskem. Předpokládáme tedy přímočaré šíření vlnění. Poznali jsme však, že tento předpoklad má omezenou platnost.

### 3. Zvuk a akustika

#### 3.1. Zvukové vlnění

Zdroj zvukového vlnění se stručně nazývá *zdroj zvuku* a hmotné prostředí, v kterém se toto vlnění šíří, jeho *vodič*. Vodič zvuku, obvykle vzduch, zprostředkuje spojení mezi zdrojem zvuku a jeho *přijímačem (detektorem)*, kterým bývá v praxi ucho nebo mikrofon.

Zdrojem zvuku může být každé těleso v stojatém vlnění, v chvění. O vlnění v okolí zdroje zvuku však nerozhoduje jen jeho chvění, ale i okolnost, jestli je tento předmět dobrým nebo špatným *zářičem zvuku*. Tato jeho vlastnost závisí hlavně na jeho geometrickém tvaru. Struna napnutá mezi dvěma pevnými body tělesa s velkou hmotností není dobrým zářičem zvuku, protože při chvění struny vzniká přetlak ve směru jejího pohybu a současně na opačné straně podtlak. Tím se nejbližší okolí struny stává druhotným zdrojem dvou vlnění, které se šíří na všechny strany prakticky s opačnou fází, protože příčné rozměry struny jsou vzhledem na vlnovou délku zvukového vlnění vždy velmi malé. Tyto dvě vlnění se interferencí ruší.

Podmínky vzniku zvuku působením chvění struny se podstatně zlepší, pokud jeden z pevných konců účinné délky struny je mechanicky spojen s tzv. ozvučnou deskou, která se takto dostává do značně tlumeného vynuceného chvění. Tím, že její rozměry jsou poměrně velké, srovnatelné s vlnovými délkami zvukového vlnění, odděluje dostatečně místa přetlaku a podtlaku. Ze stejného důvodu, tj. aby nenastal "zvukový zkrat", se elektrodynamické reproduktory zvuku montují do výřezu masivní desky vhodně zvolených rozměrů. V tomto posledním případě chvění desky nenastává a ani není potřebné, protože zdrojem zvukového vlnění je membrána reproduktoru s velkou plochou.

Ze zdroje se zvuk šíří jen pružným látkovým prostředím libovolného skupenství. Nejčastěji je to vzduch, v němž se zvuk šíří jako podélné postupné vlnění. Nejdůležitější charakteristikou prostředí z hlediska šíření zvuku je *rychlost zvuku* v daném prostředí. Rychlost zvuku ve vzduchu závisí na složení vzduchu (nečistoty, vlhkost), ale nejvíce na jeho teplotě. Ve vzduchu o teplotě  $t$  v Celsiových stupních má zvuk rychlost

$$v_t = 331,82 + 0,61t$$

Rychlost zvuku není ovlivněna tlakem vzduchu a je stejná pro zvuková vlnění všech frekvencí. V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu (popř. jiných plynech). Přibližné hodnoty rychlosti zvuku pro některé látky jsou uvedeny v tabulce 1.

| Látka            | Rychlost zvuku [ $\frac{m}{s}$ ] |
|------------------|----------------------------------|
| Vzduch (13,4 °C) | 340                              |
| Voda (25 °C)     | 1 500                            |
| Rtuť             | 1 400                            |
| Beton            | 1 700                            |
| Led              | 3 200                            |
| Ocel             | 5 000                            |
| Sklo             | 5 200                            |

Tabulka 1 Rychlosti šíření zvuku v některých látkách

Zvuky rozdělujeme na *hudební (tóny)* a *nehudební*. Nehudebním zvukem je každé nepravidelné vlnění vodiče zvuku, jehož příčinami jsou nepravidelné rozruchy (srážka dvou těles, výstřel, přeskočení elektrické jiskry apod.). Na rozdíl od nehudebních zvuků jsou hudební zvuky podmíněné pravidelným, v čase periodicky probíhajícím pohybem hmotného prostředí. Při jejich poslechu vzniká v uchu časově se neměnicí, a proto příjemný vjem, který se využívá v každé hudbě. Zdrojem hudebních zvuků mohou být například lidské hlasivky, různé hudební nástroje, případně i reproduktory zvuku.

Každý zvuk, hudební i nehudební, se vyznačuje svojí fyzikální *intenzitou*, s kterou je rovnocenná veličina nazývaná *hladina intenzity zvuku*, a fyziologickou *hladinou své hlasitosti*. Mimo to se hudební zvuky vyznačují ještě *výškou* a *zabarvením*.

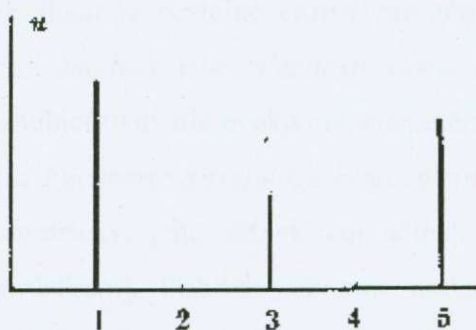
Pod pojmem intenzita zvuku se rozumí střední hodnota intenzity zvukového vlnění, která je při jednoduchém harmonickém vlnění dána vzorcem:

$$I_s = 2\pi^2 scf^2 u_0^2 = \frac{1}{2} scv_0^2 = \frac{P_s^2}{sc} \quad [4]$$

kde  $s$  je měrná hmotnost vzduchu (dle nových označení  $\rho$ ),  $c$  rychlost postupu vlnění,  $f$  frekvence,  $u_0$  amplituda výchylky objemového elementu vodiče zvuku z jeho rovnovážné polohy, která se v akustice nazývá *zvuková* nebo také *akustická výchylka*,  $v_0$  amplituda rychlosti pohybu elementu vodiče zvuku (*akustické rychlosti*) a  $P_s$  střední hodnota zvukového přetlaku, nazývaná také efektivní přetlak.

Výška tónu se udává absolutně nebo relativně. *Absolutní výška* tónu, jako fyzikální veličina, je určena jeho frekvencí. Absolutní výšce tzv. komorního  $a$  ( $a'$ ) byla podle rozhodnutí vídeňské konference hudebníků, konané v roce 1885, přiřazena hodnota 435 Hz, avšak dnes je to 440 Hz. Relativní výška dvou hudebních zvuků se rovná podílu jejich frekvencí, neboli jejich absolutních výšek.

Zvláštní případ hudebního zvuku je *jednoduchý tón*, pod kterým se rozumí jednoduché a přísně harmonické vlnění hmotného prostředí. Tóny jsou však ve všeobecnosti součtem (superpozicí) tzv. *základního tónu*, jehož frekvence se rovná frekvenci daného tónu a příslušných *vyšších harmonických tónů* s frekvencemi rovnajícími se celým násobkům frekvence základního tónu. Fyzikální příčinou této skutečnosti je okolnost, že v různých zařízeních, které jsou schopny chvění a které tedy mohou být zdroji hudebních zvuků (složených tónů), může vzniknout chvění, které je superpozicí chvění s frekvencemi rovnajícími se celistvým násobkům základní frekvence. Z matematické stránky je to důsledek definice hudebního zvuku jako periodického vlnění a matematické poučky, podle které každou periodickou funkci můžeme zapsat ve tvaru Fourierovy řady (rozklad periodické funkce na nekonečně mnoho harmonických periodických funkcí).



Obr. 1-30 Frekvenční spektrum houslí

Pod pojmem zabarvení tónu se rozumí ta jeho vlastnost, podle které se dají rozeznat dva tóny stejné výšky a intenzity, avšak zahrané na různých hudebních nástrojích. Příčinou této rozličnosti je nestejný časový průběh kmitání v periodě ve stejném smyslu jako je to u složených tónů - nestejné zastoupení vyšších harmonických tónů ve složeném tóně, přičemž podle zkušeností rozhoduje pouze jejich frekvence a amplituda, nikoli však jejich fázová konstanta. Tato okolnost umožňuje vyjádřit složený hudební tón jeho tzv. *frekvenčním spektrem*, ve kterém délky *akustických spektrálních čar* vyjadřují amplitudy harmonických složek složeného tónu. Obr.1-30 představuje frekvenční spektrum houslí.

Hudební zvuky, ve kterých je mnoho vyšších harmonických tónů, avšak s intenzitami, které se zmenšují s jejich pořadovým číslem, vnímáme jako *plné*. Tyto zvuky je možné vytvořit například zahráním nerozložených akordů na hudebních nástrojích. Když jsou z vyšších harmonických tónů silné jen některé, zvuk nabývá pronikavosti a *lesku*, jako například zvuk houslí. Zvuk, ve kterém jsou zastoupené jen harmonické tóny s menšími frekvencemi, se jeví jako *dutý*.

Subjektivní dojem výšky tónu závisí kromě jeho frekvence i na jeho intenzitě a zabarvení. Pro tuto příčinu se v hudební akustice výška tónu určuje jeho subjektivním porovnáním s jednoduchým tónem, jehož hladina intenzity se nazývá *mel*.

### 3.2 Hladina intenzity a hlasitosti zvuku

Zvuky vnímáme jako silné nebo slabé. Za objektivní fyzikální míru síly zvuku byla zvolena střední hodnota intenzity příslušného zvukového vlnění, která má význam energie vlnivého pohybu, procházejícího za jednotku času skrz plošnou jednotku, kolmou na směr postupu vlnění.

V důsledku toho, že sluch je nestejně citlivý pro tóny různých výšek, může být subjektivní síla zvuku neboli *hladina* jeho *hlasitosti* různá i u dvou zvuků se stejnou intenzitou. Mimo to platí, že subjektivní síla zvuku neroste úměrně s jeho fyzikální intenzitou, ale zhruba podle *Weberova a Fechnerova fyziologického zákona*: roste-li fyzikální intenzita tónu  $i$  dané frekvence geometricky, jeho subjektivní účinek  $h$  se zvětšuje přibližně jen aritmeticky (se stejným přírůstkem). Přibližné správné matematické vyjádření závislosti intenzity tónu  $I$  k hladině jeho hlasitosti má tedy tvar:

$$I = Ka^k$$

Konstanty  $k$  a  $a$  v tomto vzorci mohou být určeny volbou intenzity tónu, jehož hladina hlasitosti se má například rovnat nule, a volbou její jednotky.

Jestliže ucho nemůže vnímat zvuk libovolně malé intenzity, je přirozené označit nulou hladinu hlasitosti zvuku určitého složení, které lidské ucho právě už nevnímá. Jeho intenzita se nazývá prahová intenzita a označuje se  $i_0$ . Dosazením těchto odpovídajících si hodnot ( $k = i_0$ ) do převodní rovnice dostaneme

$$I = I_0 a^k$$

Jednotka hladiny hlasitosti byla určena jako desetina rozdílu hladin hlasitosti dvou zvuků, z nichž hlasitější má fyzikální intenzitu desetkrát větší než druhý - nazývá se *fón* (značka Ph). Z této definice jednotky hladiny hlasitosti vyplývá, že pokud fyzikální intenzity dvou zvuků splňují vztah  $I_2 = 10I_1$ , jejich hladiny hlasitosti se odlišují o 10 Ph. Z rovnic  $I = I_0 a^k$  a  $10I_1 = I_2 = I_0 a^{k+10}$  dělením vyplývá

$$10 = a^{k+10} : a^k = a^{10}$$

To znamená, že  $a = \sqrt[10]{10}$ .

Podle tohoto výsledku vztah mezi hladinou hlasitosti a intenzitou vyjadřuje vzorec, který vyplývá už z rovnice  $I = I_0 a^k$ :

$$I = I_0 10^{\frac{k}{10}} \text{ neboli } h = 10 \log \frac{I}{I_0}.$$

Tento vzorec se však pro běžné používání v akustické praxi nehodí, protože předpokládá znalost prahové intenzity pro zvuky různých výšek a charakteru. Z tohoto důvodu se pomocí naposledy zmíněného vzorce určuje jen hladina hlasitosti tzv. referenčního tónu, tj. jednoduchého harmonického tónu s frekvencí 1 000 Hz, jehož zvukový práh je  $I_0 = 10^{-16} \text{ watt/cm}^2$ . Hladina hlasitosti referenčního tónu je tedy určena vzorcem

$$h = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Hladina hlasitosti jiných zvuků byla definována takto: Hladina hlasitosti zvuku se rovná hlasitosti pro lidské ucho stejně silného jednoduchého tónu s frekvencí 1 000 Hz.

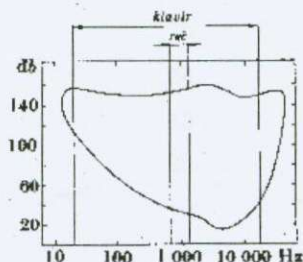
Veličina definovaná pro jakýkoliv zvuk vzorcem



$$s = \log \frac{I}{I_0}$$

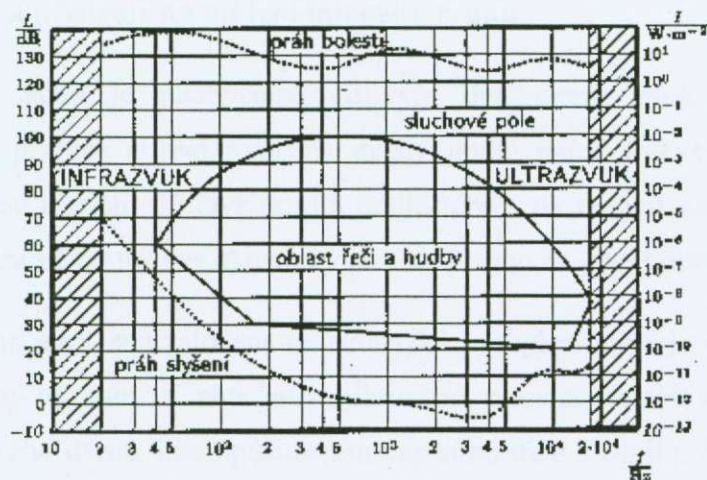
ve kterém  $I_0$  je zvukový práh referenčního tónu, se nazývá *hladina intenzity* tohoto zvuku. Jednotka takto definované hladiny intenzity zvuku se nazývá *bel* (značka B), podle jména amerického fyzika A. G. Bella (1847 - 1922, obr. 1-31), vynálezce telefonu. Desetina této jednotky se nazývá *decibel* (značka dB). Z porovnání předchozích dvou vzorců pro  $h$  a  $s$  vyplývá, že pro referenční tón  $h = 10s$ . Pokud tedy například hladina intenzity referenčního tónu je 5 bel = 50 decibel, jeho hladina hlasitosti  $h = 10s = 50$  fón. Měrná čísla hladiny intenzity v decibelech a hladiny hlasitosti ve fónech referenčního tónu jsou tedy stejně velké.

Závislost citlivosti ucha na výšce tónu je zřejmá z průběhu *Kingsburyho křivek stejné hladiny hlasitosti* (obr.1-38). Křivky označené hodnotami hladin hlasitosti ve fónech od 0 do 120 fónů udávají pro každou frekvenci hladinu intenzity  $s$  potřebnou na dosažení dané hladiny hlasitosti. Z diagramu vyplývá, že lidské ucho je při všech intenzitách nejcitlivější pro tóny s frekvencí 3 000 až 4 000 Hz.



Obr. 1-37 Sluchové pole

Uzavřená čára na obr. 1-37 ukazuje, že oblast, ve které je lidské ucho schopné vnímat tóny, je ze všech stran ohraničená. Pokud intenzita zvuku překročí určitou hranici, máme v uchu pocit bolesti a nevnímáme žádný zvuk. Z diagramu na tomto obrázku vyplývá i to, že frekvence vlnění, které lidské ucho může vnímat jako zvuk, je v intervalu 16 až asi 20 000 Hz. Příklady zvuků různé hladiny hlasitosti udává tabulka 2.



Obr. 1- 38 Sluchové pole

| Zvuk   | Hladina hlasitosti [Ph] = hladina intenzity zvuku [dB] |
|--|--|
| Zvukový práh                                     | 0  |
| Šelest listí                                     | 10   |
| Šum listí  | 20   |
| Pouliční hluk v tichém předměstí                 | 30   |
| Tlumený rozhovor                                 | 40   |
| Normální pouliční hluk                           | 50   |
| Hlasitý rozhovor                                 | 60   |
| Hluk na silně frekventovaných ulicích velkoměsta | 70   |
| Hluk v tunelech podzemních železnic              | 80   |
| Hluk motorových vozidel                          | 90   |
| Maximální hluk motorky                           | 100  |
| Hlasité obráběcí stroje                          | 110  |
| Startující letadlo ve vzdálenosti 1 m            | 120  |
| Hluk působící bolest                             | 130  |

Tabulka 2 Hladina hlasitosti některých zvuků

### 3.3 Detektory a přístroje na měření intenzity zvuku

Lidské ucho je neobyčejně citlivým detektorem zvuku. Je současně i jeho analyzátozem, protože citlivě rozlišuje zvuky podle jejich frekvencí. Fyzikální detektory zvuku je možné rozdělit do čtyř skupin podle toho, zda reagují na akustickou výchylku  $u$ , akustickou rychlost  $v$ , střídavý akustický přetlak  $P$  nebo na jeho průměrnou hodnotu  $P^*$ .

Zařízení, jenž jsou založena na akustické výchylce, která je vždy velmi malá, nemají prakticky žádný význam. K nim patří mikroskop, pomocí kterého se dají pozorovat částice např. cigaretového dýmu, které působením vnitřního tření sledují pohyb částic vodiče zvuku. Jestliže ve vzduchu obsahujícím cigaretový dým není zvukové vlnění, při vhodném bočním osvětlení se částice dýmu obarvují v zorném poli mikroskopu jako neklidné svítící body (Brownův pohyb). Pokud by však vzduchem zářil zvuk s dostatečně velkou intenzitou, tak by v zorném poli mikroskopu byly vidět navzájem rovnoběžné svítící úsečky, které by byly tím delší, čím by intenzita byla větší.

Na akustickou rychlost reaguje jako detektor zvuku tzv. *citlivý plamen*. Plamen svítíplynu unikajícího z trubičky s vnitřním průměrem asi 1 mm pod menším tlakem je klidný. Pokud bychom tlak svítíplynu zvětšili, následkem víření není klidný plamen plynu, ale rozvětňuje se. Pokud bychom tlak svítíplynu nastavili tak, že plamen byl ještě klidný, nápadně by změnil svůj vzhled, pokud by ho zasáhla zvuková vlna. O tom, že tento citlivý plamen reaguje na akustickou rychlost a ne na střídavý akustický přetlak se přesvědčíme tak, že ho dáme na různá místa v stojatém vlnění, ve kterém - na rozdíl od postupujícího vlnění - kmitny tlaku a rychlosti nejsou v totožných rovinách.

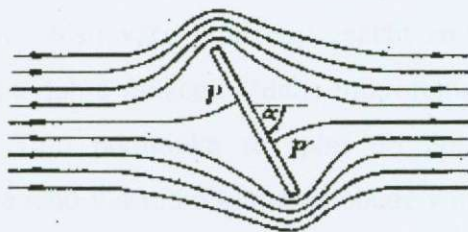
Na akustické rychlosti je založený i *Rayleighův přístroj* na měření intenzity zvuku (obr.1- 39). Jeho hlavní součástí je velmi tenká a lehká destička s průměrem 5 - 10 mm, zavěšená na jemném pružném vlákně. Ve vzduchu, který je v pohybu, se natáčí do polohy ve směru postupu vlnění. Jev vysvětluje obr. 10, ve kterém jsou zakresleny křivky proudění, kdy je tenká deska (teoreticky nekonečně tenká) v šikmé poloze v proudícím vzduchu. Z obrázku je zřejmé, že rychlost proudění vzduchu při povrchu desky je nejmenší v okolí bodů P a P', ve kterých se rovná nule. To však podle Bernoulliho rovnice znamená, že v těchto místech jsou tlakové síly působící na desku největší. Skládají se v dvojici, která se snaží pootočit desku do polohy kolmé na směr proudění. Z teorie obtékání pevných těles tekutinami vyplývá, že tento moment, jestliže na desku působí harmonické rovinné vlnění, je

$$D = \frac{2}{3} sr^3 v_0^2 \sin 2\alpha$$

kde  $s$  je měrná hmotnost vzduchu (dle nového označení  $r$ ),  $r$  poloměr desky,  $v_0$  amplituda akustické rychlosti a  $\alpha$  úhel sevřený směrem postupu vlnění a normálou k desce neboli její rovinou.



Obr. 1-39 Rayleighův přístroj



Obr. 1-40 Proudění okolo tenké desky

Rayleighův přístroj má pro akustiku zásadní význam, protože umožňuje experimentálně určit amplitudu akustické rychlosti  $v_0$  a tím i intenzitu zvuku. Přístroj je upotřebitelný pouze tehdy, jestliže intenzita zvuku a jeho vlnová délka jsou dost velké.

Jako detektory zvuku, použitelné i na měření jeho intenzity se nejčastěji používají přístroje reagující na střídavý akustický tlak (*mikrofony*) nebo na jeho průměrnou hodnotu (*radiometrie*).

Každý mikrofon obsahuje membránu, která se působením zvukového vlnění dostává do vynuceného kmitání. Tyto mechanické kmity se různým způsobem využívají ke vzniku střídavého elektrického proudu se stejnou frekvencí a zabarvením (*elektrodynamický* a *kapacitní mikrofon*) nebo na měření intenzity jednosměrného proudu jdoucího skrz mikrofon z vnějšího zdroje (*uhlíkový mikrofon*).

Membrána elektrodynamického mikrofonu, podobně jako elektrodynamického reproduktoru zvuku, je pevně spojena s cívkou, která kmitá v radiálním magnetickém poli silného permanentního magnetu. Tím se v závitech cívky indukují střídavé elektrické proudy. Membrána kapacitního mikrofonu tvoří jednu ze dvou desek elektrického kondenzátoru, který

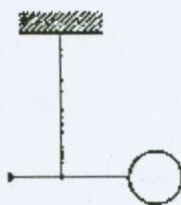
je přes vhodně zvolený odpor připojený na svorky galvanického článku. Kmitání membrány je spojené se změnami elektrické kapacity kondenzátoru. V důsledku toho se mění náboje na deskách, což znamená vznik proměnlivého proudu v elektrickém obvodu a tím i měnícího se napětí na odporu. Uhlíkový mikrofon obsahuje mezi svou kovovou membránou a za ní se nacházející pevnou vodivou deskou hrubou uhlíkovou dřevě. Kmitání membrány se mění síla, kterou jsou k sobě přitlačována zrnka uhlíku, a tím i vnitřní elektrický odpor mikrofonu. Jeho zapojení do okruhu zdroje jednosměrného elektrického proudu může být podobné jako zapojení kapacitního mikrofonu.

Dnešní elektronické tranzistorové zesilovače umožňují zvětšit změny proudů, které vznikají v mikrofonu. Hlavní podmínkou dobré funkce každého mikrofonu je, aby byl stejně citlivý na zvuky různých frekvencí. Tato podmínka se splní při dostatečném tlumení membrány mikrofonu, jestliže frekvence jeho vlastního kmitání nebude v intervalu frekvencí, které mají být mikrofonem zpracovávány.

Na měření intenzity ultrazvuku se používají radiometry. Využívá se v nich tlak akustického záření dané vzorcem

$$P = \frac{1+\chi}{2} e,$$

podle kterého je tento tlak v případě odrazu zvuku



Obr. 1-41 Radiometr

$$P = (1+\chi) \frac{i}{c}, \text{ to znamená, že } i = \frac{cP}{1+\chi}, [3]$$

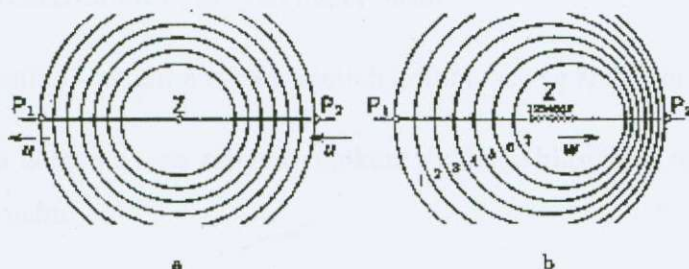
kde  $\chi$  je Poissonova plynová konstanta a  $c$  rychlost zvuku. Princip radiometru vystihuje schematicky obr. 1- 41 Na jemném pružném vlákně visí vodorovná příčka, která na jednom konci nese kruhovou desku, odrážející na ni dopadající akustické záření. Tlak akustického záření pootočí příčku o úhel úměrný tomuto záření.

## Dopplerův efekt

Při relativním pohybu zdroje zvuku nebo pozorovatele vnímá pozorovatel zvuk jiné frekvence, než je frekvence zdroje.

Nejdůležitější případy Dopplerova jevu nastávají při vzájemném pohybu zdroje zvuku Z a přijímače zvuku P. Jsou to případy:

1. Zdroj zvuku je v klidu a přijímač zvuku se pohybuje po vzájemné spojnici konstantní rychlostí  $u$ , která je menší než rychlost zvuku  $v$  ( $u < v$ ). Zdroj Z vysílá zvukové vlnění o vlnové délce  $\lambda = \frac{v}{f}$  ( $f$  frekvence zdroje vlnění), které je na obr. 1.42a znázorněno soustavou soustředných vlnoploch. Jestliže jsou přijímače zvukového vlnění  $P_1$  a  $P_2$  v klidu, dospěje k nim za jednotku času stejný počet vlnoploch a přijímače registrují zvukové vlnění stejné frekvence  $f = \frac{v}{\lambda}$ .



Obr. 1-42 Zdroj vlnění: a) v klidu b) v pohybu

Jestliže se přijímač  $P_1$  rychlostí  $u$  od zdroje vzdaluje, dospěje k němu za jednotku času menší počet vlnoploch a přijímač registruje nižší frekvenci  $f_1 = \frac{v-u}{\lambda} = \frac{v-u}{v} f$ .

Přijímač, který se ke zdroji zvuku rychlostí  $u$  přibližuje, zachytí více zvukových vln a registruje vyšší frekvenci  $f_2 = \frac{v+u}{\lambda} = \frac{v+u}{v} f$ .

2. Přijímač je v klidu a zdroj vlnění se pohybuje rychlostí  $w$  ( $w > v$ ) od přijímače  $P_1$  k přijímači  $P_2$  (obr. 1-42b). Zdroj vlnění se od přijímače  $P_1$  vzdaluje a to se projevuje zvětšením vlnové délky zvukového vlnění. Vlnová délka  $\lambda_1 = \frac{(v+w)}{f}$  a přijímač  $P_1$  registruje

frekvenci  $f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{v+w}f$ , která je nižší než frekvence zdroje ( $f_1 < f$ ). Obdobně v místě

přijímače  $P_2$  je vlnová délka zvukového vlnění kratší  $\lambda_2 = \frac{v-w}{f}$  a přijímač  $P_2$  registruje

frekvenci  $f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{v-w}f$ .

Dopplerův jev nastává obecně v každém případě, kdy se zdroj zvuku a jeho přijímač navzájem přibližují, popř. vzdalují.

### 3.4 Rozdělení akustiky

Důvody a cíle zájmů o akustiku jsou různé, a právě podle toho se tento obor dá rozdělit na několik částí:

1. Fyzikální akustika - studuje způsob vzniku a šíření zvuku. Dále se zabývá jeho odrazem a pohlcováním v různých materiálech.
2. Hudební akustika - zkoumá zvuky a jejich kombinace se zřetelem na potřeby hudby.
3. Fyziologická akustika - se zabývá vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu.
4. Stavební akustika - zkoumá dobré a nerušené podmínky „poslouchatelnosti“ hudby a řeči v obytných místnostech a sálech.
5. Elektroakustika - se zabývá záznamem, reprodukcí a šířením zvuku s využitím elektrického proudu.

V akustice se obvykle pojednává i o vzniku, vlastnostech a účinku tzv. **ultrazvuku** (a **infrazvuku**), mechanického vlnění s velmi vysokou (pro infrazvuk nízkou) frekvencí, na kterou už lidské ucho nereaguje.

### 3.5 Základy hudební akustiky

Dva současně znějící hudební zvuky se v akustice nazývají *dvojzvuk*. Ze zkušeností je jasné, že některé dvojzvuky jsou pro normální lidský sluch lahodné (*souzvukné, konsonantní*), jiné naopak nepříjemné (*nesouzvukné, disonantní*). Správnou odpověď na otázku, kdy jsou

dva tóny konsonantní a kdy disonantní zjistil už v 6. století před n. l. Pythagoras na základě jeho pokusů se strunami. Ještě lépe tuto věc objasnil Euklides už okolo roku 300 před n. l. Podle něho mají dva konsonantní tóny schopnost spojování se v jeden celek, a my s uspokojením poznáváme, že tyto dva tóny patří k sobě, zatímco při disonantních tónech to není možné. Je zajímavé, že na tomto velmi starém poznatku (prohloubeném a doplněném) je založena celá hudební akustika.

Správnost Euklidova názoru na konsonanci a disonanci tónů vyplývá z následující úvahy. O dvou konsonantních tónech je dnes známo, že jejich frekvence jsou v poměru celých a malých čísel, která nejsou větší než 6. Jestliže například frekvence dvou tónů jsou v poměru  $4 : 3$ , tak to značí, že vždy na každé tři kmity hlubšího tónu připadají právě čtyři kmity tónu vyššího. To znamená, že se vlnění obou dvou tónů skládají ve výsledné vlnění, jehož perioda se rovná trojnásobku periody tónu hlubšího a současně čtyřnásobku periody tónu vyššího. Toto klidné splývání dvou konsonantních tónů v nový periodický děj, jehož perioda je v jednoduchém vztahu k periodám obou současně znějících tónů, je právě příčinou jejich souzvučnosti.

Další charakteristiku dvou tónů v hudební akustice vyjadřuje jejich určitá výšková odlehlost, neboli to, že tvoří určitý *interval*, přičemž za stejné intervaly se pokládají intervaly tvořené vždy dvěma dvojicemi tónů se stejnými relativními výškami (tedy ne tóny se stejnými rozdíly absolutních výšek). Stejně jsou tedy například intervaly tvořené dvojicí tónů s frekvencemi 24 a 27 Hz a dvojicí s frekvencemi 32 a 36 Hz, protože  $36 : 32 = 27 : 24 = 9 : 8$  (i když  $36 - 32 = 4$  a  $27 - 24 = 3$ ). Protože frekvence všech vyšších harmonických tónů zvoleného základního tónu jsou v poměru po sobě jdoucích celých čísel, všechny *hudební intervaly*, tj. intervaly tvořené vždy dvěma více nebo méně konsonantními tóny, je možné najít v souboru libovolného základního tónu a vyšších harmonických tónů, které k němu připadají.

Nejjednodušším hudebním intervalem je tzv. *oktáva*, interval tvořený dvěma tóny, jejichž frekvence jsou v poměru  $2 : 1$ . Jestliže v tomto případě za čas jedné periody hlubšího tónu uplynou právě dvě periody tónu vyššího, tak, že perioda výsledného zvukového vlnění se rovná periodě hlubšího tónu, potom tyto dva tóny tvoří oktávu se v hudbě ani nepovažují za tóny kvalitativně odlišné a označují se pomocí stejných písmen, např.  $c^1$  a  $c^2$ . Nejjednodušším



hudebním intervalem v oktávě je tzv. *kvinta*, interval tvořený tóny s frekvencemi v poměru 3 : 2.

Jestliže libovolné tři tóny, například  $a$ ,  $b$  a  $c$ , jejichž absolutní výšky jsou  $v_1$ ,  $v_2$  a  $v_3$ , potom pod součtem intervalů dvojice tónů  $a$  a  $b$  a dvojice tónů  $b$  a  $c$  se v hudební praxi rozumí interval tónů  $a$  a  $c$ . Pro relativní výšku tónů tvořících tento interval platí

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{v_3}{v_2} \cdot \frac{v_2}{v_1}, \text{ neboli } \log \frac{v_3}{v_1} = \log \frac{v_3}{v_2} + \log \frac{v_2}{v_1}.$$

Podle těchto výsledků relativní výška tónů ohraničujících hudební interval, který je součtem jiných dvou hudebních intervalů, se rovná součinu relativních výšek tónů ohraničujících sčítané intervaly tak, že logaritmus výsledné relativní výšky se rovná součtu logaritmů relativních výšek tónů ohraničujících sčítané intervaly.

Odvození nového intervalu od daného se v hudbě nazývá *inverze* intervalu a dosáhne se tak, že se nižší tón dvojice tónů tvořících interval nahradí tónem s dvojnásobnou frekvencí a nebo tón s vyšší frekvencí se nahradí poloviční frekvencí, přičemž se současně pořadí tónů vymění. Inverzí *kvinty*, intervalu daného poměrem frekvencí 3 : 2, vzniká *kvarta*, interval určený poměrem frekvencí 4 : 3. Rozdíl kvinty a kvarty je tzv. velký celý tón, určený poměrem frekvencí.  $\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = 9 : 8$

Nejenom dva, ale i více současně znějících tónů může představovat souzvučný celek. Podmínkou je, aby se poměr frekvencí všech současně znějících tónů rovnal poměru dost malých a celých čísel. Nejjednodušším souzvučným trojzvukem i v oktávě je skupina tónů s frekvencemi v poměru 3 : 4 : 5, jehož inverzí je možno utvořit tzv. tvrdý *terc-kvintový akord*, trojzvuk určený poměrem 4 : 5 : 6.

Hudební *stupnice*, to jsou vždy po oktávě se opakující sledy tónů s takovými frekvencemi, že je z nich možno i v hranicích oktávy sestavit několik konsonantních trojzvuků. Současná hudba dnes používá dvojí stupnice - tzv. *tvrdé (dur)* a tři *měkké (moll)*. Tvrdou stupnici tvoří tóny s frekvencemi v poměru čísel

24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48

a tzv. měkkou harmonickou stupnici tóny v poměru čísel

120, 135, 144, 160, 180, 192, 216, 240

V obou dvou stupnicích jsou od sebe dva libovolné tóny s dvojnásobnou frekvencí vzdáleny právě osm tónů, podle čeho se interval dvou tónů s frekvencemi v poměru 2 : 1 nazývá *oktáva*. Z podobných příčin se *kvinta* a *kvarta* nazývají intervaly určené relativními výškami.  $\frac{3}{2}$  a  $\frac{4}{3}$ . V obou dvou stupnicích to jsou vzhledem k základnímu tónu relativní výšky pátého a čtvrtého tónu.

V obou dvou stupnicích se pátý tón nazývá dominantní a čtvrtý subdominantní. Významnou vlastností tvrdé stupnice tónů je, že terc-kvintové akordy založené na základním, *subdominantním* a *dominantním* tónu jsou všechny tři totožné a tvrdé, jako to vyplývá z příslušných poměrových čísel

$$24 : 30 : 36 = 32 : 40 : 48 = 36 : 45 : 54 = 4 : 5 : 6$$

Podobné terc-kvintové akordy, založené na základním, subdominantním i dominantním tónu jsou totožné i v měkké stupnici, kde se nazývají měkkým terc-kvintovým akordem.

$$120 : 144 : 180 = 160 : 192 : 240 = 180 : 216 : 270 = 10 : 12 : 15$$

|      | 1.                                | 2.  | 3.  | 4.  | 5.  | 6.  | 7.   | 8.  |
|------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| dur  | 24                                | 27  | 30  | 32  | 36  | 40  | 45   | 48  |
|      | 1                                 | 9/8 | 5/4 | 4/3 | 3/2 | 5/3 | 15/8 | 2   |
|      | 9/8 10/9 16/15 9/8 10/9 9/8 16/15 |     |     |     |     |     |      |     |
| moll | 120                               | 135 | 144 | 160 | 180 | 192 | 216  | 240 |
|      | 1                                 | 9/8 | 6/5 | 4/3 | 3/2 | 8/5 | 9/5  | 2   |
|      | 9/8 16/15 10/9 9/8 16/15 9/8 10/9 |     |     |     |     |     |      |     |

Tabulka 3 Tvrdá a harmonická měkká hudební stupnice

V tabulce 3 v prvním řádku jsou vždy uvedena celá čísla, která určují frekvenci jednotlivých tónů tvrdé a měkké stupnice, v druhém řádku jejich sousedních tónů. Z údajů

této tabulky vidíme, že intervaly tvořené vždy dvěma sousedními tóny obou dvou stupnic, tzv. *sekundy*, jsou trojí. Nazývají se *velký celý tón* (9 : 8), *malý celý tón* (10 : 9) a *půltón* (16 : 15).

První dva intervaly jsou jen málo odlišné. Jejich rozdíl  $\frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{81}{80}$  se nazývá *syntonická*

*koma* a je to interval, který pro obyčejný sluch značí už praktickou totožnost dvou tónů. Proto se v hudbě tento rozdíl obyčejně zanedbává a malý celý tón a velký celý tón se zahrnují pod společný název *celý tón*. Součet dvou půltónů je však větší než jakýkoliv z obou celých tónů,

protože  $\left| \frac{16}{15} \right|^2 = \frac{256}{225} = 1,14$ , avšak  $\frac{9}{8} = 1,125$  a  $\frac{10}{9} = 1,11$

Podobně jako sekundy jsou v tvrdé a měkké stupnici různé i ostatní intervaly. Například kvintu mezi druhým a šestým tónem tvrdé stupnice tvoří tóny s relativní výškou  $40 : 27 = 1,48 < 1,5$ . To má za následek, že kdybychom chtěli vytvořit novou tvrdou stupnici, vycházející například z druhého tónu už dané stupnice, například v podobě napnutých strun i fyzikálně realizované tvrdé stupnice, tak bychom při úplné přesnosti mohli použít jen malý počet tónů. Násobením čísla 27 relativními výškami tónů tvrdé stupnice vzhledem k jejímu základnímu tónu dostáváme skutečná čísla:

$$27, 27 \frac{9}{8} = 30 \frac{3}{8}, 27 \frac{5}{4} = 33 \frac{3}{4}, 27 \frac{4}{3} = 36, 27 \frac{3}{2} = 40 \frac{1}{2}, 27 \frac{5}{3} = 45, 27 \frac{15}{8} = 50 \frac{5}{8}, 27 \cdot 2 = 54$$

Nevyhovuje tedy nejen čtvrtý a osmý tón původní stupnice, kde jsou rozdíly největší, ale ani třetí a šestý. Kdyby dokonalý hudební nástroj - konstruovaný tak, že by při hraní hudebník, opírající se o svůj hudební sluch, nemohl výšku tónu už libovolně měnit - měl umožňovat i přechody do různých stupnic, musel by být velice složitý.

Rozvoj hudebních nástrojů, zejména varhan a klavíru, si vynutil tzv. *temperované ladění* takovýchto hudebních nástrojů. Toto ladění spočívá v tom, že se při něm oktáva dělí na 12 stejných intervalů určených poměrem kmitočtů  $\sqrt[12]{2} = 1,05946$ , které představují temperovaný půltón, zatím co čistý půltón je určen poměrem frekvencí  $16 : 15 = 1,066\ 666$ . Dva temperované půltóny tvoří temperovaný celý půltón atd. Hra na nástroji s temperovaným laděním nedosahuje lahodnosti čistého ladění i tehdy, pokud se temperované ladění s laděním čistým dost dobře shoduje. Ukazuje to tabulka 4, ve které jsou uvedeny logaritmy

jednotlivých intervalů tvrdé hudební stupnice v čistém a temperovaném ladění, přičemž za základ logaritmů byla zvolena relativní výška dvou tónů tvořících malý temperovaný půltón.

| Ladění      | 1. | 2.   | 3.   | 4.   | 5.   | 6.   | 7.    | 8. |
|-------------|----|------|------|------|------|------|-------|----|
| Čisté       | 0  | 2,04 | 3,86 | 4,98 | 7,02 | 8,84 | 10,88 | 12 |
| Temperované | 0  | 2    | 4    | 5    | 7    | 9    | 11    | 12 |

Tabulka 4 Vztah mezi temperovaným a čistým laděním

Je pozoruhodné, že poměrně nejméně se od sebe liší temperovaná a čistá kvarta a kvinta. Na to, aby se současně dalo hrát ve větším počtu hudebních nástrojů, je potřebné, aby jimi vydávané tóny měli stejné relativní výšky vzhledem k společnému základu. Tímto základním, dohodou přijatým tónem je komorní *a*, přesněji  $a^1$ , s frekvencí 440 Hz. Jestliže je tento tón šestým tónem v tvrdé stupnici tónů, stupnice se nazývá tvrdou stupnicí *c* (*c dur*) a její jednotlivé tóny se označují písmeny *c, d, e, f, g, a, h, c*, přesněji  $c^1, d^1, \dots, c^2$ .

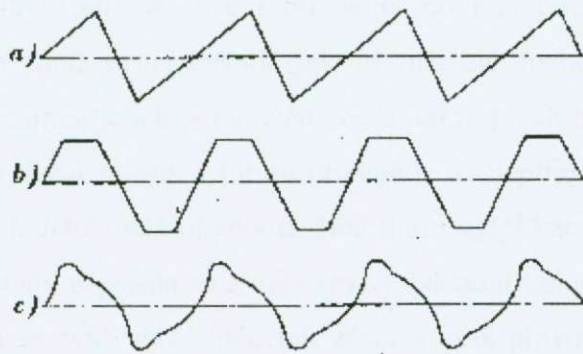
Hudební označení níže a výše položených oktáv je: *subkontraoktáva* ( $C_2, D_2, \dots, C_1$ ), *kontraoktáva* ( $C_1, D_1, \dots, C$ ), *velká oktáva* ( $C, D, \dots, c$ ), *malá oktáva* ( $c, d, \dots, c^1$ ), *jednočárkovaná oktáva* ( $c^1, d^1, \dots, c^2$ ), atd. Zvýšení tónu o půltón se označuje příponou *is*, například *fis* a snížení o půltón se vyjadřuje koncovkou *es*, například *hes*.

### 3.6 Některé zdroje hudebních zvuků

Zdrojem hudebního zvuku může být každé pravidelně kmitající těleso. V praxi jsou zdroji hudebních zvuků hudební nástroje, lidské hlasivky a reproduktory zvuku. Nejdůležitějšími druhy hudebních nástrojů jsou nástroje *strunové* a nástroje založené na *píšťalách*. Strunové nástroje se dále rozdělují na nástroje *smyčcové* ( housle, viola, čelo, basa), nástroje *brnkací* ( harfa, kytara, balalajka, mandolína) a na nástroje, ve kterých se struny přivádějí do chvění úderem kladívka ( klavír, cimbál).

Absolutní výšku základního tónu struny určuje vzorec

$$v_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{s}}$$



Obr. 1-43 Chvění struny

kde  $l$  je délka struny,  $F$  její napětí a  $s$  hmotnost délkové jednotky struny, přičemž struna může ve všeobecnosti vydávat současně i všechny příslušné vyšší harmonické tóny s frekvencemi  $\nu_k = k\nu_1$ . O tom, které vrchní tóny a s jakou intenzitou jsou zastoupeny ve zvuku struny, rozhoduje hlavně způsob, jak se struna přivádí do chvění, jak to dokazují příslušné grafické záznamy rozkladu průběhu vyšších harmonických tónů na harmonické složky. Na obr. 1-43 je reprodukován záznam chvění struny: a) přivedené do chvění smyčcem, b) přivedené do chvění brnknutím, c) přivedené do chvění úderem kladívka.

Zvuk struny, která se chvěje účinkem smyčce, obsahuje mnoho vyšších harmonických tónů, jejichž intenzity se s jejich stoupajícím pořadovým číslem zmenšují. Výjimku tvoří ty tóny, při kterých místo styku smyčce a struny je uzlem, protože tyto tóny vůbec nevzniknou. Intenzita zvuku vydávaného touto strunou závisí hlavně na rychlosti pohybu smyčce po struně, méně na jeho tlaku. Hudebník může pomocí smyčce měnit sílu i zabarvení zvuku v širokém rozsahu, čímž hra na smyčcové nástroje nabývá neobyčejné výraznosti tak, že z této stránky se jim žádný jiný nástroj nevyrovná.

Struny smyčcových hudebních nástrojů jsou naladěné na tyto tóny:

- housle  $g, d^1, a^1, e^2$ , celkové napětí 28 N,
- viola  $c, g, d^1, a^1$ , celkové napětí 31 N,
- čelo  $C, G, d, a$ , celkové napětí 45 N,
- basa  $E_1, A_1, D, G$ , celkové napětí 200 N. napětí

Ostatní tóny vytváří hudebník tak, že prsty levé ruky tlačí strunu k hmatníku a tím krátí jejich délku.

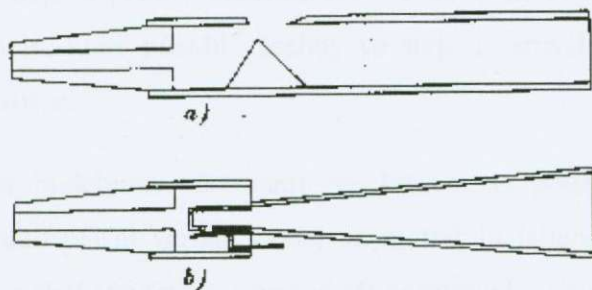
Jestliže se struna uvádí do chvění brnkáním pomocí tvrdého bodu, amplitudy a vrchních harmonických tónů se zmenšují (jak to ukazuje rozbor grafického záznamu) přibližně jen s první mocninou jejich pořadového čísla, takže jejich intenzita, úměrná součinu  $v^2 a^2$ , je prakticky stejná. Zvuk struny v tomto případě je až nepříjemně ostrý, snesitelný jen při ocelových strunách, jejichž malá ohybnost silně tlumí vyšší harmonické tóny. Jestliže se však brnká měkkým prstem, převládá ve zvuku struny základní tón a vrchní harmonické tóny jsou o něco slabší. Tím se zvuk stává měkčím, zůstává však plným. Význačným nástrojem tohoto druhu je *harfa*.

Struny klavíru mají temperované ladění po půltónech od  $A_2$  do  $a^4$ . Celkové napětí strun je asi 11 000 N. Velmi různá délka a hmotnost strun by měla za následek, že by při stejných úderech dlouhé a těžké struny pro hluboké tóny vydávaly o mnoho silnější zvuk než krátké a tenké struny pro vysoké tóny. Aby se to nestalo, struny pro nejhlubší tóny jsou jednoduché, struny pro tóny o něco vyšší jsou po dvou a struny pro střední a vysoké tóny jsou po třech.

Struny smyčcových hudebních nástrojů jsou napjaté přes lehkou kobylku, která stojí na duté "skříňce" s prohnutými stěnami a s otvory do tvaru *f*. Tuto skříňku nebo alespoň desku musí mít všechny strunové hudební nástroje, jinak by kmitající struna vyvolávala ve svém blízkém okolí jen vířivé, do sebe uzavřené, proudění vzduchu, které však není významným kolísáním tlaku, jenž je potřebné pro vyvolání delšího zvukového vlnění. Skříňka je uvnitř vyztužena kolíčkem (duší) pod pravou nohou kobylky a delším trámem pod levou nohou kobylky. Účelem zvláštního tvaru ozvučné skříňky je, aby podle možnosti rovnoměrně zesilovala tóny různých výšek. Ozvučná skříňka podle svého materiálu a tvaru vždy pozměňuje zabarvení zvuku samotné struny tím, že některé složky jejího složitého zvuku zesiluje víc a jiné méně, a tak rozhoduje o síle, čistotě, lahodnosti a jasnosti zvuku. Z této příčiny jsou velice ceněné zejména housle vyrobené italskými mistry v 17. století, které se vyznačují neobyčejně jasným a čistým zvukem.

Ozvučné skříňky smyčcových hudebních nástrojů mají velmi silné tlumení, což nejen, že není na škodu, protože struny udržované stále ve chvění pohybem smyčce poskytují pro vznik zvuku neustále dostatek energie, ale je to dokonce výhodné, protože se takto vydávaný zvuk může velmi rychle měnit, jelikož ho neruší *doznívání*. Naproti tomu ozvučné skříňky hudebních nástrojů, jejichž struny se přivádějí do chvění brnkáním (například *kytara*) nebo

úderem kladívka (*klavír, cimbál*), mají mít menší tlumení, aby se náhle vzbuzený zvuk déle udržel.



Obr. 1-44 Pišťaly

V některých hudebních nástrojích se namísto strun, naladěných na určité tóny, používají *retní* (obyčejně otevřené) nebo *jazýčkové* pišťaly. Jsou to trubice s kruhovým, čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem, ve kterých se vzduch uvádí do podélného chvění buď foukáním proti ostré hraně, která se nazývá *ret* (obr. 1-44a), nebo chvěním pružného *jazýčku* (obr. 1-44b).

Výška základního tónu, který může vydávat retná pišťala, závisí na její délce a pro otevřenou retnou pišťalu je dána vzorcem

$$v_l = \frac{1}{2l} \sqrt{\chi \frac{p}{s}}$$

kde  $l$  je délka pišťaly,  $\chi$  Poissonova konstanta,  $s$  měrná hmotnost plynu ve válci a  $p$  tlak plynu.

Pišťala může vydávat i všechny vyšší harmonické tóny s frekvencemi.  $v_k = kv_l$

Silnější foukání do pišťaly může způsobit, že se nezvze její základní tón, ale až tóny počínající některým vyšším harmonickým tónem. Vzorec

$$v_l = \frac{1}{2l} \sqrt{\chi \frac{p}{s}}$$

však nevyjadřuje frekvenci tónů vydávaných otevřenou retnou pišťalou celkem přesně, protože předpokládá, že kmitny stojatého vlnění vzduchu ve válci jsou přesně na obou koncích válce. Ve skutečnosti však ani hrana rtu a ani konec pišťaly svojí polohou neodpovídají polohám kmiten na koncích pišťaly, které jsou vždy o něco dále, to znamená, že délka vzduchového sloupce ve stojatém vlnění je vždy o něco dále, takže délka vzduchového sloupce ve stojatém vlnění je o příslušný rozdíl větší než délka pišťaly. Mimo to je rychlost

postupu vlnění ve vnitřním prostoru píšťaly vždy o něco menší než ve volném vzduchu. Příčinou tohoto poklesu je vnitřní tření vzduchu na styku se stěnami píšťaly, ale i to, že změny tlaku v píšťale nejsou přesně adiabatické. Výška tónu vydávaného otevřenou retní píšťalou je z těchto příčin, které působí všechny ve stejném smyslu, vždy menší než podle naposledy napsaného vzorce.

Nejdokonalejším hudebním nástrojem, ve kterém se používají retné píšťaly jsou *varhany*. Zabarvení zvuku píšťal varhan závisí na materiálu jejich stěn a na tzv. *menzuře*. Dřevěné píšťaly dávají měkčí tón (stěny tlumí vyšší harmonické tóny), na rozdíl od cínových píšťal, které dávají tvrdší a pronikavější tón. Pod menzurou píšťaly se rozumí poměr hloubky hranaté píšťaly k její délce a pohybuje se v rozmezí  $1/25$  až  $1/6$ . Úzká menzura podporuje vznik vyšších harmonických tónů, které dodávají zvuku určitý lesk, široká menzura podporuje základní tón a nižší harmonické tóny, čímž zvuk nabývá plnosti.

Z orchestrálních hudebních nástrojů patří k retným píšťalám pouze *flétna* a *pikola*. Tóny různých výšek vytváří hudebník na těchto nástrojích tím, že zmenšuje účinnou délku píšťaly otvíráním bočních dírek, které byly zakryty prstem nebo klapkou, nebo silnějším foukáním, tzv. *přefukováním*, čímž se namísto základního tónu ozvou jen jeho vyšší nebo nižší násobky.

V jazýčkových píšťalách vzniká zvuk chvěním jazýčku (pružného mosazného proužku), který překrývá obdélníkový výřez mezi vzdušnou komorou a ozvučnou rourkou píšťaly. Jazýček je buď o něco menší než tento výřez, takže v něm může kmitat (průrazný jazýček) a nebo o něco větší (nárazný jazýček). Průrazný jazýček dává měkký zvuk, nárazný jazýček, který při svém pohybu naráží na okraje výřezu mezi vzdušnou komorou a jejím pokračováním, dává zvuk drsnější. Na rozdíl od retné píšťaly, u které o výšce tónu rozhoduje délka píšťaly, výška tónu jazýčkové píšťaly je určena hmotností, rozměry a pružností jazýčku a ozvučná rourka píšťaly jen podporuje vznik tónu, jenž rezonancí současně zesiluje. K hudebním nástrojům obsahující jazýčkové píšťaly patří zejména *harmonium* a různé ruční a foukací *harmoniky*.

Dechové orchestrální hudební nástroje, kromě flétny a pikoly, jsou vlastně také jazýčkové píšťaly. *Hoboj*, *anglický roh*, a *fagot* mají dvojitý (třetinový) jazýček a jejich zvuk vlivem kuželovitého tvaru rezonační roury obsahuje všechny vyšší harmonické tóny. *Klarinet*



a *basový klarinet* mají jednoduchý dřevěný jazýček a jejich (u jazýčku uzavřená) rezonanční rourka, která má válcovitý tvar, umožňuje vznik jen lichých vrchních harmonických tónů.

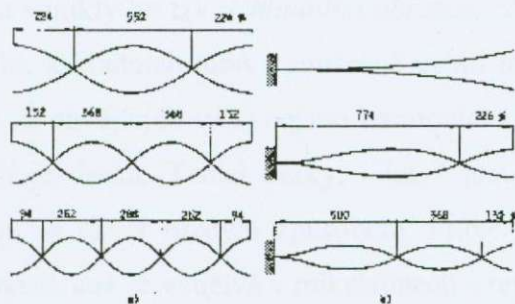
Plechové hudební nástroje jsou též jazýčkové píšťaly, ve kterých úlohu jazýčku zastupují různě napínané rty hudebníka. Z těchto nástrojů dává nejušlechtlejší zvuk *roh*, jehož rezonanční zvukovod se od samého počátku mírně rozšiřuje. *Trubky* a *pozouny* mají zvukovody až do dvou třetin válcovité a až poslední třetina se kuželovitě rozšiřuje. Úzká menzura plechových nástrojů způsobuje, že z nich není možno vyloudit jejich základní tón, zato vznik všech vyšších harmonických tónů je jednoduchý, od druhého až po dvanáctý. Starší přirozený roh, který neměl ventily, umožňoval zahrát jen vyšší harmonické tóny svého základního tónu. To znamená, že pokud například základní tón byl  $C^1$ , mohly se na rohu hrát jen  $C, G, c, e, g, hes, c^1, d^1, e^1, f^1, g^1$ , přičemž tón  $f^1$  už nebyl čistý. U dnešních ventilových hudebních nástrojů se chybějící tóny doplňují tím, že se pomocí ventilů do rezonančního zvukovodu vřazují prodlužovací rourky, čímž se účinná délka zvukovodu prodlužuje a tón snižuje. První ventil snižuje o celý tón, druhý o půltón a třetí o malou tercii. U *pozounu* se snížení tónu dosahuje vytahováním dvou do sebe zapadajících trubic tvaru U.

Kromě strun a píšťal se jako zdroje hudebních zvuků používají ještě pružné kovové *tyče*, *desky* a *napjaté blány*. Tyč se může chvět dvěma způsoby - podélně a příčně.

Podélně chvějící se tyče se však v hudbě nepoužívají ze dvou příčin: pro obtížné rozechvívání tyčí a pro jejich příliš velkou délku, která by byla potřebná pro vznik tónů s výškami, které jsou obvyklé pro hudbu.

Příčné chvění tyčí je jev mnohem složitější, než jejich vlnění podélné. Frekvence příčně se chvějící tyče se konstantním průřezem se vypočítá vzorcem

$$v = \frac{m^2 R}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{s}}$$



Obr. 1-45 Chvění tyče

ve kterém je  $E$  modul pružnosti materiálu tyče v tahu,  $R$  poloměr setrvačnosti průřezu tyče vzhledem k pohybové ose,  $l$  délka tyče,  $s$  měrná hmotnost a  $m$  kořen transcendentní rovnice  $\cos m \cdot \cosh m = \pm 1$ , ve které platí znaménko  $+$  pro tyč, která je volná na obou dvou koncích nebo na obou dvou koncích upevněná, a  $-$  pro tyč, která je na jednom konci volná a na druhé upevněná. Podle vzorce na výpočet frekvence se tedy základní frekvence příčného vlnění tyče zmenšuje s druhou mocninou její délky, tedy mnohem rychleji, než u podélného vlnění. Je ale významné, že frekvence možných příčných chvění tyče nejsou celistvými násobky základní frekvence. Díky tomu zvuk příčně se chvějících tyčí není dost příjemný a dobře se nehodí pro hudební účely. Rozložení kmiten a uzlů na příčně se chvějící tyči ukazuje obr. 14, přičemž obr. 1-45a ukazuje tyč, která je na obou dvou koncích volná a obr. 1-45b tyč, která je na jednom konci upevněna.

*Ladička* se používá jako zdroj zvuku se známou a konstantní frekvencí. Je to kovová, obvykle ocelová tyč, ohnutá do tvaru vidlice, která má v místě ohybu nožičku. Jestliže udeříme na některé rameno ladičky například měkkým kladívkem, ramena ladičky se rozechvějí příčně, přičemž nožička jako celek kmitá podélně. Ladička může při svém základním tónu vydávat i neharmonické a o mnoho vyšší tóny, které však vlivem tlumení poměrně rychle zanikají. Teplota má na frekvenci jejího chvění jen velmi malý vliv. Pro ocelovou ladičku je tato závislost vyjádřena pokusně získaným vzorcem  $v = v_0 (1 - 0,0011t)$ . Ladičky ze slitiny zvané *elinvar* (niklová ocel) vydávají tón, jehož frekvence se s teplotou prakticky vůbec nemění.

Kovové nebo skleněné, uprostřed upevněné desky kruhového nebo čtvercového tvaru je možné uvádět do příčného chvění pomocí smyčce, který taháme po okraji desky, přičemž desku přidržujeme prstem v některém bodě jejího obvodu. Tímto rozechvíváním se můžeme přesvědčit, že se desky chvějí nejrůznějším způsobem. Kdybychom takovou desku, upevněnou ve vodorovné poloze, posypali jemným pískem, písek by se během kmitání přesunul do uzlových čar a vznikly by tzv. *Chladního obrazce*. Z těchto pokusů vyplývá, že deska může vydávat několik základních tónů a současně velmi mnoho vysokých tónů, které však (stejně jako u příčně se chvějících tyčí) nejsou harmonické. Základní tón desky je tím vyšší, čím menší a hrubší je deska. Tenké desky, i když jsou malé, mají základní tóny poměrně hluboké a můžou se chvět různým způsobem. Právě proto můžou reprodukovat různé zvuky s velkou přesností, což se využívá v mikrofonech a reproduktorech zvuku.

Velké desky, pokud jsou dost hrubé, mohou vydávat přiměřeně vysoký zvuk, který je v důsledku velikosti desky i mohutný. Těmito deskami jsou v zásadě *kostelní zvony*. Volbou vhodného tvaru zvonu je možné dosáhnout, že jeho základní tóny jsou konsonantní, čímž se zvuk zvonu stává současně lahodný a velebný.

*Bubny* jako zdroje zvuku využívají napjaté blány. Jejich neurčitý zvuk slouží jen na podporu rytmu. Pokud je blána napnutá nad vhodnou rezonanční dutinou, potřebným vypnutím blány je možné dosáhnout, že vydávaný zvuk má svoji výšku zřetelnou. To se využívá u *tympanonů*, což jsou měděné kotle tvaru dutých polokoulí, přes které je napnutá dobře vypracovaná telecí kůže.

### 3.7 Vznik, vlastnosti a použití ultrazvuku

Podle všeobecného zvyku se zvukem nazývá jen takové vlnění hmotného prostředí, o kterém se můžeme přesvědčit sluchem, tedy vlnění v rozsahu frekvencí 16 - 20 000 Hz (obr. 7 a 8), přičemž tyto hranice jsou do jisté míry individuální. S ohledem na tuto okolnost (a podle analogie s názvy vlnění v optice) se vlnění jakéhokoliv hmotného prostředí s frekvencí menší než 16 Hz nazývá *infrazvuk* a vlnění s frekvencí větší než přibližně 20 000 Hz *ultrazvuk*. Prakticky zajímavým jevem je hlavně vlnění ultrazvukové (nadzvukové). Ultrazvuk se tedy od obyčejného zvuku liší jen svojí vysokou frekvencí. Jeho poměrně příliš vysoká hodnota je příčinou, že se jako zdroje ultrazvuku obvykle používají speciální přístroje a zařízení. Z čistě mechanických zdrojů ultrazvuku jsou to zejména: speciálně konstruovaná kovová uzavřená píšťala velmi malých rozměrů, tzv. *Galtonova píšťala*, a na podobném principu založený *Hartmanův akustický generátor*, ve kterém proud vzduchu unikající z kuželové trubice naráží na válcový rezonátor. Pomocí Hartmanova generátoru lze získat ultrazvuk s frekvencí 130 kHz a při použití vodíku až 500 kHz. Při pokusech s ultrazvukem a při jeho praktickém používání jsou zdroji ultrazvuku nejčastěji piezoelektrické nebo magnetostrikční ultrazvukové generátory, které jsou o mnoho lépe ovladatelné než generátory mechanické.

Protože jsou ultrazvukové vlny velmi krátké, ultrazvuk se šíří prostředím prakticky přímočaře a při odrazu od překážek platí zákon odrazu. Jeho jinou význačnou vlastností je, že na rozdíl od obyčejného zvukového vlnění je ultrazvuk ve vzduchu a jiných plynech značně absorbován, a to tím víc, čím je jeho vlnová délka menší. Naproti tomu v kapalinách,

například ve vodě, se ultrazvukové vlnění může rozšířit i do velmi velkých vzdáleností. Tuto vlastnost ultrazvuku dobře vyjadřují hloubky  $x$  vzduchové a vodní vrstvy, potřebné k zeslabení intenzity ultrazvuku na polovinu, uvedené v tabulce 5.

| Prostředí | $f = 10$     | 100    | 500    | 1 000 kHz |
|-----------|--------------|--------|--------|-----------|
| Vzduch    | $x = 220$ m  | 220 cm | 4,8 cm | 2,2 cm    |
| Voda      | $x = 400$ km | 4 km   | 100 m  | 40 m      |

Tabulka 5 Vrstvy zeslabující intenzitu ultrazvuku na polovinu

Ultrazvuk se v praktickém životě využívá pro svoje významné vlastnosti různými způsoby. Jeho malá absorpce ve vodě umožňuje velmi rychle a pohodlně měřit například hloubky moří tzv. *metodou ozvěny ultrazvuku*. Zdroj ultrazvuku upevněný na lodi pod vodní hladinou vysílá velmi krátké ultrazvukové impulsy, které se po odrazu ode dna moře vracejí a působí na přijímač ultrazvuku. Jestliže mezi vysláním a zachycením ozvěny ultrazvukového signálu uplynul čas  $\Delta t$  a rychlost zvuku ve vodě je  $v$ , potom hloubku moře určuje vzorec

$$h = \frac{1}{2} v \Delta t$$

Odraz ultrazvuku na rozhraní dvou hmotných prostředí se využívá i k hledání kazů v kovových výrobcích. Rychlé změny tlaku v kapalinách, kterými se ultrazvuk šíří, vyvolávají kmitavý pohyb částic, které se v nich vznášejí. Ultrazvukem se dá tímto způsobem podporovat *homogenizace heterogenních soustav*, tj. vytvářet velmi jemné disperzní (rozptýlené) soustavy, jakými jsou *suspenze, emulze, pěny a koloidní roztoky*. Ultrazvuk účinkuje i na větší molekuly a podporuje jejich chemické reakce. Využíváním tohoto účinku se zabývá obor chemie, který se nazývá *fonochemie*.

### 3.8 Odraz a pohlcování zvuku

Jestliže zvukové vlnění dopadá na rovnou stěnu, jejíž rozměry jsou v porovnání s vlnovou délkou vlnění o mnoho větší, část energie vlnivého pohybu vzduchu vniká do materiálu stěny, ve kterém se postupně absorbuje a druhá část se od stěny odráží, přičemž se úhel odrazu stěny rovná úhlu jeho dopadu. Při kolmém dopadu se vlnění vrací zpět, a pokud je zdroj zvuku ve vzdálenosti alespoň 17 m od stěny, potom je sluch schopný rozeznat

odražený zvuk od původního, čímž vzniká *ozvěna*. Při této, pro vznik ozvěny minimální potřebné vzdálenosti, kterou zvuková vlna proběhne tam a nazpátek, je časový interval mezi vysláním zvukového signálu a jeho přijetím  $\Delta t = 2 \cdot 17 \text{ m} : 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 0,1 \text{ s}$ . To znamená, že sluchem můžeme rozeznat dva po sobě jdoucí přijímané zvukové signály pouze tehdy, jestliže je mezi nimi časový odstup alespoň 0,1 s.

V důsledku toho, že při dopadu zvukového vlnění na stěnu část zvukové energie proniká do druhého prostředí a jen zbytek se vrací, intenzita odraženého vlnění  $i$  je vždy menší než intenzita na stěnu dopadajícího vlnění  $i_0$ . Podíl

$$\alpha = \frac{i_0 - i}{i_0}$$

se nazývá koeficient absorpce zvuku při odraze a závisí především na materiálu stěny, ale mění se i s výškou zvukového vlnění - pro nižší tóny je koeficient absorpce tónu menší a pro vyšší tóny je naopak o něco vyšší. Koeficienty absorpce některých pevných materiálů pro zvuk s frekvencí 512 Hz popisuje tabulka 6.

| Materiál              | Koeficient absorpce | Materiál        | Koeficient absorpce |
|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| Mramor                | 0,010               | Dřevěná podlaha | 0,10                |
| Beton                 | 0,015               | Linoleum        | 0,12                |
| Sklo                  | 0,027               | Obrazy          | 0,28                |
| Omítnutá stěna        | 0,025               | Koberce         | 0,29                |
| Neomítnutá stěna      | 0,032               | Plyš            | 0,59                |
| Stěna obložená dřevem | 0,10                | Celotex         | 0,64                |

Tabulka 6 Koeficienty absorpce pro tón 512 Hz

Celkovou absorpci  $A$  místnosti získáme tak, že velikost ploch jednotlivých stěn vynásobíme jejich absorpčními koeficienty a získané součiny sečteme

$$A = \sum a_i S_i$$

Absorpční koeficient otevřeného okna se rovná 1 (od otevřeného okna se zvukové vlnění neodráží), a proto se absorpce otevřeného okna rovná jeho ploše.

To znamená, že absorpci otevřeného okna s plošným obsahem  $1 \text{ m}^2$  je  $A = 1 \text{ m}^2$ . Díky tomuto poznatku se jednotka celkové absorpce (rozměr  $\text{m}^2$ ) nazývá "otevřené okno".

Při počítání celkové absorpce je třeba brát v úvahu i s absorpcí těl osob, přítomných v místnosti a s nábytkem. Tak například na 1 osobu připadá průměrně  $0,42 \text{ m}^2$  (otevřených oken), na dřevěnou židli  $0,01 \text{ m}^2$  a na čalouněné křeslo  $0,09$  až  $0,28 \text{ m}^2$ .

### 3.9 Akustičnost sálů

Jak již bylo řečeno, sluchem můžeme rozpoznat dva po sobě následující zvukové signály pouze tehdy, pokud mezi nimi uplynula doba alespoň  $0,1 \text{ s}$ . Tomuto času odpovídá vzdálenost stěny od zdroje zvuku  $17 \text{ m}$ , potřebná pro vznik *ozvěny*. Tato ozvěna by se dala nazvat jako jednoslabičná, protože čas pro vyslovování jedné slabiky trvá právě  $0,1 \text{ s}$ . Jestliže je však odrazejí stěna blíže, odražené vlnění začne v uchu splývat s vlněním původním a zvuk se tím zesiluje a prodlužuje. Tento jev se nazývá *doznívání zvuku*.

Koncertní, divadelní a přednáškové sály by měly být upravené tak, aby mohl každý posluchač zřetelně poslouchat řečníka nebo hudbu. Místnost, která vyhovuje těmto podmínkám, se označuje, že má *dobrou akustiku*. Je zřejmé, že ozvěna je pro přednáškové nebo koncertní sály nepřijatelná, ale krátkotrvající doznívání je naopak výhodné. Zvuk se tím zesiluje a řeč i hudba získávají na výraznosti.

Dobrá akustičnost sálů je podmíněna zejména těmito podmínkami:

1. Kvalita zvuku, tj. poměr intenzit zvukových vlnění, má být zachována.
2. Dovnitř sálu nemají pronikat žádné zvuky zvenčí.
3. Zvuk má být všude v sále dostatečně silný a podle možnosti alespoň přibližně stejně silný.
4. Jednotlivé zvuky lidské řeči a krátce trvající hudební tóny nesmí splývat.

První z těchto podmínek bývá obvykle splněna automaticky, protože koeficient absorpce zvuku na překážkách je jen velmi málo závislý na jeho frekvenci.

Druhá podmínka je splněna tehdy, pokud je postaráno o vhodnou zvukovou izolaci místnosti. To může být uskutečněno volbou vhodného materiálu stěn, jejich obkládáním izolujícími vrstvami, dvojími oblouky, dveřmi, apod. Větší problémy v betonových stavebách může působit vedení zvuku betonovými sloupy, kovovými rourami a ventilačními komíny. Zvukovou propustnost stěn udává jejich *koeficient propustnosti*  $p$ , daný podílem intenzity propuštěného zvuku a zvuku na stěnu dopadajícího:  $p = \frac{i}{i_0}$ . Jestliže propustnosti

jednotlivých ploch s obsahy  $S_1, S_2, \dots$  jsou  $p_1, p_2, \dots$ , proniká do místnosti zvukový příkon

$$i(p_1S_1 + p_2S_2 + \dots) = i_0P$$

kde  $P = \sum p_i S_i$  je *celková zvuková propustnost* stěn. Uvnitř místnosti se ustálí taková intenzita zvuku, při které se zvuková energie vnikající do místnosti rovná pohlcené energii při odrazech na stěnách.

$$i_0P = iA, \text{ tj. } i = i_0 \frac{P}{A}$$

Pod útlumem zvuku stěnami se rozumí podíl

$$U = \frac{i}{i_0} = \frac{P}{A} = \frac{p_i S_i}{a_i S_i}$$

Jestliže intenzita souvisí s hladinou jeho intenzity podle vzorce  $i = k 10^s, U = 10^{s-s_0}$ . Útlum stěn se proto udává i počtem decibelů, o které je hladina intenzity zvuku vnitřní místnosti menší než venku. Ideální útlum je takový, který sníží průměrnou hlasitost vnějšího zvuku pod zvukový práh. V praxi se však připouští: pro ateliéry zvukového filmu a rozhlasové ateliéry 6 až 10 decibelů, pro nemocnice 8 až 12 decibelů, pro školy, kostely, knihovny a divadla 10 až 20 decibelů a pro kanceláře 20 až 30 decibelů.

Velmi nepříjemné jsou občasné silnější zvuky (troubení automobilů, netlumené motory, chůze po nekryté podlaze aj.). Ty je třeba odstraňovat na místě jejich možného vzniku.

Poslední dvě podmínky pro akustičnost sálů, jak byly uvedeny výše, spolu úzce souvisejí a do jisté míry se navzájem odporují. Představují akustický problém sálů v užším smysle. Totiž pokud má být zvuk všude v sále i daleko od řečníka (nebo orchestru) dostatečně silný aniž by byl v blízkosti řečníka příliš silný, je nevyhnutelné, aby se využilo i odrazu

zvuku. Nesmí se to ovšem stávat mnohokrát, protože by to vedlo k rušivému doznívání. Proto je účelné, když je za řečníkem (orchestrem) odražející stěna parabolického tvaru a pokud je strop dost vysoko nad obecenstvem a upravený tak, aby odrazil zvuk dolů. Podlaha už zvuk odrazet nemá, a proto je pokryta koberci a křesla jsou čalouněná.

Hladina hlasitosti přiměřeně silného zvuku, pro lidské ucho i nevhodnějšího je asi 60 fónů. Jeho hladina intenzity je přitom 60 decibelů. Za dobu doznívání  $\tau$  v sále se bere čas, za který se hlasitost tohoto zvuku zmenší na nulu. Experimentálně bylo zjištěno, že nejvýhodnější doba doznívání pro přednáškové síně je 0,8 až 1,0 s a pro koncertní sály 1,0 až 1,5 s. V blízkém okolí zdroje zvuku by měly být stěny poměrně dobře odražlivé a naopak v odlehlém konci sálu podstatně více pohltivé. Na odlehlém konci sálu jsou nebezpečné zejména zaoblené stěny, které koncentrují zvuk do jediného místa a vedle sebe zanechávají zvukem nepřesycené prostory.

### 3.10 Vznik a složení lidského hlasu

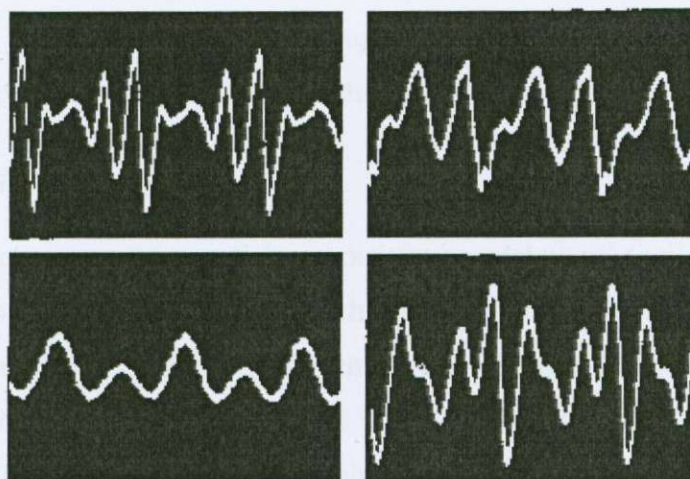
Lidský hlas vzniká podobným způsobem jako zvuk v jazýčkové píšťale. V hrtanu jsou dvě pružné blány, nazývané hlasivky, které jsou při hovoření a zpívání napnuté tak, že je mezi nimi úzká hlasová štěrbin. Proudem vzduchu z plic se hlasivky rozkmitají, čímž v prostoru na druhé straně hlasivek vzniká pravidelné kolísání tlaku vzduchu, které se šíří skrz ústa do okolí jako zvukové vlnění nazývané lidským hlasem.

Výška hlasu závisí na délce hlasivek (u mužů asi 18 mm, u žen asi 12 mm) a jejich napínání, které se působením příslušného svalstva může měnit. Tyto hranice určují výškový rozsah lidského hlasu, který se rovná asi dvěma oktávám, které mohou být u různých osob v různých polohách.

Různé zabarvení lidského hlasu, které rozeznáváme hlavně podle samohlásek, vzniká rezonancí hrtanové, ústní a nosní dutiny. Jejich značný útlum na měkkých stěnách způsobuje, že tyto dutiny jsou schopné zesilňovat široký obor tónů okolo jejich vlastních tónů, tzv. formantů. Vlastní tón neměnné hrtanové dutiny je tzv. vedlejší formant s frekvencí asi 400 Hz (tón  $g^1$ ). Hlavní formant, vlastní tón ústní dutiny, se může měnit polohou jazyka, zubů a rtů v širokém rozsahu asi od 175 Hz ( $f$ ) do 3700 Hz ( $b^4$ ). Dutina nosní má jen menší vliv, který se projevuje například při rýmě. U složitějšího zvuku, který vzniká v hlasivkách, se v rezonančních dutinách zesilují hlavně frekvence v okolí formantů. Hlavní formant je měnitelný, a proto se



může měnit i složení lidského hlasu, čímž právě vznikají různé samohlásky. Nejnižší je formant samohlásky u, asi 175 Hz (tón f). Při obvyčejné řeči je v této samohlásce pouze základní tón. Tím se dá vysvětlit zvuk ladičky, ve kterém je také prakticky jen základní tón, a proto budí dojem samohlásky u. Formanty ostatních samohlásek jsou postupně vyšší: pro o asi 400 Hz ( $g^1$ ), pro a 800 Hz ( $g^2$ ), pro e 2300 Hz ( $d^4$ ) a pro i 3700 Hz ( $b^4$ ). Grafický záznam kolísání tlaku vzduchu při vyslovování jednotlivých samohlásek je reprodukován na obr. 17. Je na něm vidět, že při souvislé a obvyklým způsobem hovořené řeči mají všechny samohlásky stejnou základní frekvenci, ke které se přidávají formanty - nejvyšší při vyslovování hlásky i. Při mluvení šeptem jsou hlasivky uvolněnější, a proto základní tón nevzniká. Vzduchovým proudem unikajícím z plic se rozechvívají jen tři rezonanční dutiny, což na porozumění řeči stačí.



Obr. 1-47 Grafický záznam tlaku vzduchu jednotlivých samohlásek (a, e, i, o)

Souhlásky vznikají jako šelesty při proudění vzduchu skrz zúžená místa (například souhláska s je soubor velmi vysokých tónů, vznikajících při proudění vzduchu mezi zuby) nebo tím, že rty, zuby nebo jazyk náhle otvírají cestu pro vzduch proudící z plic, čímž vznikají jen krátce trvající nepravidelné zvuky.

Aby byl reprodukován lidský hlas dostatečně srozumitelný, je třeba, aby příslušné zařízení dostatečně rovnoměrně reprodukovalo i tóny o poměrně vysokých frekvencích. Podle zkušeností dokonalého přenosu řeči telefonem nebo rozhlasovým reproduktorem je třeba, aby membrána správně reprodukovala tóny až do výšky asi 8 000 Hz. Pokud se však uspokojíme pouze s porozuměním řeči, jako je to při telefonování, stačí, pokud membrána reprodukuje

správné tóny do výšky asi 2 600 Hz. Se zmenšováním této hranice srozumitelnost řeči klesá a končí už při frekvenci asi 1 000 Hz.

Vlastní reprodukováný hlas se nám zdá nepřirozený. Je to způsobeno faktem, že když mluvíme, tak svůj hlas slyšíme jinak než ti, kteří jsou kolem nás. Zvuky, které vydáváme, přicházejí k nim vzduchem, jednak přímo a jednak po odrazu od pevných předmětů (např. stěn). Svůj hlas však slyšíme hlavně díky vodivosti kostí. Chvění se totiž šíří od hlasivek do vnitřního ucha (do zakončení sluchového nervu) prostřednictvím souboru kostí, které jsou mezi hlasivkami a sluchovým nervem. Tento systém kostí tvoří jakýsi druh zvukového filtru, který propouští některé frekvence lépe a jiné zase hůře. To znamená, že zabarvení přenášených zvuků je dosti pozměněno.

Za normálních okolností k nám ovšem přichází část zvuků též vzdušnou cestou, ale pouze po odrazu od různých povrchů. Pokud by se člověk postavil do dokonale akusticky izolované kabiny, jejíž stěny dokonale pohlcují zvuky, slyšel by se pouze díky vodivosti kostí. Měl by přitom nepříjemný pocit, jako by se dusil ...

### 3.11 Sluchový orgán

Sluchový orgán reaguje na tlak vykonávaný molekulami (nejčastěji vzduchu) a patří proto mezi mechanoreceptory. Je ze všech mechanoreceptorů nejcitlivější, zaznamenává energii již o hodnotě asi  $5 \cdot 10^{-23}$  J. Orgánem sluchu je ucho (latinsky *auris*). Lidské ucho vnímá zvukové vlny v rozsahu frekvencí 16 - 20 000 Hz a nejcitlivější je pro tóny v oblasti okolo 1000 - 3000 Hz (mluvené slovo). Je schopné rozlišit přibližně 400 000 rozličných druhů zvuků. U zvířat (krysa, pes) je rozsah vnímání zvukových vln posunut většinou k vyšším frekvencím. Tak například kočka vnímá zvukové vlnění o frekvenci 60 Hz - 65 000 Hz, pes 15 Hz - 50 000 Hz (ultrazvukové píšťalky) a mol dokáže vnímat vlnění o frekvenci až 150 000 Hz. Jiná zvířata, např. netopýr, využívají ultrazvuk k orientaci.

Zvukové vlnění postupuje uchem tak, že se zvukové vlny nejprve zachytí ušním boltcem. Tlaková zvuková vlna potom pokračuje vnějším zvukovodem (dlouhým 2 - 3 cm), zakončeným bubínkem. Molekuly vzduchu ve fázi zhuštění narážejí více na membránu bubínku a způsobují, že se prohýbá do dutiny středního ucha. Membrána bubínku je mimořádně citlivá, odpovídá na tlaky, na něž nejcitlivější dotykové receptory kůže jsou zcela necitlivé. Z bubínku se zvuková energie převádí dále dutinou středního ucha soustavou tří

malých sluchových kůstek (kladívko, kovadlinka, třmínek) na membránu oválného okénka vnitřního ucha.

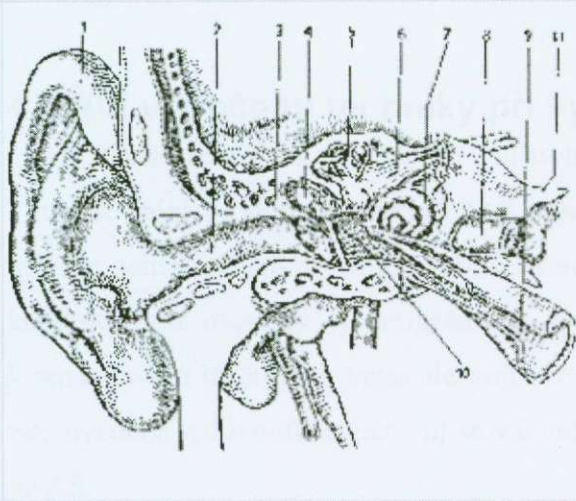
Vlastní receptory zvukových vln jsou uloženy ve vnitřním uchu v blanitém hlemýždi, což je útvar uložený v kostěném labyrintu kosti skalní. Blanitý hlemýžď je vazivová, slepě uzavřená trubička stočená do tvaru ulity (2,5 závitů), vyplněná tekutinou - endolymfou. Je uložen v kostěném hlemýždi v perilymfě. Blanitý hlemýžď rozděluje kostěný hlemýžď na dvě patra - na patro předsíňové a bubínkové. Obě patra se spojují ve vrcholu hlemýžďe.

Sluchové receptory v blanitém hlemýždi jsou součástí Cortiho orgánu. Jsou usazeny na vazivové membráně dolní stěny blanitého hlemýžďe (bazální membrána) a svými vláskovitými výběžky se těsně dotýkají krycí membrány. Zvukové vlny se přenášejí sluchovými kůstkami na oválné okénko, které rozechvěje perilymfu, v níž je uložen blanitý hlemýžď. Vlnění se přenáší na endolymfu v blanitém hlemýždi. Kmity endolymfy způsobují posun krycí membrány proti membráně bazální, na níž spočívají vláskové buňky. Vlnění perilymfy se vyrovnává vyklenutím kulatého okénka do bubínkové dutiny středního ucha.

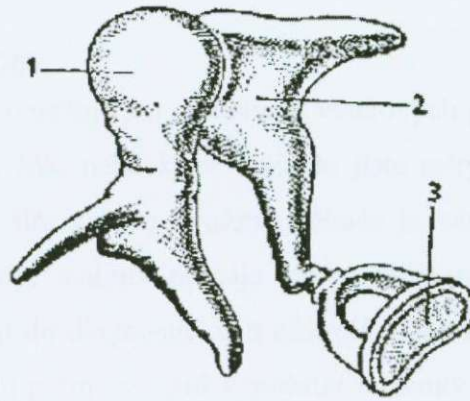
Každá z vláskových buněk je vybavena asi 100 vlásky (ciliemi), které jsou v těsném kontaktu s krycí membránou. Relativní pohyb obou membrán proti sobě vede k nepatrnému ohybu vlásků, což představuje podnět pro vláskové buňky, který vyvolává jejich podráždění.

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

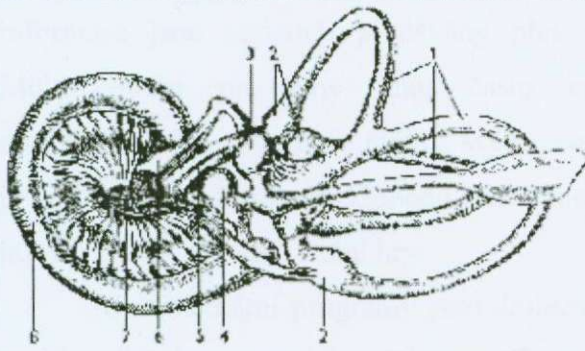
Vláskové buňky jsou ve spojení s vlákny nervových buněk VIII. hlavového nervu (nerv předsíňohlemýžďový). Podráždění vláskových buněk se přenáší na nervová vlákna, kde vznikají akční potenciály, které se vedou do mozkového kmene a odkud až do spánkového laloku mozkové kůry (sluchové centrum).



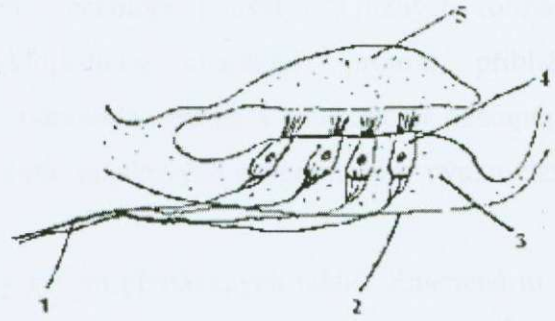
Obr.148 1 boltec, 2 zevní zvukovod, 3 bubínek, 4 sluchové kůstky středního ucha, 5 polokruhové kanálky, 6 předsiňohlemýžďový nerv, 7 kostěný hlemýžď, 8 tepna, 9 Eustachova trubice, 10 dutina středního ucha, 11 kost skalní



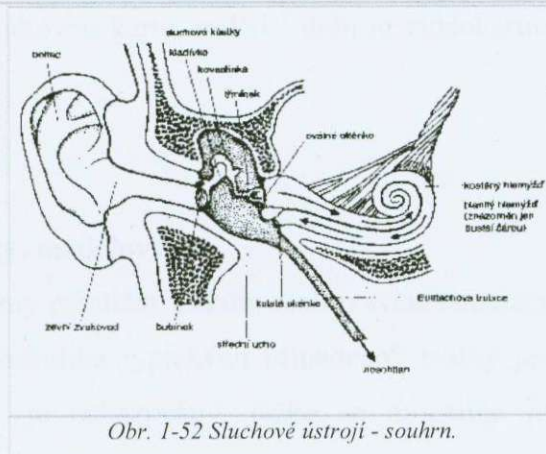
Obr. 149 1 kladívko, 2 kovádlínka, 3 třmínek



Obr. 1-50 1 polokruhové trubičky, 2 baňky, 3 vejčitý váček, 4 kulovitý váček, 5,7 nerv předsiňohlemýžďový, 6 nerv lícni, 8 blanitý hlemýžď



Obr. 1-51 vlákna předsiňohlemýžďového nervu, 2 bazální membrána, 3 Cortiho orgán, 4 sluchové buňky s vlásky, 5 krycí membrána



Obr. 1-52 Sluchové ústrojí - souhrn.

## 4. Užití výpočetní techniky při výuce

Často se pojem „počítač ve vyučování“ omezuje jen na užívání výukových programů. Těmi se míní programy, s nimiž buď pracuje žák, nebo které mají do jisté míry nahradit učitele; tento výklad je příliš zúžen, protože širší záběru využití počítače je větší. V této kapitole jsou uvedeny ty programy a systémy, s nimiž pracuje žák a které mají vztah k poskytování informací, nebo alespoň zapadají do diagnostických nástrojů. Tato kapitola je zde uvedena z důvodů seznámení se základními pojmy využití výpočetní techniky při výuce na ZŠ.

### 4.1. Multimediální programy

Program zařadíme do této skupiny ve chvíli, kdy komunikace programu s uživatelem používá více typů údajů – text, obrázky, grafiku, animace, videosekvence, zvuk, tzn. Jestliže informace jsou uživateli předávány přes různé receptory (smysly) v různých formách. Multimediální programy mají často encyklopedický charakter, protože přibližují multimediálním způsobem realitu světa. Tomu odpovídá většina v současnosti dostupných programů - množství encyklopedií a učebních textů, jazykových programů pro výuku cizích jazyků „živé“ příběhy, akční hry.

Multimediální programy jsou definovány typem předávaných údajů. Znamená to, že multimediální program bývá dále zařazen do dalšího typu programu podle svého specifického určení.

Předpokladem pro použití multimediálního programu je technické vybavení počítače, který musí obsahovat zvukovou kartu, raději i dobrou videokartu na zobrazování a obvykle jednotku CD ROM.

### 4.2. Simulační programy, modelování

Simulační programy přibližují žákům realitu světa simulací reálných jevů na počítači. Simulace se používá v několika typických případech“ reálný jev je nedostupný, je přímo smyslově nedosažitelný, je nebezpečný, těžko se modeluje jinými prostředky nebo je modelování jinými prostředky finančně nákladné.

Téměř nezbytná je možnost ovládní simulací, nastavení parametrů modelu, řízení probíhajících procesů, jejich znázornění nebo analýza. Zajímavé je modelování z oblastí životního prostředí a ekologie.

Programy jsou ve výuce velmi účinné, protože mohou věrně přiblížit různé části světa, a navíc s nimi mohou žáci přímo manipulovat. Bohužel dobrý simulační program pro výuku je náročný na vytváření, proto jich zatím není mnoho (kromě některých matematických a fyzikálních systémů a různých didakticky spíše nevhodných her.)

### 4.3. Testovací programy

Programy zjišťují míru získaných znalostí, schopností a dovedností žáka. Výstupy jsou jedním z nejpoužívanějších způsobů diagnostiky výuky, obvykle pro jednoduchost zadávání a vyhodnocování testů.

Bohužel není mnoho testů, které měří s vysokou jistotou právě to, co učitel zamýšlí. Každý dobrý test by měl projít alespoň několika ověřovacími koly včetně následného zhodnocení testu, tedy testových otázek a odpovědí v kontextu plánovaného didaktického cíle testování. Při zhodnocení se používají poměrně jednoduché výpočty, ale v rutinní praxi se jimi asi nikdo nezabývá. Smysl běžných testů ve škole pak může zapadat jen do nejjednodušší škatulky, zda žák vybral či zapsal odpověď, kterou učitel definuje jako správnou, s dalším rozříděním do pěti úrovní známek.

Zatím nejsou rozšířeny systémy, které učitelé zpracují výsledky testu a dají mu aspoň základní představu o kvalitě a smysluplnosti zadávaného testu. Naopak, programů pro testování je dost, ne vždy však mají vysokou pedagogickou hodnotu.

### 4.4. Výukové programy

Výukový program musí zajistit tři nutné podmínky: předání informací (učiva) žákovi, kontrolu získané úrovně znalostí a následnou reakci podle výsledků zpětnovazební informace. Největším problémem je právě reakce, protože teoreticky by výukový program měl reagovat jako dobrý pedagog, tedy program by měl mít vysokou míru umělé inteligence. Naštěstí, ve zjednodušeném pojetí, se dá učivo rozložit do malých celků s malým množstvím předávaných údajů, které by se obvykle měl žák naučit beze zbytku a pro které se předpokládá několik ověřených způsobů výuky a kontroly.

#### 4.5. Informační zdroje

Jsou to všechny ostatní zdroje dat určených pro výuku. Budou prolínat jinými typy programů kvůli své formě (zejména databázovými a multimediálními) a bude záležet i na kontextu použití. Důvodem pro zařazení pojmu „informační zdroj“ do samostatné skupiny je významnost jakéhokoliv systému (nejen programového, ale i souborů dat a počítačových sítí) použitého v roli zdroje informací.

Příkladem jsou třeba zákony, osnovy, mapa ČR s místními daty aj. Roste přitom význam informací zpřístupněných přes Internet.

#### 4.6. Videokonference

Videokonference představuje situaci, kdy spolu ve stejné chvíli diskutují účastníci jednání („konference“) prostřednictvím počítačových sítí. Přenáší se přímo obraz a zvuk snímáný videokamerou, takže každý účastník se může dívat na kohokoliv jiného a diskutovat s ním. Praktickým problémem je kapacita přenosových linek, která silně omezuje kvalitu obrazu a rychlost jeho změn. Rozhovor bývá ve vyhovující kvalitě.

Komunikace s využitím obrazu je perspektivní variantou kontaktu učitele se žákem.

#### 4.7. Distanční formy výuky

Pojem „distanční výuka“ je vysvětlován s různou šíří významu – od situace, kde žák nebývá přítomen výuce v učebně a učí se doma (nejde o záškoláctví, ale o styl výuky), až po komplexní samostudium rozsáhlých tematických celků s využitím výukových materiálů vytvářených přímo pro tento typ výuky. Charakteristický způsob distančně orientovaného studia je takový, že žák obdrží materiály alespoň částečně přizpůsobené samostudiu (obsah kursu a metodický postup, výukové texty z řadou kontrolních úkolů, bývá i videokazeta s ukázkami, testy na počítači) a současně je osobní kontakt s učitelem (lektorem, tutorem) velmi řídký. Ten bývá nahrazen zasíláním kontrolních úkolů nebo komunikací po počítačových sítích.

Z pohledu počítačových prostředků jsou zajímavé možnosti předávání výukových materiálů a vypracovaných úkolů sítěmi zpřístupňování materiálů a vypracovaných úkolů

sítěmi, zpřístupňování materiálů na Internetu (webové stránky) a komunikace elektronickou poštou.

#### **4.8. Virtuální realita**

Virtuální realita je poměrně nový pojem, které se objevil v praxi počítačů před několika lety. Představuje naprosto nový fenomén v možnostech výuky, protože se žáci ve výuce setkávají přímo se simulovanou realitou, se světem (reálným nebo fantazijním). Oč jde? V principu jde o zvětšení počtu smyslů, které jsou zapojeny do poznávání obsahu výuky, a zároveň o odstranění rušivých podnětů. Je to svým způsobem vyšší stupeň multimediálního systému (v něm působí na žáka jen obrazová a zvuková informace). Je doplněn především o třírozměrné zobrazování a o okamžitou zpětnou vazbu zobrazovaného prostředí a podnětů podle fyzických projevů osoby.

Praktické řešení spočívá v obslužném simulačním programu a v obleku (minimálně helma a rukavice), který si osoba navlékne. V helmě jsou obrazovky, ve kterých se objevuje programem simulovaná realita (označení „realita“ může přitom zahrnout i neskutečné fantazijní světy), reproduktory pro sluchový vjem, perspektivně zřejmě i členy pro vytváření čichového a možná i chuťového vjemu. V helmě a v rukavicích jsou snímače, které snímají pohyb hlavy a rukou osoby. Simulační program podle nich pozná, kam se osoba dívá, na co chce sáhnout nebo co chce uchopit, a podle toho zareaguje příslušným zobrazením. Tím způsobem osoba ovládá simulaci reality. Osoba může také stát na pohyblivém chodníku, ze kterého se snímá chůze.

Na virtuální realitě je náročné zpracování virtuálního programu, vyžadující velmi nákladné materiální tvůrčí zázemí a mnoho práce pro jeho vytvoření. Není zatím možné ho zpracovávat na bázi dobrovolné práce. Současné využití virtuálních systémů se orientuje např. na prostorové hry, ale během několika let by se mohly objevit první didakticky zpracované systémy využitelné pro výuku. Přesto je zavedení virtuálních prostředků do běžného vyučování hudbou budoucnosti.

#### **4.9. Projektově orientovaná výuka s počítači**

V předchozím textu je zdůvodněn smysl práce s informacemi pro učitele v různých fázích jeho didaktické činnosti. Nyní budeme chtít, aby i žáci pracovali samostatně s řadou informací. Cílem kapitoly je poukázat na dosud u nás méně běžné, ale bezesporu přínosné



využívání informačních prostředků jako nástroje žáka při práci v tzv. projektovém vyučování. Zásadní význam nového stylu výuky je v posunu charakteru výuky od přijímání faktů směrem k aktivní práci žáků s daty a ke komunikaci v týmu. V takto koncipované výuce do značné míry mizí hranice mezi jednotlivými obory a žáci spolu s učitelem využívají informačních prostředků komplexně při práci na společně koncipovaných projektech. Jsou i nepřímo nuceni zpracovávat informační zdroje, hledat adekvátní nástroje, rozhodovat se a volit efektivní postupy. Realita školy dosud sice příliš nenapomáhá tomuto stylu výuky, ale skoro vždy záleží na učitelích, jestli alespoň někdy dokážou pro žáky připravit jedno z velice efektivních výukových prostředí. Myšlení lidí má spíše asociativní charakter, než je lineární způsob přebírání poznatků při tradičním způsobu výuky.

Zmínka o projektech zde uvedena především proto, aby bylo připomenuto, že právě počítače a veškeré další informační technologie mají v projektové výuce své významné a přirozené místo.

#### 4.10. Projekt ve škole

Projekty jsou jedna z forem výuky. Svým rozsahem, počtem použitých prostředků, šíří záběru do předmětů (oborů) a různorodostí forem stojí někde mezi řešením jednotlivých jednoduchých školních úloh a skutečnou praxí či modelováním skutečnosti. Při dobrém vedení projektu žáci pracují převážně samostatně, musejí se často rozhodovat a získávat a zpracovávat dostatek informací pro práci.

Při projektovém vyučování žáci kolektivně řeší široce zadanou úlohu – projekt, ve kterém navzájem spolupracují na řešení jeho částí. Forma projektového vyučování nutí k větší samostatnosti práce, umožňuje využít schopnosti všech žáků a vede ke stylu samostatné (byť řízené) práce s informacemi, V projektovém vyučování nemusejí všichni žáci řešit stejný typ úlohy nebo pracovat se stejným prostředkem. Od souboru jednotlivých nebo navazujících úloh se projekt liší hlavně společnou motivací a zároveň různorodostí témat pokrývajících projekt. Od modelování a simulace reality se projekty odlišují hlavně aktivním tvůrčím přístupem k řešení vybraných témat. Části projektu vybírá učitel spolu s žáky podle prostředků, které jsou k dispozici, podle znalostí, schopností a zájmu žáků, charakteru kolektivu, podle možností spolupráce s učiteli jiných předmětů, podle vhodné motivace aj. Projekt je svým charakterem mezipředmětový, pokrývá teší počet oborů (předmětů).

Cíle projektu akcentují kromě obvyklého poznávacího hlediska zvláště psychosociální (komunikační a koordinační) a hodnotově orientační hledisko. Cíle některých projektů se stanovují někdy obtížně pro jejich množství v komplexním projektu.

Forma projektového vyučování není v českých školách ještě úplně obvyklá. Oproti běžným formám vyučování dává žákům relativní volnost spojenou s požadavkem na samostatnost a kolektivnost práce. Výsledky práce není lehké pedagogicky hodnotit. Při práci – řešení části projektu – je žákům často svěřováno rozhodování, které by mělo být podloženo informacemi. Zpočátku si žáci musejí zvyknout na nutnost intenzivní vzájemné spolupráce, i učitel se stává spíše spolupracovníkem žáků, příprava na hodinu je náročnější, ale vlastní práce v hodinách je potom uvolněnější.

Projekt může být popsán různě složitě, na různé úrovni obecnosti a může obsahovat různé informace pro učitele. Jedno z možných vhodných členění je použito jako samo členění následující kapitoly. Nejjednodušší popis bude stručný konkrétní námět, který si učitel celý rozpracuje podle svých představ s využitím prostředků, jež má k dispozici (např. „výstava“ nebo „závody“ jsou obecné, „výstava modelů aut“ a „závody automobilů do vrchu“ jsou konkrétní varianty uvedených projektů).

Pro praktické použití jsou vhodné částečně rozpracované náměty, které mohou být použity hned bez podstatných úprav, ale které je možné vhodně upravovat podle podmínek školy a potřeb učitele. V takovém duchu je popsán projekt v další kapitole.

Abychom přešli do konkrétnější polohy, uvedeme některé vhodné náměty projektů. Dále uvedené příklady jsou popsány spolu s některými možnostmi zpracování :

- *Výstava nebo trvalejší expozice* (příprava, návrh realizace, získání exponátů a informací, propagace, ekonomické zajištění...)
- *Konference, seminář*, popř. společenská akce (propagace, referáty, pohoštění, hlavní a doprovodný program, výzdoba...),
- *Vydavatelství časopisu* (grafické a textové editory, tabulkové kalkulátory – ekonomika, databáze – informace, šíření informací, reportáže),
- *Továrna* (výrobní program, řízení výroby, management, řízení lidských zdrojů, komunikace, výběr uchazečů, propagace, ekonomika...),
- *Škola* (provoz, sklad, kuchyně, hospodaření..., zjištění problémů školy z pohledu vně žáků),

- *Knihovna* (práce s informacemi, služby, datové sítě, nabídka knih, rejstříky...),
- *Expedice* (příprava, vědecké informace, natáčení videopořadu, zpracování dokumentace, vyhodnocení...),
- *Vesmírný let* (příprava, řešení technické, biologické, sociální, psychologické...),
- *Závody a turnaje* (propagace, informace, průběh, zpracování výsledků, občerstvení...),
- *Rodinný domek, domácnost* (stavba, provoz, optimální materiály...),
- *Informační databáze* (budování, nákup prostředků, provoz...),
- *Kuchařské recepty* (textové editory, databáze; vhodné pro dívky),
- *Akciový trh nebo sázková kancelář* (tabulkové kalkulátory, jednoduchá statistika, databáze).

Projekt spojuje několik navzájem odlišných oborů, které se v praxi leckdy uměle staví do protikladu. V projektu se ukazuje na jejich vzájemné sepětí, doplňování výtvarných záměrů použitím programových i technických prostředků, a naopak využití výpočetní techniky ve výtvarné výchově. Náměty v projektu ukazují na potřebnost spojení technických a uměleckých oborů, které je prospěšné všem z nich. Zajímavé je využití informačních zdrojů Internetu pro získávání podkladů pro práci žáků.

Žáky můžeme pro práci na projektu postavit do několika odlišných rolí – architekta, výtvarníka, technika, majitele děl nebo výstavních ploch, ekonoma, vedoucího prodejního stánku... Základní role jsou tři, navzájem se doplňují: majitel galerie zajišťující její provoz, architekt zajišťující její náplň a pracovníci služeb zajišťující její provoz. Role jsou především motivační a jsou přidělovány podle schopností a zájmu žáků.

Projekt je popsán tak, aby mohl být realizován v různých ročnících školy (pro věkový stupeň kolem 11-17 let) i v různých typech škol. Pro realizaci je velmi vhodné spojení práce učitelů více předmětů – především výtvarná výchova, informatika a výpočetní technika nebo praktické činnosti, popř. dále hudební výchova a některý z technický předmětů. Varianty projektu do předmětů a hloubka zaměření nejsou dále popisovány a rozvíjeny.

#### **4.11. Školní vzdělávací program**

Poslední dobou se dost části mluví o Školním vzdělávacím programu základního vzdělání (ŠVP ZV), který do jisté míry ovlivní vyučování na ZŠ, proto je zde uvedena citace Výzkumného ústavu pedagogického v Praze proč vytvářet ŠVP ZV:

„ŠVP ZV se stává povinným dokumentem, který je stanoven školským zákonem, a ředitel školy odpovídá za jeho přípravu i realizaci. Tímto vymezením je dána povinnost vytvořit v rámci státem stanovených pravidel (školský zákon, RVP ZV) vlastní vzdělávací program dané školy – *rovina legislativní*

Tvorba ŠVP ZV dává možnost svobodně formulovat představy o nejvhodnější podobě vzdělávání na dané škole. Stává se tak prostředkem profesního zdokonalování učitelů, jejich zvýšené odpovědnosti za vlastní práci i dosažené výsledky – *rovina pedagogická*.

ŠVP ZV má být podkladem pro ucelený systém hodnocení žáků i pro sebehodnocení (autoevaluaci) činnosti školy na různých úrovních. Záměrné a pravidelné hodnocení s jasnými a předem známými pravidly by mělo fungovat jako zpětnovazební mechanismus pro korekci vlastní práce a pro posouzení podílu každého učitele i pracovníka školy na naplňování společných záměrů. Mělo by sloužit i jako významný motiv pro další efektivní změny ve vzdělávání – *rovina evaluační*.

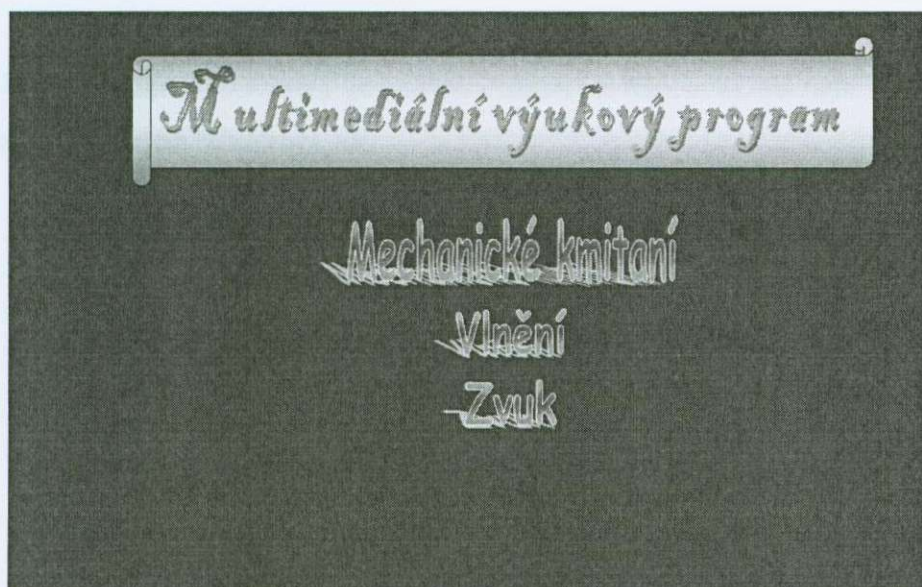
ŠVP ZV bude fungovat jako prostředek propagace školy a jejích záměrů. Dává možnost profilovat školu „na míru“ podle potřeb i zájmů žáků a požadavků jejich rodičů, podle konkrétních podmínek i tradic školy, podle záměrů regionu, požadavků trhu práce atd. Umožňuje pružněji reagovat na konkrétní situaci, zvýšit přitažlivost vzdělávací nabídky školy, prosadit se v povědomí veřejnosti – *rovina společenská*.“

Tato citace má za cíl přibližné seznámení čtenáře s tímto vzdělávacím programem.

## **5. Popis multimediálního programu a zařazení do výuky**

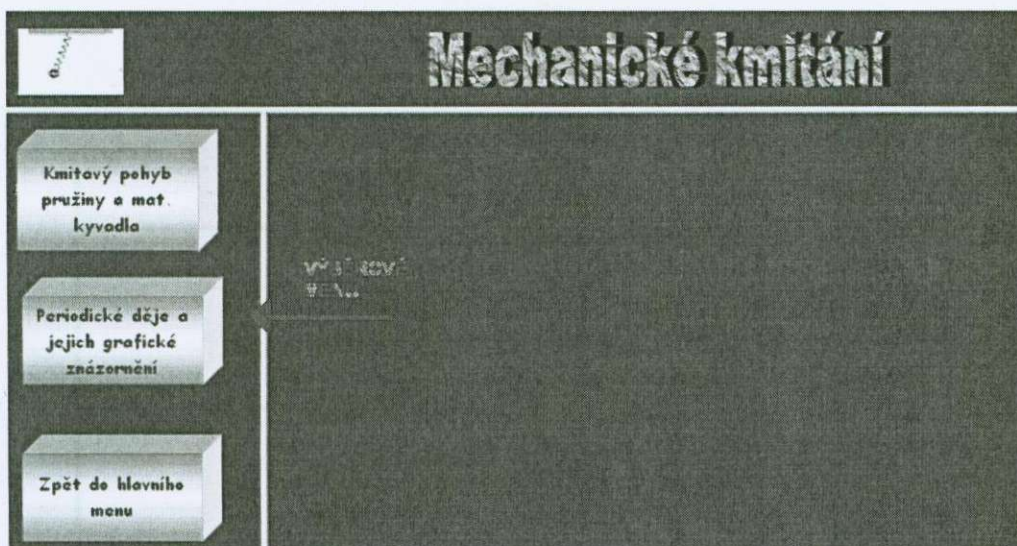
Multimediální výukový program je vytvořen v aplikaci Microsoft Office FrontPage 2003 firmy Microsoft a to jako www stránka.

Program se skládá ze tří základních témat, ze kterých si uživatel může vybrat na startovní stránce programu.



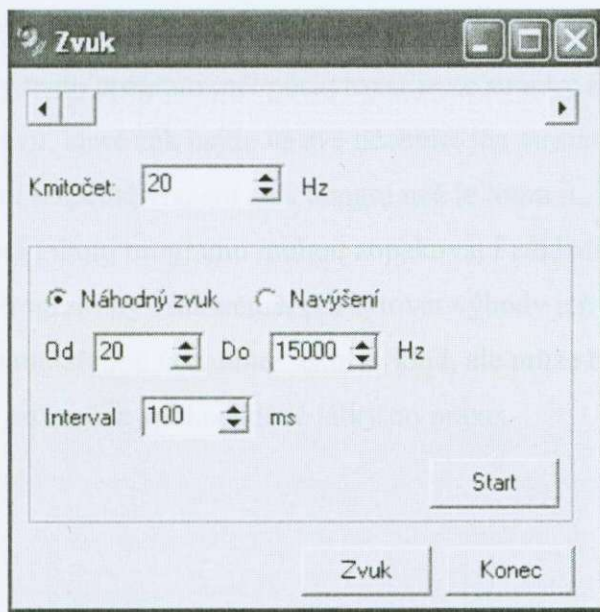
Startovní stránka programu

Po výběru jednoho ze tří témat se otevře „okno“ ve kterém si uživatel vybere z menu, které se nachází po levé straně. Zde má na výběr z několika možností, které se vztahují k danému tématu a možnost vrátit se na startovní stránku výukového programu.

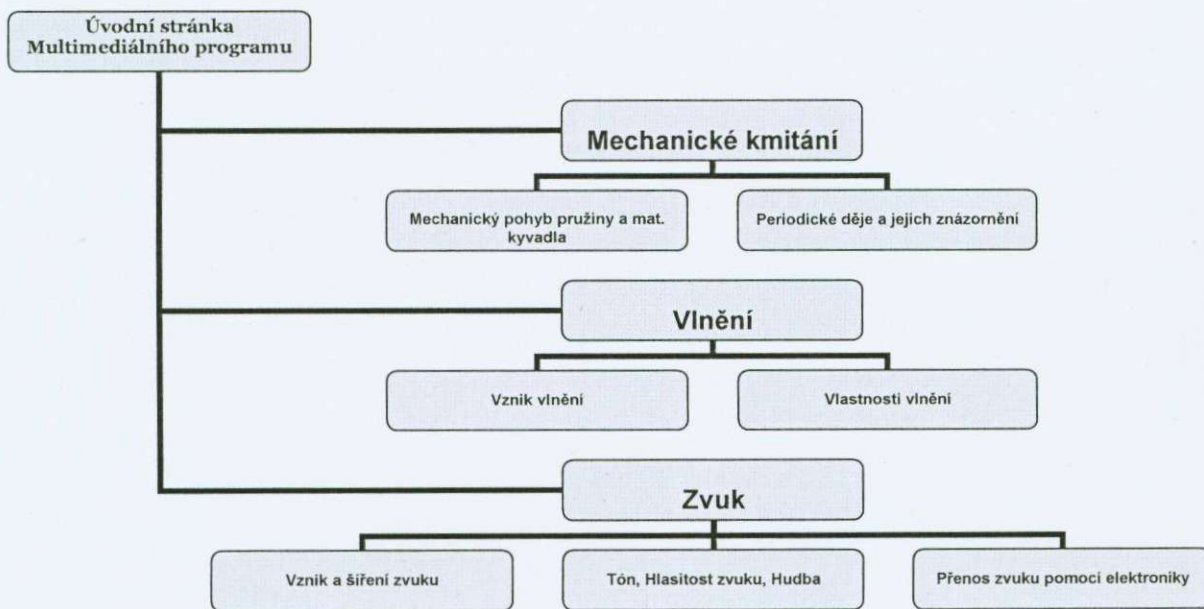


Stránka z menu

U tématu *Zvuk – Tón, Hlasitost zvuku, Hudba* se nachází tlačítko, které spustí program *Zvuk*, který funguje jako tónový generátor. Program v této verzi, ale není bohužel funkční pod operačním systémem Windows XP.



Program Zvuk



Blokové schéma Multimediálního programu

Na blokovém schématu Multimediálního programu je patrné její rozložení a téma, kterými se program zabývá. U každého z podtémat dané kapitoly je vždy uveden základní výklad pro žáky základní školy, který je obohacen o vizuální prvky pro lepší pochopení dané problematiky.

Výhody které by tento program měl poskytovat je ze stránky žáků, vizualizace některých fyzikálních jevů, které žák najde ve své učebnici jen ve statické formě, dále lehčí přechod mezi kapitolami a zpětné vracení se k tématu než je tomu u „klasické“ papírové učebnice. Žáci si v rámci tohoto programu mohou zopakovat i základní orientaci na webových stránkách. Program by však neměl poskytovat výhody jen a pouze žákům, nýbrž i vyučujícímu, kterému samozřejmě nenahradí ústní výklad, ale může být jeho pomocníkem při předvádění fyzikálních pokusů a aplikaci dané látky do praxe.

## 7. Závěr

Účelem diplomové práce bylo seznámit čtenáře s podstatou fyzikálních jevů a veličin mechanického kmitání, vlnění a akustiky prostoru a se souvisejícími obory. Práce je obohacena o didaktické poznatky týkající se základních pojmů využití výpočetní techniky při výuce na základní škole.

Cílem, který si tato práce kladla bylo vytvoření výukového programu zaměřeného na mechanické kmitání, vlnění a akustiku. Program by neměl nahrazovat „klasickou“ formu výuky, měl by být pomocníkem jak učitele s výkladem dané látky, tak i žáka s pochopením a ožíváním těchto pojmů. Každý vyučující přistupuje k výuce rozdílně, proto záleží kdy a v jaké formě zařadí tento program do výuky.

Současný vývoj vědy přináší velké množství nových poznatků, které zlepšují životní úroveň civilizovaného světa. S poznatky přichází řada nových termínů, jevů a zákonitostí, které spolu souvisejí, vzájemně se prolínají a doplňují. Úkolem všech oborů vědy je nejen postupovat dál ve výzkumu a vývoji, ale také předat poznatky do praxe, naučit člověka se v nich orientovat a využívat jich ve svůj prospěch. Část tohoto úkolu by měla v oboru splnit i tato práce.



## Literatura:

- [1] Hlavička, A.: Fyzika pro pedagogické fakulty. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1978.
- [2] Jáchim, F., Tesař, J.: Fyzika pro 9. ročník základní školy, Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 2001
- [3] Svoboda, E. a kol.: Přehled středoškolské fyziky, Prométheus, Praha, 1998
- [4] Kašpar, E.: Didaktika fyziky, Státní Pedagogické Nakladatelství, Praha 1978
- [5] Ilkovič, D.: Fyzika I., Alfa, Bratislava 1972
- [6] Beránek, L.: Snižování hluku, SNTL, Praha 1965
- [7] Sokolowsky P., Šedivá Z.: Multimédia, Grada Praha, 1994
- [8] Salava T.: Holsinger E.: Jak pracují multimédia, UNIS Brno, 1995
- [9] Špelda, A.: Hudební akustika. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1978.
- [10] Hutchins, C.A.: The Physics of Music. Scientific American, San Francisco, 1977.
- [11] Syrový, V.: Zvuková kvalita a její klasifikace. Hudební nástroje, Praha, 1985.
- [12] [www.vuppraha.cz](http://www.vuppraha.cz)
- [13] [www.akustika.cz](http://www.akustika.cz)
- [14] [www.walter-fendt.de](http://www.walter-fendt.de)
- [15] [www.fyzika.info](http://www.fyzika.info)
- [16] [www.labo.cz](http://www.labo.cz)
- [17] [fyzweb.mff.cuni.cz](http://fyzweb.mff.cuni.cz)
- [18] [faraday.physics.utoronto.ca](http://faraday.physics.utoronto.ca)