

11 Akustika



doc. RNDr. Anna Daníhelová, PhD.

Sibelius Hall, Lahti

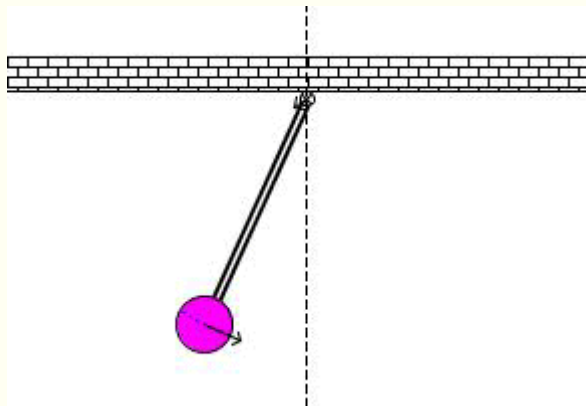
Pohyb kmitavý

Kmitanie, kmitavý pohyb – periodicky sa opakujúca zmena určitej fyzikálnej veličiny – (mechanické, elektrické kmity, zmeny elektrického napätia, prúdu).

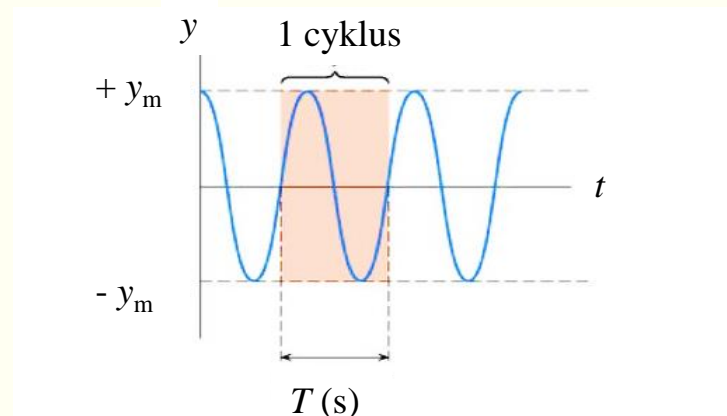
Mechanické kmitanie – kmitavý pohyb, pri ktorom hmotný bod neprekročí určitú konečnú vzdialenosť od rovnovážnej polohy.

Rovnovážna poloha – poloha, v ktorej je súčet síl pôsobiacich na teleso nulový (ak je teleso v pokoji, ustáli sa v tejto polohe).

Periodický kmitavý pohyb – periodicky sa opakujúci pohyb. T (s) – perióda (čas jedného cyklu), pričom $T = 1/f$, kde f (Hz) – frekvencia (počet kmitov za jednotku času) ($f = \omega/2\pi$).



Obr. 11.1 Periodický kmitavý pohyb
(Baldwin, 2016).



Obr. 11.2 Perióda, amplitúda a frekvencia
(Baldwin, 2016).

Pohyb kmitavý

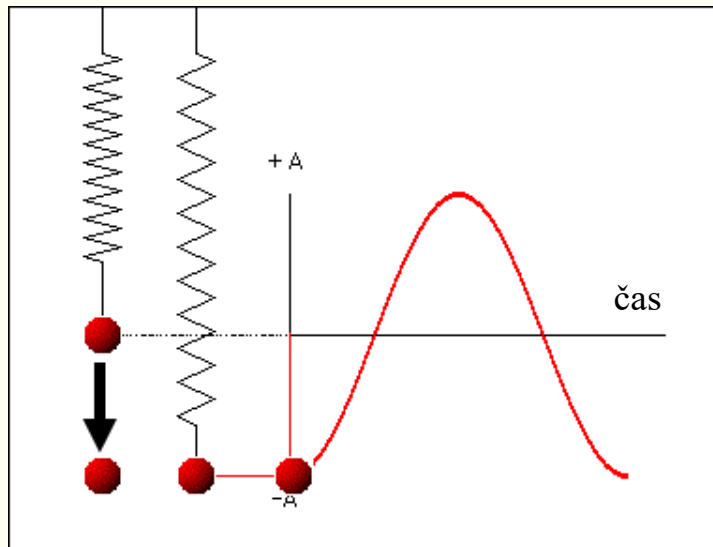
Harmonický kmitavý pohyb – je pohyb po priamke za pôsobenia sily pružnosti F (N), ktorá je priamo úmerná výchylke y (m) a tuhosti pružiny k (N.m⁻¹).

$$F = -k \cdot y$$

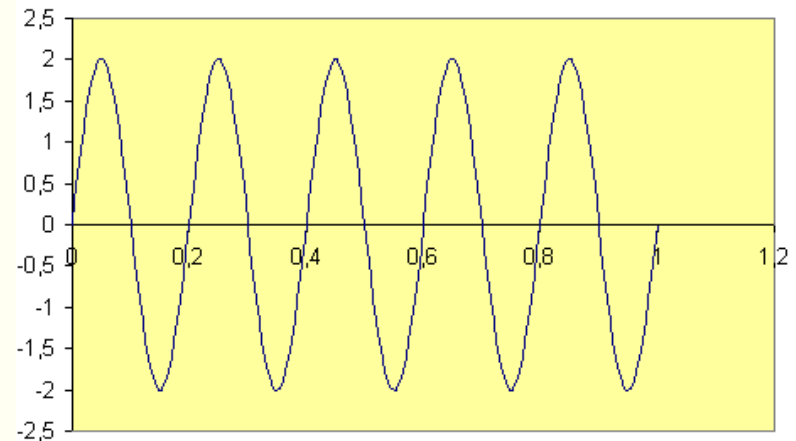
Harmonický kmitavý pohyb netlmený – okamžitá výchylka $y(t)$ je daná:

$$y(t) = y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

y_{\max} – maximálna výchylka (amplitúda), jednotka je m,
 ω – uhlová frekvencia ($=2\pi f = 2\pi/T$), jednotka rad.s⁻¹,
 φ – počiatková fáza (závisí od polohy v čase $t = 0$), jednotka rad.



Obr. 11.3 Kmitanie pružiny bez tlmenia
(Ahmed, 2014)



Obr. 11.4 Harmonický kmitavý pohyb
(Kratochvíl, 2018).

Pohyb kmitavý

Harmonický kmitavý pohyb netlmený – okamžitá rýchlosť je daná:

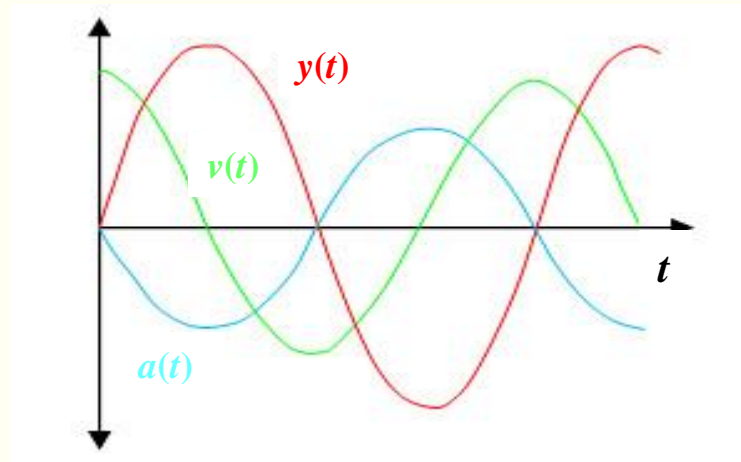
$$v(t) = \omega \cdot y_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ = v_m \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$\omega \cdot y_m$ – amplitúda rýchlosti – v_m , jednotka je $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
okamžitá rýchlosť pri prechode rovnovážnou polohou je najvyššia, v krajnej polohe (pri max. výchylke) je nulová

– okamžité zrýchlenie je dané:

$$a(t) = -\omega^2 \cdot y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ = -\omega^2 \cdot y(t)$$

$\omega^2 \cdot y_{\text{max}}$ – amplitúda zrýchlenia – a_{max} , jednotka je $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,
okamžité zrýchlenie pri prechode rovnovážnou polohou je nulové, v krajnej polohe (pri max. výchylke) je maximálne, má však opačný smer ako okamžitá výchylka

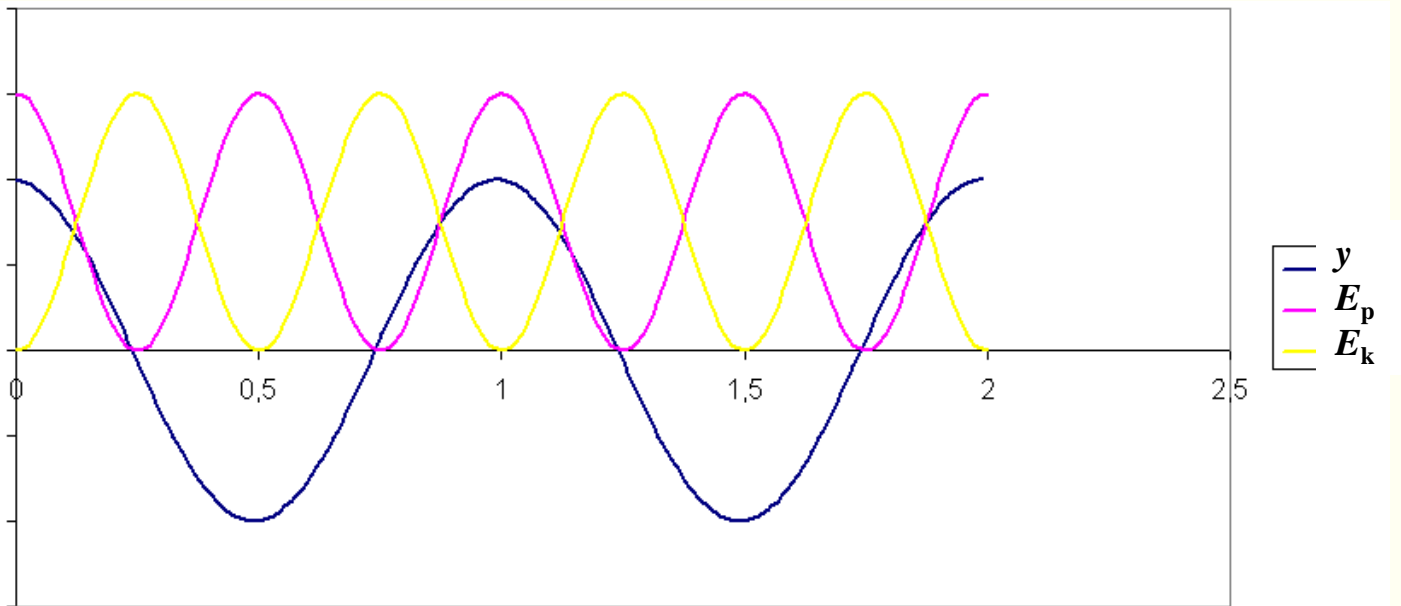


Obr. 11.5 Časové priebehy výchylky, rýchlosti a zrýchlenia

Pohyb kmitavý

Pri netlmenom harmonickom pohybe platí zákon zachovania mechanickej energie:

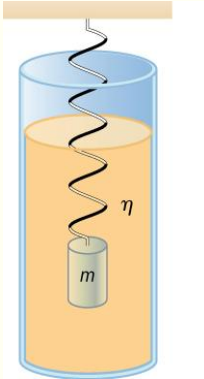
$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y_m^2$$



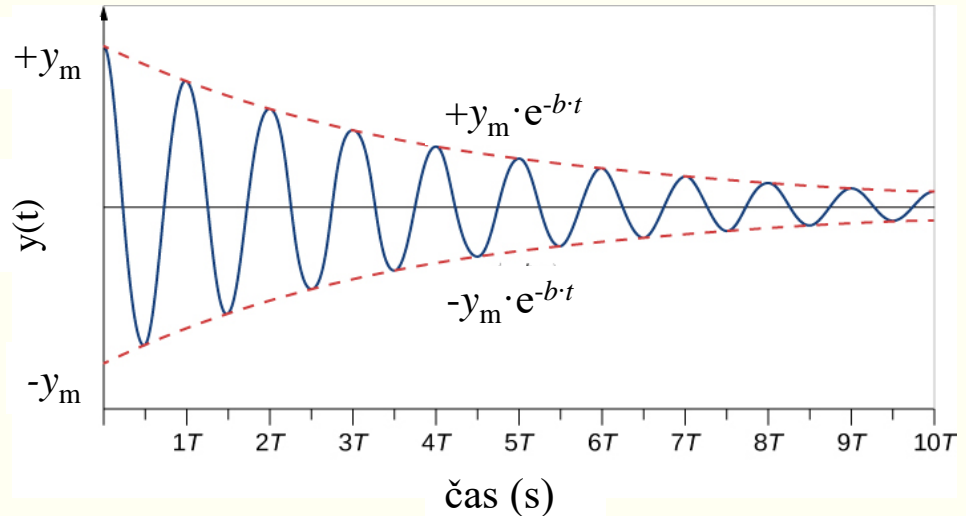
Obr. 11.6 Energia harmonického kmitavého pohybu

Pohyb kmitavý

Tlmený kmitavý harmonický pohyb – príčina: premena mechanickej energie na inú formu energie (predovšetkým na vnútornú energiu). Trecie a odporové sily prostredia ($F = -k' \cdot v$, kde v je rýchlosť) spôsobujú tlmenie kmitania.



Obr. 11.7 Tlmený kmitavý pohyb
(Moebis, 2016)



Obr. 11.8 Tlmený kmitavý pohyb

Výslednica síl pri tlmenom kmitavom pohybe:

$$y(t) = e^{-b \cdot t} \cdot y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$F = -k \cdot y - k' \cdot v$$

$$b = \frac{k'}{2m} - \text{koeficient útlmu}$$

$$\omega = \sqrt{(\omega_0^2 - b^2)}$$

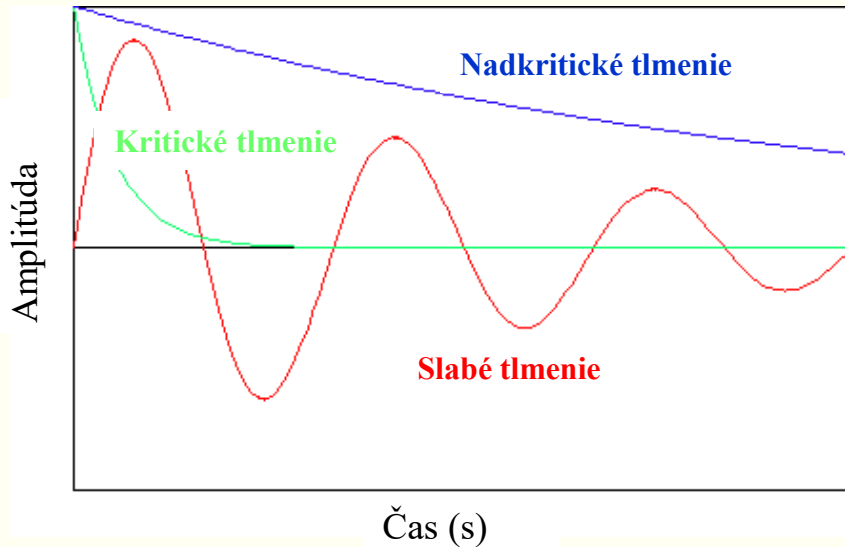
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ uhlová frekvencia netlmených kmitov}$$

k – tuhosť pružiny; k' – odpor prostredia
 m – hmotnosť závažia

$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, f_0 je frekvencia netlmených kmitov

Pohyb kmitavý

Vlastné kmitanie oscilátora je vždy tlmené. Tlmenie má vplyv tiež na periódu T (tlmený oscilátor kmitá voľne s väčšou periódou ako netlmený s rovnakými parametrami, uhlová frekvencia ω tlmených kmitov je menšia ako ω_0).



$\omega_0^2 < b^2$ – nadkritické tlmenie
periodický pohyb nevzniká

$\omega_0^2 = b^2$ – kritické tlmenie

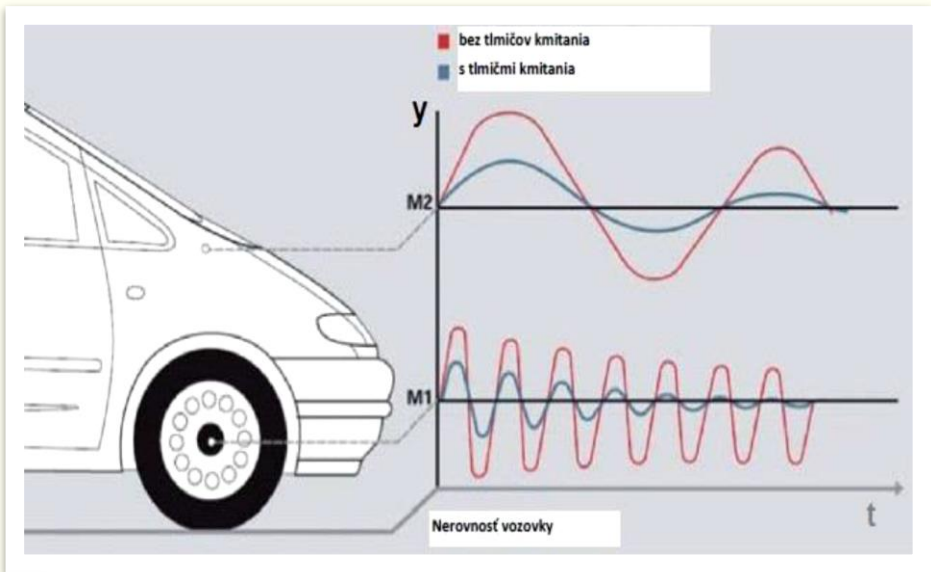
$\omega_0^2 > b^2$ – slabé (podkritické) tlmenie

Energia klesá podľa:

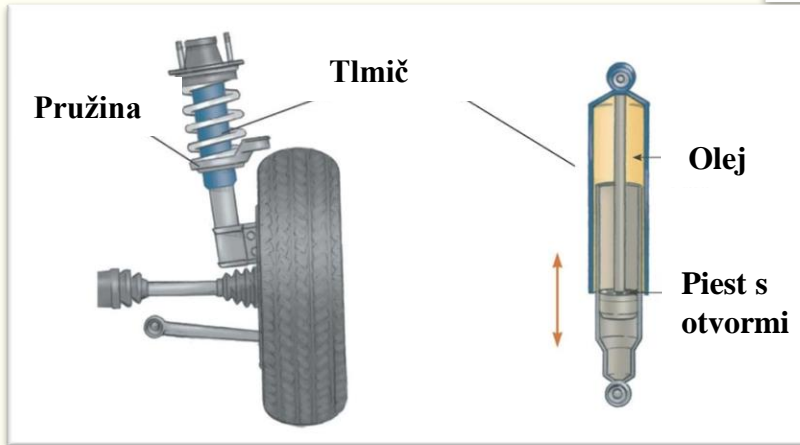
$$E = E_0 \cdot e^{-2bt}$$

Obr. 11.9 Priebeh výchylky 3 druhov tlmeného pohybu (Splung, 2014)

Podiel dvoch po sebe idúcich amplitúd je konštantný ($\frac{y_m \cdot e^{-b \cdot t}}{y_m \cdot e^{-b \cdot (t+T)}} = e^{b \cdot T}$)
a jeho prirodzený logaritmus = $b \cdot T = b/f$ – **logaritmický dekrement útlmu v** .



Obr. 11.10 Tlmenie kmitania (Jurda, 2015)



Obr. 11.11 Závesný systém (Ball, 2018)

Nápravy automobilov sú spojené s pružinami umožňujúcimi pruženie náprav, teda pohyb auta bez veľkých výkyvov aj po nerovnom teréne. Pružiny + hmotnosť auta tvoria mechanický oscilátor, ktorý sa rozkmitá, ak auto nabehne na nerovnosť. Preto sú pružiny doplnené tlmičmi pruženia, ktoré kmitanie utlmí.

Pohyb kmitavý

Vynútený kmitavý pohyb – kmitajúci systém prijíma energiu zvonku. Vynucujúca sila núti systém kmitať *s všeobecne inou* frekvenciou ako je frekvencia vlastných kmitov. Ak sa obidve frekvencie k sebe približujú, vzniká **rezonancia**.

Vynucujúca periodická sila:

$$F_v = F_m \cdot \cos(\omega_v \cdot t)$$

Výslednica síl pri vynútenom kmitavom pohybe:

$$F = -k \cdot y - k' \cdot v + F_m \cdot \cos(\omega_v \cdot t)$$

V ustálenom stave pre výchylku platí:

$$y(t) = B \cdot \cos(\omega_v \cdot t + \varphi)$$

To znamená, že systém v ustálenom stave koná harmonický pohyb s frekvenciou ω_v vynucujúcej sily.

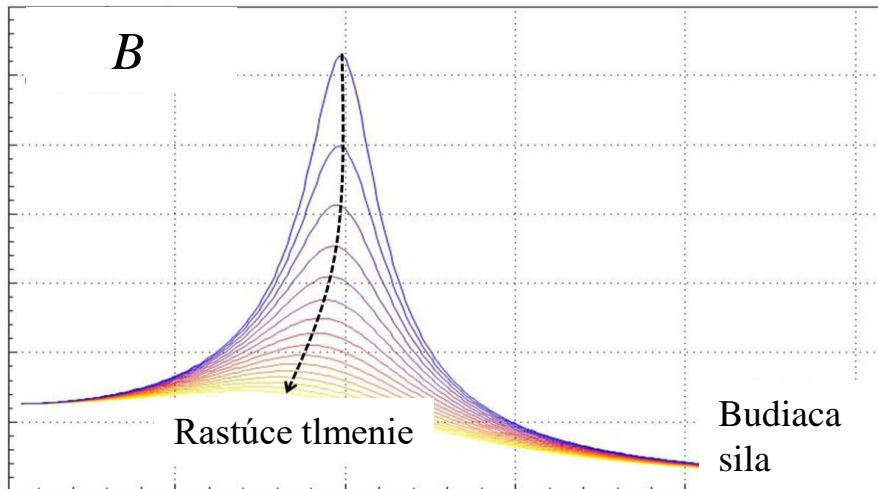
Rezonancia

Rezonancia je jav, pri ktorom sa frekvencia vynúteného kmitania rovná frekvencii vlastného kmitania.

Rezonancia – najvyššia hodnota amplitúdy B vtedy, keď $\omega_v = \omega_0$

Každý oscilátor možno charakterizovať rezonančnou krivkou a kvalitou oscilátora.

Rezonančná krivka je závislosť amplitúdy oscilácií od budiacej frekvencie, kvalita oscilátora súvisí so šírkou rezonančnej krivky.



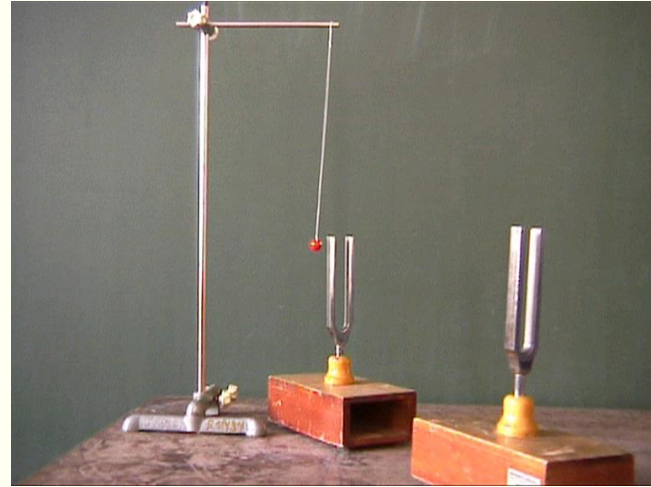
Obr. 11.12 Rezonančná krivka (WordPress.com, 2015)

ω_0 – vlastná frekvencia
kmitajúceho systému
 ω_v – vynucujúca frekvencia

Potlačenie rezonancie:

Zmena vlastnej frekvencie mechanizmu
Doplnenie mechanizmu tlmičom
Zväčšenie trenia mechanizmu





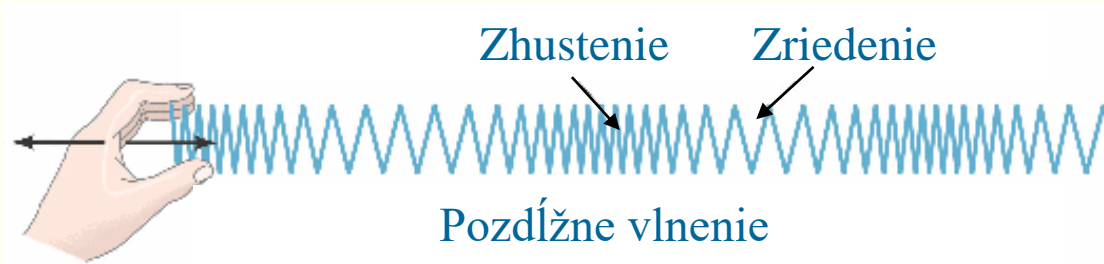
Obr. 11.13 Prejavy rezonancie

Mechanické vlnenie

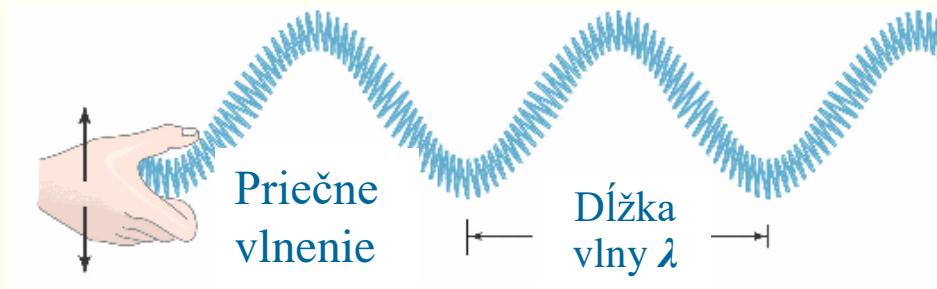
Mechanické vlnenie – šírenie kmitavého pohybu látkovým prostredím, bez prenosu látky. Kmitanie jednej častice sa väzbovými silami prenáša na ďalšie častice.

Zdroj vlnenia – kmitavý pohyb (ladička, struna, membrána reproduktora).

Pozdĺžne vlnenie – častice prostredia kmitajú rovnobežne so smerom šírenia vlnenia. Vznikajú zhustenia a zriedenia častíc v smere šírenia vlnenia.



Priečne vlnenie – častice prostredia kmitajú kolmo na smer šírenia vlnenia.



Obr. 11.14 Pozdĺžne a priečne vlnenie (Zohuri, 2023)

Mechanické vlnenie

Všetky veličiny opisujúce vlnenie sú funkciami času ako aj polohy (súradnice) bodu, ktorým vlnenie prechádza.

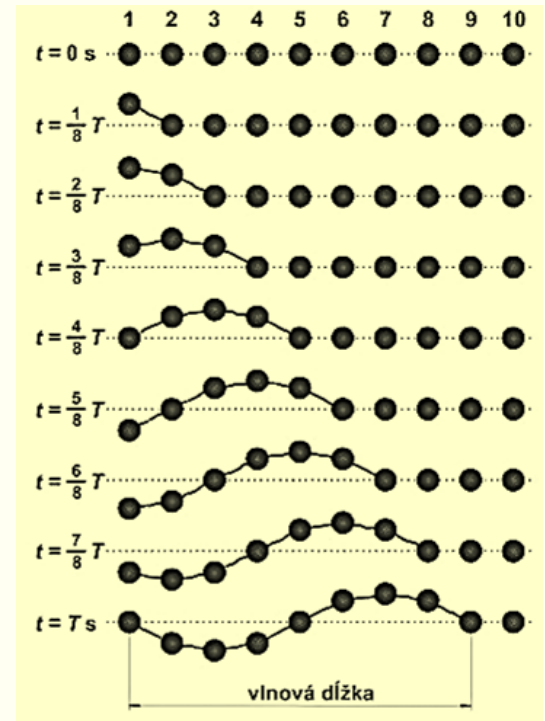
Ak kmit postupuje v smere osi x konštantnou rýchlosťou v , tak za čas kmitu T (s) sa vlnenie od zdroja kmitania rozšíri do vzdialenosti, ktorá sa nazýva vlnová dĺžka λ .

Vlnová dĺžka λ (m) je vzdialenosť dvoch najbližších častíc kmitajúcich pri šírení vlnenia s rovnakou fázou.

Fázová rýchlosť v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), ktorou sa šíri vlnenie prostredím.

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

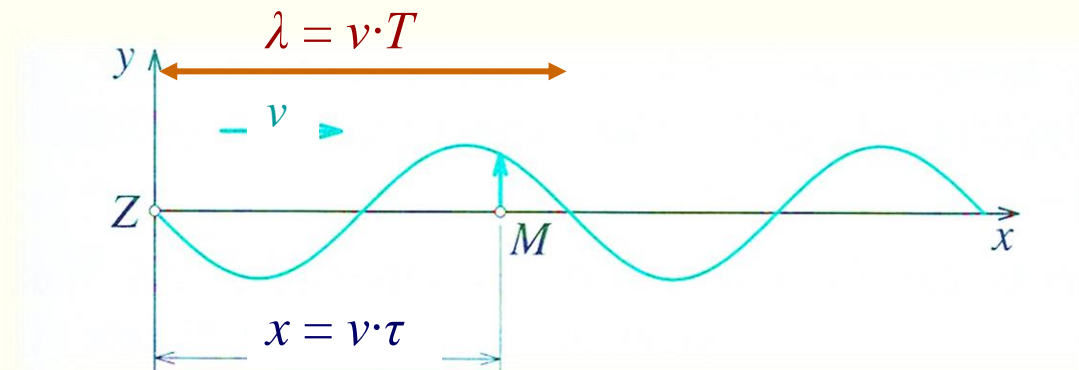
kde f (Hz) je frekvencia kmitania zdroja ($f = 1/T$).



Obr. 11.15 Šírenie vlnenia

Mechanické vlnenie

Vlnenie je možné opísať vzťahom, ktorý určuje okamžitú výchylku y ľubovoľného bodu prostredia v čase t v závislosti na vzdialenosti x od zdroja vlnenia. Zdroj vlnenia kmitá harmonicky: $y = y_m \cdot \sin\omega t$



Obr. 11.16 Šírenie vlnenia prostredím

Do ľubovoľného bodu M vo vzdialenosti x od zdroja sa vlnenie dostane za čas $\tau = x/c$.

Kmitanie v danom bode M bude mať rovnakú výchylku s akou kmital zdroj v čase o τ skôr.

Okamžitá výchylka bodu M:

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

Mechanické vlnenie

Po dosadení za $\omega = 2\pi/T$, a za $v \cdot T = \lambda$ dostaneme rovnicu postupného vlnenia – vyjadrujúcu závislosť okamžitej výchylky ľubovoľnej kmitajúcej častice na čase t ako aj na vzdialenosti x častice od zdroja vlnenia.

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

kde: $2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ je **fáza vlnenia**.

Rovnica platí pre postupné vlnenie priečne ako aj pre postupné vlnenie pozdĺžne. V rôznych prostrediach sa vlnenie šíri rôznou rýchlosťou. *Straty mechanickej energie prenášanej vlnením sa neuvažujú*, t.j. **amplitúda y_m** všetkých bodov je rovnaká, ale ju dosahujú v rôznom čase (okrem bodov kmitajúcich vo fáze). Vlnenie je **netlmené**.

Mechanické vlnenie

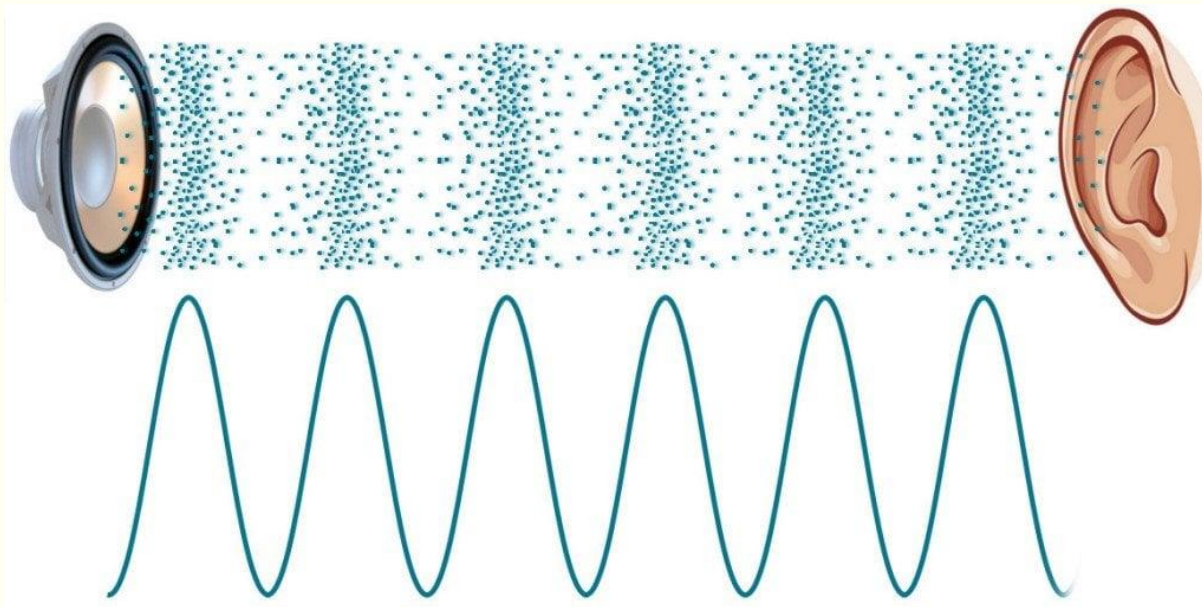
Kmitanie

Veličiny sú len funkciami času.

Vlnenie

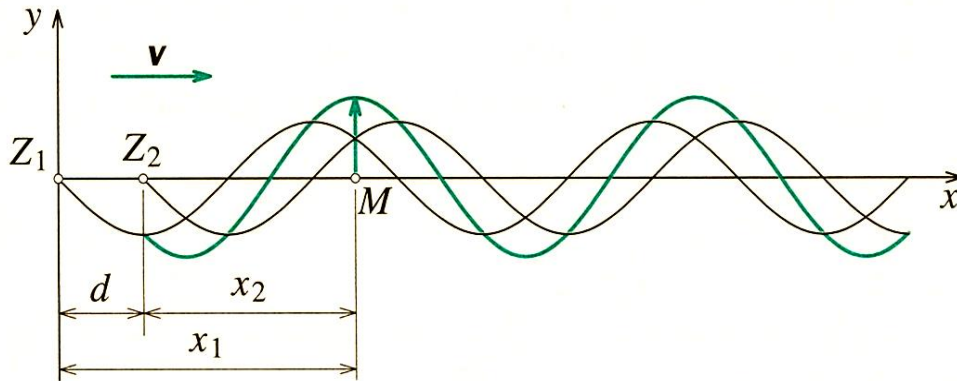
Veličiny sú funkciami času a miesta.

Vlnenie je periodický dej v čase aj priestore.



Obr. 11.17 Šírenie pozdĺžneho vlnenia prostredím (Ashish, 2018)

Interferencia (skladanie) vlnenia



Obr. 11.18 Interferencia vlnenia

$$y_1 = y_m \cdot \sin 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right)$$
$$y_2 = y_m \cdot \sin 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d$$

d – dráhový rozdiel (m)

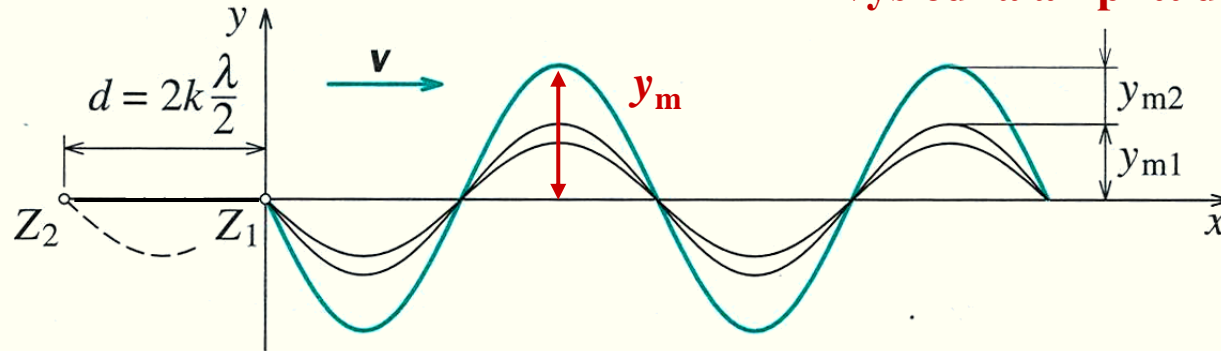
Pri šírení dvoch a viacerých vlnení sa v určitom bode, kde sa vlnenia stretnú **okamžité výchylky skladajú**. Vlnenia sa môžu zosilňovať, zoslabovať, resp. úplne rušiť. Vznikajú **interferenčné maximá a minimá**, rozmiestnenie závisí – vlastností vlnení, od vzdialenosti zdrojov vlnenia.

Najjednoduchšia **interferencia vlnenia** – dve vlnenia s rovnakou frekvenciou, smerom šírenia a na sebe nezávislým dráhovým rozdielom – **koherentné vlnenia**.

Interferenciou dvoch koherentných vlnení vzniká výsledné vlnenie s amplitúdou maximálnou v miestach, kde sa vlnenia stretávajú s rovnakou fázou (interferenčné maximum). Minimálna (nulová) amplitúda je v miestach, kde sa vlnenia stretávajú s opačnou fázou (interferenčné minimum).

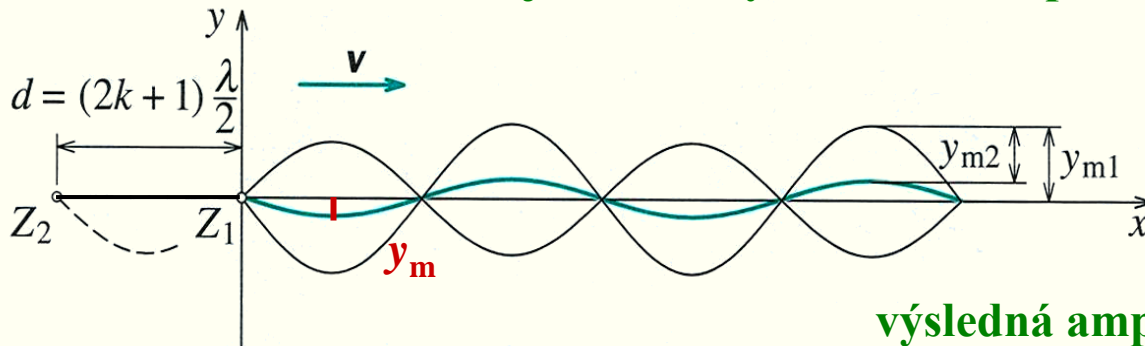
Interferenčné maximum (resp. max. amplitúda) v miestach, kde: $d = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$
 – vlnenia sa stretávajú vo všetkých bodoch s rovnakou fázou,

výsledná amplitúda $y_m = y_{m1} + y_{m2}$



Obr. 11.19 Interferenčné maximum

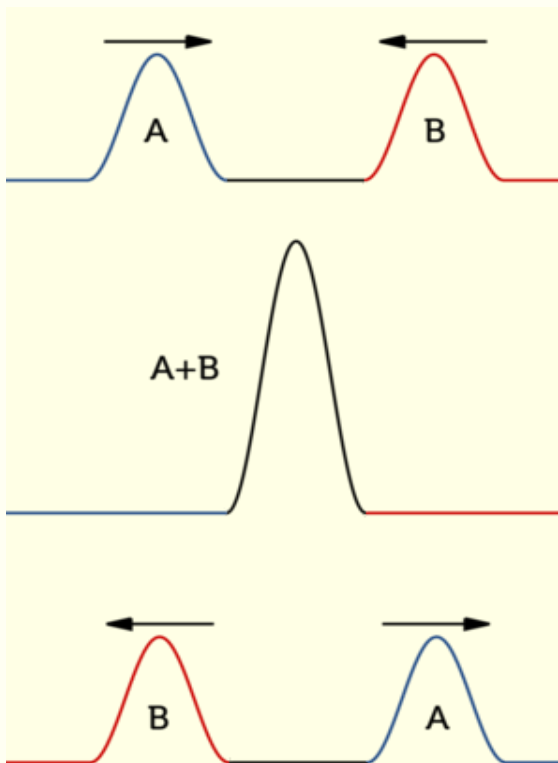
Interferenčné minimum (resp. nulová amplitúda) v miestach, kde: $d = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$
 – vlnenia sa stretávajú vo všetkých bodoch s opačnou fázou,



výsledná amplitúda $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$
 (pre $y_{m1} = y_{m2}$ je $y_m = 0$ a vlnenie sa vyruší)

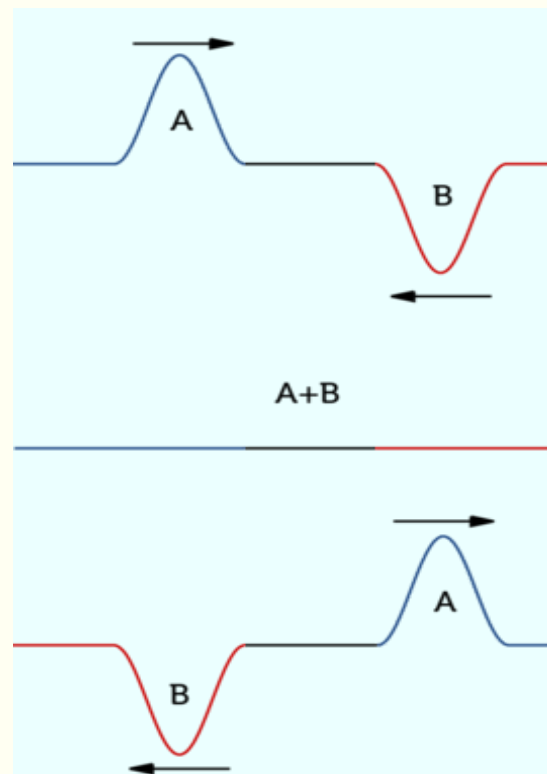
Obr. 11.20 Interferenčné minimum

Ak 2 vlnenia s **rovnakou fázou** interferujú – amplitúda novej vlny je väčšia (zvýšenie hlasitosti).



Obr. 11.21 Konštruktívna interferencia

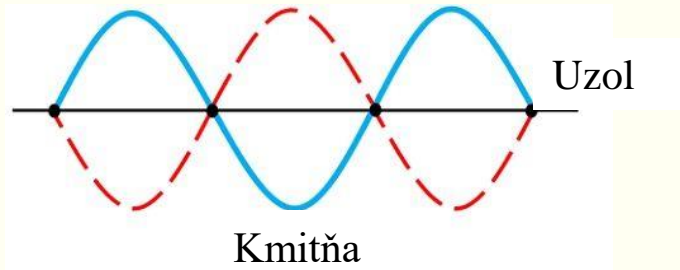
Ak 2 vlnenia s **opačnou fázou** interferujú – amplitúda novej vlny je menšia (pokles hlasitosti), resp. nulová.



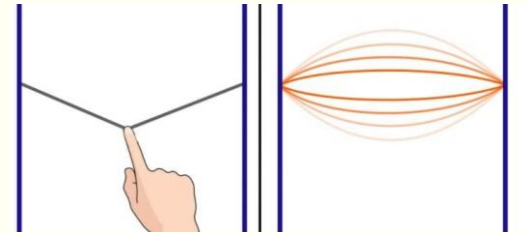
Obr. 11.22 Deštruktívna interferencia

Stojaté vlnenie

Stojaté vlnenie vzniká vtedy, keď sa skladajú dve vlnenia s rovnakou amplitúdou a frekvenciou postupujúce proti sebe.



Obr. 11.23 Stojaté vlnenie



Obr. 11.24 Vznik stojatej vlny v strune
(Ashish, 2018)

Body, ktoré kmitajú s **najväčšou amplitúdou** – **kmitne**, body, ktoré **nekmitajú** – **uzly**. Dve kmitne sú od seba vzdialené o $\lambda/2$, dva uzly sú od seba vzdialené tiež $\lambda/2$.

Kmitňa – **uzol** vzdialené od seba o $\lambda/4$. Poloha kmitní a uzlov stojateho vlnenia sa nemení.

Stojaté vlnenie

Body kmitajú s rôznou amplitúdou, s rovnakou fázou. **Neprenáša sa energia** (mení sa potenciálna energia pružnosti na kinetickú energiu a naopak).

Postupné vlnenie

Body kmitajú s rovnakou amplitúdou, s rôznou na čas závislou fázou. Vlnenie sa šíri rýchlosťou v .

Prenáša sa energia.

Stojaté vlnenie

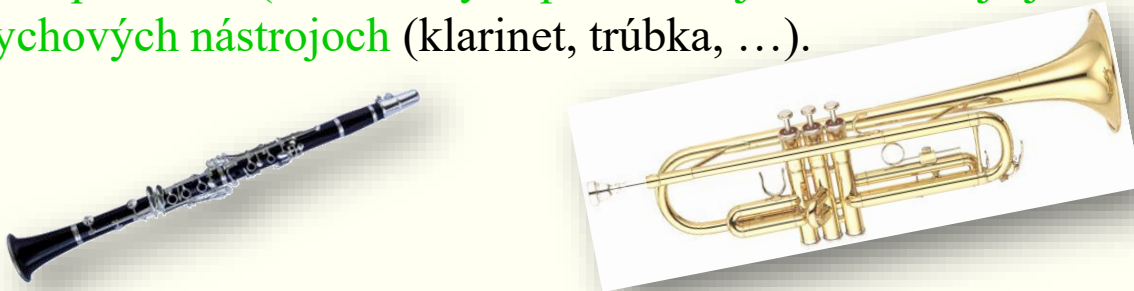
Stojaté vlnenie môže byť priečne, resp. pozdĺžne.

Stojaté vlnenie priečne – zdroj zvuku pri strunových nástrojoch (gitara, husle, ...).



*Obr. 11.25 Aplikácia priečného stojatého vlnenia
(Baumgarten, 2022)*

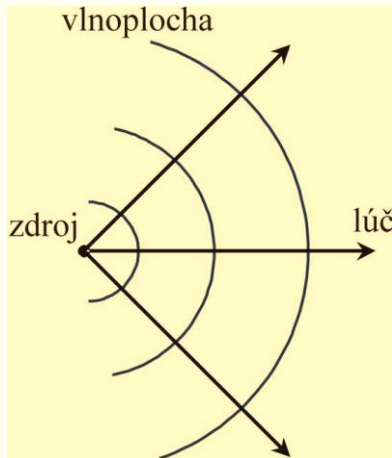
Stojaté vlnenie pozdĺžne (vzduchový stĺpec v dutej časti nástroja je zdrojom zvuku pri dychových nástrojoch (klarinet, trúbka, ...).



*Obr. 11.26 Aplikácia pozdĺžneho stojatého vlnenia
(Muziker, 2023)*

Vlnenie v rovine a priestore

Pri dvojrozmerných alebo trojrozmerných vlnách (vlny na vodnej hladine, zvukové vlny) sa používajú pojmy **vlnoplocha** a **lúč**.



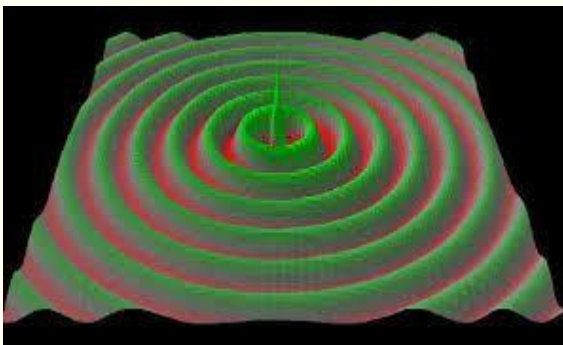
Obr. 11.27 Vlnoplocha, lúč

Vlnoplocha je množina bodov, do ktorých sa dostalo vlnenie za určitý čas. Tieto body kmitajú s rovnakou fázou.

Lúč je orientovaná čiara, ktorá určuje smer šírenia vlnenia. Lúč je v každom bode kolmý na vlnoplochu.

V prostredí – **homogénnom, izotropnom** sa šíri vlnenie všetkými smermi rovnako – **vlnoplocha má tvar gule**.

V **anizotropnom prostredí** sú rýchlosti vln v rôznych smeroch rôzne a **vlnoplocha** v okolí bodového zdroja nebude guľová, ale **zložitejšia**.

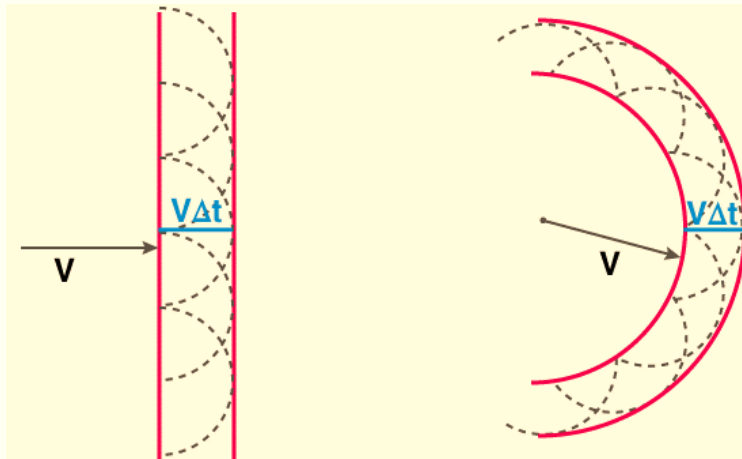


Obr. 11.28 Vlnenie v izotropnom prostredí
(Soukopová, 2015)

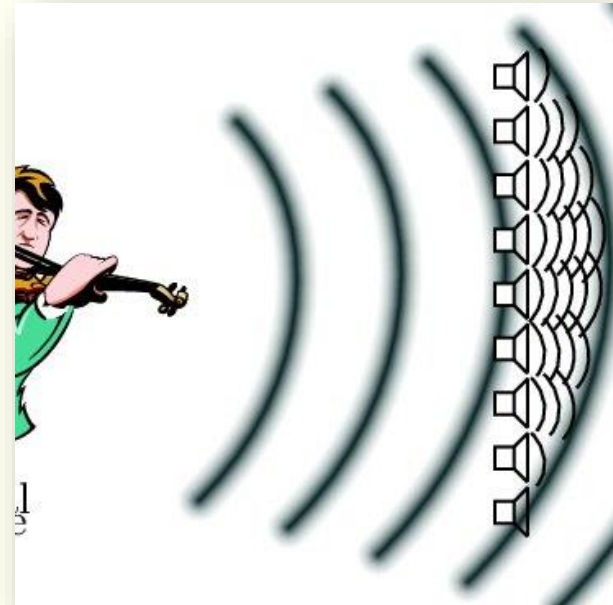
Huygensov princíp

Šírenie vlnenia – vlnenie naráža na prekážky, prechádza rozhraním prostredí.

Huyghensov princíp – objasňuje mechanizmus šírenia vlnenia v priestore.



Obr. 11.29 Rovinná a guľová vlna



Obr. 11.30 Aplikácia Huygensovho princípu
(Rabenstein, 2006)

Huyghensov princíp

Vlnenie sa šíri tak, že všetky body priestoru, do ktorých sa vlnenie v určitom čase t dostane, sa stávajú bodovými zdrojmi vlnenia a elementárnymi vlnoplôch.

Vlnoplocha v čase $t + dt$ je obálkou takýchto elementárných vlnoplôch.

Odraz, lom a ohyb vlnenia

Vlnenie na rozhraní dvoch prostredí:

Postupuje všetkými smermi fázovou rýchlosťou závislou od prostredia.

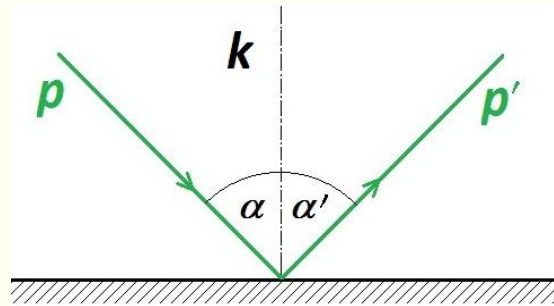
Na rozhraní 2 prostredí sa:

- a) vlnenie **sa vracia** do pôvodného prostredia – **odráža sa** (veľkosť prekážky **väčšia** ako λ);
- b) **vniká do** druhého prostredia so **zmenenou fázovou** rýchlosťou, **mení sa smer** šírenia – **láme sa**;
- c) **pohlí sa** (absorbuje) - častice prostredia odoberajú vlneniu energiu;
- d) vlnenie **sa ohýba** ak dopadne **na malé prekážky** (aj otvory) – (veľkosť prekážky je porovnateľná s λ).

(rozhlas 15 m – 2 000 m; TV 1m – 15 m priamo).

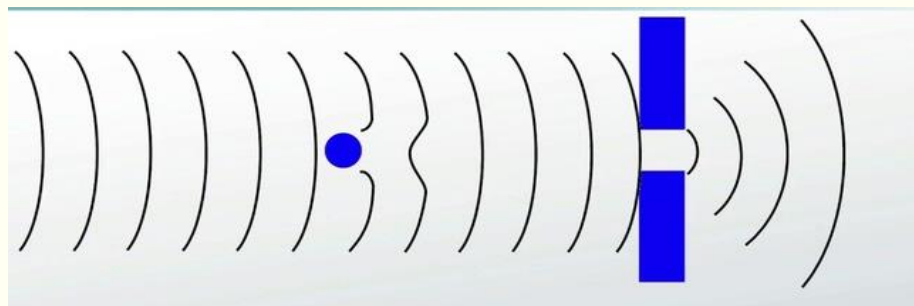
Zákon odrazu – pri odraze od povrchu sa uhol odrazeného lúča rovná uhlu dopadajúceho lúča. Odrazený lúč zostáva v rovine dopadu.

Uhly sa merajú od kolmice dopadu.

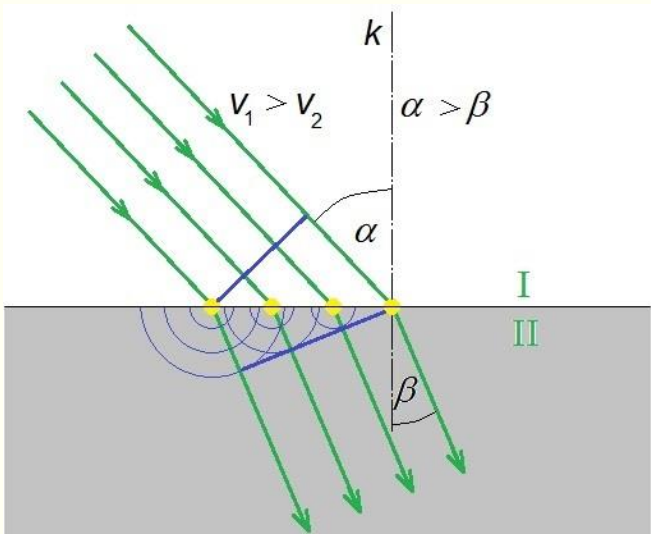


Obr. 11.31 Odraz vlnenia (Pazdera, 2015)

Ohyb – dochádza k nemu v prípade zvukového vlnenia, λ je veľká, porovnateľná s veľkosťou bežných prekážok.



Obr. 11.32 Ohyb vlnenia (Calderado, 2022)



Obr. 11.33 Lom vlnenia pomocou Huygensovho princípu (Pazdera, 2015)

Pre lom platí **Snellov zákon lomu**:

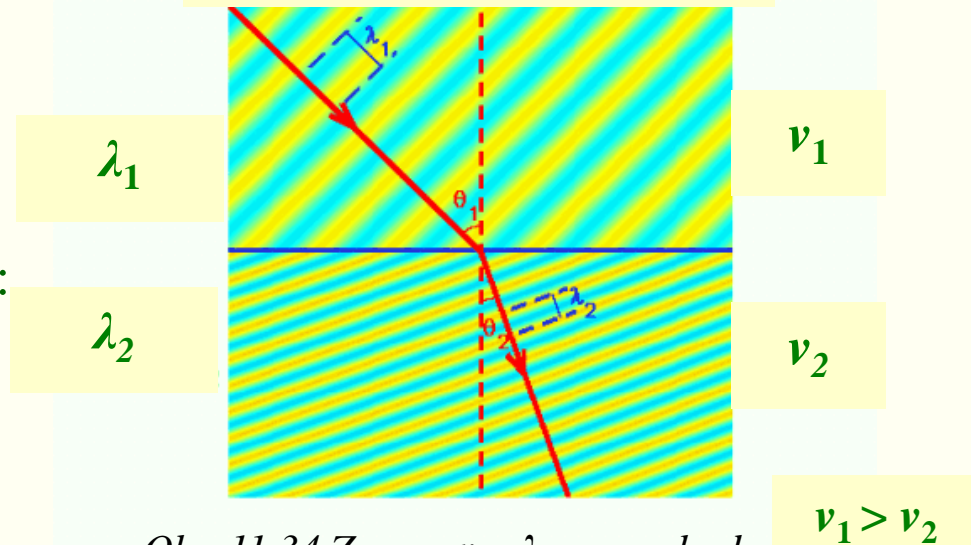
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

α – uhol dopadu; v_1 – rýchlosť v 1. prostredí
 β – uhol lomu; v_2 – rýchlosť v 2. prostredí
 n – index lomu

Lom

- ak platí $v_1 > v_2$, tak nastáva lom **ku kolmici**,
- ak platí $v_2 > v_1$, tak nastáva lom **od kolmice**.

Lom vlnenia



Obr. 11.34 Zmena v a λ po prechode vlnenia rozhraním (Maury, 2023)

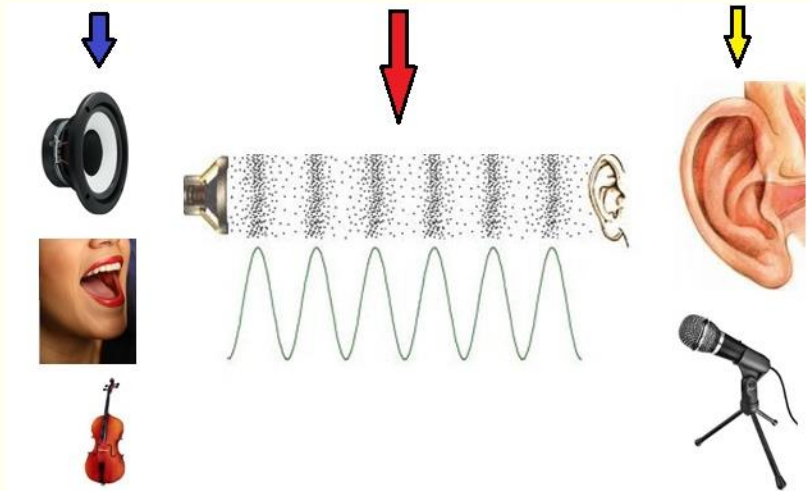
Základy akustiky

Ciele:

- Akustika – významná oblasť fyziky zaoberajúca sa šírením mechanického vlnenia pružným prostredím.
- Pochopenie zákonitostí a metód akustiky.
- Osvojenie si terminológie, definícií, zákonov.
- Aplikovať zákony a zákonitosti pri riešení teoretických zadaní a praktických úloh.

Akustika

Akustika je vedný a technický odbor, ktorý sa zaoberá štúdiom vlnenia v pružnom prostredí a štúdiom javov, súvisiacich s týmito kmitmi – vznikom, šírením a pôsobením (akustického, zvukového) vlnenia.



Obr. 11.35 Zdroj – šírenie – príjem zvuku (Pazdera, 2015)

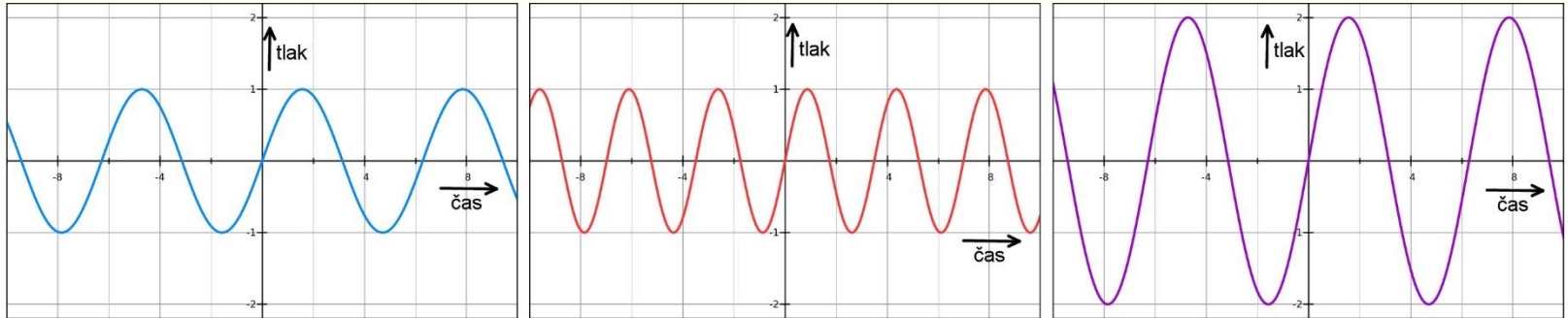
Podľa povahy zvukového vnemu sú zvuky:

- **nehudobné** (neperiodické) – hluč, šum, praskot, buchot, zvuk spoluhlások,
- **hudobné** (periodické) – zvuky hudobných nástrojov a aj samohlások.

Zvukové vlnenie má všetky vlastnosti vlnenia v priestore.

Zvuk sa posudzuje z pohľadu:

– jeho fyzikálnych parametrov (vlnová dĺžka, frekvencia, amplitúda)



Obr. 11.36 Zvukové vlnenia rôznych frekvencií a amplitúd (Quark, 2015)

– fyziologických účinkov, subjektívnych vnemov a pocitov



Obr. 11.37 Subjektívne vnímanie (Ono Sokki, CO., LTD., 2023)

Odbory akustiky

Fyzikálna akustika

Študuje spôsob vzniku a šírenia zvuku.

Fyziologická akustika

Zaoberá sa vznikom zvuku v hlasovom orgáne človeka a jeho vnímaním v uchu.

Priestorová akustika

Opisuje, ako sa zvuk šíri v uzavretom alebo polouzavretom priestore.

Stavebná akustika

Zaoberá sa šírením zvuku v budovách (pohlcovanie zvuku a zvuková izolácia).

Psychoakustika

Zaoberá sa vnímaním zvuku.

Elektroakustika

Zaoberá sa premenou akustických signálov na elektrické, ich spracovaním a opätovnou premenou na signály akustické (zvukový elektroakustický systém).

Hudobná akustika

Skúma vznik a akosť zvuku z hudobného hľadiska.

Vibroakustika

Skúma vznik, prenos a vyžarovanie zvuku z akustických a vibračných zdrojov. Je na rozhraní akustiky a štruktúrnej dynamiky.

Hydroakustika

Študuje šírenie zvuku v tekutinách a jeho praktické aplikácie (detekcia plávajúcich objektov).

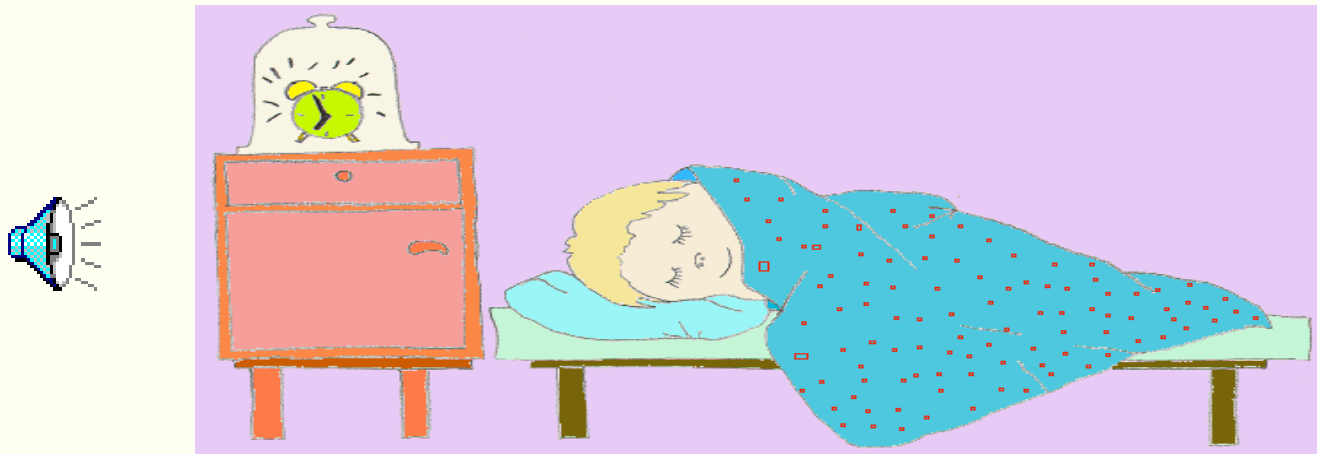
Zvuk

Je mechanické vlnenie, ktoré sa šíri prostredím a je vnímateľné sluchovým orgánom, resp. detekovateľné špeciálnymi prístrojmi.

- vzniká vychyľovaním častíc prostredia zo svojej rovnovážnej polohy (kmitaním),
- šíri sa prostredím odovzdávaním energie kmitania medzi susediacimi časticami,
- môže sa šíriť v ľubovoľnom **pružnom** prostredí:
 - pevnom
 - kvapalnom
 - plynnom.

Zvukové (akustické) vlnenie ak $f = (20 - 20\ 000)$ Hz; $\lambda = (17 - 0,017)$ m.

Infrazvuk $f < 20$ Hz; Ultrazvuk $f > 20\ 000$ Hz



Obr. 11.38 Bez vzduchu niet zvuku (Čenčariková, 2015)

Charakteristiky akustického vlnenia

Akustická rýchlosť v_a (vektor) – rýchlosť, ktorou sa častice prostredia pohybujú v rytme zmien akustického tlaku, t.j. okolo svojej rovnovážnej polohy.

$$v_a = v_0 \cdot \sin \omega \cdot (t - x/c)$$

Akustická rýchlosť sa pohybuje od $5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (*prah počuteľnosti*) až po $1,6 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (*prah bolesti*).

Fázová rýchlosť zvuku c – rýchlosť šírenia zvukového rozruchu v smere zvukového lúča prostredím, resp. rýchlosť šírenia zvuku prostredím.

– vo vzduchu

$$c = 331,8 + 0,61 \cdot t \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

Pre kvapalné látky:

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

k – modul objemovej pružnosti, pre plyny $k = \kappa \cdot p_0$

κ – Poissonova konštanta

Pre plynné látky:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p_0}{\rho}}$$

Pre pevné látky:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\frac{c_L}{c_T} > \sqrt{2}$$

Charakteristiky akustického vlnenia

Akustický tlak p_a – (v danom mieste prostredia, ktorým sa šíri akustické vlnenie) – striedavý tlak superponovaný barometrickému ($\approx 10^5$ Pa) tlaku:

$$p_a(t) = p_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

– zhustovanie, zriedovanie kmitajúcich častíc prostredia je príčinou zvýšenia, resp. poklesu tlaku v prostredí. Akustický tlak p_a (Pa) na prahu počuteľnosti pri 1 kHz je $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ Pa a na prahu bolesti ≈ 200 Pa.

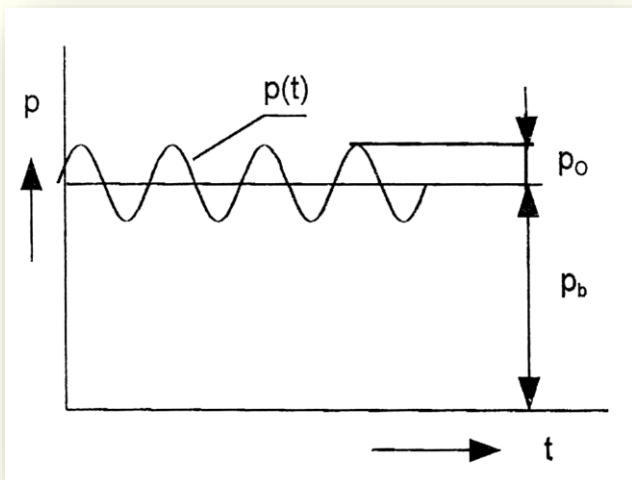
Akustický tlak je vo fáze s akustickou rýchlosťou, teda: $p_0 = \rho \cdot c \cdot v_0$;

p_0 – amplitúda (maxim. p_a) tlaku; ρ – hustota;
 c – rýchlosť zvuku; v_0 – akustická rýchlosť

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \doteq 0,707 \cdot p_0 \quad p_{ef} \text{ – efektívna hodnota akust. tlaku}$$

Veľkosť akustického tlaku závisí od:

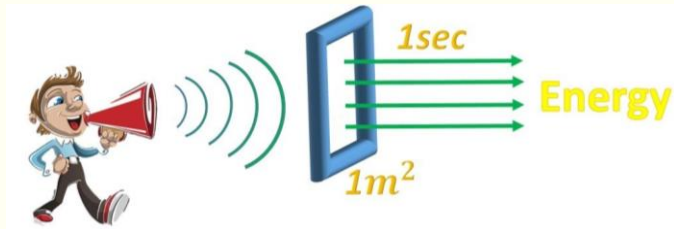
- vzdialenosti od zdroja hluku – klesá s rastúcou vzdialenosťou,
- orientácie príjemcu,
- teplotného a rýchlostného gradientu prostredia,
- prekážok.



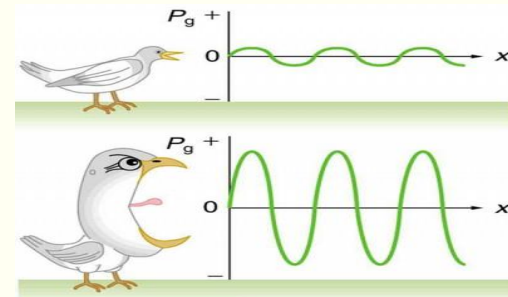
Obr. 11.39 Akustický tlak (Mišun, 2005)

Charakteristiky akustického vlnenia

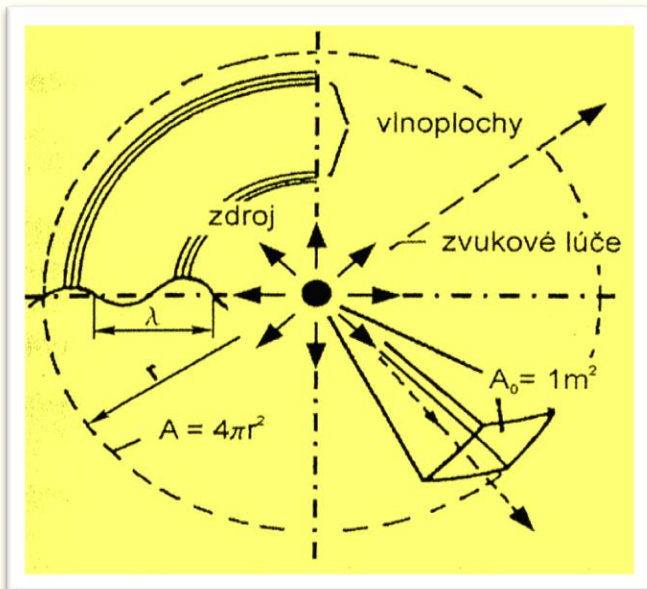
Akustická intenzita (vektor) – I ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) je energia zvukového vlnenia, ktorá prejde za 1s plochou (t.j. výkon zvukovej vlny) 1m^2 kolmou na smer šírenia vlnenia.



Obr. 11.40 Sound Intensity (AmjidTV, 2021)



Obr. 11.41 Akustický tlak úmerný amplitúde (Urone, 2022)



Obr. 11.42 Ku odvodeniu intenzity (Žiaran, 2006)

$$I = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S}$$

E – akustická energia (J); t – čas (s);

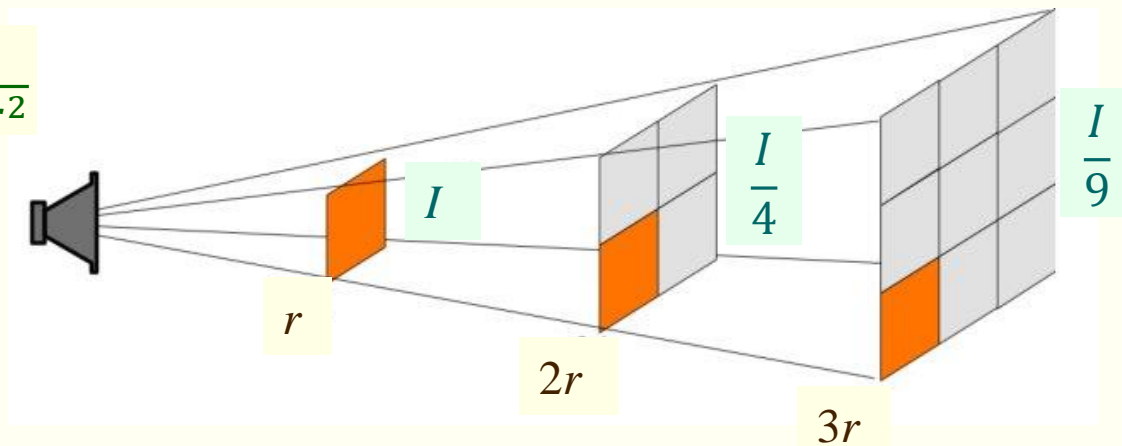
P – akustický výkon (W); S – plocha (m^2)

Akustická intenzita na prahu počuteľnosti pri 1 kHz je $I_0 = 10^{-12} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, bolestivý pocit vyvolajú zvuky s akustickým výkonom nad 10 W.

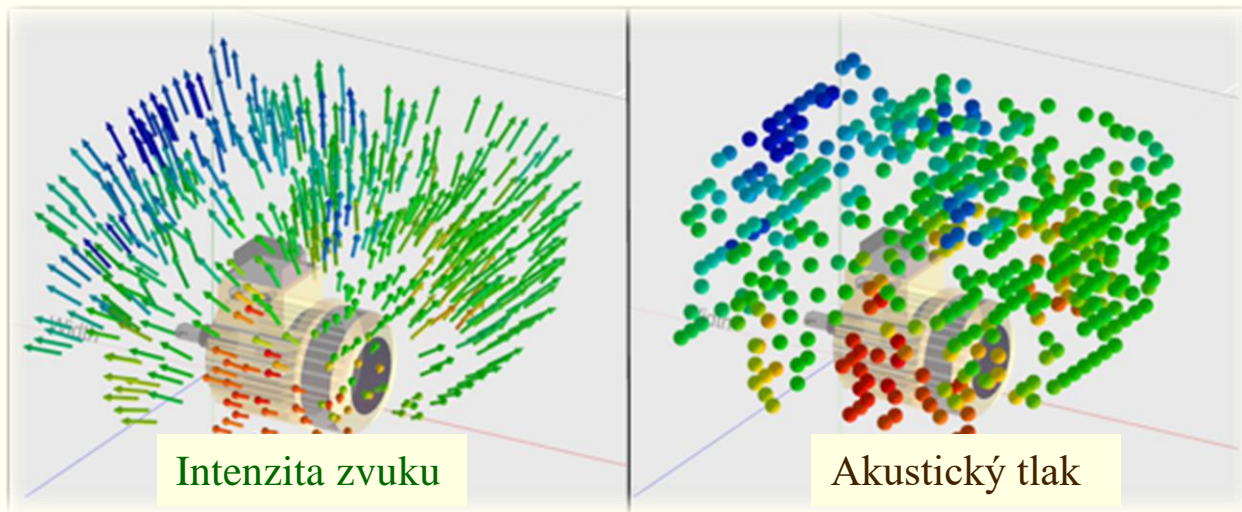
Intenzita je priamo úmerná druhej mocnine akustického tlaku – $I \approx p_a^2$.

S rastúcou vzdialenosťou od zdroja **akustická intenzita klesá** tak, ako sa **zväčšuje plocha povrchu** gule ($S = 4\pi \cdot r^2$) okolo zdroja zvuku, $I \approx \frac{1}{r^2}$

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$



Obr. 11.43 Pokles intenzity zvuku so vzdialenosťou (Kaplanis, 2012)



Obr. 11.44 Akustický tlak a intenzita (Kaplanis, 2012)

Charakteristiky akustického vlnenia

Akustický výkon P (W) – základná a najdôležitejšia charakteristika opisujúca akustické vlastnosti zdroja zvuku. P je podiel zvukovej energie a časového intervalu, za ktorý je energia vyžiarená, prijatá alebo prejde zvolenou plochou:

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

Pre rovinnú akustickú vlnu (kedy sú akustický tlak p_a a akustická rýchlosť v_a vo fáze) šíriacu sa plochou S kolmou na smer šírenia vlny platí:

$$P = I \cdot S = p_a \cdot v_a \cdot S$$

Akustický výkon zdroja zvuku – meraním akustického tlaku p_a alebo meraním intenzity zvuku I na uzatvorenej ploche S obklopujúcej zdroj zvuku. Najčastejšie povrch gule alebo kvádra. Veľkosť akustického výkonu zdroja zvuku je daná súčinom intenzity zvuku a povrchu gule alebo kvádra ($P = I \cdot S$).

Charakteristiky akustického vlnenia

Charakteristická akustická impedancia prostredia Z ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) (akustický vlnový odpor) – komplexný odpor, ktorý kladie prostredie šíreniu akustického rozruchu. Akustická impedancia je pre rovinnú zvukovú vlnu daná:

$$Z = \frac{p_0}{v_0} = \rho \cdot c$$

Charakteristická akustická impedancia prostredia Z – závisí od prostredia, ovplyvňuje veľkosť odrazenej akustickej energie pri dopade zvukovej vlny na rozhranie prostredí s rôznymi akustickými impedanciami. Pri prechode cez rozhranie rôznych prostredí sa zachováva f , ale mení sa rýchlosť šírenia vlny c a λ .

Pri prechode prostredím sa môže časť energie zvukovej vlny absorbovať (premeniť na teplo) – prejav – pokles amplitúdy a okamžitej akustickej rýchlosti.

Akustická impedancia Z sa pri prechode zo vzduchu do vody zväčší približne 3600 x.

Vzduch: ρ ($1,21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c ($344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$): $Z = 416 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$,

Voda: ρ ($1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c ($1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$): $Z = 1,5 \text{ MPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$

Tab. 11.1 Hustota, rýchlosť a akustická impedancia vybraných materiálov

Materiál	Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Rýchlosť c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Akustická impedancia Z ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)
Polyetylén	900	1 950	1 760
Drevo (mäkké)	450	3 600	1 620
Drevo (tvrdé)	850	3 850	3 270
Mlieko	1 037	1 548	1 610
Guma	1 200	1 600	1 920
Oceľ	7 800	5 790	45 450
Korok	0 24	530	127
Hliník	2 690	6 420	17 000

Hladiny akustických veličín

Citlivosť ľudského sluchu pri vnímaní akustickej intenzity nie je rovnaká, s rastúcou intenzitou sa znižuje. Pri zvyšovaní akustickej intenzity akoby sluch strácal schopnosť vnímať v plnej hodnote ďalší prírastok.

Rozsah intenzít zvukov je veľký (12 dekád). Preto, a na základe **Weberovho-Fechnerovho fyziologického zákona**, ktorý predpokladá, že zmyslové vnímanie človeka je úmerné logaritmu podnetu, sa používa aj pre základné akustické veličiny logaritmická miera vyjadrenia.

Hladina akustického tlaku L_p (dB) je v praxi najčastejšie používaná veličina.

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$$

p_a – akustický tlak spôsobený zdrojom
 $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa referenčná hodnota
akustického tlaku

Zdvojnásobenie akustického tlaku (v Pa) – zvyšuje hladinu akustického tlaku (v dB) o 6 dB (alebo $20 \log(2) = 20 \cdot 0,3$).

Hladiny akustických veličín

Hladina akustickej intenzity L_I (dB) je definovaná ako

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

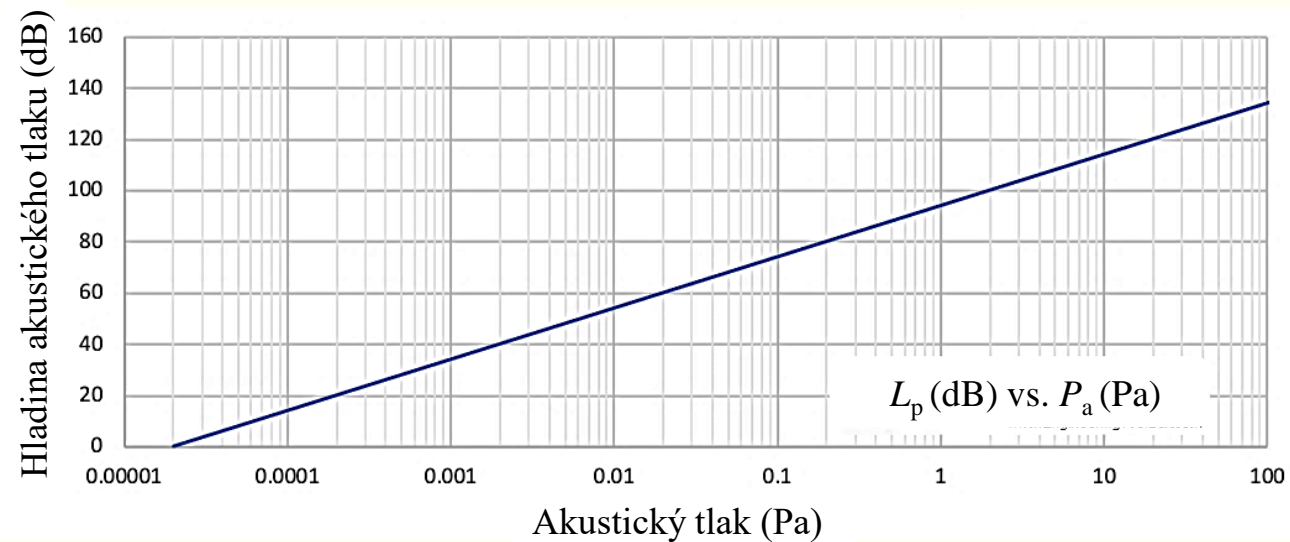
I – akustická intenzita

$I_0 = 10^{-12}$ (W·m⁻²) referenčná hodnota intenzity

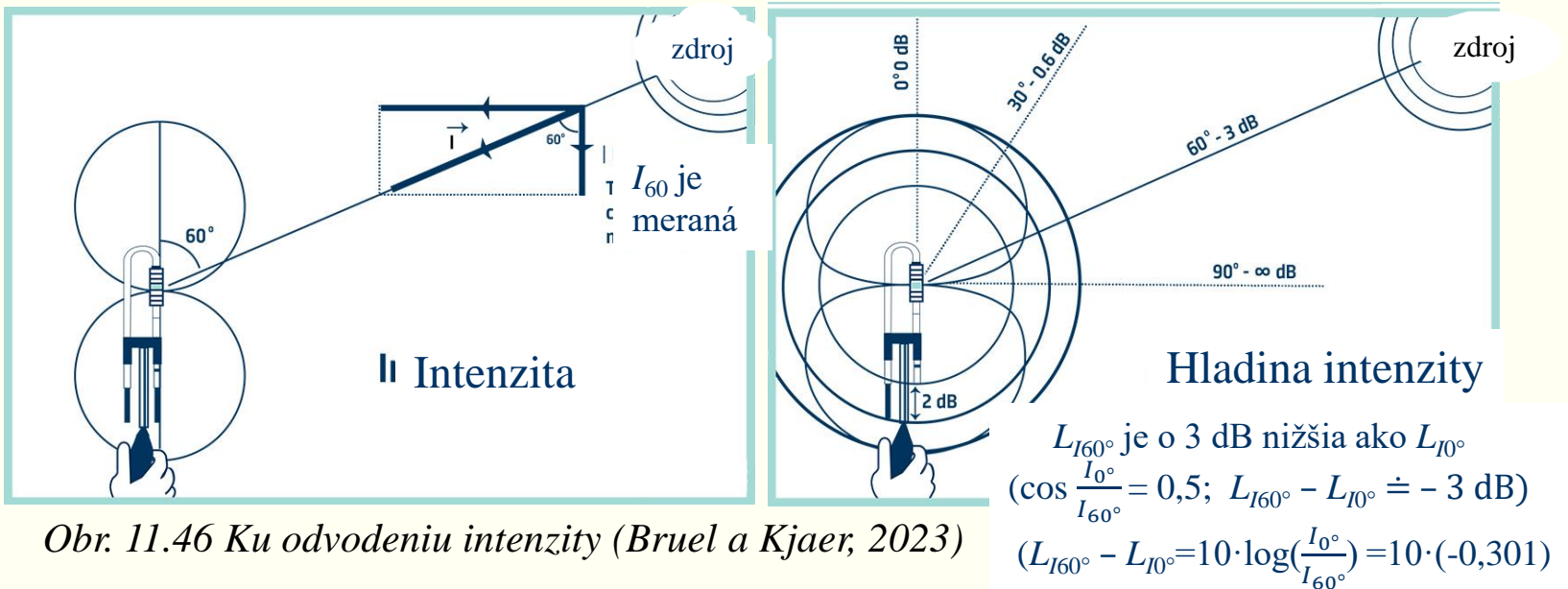
$L_I \doteq L_p$, lebo pre obidve veličiny sú stanovené nezávislé referenčné hodnoty I_0, p_0 . Pri bežných atmosférických podmienkach je rozdiel L_I a L_p menší ako 0,2 dB.

Tab.11.2 Akustický tlak a hladina akustického tlaku činnosti

Zdroj zvuku	Akustický tlak (Pa)	Hladina akustického tlaku (dB)
Prah počuteľnosti pre dokonalý sluch	0,00002	0
Prah počuteľnosti pre dobrý sluch		10
Šeľest lístia	0,0002	20
Nahrávacie štúdio		30
Tichá usadlosť	0,002	40
Hovor	0,02	60
Pouličná prevádzka	0,2	80
Nákladné vozidlo	2	100
Nitovačka	20	120
Prah bolesti		135
Vrtuľník	200	140
Prúdový motor	2000	160



Obr. 11.45 Porovnanie hladiny akustického tlaku v dB a akustického tlaku v Pa
(The Engineering ToolBox, 2004)



Obr. 11.46 Ku odvodeniu intenzity (Bruel a Kjaer, 2023)

Hladiny akustických veličín

Hladina akustického výkonu L_P (dB) je definovaná ako

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0}$$

P – akustický výkon

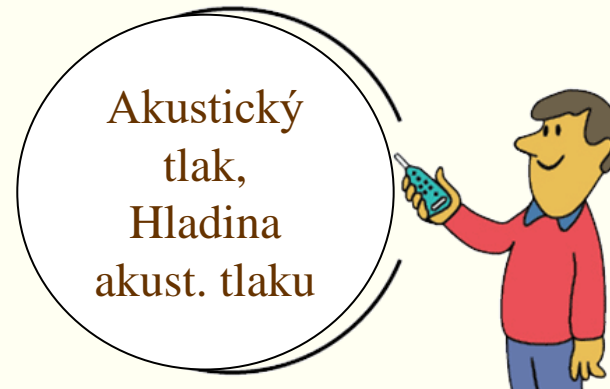
$P_0 = 10^{-12}$ (W) referenčná hodnota akustického výkonu

Jeho hladina nezávisí na: umiestnení zariadenia, podmienkach okolitého prostredia, od vzdialenosti od bodu merania, pretože veličina charakterizuje akustický výkon zdroja zvuku (napr. stroja).

L_P – je nevyhnutná pre – stanovenie hladiny akustického tlaku v danej vzdialenosti od stroja a stanovenie dennej hlukovej expozície pracovníka.



Akustický výkon,
Hladina ak. výkonu



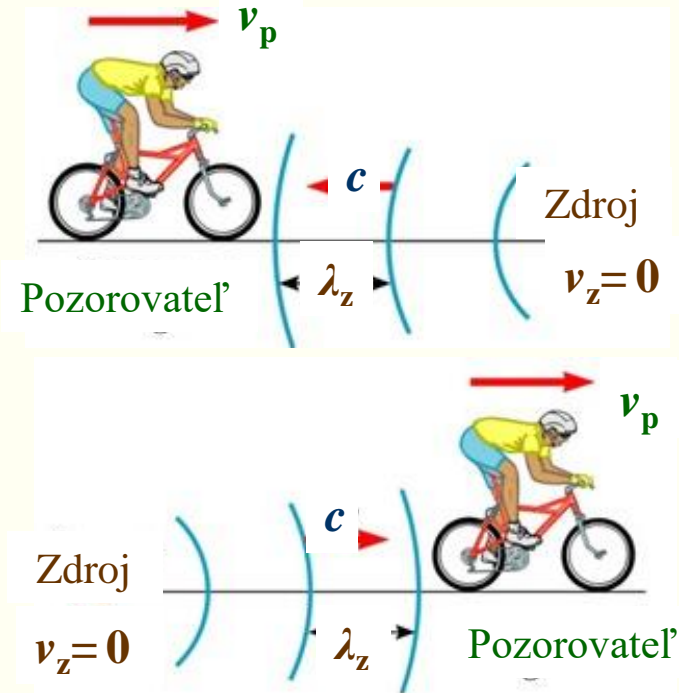
Obr. 11.47 Zdroj zvuku – akustický výkon; prostredie – akustický tlak (Bruel a Kjaer, 2023)

Doplerov jav

Dopplerov jav – zmena prijímanej frekvencie vlnenia v dôsledku pohybu zdroja alebo pozorovateľa.

Ak zdroj zvuku a pozorovateľ sa pohybujú smerom k sebe – pozorovateľ počuje zvuk vyššej frekvencie.

Ak sa zdroj zvuku a pozorovateľ pohybujú od seba – pozorovateľ počuje zvuk nižšej frekvencie.



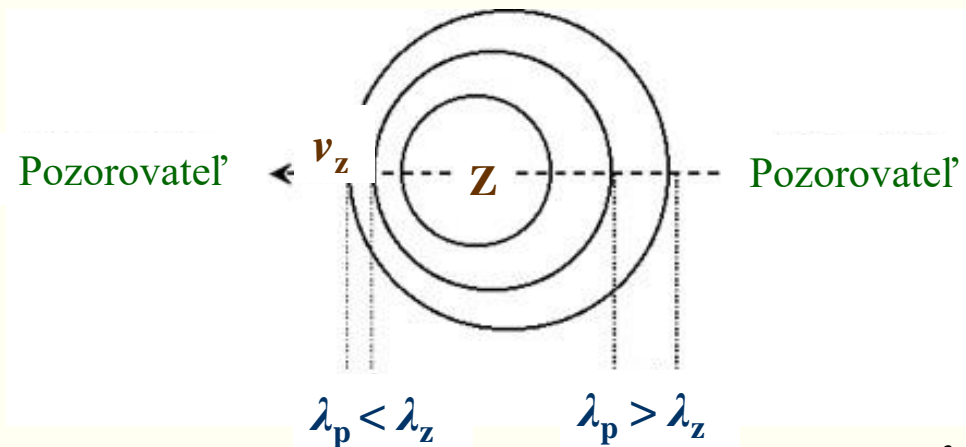
$$f_z = \frac{c}{\lambda_z} \quad f_p = \frac{c \pm v_p}{\lambda_z}$$

c – rýchlosť zvuku vo vzduchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Pozorovateľ sa pohybuje ku je ($c + v_p$); od je ($c - v_p$) zdroju zvuku, ktorý je v pokoji:

$$f_p = f_z \cdot \left(\frac{c \pm v_p}{c} \right)$$

Obr. 11.48 Pozorovateľ sa pohybuje ku stacionárnemu zdroju a od zdroja zvuku (Golden, 2015)



Zdroj sa prejde za T vzdialenosť:

$$v_z \cdot T = \frac{v_z}{f_z}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_p &= \lambda_z - \frac{v_z}{f_z} \\ \lambda_z &= \frac{c}{f_z} \end{aligned} \right) \longrightarrow f_p = \frac{c}{\lambda_p}$$

- zdroj ku pozorovateľovi + pozorovateľ k zdroju
- + zdroj od pozorovateľa - pozorovateľ od zdroja



Obr. 11.49 Zdroj sa pohybuje ku pozorovateľovi (Golden, 2015)

Zdroj sa pohybuje ku je $(c - v_p)$; od je $(c + v_p)$ pozorovateľa, ktorý je v pokoji:

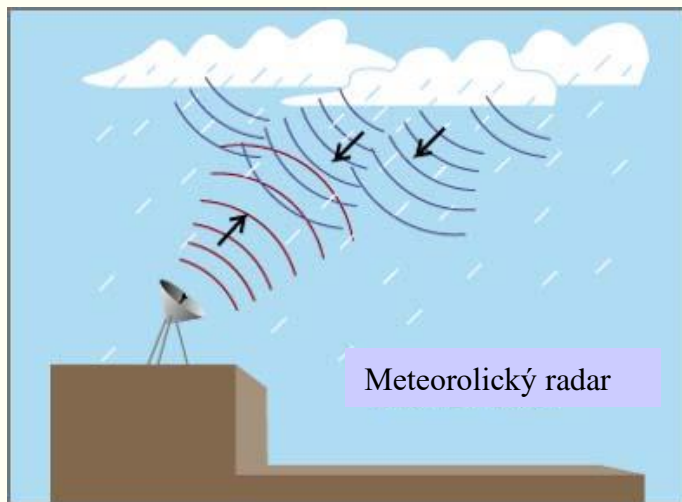
$$f_p = f_z \cdot \left(\frac{c}{c \mp v_z} \right)$$

Všeobecne: Ak sa pohybuje aj zdroj aj pozorovateľ:

$$f_p = f_z \cdot \left(\frac{c \pm v_p}{c \mp v_z} \right)$$



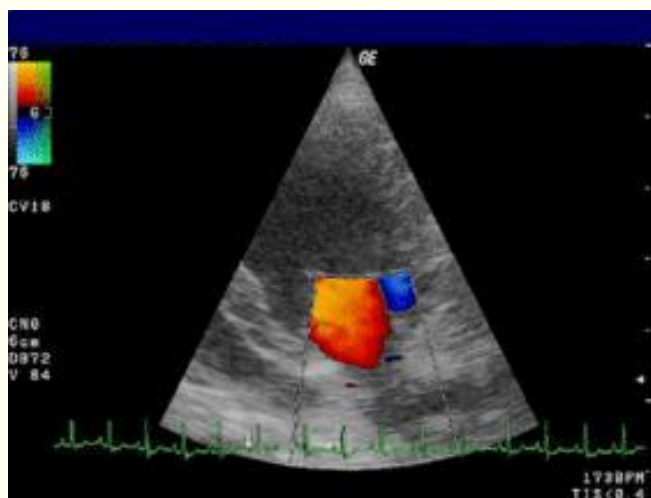
Obr. 11.50 Dopplerov jav (QS Study, 2023)



*Obr. 11.51 Meteorologický radar
(StudiosGuy, 2023)*



*Obr. 11.52 Policajný radar
(StudiosGuy, 2023)*



*Obr. 11.53 Doppler echokardiogram – smer,
rýchlosť prúdenia krvi (StudiosGuy, 2023)*



*Obr.11.54 Laserový vibrometer
(Brueel a Kjaer, 2023)*

Fyziologická akustika

Fyziologická akustika – zaoberá sa vznikom zvuku v **hlasovom orgáne** človeka (vysielač) a jeho prijímaním **sluchovým orgánom** (prijímač). Dôležitá je **spätná väzba** – *vokálny trakt a ucho (komunikačný reťazec)*.

Fyzikálnym veličinám opisujúcim vlastnosti zvuku **zodpovedajú príslušné vlastnosti subjektívneho sluchového vnemu**.

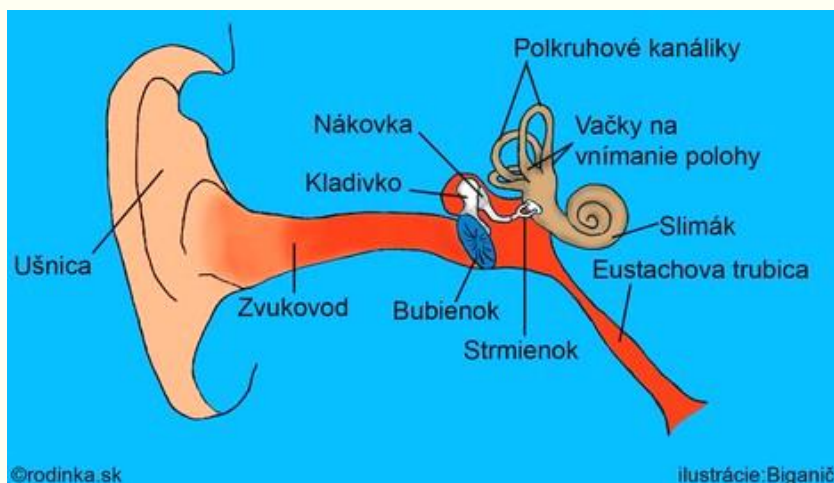
Intenzita zvuku – **hlasitosť**,

Frekvencia zvukového podnetu – **výška vnímaného zvuku**,

Spektrálna skladba z harmonických tónov – **farba tónu**.

Ucho

- **vonkajšie**,
- **stredné**
- **vnútorné**.



Obr. 11.55 Základné časti ucha (upjš, 2023)

Vonkajšie ucho – zvukové vlnenie zachytí **ušnica**. Tlaková zvuková vlna – **vonkajším zvukovodom** (dlhý 2 – 3 cm, priemer 7 – 8 mm), kt. je zakončený **bubienkom** (pružná blanka 0,1 mm hrubá, $S = 55 \text{ mm}^2$ a $d = 1 \text{ cm}$). Molekuly vzduchu vo fáze zhustenia narážajú viac na membránu bubienka (ako bubon), ktorá sa prehýba do dutiny stredného ucha.

Dôležitá funkcia – zosilnenie (rezonancia) zvukových vln okolo 3 kHz ($\approx 15 \text{ dB}$) lepšia detekcia a rozpoznávanie nízkoenergetických, vysokofrekvenčných zvukov.

Stredné ucho – z bubienka zvuková energia sa prenáša sústavou troch sluchových kostičiek (**kladivko, nákovka, strmienok**) na membránu oválneho okienka ($S = 3,2 \text{ mm}^2$) **vnútorného ucha**.

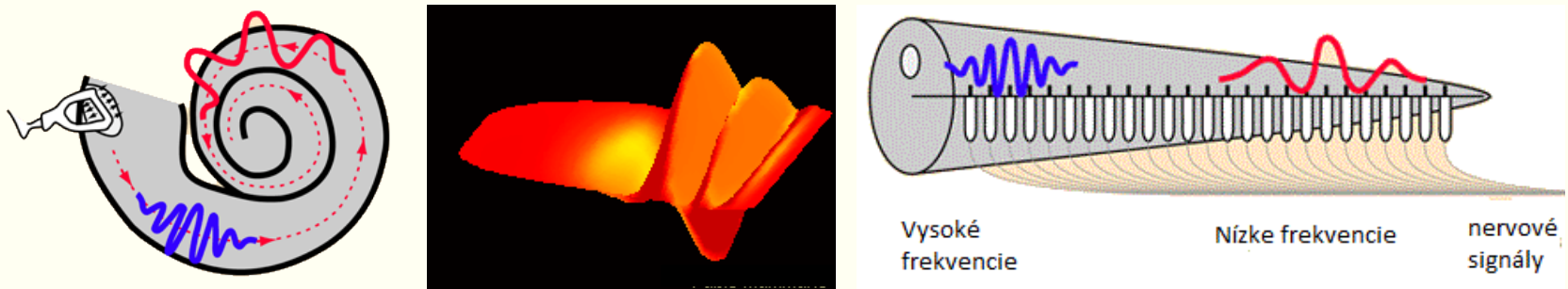
Pri prenose zvukovej energie sa časť odrazí späť – *závisí od impedancie* (vzduch nízka, voda vysoká), časť prejde cez bubienok. (Ak by sme nemali stredné ucho, tak 99,9 % zvukovej energie by sa odrazilo do vonkajšieho ucha). Tuhosť a impedanciu systému ovplyvňujú svaly stredného ucha – ich stiahnutie akustický reflex je aktivované silnejšími zvukmi a chráni sluch (*vláskové bunky vnútorného ucha*) pred poškodením.

Stredné ucho spojené s vonkajškom Eustachovou trubicou – vyrovnanie tlakov.

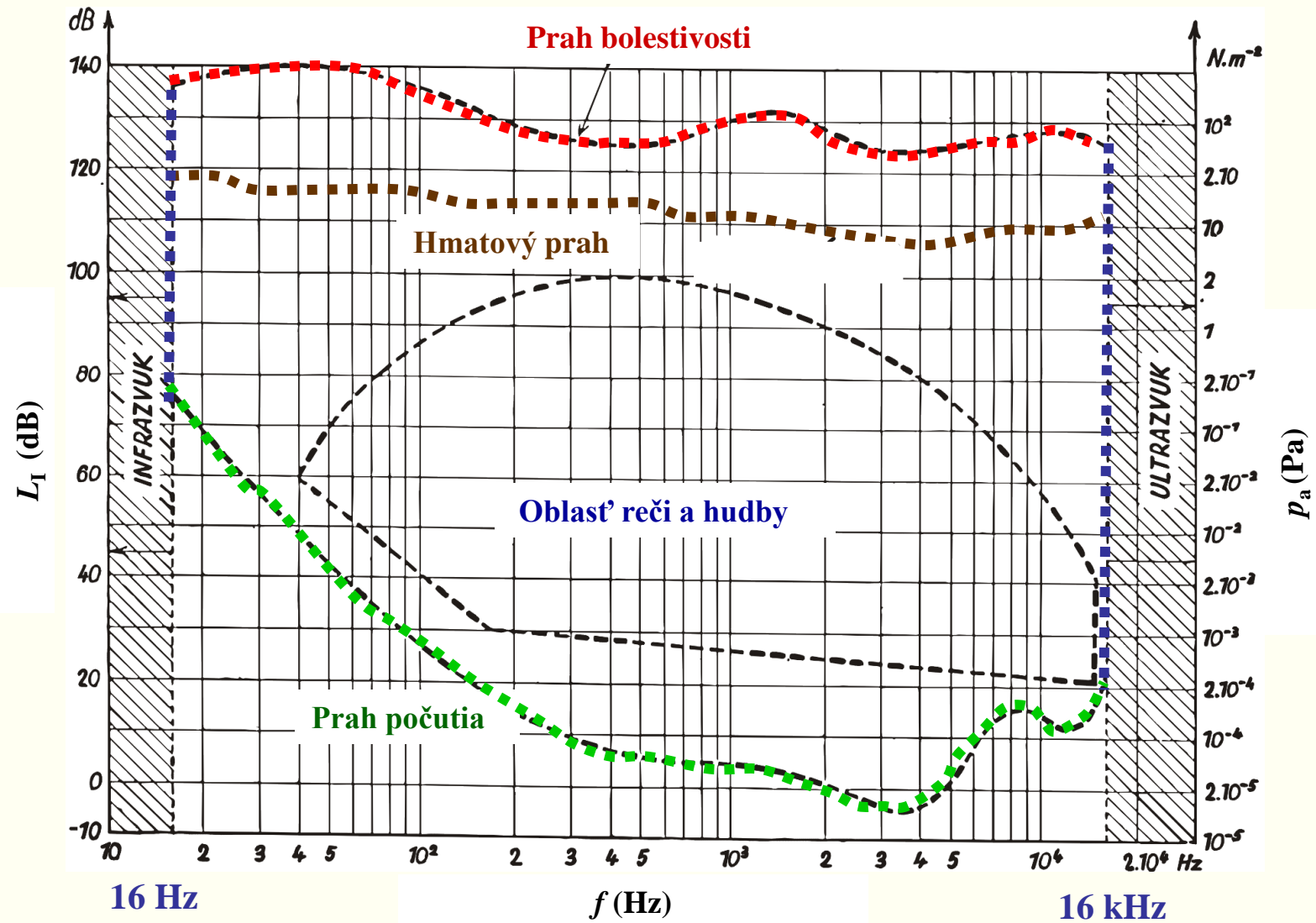
Vnútorne ucho – slimák s 3 polkruhovými kanálíkmi naplnenými tekutinou (senzor rovnováhy, pohyb hlavy – pohyb tekutiny), **Cortiho orgán** – premena zvukových vln v tekutine na elektrochemické signály a **sluchový nerv** – signály dopravuje do sluchových centier mozgu prostredníctvom nervových vlákien.

Slimák – (špirála 2,5 závitú – vnútorný priemer klesá od základu ku špičke) je rozdelený na dve komory je vyplnený kvapalinou a obsahuje **Cortiho orgán** s nervovými zakončeniami. Kvapalina pri prechode zvuku vibruje, tým sa rozkmitajú vláskové senzorické bunky, ktoré vysielajú elektrické impulzy do mozgu.

Vláskové bunky majú rôznu dĺžku. Najviac sa rozkmitá to vlákno, ktorého vlastná frekvencia je rovnaká ako frekvencia dopadajúceho vlnenia. Pri frekvencii zvuku pod 20 Hz, neexistuje vlásková bunka, ktorá by rezonovala.



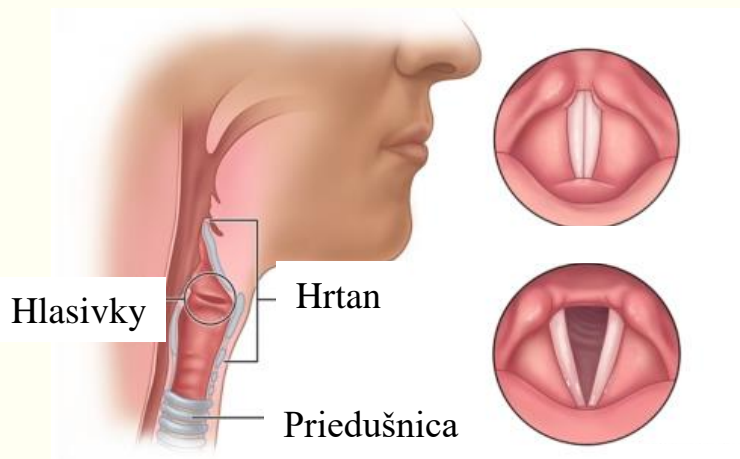
Obr. 11.56 Činnosť vnútorného ucha (Balážová, 2023)



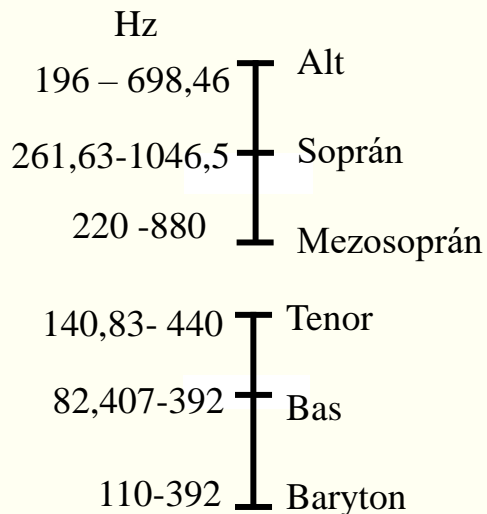
Obr. 11.57 Sluchové pole (Beran, 2010)

Ľudský hlas

sa tvorí v hrtane medzi dvoma hlasivkami. Medzi nimi je úzka hlasová štrbina, ktorou prechádza vzduch. Kratšie hlasivky (12 mm) – ženy, deti sa tvorí základný tón vyšší, v dlhších hlasivkách (18 mm) – muži tón nižší.



Obr. 11.58 Hlasové ústrojenstvo
(Healthwise Staff, 2022)



Mariah Carey – 5,5 oktávy



Peter Dvorský – tenor

Kmitaním hlasiviek vznikajú periodicky sa opakujúce vzduchové vlny, ktoré postupujú hlasovým traktom, sú modulované pohybmi artikulačných ústrojov hlasového traktu (mäkké a tvrdé podnebie, jazyk, d'asná, zuby, pery, nosová dutina) a opúšťajú ho ako akustické vlnenie (reč, spev).

Hlasový rozsah, t. j. rozpätie frekvencie kmitov (u človeka 64 Hz – 1 024 Hz), sa vyvíja od detstva (od niekoľkých poltónov až po dve oktávy), znižuje sa pri mutácii a v starobe. **Hovorený hlas** sa pohybuje v dolnej tretine hlasového rozsahu.

Hlas vychádzajúci z hlasiviek nemá farbu ľudského hlasu. Charakteristické znenie, získava prechodom nadhrtanovými priestormi – rezonátormi. Na konečnom efekte sa podieľa aj **rezonancia lebečnej dutiny a lícných kostí.**

- Človek časť toho čo hovorí, počuje prenosom cez lebečné kosti a časť zachytí ušami. Táto „spätná väzba“ vysvetľuje prečo človeku znie vlastný hlas cudzo pri reprodukcii (vtedy počuje iba hlas, ktorý je prenášaný vzduchom).
- **Základná poloha hlasu sa mení vplyvom hormonálnych zmien v dospievaní (mutácia), ku ďalším zmenám dochádza v starobe.** Zmeny výšky hlasu sú zapríčinené zmenami postavenia hlasivkových chrupaviek, zmenou napätia hlasiviek, podieľa sa na nej aj tlak výdychového vzduchu a svaly hrtana.
- **Reč a s ňou spojené funkcie sú zvyčajne sústredené do jednej mozgovej hemisféry** (u pravákov sú v ľavej a u ľavákov v pravej hemisfére).

Subjektívne vnímanie zvuku

Hlasitosť zvuku N je vlastnosť subjektívneho vnemu, ktorá vyjadruje akou intenzitou pôsobí daný zvuk na normálny sluch.

Dva tóny s rovnakou hladinou intenzity zvuku, ale s rôznou frekvenciou, nie sú vnímané ako rovnako hlasné. Rozdiel je spôsobený nerovnakou citlivosťou sluchového orgánu na rôzne frekvencie.

Hlasitosť je funkciou **frekvencie, frekvenčného rozsahu, intenzity a trvania zvuku**.

Na porovnanie hlasitosti dvoch zvukov – son (= hlasitosti čistého tónu s frekvenciou 1 kHz pri hladine akustického tlaku 40 dB).

Závislosť citlivosti sluchu od frekvencie a od hladiny intenzity je daná krivkami rovnakej hlasitosti.

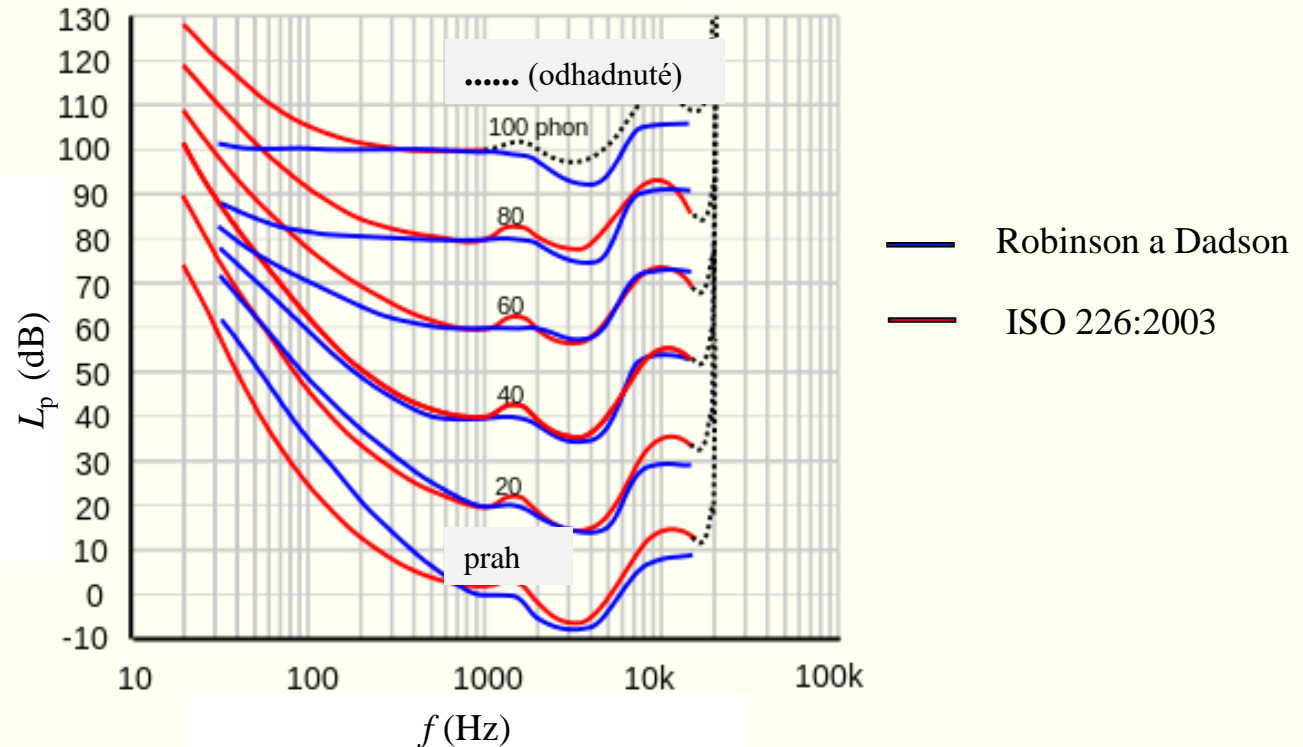
Hladina hlasitosti (L_N) vo fónoch (Ph) súhlasí číselne s hladinou akustického tlaku v dB čistého tónu frekvencie 1 kHz. Pre ostatné tóny sa hladina hlasitosti od hladiny intenzity líši.

Subjektívne vnímanie zvuku

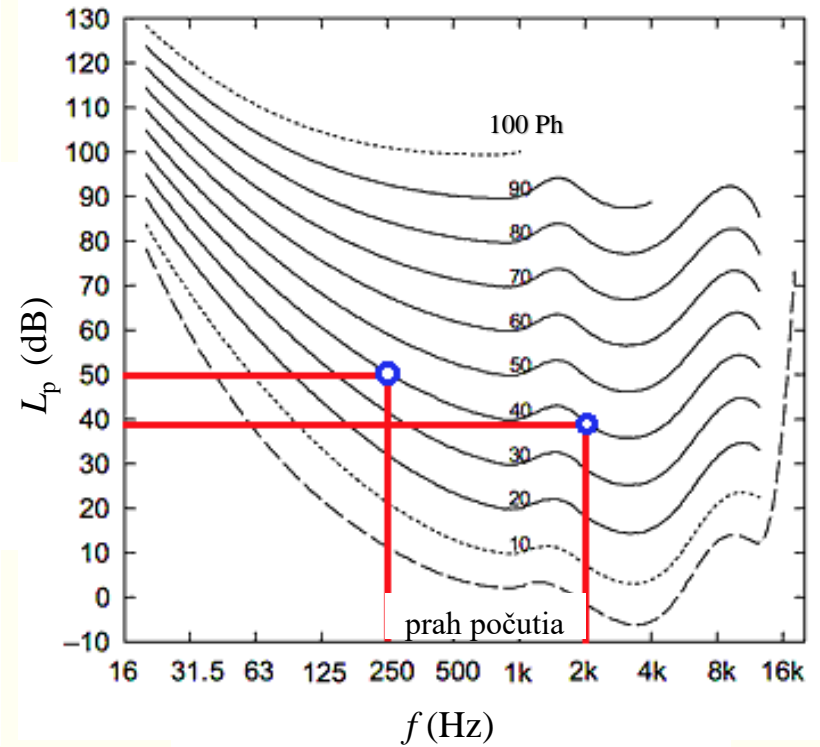
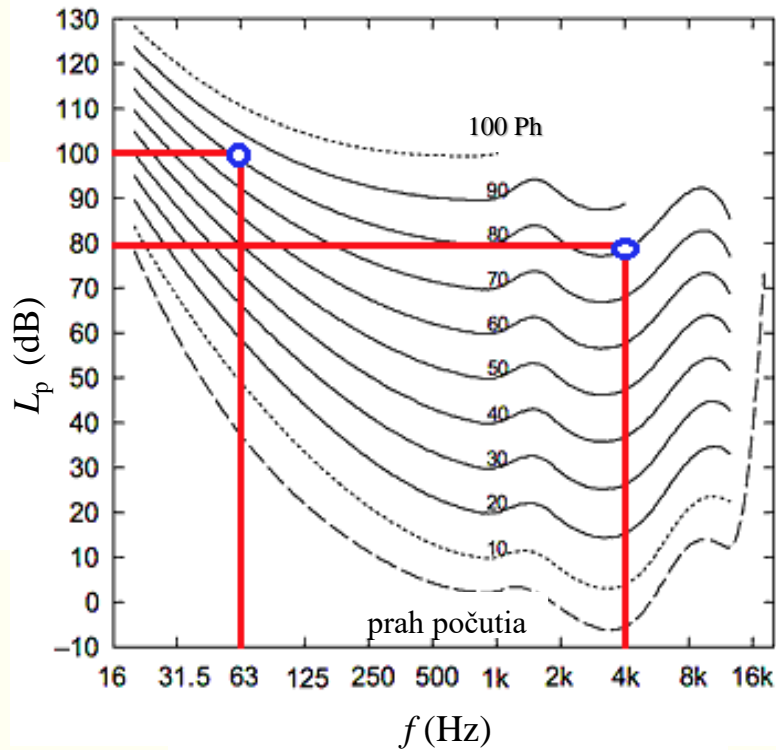
Vzťah medzi N a L_N je

$$N = 2^{\left(L_N - \frac{40}{10}\right)} \longleftrightarrow L_N = 33,22 \cdot \log N + 40$$

Pri každom zvýšení hladiny hlasitosti o 10 Ph sa zväčšuje hlasitosť na dvojnásobok (40 Ph = 1 son; 50 Ph = 2 sony; 60 Ph = 4 sony ...).



Obr. 11.59 Hladiny hlasitosti (Jahoda, 2008)



Obr. 11.60 Krivky rovnakej hlasitosti (SoundBridge, 2023)

Tón s $f = 63$ Hz pri 100 dB znie rovnako hlasno ako s $f = 4$ kHz pri 80 dB.

Tón s $f = 250$ Hz pri 50 dB znie rovnako hlasno ako s $f = 2$ kHz pri 38 dB.

Poznámka: Ucho je najcitlivejšie na zvuky v blízkosti 3 500 Hz – spôsobené rezonanciou vo zvukovode.

Priestorová akustika



Obr. 11.61 Sibelius concert hall

Priestorová akustika

Priestorová akustika sa zaoberá spôsobmi ako dosiahnuť čo najkvalitnejší poslech zvuku v priestore. V uzavretých priestoroch, ktoré nie sú pravouhlé, a ktorých rozmery sú väčšie ako vlnová dĺžka zvuku, sú procesy šírenia zvuku veľmi zložité.

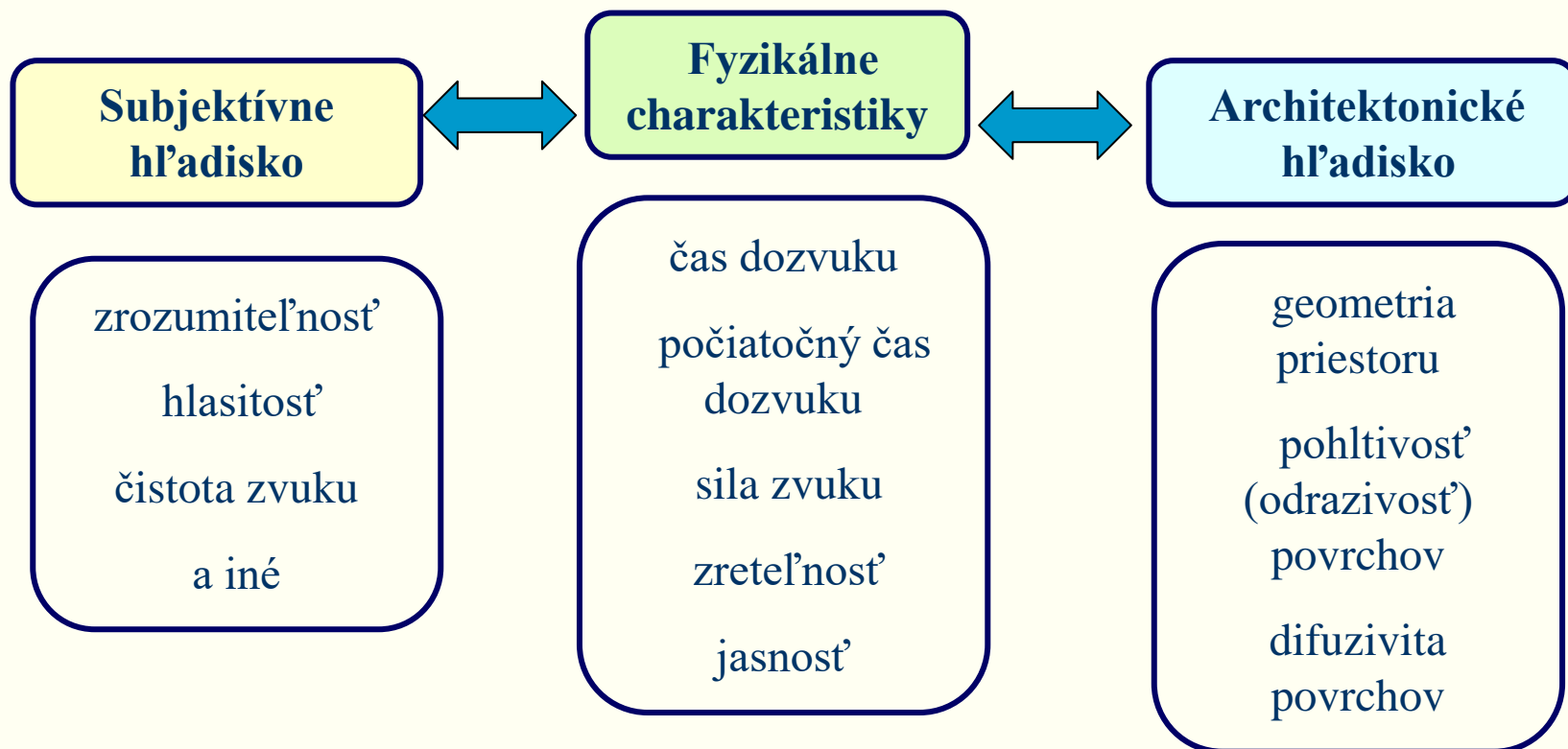
Hodnotiace parametre akustiky priestoru vyplývajú zo **základných vlastností zvuku v uzavretom zvukovom poli a ich vnímania ľudským uchom**. V uzavretom priestore dobre vnímame priamy i odrazený zvuk.

Priamy zvuk je dôležitý pre **zrozumiteľnosť reči, odrazené zložky na dojem priestorovosti** (*uzavretosti melodických línií*). To, či sa odrazená zložka zvuku v priestore vníma ako žiaduca alebo rušivá, súvisí najmä s časom jej pôsobenia a jej intenzitou v porovnaní s priamym zvukom.

Dôležitým fenoménom v priestore sú **vlastné frekvencie priestoru, stojaté vlnenie**, s tým súvisiaca celková **difúznosť** priestoru.

Priestorová akustika

Opis akustických vlastností uzavretého priestoru – **objektívne parametre**
– spojovací prvok medzi subjektívnym vnímaním a architektúrou priestoru.



Akustické polia

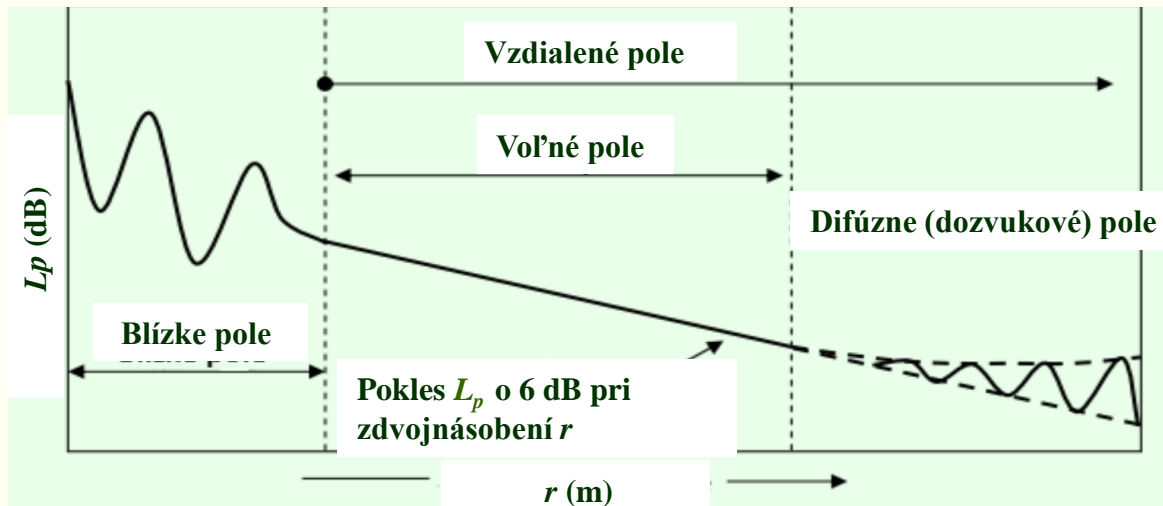
Zdroj zvuku v uzavretom priestore – akustické pole priamych vln a akustické pole odrazených vln.

Podľa vzdialenosti od zdroja zvuku – akustické pole **blízke a vzdialené**.

Blízke pole (*kolísanie akust. veličín*) – v **malej vzdialenosti od zdroja zvuku** (približne ako vlnová dĺžka zvuku). Vlastnosti akust. poľa nezávisia na prostredí.

Voľné pole – nedochádza tu k odrazom, absorpcii, L_p priamych vln je o 6 dB vyššia ako L_p odrazených vln. Platí: zdvojnásobením vzdialenosti r od zdroja, L_p klesne o 6 dB.

Vzdialené pole – vo vzdialenosti od zdroja zvuku, ktorá je **veľká v porovnaní s λ zvuku a rozmermi zdroja**.

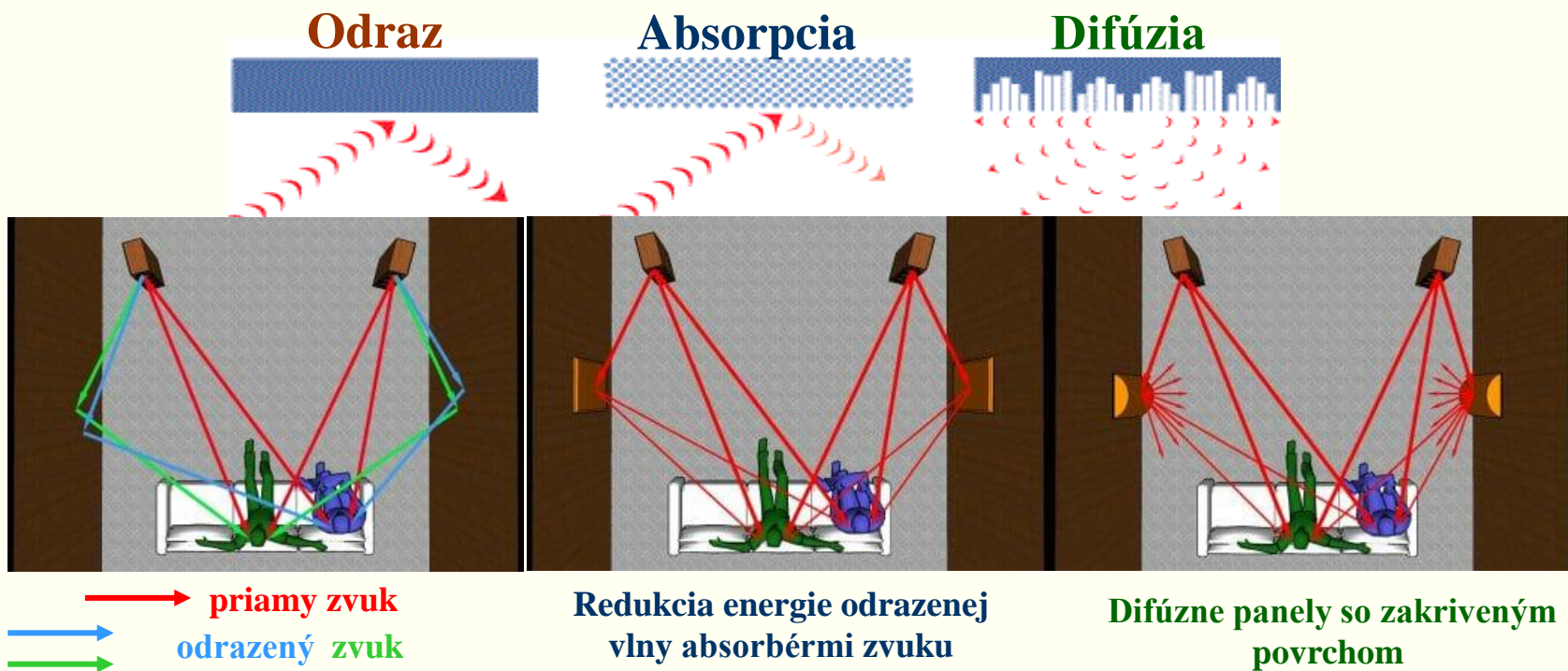


Obr. 11.62 Zvukové pole v uzatvorenom priestore (Van Treuren, 2020)

Uzavretý priestor – rôzne druhy plôch a členitosť povrchov, rôzne materiály, rôzne akustické vlastnosti (zvuková pohltivosť, odrazivosť, difúznosť).

Zvuková pohltivosť (odrazivosť) závisí od materiálu, drsnosti povrchu, pórovitosti (pri stenách z dosiek, skiel aj na ich pružnosti a plošnej hustote).

Difúzia zvuku – rozptyl alebo náhodné rozloženie zvukovej vlny po dopade na povrch.



Obr. 11.63 Šírenie zvuku v uzatvorenom priestore (Acoustical Surfaces, Inc, 2018)

Celková zvuková energia E :

Na odrazení, pohltení a prechádzajúcu:

$$E = E_a + E_o + E_p$$

Koeficient zvukovej pohltivosti α (-) = (0,1)

$$\alpha = \frac{E_a}{E}$$

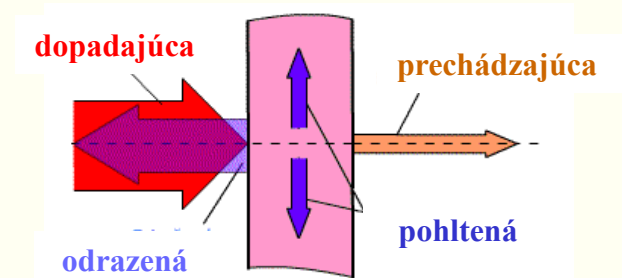
absorbovaná akustická energia
dopadajúca akustická energia

Koeficient zvukovej odrazivosti β (-) = (0,1)

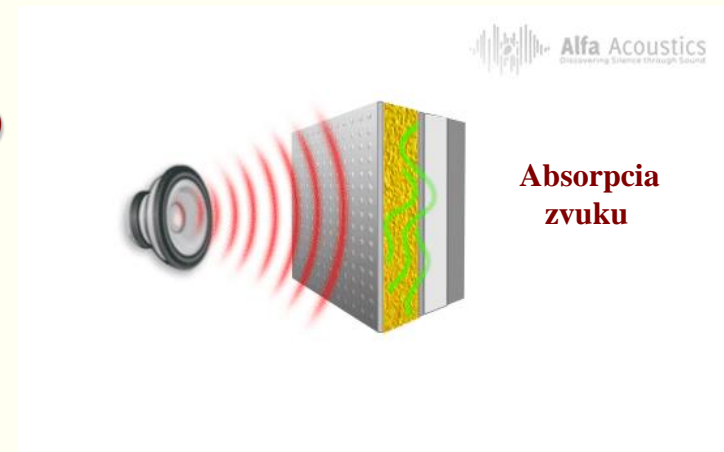
$$\beta = \frac{E_o}{E}$$

odrazená akustická energia
dopadajúca akustická energia

$$\alpha + \beta = 1$$



Obr. 11.64 Zvukové vlnenie pri stene
(Bernat, 2010)



Obr. 11.65 Absorpcia zvuku
(Alfa Acoustics 2019)

Okrem druhu materiálu závisí koeficient zvukovej pohltivosti aj odrazivosti od frekvencie a smeru dopadajúceho akustického vlnenia.

Ekvivalentná pohltivá plocha A (m²) $A = \alpha \cdot S$

Vysoká zvuková pohltivosť – porézna, vláknitá štruktúra.

Tab. 11.4 Koeficienty zvukovej pohltivosti materiálov

Materiál	Koeficient zvukovej pohltivosti α (-)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Tehla pálená	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Obklad - kachličky	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Betónový blok, surový	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Betónový blok, natretý	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Dverový otvor	0.28	0.20	0.10	0.10	0.08	0.08
Drevené dvere	0.10	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04
Betónová dlážka	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Drevená dlážka na hranoloch	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Koberec, 7 mm vlas	0.05	0.10	0.15	0.30	0.50	0.55
Sklené okno	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Drevený panel	0.24	0.19	0.14	0.08	0.13	0.10
Sedadlo v divadle	0.5	0.3	0.4	0.76	0.8	0.76
Dospelý človek	0.5	0.3	0.4	0.76	0.8	0.76
Záves, 620g.m ⁻¹	0.14	0.35	0.53	0.75	0.7	0.6
Minerálna vlna na stene, 25 mm	0.03	0.22	0.69	0.91	0.96	0.99
Obklad Audiotec S000, 50 mm	0,2	0,6	0,98	1,05	1,0	1,0
Obklad Audiotec S290, 20 mm	0,08	0,25	0,5	0,85	0,98	0,9

NRC

- **Koeficient redukcie hluku (NRC)** – norma ASTM C423
- Jednočíselný údaj sa vypočíta na dve desatinné miesta a zaokrúhli v krokoch po 0,05.
- Aritmetický priemer meraného koeficienta zvukovej pohltivosti pri frekvenciách (250, 500, 1 000 a 2 000) Hz.
- **Triedy zvukovej pohltivosti** – ISO 11654



Obr. 11.66 Brüel & Kjær Impedančná trubica

Vážený koeficient zvukovej pohltivosti

Tab. 11.5 Tretinooktávové a oktávové pásma

- Výpočet podľa normy EN ISO 11654:1997
- α_s – koeficient zvukovej pohltivosti
- najpresnejšie hodnoty merané v tretinooktávových pásmach (od 100 Hz do 5 kHz), t.j. 18 hodnôt.
- α_p – praktický koeficient zvukovej pohltivosti
- tri 1/3 oktávové hodnoty α_s v rámci danej oktávy idú do výpočtu α_p pre túto oktávu.

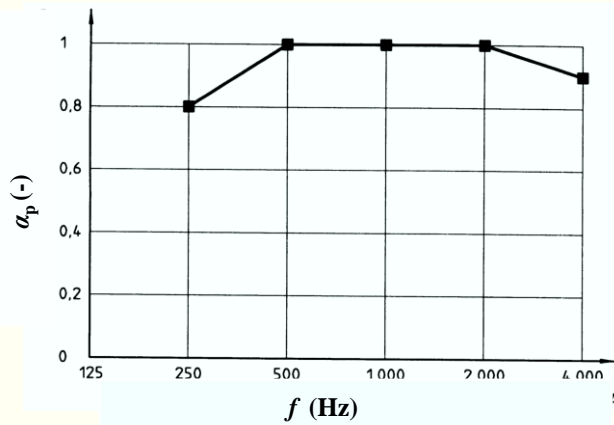
$$\alpha_p = \frac{\alpha_{s1} + \alpha_{s2} + \alpha_{s3}}{3}$$

- Získa sa 6 hodnôt pre každé oktávové pásmo (od 125 Hz do 4 kHz).
- Stredná hodnota sa vypočíta na dve desatinné miesta a zaokrúhli v krokoch po 0,05 (napr. 0,92 sa zaokrúhli na 0,90).

Tretina oktávy (Hz)	Oktáva (Hz)
100	125
125	
160	
200	250
250	
315	
400	500
500	
630	
800	1000
1000	
1250	
1600	2000
2000	
2500	
3150	4000
4000	
5000	

α_W – vážený koeficient zvukovej pohltivosti.

- jednočíselná hodnota nezávislá od frekvencie, ktorá sa rovná hodnote referenčnej krivky na hodnote 500 Hz po jej posunutí. α_W je hodnota posunutej referenčnej krivky pri 500 Hz.
- Vypočíta sa na dve desatinné miesta a zaokrúhli v krokoch po 0,05.
- Referenčná krivka sa posúva v krokoch po 0,05 k nameranej hodnote až, kým súčet nepriaznivých odchýlok je $\Delta \leq 0,10$ (nameraná hodnota je nižšia ako hodnota na krivke). Počítajú sa iba nepriaznivé odchýlky.



Obr. 11.67 Referenčná krivka pre hodnotenie α_W (EN ISO 11654, 1997)

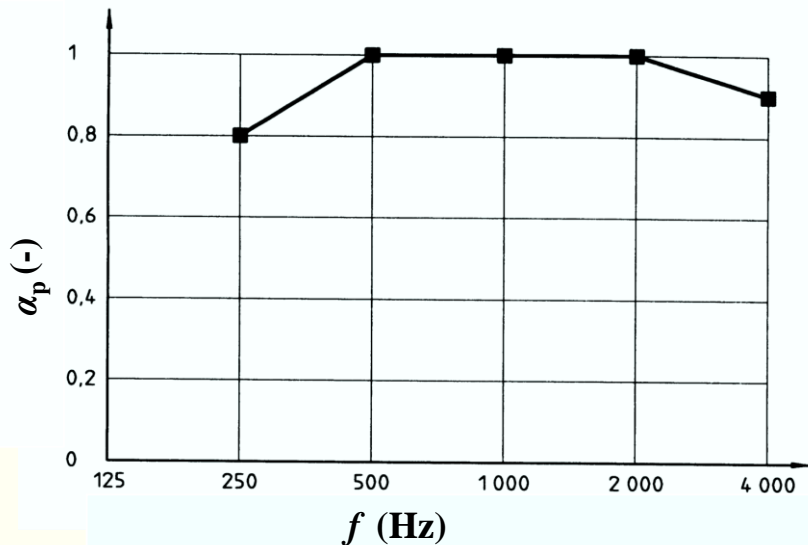
Indikátory tvaru

- ak α_p je vyšší ako hodnota referenčnej krivky o 0,25, potom indikátory tvaru (L, M, H) určujú či je absorbér účinný v oblasti nízkych (L – do 250 Hz), stredných (M – 500 až 1 kHz) alebo vysokých (H – 2 kHz až 4 kHz) frekvencií.

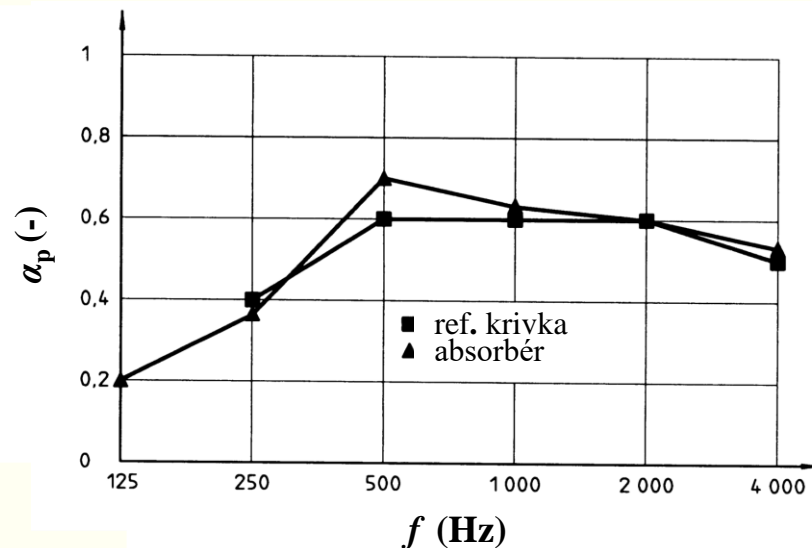
Vážený koeficient zvukovej pohltivosti – výpočet

Tab. 11.6 Praktický koeficient zvukovej pohltivosti (EN ISO 11654,1997)

f (Hz)	250	500	1000	2000	4000
α_p (-)	0,80	1,00	1,00	1,00	0,90



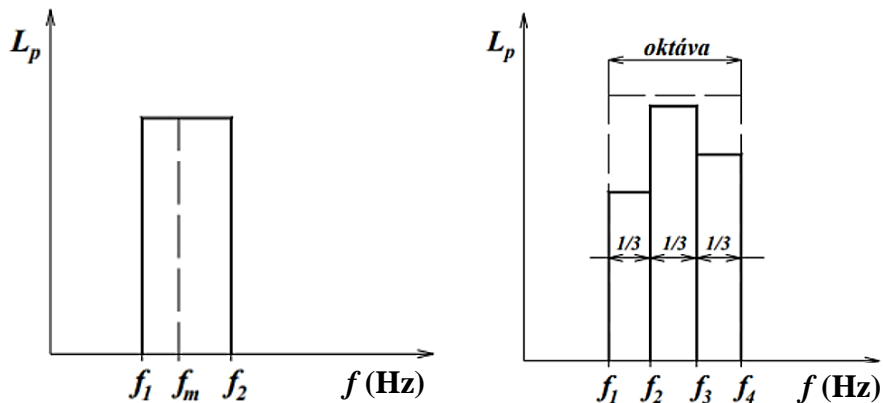
Obr. 11.67 Referenčná krivka pre hodnotenie α_w (EN ISO 11654,1997)



Obr. 11.68 Příklad výpočtu α_w ($\alpha_w = 0,60$) (EN ISO 11654,1997)

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_{p,ref}$ (-)	–	0,40	0,60	0,60	0,60	0,50
$\alpha_{p,abs}$ (-)	0,20	0,35	1,00	0,65	0,60	0,55

Tab. 11.7 Hodnoty koeficienta zvukovej absorpcie – $\alpha_{p,ref}$, $\alpha_{p,abs}$ (EN ISO 11654,1997)



Obr. 11.69 Tretinooktávové a oktávové pásmo (Mišun, 2005)

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

f_m – stredná frekvencia (Hz)

f_1 – dolná medza oktávy (Hz)

f_2 – horná medza oktávy (Hz)

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad \text{– šírka oktávy}$$

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} = 1,26$$

Tab. 11.8 Triedy zvukovej pohltivosti (EN ISO 11654,1997)

Trieda zvukovej pohltivosti	α_w (-)	Slovný opis zvukovej pohltivosti (VDI 3755/2000)
A	0,90; 0,95; 1,00	veľmi vysoko pohlcujúci
B	0,80; 0,85	
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75	vysoko pohlcujúci
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55	pohlcujúci
E	0,25; 0,20; 0,15	málo pohlcujúci
F	0,10; 0,05; 0,00	odrazivý (nepohlcujúci)

Priestorová akustika

Na riešenie akustiky priestoru sa používajú metódy **vlnovej, geometrickej a štatistickej akustiky**.

Vlnová akustika opisuje šírenie zvuku ako šírenie vlny (nie lúča) – matematicky zložité. Význam – ak vlnové dĺžky zvuku sú porovnateľné s rozmerom miestnosti (malé a pravouhlé miestnosti, nízke frekvencie, nízka pohltivosť zvuku).

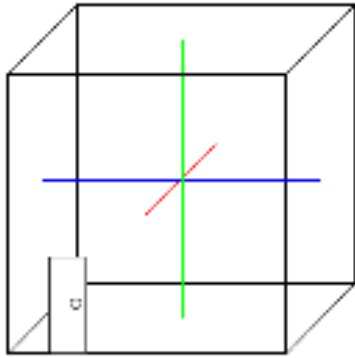
Tab. 11.9 Prepočet frekvencie a vlnovej dĺžky

f (Hz)	20	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
λ (m)	17	2,72	1,36	0,68	0,34	0,17	0,085	0,043	0,021

Metódou sa zisťujú – fyzikálne vlastnosti priestoru, **vlastné** frekvencie (módy – vytvárajú sa v dôsledku skladania priamej a odrazenej vlny) **priestoru** (frekvencie, kedy dôjde ku rezonancii) – závisia od rozmerov priestoru.

$$f_{\ell,m,n} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\ell}{A}\right)^2 + \left(\frac{m}{B}\right)^2 + \left(\frac{n}{C}\right)^2}$$

c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) – rýchlosť zvuku; A, B, C (m) – rozmery priestoru; ℓ, n, m – celé čísla (poradie módu)



Obr. 11.70 Axiálne módy
(Blue Frog Audio, 2021)

Vlna medzi 2 || plochami –
dominantné

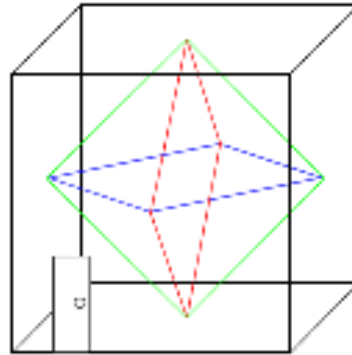
najnižšie f vlastných kmitov:

$$f_{100} = c_0 / 2A;$$

$$f_{010} = c_0 / 2B;$$

$$f_{001} = c_0 / 2C.$$

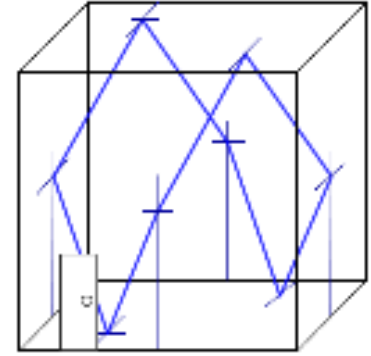
Najnižšia f vlastných kmitov
závisí od najväčšieho
rozmeru priestoru.



Obr. 11.71 Tangenciálne módy
(Blue Frog Audio, 2021)

Vlna sa odráža od 4
plôch, v rovine
rovnobežnej so zvyšnou
dvojicou stien.

$$f_{1,1,0} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\ell}{A}\right)^2 + \left(\frac{m}{B}\right)^2}$$



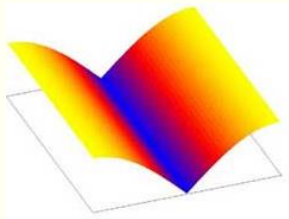
Obr. 11.72 Šikmé módy
(Blue Frog Audio, 2021)

Vlna sa odráža šikmo
od 3 dvojíc plôch.

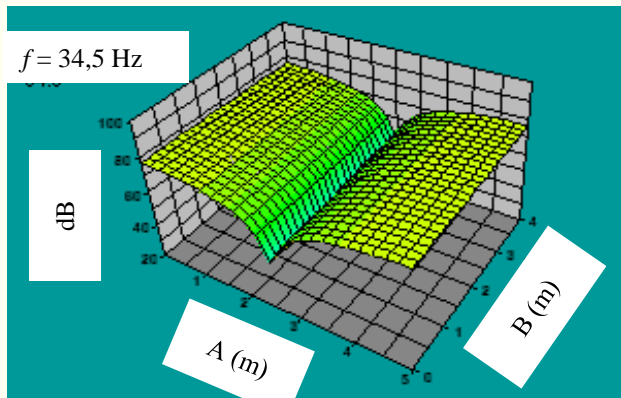
$$f_{1,1,1} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\ell}{A}\right)^2 + \left(\frac{m}{B}\right)^2 + \left(\frac{n}{C}\right)^2}$$

Priestorová akustika

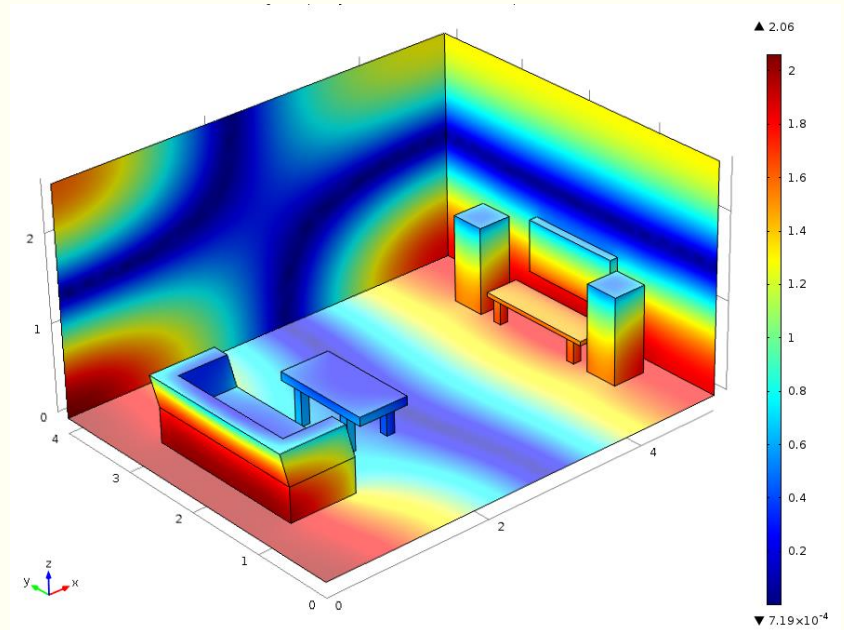
Dôsledok odrazu zvuku – **stojaté vlnenie** (vzniká $f = c/2A$, t.j. vzájomná vzdialenosť protiľahlých stien = $\lambda/2$) – miesta s nízkou (uzly) a vysokou intenzitou (kmitne). Stojaté vlnenie narúša difúznosť zvukového poľa (zmena farby zvuku, zrozumiteľnosti). Pre zaistenie difúznosti od čo najnižšej frekvencie nesmú byť rozmery priestoru celistvými násobkami, t.j. $A:B:C \neq 1:2:4$.



Obr. 11.73 Múd 1,0,0



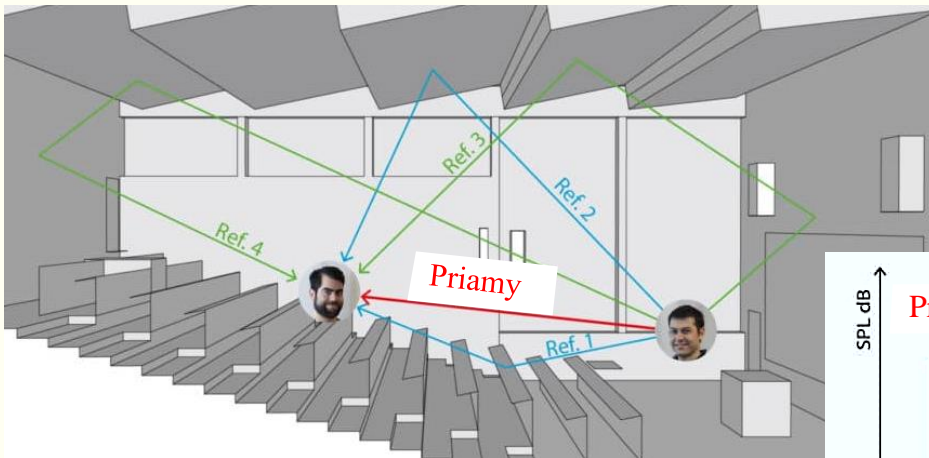
Obr. 11.74 Vlastné módy priestoru (Sengpielaudio, 2023)


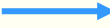

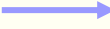



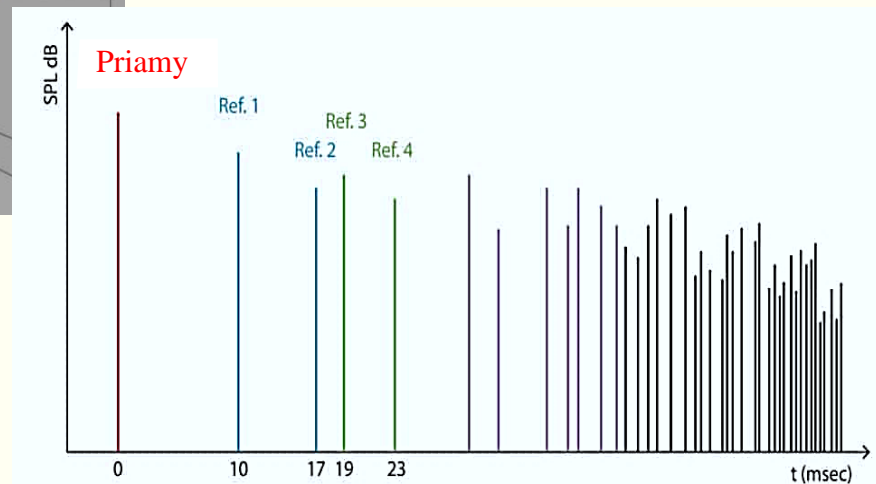
Obr. 11.75 Rozloženie akustického tlaku pre prvý vlastný mód v malej miestnosti (Jensen, 2015)

Priestorová akustika

Geometrická akustika – zaoberá sa odrazom zvukových vln od prekážok pri ich šírení. Je vhodnejšia pre vyššie frekvencie ($\lambda < A, B, C$) – zvukové vlny sú nahradené hustou sieťou lúčov (výpočet je jednoduchší). Princíp využívajú akustické programy (EASE, ODEON) – umožňujú zvukovú vizualizáciu (auralizáciu) priestoru na základe počítačových výpočtov.



-  priamy
-  skoré odrazy
-  skoré odrazy
-  skoré odrazy
-  neskoré odrazy



Obr.11.76 Vizualizácia šírenia zvuku v programe ODEON (Odeon A/S, 2021)

Priestorová akustika

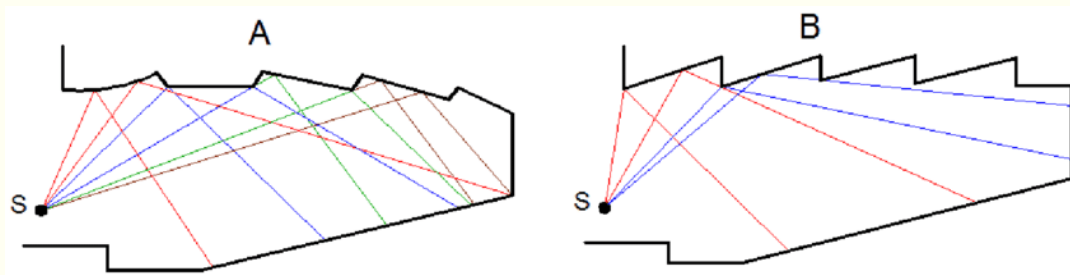
Odrazený zvuk v porovnaní s **priamym zvukom** do rovnakého miesta prejde dlhšiu vzdialenosť, má určité oneskorenie.

Malé oneskorenie – ucho vníma **oba signály ako jeden zvuk vyššej intenzity**.

Väčšie oneskorenie – pokles zrozumiteľnosti reči, vznik ozveny.

Tab. 11.10 Vplyv oneskorenia zvuku na zrozumiteľnosť (Reichl, 2023)

Dráhový rozdiel	Časové oneskorenie	Vplyv na zrozumiteľnosť
menší ako 10 m	menšie ako 0,03 s	zvýšenie intenzity zvuku
10 m až 17 m	0,03 s až 0,05 s	zmiešavanie hlások
17 m – 34 m	0,05 s – 0,1 s	ozvena
väčší ako 34 m	väčšie ako 0,1 s	jednoslabičná ozvena



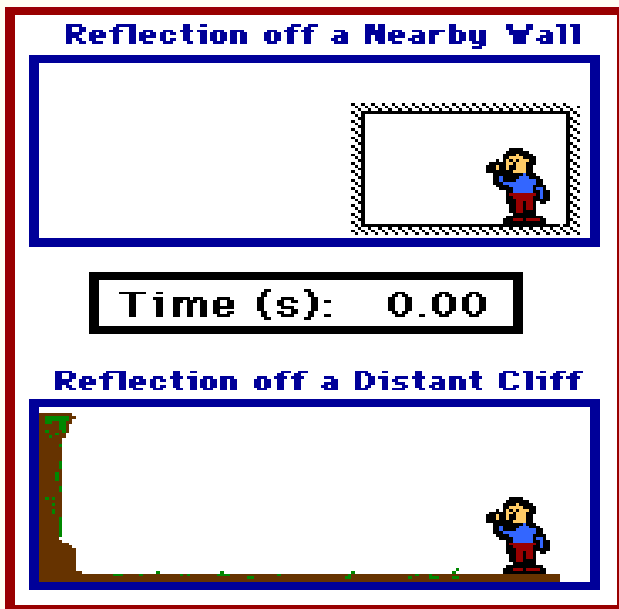
Obr. 11.77 Príklad dobrého (A) a zlého (B) členenia stropu pre akustiku (Kanev, 2016)

Priestorová akustika

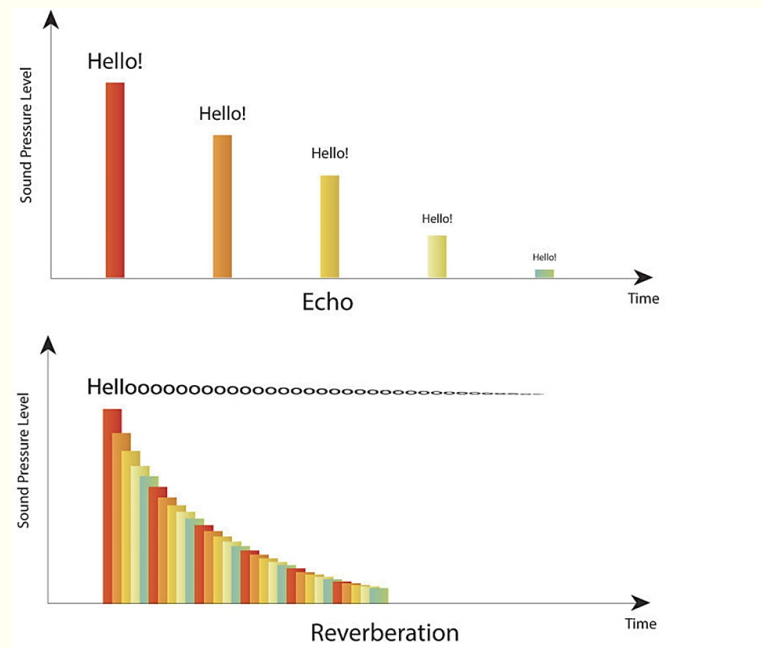
Dozvuk (reverberation) vzniká v uzavretom alebo takmer uzavretom priestore mnohonásobnými, sluchom nerozlišiteľnými odrazmi.

Priestor s tvrdými povrchmi má dlhší čas dozvuku ako s mäkkými.

Dozvuk je žiadanou vlastnosťou, **echo** (vzdialenosť steny > 17 m, čas medzi priamym a odrazeným zvukom dlhší ako 0,1 s) sa považuje za negatívum.



Obr. 11.78 Dozvuk a echo
(The Physics Classroom, 2023)



Obr. 11.79 Rozdiel medzi dozvukom a echom
(Harout, 2018)

Tab. 11.11 Stredné frekvencie oktáv a ich vlnové dĺžky

	NF				SF				VF		
f_m (Hz)	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
λ (m)	9,7	4,9	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,07	0,03	0,015	

Správanie sa zvuku v malej miestnosti možno rozdeliť na nízke frekvencie a vysoké frekvencie na základe Schröderovej (kritickej) frekvencie. Pre väčšinu malých miestností je Schröderova frekvencia niekde medzi 200 a 500 Hz.

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{RT}{V}}$$

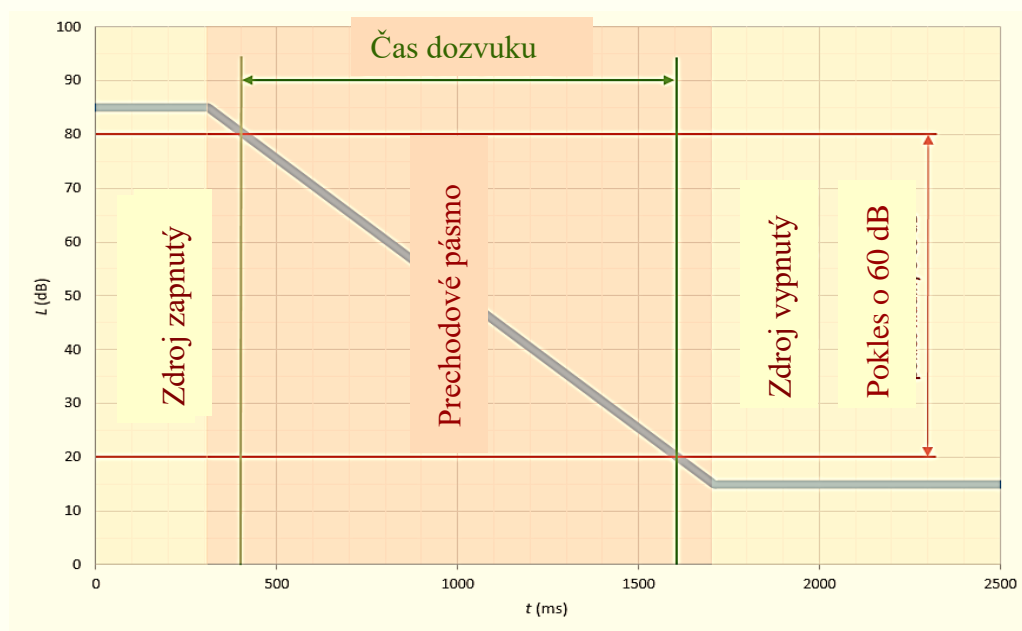
f_s – Schröderova frekvencia (Hz)
 RT – čas dozvuku (s)
 V – objem miestnosti (m³)

Schröderova frekvencia – hranica, kedy je nevyhnutné na opis vlastností akustického poľa uzavretého priestoru použiť metódy vlnovej akustiky (oblasť pod kritickou frekvenciou) a kedy metódy geometrickej, resp. štatistickej akustiky (oblasť nad kritickou frekvenciou).

Priestorová akustika

Štatistická akustika – vychádza z predstavy **difúzneho zvukového poľa** (t.j. intenzita zvuku je v celom priestore rovnaká, neexistuje žiadny prevládajúci smer dopadu zvuku do určitého bodu) **v uzavretom priestore**, rieši vytvorenie a zánik zvukového poľa na základe veľkého počtu odrazov, rieši akustické pole ako jeden celok. Hlavným kritériom z hľadiska štatistickej akustiky je **čas dozvuku** (Reverberation Time) RT_{60} (s).

Čas dozvuku je čas, za ktorý **poklesne** hladina akustického tlaku o **60 dB**.



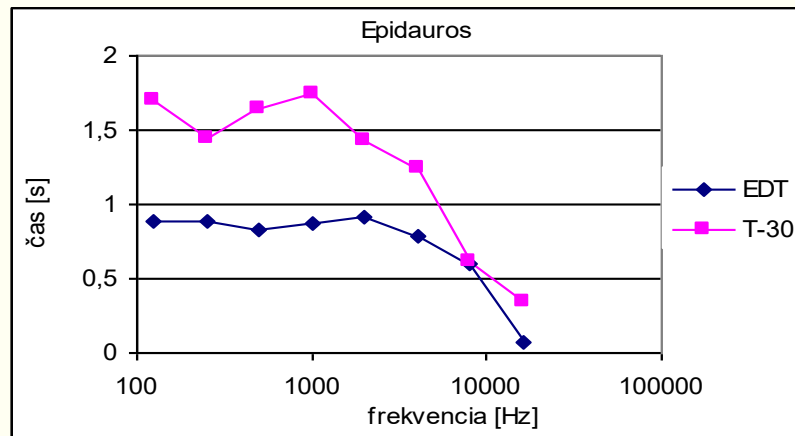
Obr. 11.80 Čas dozvuku (Burda, 2017)

V praxi ťažké dosiahnuť pokles o 60 dB (napr. hluk pozadia), preto sa používajú RT_{20} a RT_{30} (predstavujú objektívne hodnotenie dozvuku).

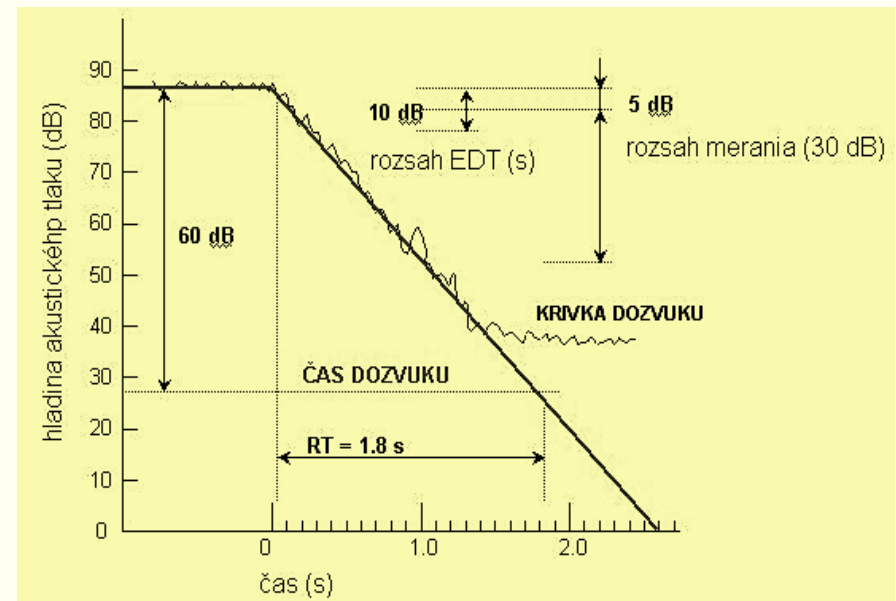
RT_{20} z času Δt_{20} , za ktorý klesne L_p o 20 dB (- 5 dB; -25 dB), t.j. $RT_{20} = 3 \cdot \Delta t_{20}$

RT_{30} z času Δt_{30} , za ktorý klesne L_p o 30 dB (- 5 dB; -35 dB), t.j. $RT_{30} = 2 \cdot \Delta t_{30}$

Počiatočný čas dozvuku (EDT – Early Decay Time) z času Δt_{10} , za ktorý klesne L_p o 10 dB (0 dB; -10 dB), t.j. $EDT = 6 \cdot \Delta t_{10}$ (najviac sa približuje subjektívnemu vnímaniu dozvuku).



Obr. 11.81 Čas dozvuku RT_{30} , EDT – Epidauros



Obr. 11.82 Čas dozvuku RT_{20} , RT_{30} , EDT

Kritériá akustiky priestoru

Sabine – používa sa pre menšie miestnosti ($V = 2\,000\text{ m}^3$, difúzne pole), kde sa neprejaví pohltivosť zvuku vo vzduchu. Vyžarovanie zvukovej energie zo zdroja a jej pohlcovanie stenami je plynulé, nízka pohltivosť ($\alpha < 0,2$), vysoká difúznosť priestoru.

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{A}$$

V – objem miestnosti (m^3), RT – čas dozvuku (s)
 A – celková ekvivalentná pohltivá plocha (m^2)
 α – koeficient zvukovej pohltivosti (-)

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

Eyring – priestory viac zatmené, rovnomerne rozložená zvuková pohltivosť, ($\alpha > 0,2$; ale $\alpha < 0,8$). **Energia pri každom odraze o určitú hodnotu klesne – po skokoch.**

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha_E}$$

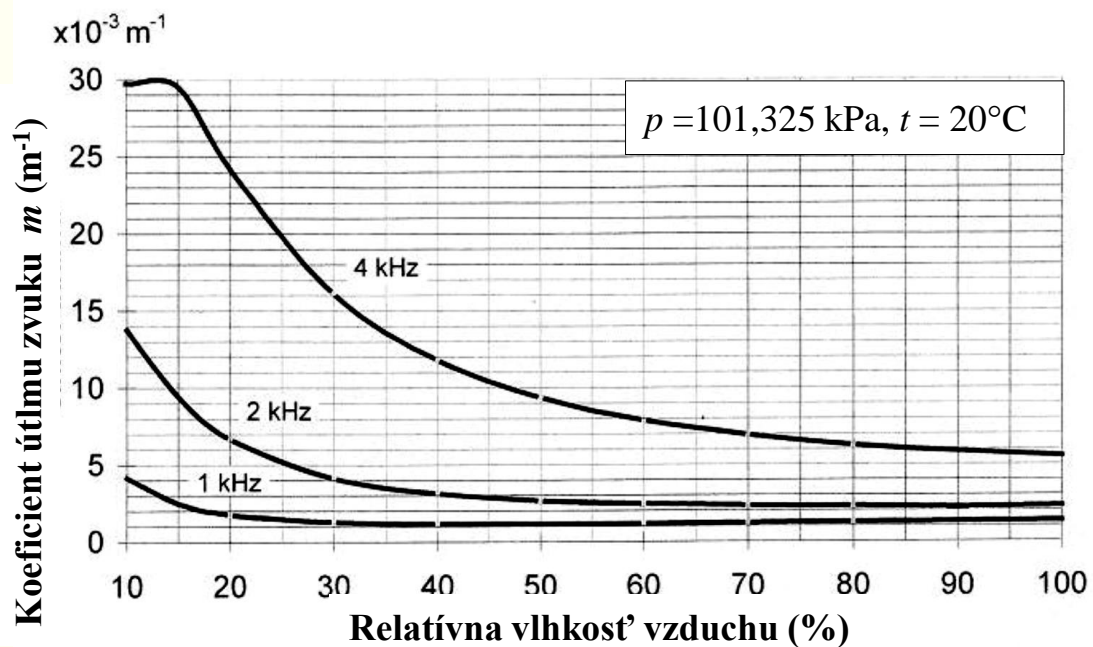
S – celková pohltivá plocha (m^2)
 $\alpha_E = -\ln(1 - \alpha_{\text{priem}})$ – Eyringov koeficient zvukovej pohltivosti (-)

Pre $f > 1000\text{ Hz}$, väčšie miestnosti (nad 2000 m^3) sa dopĺňa koeficient útlmu zvuku vo vzduchu – m (m^{-1}).

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha_E + 4m \cdot V}$$

Tab. 11.12 Koeficient útlmu zvuku vo vzduchu m pri 101,325 kPa 20°C (ČSN 73 0525, 1998)

f (Hz)	Relatívna vlhkosť vzduchu (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1000	0,0041	0,0025	0,0018	0,0013	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013
2000	0,0137	0,0095	0,0067	0,0041	0,0031	0,0027	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0023
4000	0,0297	0,0295	0,0242	0,0161	0,0118	0,0094	0,0079	0,0069	0,0063	0,0058	0,0055



Obr. 11.83 Závislosť koeficienta útlmu v oktávových pásmach na vlhkosti vzduchu (ČSN 73 0525, 1998)

Z dozvukovej krivky: **jasnosť** C (dB), **zreteľnosť** D (%), **ťažisko impulzovej odozvy** T_s (s), **sila zvuku** G (dB).

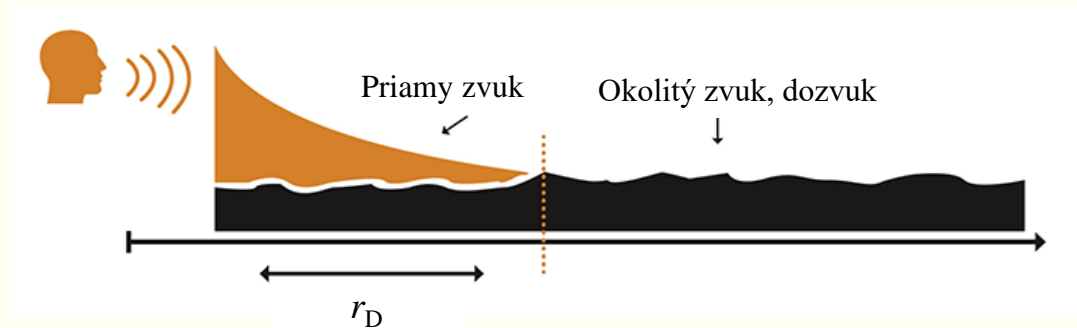
Pri hodnotení **zrozumiteľnosti** hovoreného slova: **STI** – Index prenosu reči (Speech Transmission Index), **SII** – Index zrozumiteľnosti reči (Speech Intelligibility Index) a **RASTI** – Index rýchleho prenosu reči (Rapid Speech Transmission Index). **Všetky kritériá sú frekvenčne závislé.**

Základom pre **STI (0,1)** je, že **zrozumiteľnosť reči je** do veľkej miery **založená na pomalej amplitúdovej modulácii zvuku** správajúceho sa ako nosič. Šum rozdelený do **siedmich oktávových pásiem od 125 Hz do 8 000 Hz**. Každé je modulované štrnástimi modulačnými frekvenciami v **tretinovo oktávových pásmach v rozsahu od 0,63 Hz do 12,5 Hz**, čo dáva spolu **98 kombinácií**. Na mieste poslucháča je zvuk prijímaný mikrofónom.

Prenášaný obsahuje viac odrazeného zvuku – prenášaný zvuk sa výrazne líši, **STI klesá k 0 (zlá zrozumiteľnosť)**. Prenášaný zvuk obsahuje menej odrazeného zvuku, **STI rastie k 1 (dobrá zrozumiteľnosť)**.

Aby bola ľudská reč bola zrozumiteľná, sa všeobecne vyžaduje **STI vyššie ako 0,6**.

Dozvuk môže rušiť priamy zvuk a maskovať ho. Pri telekonferencii sa môže znížiť jasnosť zvuku (ťažšie počuť, čo sa hovorí). Zlepšiť akustiku v miestnosti, resp. byť bližšie k zdroju zvuku, aby priamy zvuk nebol maskovaný dozvukom, okolitým zvukom.



Obr. 11.84 Polomer doznievania (Konftel AB, 2023)

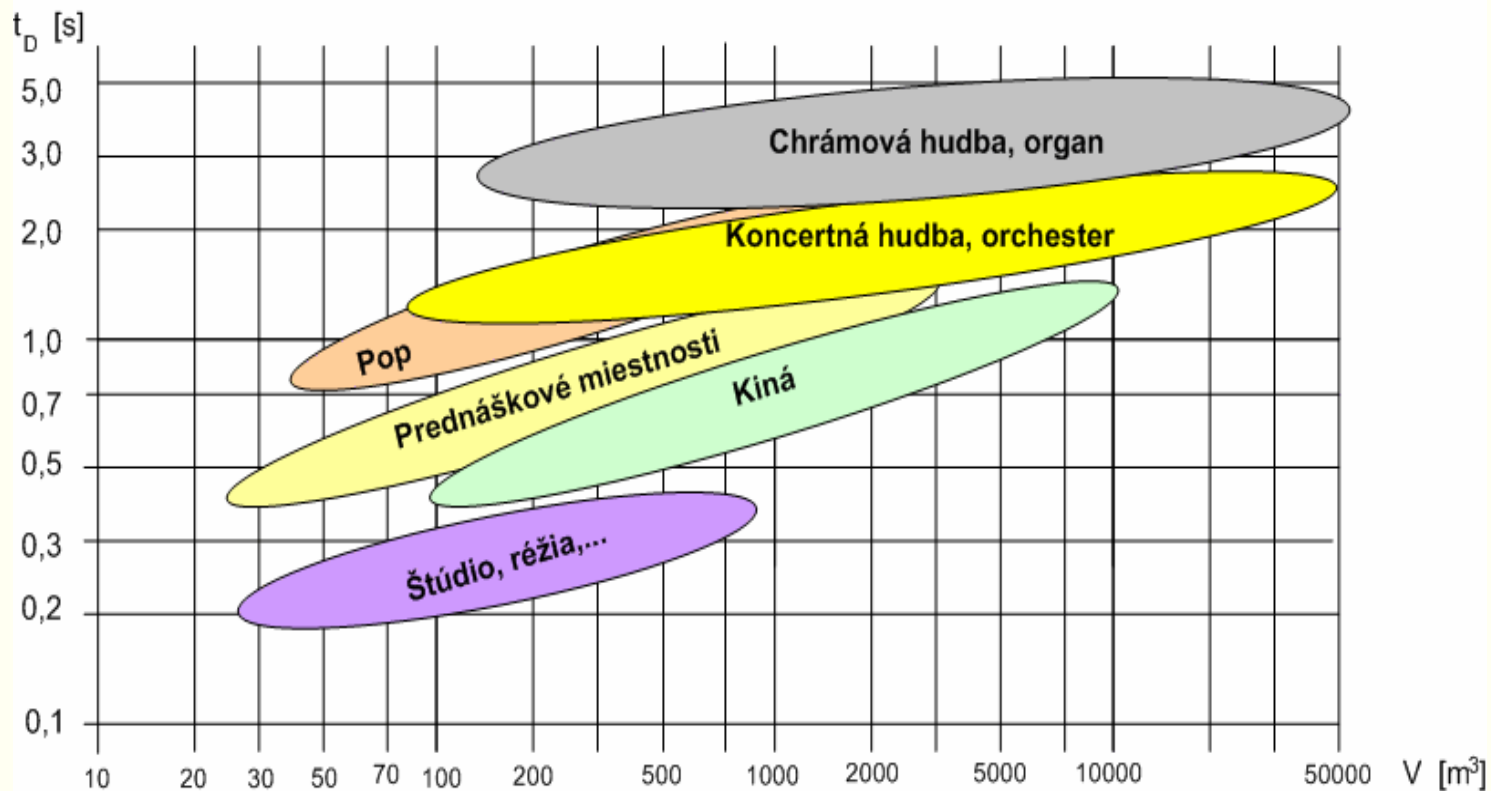
Polomer doznievania – akustický tlak vyvolaný voľným polom rovnaký ako akustický tlak poľa difúzneho, za hranicou dozvukovej vzdialenosti sa vytvára difúzne pole (v ňom $L_p = \text{konšt.}$, nezávisí od miesta).

$$r_D = 0,056 \cdot \sqrt{\frac{V}{RT}}$$

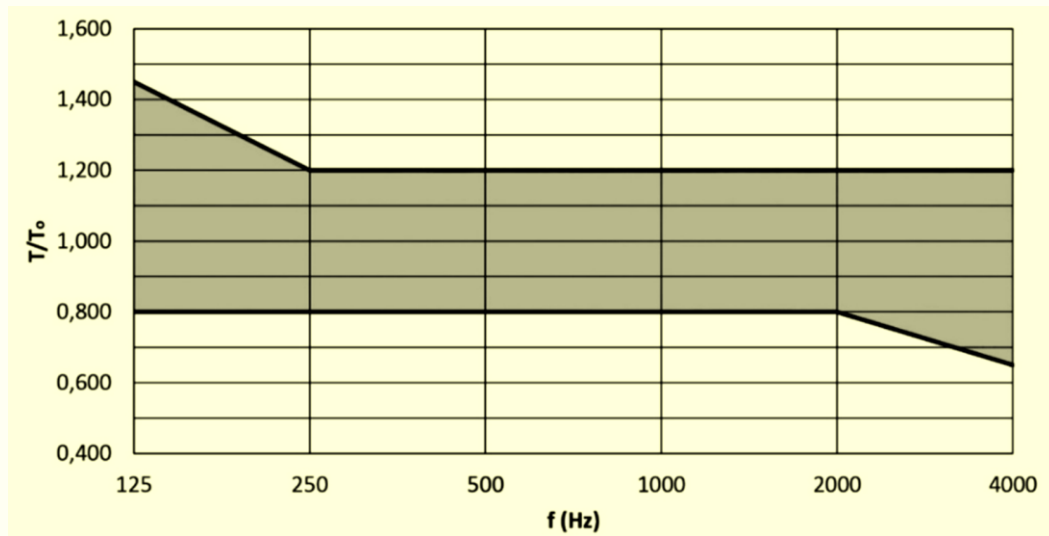
r_D – polomer doznievania (m)

V – objem (m^3)

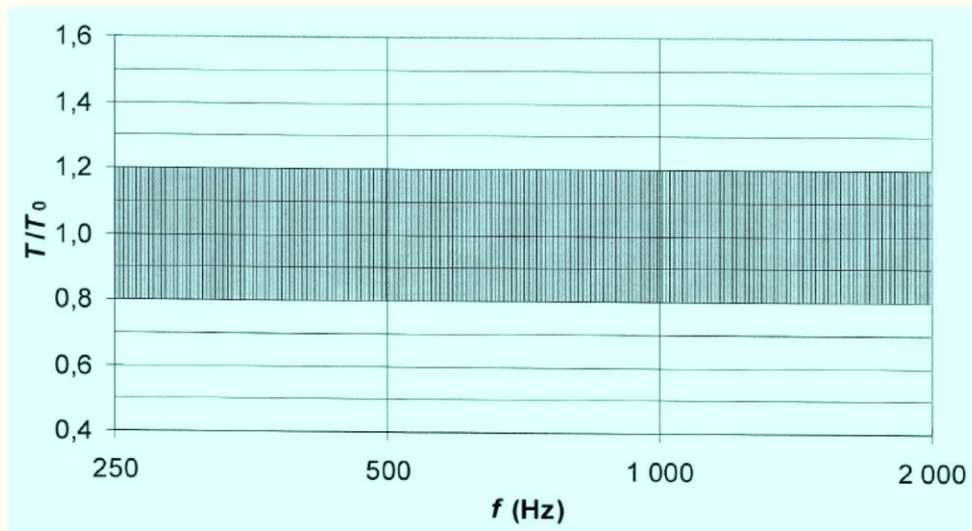
RT – čas dozvuku (s)



Obr. 11.85 Optimálny čas dozvuku pre rôzne priestory (Vaculík, 2007)



Obr. 11.86 Prípustný interval pomeru času dozvuku T/T_0 priestoru na prezentáciu hudby a reči v závislosti na strednej frekvencii oktávového pásma (ČSN 73 0527)



Obr. 11.87 Prípustný interval pomeru času dozvuku T/T_0 telocvične v závislosti na strednej frekvencii oktávového pásma (ČSN 73 0527)



(.wav)



(.wav)



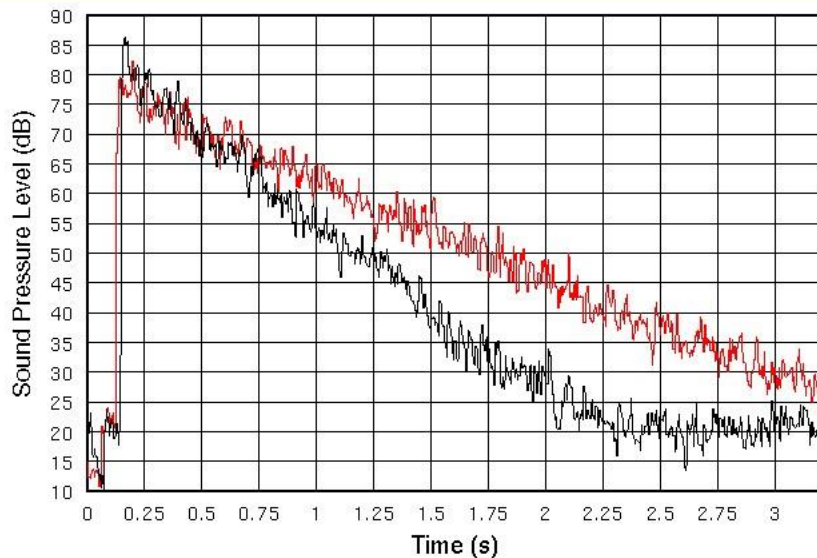
(.wav)



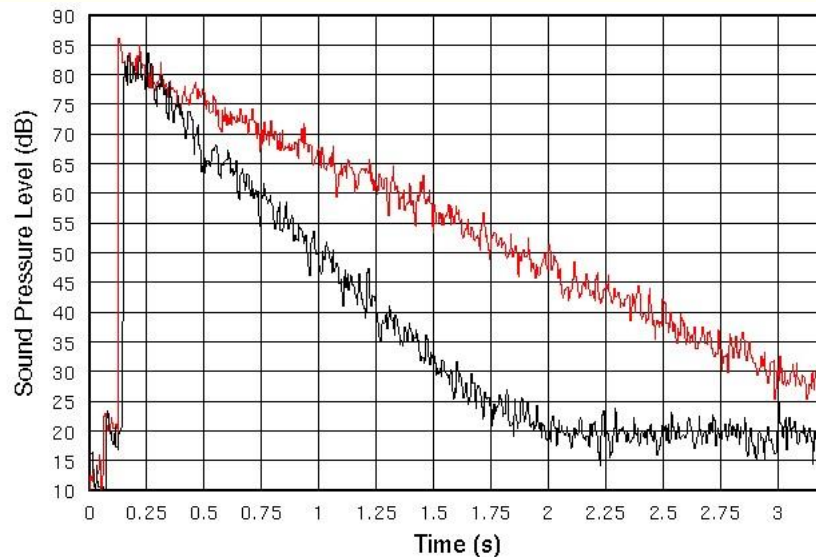
(.wav)

Obr. 11.88 Vplyv priestoru na čas dozvuku a zrozumiteľnosť (Russell, 2001)

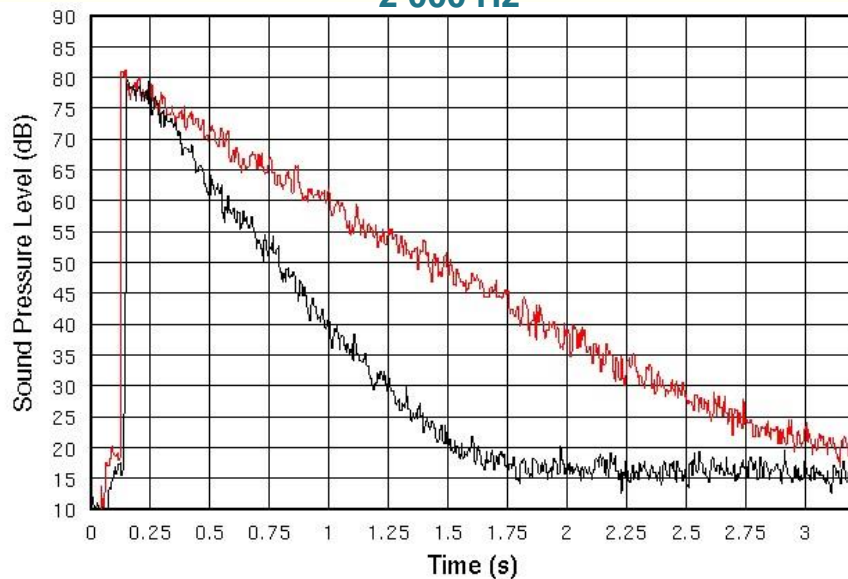
500 Hz



1 000 Hz



2 000 Hz



Rozmery = 9,25 m, 7,65 m, 3,15 m

pre $f = 1000$ Hz,

RT= 3,3 s pre prázdny priestor a

RT= 1,6 s pre priestor s kobercom

rozdiel s výpočtom 0,7 s

Obr. 11.89 Závislosť času dozvuku na frekvencii (Russell, 2001)

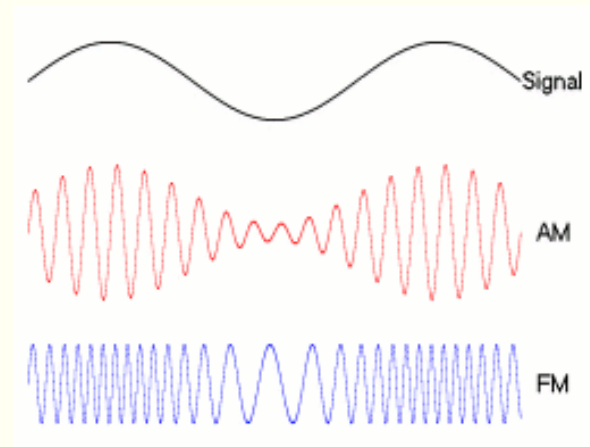
Metóda RASTI je založená na meraní modulačnej prenosovej funkcie (modulation transfer function – MTF). **Meraným parametrom je zníženie modulačného indexu testovacieho signálu.** Metóda RASTI uvažuje iba dve oktávové pásma (500 Hz a 2 000 Hz).

Čas merania na jednej pozícii je okolo 10 až 15 s.

RASTI (0,1) vyhodnocuje zrozumiteľnosť reči pomocou modulovaného šumu. Je jednoduchšia metóda ako STI. Frekvenčné meranie len v dvoch oktávach so stredovými frekvenciami 500 Hz a 2 000 Hz (rozdiel od STI).

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$$

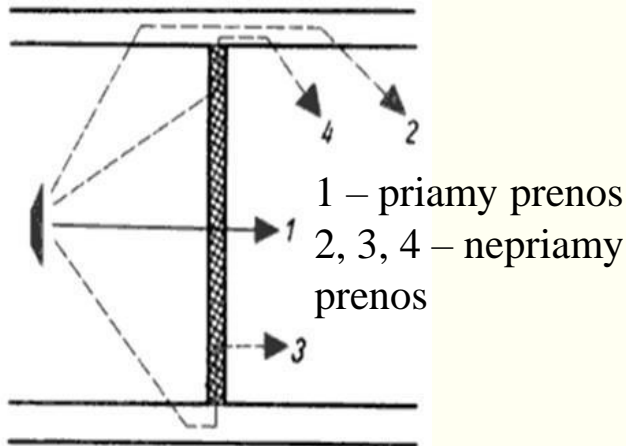
β – index modulácie
 $\Delta\omega$ – modulačný zdvih
 Ω – modulačná frekvencia



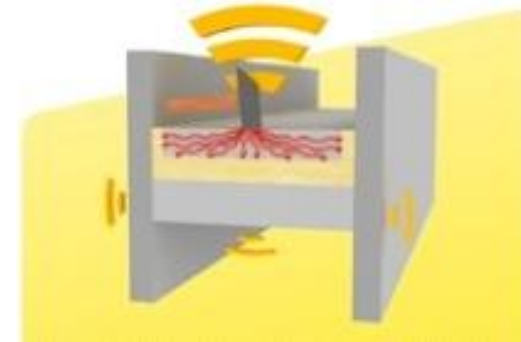
Obr. 11.90 Frekvenčná a amplitúdová modulácia
(Berserkerus, 2008)

Stavebná akustika

Akustický výkon zvukovej vlny, ktorá prejde do susednej miestnosti závisí od akustických vlastností stavebnej konštrukcie.



Obr. 11.91 Šírenie zvuku konštrukciou
(Urbanovská, 2014)



Obr. 11.92 Šírenie zvuku konštrukciou pred úpravou a po úprave izoláciou (Isover, 2023)

K akustickým vlastnostiam patria:

akustická pohltivosť – schopnosť povrchu konštrukcie pohlcovať zvukovú energiu (teda znížiť hluk v miestnosti, resp. ovplyvniť kvalitu posluchu),

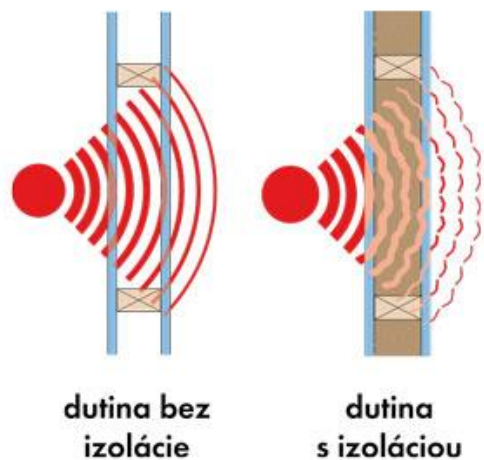
vzduchová nepriezvučnosť – schopnosť deliacej konštrukcie zabrániť prenosu zvuku šíriaceho sa vzduchom z jedného priestoru do druhého,

kroková nepriezvučnosť – schopnosť vodorovnej konštrukcie utlmiť krokový zvuk.

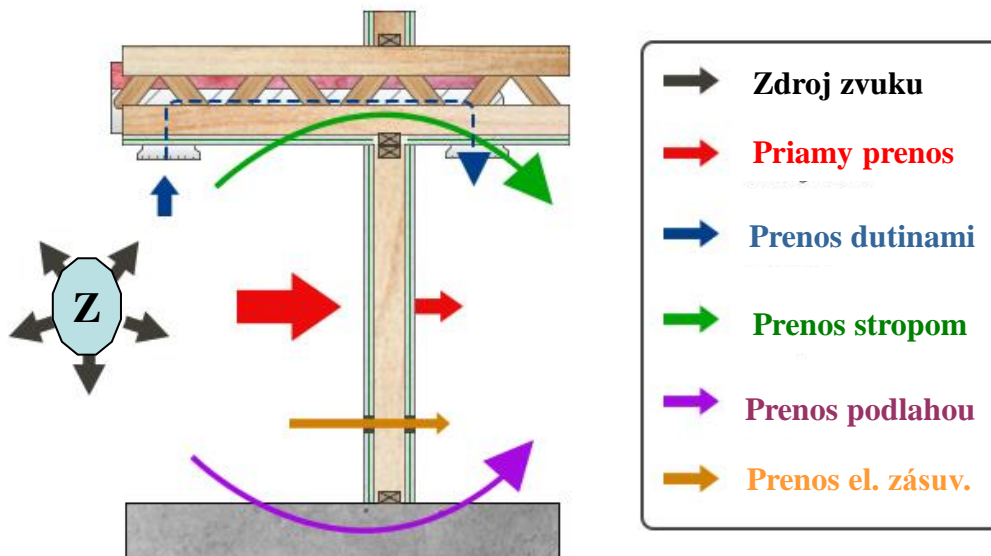
Stavebná akustika

Hluk sa šíri do interiérov budov z exteriéru, ale aj z iných častí budov rôznymi cestami – **vzduchom** (pozdĺžne), **konštrukciou** (priečne, ohybom, krokom).

Pri hodnotení konštrukcií z pohľadu zvukovej izolácie ide o **vzduchovú nepriezvučnosť**.



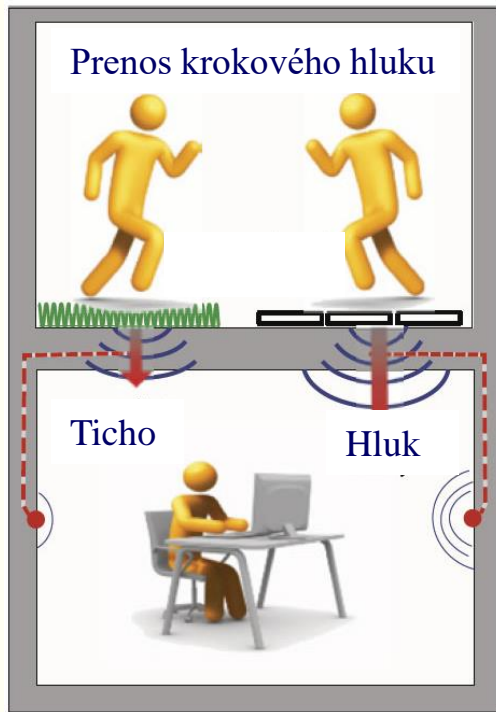
Obr. 11.93 Efekt izolácie v deliacej konštrukcii (KnaufInsulation, 2023)



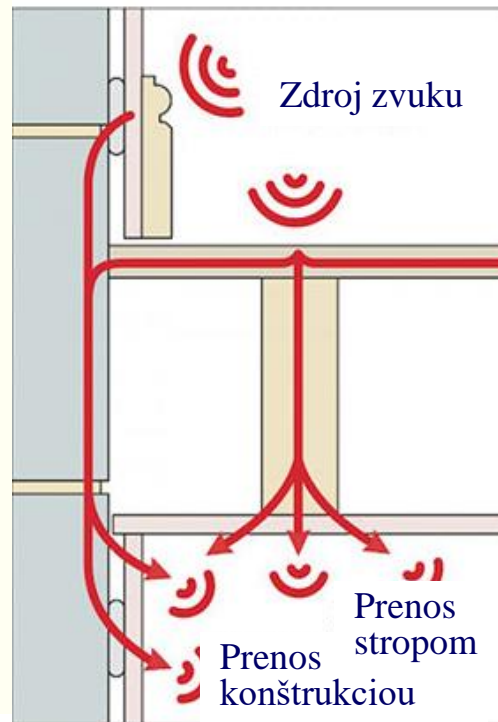
Obr. 11.94 Šírenie zvuku konštrukciou (Matt, 2017)

Stavebná akustika

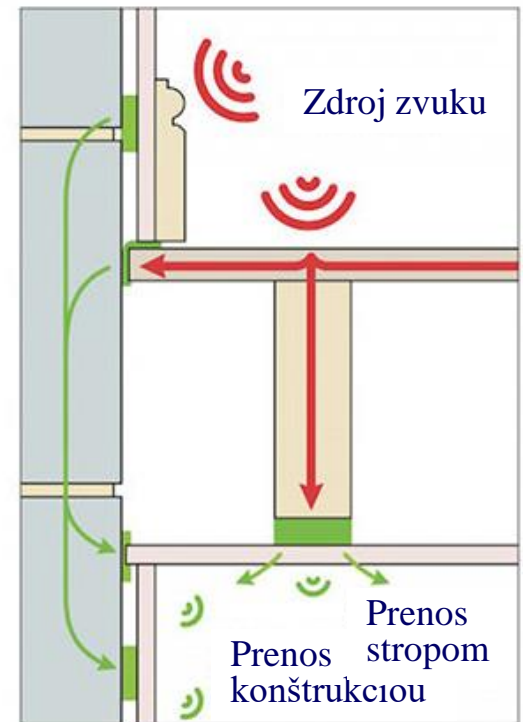
Zvukovoizolačné vlastnosti stropnej konštrukcie sú hodnotené prostredníctvom – **krokovej nepriezvučnosti** – schopnosť konštrukcie tlmiť krokový hluk spôsobený priamym kontaktom zdroja zvuku s konštrukciou.



Obr. 11.95 Prenos krokového hluku
(GUT e.V., 2023)



Obr. 11.96 Efekt izolácie v konštrukcii
(Soundstop.co.uk., 2003)



Zvuková izolácia – vzájomné akustické oddelenie dvoch priestorov, prejavujúce sa potlačovaním zvuku pri jeho šírení z jednej miestnosti do druhej.

Hlučný priestor je miestnosť zdroja (1 – source room) a **chránený priestor** je miestnosť príjmu (2 – receiver room). Hlučným priestorom však môže byť aj vonkajší priestor pred fasádou objektu.

Požadovanú zvukovú izoláciu je možné dosiahnuť použitím materiálov vhodných vlastností. Pri návrhu budov a priestorov v nich je však nutné poznať nielen akustické, ale aj:

- mechanické vlastnosti,
- tepelno-izolačné vlastnosti stavebných materiálov.

Deliaca stena by mala byť zhotovená tak, aby čo najviac neodrazenej akustickej energie bolo absorbovanej. Tým sa dosiahne zníženie akustickej energie a na druhej strane je L_p nižšia.

Prenos zvuku medzi miestnosťami je ovplyvnený charakterom zdroja zvuku a akustickými vlastnosťami stavebných prvkov.

V stavebnej akustike sa bežné zdroje zvuku rozdeľujú do 2 skupín:

- 1) Zdroje zvuku vyžarujúce zvuk do okolitého prostredia (hlasové prejavy osôb, zvierat, reprod. hudba). Vyžarovaný zvuk potom dopadá na stavebné prvky v miestnosti zdroja zo vzduchu, šíri stavebnými konštrukciami kmitaním a následne je vyžiarený späť do vzduchu v miestnosti príjmu. Zvuk produkovaný týmito zdrojmi sa nazýva zvuk prenášaný vzduchom (*airborne sound*).
- 2) Zdroje zvuku v priamom kontakte so stavebnými prvkami, do ktorých vnášajú mechanické impulzy (chôdza po podlahe, pády telies na podlahu). Zvuk je prenášaný kmitaním stavebných konštrukcií a je vyžarovaný v miestnosti príjmu do vzduchu – označuje sa ako zvuk prenášaný konštrukciou (*structure-borne sound*).

Nepriezvučnosť vzduchová, kroková

Pri deliacich priečkach a obvodových stenách sa z akustického hľadiska posudzuje **iba vzduchová nepriezvučnosť**.

Zvuková izolácia má zvukovú energiu konštrukcie obmedziť – zvýšiť jej vzduchovú nepriezvučnosť. Zvýšenie je možné vhodnou skladbou materiálov – pohltivý materiál musí byť umiestnený v konštrukcii, nie na jej povrchu.

Pri podlahových konštrukciách sa okrem **vzduchovej nepriezvučnosti** hodnotí aj schopnosť konštrukcie pohlcovať **krokový hluk (kroková nepriezvučnosť)**. Z akustického hľadiska platí, čím väčšia **kroková izolácia**, tým nižšia dynamická tuhosť a lepší **krokový útlm**.

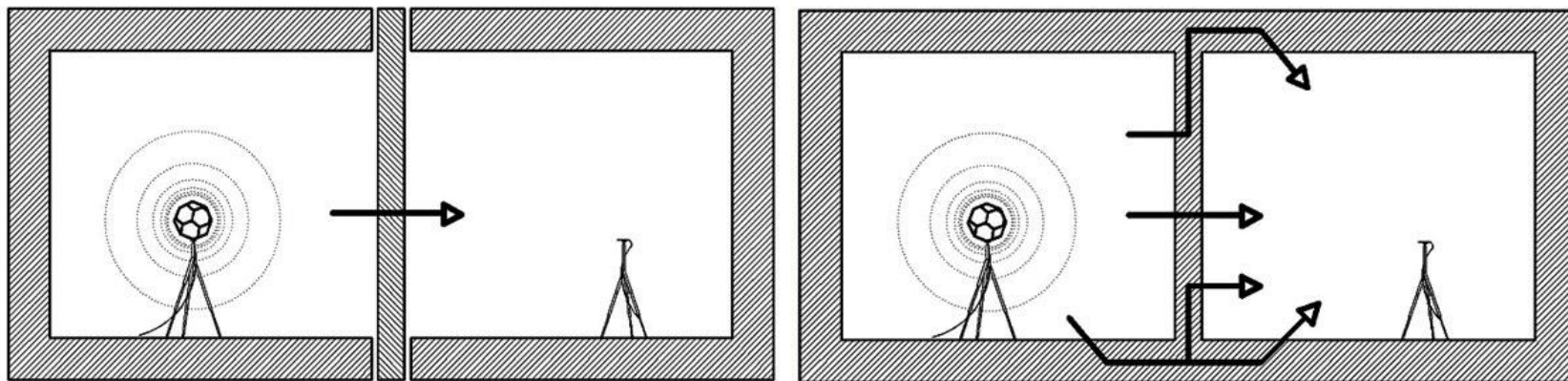
Vzduchová nepriezvučnosť

Vzduchová nepriezvučnosť je schopnosť plošnej deliacej konštrukcie prenášať zvuk v zoslabenej miere do chránených priestorov. Je charakterizovaná **stupňom vzduchovej nepriezvučnosti R** (dB), ktorý závisí od frekvencie. Meria sa v tretinooktávových pásmach od **100 Hz do 3 150 Hz**.

$$R = 10 \cdot \log \frac{P_i}{P_t}$$

P_i (W) – akustický výkon dopadajúci na testovaný stavebný prvok;

P_t (W) – akustický výkon vyžiarený prvkom do prijímacej miestnosti.



Obr. 11.97 Meranie vzduchovej nepriezvučnosti v laboratóriu a na stavbe (Zaťko, 2007)

Pri zisťovaní **stupňa vzduchovej nepriezvučnosti R** (dB) v **laboratórnych podmienkach** nedochádza ku šíreniu zvuku vedľajšími cestami.

Pri **meraní** stupňa vzduchovej nepriezvučnosti R sa predpokladá, že zvukové pole vo vysielacej aj prijímacej miestnosti je difúzne.

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \frac{S}{A}$$

L_{p1} (dB) – hladina akustického tlaku vo vysielacej miestnosti;

L_{p2} (dB) – hladina akustického tlaku v prijímacej miestnosti;

S (m²) – plocha deliacej konštrukcie;

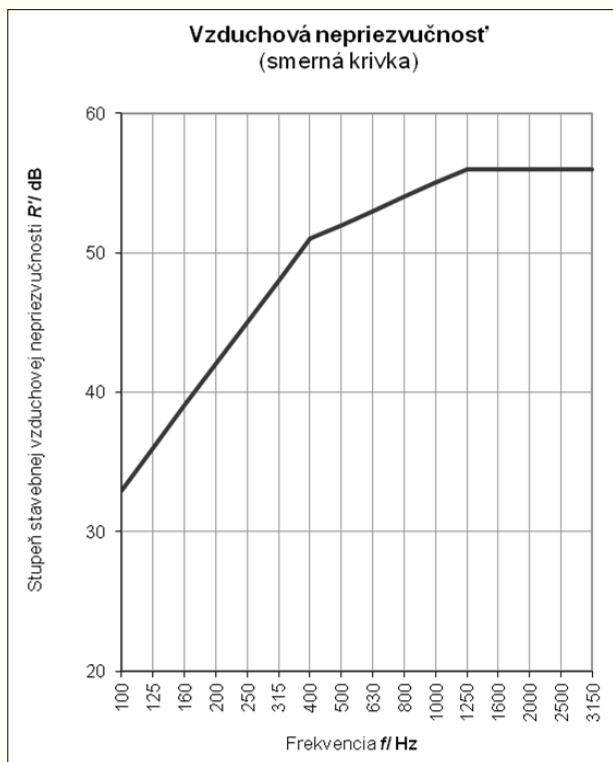
A (m²) – ekvivalentná pohltivá plocha (celková efektívna zvuková pohltivosť) v prijímajúcej miestnosti.

Ak je spektrálny priebeh vzduchovej nepriezvučnosti odmeraný v budove – **stupeň stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti R'** (dB). V tomto prípade dochádza ku šíreniu zvuku aj bočnými cestami vrátane otvorov.

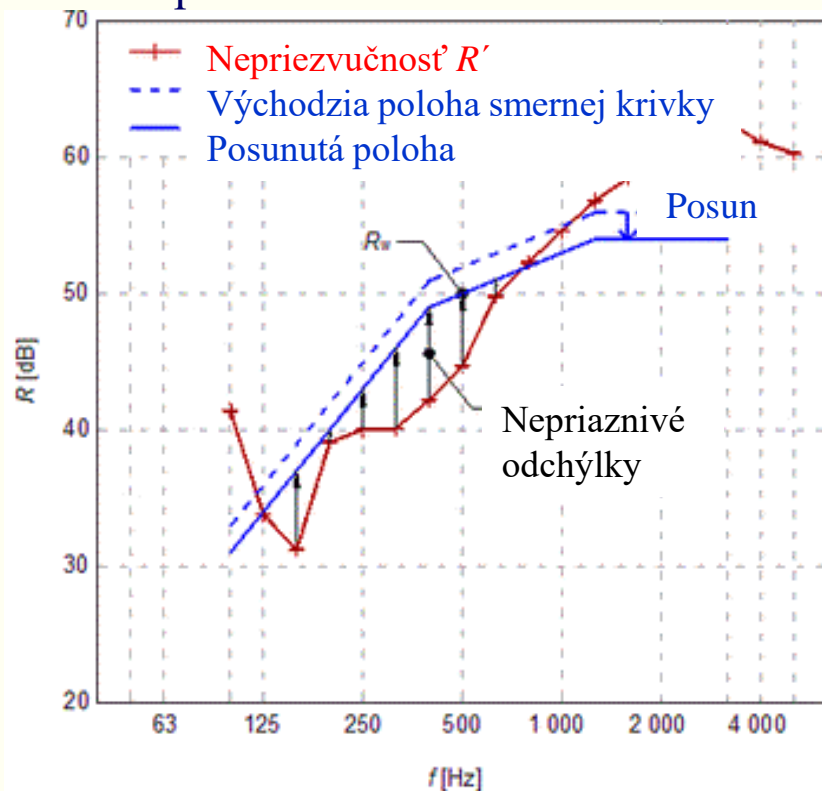
$$R' = 10 \cdot \log \frac{P_i}{P_{tb}}$$

P_{tb} (W) – akustický výkon vyžiarený deliacim prvkom a bočnými cestami do prijímacej miestnosti.

Vážená stavebná nepriezvučnosť' R'_w . Nameraný priebeh vzduchovej nepriezvučnosti stavebného prvku sa porovnáva so smernou krivkou, ktorá reprezentuje „vyhovujúcu“ krivku nepriezvučnosti z hľadiska zvukovej izolácie. Smerná krivka sa posúva smerom ku krivke nepriezvučnosti s krokom 1 dB, kým súčet nepriaznivých odchýlok nie je rovný hodnote čo najbližšej, avšak nie vyššej ako 32 dB. Odchýlky sú nepriaznivé, ak je hodnota smernej krivky vyššia ako hodnota nepriezvučnosti. **Vážená nepriezvučnosť' sa potom určí ako hodnota posunutej smernej krivky v tretinooktávovom pásme 500 Hz.**



Obr. 11.98 Smerná krivka (STN EN ISO 717-1, 2021)



Obr. 11.99 Postup stanovenia váženej stavebnej nepriezvučnosti (TZB-info, 2021-2023)

Podobne sa postupuje aj pri určovaní D , D_n , $D_{nT,w}$.

Váženú stavebnú nepriezvučnosť prvku je možné odhadnúť podľa vzťahu:

$$R'_w = R_w - k_1$$

k_1 – empirická korekcia závislá na bočných cestách prenosu zvuku (v bežných masívnych murovaných a panelových stavbách sa rovná 2 dB).

Zvukové mosty

– miesta kritické na vznik rušivých zvukov – veľmi výrazne zhoršujú hodnotu zvukovej pohody v interiéri, z tohto dôvodu je im potrebné venovať mimoriadnu pozornosť. Zvukové mosty vznikajú v miestach spojov rôznych konštrukcií: napr. miesta spojov vodorovných alebo zvislých konštrukcií, styk zárubní dverí s podlahou, technické zariadenia (vodovodné rúry) v priečkach ap. Zvukové mosty bývajú považované za najrušivejšie vplyvy zasahujúce do komfortu bývania.

Vzduchová nepriezvučnosť deliacich konštrukcií **drevených stavieb** sa dá ovplyvniť jednotlivými **vrstvami materiálov**, ich **správnou voľbou a vzájomným poradím vrstvenia**. Pri **murovaných stavbách** sa **zvuková nepriezvučnosť dá regulovať len hrúbkou steny**.

Z pohľadu zvukovej izolácie je potrebné hľadať vhodnú materiálovú skladbu, technické prevedenia konštrukcie a vzájomné prepojenia vrstiev.

Mnohé **ľahké deliace konštrukcie nedokážu eliminovať ani pohltiť nízke frekvencie**, ale prepúšťajú ich cez deliacu konštrukciu.

Pri navrhovaní akustickej ochrany, treba myslieť aj napr. pri orientácii budovy vzhľadom na jej zaťaženie vonkajším hlukom, pri zabudovaní masívnych vrstiev do nosných konštrukčných prvkov a pri umiestnení hlučných a tichých priestorov v budove.

Je nutné vyhýbať sa škáram a zvukovým mostom. Zvuk sa šíri priamo cez konštrukciu, tiež bočnými cestami – spoje, detaily ukotvenia jednotlivých konštrukcií a pod..

Kroková nepriezvučnosť

Kroková nepriezvučnosť – schopnosť tlmiť krokový hluk.

Vzniká tam, kde je stavebná konštrukcia v priamom kontakte so zdrojom hluku (týka sa výhradne podláh). Krokový hluk vzniká mechanickými nárazmi do konštrukcie budovy (pri chôdzi, náhodným nárazom predmetu). Preto má nepravidelný charakter a závisí na aktivite ľudí.

L_n (dB) – normalizovaná hladina
krokového hluku,

L_{p2} (dB) – priemerná hladina akustického
tlaku v tretinooktávovom pásme v
prijímacej miestnosti,

A (m²) – je ekvivalentná zvuková pohltivosť
v prijímacej miestnosti,

$A_0=10$ m² referenčná hodnota pohltivosti.

$$L_n = L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0}$$

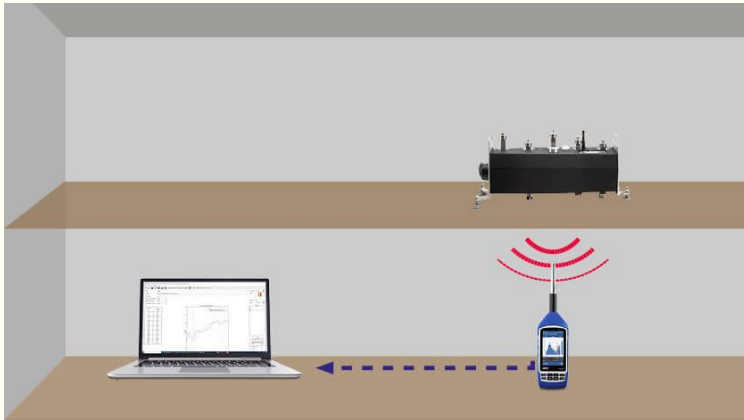
$$A = \sum \alpha_i S_{Vpi}$$

α_i (-) – vážený priemer koeficienta zvukovej
pohltivosti, S_{Vpi} (m²) – suma vnútorných
povrchov v prijímacej miestnosti.

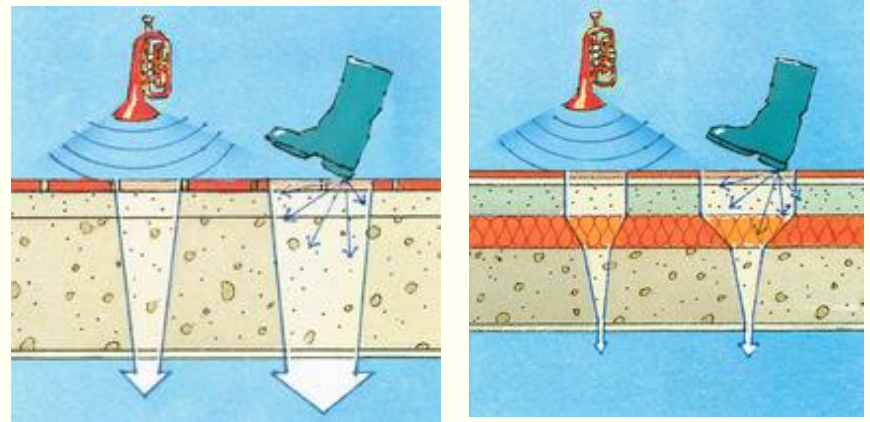


Obr. 11.100 Kroková nepriezvučnosť
(Medzayová, 2020)

Hodnotiacim kritériom krokovej nepriezvučnosti je jednočíselná veličina – **vážená normalizovaná hladina krokového hluku $L_{n,w}$** .



Obr. 11.101 Meranie krokovej nepriezvučnosti
(NTi Audio, 2023)



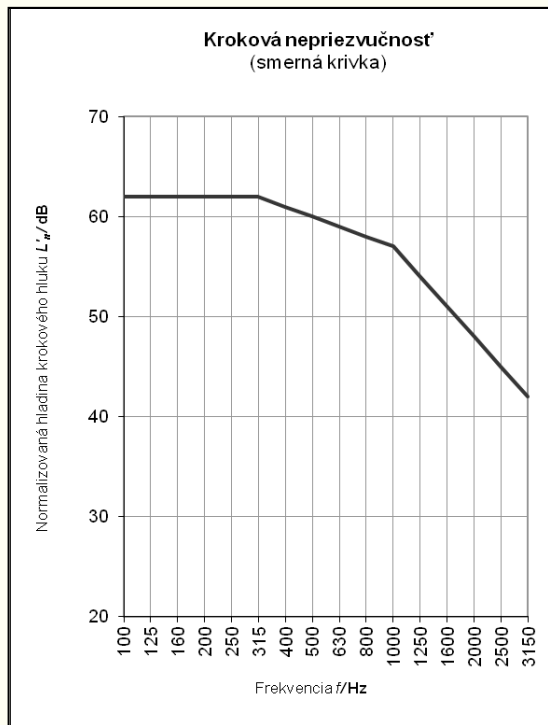
Obr. 11.102 Zníženie krokového zvuku izoláciou
(môjdom, 2006)

Pri návrhu je možné použiť namerané, resp. vypočítané laboratórne hodnoty normalizovanej hladiny krokového hluku stropných konštrukcií s podlahami $L_{n,w}$ na prepočet na **váženú stavebnú normalizovanú hladinu krokového hluku $L'_{n,w}$ (dB)**, podľa vzťahu:

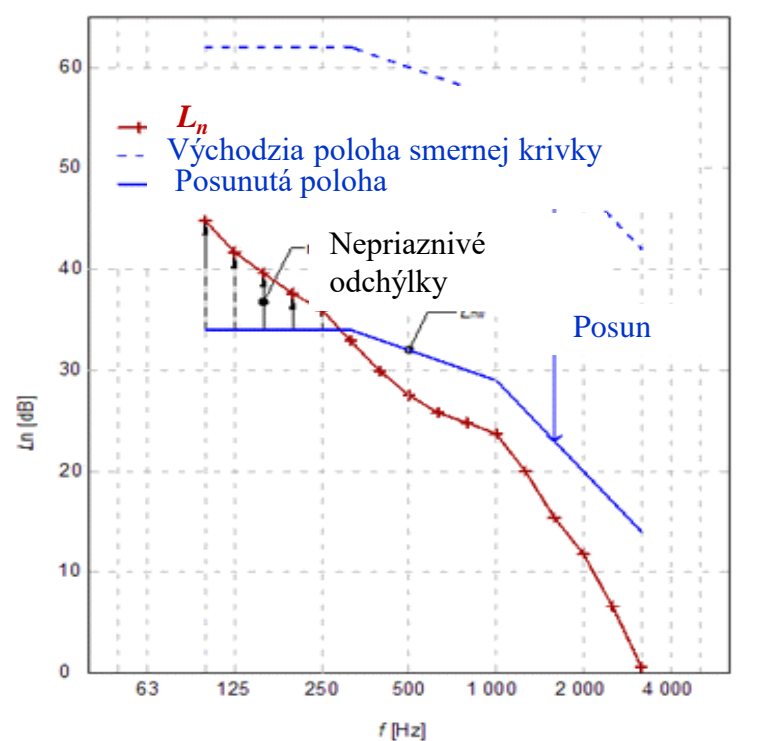
$$L'_{n,w} = L_{n,w} + k_2$$

kde k_2 je empirická korekcia závislá na bočných cestách prenosu zvuku (obvykle sa rovná 0 až 2 dB).

Vážená normalizovaná hladina krokového hluku $L_{n,w}$. Nameraný priebeh krokovej nepriezvučnosti stavebného prvku sa porovnáva so smernou krivkou. Smerná krivka sa posúva smerom ku krivke – normalizovanej hladine krokového hluku s krokom 1 dB, kým súčet nepriaznivých odchýlok nie je rovný hodnote čo najbližšej, avšak nie vyššej ako 32 dB. Odchýlky sú nepriaznivé, ak je hodnota smernej krivky nižšia ako hodnota hladiny krokového zvuku. Vážená normovaná hladina akustického tlaku krokového hluku sa potom určí ako hodnota posunutej smernej krivky v tretinooktávovom pásme 500 Hz.



Obr. 11.103 Smerná krivka krokového hluku (STN EN ISO 717-2, 2013)



Obr. 11.104 Vážená normalizovaná hladina krokového hluku $L'_{n,w}$ (TZB-info, 2021-2023)

Vzduchová nepriezvučnosť:

Čím vyššia hodnota vzduchovej nepriezvučnosti, tým tichšie prostredie za deliacou konštrukciou.

Vážená stavebná nepriezvučnosť $R'_w <$ Vážená laboratórna nepriezvučnosť R_w .

Vzduchovú nepriezvučnosť násobných deliacich konštrukcií ovplyvňuje:

- plošná hmotnosť použitých materiálov (čím vyššia plošná hmotnosť, tým lepšia nepriezvučnosť),
- počet vrstiev opláštenia,
- spôsob prepojenia jednotlivých konštrukcií (vhodné sú ľahké kovové profily, nevhodné je čiastočné spojenie lepidlom alebo podobnou hmotou),
- vzduchová medzera (čím väčšia medzera, tým lepšia nepriezvučnosť – platí do šírky 200 mm),
- výplň vzduchovej medzery (čím má materiál nižšiu dynamickú tuhosť, tým lepšie tlmí zvuk),
- spôsob odizolovania konštrukcie od príľahlých deliacich konštrukcií (eliminácia zvuku prenášaného bočnými cestami).

Kroková nepriezvučnosť:

Čím nižšia hodnota krokovej nepriezvučnosti, tým tichšie prostredie za deliacou konštrukciou.

Vážená normalizovaná hladina krokového zvuku $L_{n,w}$ > Vážená stavebná normalizovaná hladina krokového zvuku $L'_{n,w}$.

Zlepšenie krokovej nepriezvučnosti – akusticky jednoduchej konštrukcie, konštrukcie zloženej z tuhého materiálu (monolit) je možné realizovať s využitím rovnakých princípov ako je to v prípade zlepšenia vzduchovej nepriezvučnosti.

Jednou možnosťou je zvyšovanie plošnej hmotnosti a druhou možnosťou je vytvorenie zloženej, resp. akusticky násobnej konštrukcie.

Pre vzduchovú aj krokovú nepriezvučnosť konštrukcie platí:

Akusticky násobná konštrukcia rovnakej hrúbky a rovnakej plošnej hmotnosti ako akusticky jednoduchá konštrukcia má z pohľadu akustiky vždy výrazne lepšie vlastnosti a predstavuje efektívnejšie riešenie.

Požiadavky na nepriezvučnosť obvodových a deliacich konštrukcií

Obvodová stena musí zo zvukovoizolačného hľadiska spĺňať 2 základné architektonicko-konštrukčné požiadavky:

- svojím tvarovaním a povrchovou úpravou má znižovať hladinu hluku vo vonkajšom prostredí tesne pred fasádou a meniť vlastnosti zvukového poľa odrazom zvuku od povrchu priečelia,
- musí zabraňovať prechodu nežiaducich zvukov z vonkajšieho do vnútorného chráneného prostredia svojou konštrukciou, materiálom a konštrukčným riešením jednotlivých prvkov.

Deliaca konštrukcia musí byť odolná voči šíreniu nežiaduceho zvuku. Šírenie zvuku cez konštrukciu – potlačiť použitím **konštrukcie pohlcujúcej zvukové vlnenie**, resp. **konštrukcie zvukovoizolačnej**. **Konštrukcie pohlcujúce zvukové vlnenie potláčajú odraz zvukových vln** (väčšia časť akustickej energie je konštrukciou absorbovaná). **Konštrukcie zvukovoizolačné potláčajú prenos zvukových vln konštrukciou.**

Konštrukcia (s ohľadom na ochranu pred hlukom) – spĺňať normatívne požiadavky na nepriezvučnosť konštrukcií – uvedené v *STN 73 0532:2013-01:2013*, ktorá stanovuje požiadavky na posudzovanie zvukovoizolačných vlastností deliacich konštrukcií medzi miestnosťami a obvodových plášťov budov.

Posudzovanie sa vykonáva porovnaním jednočíselných hodnotiacich veličín určených podľa *STN EN ISO 717-1: 2013-11 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť (ISO 717-1: 2013)* a *STN EN ISO 717-2: 2013-11 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť (ISO 717-2: 2013)* s požadovanými hodnotami uvedenými v norme *STN 73 0532: 2013*.

Určujúce veličiny pre hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií sú:

- **stupeň vzduchovej nepriezvučnosti R** v dB, ktorý sa v 1/1 alebo 1/3 oktávových frekvenčných pásmach od 100 Hz až 3 150 Hz získa meraním v laboratóriách,
- **vážená laboratórna nepriezvučnosť R_w** v dB, ktorej hodnota sa odčíta pri frekvencii 500 Hz z posunutej smernej krivky podľa STN EN ISO 717-1: 2013-11 a STN EN ISO 16283-1: 2014-08,
- **stupeň stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti R'** v dB, ktorý sa stanoví meraním v 1/1 alebo 1/3 oktávových frekvenčných pásmach od 100 Hz až 3 150 Hz v budovách,
- **vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w** , ktorej hodnota sa odčíta pri frekvencii 500 Hz z posunutej smernej krivky podľa STN EN ISO 717-1: 2013-11 a STN EN ISO 16283-1: 2014-08,

- ***stupeň štandardizovanej zvukovej izolácie D_{nT} v dB***, ktorý sa stanoví meraním v 1/1 alebo 1/3 oktávových frekvenčných pásmach od 100 Hz až 3 150 Hz v budovách,
- ***vážený štandardizovaný rozdiel hladín $D_{nT,w}$ v dB***, ktorej hodnota sa odčíta pri frekvencii 500 Hz z posunutej smernej krivky podobne ako pri R'_w ,
- ***normalizovaná hladina krokového hluku L_n (L'_n – meranie v budovách) v dB***, ktorá sa v 1/1 alebo 1/3 oktávových frekvenčných pásmach od 100 Hz až 3 150 Hz získa meraním v laboratóriách,
- ***vážená normalizovaná hladina krokového hluku $L_{n,w}$ ($L'_{n,w}$ – meranie v budovách) v dB***, ktorej hodnota sa odčíta pri frekvencii 500 Hz z posunutej smernej krivky podľa STN EN ISO 717-2: 2013-11.

Požiadavky na zvukovú izoláciu medzi miestnosťami bytov, domov

Zvukovú izoláciu medzi miestnosťami bytov, domov v smere prenosu zvuku vzduchom (*horizontálny alebo vertikálny prenos*) cez spoločné deliace konštrukcie vrátane prenosu vedľajšími cestami charakterizujú jednočíselné veličiny:

- **vážená stavebná nepriezvučnosť** R'_{w} , ktorá je stanovená pre miestnosti so spoločnou celou plochou steny, priečky a stropu, ako aj pre miestnosti, ktoré majú spoločnú časť deliacej konštrukcie menšiu ako je plocha príslušnej steny, priečky alebo stropu pri pohľade z vysielacej alebo prijímacej miestnosti,
- **vážený štandardizovaný rozdiel hladín** $D_{nT,w}$, ktorý je stanovený pre miestnosti, ktoré nemajú spoločnú deliacu konštrukciu (bezprostredne nesusedia), alebo stavebné konštrukcie delia miestnosti s rozdielnym objemom alebo v prípadoch, keď deliacu plochu nie je možné jednoznačne určiť,

- **vážená normalizovaná hladina krokového zvuku $L'_{n,w}$** , ktorá je stanovená pre miestnosti so spoločnou celou plochou stropu so skúšanou podlahou, alebo keď skúšaná podlaha je súčasťou spoločnej časti stropu, ktorá je menšia ako plocha stropu pri pohľade z prijímacej miestnosti (vertikálny prenos z hornej alebo spodnej chránenej miestnosti).

Hodnotenie zvukovo-izolačných vlastností konštrukcií sa uskutočňuje vo frekvenčnom rozsahu (100 Hz – 3 150) Hz. S používaním nových stavebných materiálov, technologických postupov narastajú problémy v oblasti nižších frekvencií. Preto pre hodnotenie zvukovo-izolačných vlastností sa rozširuje rozsah frekvencií od 50 Hz do 5 000 Hz.

Deliaca stena musí čo najviac neodrazenej akustickej energie premeniť v tepelnú energiu tak, aby na druhej strane steny nebol zvuk vyžarovaný.

Zdroje obrázkov

1. Baldwin G. 2016. Lesson 1. Oscillatory Motion [Online] 2016. [Dátum: 9.10. 2023.]
<https://slideplayer.com/slide/10551912/>
2. Kratochvíl P. 2018. Časť I – Kmity. Plzeň [Online] 2018. [Dátum: 9. 4. 2023.]
<https://slideplayer.cz/slide/15207547/>
3. Ahmed M. et al. 2014. Physics. What are some examples of simple harmonic motion? [Online] 4. 9. 2014. [Dátum: 4. 6. 2021.]
<https://socratic.org/questions/what-are-some-examples-of-simple-harmonic-motion>
4. Moebis W. et al. 2016. University Physics Volume 1. 15.5 Damped Oscillations. [Online] 19. 9. 2016. [Dátum: 14. 6. 2022.]
<https://courses.lumenlearning.com/suny-osuniversityphysics/chapter/15-5-damped-oscillations/>
5. Splung.com. 2014. A diagram of three types of damped harmonic motion. [Online] 2. 12. 2014. [Dátum: 15. 4. 2022.]
https://www.splung.com/kinematics/images/damped_oscillations/damped_oscillations.gif

6. Jurda.sk. 2015. Testy tlmičov. [Online] 2015. [Dátum: 15. 4. 2023.]
<https://jurda.sk/testy-tlmicov/>
7. Ball G. 2018. Damped and driven oscillations. [Online] Jar 2018. [Dátum: 9.10. 2022.]
<https://slideplayer.com/slide/15239401/>
8. WordPress.com. 2014. 040 Damping and Resonance Amplitude. [Online] 22.6. 2014. [Dátum: 9. 6. 2022.] <https://xmdemo.wordpress.com/category/08-oscillations/page/2/>
9. Zohuri B. 2019. RETRACTED CHAPTER: Scalar Wave Energy as Weapon. In: RETRACTED BOOK: Directed-Energy Beam Weapons. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-20794-6_6
10. Ashish T. 2018. What Is Sound? ScienceABC.com. [Online] 3.9. 2018. [Dátum: 9. 11. 2022.]
<https://www.scienceabc.com/pure-sciences/movement-of-sound-waves-through-different-media.html>
11. Ashish T. 2018. How Is A Standing Wave Produced? ScienceABC.com. [Online] 17.11. 2018. [Dátum: 10. 11. 2022.]
<https://www.scienceabc.com/pure-sciences/standing-wave-definition-ratio-examples-and-explanation.html>

12. Baumgarten F. 2022. Aluminium contrabas. [Online] Jar 2022. [Dátum: 10. 9. 2022.]
<https://www.baumgarten.nl/aluminium-double-bass/>
13. Muziker.sk. 2023. Trúbky, Kornety a Krídlovky. [Online] 2023-2024. [Dátum: 10. 9. 2023.]
<https://www.muziker.sk/trubky-kornety-a-kridlovky>
14. Soukupová M. 2015. 3.2.4 Huygensův princip, odraz vlnění. [Online] 2015. [Dátum: 12. 6. 2023.] <https://docplayer.cz/411904-3-2-4-huygensuv-princip-odraz-vlneni.html>
15. Rabenstein R., Spors S. 2006. Wave Field Synthesis Techniques for Spatial Sound Reproduction. [Online] 2006. [Dátum: 10. 6. 2023.]
https://www.researchgate.net/publication/230702209_Wave_Field_Synthesis_Techniques_for_Spatial_Sound_Reproduction
16. Pazdera V., Diviš J. 2015. Fyzika. Mechanické kmitání a vlnění. [Online] 28.8.2015. [Dátum: 12. 10. 2022.] <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1666>
17. Calderado S. 2022. Diffraction | Light, Sound & Wavelength. [Online] 28.10.2022. [Dátum: 12. 7. 2023.] <https://study.com/academy/lesson/diffraction-relation-to-sound-light-and-effects-on-wavelength.html>

18. Cedric M., Matthew W., Philip N. 2023. Sound Waves. [Online] 2023. [Dátum: 10. 9. 2023.]
<https://blog.soton.ac.uk/soundwaves/wave-interaction/3-refraction/>
19. Liptaj A. 2015. Fyzika hudby. [Online] 6.9.2015. [Dátum: 10. 11. 2022.]
https://www.quark.sk/fyzika_hudby/
20. Ono Sokki, CO., LTD. 2023. What is sound quality evaluation? [Online] 2023. [Dátum: 10. 9. 2023.]
https://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/whats_new/SV_rpt/soundquality/soundquality.htm
21. Čenčariková H. 2015. Akustika. [Online] 2015. [Dátum: 11. 12. 2021.]
<https://slideplayer.com/slide/14076344/>
22. Mišun V. 2005. Vibrace a hluk. Brno: Akad. naklad. CERM, s.r.o., 2005. 177 s. ISBN: 80-214-3060-5
23. AmjidTV. 2021. Sound Intensity and Sound Level. [Online] 2021. [Dátum: 11. 12. 2022.]
<https://www.youtube.com/watch?v=AO3nrFyCtTQ>
24. Urone P. P., Hinrichs R. 2022. Sound Intensity and Sound Level. [Online] 2023. [Dátum: 9. 8. 2023.] <https://courses.lumenlearning.com/atd-austincc-physics1/chapter/17-3-sound-intensity-and-sound-level/>

25. Baumgarten F. 2022. Aluminium contrabas. [Online] Jar 2022. [Dátum: 10. 9. 2022.]
<https://www.baumgarten.nl/aluminium-double-bass/>
26. Žiaran S. 2006. Znižovanie kmitania a hluku v priemysle, Kmitanie a akustika. Bratislava: STU v Bratislave, 2006. 330 s. ISBN 80-227-2366-5.
27. Kaplanis N., Velzen J. 2012. SPATIAL PERCEPTION IN REAL-LIFE ACOUSTICS: A study of perceptual auditory information of reverberation and its effect in space perception in Musicians and Non-Musicians. [Online] Sept. 2012. [Dátum: 12. 6. 2023.]
https://www.researchgate.net/publication/329943307_SPATIAL_PERCEPTION_IN_REAL-LIFE_ACOUSTICS_A_study_of_perceptual_auditory_information_of_reverberation_and_its_effect_in_space_perception_in_Musicians_and_Non-Musicians
28. EngineeringToolBox.com. 2004. Sound Pressure. [Online] 2004. [Dátum: 12. 6. 2023.]
https://www.engineeringtoolbox.com/sound-pressure-d_711.html
29. Hottinger Brüel & Kjær. 2023. Sound Power and Sound Pressure Explained. [Online] 2023. [Dátum: 18. 6. 2023.] <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/sound/sound-power-sound-pressure>

30. Golden G. 2015. Chapter 14: Sound. Producing a Sound Wave. [Online] 2015. [Dátum: 10. 4. 2023.] <https://slideplayer.com/slide/8957108/>
31. Qsstudy.com. 2023. What is Doppler Effect? [Online] 2023. [Dátum: 17. 5. 2023.] <https://qsstudy.com/what-is-doppler-effect/>
32. Studiosguy.com. 2023. 11 Examples of Doppler Effect in Everyday Life. [Online] 2023. [Dátum: 17. 5. 2023.] <https://studiousguy.com/doppler-effect-examples/>
33. Upjs.sk. 2023. Sluchový zmysel. [Online] 2023. [Dátum: 19. 5. 2023.] <https://www.upjs.sk/public/media/22833/SLUCH.pdf>
34. Balážová K. 2023. Ako funguje ľudské ucho. [Online] 2023. [Dátum: 19. 5. 2023.] <https://audiosvet.wordpress.com/2013/06/30/ako-funguje-ludske-ucho/>
35. Beran V. 2010. Chvění a hluk. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. 202 s. ISBN 978-80-7043-916-6.
36. Healthwise Staff. 2022. Normal vocal cords. [Online] 14.11.2022. [Dátum: 22. 6. 2023.] <https://myhealth.alberta.ca/Health/Pages/conditions.aspx?hwid=zm6118>

37. Healthwise Staff. 2022. Normal vocal cords. [Online] 14.11.2022. [Datum: 22. 6. 2023.] <https://myhealth.alberta.ca/Health/Pages/conditions.aspx?hwid=zm6118>
38. Jahoda R. 2008. Mezi tichem a šumem - komprese zvuku. [Online] 10.9.2008. [Datum: 22. 6. 2023.] <https://www.tvfreak.cz/mezi-tichem-a-sumem-komprese-zvuku/2600-2>
39. SoundBridge, LLC. 2023. Loudness and Level - The Difference. [Online] 2023. [Datum: 28. 6. 2023.] <https://www.soundbridge.io/loudness-level>
40. Van Treuren K., Sanchez, R, Wisniewski, C, & Leitch, P. 2020. Acoustically Testing Stock and Modified UAS Propellers in Both the Near and Far Field. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020. [Online] 2020. [Datum: 28. 6. 2023.] <https://doi.org/10.1115/GT2020-14015>
41. Acoustical Surfaces, Inc. 2018. What is Sound Diffusion (and Absorption)? [Online] 20.12.2018. [Datum: 25. 6. 2023.] <https://www.acousticalsurfaces.com/blog/acoustics-education/what-is-sound-diffusion-and-absorption/>
42. Bernat P. 2005. Akustika, vznik a šíření zvuku frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. [Online] 13.4.2005. [Datum: 20.11. 2022.] http://www.anatomie-varhan.cz/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm

43. Bernat P. 2005. Akustika, vznik a šíření zvuku frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. [Online] 13.4.2005. [Dátum: 20.11. 2022.] http://www.anatomie-varhan.cz/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
44. Alfa Acoustics. 2019. Sound Absorption Coefficient. [Online] 2019. [Dátum: 20.11. 2022.] <https://www.alfaacoustics.com/sound-absorption-coefficient.html>
45. EN ISO 11654. 1997. Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption. Genève: Inter. Organization for Standardization, 1997.
46. Blue Frog Audio. 2021. Room Modes. [Online] 2021. [Dátum: 20.11. 2022.] <http://www.bluefrogaudio.co.uk/room%20modes.html>
47. Tontechnik-Rechner – sengpielaudio. 2023. Room Modes (Sound Pressure Level – SPL). [Online] 2014. [Dátum: 26.3. 2022.] <http://www.sengpielaudio.com/calculator-roommodes.htm>
48. Jensen H. 2015. Modeling Room Acoustics with COMSOL Multiphysics. [Online] 25.2.2015. [Dátum: 26.3. 2022.] <https://www.comsol.com/blogs/modeling-room-acoustics-with-comsol-multiphysics/>

49. Odeon A/S.2021. What is "Room Acoustics"? [Online] 2021. [Dátum: 3.4. 2022.]
<https://odeon.dk/learn/articles/room-acoustics/>
50. Kanev N. 2016. Efficiency factors characterizing sound reflection properties of a room ceiling. *Proc. Mtgs. Acoust.* 11. September 2016; 28 (1): 015007. [Online] 11.9. 2016. [Dátum: 3.4. 2022.] <https://doi.org/10.1121/2.0000326>
51. The Physics Classroom. 1996-2023. Echo vs. Reverberation. [Online] 1996 2023. [Dátum: 12.4. 2022.] <https://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/er.cfm>
52. Harout, T. 2018. What's the difference between echo and reverberation? [Online] 23.3. 2018. [Dátum: 10.4. 2023.] <https://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2018/03/whats-the-difference-between-echo-and-reverberation/>
53. Burda, J. 2017. Tipy, jak na akustiku domácího studia: díl 3. Doba dozvuku. [Online] 1.11. 2017. [Dátum: 12.4. 2023.] <https://magazin.disk.cz/cs/tipy-jak-na-akustiku-domaciho-studia-dil-3-doba-dozvuku>
54. ČSN 73 0527 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely. ČNI Praha, 2005.

55. Konftel.com. 2023. Dr Sound explains the reverb phenomenon. [Online] 2023. [Dátum: 13.6. 2023.] <https://www.konftel.com/en/academy/dr-sound-explains-the-reverb-phenomenon>
56. Vaculík, M. 2007. Priestorová akustika. [Online] 2007. [Dátum: 13.6. 2022.] http://kt.utc.sk/ktam/download/Studijne_materialy/Multimedia/Priestorova_akustika/PRAK01.pdf
57. Russell D. A. 2001. Reverberation in a Small Room. [Online] 2001. [Dátum: 22.6. 2022.] <https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/rt60/rt60.html>
58. Berserkerus. 2008. A signal may be carried by an AM or FM radio wave. [Online] 26.10.2008. [Dátum: 22.6. 2022.] https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_modulation#/media/File:Amfm3-en-de.gif
61. Urbanovská E. 2014. Hluková problematika. [Online] Jún 2014. [Dátum: 22.6. 2023.] <https://slideplayer.cz/slide/2784074/>
62. ISOVER Saint-Gobain. 2023. Akustika izolovanej podlahy. [Online] 2023. [Dátum: 22.9. 2023.] <https://www.isover.sk/zateplenie-podlahy>

61. KNAUF INSULATION. 2023. Zvukovoizolačné vlastnosti. [Online] 2023. [Dátum: 22.6. 2023.] <https://knaufinsulation.sk/rie%C5%A1enie/prie%C4%8Dky/%C4%8Do-by-ste-mali-vedie%C5%A5>
62. Matt. 2017. SIMPLIFYING SOUND REDUCTION: THE BASICS. [Online] 2.10.2017. [Dátum: 22.7.2023.] <https://everkemproducts.com/sound-reduction-soundproofing-basics/#>
63. GUT e.V. 2023. How impact sound is transmitted. [Online] 2023. [Dátum: 29.7.2023.] <https://gut-prodis.eu/en/environment-and-health/noise-sounds>
64. Soundstop.co.uk. 2023. Isosonic Acoustic Ceiling Brackets. [Online] 2023. [Dátum: 29.7.2023.] <https://soundstop.co.uk/products/isosonic-125mm-bracket>
65. Zaťko P. 2007. Požiadavky na zvukovú izoláciu vnútorných deliacich konštrukcií budov. [Online] 22.8.2007. [Dátum: 22.9. 2022.] <https://www.asb.sk/stavebnictvo/realizacia-stavieb/poziadavky-na-zvukovu-izolaciu-vnutornych-deliacich-konstrukcii-budov>
66. STN EN ISO 717-1: 2021. Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť.

67. TZB-Info. 2023. Vážená neprůzvučnost. [Online] 2001-2023. [Dátum: 22.9. 2023.] <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/185-vazena-nepruzvucnost>
68. Medzayová, K. 2020. Pre pohodu užívania priestorov je dôležité tlmenie krokového hluku. [Online] 12.2.2020. [Dátum: 24.9. 2023.] <https://forbi.online/208832/tlmenie-krokoveho-hluku/>
69. Môjdom. 2016. Nemusíte chodiť po špičkách... [Online] 24.1.2016. [Dátum: 24.9. 2023.] <https://mojdom.zoznam.sk/stavba-a-rekonstrukcia/podlaha-dlazba/nemusite-chodit-po-spickach/>
70. NTi Audio. 2023. Building Acoustic Measurements. [Online] 2023. [Dátum: 24.9. 2023.] <https://www.nti-audio.com/en/applications/room-building-acoustics/building-acoustics>
71. STN EN ISO 717-2:2013. Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť.
72. TZB-Info. 2023. Vážená normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku. [Online] 2001-2023. [Dátum: 22.9. 2023.] <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/195-vazena-normovana-hladina-akustickeho-tlaku-krocejoveho-zvuku>