

Akustika

Ing. Stanislav Jakoubek



Přehled studijních materiálů

Číslo DUMu	Název DUMu
<u>1</u>	<u>Vymezení pojmu akustika</u>
<u>2</u>	<u>Vznik a druhy zvuku</u>
<u>3</u>	<u>Šíření zvuku</u>
<u>4</u>	<u>Vlastnosti zvuku</u>
<u>5</u>	<u>Infrazvuk, ultrazvuk</u>
<u>6</u>	<u>Základy fyziologické akustiky</u>
<u>7</u>	<u>Základy hudební akustiky</u>
<u>8</u>	<u>Ochrana před škodlivými účinky zvuku</u>

Vymezení pojmu akustika

Ing. Stanislav Jakoubek



Co je to akustika?

- ▶ Je speciálním oborem nauky o mechanickém vlnění
- ▶ Zabývá se ději, které probíhají při **vzniku, šíření a vjemu** zvuku
- ▶ Zahrnuje tedy studium **zdroje zvuku, prostředí, kterým se zvuk šíří a přijímače** zvuku (nejčastěji lidské ucho)

Zvuk

- ▶ Zvuk je mechanické vlnění, které vnímáme sluchovým orgánem
- ▶ Širší pojetí: zahrnuje i zvukové vlny, které jsou mimo obor slyšitelných frekvencí (ultrazvuk a infrazvuk)

Různá hlediska studia zvuku

- ▶ **Fyzikální akustika** – vznik zvuku ve zdrojích, šíření zvuku, odraz zvuku, pohlcování, ...
- ▶ **Fyziologická akustika** – vznik zvuku v hlasivkách a jeho vnímání uchem
- ▶ **Hudební akustika** – zkoumá zvuky a jejich kombinaci se zřetelem na potřeby hudby
- ▶ **Stavební akustika** – zkoumá podmínky dobrého poslechu řeči i hudby v obytných místnostech, koncertních sálech, ...
- ▶ **Elektroakustika** – záznam, reprodukce a šíření zvuku

▶ ...

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.

Vznik a druhy zvuku

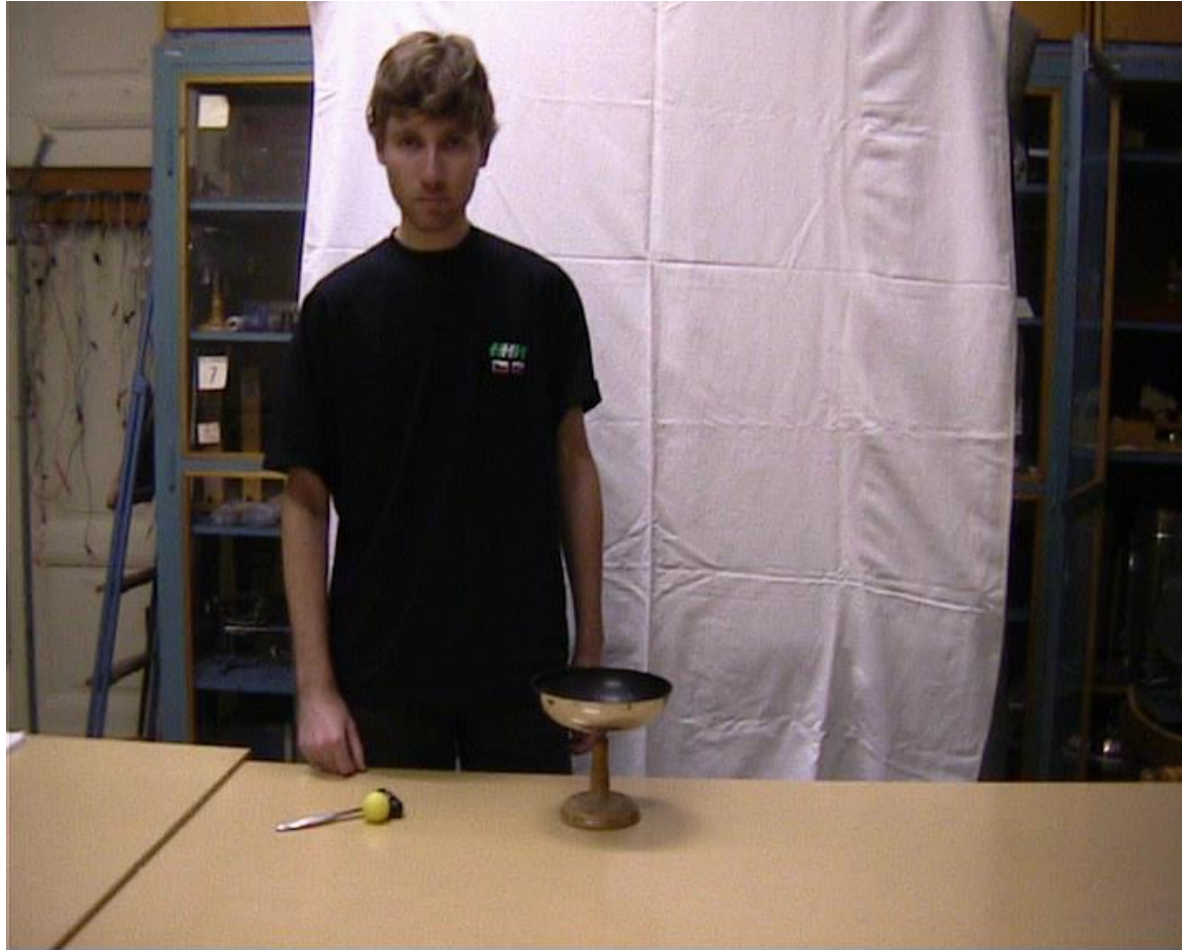
Ing. Stanislav Jakoubek



Zdroj zvuku

- ▶ Může jím být každé **chvějící se těleso** (tj. těleso, ve kterém vzniklo stojaté vlnění)
- ▶ Hudební nástroje, ladičky, hlasivky, chvějící se součástky strojů, motory, ...)
- ▶ U hudebních nástrojů: struny, tyče, desky, membrány, vzduchové sloupce

Těleso vydávající zvuk se chvěje – video



Struna

- ▶ Napjaté pevné vlákno upevněné na obou koncích
- ▶ Rozechvívání: smyčcem (housle, viola, basa), drnkáním (harfa, kytara), nárazem (klavír, cimbál)
- ▶ Po rozechvění se oběma směry šíří postupné příčné vlnění, které se odrazí od konců a interferuje; vzniká stojaté příčné vlnění

Tyč

- ▶ Pevné pružné těleso, které je schopno se rozechvět bez působení vnější napínací síly
- ▶ Mohou chvět příčně i podélně (závisí na způsobu rozechvívání)
- ▶ Použití: xylofon, ladička (příčné vlnění), bručení transformátoru (podélné vlnění)

Ladička

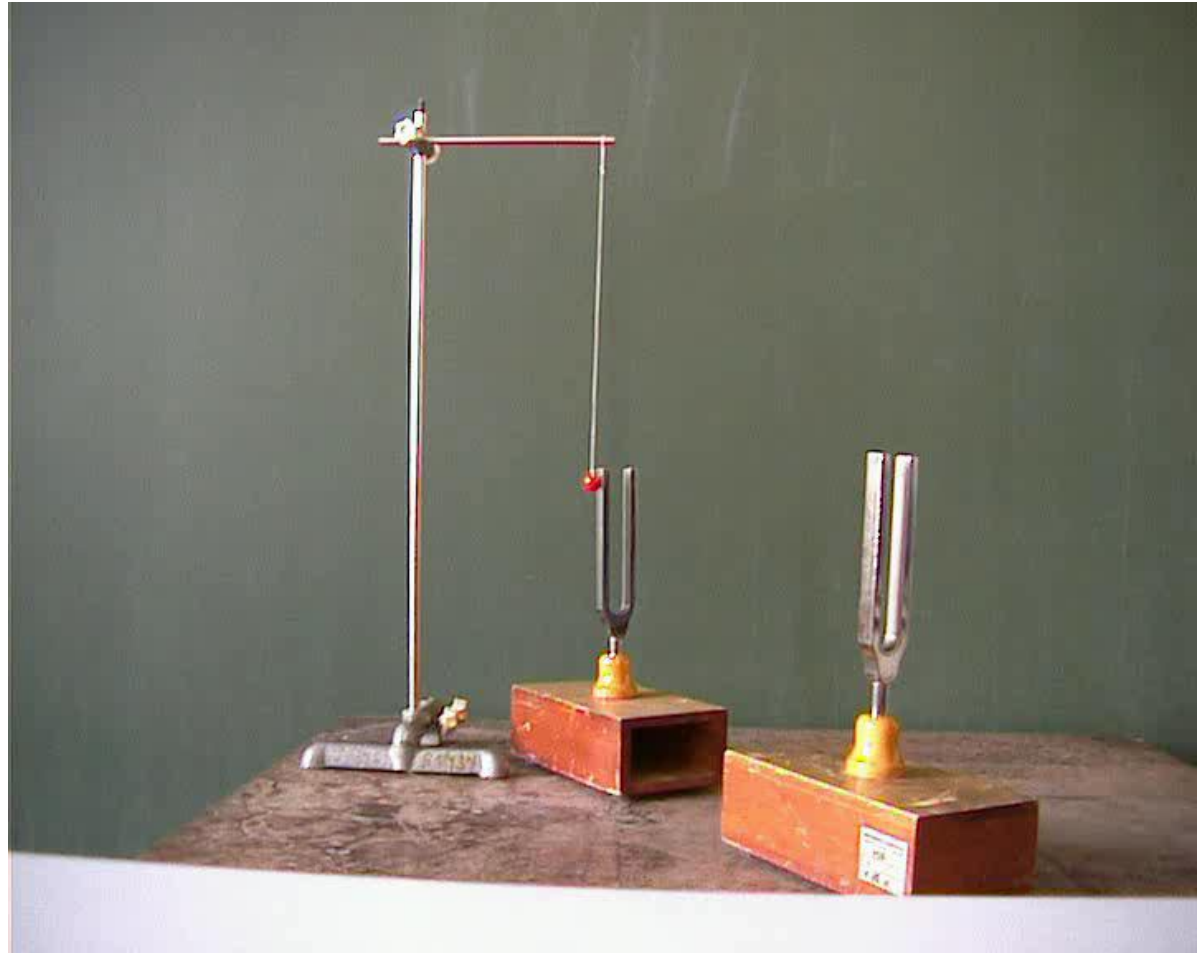
- ▶ Tyč zahrnutá do tvaru písmene U
- ▶ Tvar způsobuje, že se rychle utlumí vyšší harmonické kmity a ladička vydává jen základní tón
- ▶ Tón se zesiluje upevněním na rezonanční skříňku



Chvění ladičky – video

Pozorujeme:

- Rezonance ladičky
- Chvění ladičky při vydávání zvuku



Deska

- ▶ Rozechvívá se smyčcem nebo nárazem
- ▶ Vlnění se šíří všemi směry, odráží se od krajů a interferencí vzniká stojaté vlnění (tedy včetně uzlů a kmiten)
- ▶ V místech s nulovou výchylkou amplitudy kmitání (tedy v uzlech) vznikají **uzlové čáry**

Chladního obrazce

- ▶ Vzniknou vizualizací uzlových čar
- ▶ Pokus: posypeme desku jemným pískem a rozechvějeme ji. Některá místa kmitají víc, jiná méně a některá vůbec. Díky tomu se „poskakující písek“ sesype do uzlových čar
- ▶ Jejich tvar závisí na místě upevnění desky, na místě rozechvívání, na jejím tvaru, ...

Chladniho obrazce na čtvercové desce 1 – video

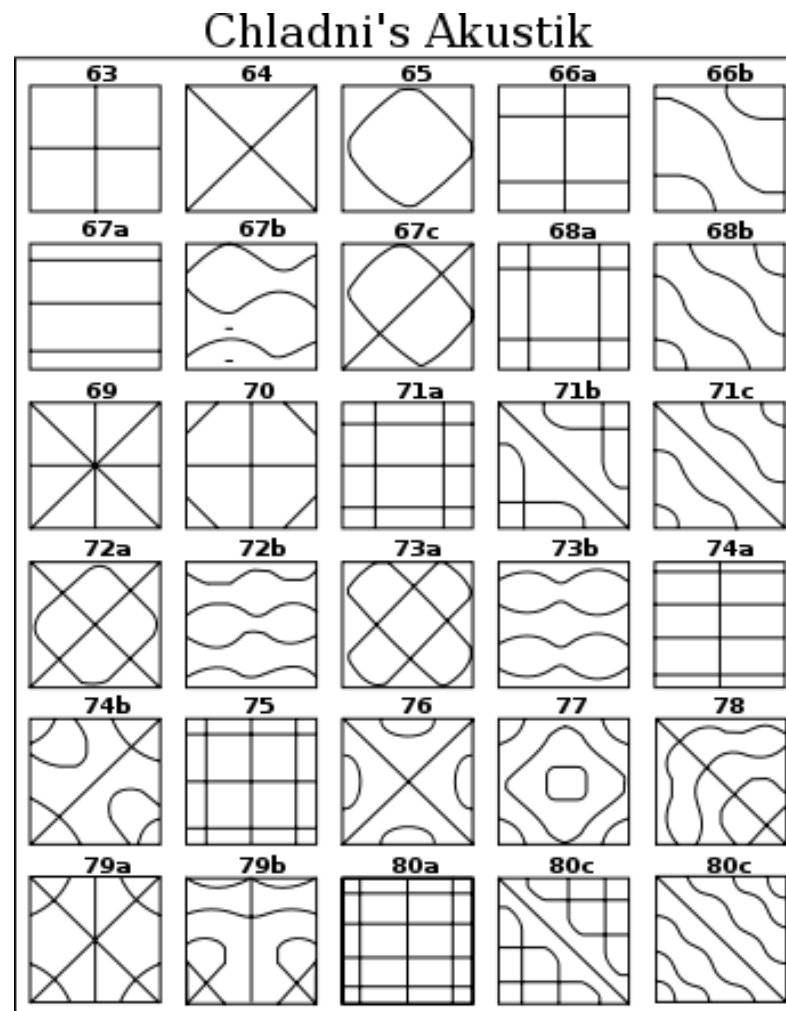


Chladniho obrazce na čtvercové desce 2 – video



Chladniho obrazce na čtvercové desce – některé ukázky

- Přímě z Chladniho knihy „Akustika“



Chladniho obrazce na šestiúhelníkové desce – video



Ernst Florens Friedrich Chladni (1756 – 1827)



- Německý fyzik a hudebník
- Bývá nazýván otcem akustiky
- Průkopník při studiu meteoritů
- Citát: „Tento muž zviditelnil tóny.“
(Napoleon Bonaparte)

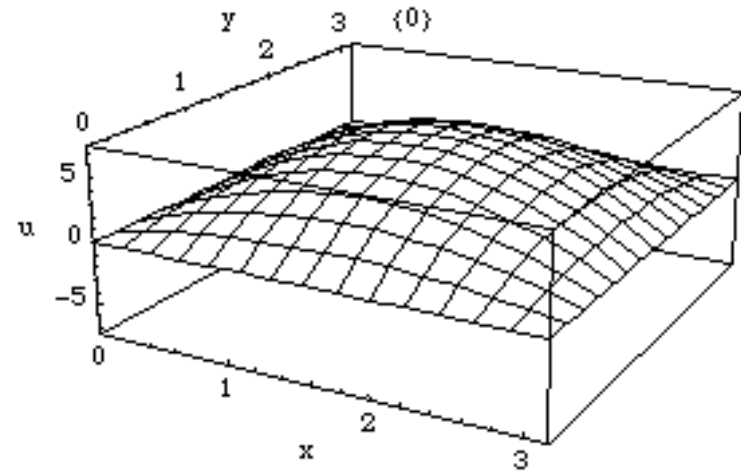
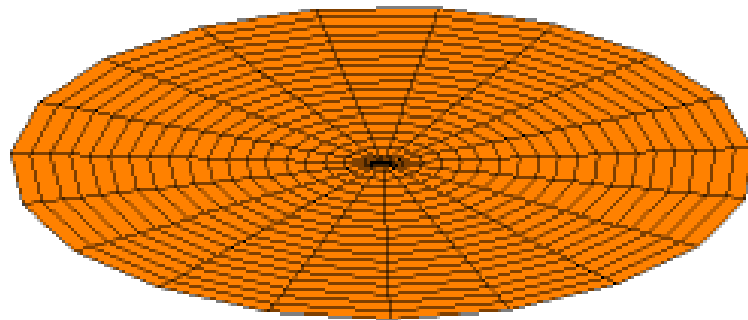
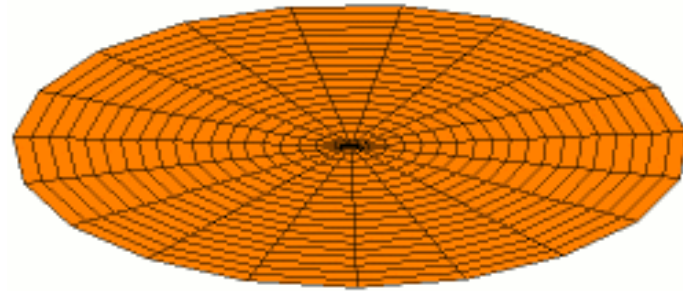
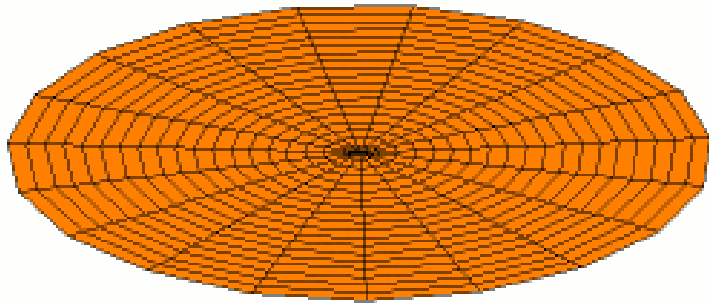
Membrána

- ▶ Tenké desky nebo napjaté blány upevněné na okrajích
- ▶ Vlastní kmity jsou silně tlumené, proto mohou rezonovat v širokém spektru frekvencí
- ▶ Reprodukce zvuku v mikrofonech, v reproduktorech, v hudbě (bubny)
- ▶ Zvon – prohnutá deska, jejíž tloušťka ubývá od středu ke kraji
- ▶ Ušní bubínek – tenká blána

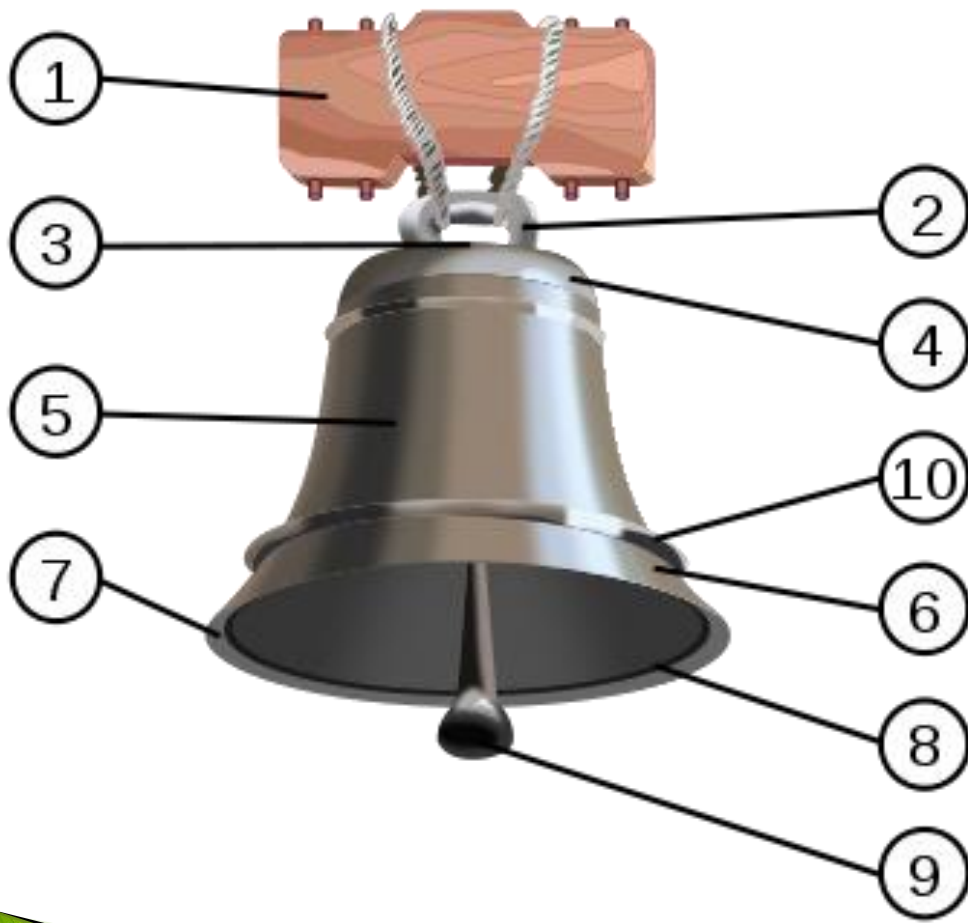
Bubny



Vibrace membrány bubnu – animace



Zvon



- 1.Hlava
- 2.Koruna
- 3.Čepec
- 4.Rameno
- 5.Krk
- 6.Lem
- 7.Ret
- 8.Ústa
- 9.Srdce
- 10.Věnec

Píšťaly

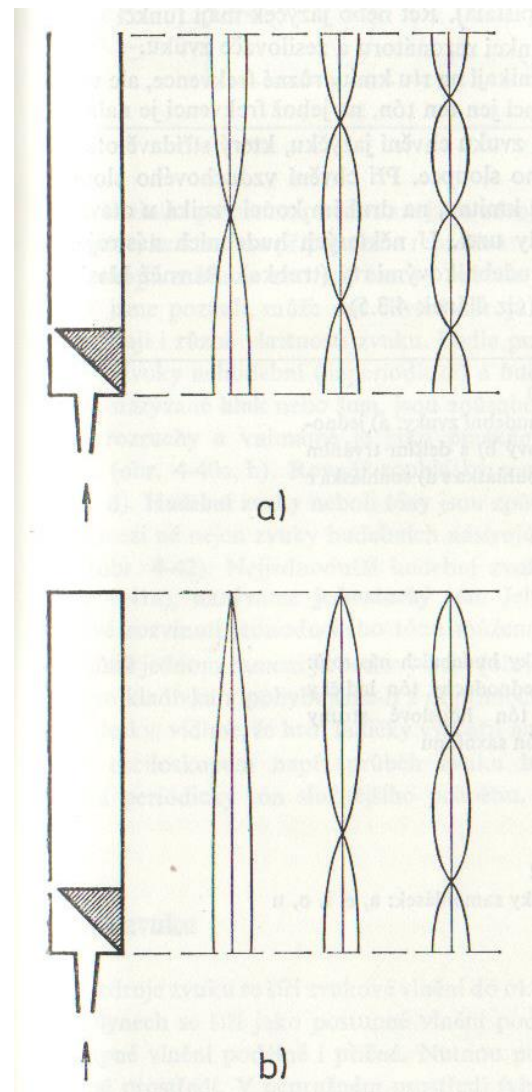
- ▶ Trubice, v nichž se vzduchový sloupec uvádí do podélného chvění foukáním proti ostré hraně zvané ret (**retná píšťala**) nebo chvěním pružného jazýčku (**jazýčková píšťala**)
- ▶ Ret neb jazýček mají funkci zdroje kmitů a vzduchový sloupec funkci rezonátoru a zesilovače zvuku

Retná píšťala

- a) Otevřená
- b) Uzavřená

Na rtu vznikají kmity různé frekvence, ale vzduchový sloupec zesiluje rezonancí jen jeden tón, na jehož frekvenci je naladěn.

- Flétna, pikola, varhany



Jazýčková píšťala

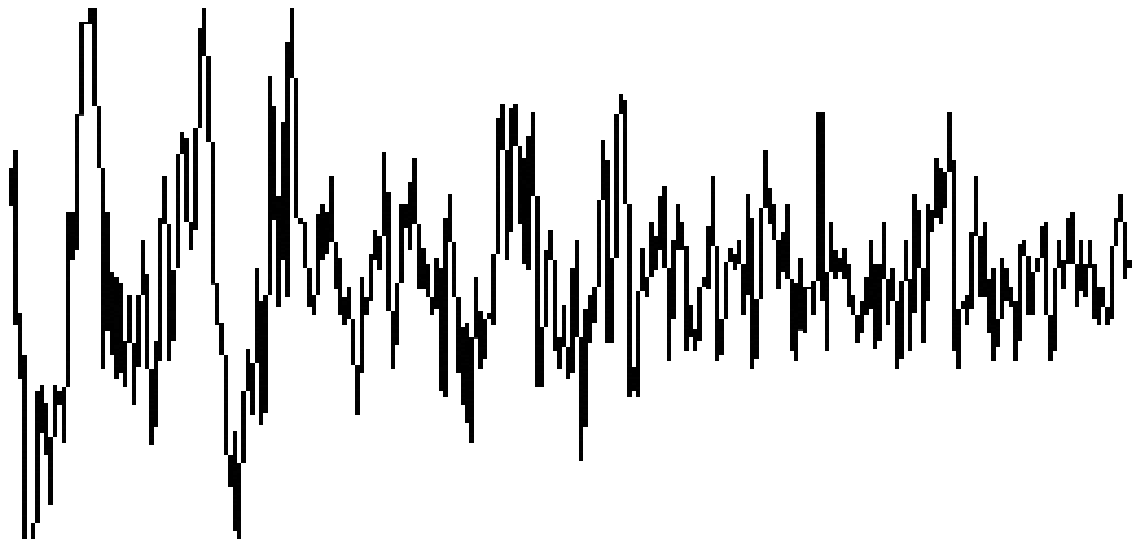
- ▶ Zdrojem zvuku je chvění jazýčku, který střídavě otevírá a zavírá otvor do vzduchového sloupce
- ▶ Klarinet, hoboj, saxofon,...
- ▶ U některých nástrojů je jazýček zastoupen sevřenými hudebníkovými rty (trubka)

Dělení zvuků

- ▶ Zvuky můžeme dělit podle povahy zvukového vjemu
- ▶ Nehudební zvuky
- ▶ Hudební zvuky

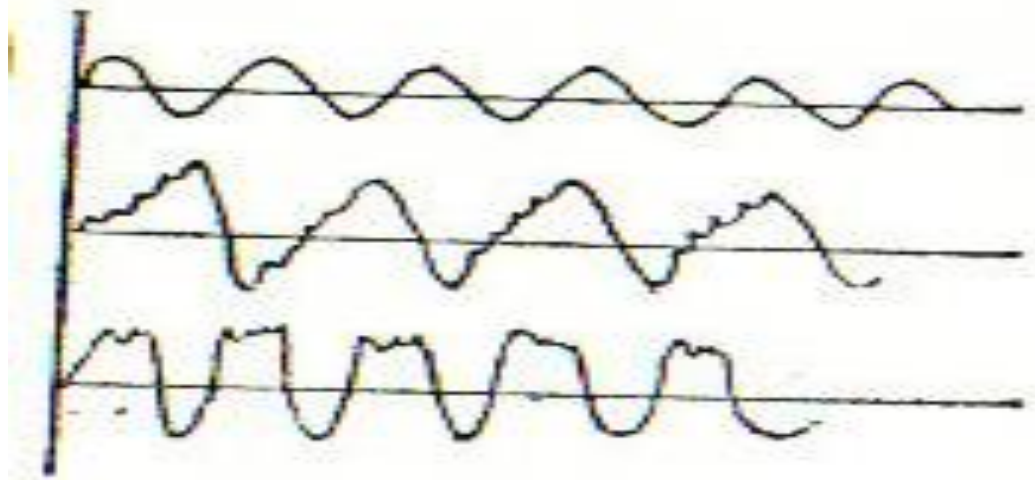
Nehudební zvuky

- ▶ Hluk, šum
- ▶ Způsobeny nepravidelnými mechanickými rozruchy
- ▶ Některé souhlásky (např. *s*, *r*, ...)
- ▶ Praskání, šramot, bouchnutí, vrzání, ...



Hudební zvuky

- ▶ Tóny
- ▶ Způsobeny periodickým chvěním
- ▶ Zvuky hudebních nástrojů a samohlásek
- ▶ Jednoduchý tón – má sinusový průběh
- ▶ Složený tón – periodický tón složitějšího průběhu



Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- ▶ [2] AUTOR NEUVEDEN. *fyzweb* [online]. [cit. 24.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/CHLADNI/INDEX.HTM>
- ▶ [3] CHLADNI, Ernst. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 24.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Chladni.Diagrams.for.Quadratic.Plates.svg>
- ▶ [4] AUTOR NEUVEDEN. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 24.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Echladni.jpg>
- ▶ [5] WOLLSCHAF. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 24.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Stimmgabel.jpg>
- ▶ [6] ALEXANDROV, Oleg. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 24.5.2013]. Dostupný na WWW: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drum_vibration_mode03.gif?uselang=cs
- ▶ [7] QUADCELL. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 24.5.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Parts_of_a_Bell.svg
- ▶ [8] CRALIZE. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Bongo.jpg>
- ▶ [9] BULLY 1. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Djembe2.jpg>
- ▶ [10] WAJDA, Pawel. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Drumkit.jpg>
- ▶ [11] TECHMANIA. *Vznik a druhy zvuku* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=661

Šíření zvuku

Ing. Stanislav Jakoubek

Šíření zvuku v prostředí

- ▶ V kapalinách a v plynech jako postupné vlnění podélné
- ▶ V pevných látkách jako postupné vlnění podélné i příčné
- ▶ Nutná podmínka šíření zvuku: pružné prostředí
- ▶ V nepružném prostředí (vlna, korek, plst', ...)
 - špatné šíření – **zvukové izolátory**

Šíření zvuku ve vzduchoprázdnu – video



Zvuk jako vlnění

- Má všechny vlastnosti vlnění v prostoru

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

Rozsah vlnových délek a frekvencí pro zvuk

Vlnová délka	21 m – 17 mm
Frekvence	16 Hz – 20 kHz

Rychlost zvuku

- Závisí na druhu a hustotě prostředí a na teplotě t .

$$v_t = kt + v_0 \quad v_0 = 331,6 \text{ m.s}^{-1}; k = 0,6 \text{ m.s}^{-1} . \text{K}^{-1}$$

Zvýšením teploty o 1°C se zvýší rychlost zvuku průměrně o $0,6 \text{ m.s}^{-1}$.

Pro odhad bereme většinou rychlost zvuku 340 m.s^{-1} ; To odpovídá rychlosti zhruba při teplotě 15°C

Poznámky k rychlosti zvuku

- ▶ V kapalinách a v pevných látkách je rychlost zvuku větší, než ve vzduchu (například ve vodě je 1440 m.s^{-1} , ve dřevě 4000 m.s^{-1} , v oceli 5000 m.s^{-1})
- ▶ Ve vzduchu urazí zvuk 1 km přibližně za 3 s

$$s = v.t = 340.3\text{m.s}^{-1} = 1020\text{m} \doteq 1\text{km}$$

Odraz zvukových vln

- ▶ Nastává na rozhraní dvou prostředí o různé hustotě
- ▶ Odraz zvuku na velké překážce (například na skalní stěně, na velké budově, ...)
- ▶ Může vznikat *ozvěna* nebo *dozvuk*
- ▶ Důležitá vlastnost slyšení: Sluchem můžeme rozlišit dva krátké zvuky následující po sobě tehdy, je-li mezi nimi časový interval alespoň 0,1 s.

Ozvěna

- ▶ Dostane-li se zvukové vlnění od zdroje k překážce a zpět za 0,1 s (nebo déle), vnímáme odražený zvuk jako samostatný zvukový vjem – vzniká **ozvěna**
- ▶ Minimální vzdálenost překážky:

$$l = v \cdot t = 340 \text{ m.s}^{-1} \cdot 0,05 \text{ s} = 17 \text{ m}$$

Ozvěna – pokračování

- ▶ Čas 0,1 s potřebujeme (přibližně) k vyslovení jedné slabiky $\Rightarrow$ vzniká *jednoslabičná ozvěna*
- ▶ Při vzdálenosti stěny n.17 m ($n=1,2,3,4,\dots$) vznikne ozvěna n-slabičná
- ▶ Pokud je několik překážek, na kterých se může zvuk odrážet, pak při jejich vhodné vzdálenosti vnímáme po sobě odrazy téhož zvuku
- ▶ Např.: V Teplických skalách (u Broumova) lze slyšet trojnásobnou sedmislabičnou ozvěnu

Dozvuk

- ▶ Když je překážka blíže, než 17 m, vzniká **dozvuk**
- ▶ Projeví se například prodlužováním konců slov nebo zvýšením hlasitosti (zpoždění do 0,02 s)
- ▶ Řeč může být až nesrozumitelná (známe např. z rozhlasu v nádražních halách) – při zpoždění větším, než 0,05 s
- ▶ Dozvuk slyšíme dobře v prázdném pokoji
- ▶ S dozvukem je třeba počítat při projektování konferenčních a hudebních sálů, rozhlasových studií, továrních hal, ...

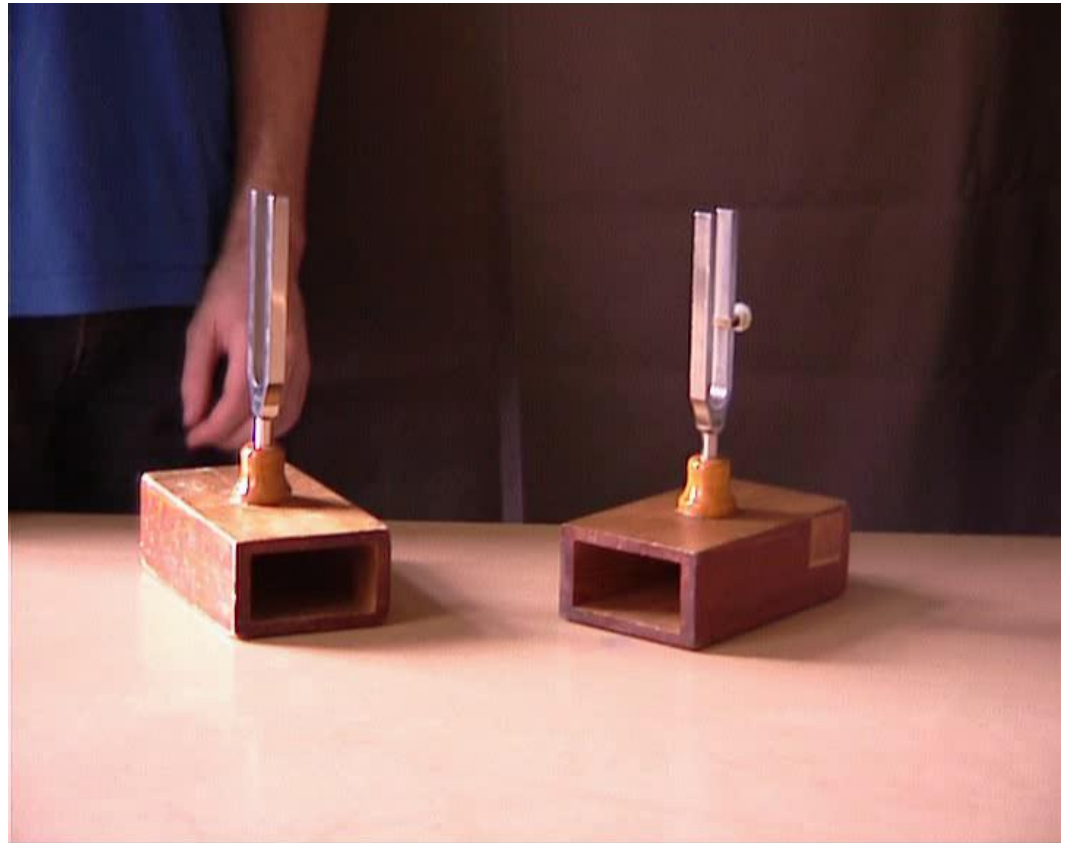
Ohyb zvukového vlnění

- ▶ Vzniká za předměty, které mají rozměry srovnatelné nebo menší, než je vlnová délka zvukové vlny
- ▶ Je-li překážka oproti vlnové délce veliká, vzniká za ní **akustický stín**

Interference zvukových vln – video

- Zvukové vlnění (jako každé jiné vlnění) interferuje

Při skládání dvou vlnění s mírně odlišnými frekvencemi vznikají **rázy** (zázněje). V tomto případě tzv. **akustické rázy**.

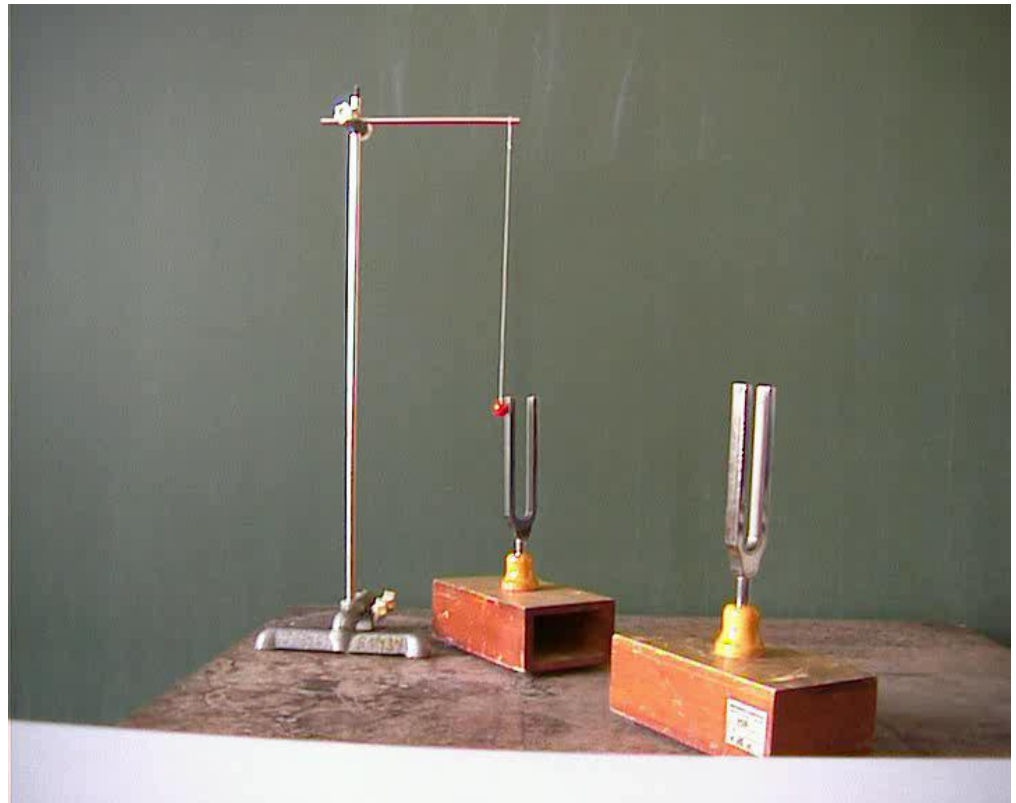


Rezonance zvukových vln – video

Rezonátor – ladička, do které klepneme.

Oscilátor – ladička u stojanu

Pokud je vlastní frekvence oscilátoru stejná (v ideálním případě), jako u rezonátoru, dochází k největšímu přijímání energie (tedy k rezonanci).



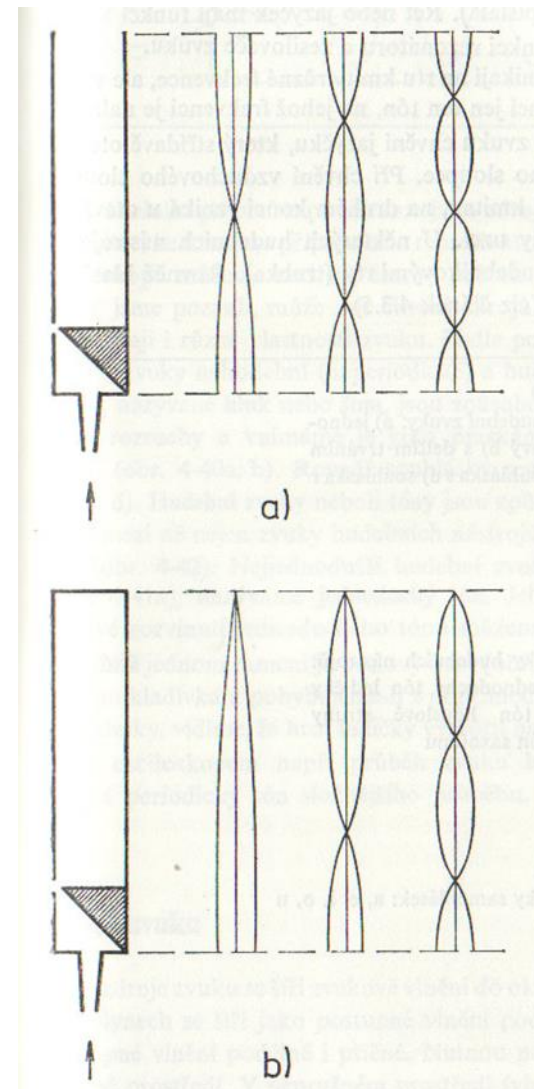
Příklad

- Jak dlouhá je otevřená a krytá píšťala se základním tónem 440 Hz při teplotě 0°C?

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{331,6}{440} \text{ m} \doteq 0,75 \text{ m}$$

Otevřená: $l = \frac{\lambda}{2} \doteq \frac{0,75}{2} \text{ m} \doteq 0,38 \text{ m}$

Krytá: $l = \frac{\lambda}{4} \doteq \frac{0,75}{4} \text{ m} \doteq 0,19 \text{ m}$



Příklad

- Za jak dlouho uslyšíme výbuch ze vzdálenosti 1,7km, počítáme-li rychlost zvuku 340 m.s^{-1} ?

$$s = 1,7\text{km} = 1700\text{m}, v = 340\text{m.s}^{-1}; t = ?$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1700}{340} \text{ s} = 5\text{s}$$

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.

Vlastnosti zvuku

Ing. Stanislav Jakoubek



Charakteristiky zvukového vlnění

- ▶ Výška
- ▶ Barva
- ▶ Intenzita
- ▶ Hlasitost

Výška zvuku

- ▶ Je dána jeho frekvencí
- ▶ Čím vyšší je frekvence chvění zdroje zvuku, tím větší je výška zvuku
- ▶ U jednoduchého tónu (sinusový průběh) určuje frekvence **absolutní výška tónu**
- ▶ U složeného tónu je výška dána základní (tj. nejnižší) frekvencí f_0

Relativní výška tónu

- ▶ Absolutní výšku tónu většinou přímo uchem neurčíme
- ▶ Zavádíme relativní výšku tónu – je dána poměrem frekvence daného tónu a frekvence tónu základního
- ▶ Základní tón v hudební akustice: a^1 ; $f=440$ Hz
- ▶ V technické praxi: $f=1$ kHz

Barva tónu

- ▶ Umožňuje rozlišit tóny stejné výšky z různých zdrojů (např. z různých hudebních nástrojů)
- ▶ Výsledný tón je složen ze základní frekvence f_z (udává výšku) a z vyšších harmonických tónů s frekvencemi $f_n = n f_z$, kde $n = 2, 3, 4, \dots$.
- ▶ Amplitudy vyšších harmonických tónů jsou různé, ale výrazně menší, než amplituda základního tónu
- ▶ Některé nástroje vydávají navíc i jiné tóny, než násobky tónu základního

Ovlivnění barvy tónu

- U hudebních nástrojů tvarem a materiálem rezonanční skříňky



Intenzita zvuku – úvod

- ▶ Zvukové vlny vycházející ze zdroje způsobují periodické zhušťování a zředování okolního pružného prostředí
- ▶ Šíření zvuku je tedy provázeno tlakovými změnami, které vnímá sluchový orgán
- ▶ Práh slyšení: nejnižší tlaková změna, která vyvolá sluchový vjem; přibližně 10^{-5} Pa
- ▶ Práh bolesti: nejvyšší tlaková změna, při které ještě nevzniká v uchu pocit bolesti; přibližně 100 Pa

Intenzita zvuku

- ▶ Závisí na velikosti tlakových změn
- ▶ Zvuková energie dopadající na jednotku plochy za jednotku času
- ▶ Jednotka: W.m^{-2}
- ▶ Rozsah intenzity zvuku, kterou slyšíme (pro $f=1 \text{ kHz}$): od $I_0=10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ do $I=10 \text{ W.m}^{-2}$
- ▶ Od prahu slyšení do prahu bolesti
- ▶ Rozsah vnímání je tedy 13 řádů
- ▶ Výhodnější je zavést logaritmickou stupnici – hladinu intenzity zvuku

Hladina intenzity zvuku

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

Jednotka: bel ... B; stupnice má rozsah 13 belů.

V praxi: jednotka desetkrát menší – decibel ... dB; rozsah stupnice je tedy 130 dB.

Práh slyšení: $B = 0$ dB

Práh bolesti: $B = 130$ dB

Hladina intenzity zvuku – poznámky

- ▶ Stupnice je logaritmická při desetinásobném zvýšení intenzity zvuku se hladina intenzity zvýší o 10 dB, při stonásobném zvýšení intenzity zvuku vzroste hladina o 20 dB atd.
- ▶ Nejmenší rozdíl hladiny intenzity, který sluchem postřehneme: zhruba 1 dB (proto se ten decibel zavedl 😊)

Poznámka – hladina tlaku

Veličina se dá zavést i pomocí tlaků.

$$B = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

p_0 – nejnižší tlak, který ucho zaznamená jako sluchový vjem

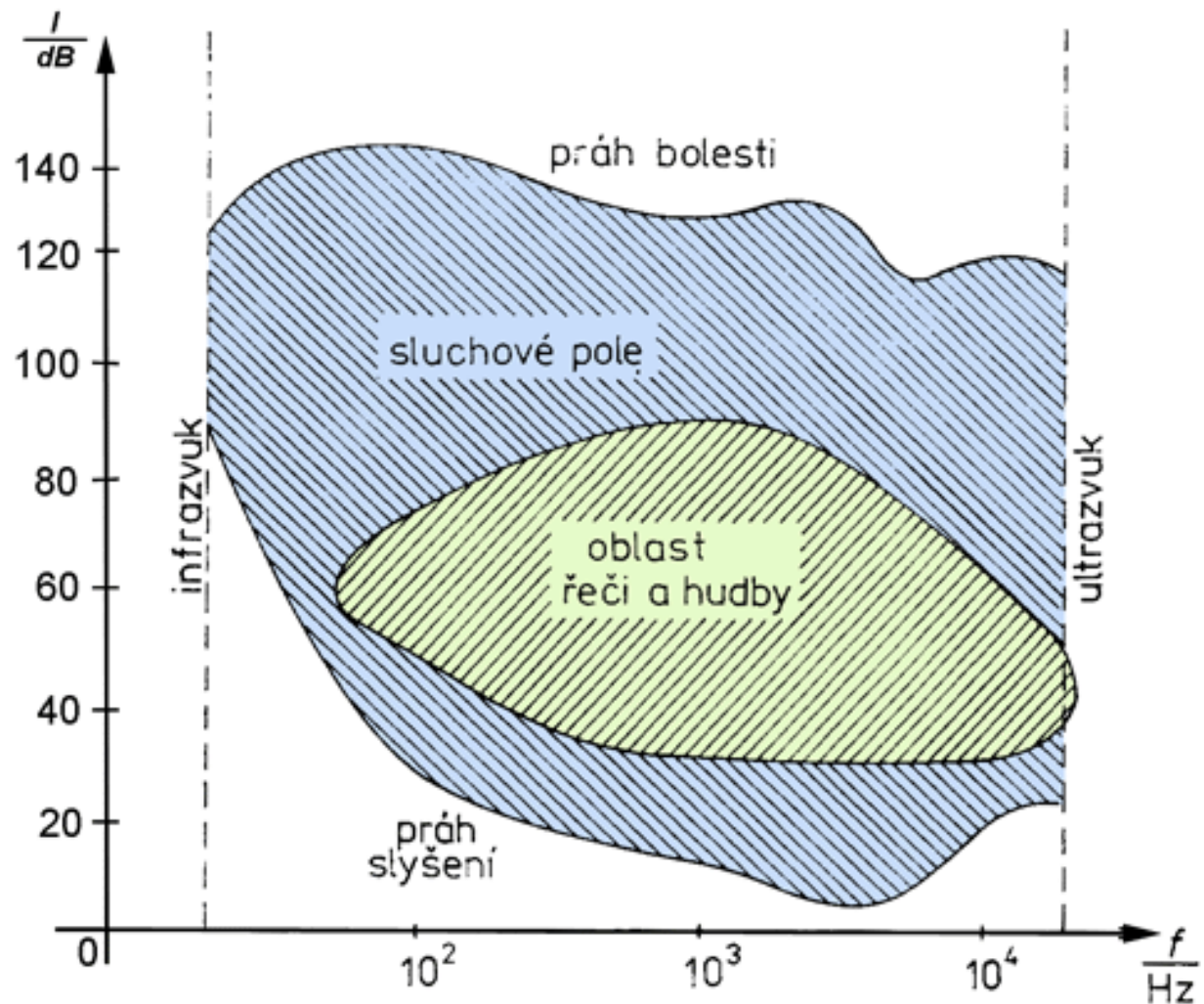
Jednotka: decibel ... dB

Hladiny intenzity pro některé zvuky

Zvuk	Hladina intenzity
Práh slyšení	0 dB
Tikot hodinek u ucha	10 dB
Šepot	30 dB
Tichý hovor	40 dB
Hlasitý hovor ve vzdálenosti 1 m	50 dB
Pouliční hluk při silném provozu	80 dB
Motocykl	90 dB
Sbíječka a velmi silná hudba	100 dB
Letecký motor ve vzdálenosti 10 m	120 dB
Práh bolesti	130 dB

Závislost hladiny intenzity zvuku na frekvenci

Ucho není citlivé stejně na všechny frekvence. Dva zvuky o stejné akustické intenzitě s různou frekvencí vnímáme různě hlasitě (přestože akustický tlak je stejný). Největší citlivost je kolem 3 kHz.



Příklad

- Vypočtete vlnovou délku tónu a^1 , který vydává ladička při teplotě 15°C .

$$t = 15^\circ\text{C}, f = 440\text{Hz}; \lambda = ?$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{kt + v_0}{f} = \frac{0,6 \cdot 15 + 331,6}{440} \text{m} \doteq 0,774 \text{m}$$

Příklad

- Jaké vlnové délky zvuku odpovídají mezím slyšitelnosti při teplotě vzduchu 20°C ?

$$t = 20^{\circ}\text{C}, f_{DM} = 16\text{Hz}, f_{HM} = 20\text{kHz} = 20000\text{Hz}; \lambda = ?$$

$$\lambda_{DM} = \frac{v}{f} = \frac{kt + v_0}{f_{DM}} = \frac{0,6 \cdot 20 + 331,6}{16} \text{m} = 21,475\text{m}$$

$$\lambda_{HM} = \frac{v}{f} = \frac{kt + v_0}{f_{HM}} = \frac{0,6 \cdot 20 + 331,6}{20000} \text{m} = 0,01718\text{m} = 17,18\text{mm}$$

Příklad

- Vyjádřete relativní výšku dvou tónů pomocí vlnových délek.

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1}, \lambda_2 = \frac{v}{f_2}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\frac{v}{f_1}}{\frac{v}{f_2}} = \frac{vf_2}{vf_1} \Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{f_2}{f_1}$$

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- ▶ [2] TECHMANIA. *Hlasitost* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupný na WWW:
http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=965
- ▶ [3] LANGE, Christoph. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 3.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Bass-und-primgitarre.jpg>
- ▶ [4] TECHMANIA. *Intenzita zvuku* [online]. [cit. 3.6.2013]. Dostupný na WWW:
http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=607

Infrazvuk, ultrazvuk

Ing. Stanislav Jakoubek



Definice pojmů

- ▶ Víme: člověk vnímá sluchem zvukové vlnění v rozmezí frekvencí od 16 Hz do 20000 Hz
- ▶ Infrazvuk: vlnění o menší frekvenci
- ▶ Ultrazvuk: vlnění o vyšší frekvenci

Infrazvuk

- ▶ Je vymezen pouze přibližně
- ▶ Spodní hranice: mezi 0,001 Hz až 0,2 Hz
- ▶ Horní hranice: 16 Hz (někdy se udává 20 Hz)
- ▶ Někteří zvířata (velryby, sloni, hroši, nosorožci, okapi, aligátoři) používají infrazvuk k dorozumívání (nízké frekvence $\Rightarrow$ velké vlnové délky $\Rightarrow$ mohou se šířit poměrně nerušeně i několik kilometrů)

Zdroje infrazvuku

- ▶ Otřesy a záchvěvy půdy, sopečná činnost
- ▶ Otřesy budov vyvolané těžkými dopravními prostředky (vlastní frekvence kmitů budov spadá do této oblasti $\Rightarrow$ rezonance)
- ▶ Bouře
- ▶ Větrné elektrárny (cca 70 dB v oblasti infrazvuku)
- ▶ Aerodynamický infrazvuk dopravních prostředků (otevřené okno ve vlaku – může „zalehnout“ v uších)

Účinky na lidský organismus

- ▶ Při vysoké intenzitě může způsobit závratě nebo infarkt
- ▶ Tlak v uších („zalehnutí“)
- ▶ Frekvence kolem 7 Hz jsou blízko mozkovým α vlnám; má vliv na pohodu a soustředění
- ▶ Uvažovalo se o použití infrazvuku jako biologické zbraně (zásadní nevýhoda: ovlivňoval i obsluhu 😊)

Hladina intenzity infrazvuku

- ▶ V přírodě za normálního stavu (bez bouří atd.; tzv. hluk pozadí): 80 dB – 90 dB
- ▶ Při bouřích, přechodech front ... až 120 dB
- ▶ Při otevření okének a současné změně laminárního obtékání kabiny na turbulentní ve vlaku při rychlé jízdě (nad 80 km.h⁻¹: 130 dB, výjimečně 140 dB (za prahem bolestivosti!!))
- ▶ ...

Ultrazvuk

- ▶ Velká frekvence $\Rightarrow$ malá vlnová délka $\Rightarrow$ mohou se šířit ve tvaru **úzkých paprsků** (podobně, jako světlo)
- ▶ Mohou se zaostřovat, odrážet, lámat, ..., přičemž platí zákony analogické s geometrickou optikou

Využití ultrazvuku

- ▶ Sonografie
- ▶ Echolokace
- ▶ Čištění ultrazvukem
- ▶ Ultrazvukové zvlhčování vzduchu
- ▶ Ultrazvuková defektoskopie
- ▶ Měření tloušťky materiálů
- ▶ Sterilizace vody, mléka, ...
- ▶ Ultrazvuková liposukce
- ▶ ...

Sonografie

- Ultrazvukové vlny s frekvencemi 1 MHz až 18 MHz procházejí tělem a odrážejí se od přechodů mezi tkáněmi

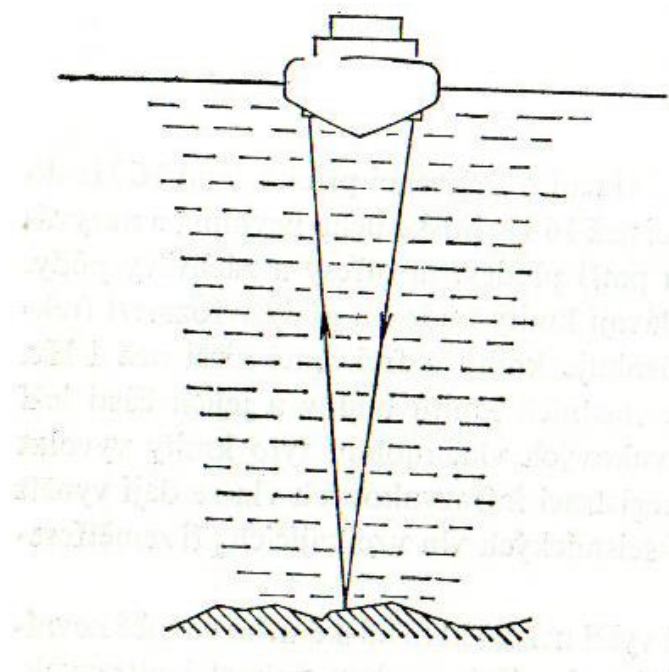
Vyšetření plodu
ultrazvukem.



Echolokace

- ▶ Zjišťování polohy a vzdálenosti těles pomocí ultrazvuku
- ▶ Využívají i některá zvířata (netopýři, kytovci)

Měření hloubky moře



Čištění ultrazvukem

- ▶ Založeno na principu tzv. kavitace (mechanické narušování povrchu prudkým nárazem kapaliny na předmět)
- ▶ 20 až 40 kHz – rychlé čištění velkých nečistot
- ▶ 40 až 70 kHz – jemnější čištění
- ▶ 70 až 200 kHz – velmi jemné čištění, například optiky
- ▶ Poznámka: čištění brýlí ultrazvukem

Ultrazvukový zvlhčovač vzduchu

- ▶ Rychlé vibrace destičky ponořené do vody generují mlhu
- ▶ Frekvence destičky řádově MHz generuje kapičky o velikosti řádově μm



Příklad

- Vypočtete hloubku moře v místě, ve kterém se ultrazvukový signál vyslaný z lodi ke dnu vrátil zpět za 0,6 s. Rychlost zvuku ve vodě je 1500 m.s^{-1} .

$$t = 0,6\text{s}, v = 1500\text{m.s}^{-1}; h = ?$$

$$h = v \frac{t}{2} = 1500 \cdot \frac{0,6}{2} \text{ m} = 450\text{m}$$

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- ▶ [2] AUTOR NEUVEDEN. *Infrazvuk* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Infrazvuk>
- ▶ [3] TECHMANIA. *Infrazvuk* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=672
- ▶ [4] TECHMANIA. *Ultrazvuk* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=985
- ▶ [5] AUTOR NEUVEDEN. *Ultrazvuk* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk>
- ▶ [6] RASCHKA, Achim. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Praenatal.png>
- ▶ [7] BONECO-CR. *Ultrazvukové zvlhčovače* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.boneco-cr.cz/zdrave-dychani/zvlhcovace-vzduchu/>

Základy fyziologické akustiky

Ing. Stanislav Jakoubek



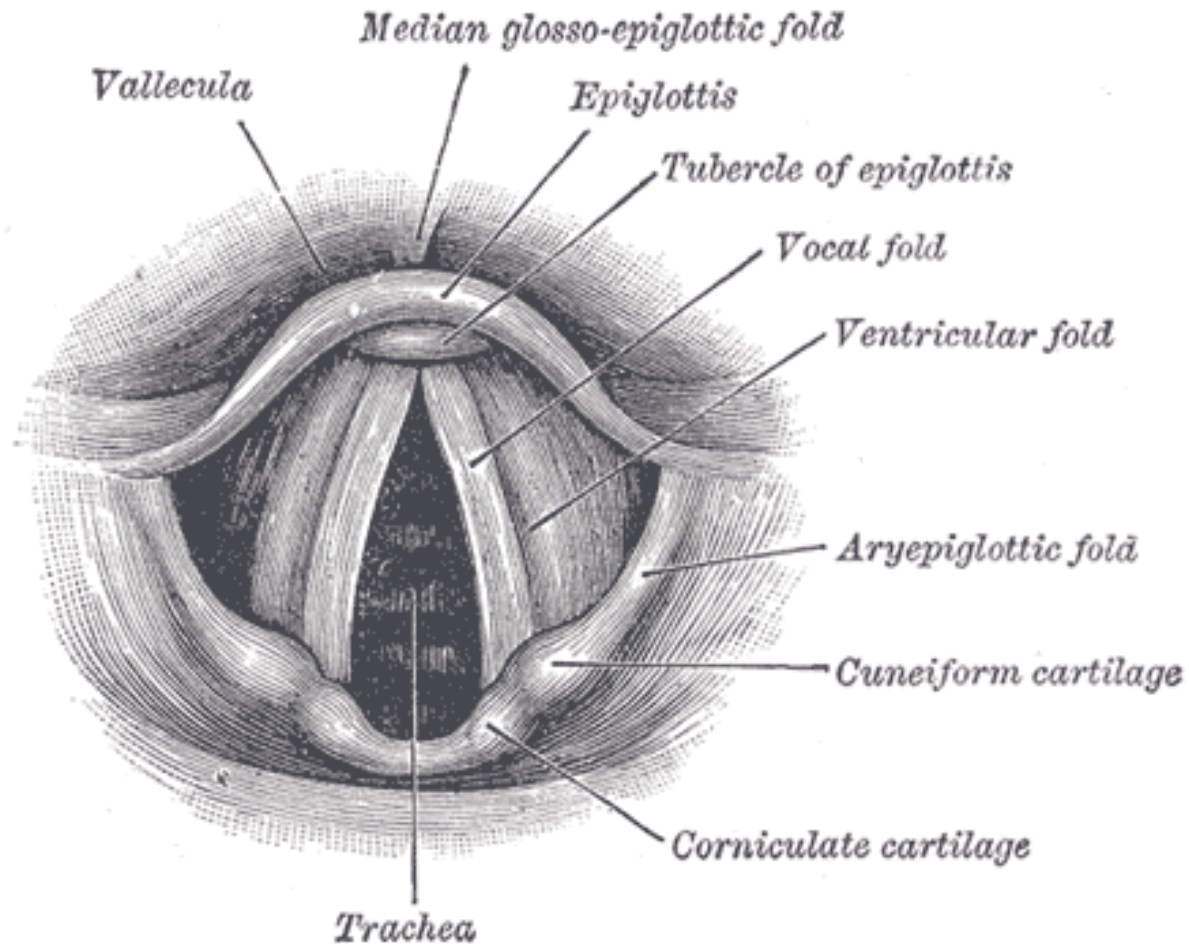
Zdroj a přijímač zvuku

- ▶ Zdroj zvuku: hlasivky
- ▶ Přijímač zvuku: ucho

Tvorba lidského hlasu

- ▶ Tvoří se v hrtanu mezi dvěma hlasovými vazy – hlasivkami
- ▶ Mezi nimi je úzká hlasová štěrbina, kterou prochází vzduch
- ▶ Proud vzduchu z plic rozechvívá okraje hlasivek
- ▶ Vzniklé tóny se zesilují rezonancí dutiny ústní, hrudní a nosohrtanové
- ▶ Kratší hlasivky (12 mm, ženy; děti) – vyšší základní tón, v delších (18 mm, muži) – nižší základní tón

Hlasové ústrojí – obrázek



Hlas – poznámky 1

- ▶ Výškový rozsah hlasu je cca 2 oktávy; u různých lidí v různých polohách
- ▶ Bas (85 – 320 Hz), tenor (130 – 435 Hz), alt (170 – 640 Hz), soprán (260 – 870 Hz)
- ▶ Výška se řídí napětím hlasivek, síla tlakem vzduchu vyháněného z plic, barva změnami v ústní dutině

Hlas – poznámky 2

- ▶ Nejvíce energie hlasu připadá na střední frekvence (kolem 500 Hz)
- ▶ Jen velmi malá část na frekvence 1 000 – 5 000 Hz
- ▶ Tyto vysoké frekvence jsou důležité pro srozumitelnost (pokud v reprodukované řeči chybí, je řeč nesrozumitelná)
- ▶ Pokud chybí nízké frekvence (pod 500 Hz), je reprodukován hlas tišší, ale srozumitelný

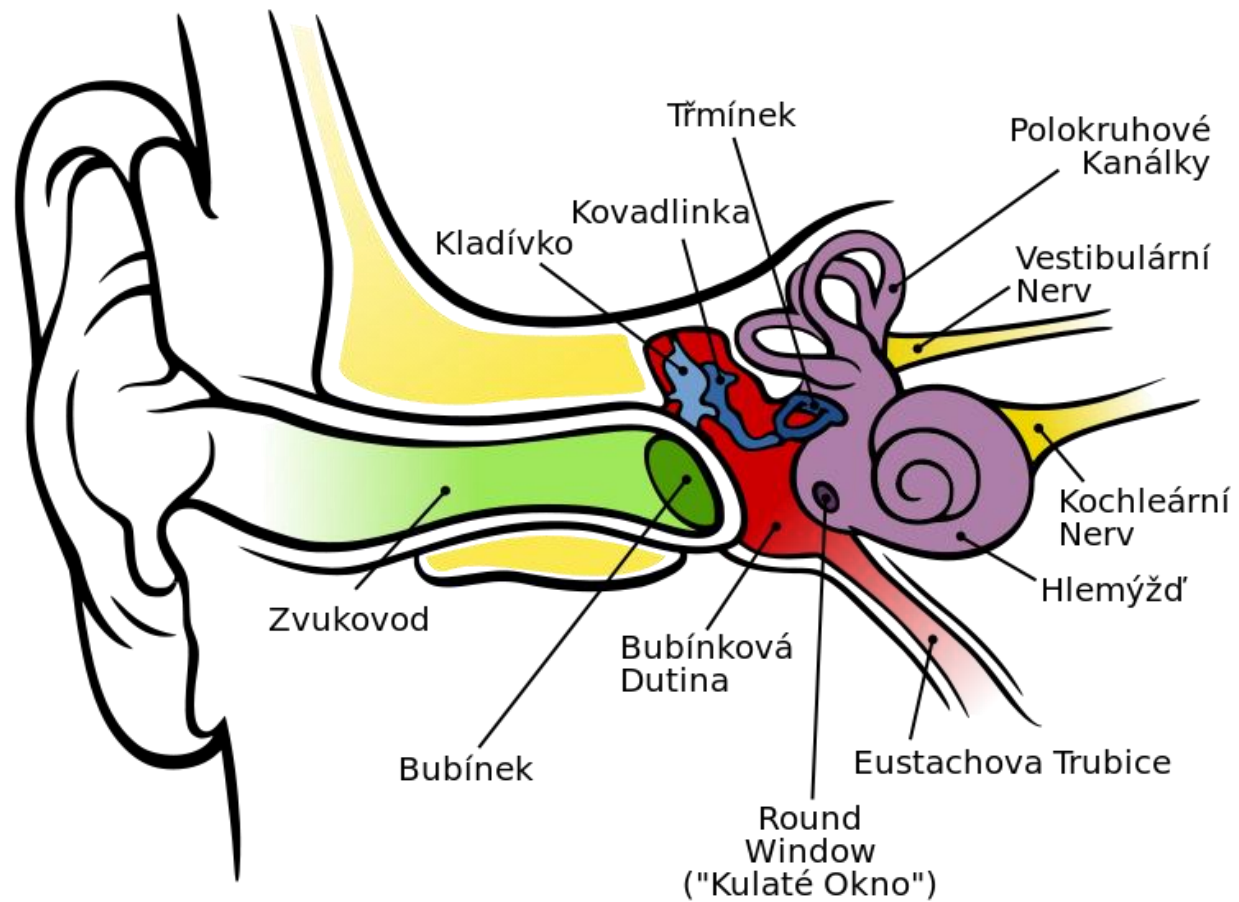
Hlas – poznámky 3

- ▶ Nejnižší tón má hláska *a*; obsahuje téměř jen základní frekvenci (Poznámka: všimněte si písňových textů, kde se do toho zpěvák „opře“ 😊)
- ▶ Nejvyšší frekvenci má hláska *i*
- ▶ *f*, *s* – vysoký podíl vyšších harmonických kmitů; zní jako šelesty; blíží se nehudebním zvukům
- ▶ Ostatní souhlásky (například *b*, *k*) – krátkodobé nepravidelné zvuky

Ucho

- ▶ **Vnější ucho** – boltec (zachycuje zvukové vlny a stíní zvuky přicházející zezadu), zvukovod (zvuk se vede na 0,1 mm tenkou asi 1 cm velkou pružnou blanku – bubínek)
- ▶ **Střední ucho** – 3 pružné kůstky (kladívko, kovadlinka, třmínek) – snižují amplitudu výchylky akustických kmitů a převádějí je k systému vnitřního ucha
- ▶ **Vnitřní ucho** – je vyplněno kapalinou; obsahuje vlastní sluchový orgán (Cortiho orgán), který obsahuje sluchové buňky

Anatomie ucha



Princip slyšení

- ▶ Boltec zachytí zvukovou vlnu; ta se dostane na bubínek
- ▶ Energie vlnění se pomocí kůstek ve středním uchu přenese na kapalinu ve vnitřním uchu
- ▶ Zde vznikne stojaté vlnění, které rezonancí rozkmitává jemná vlákna sluchového nervu
- ▶ Nejvíce se rozkmitá vlákno, jehož vlastní frekvence je stejná, jako frekvence dopadajícího vlnění
- ▶ Sluchový vjem se pomocí elektrických impulsů přenáší do nervové soustavy

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství,n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- ▶ [2] TECHMANIA. *Základy fysiologické akustiky* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=674
- ▶ [3] BROCKMANN, Chittka L.. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 4.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Anatomy_of_the_Human_Ear_cs.svg
- ▶ [4] GRAY. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 15.4.2014]. Dostupný na WWW: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gray956.png>

Základy hudební akustiky

Ing. Stanislav Jakoubek



Definice hudebního intervalu

- ▶ V hudbě užíváme jen některé tóny
- ▶ Jejich relativní výšky jsou dány určitými čísly
- ▶ Relativní výšku (neboli poměr dvou absolutních výšek) vnímá ucho jako **hudební interval**

Oktáva

- ▶ Je základním hudebním intervalem
- ▶ Je to interval mezi tóny, jejichž poměr frekvencí je 2:1 (tedy že druhý tón má dvojnásobnou frekvenci, než tón první)
- ▶ Například 3 kHz a 6 kHz; 20 Hz a 40 Hz, ... (libovolná frekvence a její dvojnásobek)

Přehled hudebních intervalů

Interval	Poměr frekvence
Oktáva	2:1
Kvinta	3:2
Kvarta	4:3
Velká tercie	5:4
Malá tercie	6:5
Velký celý tón	9:8
Malý celý tón	10:9
Velký půltón	16:15
Malý půltón	25:24

Poznámky

- ▶ **Konsonantní** (libozvučné) intervaly – až po malou tercii
- ▶ **Disonantní** (nelibozvučné) intervaly – ty ostatní
- ▶ Souzvuk je tím libozvučnější, čím menšími celými čísly je dán poměr frekvencí
- ▶ Náзор na libozvučnost a nelibozvučnost se v průběhu historie (a také v různých kulturách) měnil

Hudební stupnice

- Soubor tónů s definovanými intervaly vzhledem k základnímu tónu
- Příklad: **diatonická stupnice dur** (tvrdá)

8 tónů oktávy stupnice dur

Název	pri ma	seku nda	velká tercie	kvarta	kvinta	velká sexta	velká septi ma	oktáva
Označení	c	d	e	f	g	a	h	c ¹
Relativní výška	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

Rozsah tónů v hudbě

- ▶ Od 16 Hz do 4000 Hz
- ▶ Rozloženy do osmi po sobě jdoucích oktáv
- ▶ Zahrajeme-li po sobě dva sousední tóny stupnice, vnímá sluch jejich interval stejně, ať zní v kterékoliv oktávě

Temperované ladění

- ▶ U klávesových nástrojů
- ▶ Celá oktáva se dělí na 12 stejných půltónů s intervalem:

$$\sqrt[12]{2} \doteq 1,059463$$



Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- ▶ [2] AUTOR NEUVEDEN. *pianoforte.cz* [online]. [cit. 6.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://pianoforte.cz/cs/pevne-zaklady/sedm-a-pul-oktavy>

Ochrana před škodlivými účinky zvuku

Ing. Stanislav Jakoubek



Zdroje zvuku

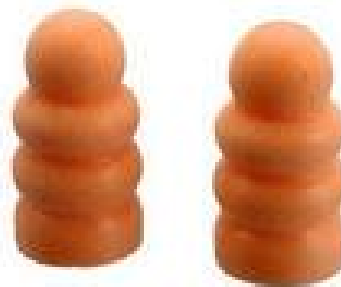
- ▶ Zvuk tvoří významnou složku životního prostředí
- ▶ **Dopravní hluk** – silniční, železniční, letecký
- ▶ **Hluk z ostatních umělých zdrojů** – z průmyslu, ze zemědělských aktivit, z provozoven (diskotéky, hospody, ...), z domácností (spotřebiče), ze zařízení domů (klimatizační systémy, výtahy, ...)
- ▶ **Hluk z přírodních zdrojů** – voda, vítr, ...

Zdroje zvuku na zdraví

- ▶ Úplné ticho – velmi vzácný úkaz
- ▶ Dlouhodobý pobyt v naprostém tichu působí na psychiku – může způsobit deprese
- ▶ Dlouhodobý pobyt v prostředí nad 70 dB je zdraví škodlivý
- ▶ Způsobuje únavu, stres, zpomaluje reakce, u některých lidí bolesti hlavy, nevolnost, ...

Vliv hluku na zdraví – pokračování

- ▶ Dlouhodobý pobyt v prostředí nad 80 dB může způsobit poškození sluchu
- ▶ Snižuje schopnost slyšet slabé zvuky – člověk se stává nedoslýchavým $\Rightarrow$ předepsány chrániče sluchu



Základ: omezení hluku přímo u zdroje

- ▶ Tlumiče na výfukovém potrubí
- ▶ Dálnice a letiště mimo obydlená území
- ▶ Omezení vibrací strojů
- ▶ Mazání třecích ploch
- ▶ Antivibrační nátěry (brání kmitání plechů)
- ▶ Zvuková izolace
- ▶ Protihlukové bariéry
- ▶ ...

Absorpce zvuku

- ▶ Při dopadu zvuku na překážku dochází částečně k jeho pohlcení (absorpci) a částečně k jeho odrazu
- ▶ Poměr pohlcení a odrazu závisí na druhu obou prostředí a na frekvenci zvukových vln (nižší frekvence se pohlcují méně)
- ▶ **Například:** vzduch – voda: 99,9 % odráží a 0,1 % pohlcuje; voda – ocel: 13 % odráží, 87 % pohlcuje

Koeficient absorpce zvuku při odrazu

$$a = \frac{I_0 - I}{I_0}$$

I_0 – intenzita dopadajícího vlnění

I – intenzita odraženého vlnění

Koeficient absorpce pro některé materiály

Koeficient absorpce při frekvenci 512 Hz

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

Celková absorpce místnosti

$$A = \sum_{i=1}^n a_i S_i$$

a_i – koeficient absorpce plochy
 S_i – plocha

Poznámka: absorpční koeficient a otevřeného okna se rovná 1 (vlnění se od něj neodráží) $\Rightarrow$ jeho celková absorpce se rovná jeho ploše $\Rightarrow$ absorpce otevřeného okna s plochou 1 m^2 : $A = 1 \text{ m}^2$.

Díky tomuto poznatku se jednotka celkové absorpce nazývá **otevřené okno**. Rozměr je m^2 .

Poznámka

- Při určování celkové absorpce je nutno započítat i absorpci osobami v místnosti, nábytkem, ...

Absorpce A	
Člověk	0,42 m ²
Dřevěná židle	0,01 m ²
Čalouněné křeslo	0,09 – 0,28 m ²

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- ▶ [2] AUTOR NEUVEDEN. *manutan.cz* [online]. [cit. 5.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.manutan.cz/chranice-sluchu_c_Main120518411859.html?utm_medium=cpc&utm_source=adwords&utm_campaign=20-Safety-of-work&gclid=CPWur8erzLcCFbMbtAod_nIA0Q
- ▶ [3] TECHMANIA. *Základy fyziologické akustiky* [online]. [cit. 5.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=674
- ▶ [4] JEDLIČKA, Jiří. *Protihlukové stěny* [online]. [cit. 5.6.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.cdv.cz/file/seminar-skanska-protihlukove-steny/>
- ▶ [5] TECHMANIA. *Absorpce zvuku* [online]. [cit. 5.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=294