

# mechanické kmitání a vlnění

---

Mgr. Magda Vlachová

# OBSAH

## Mechanické kmitání

Kmitavý pohyb.....	3
Kinematika kmitavého pohybu.....	5
Fáze harmonického pohybu.....	6
Dynamika kmitavého pohybu.....	6
Kyvadlo.....	7
Složené kmitání.....	8
Tlumené kmitání.....	11
Nucené kmitání, rezonance.....	11

## Mechanické vlnění

Vznik a druhy vlnění.....	14
Rovnice postupné vlny.....	15
Interference vlnění.....	16
Odraz vlnění. Stojaté vlnění.....	18
Chvění mechanických soustav.....	20
Šíření vlnění.....	21
Odraz a ohyb vlnění.....	22
Zemětřesení.....	24

## Akustika

Co je to akustika.....	25
Vznik a druhy zvuku.....	26
Šíření zvuku.....	27
Absorpce zvuku.....	27
Odraz zvuku.....	28
Ohyb zvuku.....	29
Vlastnosti zvuku.....	30
Výška.....	30
Barva.....	30
Intenzita zvuku.....	31
Hlasitost.....	31
Infrazvuk, ultrazvuk.....	32
Infrazvuk.....	32
Ultrazvuk.....	33
Základy fyziologické akustiky.....	34
Základy hudební akustiky.....	35
Škodlivé účinky zvuku.....	36
Dopplerův jev.....	36
Rázová vlna.....	38
Literatura.....	39

# Mechanické kmitání

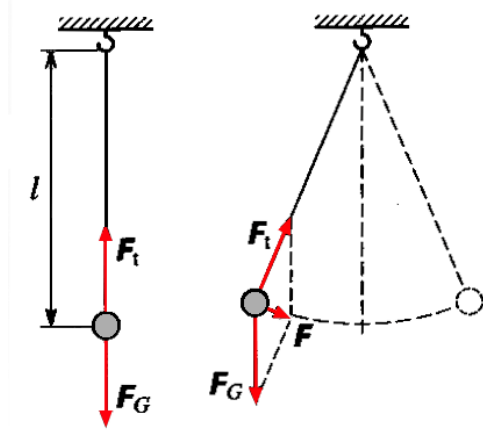
Třetím základním typem pohybu je **kmitavý pohyb** nebo také **mechanické kmitání**. Pro mechanické kmitání je charakteristické, že těleso se při pohybu neustále vrací do tzv. **rovnovážné polohy**. Jestliže těleso tento pohyb koná pravidelně, označujeme ho jako **pohyb periodický** (z řeckého *peri* = okolo a *hodos* = cesta). Periodické pohyby konají např. části chvějící se struny na kytáře, písty spalovacího motoru, kyvadlo nástěnných hodin, srdce při pravidelné srdeční činnosti, blikající maják, závaží na pružině apod.

---

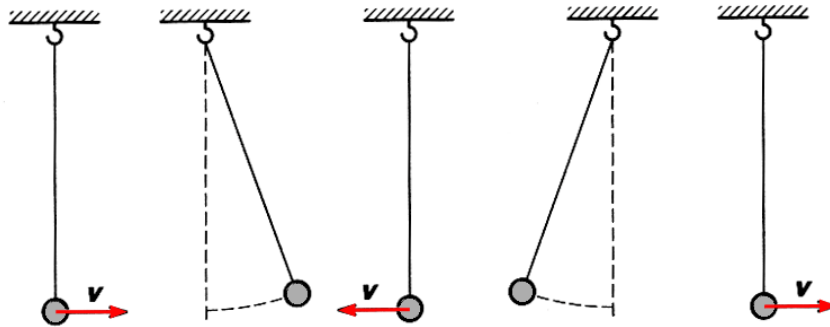
## KMITAVÝ POHYB

---

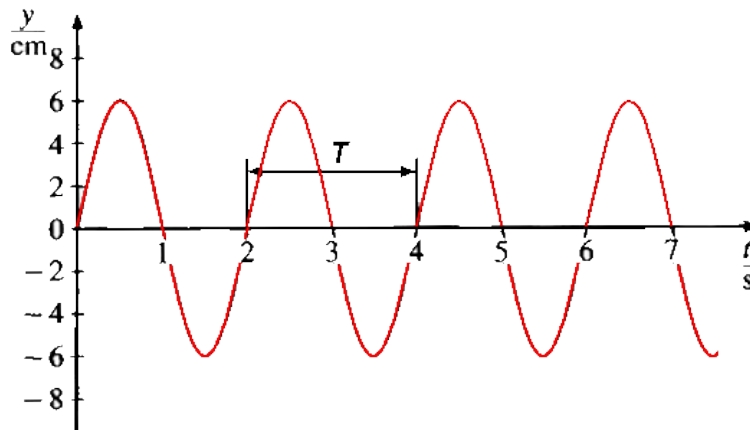
Zařízení, které volně kmitá bez vnější působení se nazývá **mechanický oscilátor**. Jeho kmitání způsobuje buď síla pružnosti nebo tíhová síla. Příkladem mechanického oscilátoru je kulička zavěšená na niti, která představuje **kyvadlo**. Volně zavěšené kyvadlo je v rovnovážné poloze. Při vychýlení z rovnovážné polohy působí na kuličku výsledná síla, která vznikne složením tíhové síly a tahové síly závěsu. Výsledná síla vždy směřuje do rovnovážné polohy.



Kyvadlo se po vychýlení vrací do rovnovážné polohy, kde má největší rychlost a pokračuje dál v pohybu, až dosáhne největší výchylky. Tam se zastaví a vrací se zpět. Odtud je zřejmé, že kmitavý pohyb patří mezi **pohyby nerovnoměrné**. Jestliže kyvadlo prošlo všemi naznačenými polohami, říkáme, že vykonalo jeden **kmit**.



Závislost okamžité polohy kmitajícího tělesa na čase zobrazuje **časový diagram**, kde na ose  $x$  je čas a veličina na ose  $y$  je úměrná okamžité poloze tělesa. Průběh kmitů můžeme sledovat osciloskopem.



Periodický pohyb je charakterizován pravidelným opakováním pohybového stavu tělesa. Nejkratší doba, za kterou dojde k opakování téhož pohybového stavu, je **perioda** ( $T$ ). Počet opakování téhož pohybového stavu za časovou jednotku je **frekvence** nebo-li kmitočet  $f$ .

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

Jednotkou periody je sekunda. Jednotkou frekvence je **hertz** (Hz). Jeden hertz je frekvence periodického pohybu, jehož perioda trvá jednu sekundu. V praxi se častěji používají násobky - kilohertz kHz, megahertz MHz, gigahertz GHz.

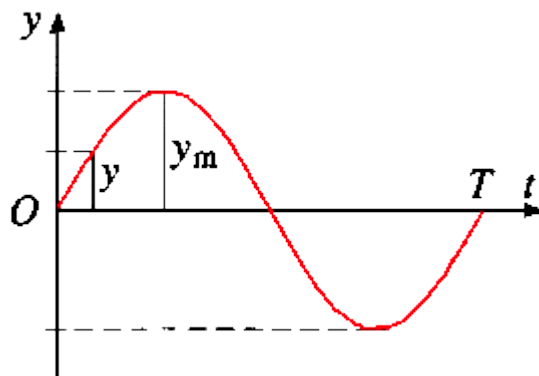
Jako periodický děj můžeme obecně nazvat jakýkoli děj, u něhož se pravidelně opakuje změna libovolné fyzikální veličiny (např. teplota, tlak, elektrické napětí, proud).

### Elektrické kmity

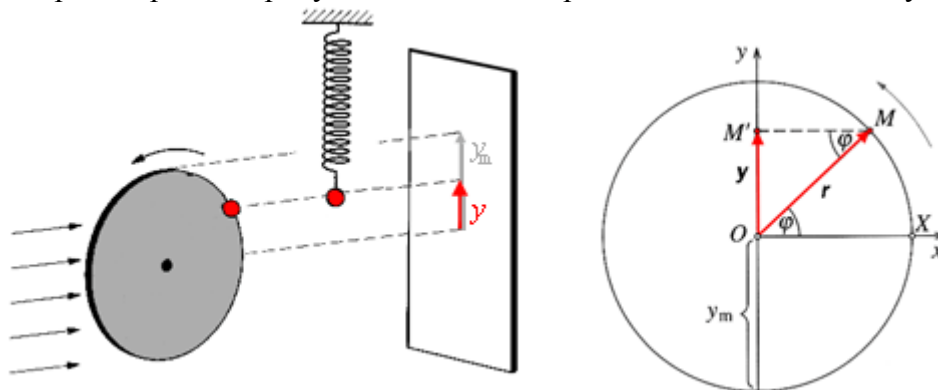
Nejen závaží na pružině koná kmitavý pohyb, ale i elektrické napětí v síti. V elektrické síti se hodnota napětí periodicky mění po každé padesátině sekundy. Má tedy frekvenci 50 Hz. Tuto frekvenci má napětí v rozvodné síti v celé Evropě. V Americe ale mají frekvenci 60 Hz. Otáčejí se generátory v amerických elektrárnách rychleji, nebo pomaleji než v Evropě? Napětí kmitá proto, že v síti je střídavý proud.

# KINEMATIKA KMITAVÉHO POHYBU

Během jednoho kmitu se kulička nepohybuje rovnoměrně. Při přemístování z krajní polohy do polohy rovnovážné koná pohyb zrychlený, při přemístování z rovnovážné polohy do polohy krajní pohyb zpomalený. Rovnovážnou polohou prochází kulička největší rychlostí. V krajních polohách se na okamžik zastaví.



V každém okamžiku můžeme měřit vzdálenost kuličky od rovnovážné polohy, tzv. **okamžitou výchylkou**  $y$ . Největší okamžitá výchylka je **amplituda výchylky**  $y_m$  nebo zkráceně jen amplituda. Z časového diagramu je patrné, že se okamžitá výchylka mění s časem podle funkce sinus. Kmitavý pohyb, jehož časovým diagramem je sinusoida (popř. kosinusoida) se nazývá **harmonický kmitavý pohyb** nebo **harmonické kmitání**. Je to jeden z nejjednodušších kmitavých pohybů. V přírodě i technické praxi mají kmitavé pohyby složitější průběh, nazývají se pak neharmonické. Vztah pro okamžitou výchylku harmonického pohybu můžeme odvodit srovnáním s pohybem po kružnici. Kmitavý pohyb odpovídá průmětu pohybu rovnoměrného po kružnici do svislé roviny.



Promítneme-li celý kmitavý pohyb do kružnice, můžeme pomocí jednoduchých geometrických úvah z obrázku odvodit rovnici pro okamžitou výchylku při harmonickém pohybu.

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

Úhel  $\omega t$  nazýváme **fáze harmonického pohybu** a veličinu  $\omega$  **úhlová frekvence**, pro kterou platí

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

Dále můžeme určit rychlost kmitavého pohybu:

$$v = v_m \cos \omega t$$

Je vidět, že rychlost je také periodickou funkcí času, ale mění se podle funkce kosinus, tj. při nejmenší výchylce je rychlost největší, naopak při největší výchylce je rychlost nejmenší (tedy nulová). Další kinematickou veličinou, kterou můžeme určit, je zrychlení:

$$a = -\omega^2 y_m \sin \omega t = -\omega^2 y$$

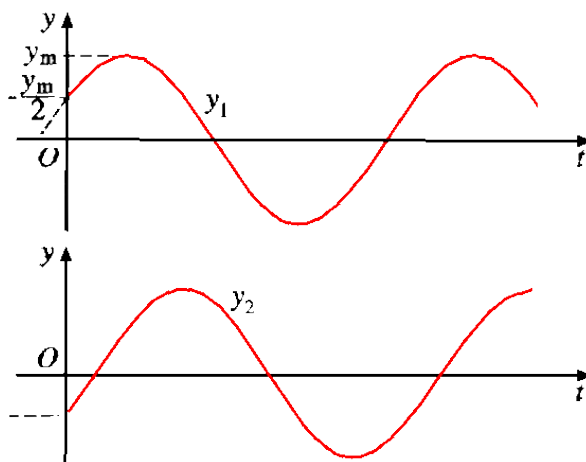
Zrychlení je tedy přímo úměrné okamžité výchylce a v každém okamžiku má opačný směr.

## FÁZE HARMONICKÉHO POHYBU

Vztahy pro okamžitou výchylku, rychlost a zrychlení platí jen tehdy, jestliže měříme od okamžiku, kdy kmitající bod prochází právě rovnovážnou polohou. Často měříme harmonický pohyb od okamžiku, kdy kmitající bod neprochází rovnovážnou polohou. Okamžitou výchylku pak vyjádříme vztahem

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

kde fázi harmonického pohybu představuje výraz  $(\omega t + \varphi_0)$ , přičemž veličinu  $\varphi_0$  nazýváme **počáteční fáze harmonického pohybu**. Tento vztah je pak **obecnou rovnicí** harmonického kmitání.



Počáteční fáze má význam zejména při sledování dvou harmonických pohybů. Např. v autoopravnách se při testování činnosti spalovacího motoru vyšetřuje vzájemný pohyb dvou pístů, přičemž se určuje tzv. **fázový rozdíl**, což je **rozdíl počátečních fází** jejich pohybů. Jsou-li okamžité výchylky dvou harmonických kmitání  $y_1 = y_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$  a  $y_2 = y_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$ , pak fázový rozdíl jejich kmitání  $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ . Důležitý případ je, když:

- je fázový rozdíl roven nule nebo sudému násobku – oba harmonické pohyby mají **stejnou fázi**,
- je fázový rozdíl roven lichému násobku – oba harmonické pohyby mají **opačnou fázi**.

## DYNAMIKA KMITAVÉHO POHYBU

Zabývejme se následující situací: závaží o hmotnosti  $m$  je zavěšeno na pružině a na začátku experimentu se nachází v klidu. Nyní závaží lehce vychýlíme směrem dolů. Naším cílem je matematicky popsat pohyb, který bude závaží vykonávat.

Jestliže se závaží nachází v klidu, výslednice všech sil na něj působících je nulová. Působící síly jsou tíhová síla  $F_G$  (směr svisle dolů) a síla  $F_p$ , kterou působí na závaží pružina (směr svisle vzhůru). Pokud je hmotnost závaží taková, že deformace pružiny je vratná (tento předpoklad lze snadno ověřit změřením délek nezátížené pružiny před zavěšením závaží a po jeho sejmutí), lze na základě platnosti Hookova zákona tvrdit, že  $F_p = -ky$ , kde  $k$  je konstanta nazývaná **tuhost pružiny**. Závisí na tloušťce pružinového drátu, na materiálu, z něhož je vyroben a na průměru pružiny. Podle druhého Newtonova zákona však platí  $F = ma$ , kde  $a$  je zrychlení. Zrychlení kmitavého pohybu vyjádříme ve tvaru  $a = -\omega^2 y$ . Po dosazení a porovnání

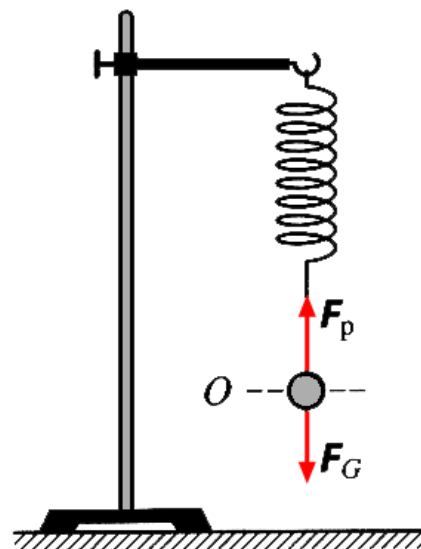
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Po dosazení za úhlovou frekvenci  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  dostaneme

pro periodu a frekvenci vztahy

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Odtud jasně plyne, že frekvence a perioda závisí jen na hmotnosti kmitajícího bodu a tuhosti pružiny, nikoli na velikosti tíhového zrychlení.



## KYVADLO

Kyvadlo sehrálo významnou úlohu v historii měření času jako jednoduché zařízení, jehož periodu kmitání lze snadno a poměrně přesně nastavit změnou jediného parametru, kterým je délka kyvadla. Konstrukcí mechanismu kyvadlových hodin proslul holandský fyzik **Christian Huygens**.

Kyvadlem může být každé tuhé těleso otáčivé kolem vodorovné osy umístěné nad jeho těžištěm. Kmitavý pohyb kyvadel, které mají různý tvar a hmotnost, je poměrně složitý. Proto zavedeme jednoduchý model kyvadla, kterým je **matematické kyvadlo**.

Matematické kyvadlo si představujeme jako hmotný bod zavěšený na konci pevného vlákna zanedbatelné hmotnosti. Přibližně ho realizujeme zavěšením malé těžší kuličky na tenkou pevnou nit, jejíž hmotnost je zanedbatelně malá vzhledem k hmotnosti kuličky. Pro frekvenci a periodu kmitání matematického kyvadla platí:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Frekvence a perioda harmonického pohybu matematického kyvadla závisí na délce jeho závěsu a na velikosti tíhového zrychlení v daném místě. Nezávisí však na hmotnosti kyvadla ani na jeho rozkyvu (jen pokud je úhel rozkyvu malý). Tuto zákonitost objevil již **Galileo Galilei** při pozorování lustrů v chrámu během bohoslužeb. Potvrdil to pak pokusem se stejně dlouhými

kyvadly, jejichž duté kuličky byly z různých látek, ale měly stejný objem (aby byl odpor vzduchu stále stejný). Všechna kyvadla kývala souhlasně.

Místo periody neboli doby kmitu  $T$  se častěji používá **doba kyvu**  $\tau$ , která se rovná polovině jeho doby kmitu. Proto doba kyvu  $\tau = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ .

Reálná kyvadla používaná v praxi jsou **kyvadla fyzická**. Periodu fyzického kyvadla určujeme měřením. Mezi další druhy kyvadel patří např.

- **sférické kyvadlo**: kývá současně ve dvou směrech, koná kruhové nebo eliptické kmity.
- **reversní kyvadlo**: je kyvadlo se dvěma rovnoběžnými osami, které jsou nesouměrně položeny vzhledem k těžišti a pro něž je doba kyvu kyvadla stejná.
- **balistické kyvadlo**: používá se k balistickým měřením.
- **Foucaultovo kyvadlo**

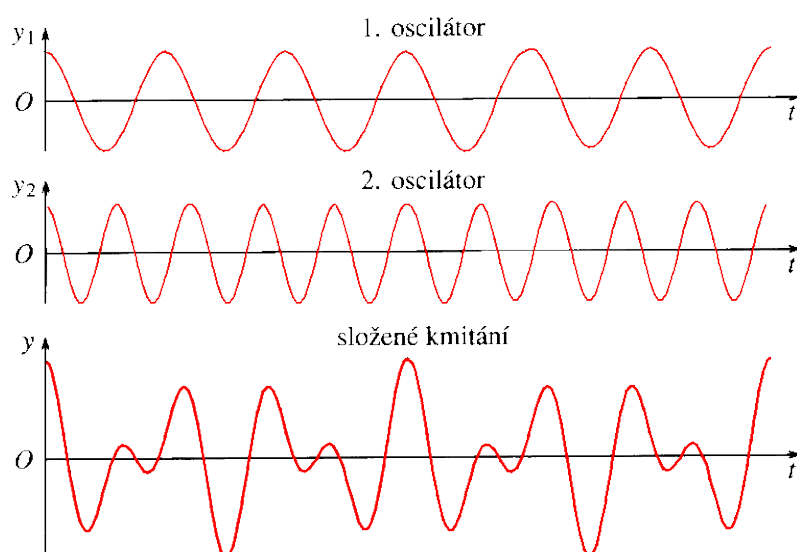
## SLOŽENÉ KMITÁNÍ

Působí-li na mechanický oscilátor současně dvě síly, z nichž každá může vyvolat samostatný harmonický pohyb oscilátoru, oba pohyby se skládají a vzniká výsledný pohyb, který nazýváme **složené kmitání**.

Složené kmitání může mít různý průběh. V jednoduchých případech má průběh harmonický, v ostatních případech neharmonický, i když oba skládané pohyby jsou harmonické.

Dva oscilátory (kuličku na pružině) spojíme za sebe. Vychýlíme-li tuto soustavu z rovnovážné polohy, pak se dolní oscilátor rozkmitá jednak působením pružné síly vlastní pružiny, jednak kmitáním horního oscilátoru.

Mají-li oba oscilátory stejné parametry (stejně těžkou kuličku, stejnou tuhost pružiny), pak harmonické kmitání obou oscilátorů má stejnou frekvenci a výsledné kmitání je rovněž harmonické. Při nestejných parametrech oscilátorů je jejich frekvence různá a výsledné kmitání je sice periodické, ale nikoli harmonické.



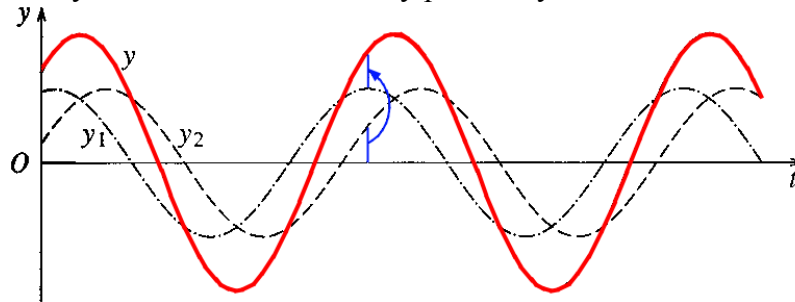
Zjišťování výsledného kmitání matematickými postupy je poměrně složité, zvláště při různých frekvencích, amplitudách a počátečních fázích skládaných harmonických pohybů. Obecně platí



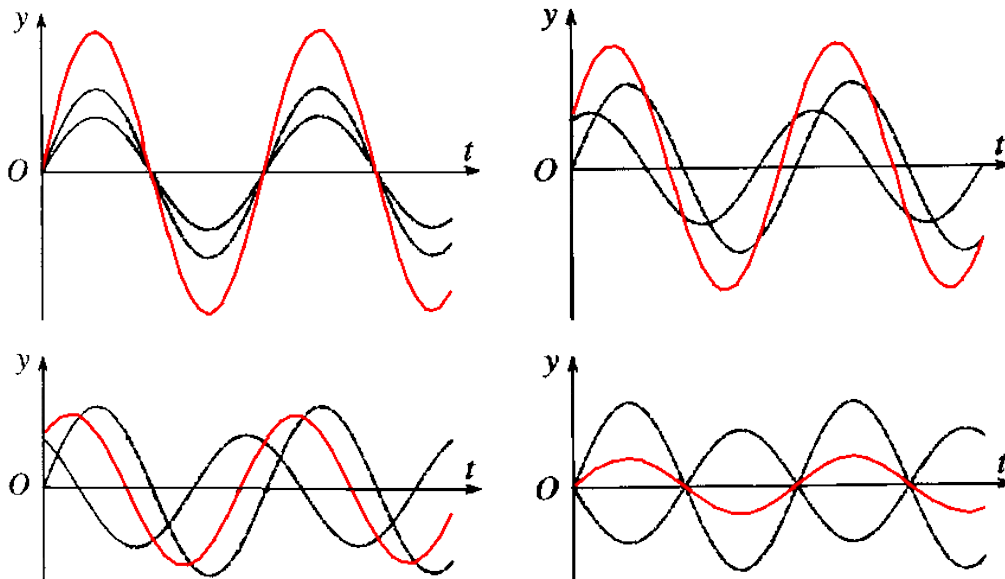
**princip superpozice:** Koná-li hmotný bod současně dva nebo více harmonických pohybů v jedné přímce s okamžitými výchylkami  $y_1, y_2, \dots$ , je okamžitá výchylka výsledného kmitání

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

Na principu superpozice je založeno **grafické skládání harmonických pohybů**. V časovém rozvinutí dvou harmonických pohybů postupně sčítáme, popř. odečítáme jejich okamžité výchylky v jednotlivých časových okamžicích, čímž dostaneme okamžité výchylky výsledného pohybu. Spojením jejich koncových bodů obdržíme časový průběh výsledného kmitání.

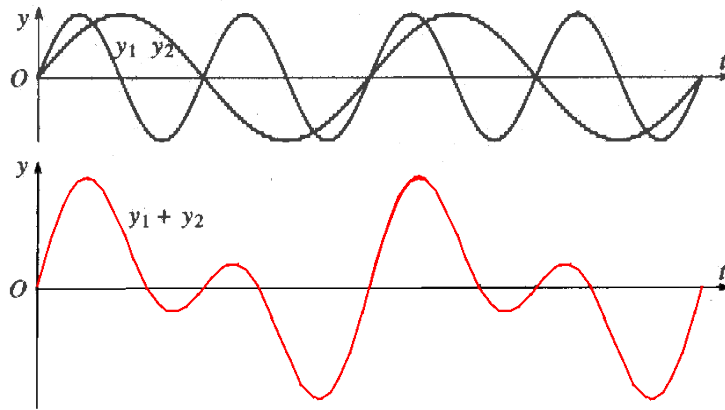


Skládáním dvou harmonických kmitání stejného směru a o stejné frekvenci vzniká opět harmonické kmitání téže frekvence. Jeho amplituda závisí na fázovém rozdílu složek.

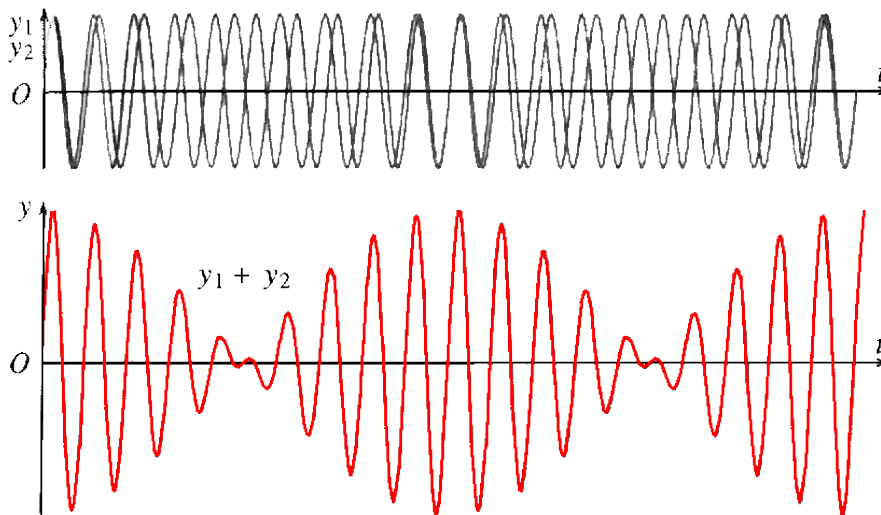


Jestliže poměr frekvencí nebo period je roven 1 je výsledný kmitavý pohyb harmonický. Jestliže fázový rozdíl  $\Delta\varphi = 0$ , tzn. při stejné počáteční fázi obou složek), je amplituda složeného kmitání největší. Složené kmitání má stejnou počáteční fázi jako složky. Je-li fázový rozdíl  $\Delta\varphi = \pi$ , tj. při opačné fázi obou složek, pak je amplituda výsledného kmitání nejmenší. Složené kmitání má stejnou počáteční fázi jako složka s větší amplitudou. V případě stejných amplitud je výchylka nulová a kmitání zaniká.

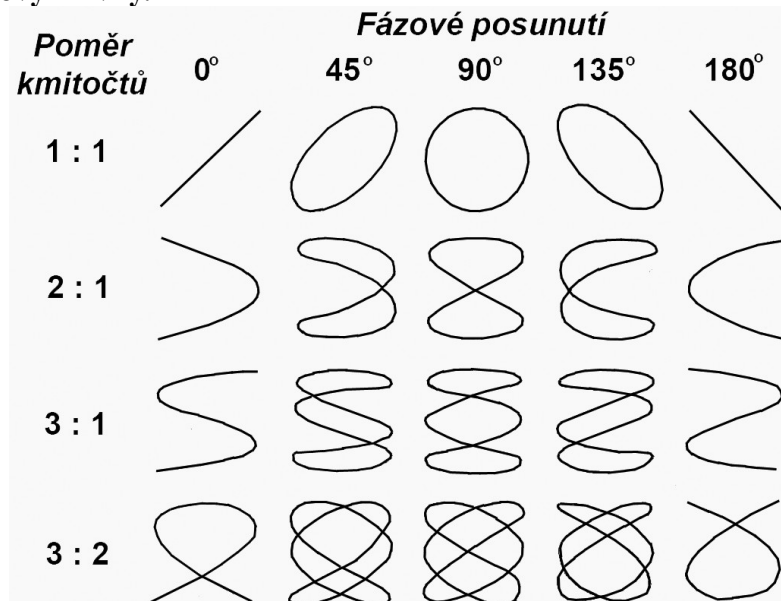
Superpozicí kmitání různé frekvence, tzn. když  $f_1 \neq f_2$ , vzniká složené kmitání, které není harmonické. Kmitání však může být periodické a to v případě, že v poměru jejich period, popř. frekvencí, jsou celá čísla. Na následujícím obrázku jsou dvě kmitání s poměrem frekvencí 1:2.



Zvláštní případ nastává, když se úhlové frekvence složek velmi málo liší. Z dalšího obrázku je patrné, že amplituda výsledného kmitání se periodicky zvětšuje a zmenšuje. Vzniká složené kmitání, které nazýváme **rázy** neboli **zázněje**. Amplituda rázů se mění s frekvencí  $f = f_1 - f_2$ . To znamená, že při postupném přibližování frekvencí obou kmitání se frekvence rázů zmenšuje. Pro  $f_1 = f_2$  rázy zaniknou. Rázy jsou velmi citlivým indikátorem pro sladění dvou současně znějících tónů. Vymizí-li rázy, jsou oba tóny dokonale sladěny.

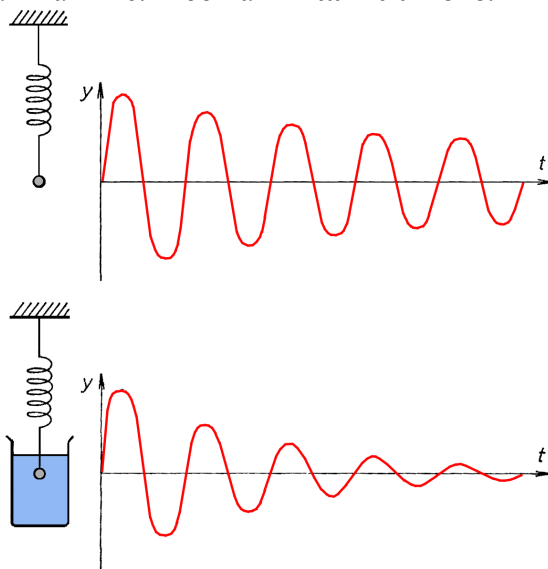


Jestliže se kmity dějí v přímkách navzájem kolmých a frekvence  $f$  jsou v poměru celých čísel, vznikají **Lissajousovy křivky**.



## TLUMENÉ KMITÁNÍ

Kmitání, které by probíhalo neomezeně dlouho beze změn své amplitudy, se nazývá **kmitání netlumené**. Ze zkušenosti však víme, že amplituda výchylky mnohých kmitavých pohybů se postupně zmenšuje, až kmitání zanikne. Probíhá **kmitání tlumené**.



Příčinou tlumeného kmitání oscilátoru jsou síly, které vznikají v samotném oscilátoru (při deformaci pružných částí oscilátoru), při styku s prostředím (odporová síla prostředí). V obou případech se část mechanické energie oscilátoru postupně mění ve vnitřní energii oscilátoru a prostředí, čímž se oscilátor i prostředí v jeho nejbližším okolí zahřívá. Kromě amplitudy se zmenšuje i perioda kmitání.

Kdybychom kmitající kuličku ponořili do různých prostředí, tak může dojít k následujícím jevům

- **aperiodický přetlumený pohyb**, kdy těleso nepřejde přes rovnovážnou polohu.
- **kritický tlumený aperiodický pohyb**, kdy těleso dojde do rovnovážné polohy
- **tlumený periodický kmitavý pohyb**.

Tlumením se omezují např. nepříznivé účinky kmitavých pohybů, např. kmitání kol automobilů při jízdě na nerovném terénu – tlumiče pérování, kmitavý pohyb ruček měřících přístrojů apod.

## NUCENÉ KMITÁNÍ, REZONANCE

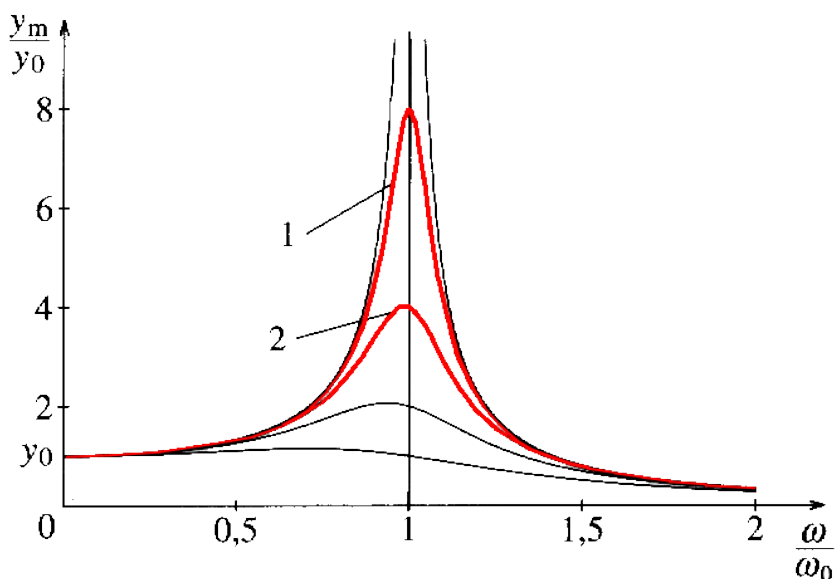
Aby kmitání oscilátoru bylo netlumené, je nutné mu dodávat rozdíl energií z vnějšího zdroje. Příkladem mohou být nástěnné hodiny, dětská houpačka. Jestliže chceme, aby se houpačka stále houpala, musíme při každém kmitu působit silou ve směru houpání nebo pravidelně měnit polohu těžiště těla. Svou silou nahrazujeme ztrátu energie, kterou způsobují odporové síly. Houpačku nutíme k houpání, hovoříme proto o **kmitání nuceném**.

Při rozhoupávání houpačky si můžeme všimnout, že při nevhodně voleném silovém působení (co do okamžiku, velikosti, směru) nedosáhneme konstantní amplitudy výchylky. Může se stát, že budeme působit silou v jiném směru než se houpe houpačka. Houpačka se buď rozhoupe s velkými amplitudami, nebo se naopak zastaví. **Nucené kmitání může mít různý průběh, podle toho, jakým způsobem je mu energie zvnějšku dodávána.**

Má-li být nucené kmitání oscilátoru harmonické, musí mít harmonický průběh i vnější síly, která na oscilátor působí. **Vnější síla, která udržuje netlumené harmonické kmitání oscilátoru, je periodickou funkcí času.**

Pokud se úhlová frekvence zdroje energie výrazně liší od úhlové frekvence oscilátoru, je účinek vnější síly na amplitudu výchylky nuceného kmitání jen velmi malý.

Pokud se úhlová frekvence zdroje energie liší jen málo od úhlové frekvence oscilátoru, amplituda výchylky nuceného kmitání se postupně zvětšuje. Největší je při stejných úhlových frekvencích. Dochází k jevu, který se nazývá **rezonance oscilátoru**. Vše je znázorněno tzv. **rezonanční křivkou**. Z jejího tvaru můžeme dobře usuzovat na celkové vlastnosti oscilátoru. Poloha maxima křivky určuje **rezonanční frekvenci** oscilátoru a tvar křivky je značně ovlivněn tlumením. Ostré maximum charakterizuje oscilátor s malým tlumením (1), kdežto oscilátor s větším tlumením má rezonanční křivku s méně výrazným maximem (2).



Při rezonanci dochází k největšímu přenosu mechanické energie na oscilátor. Proto lze při rezonanci vyvolat i poměrně malou vnější silou velké amplitudy – např. malou silou rozhoupeme i velmi těžký zvon, budeme-li tahat za lano od zvonu v pravidelných časových intervalech, odpovídajících frekvenci jeho vlastního kmitání.

Velký význam má rezonance u hudebních nástrojů a v reprodukční zvukové technice. Např. mechanické kmitání strun kytary se přenáší na celé těleso kytary, které pak rezonuje v širokém intervalu frekvencí, čímž se zesilují zvuky. Stejnou funkci mají těla dalších strunných hudebních nástrojů. Zvuky reprodukováné hudby jsou výrazně zesilovány bednami v nichž jsou zabudované reproduktorové soustavy. Mnohem větší praktický význam má rezonance elektrických kmitů, na níž je založena většina zařízení pro bezdrátovou komunikaci.

Závažný dopad má rezonanční kmitání mostů a vysokých budov, které vzniká větry a zemětřeseními. Rezonanci velkých budov se věnuje velká pozornost od události zřícení mostu Tacoma Narrows Bridge 7. listopadu 1940. Nové velké budovy jsou konstruovány s ohledem na rezonanci a starší budovy (most Golden Gate Bridge) byly dodatečně modifikovány. Budovy se např. konstruují tak, aby se vlastní frekvence jejich úseků lišily a nedocházelo k rozkmitání velkých celků, komponují se do nich statické pohlcovače kmitů.

V roce 1850 způsobila rezonance dokonce zřícení celého mostu v jednom **francouzském městě**. Po mostě tehdy pochodovala vojenská jednotka a její pravidelný krok byl v rezonanci s vlastní frekvencí mostu. Vojáci svým krokem rozhoupali most natolik, že to jeho konstrukce nevydržela a praskla. Zahynulo přitom 219 lidí.

V technické praxi se přihlíží k rezonanci např. při konstrukci továrních hal, strojů a jejich podstavců, trupů letadel, které by se mohly dostat do rezonance s kmitáním vyvolaným chodem motorů apod.

Při konstrukci turbín se používají tzv. pružné hřídele. Jakmile se turbína roztáčí, existuje tzv. kritická hodnota otáček, při kterých dochází k rezonanci s vlastními kmity turbíny (tj. kmity, kdy turbína bude volně upevněna a rozkmitána). Proto je nutné rychle zvýšit otáčky přes tuto hodnotu.

# Mechanické vlnění

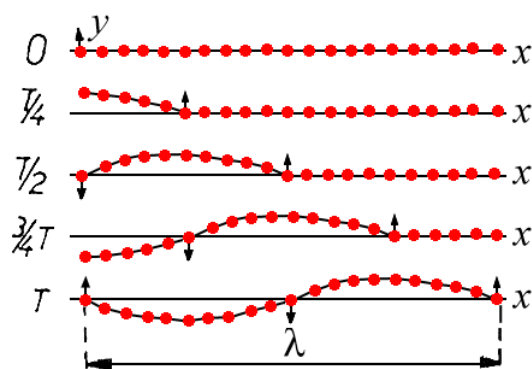
Vlnění je nejrozšířenějším druhem pohybu v přírodě. S vlněním se setkáváme v podobě zvuku, světla, rozhlasového či televizního vysílání atd. Vlnění mají různou fyzikální podstatu. V přírodě se můžeme setkat s těmito druhy vln: mechanické, elektromagnetické a de Broglieho.

## VZNIK A DRUHY VLNĚNÍ

Vhodíme-li na klidnou vodní hladinu rybníka kámen, hladina se jeho dopadem rozkmitá a z místa rozruchu se začnou šířit kruhové vlny. Vzniklo vlnění.

**Šíření kmitavého rozruchu prostředím se nazývá vlnění. Vlněním se přenáší pouze energie, částice kmitají,** ale nepřemísťují se ve směru šíření vlnění. Místo, z něhož se rozruch šíří, je **zdroj vlnění**. Důkazem je např. plovoucí listí na rozvlněné hladině vody. Po hladině se sice šíří vlny, ale listí zůstává na místě (platí to samozřejmě jen pro malé vlnky).

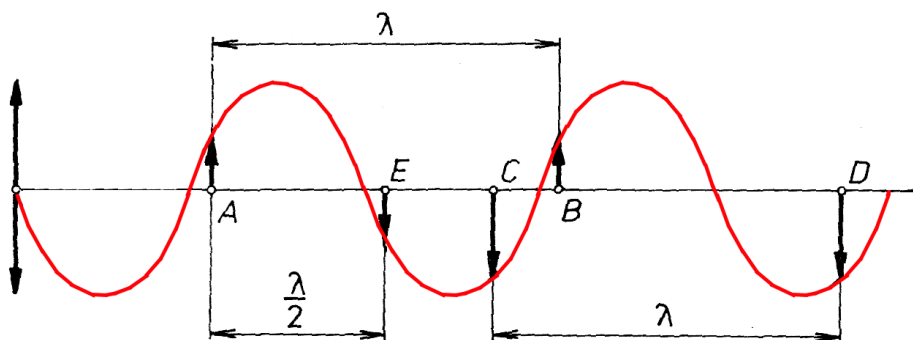
Příčinou mechanického vlnění je existence vazeb mezi částicemi (atomy, molekulami) prostředí, kterým se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na další částici. Současně se na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí označujeme jako **pružné prostředí** (v kapalině, pevné látce i plynu, tj. v látkách, kde mezi částicemi existují vazby). Jakmile je vazba porušena – jedna částice se vychýlí z rovnovážné polohy, postupně rozkmitá další a další částice prostředí. Říkáme, že se prostředím šíří **postupné vlnění**. Pro zjednodušení se budeme zabývat vlněním, které se šíří jen v jednom směru. Jednotlivé částice si představíme jako řadu bodů vzájemně vázaných pružnými silami. Při postupném vlnění se pohybují všechny částice prostředí. Každá z nich dosahuje postupně amplitudy výchylky a pak je zase v určitém okamžiku v klidu.



Mechanické vlnění se šíří jen pružným prostředím a jeho rychlost ( $v$ ) závisí na prostředí. Dráhu, kterou vlnění proběhne za jednu periodu ( $T$ ), nazveme **vlnová délka** ( $\lambda$ ). Vlnová délka je obecně **vzdálenost kterýchkoli dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází**. Body ve vzdálenosti  $\lambda/2$  kmitají s **opačnou** fází. Platí pro ni obdoba vztahu pro dráhu rovnoměrného přímočarého pohybu  $s = v \cdot t$

$$\lambda = cT \text{ nebo } \lambda = \frac{c}{f}.$$

Kde  $f$  je frekvence vlnění, což je frekvence kmitání jak počátečního bodu řady, tak všech ostatních bodů řady, k nimž kmitavý rozruch dospěje.



Postupné vlnění je dvojího druhu podle toho, jakým směrem kmitají jednotlivé částice vzhledem ke směru šíření vlnění:

- kolmo na směr šíření vlnění - **příčné vlnění** (v prostředích, kde vznikají pružné síly při změně tvaru tělesa - v pevných látkách a na hladině kapalin)
- směr výchylky je rovnoběžný se směrem vlnění, prostředí se zhušťuje a zředňuje **vlnění podélné** (v prostředích, kde vznikají pružné síly při změně objemu - v plynech, pevných látkách i kapalinách). Podélné vlnění charakterizujeme **zhuštěním** a **zředěním** částic v bodové řadě. Protože jsou amplitudy výchylek jednotlivých částic velmi malé a jejich směr splývá se směrem šíření vlnění, není většinou podélné vlnění přímo pozorovatelné, např. šíření zvuku ve vzduchu.

---

## ROVNICE POSTUPNÉ VLNY

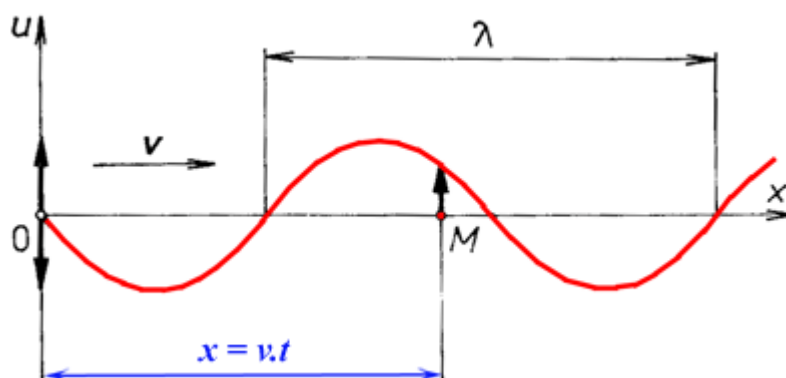
---

Uvažujme opět řadu bodů, jejíž počáteční bod uvedeme do kmitavého pohybu. Je-li jeho kmitání harmonické, mění se okamžitá výchylka  $y$  v závislosti na čase  $t$  podle vztahu

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

kde  $y_m$  je amplituda výchylky a  $\omega$  úhlová frekvence kmitání.

Jsou-li částice bodové řady vzájemně vázány pružnými silami, kmitání se přenáší od počátečního bodu postupně na další částice a bodovou řadou se šíří postupné vlnění.



Do určitého bodu  $M$  bodové řady, který leží ve vzdálenosti  $x$  od počátečního bodu  $0$ , dospěje vlnění při rychlosti  $v$  za dobu  $t = \frac{x}{v}$ . O tuto dobu začne bod  $M$  kmitat později než počáteční bod  $0$ . Proto okamžitá výchylka bodu  $M$  je

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

Dostáváme rovnici postupné vlny, která vyjadřuje závislost okamžité výchylky libovolné kmitající částice bodové řady jednak na čase  $t$ , který měříme od okamžiku průchodu počátečního bodu řady rovnovážnou polohou, jednak na vzdálenosti  $x$  částice od počátečního bodu, který je zdrojem vlnění. **Okamžitá výchylka částice bodové řady je funkcí dvou proměnných: času a vzdálenosti místa od zdroje vlnění.** Proto říkáme, že postupné vlnění je periodický děj v prostoru a čase.

Dosadíme-li do rovnice  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  a  $vT = \lambda$ , dostáváme rovnici postupné vlny ve tvaru:

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

Obě rovnice pro okamžitou výchylku platí jak pro postupné vlnění příčné, tak pro postupné vlnění podélné.

---

## INTERFERENCE VLNĚNÍ

---

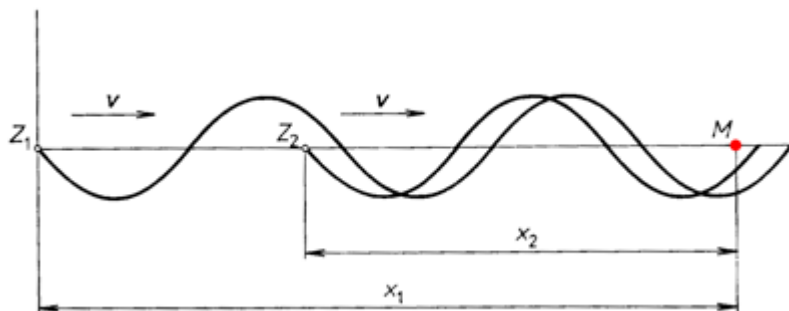
Co se stane, spadnou-li na hladinu současně dva kameny? Vzniknou dvě kruhové vlny, které se navzájem překrývají. Při svém pohybu se však neovlivňují a šíří se navzájem nezávisle. V místech, kde se vlny překrývají, však pozorujeme, že má amplituda jednotlivých vln různou velikost. Přitom některá místa vodní hladiny kmitají se zvětšenou amplitudou výchylky, zatímco jiná místa zůstávají téměř v klidu. Je to způsobeno tím, že obě vlnění se při vzájemném setkání skládají v jediné vlnění výsledné. Děj, při kterém dochází ke skládání dvou nebo více vlnění, nazýváme **interference vlnění**.

Kmitání jednotlivých míst pružného prostředí, v nichž vlnění interferují se řídí **principem superpozice**. Okamžitá výchylka výsledného kmitání určitého bodu prostředí se rovná součtu okamžitých výchylek kmitání způsobených šířením jednotlivých vlnění. Proto se mohou vlnění interferencí zesilovat nebo zeslabovat či dokonce navzájem zcela rušit. Vznikají tzv. **interferenční maxima a minima**, jejichž rozmístění v pružném prostředí závisí na vlastnostech skládaných vlnění a na vzdálenostech zdrojů vlnění.



Stálé rozmístění interferenčních maxim a minim nastává při skládání dvou vlnění stejné frekvence a s konstantním fázovým rozdílem kmitání jejich zdrojů. Taková dvě vlnění se nazývají **vlnění koherentní** (z latinského cohaere = souviset). Nejsou-li vlnění koherentní, interferenční jev nepozorujeme.

Nejjednodušší případ interference vlnění nastává skládáním dvou postupných příčných vlnění o stejné amplitudě výchylky  $y_m$  a stejné frekvenci  $\omega$ , která se šíří stejnou rychlostí  $v$  v téže bodové řadě týmž směrem.



Uvažujme bod  $M$ , do něhož dospějí dvě příčná vlnění ze zdrojů  $Z_1$  a  $Z_2$ . Jsou-li  $x_1$  a  $x_2$  vzdálenosti těchto zdrojů od bodu  $M$ , pak okamžité výchylky obou vlnění v bodě  $M$  jsou

$$y_1 = y_m \sin \omega \left( t - \frac{x_1}{v} \right) \quad y_2 = y_m \sin \omega \left( t - \frac{x_2}{v} \right)$$

Při stejném směru okamžitých výchylek, tj. při stejném směru kmitání bodu  $M$  je výsledná okamžitá výchylka  $y = y_1 + y_2$ .

Protože pro okamžité výchylky bodu  $M$  můžeme psát také vztahy ve tvaru

$$y_1 = y_m \sin(\omega t + \varphi_1) \quad y_2 = y_m \sin(\omega t + \varphi_2)$$

počáteční fáze kmitání bodu  $M$  jsou

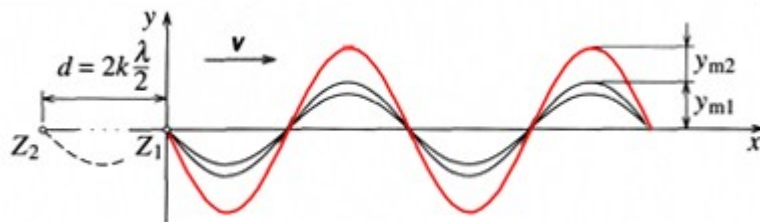
$$\varphi_1 = -\frac{\omega x_1}{v} \quad \varphi_2 = -\frac{\omega x_2}{v}$$

Fázový rozdíl obou kmitání je pak

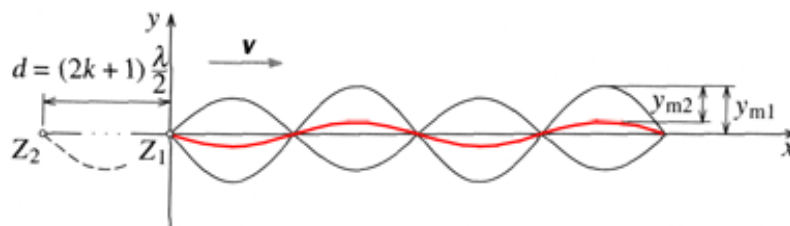
$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\omega}{v}(x_1 - x_2) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 - x_2)$$

kde výraz  $x_1 - x_2 = \Delta x$  je tzv. **dráhový rozdíl** vlnění. Je-li dráhový rozdíl delta  $x$  dvou vlnění

- $\lambda, 2\lambda, 3\lambda$ , obecně  $2k \frac{\lambda}{2}$ , tj. rovná-li se sudému počtu půlvln, je výsledná amplituda složeného vlnění **maximální** a rovná se hodnotě  $2y_m$

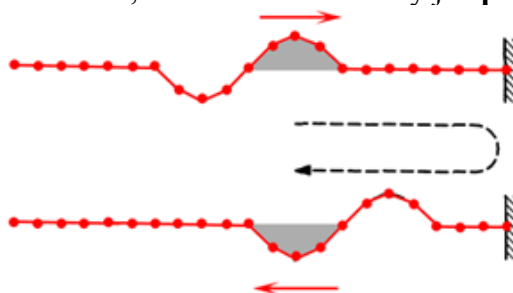


- $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}$ , obecně  $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , tj. rovná-li se lichému počtu půlvln, je výsledná amplituda nulová a obě vlnění se **navzájem ruší**.

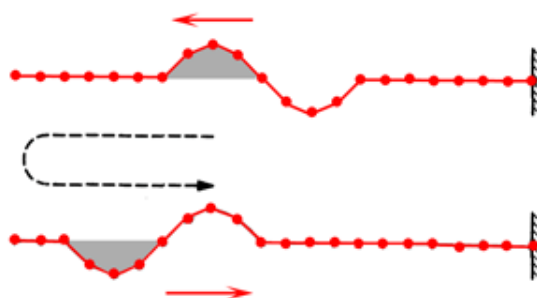


## ODRAZ VLNĚNÍ. STOJATÉ VLNĚNÍ

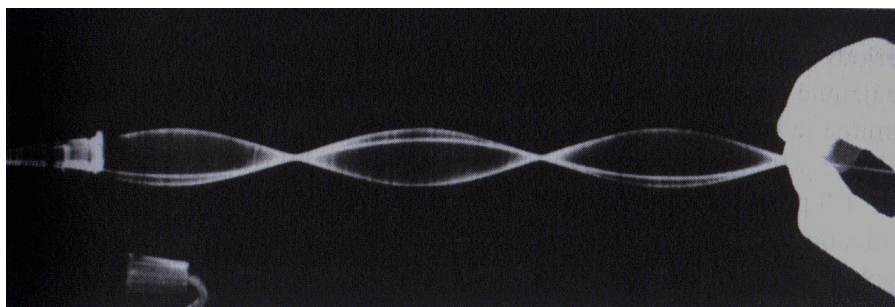
Velmi důležitý a zajímavý jev nastane, dorazí-li vlna na konec řady bodů. Na konci se odráží a postupuje opačným směrem zpět. Na konci nastal **odraz vlnění**. Jestliže k pevnému konci dospěl nejdříve vrch vlny a po něm důl, pak po odrazu je situace opačná. Nejdříve postupuje důl odražené vlny a teprve pak její vrch. Můžeme říct, že **fáze** odražené vlny je **opačná**.



Jiný průběh má odraz vlnění v případě, že konec vlny není upevněn, tzn. je volný. Na rozdíl od předchozího případu odraz probíhá tak, že **fáze odražené vlny je stejná** jako fáze vlny před odrazem.

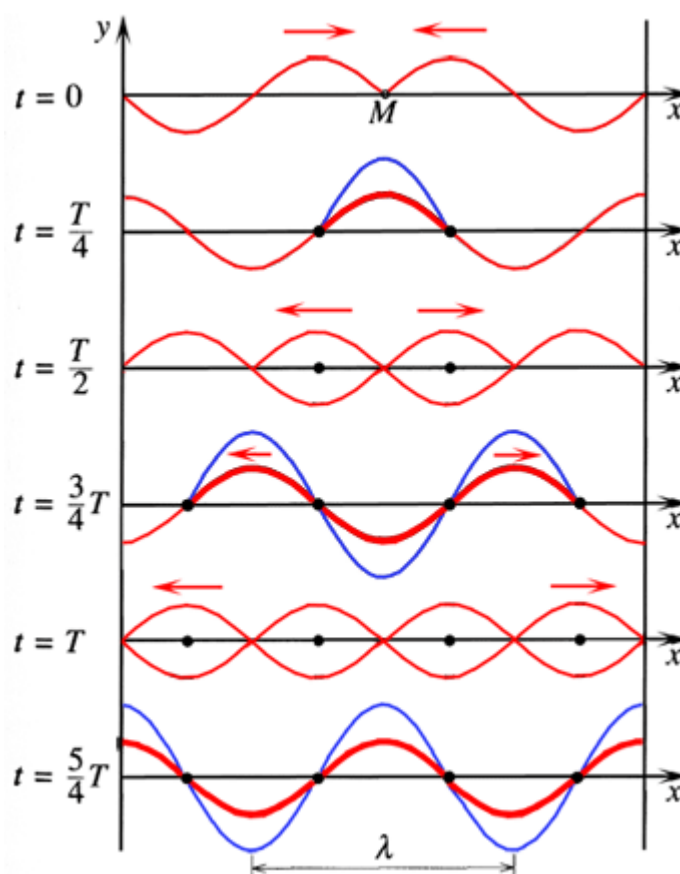


Jestliže jeden konec pružného vlákna trvale harmonicky kmitá, postupuje vlnění ke druhému konci, tam se odráží a postupuje opačným směrem, tzn. zpět ke zdroji vlnění. Nastává zajímavý a velmi důležitý případ, kdy interferují dvě stejná vlnění – přímé a odražené, která postupují stejnou rychlostí opačnými směry. Na rozdíl od postupného vlnění, kdy všechny body postupně kmitají se stejnou amplitudou, v tomto případě je amplituda jednotlivých bodů kmitajícího vlákna různá. Některé body vlákna dokonce zůstávají trvale v klidu. Průběh vlnění na vlákne vytváří dojem ustáleného stavu, jako by vlna na vlákne stála a nepohybovala se. Tento zvláštní druh vlnění označujeme jako **stojaté vlnění**.



Vznik stojatého vlnění si objasníme grafickou superpozicí dvou stejných vlnění postupujících opačným směrem proti sobě. Vidíme, že bod  $M$  a také všechny další body vzdálené od něho o celistvé násobky poloviny vlnové délky kmitají s největší amplitudou. V těchto bodech vzniká **kmitna stojatého vlnění**.

Naopak body, jejichž amplituda výchylky je nulová, zůstávají trvale v klidu. V těchto bodech vznikají **uzly**.



I když stojaté vlnění vzniká skládáním dvou vlnění postupných, liší se od postupného vlnění několika vlastnostmi:

Postupné vlnění	Stojaté vlnění
postupně všechny body řady kmitají se stejnou amplitudou výchylky	body kmitají s různými amplitudami výchylky
body řady kmitají s různým fázovým zpožděním, tzn. že každý další bod řady dosáhne největší výchylky "o něco později" než bod předcházející	body ležící mezi dvěma sousedními uzly kmitají se stejnou fází
žádný bod řady není trvale v klidu	existují body, které jsou trvale v klidu (uzly) a body, které trvale kmitají s maximální

Stojaté vlnění může být podélné i příčné. Typické příklady si můžeme ukázat u hudebních nástrojů:

- **příčné vlnění stojaté** vzniká u strunných nástrojů (housle, kytara), zdrojem zvuku je příčné stojaté vlnění struny.
- **podélné stojaté vlnění** vzniká rozechvíváním vzduchových sloupců u dechových nástrojů (trubka, klarinet). Podobně jako u příčného stojatého vlnění existují i zde body s maximální a minimální amplitudou výchylky, tj. kmitny a uzly, jenže v případě podélného stojatého vlnění kmitají částice vzduchu ve směru podélné osy vzduchového sloupce, tj. ve směru obou postupných vlnění, jejichž složením stojaté vlnění vzniká. Podélné stojaté vlnění neboli chvění vzduchových sloupců je zdrojem tónů u dechových hudebních nástrojů.

## CHVĚNÍ MECHANICKÝCH SOUSTAV

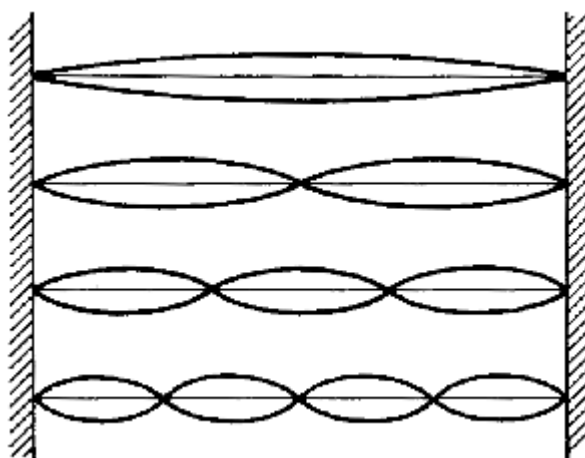
Příčné stojaté vlnění můžeme pozorovat u napjaté struny nebo napjatého vlákna. V tomto případě mluvíme o **chvění**. Chvění struny probíhá obvykle tak, že na koncích struny jsou uzly a mezi nimi jedna nebo více kmiten. Označíme-li  $k$  počet kmiten na struně, pak její délka

$$l = k \frac{\lambda}{2},$$

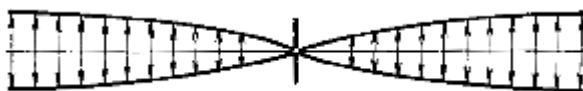
kde  $\lambda$  je vlnová délka stojatého vlnění. Dosadíme-li pro vlnovou délku  $\lambda = \frac{v}{f}$ , kde  $v$  je rychlost šíření vlnění ve struně a  $f$  frekvence chvění struny, dostaneme po úpravě

$$f = k \frac{v}{2l}.$$

Frekvence chvění struny a tím také frekvence znějícího tónu, který struna vydává, je určena počtem půlvln stojatého vlnění na struně. Pro  $k = 1$  je  $f_z = \frac{v}{2l}$ , což je základní frekvence struny (struna vydává základní tón). Pro  $k > 1$  je  $f = kf_z$ , což jsou **vyšší harmonické frekvence** (struna vydává vyšší harmonické tóny).



Podobně vzniká chvění u tyčí upevněných uprostřed, jejichž konce jsou volné. Pak je uzel vždy ve středu tyče a na koncích tyče vznikají kmitny.



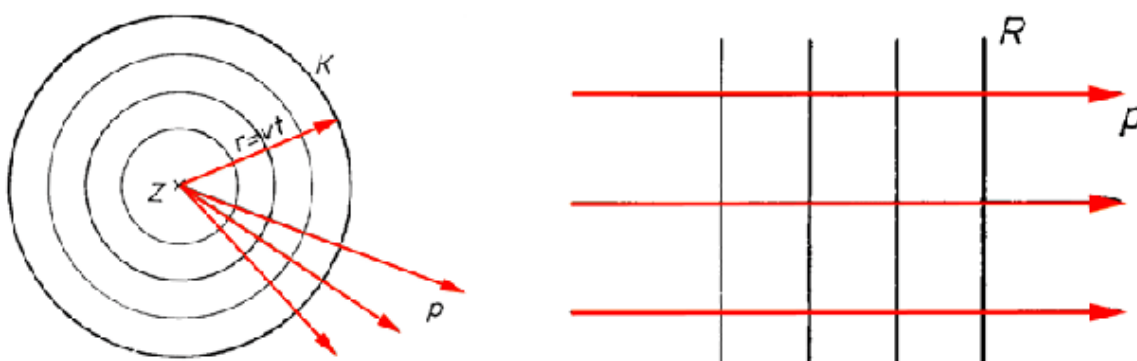
Chvění je charakteristické pro zdroje zvuku jako např. hudební nástroje, ale i pro **lidské hlasivky**. Zdroje zvuku tedy plní funkci oscilátoru, ze kterého se kmitání přenáší do okolního prostředí, nejčastěji do vzduchu. Ve vzduchu vznikají periodické změny tlaku vzduchu a prostředím se šíří postupné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

Chvění samozřejmě nepozorujeme jen u jednorozměrných předmětů. Důležitou roli hraje studium chvění desek, blan a jiných podobných objektů pro konstrukci různých elektroakustických zařízení (membrány reproduktory, sluchátka, mikrofony apod.), u nichž požadujeme vysokou kvalitu přenosu zvukových signálů.

## ŠÍŘENÍ VLNĚNÍ

Rychlost, kterou se vlnění šíří v prostoru, závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, např. na pružnosti a hustotě prostředí. Jsou-li fyzikální vlastnosti prostředí ve všech směrech stejné, je také ve všech směrech stejná velikost rychlosti vlnění. Takové prostředí nazýváme **izotropní prostředí**.

Dále se budeme zabývat šířením vlnění v izotropním prostředí. Stane-li se určitý bod prostředí, např. vzduchu, zdrojem kmitavého rozruchu, postupuje vlnění ze zdroje všemi směry rychlostí o velikosti  $v$  a za dobu  $t$  dosáhne vzdálenosti  $r = vt$ . Všechny body, do nichž dospěje vlnění z bodového zdroje za stejnou dobu, leží na kulové ploše  $K$ , kterou nazýváme **vlnoplocha**. Všechny body téže vlnoplochy kmitají se stejnou fází. Směr šíření vlnění určuje přímka  $p$ , která vychází ze zdroje vlnění kolmo na vlnoplochu a nazývá se **paprsek**. Všechny paprsky jsou kolmé na vlnoplochu.



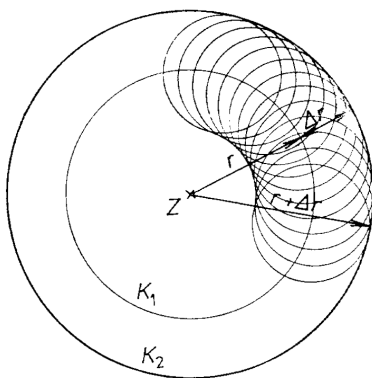
V blízkosti bodového zdroje vlnění se vytvářejí **kulové vlnoplochy**. Ve větších vzdálenostech od zdroje je však zakřivení kulových vlnoploch tak malé, že můžeme jejich části nahradit vlnoplochami rovinnými. **Rovinné vlnoplochy**  $R$  jsou navzájem rovnoběžné a stejně tak rovnoběžné jsou i paprsky  $p$ .

Nejnázornějším příkladem vlnění jsou **vlny na vodě**. Je zajímavé, že vlnění se šíří jen po hladině. S rostoucí hloubkou se amplituda rychle zmenšuje. V hloubce rovné polovině vlnové délky klesne amplituda dvacetkrát a v hloubce rovné vlnové délce již prakticky žádný pohyb není. Pro rychlost vlnění na otevřeném moři platí

$$v = \frac{gT}{2\pi}$$

u pobřeží je závislost složitější.

Každá částice, k níž dospěje postupné vlnění, se rozkmitá. Podobně koná kmitavý pohyb i každý bod vlnoplochy v prostoru. Protože kmitající body vlnoplochy jsou vázány pružnými silami s dalšími body prostředí, můžeme je považovat za místa nového kmitavého rozruchu, za nové zdroje vlnění. Příkladem může být šíření mechanického vlnění na vodní hladině. Jestliže použijeme překážku s malým otvorem, pak se za otvorem vytvářejí nové vlny tak, jako kdyby byl otvor zdrojem vlnění.



Obecně pro šíření vlnění v libovolném pružném prostředí platí tzv. **Huygensův princip**, který zformuloval před 300 lety Ch. Hugenst: **Každý bod vlnoplochy, do něhož dospěje vlnění v určitém okamžiku, se stává zdrojem nového, tzv. elementárního vlnění, které se šíří z tohoto zdroje v elementárních vlnoplochách. Vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch tvoří pak výslednou vlnoplochu v dalším časovém okamžiku.**

Význam Huygensova principu je patrný z obrázku. Vlnění, které se šíří z bodového zdroje Z rychlostí  $v$ , dospěje za dobu  $t$  do vzdálenosti  $r = vt$  a vytvoří kulovou vlnoplochu  $K_1$ . Každý bod této vlnoplochy, který je zdrojem nového vlnění, vytvoří za dobu  $\Delta t$

elementární vlnoplochu o poloměru  $\Delta r = v\Delta t$ . Protože elementární vlnění ze všech bodů vlnoplochy  $K_1$  jsou koherentní (tj. kmitají se stejnou frekvencí a stejnou fází), navzájem interferují. Interferencí se ruší elementární vlnění ve všech bodech kromě bodů ležících na vnější obalové ploše všech elementárních vlnoploch. Tato vnější obalová plocha o poloměru  $r + \Delta r$  je výslednou vlnoplochu  $K_2$ , k níž dospělo vlnění ze zdroje Z za dobu  $t + \Delta t$ .

Huygensův princip doplnili Fresnel a Kirchhoff. Ukázali a vysvětlili, že účinek elementárních vlnoploch se projevuje právě na vnější obálce. Příčinou je interference elementárních vln, které se zesilují právě jen na vnější obálce a dávají tak vzniknout výsledné vlnoploše. Huygensův princip doplněný tímto poznatkem se nazývá **Huygensův – Fresnelův**.

Pomocí Huygensova principu můžeme konstruovat vlnoplochy v každém dalším okamžiku šíření vlnění, známe-li polohu některé vlnoplochy v okamžiku předcházejícím, a to i tehdy, jestliže neznáme polohu zdroje vlnění.

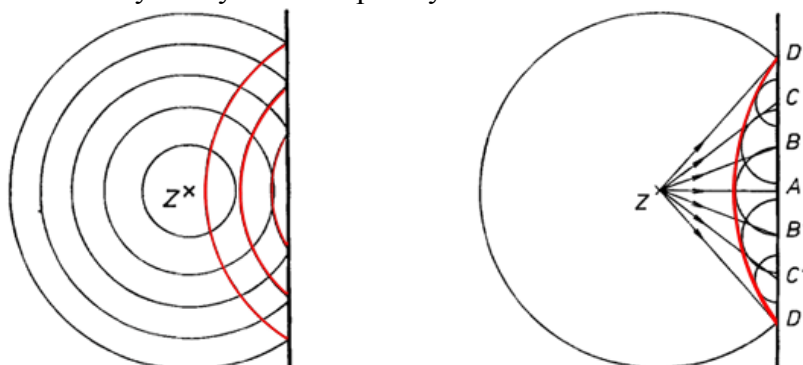
## ODRAZ A OHYB VLNĚNÍ

Jestliže vložíme vlnění do cesty překážku mohou nastat podle rozměrů překážky dva základní případy dalšího šíření vlnění:

- **překážka je větší oproti vlnové délce** – dochází k odrazu vlnění.

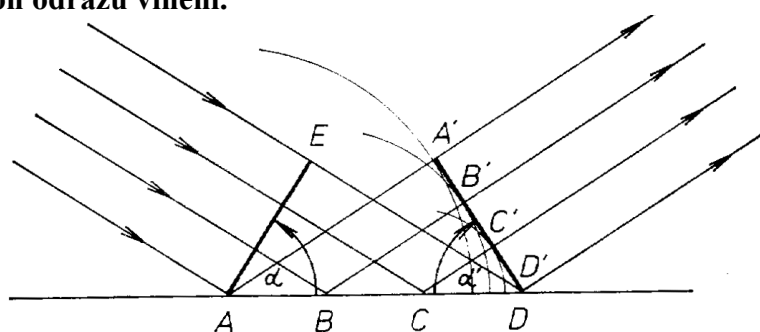


Princip odrazu vlnění můžeme vysvětlit pomocí Huygensova principu. Sledujeme vlnoplochu  $K$ , která postupuje ze zdroje  $Z$  k rovinné překážce. K ní vlnění dospívá postupně v bodech  $A, B, B', C, C', D, D'$ . V době, ve které vlnění dorazilo do bodu  $D$  a  $D'$ , vznikly již kolem bodů  $A, B, B', C, C'$  elementární vlnoplochy o poloměrech odpovídajících okamžiku dopadu vlnění na překážku. Jejich vnější obalová plocha tvoří výsledný tvar vlnoplochy odražené.



Podobným způsobem sestrojíme tvar odražené vlnoplochy v případě odrazu vlnoplochy rovinné. Sledujme rovinnou vlnoplochu, která svírá s rovinou překážky **úhel dopadu**  $\alpha$ . Vlnění dospívá k překážce postupně v bodech  $A, B, C, D$ . V čase  $t$ , ve kterém vlnění dorazilo z bodu  $E$  do bodu  $D$ , vznikla kolem bodu  $A$  elementární vlnoplocha o poloměru  $AA' = vt$ , kolem bodu  $B$  vlnoplocha o poloměru  $BB'$  a kolem bodu  $C$  vlnoplocha o poloměru  $CC'$ . Vnější obálka  $A'D$  těchto elementárních vlnoploch dává vlnoplochu odraženou, která je rovinná a svírá s překážkou **úhel odrazu**  $\alpha'$ .

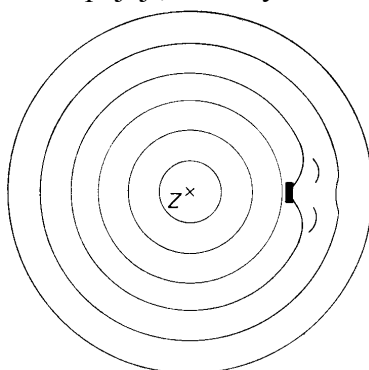
Poněvadž  $\triangle ADE = \triangle DAA'$ , platí  $\alpha' = \alpha$ . **Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu jeho dopadu na překážku = zákon odrazu vlnění.**



Odraz rovinné vlnoplochy

- **překážka je menší oproti vlnové délce** – dochází k ohybu vlnění.

Princip ohybu vlnění můžeme vysvětlit pomocí Huygensova principu. Okraje překážky, k nimž vlnění dospěje, se stávají zdrojem elementárních vlnění, která se v případě blízkých okrajů, tj. malých rozměrů překážky, za překážkou spojují, čímž vytvoří souvislou výslednou vlnoplochu.



Podobný jev nastává, je-li v překážce velkých rozměrů malý otvor. Pozorujeme, že za překážkou se vlnění šíří všemi směry, ačkoliv bychom očekávali, že po průchodu otvorem bude vlnění postupovat jen původním směrem, kterým se šířila rovinná vlna. Pokus je důkazem, že nastal ohyb vlnění. Oba jevy mají velký význam v oblasti šíření světla a zvuku a rozhlasových vln .

---

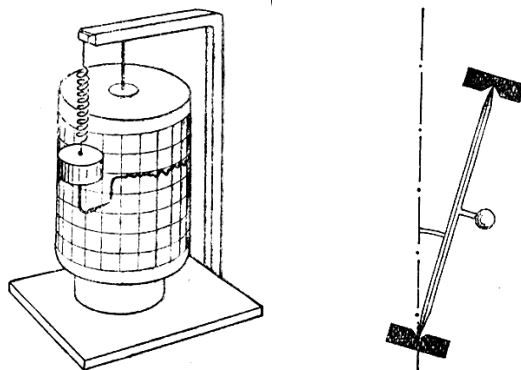
## ZEMĚTŘESENÍ

---

Příčinou zemětřesení je téměř nezatelný pohyb částečně plastických hornin v zemské astenosféře. Ve křehkých horninách litosféry, která leží na astenosféře, vyvolá napětí. Po nějaké době křehké horniny napětí nevydrží, prasknou a napětí se uvolní jako zemětřesné vlny. Zemětřesení mohou vznikat v hloubce až 720 kilometrů. Ta, jež se projevují na povrchu, ale nevznikají hlouběji než 70 kilometrů pod povrchem.

Země je dobrým zvukovým vodičem, proto nás zvukové vlny šířící se Zemí informují o procesech uvnitř Země. Tyto vlny nazýváme **seismické**, a zaznamenáváme je velmi citlivými přístroji **seismografy**. Používají se dva druhy seismografů

- **vertikální** (slouží k zaznamenání horizontálních posuvů)



- **horizontální** (slouží k zaznamenání vertikálních posuvů)

Jestliže k měření použijeme jeden vertikální a dva horizontální s navzájem kolmými rovinami, získáme informace o rychlosti i směru jakéhokoli posunu.

Jako **zemětřesení** označujeme jakékoli vychýlení seismografu. Není proto divu, že ročně jich je několik set tisíc.

Seismolog zjišťuje údaje o všech typech vln:

- podélná (dorazí první)
- příčná

Intenzita podélných a příčných vln klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje, protože se šíří prostorem v kulových vlnoplochách.

- povrchová – intenzita klesá se vzdáleností, protože se šíří v ploše v kruhových vlnoplochách. Z toho důvodu je také nejintenzivnější, má největší účinky.



# Akustika

---

## CO JE TO AKUSTIKA

---

Již jsme si vysvětlili jak vznikají kmity. Jak ale reaguje okolní prostředí na tyto kmity? Kmitající předmět naráží na okolní částice a postupně je rozpohybuje. Tyto částice dále naráží do okolních částic, které jsou ve větší vzdálenosti. Říkáme, že prostředím se šíří **zvuk**.

Speciálním oborem nauky o mechanickém vlnění je akustika. Zabývá se ději, které probíhají při vzniku, šíření a vjemu zvuku. Akustika zahrnuje tedy:

- zdroje zvuku,
- prostředí, kterým se zvuk šíří
- přijímače zvuku, nejčastěji lidské ucho.

Zvukem nazýváme mechanické vlnění, které vnímáme sluchem, jeho frekvence je v rozmezí od 16 Hz do 16 kHz. V širším smyslu slova zahrnuje i zvukové vlny, které jsou mimo obor slyšitelných frekvencí (ultrazvuk, infrazvuk).

Zvuk můžeme studovat z různých hledisek.

- **fyzikální akustika** – studuje vznik zvuku v různých zdrojích, jeho šíření, odraz, pohlcování apod.
- **fyzilogická akustika** – zabývá se vznikem zvuku v lidských hlasivkách a jeho vnímáním v uchu.
- **hudební akustika** – zkoumá zvuky a jejich kombinaci se zřetelem na potřeby hudby.
- **stavební akustika** – zkoumá podmínky dobrého a nerušeného poslechu řeči i hudby v obytných místnostech, v konferenčních nebo koncertních sálech.
- **elektroakustika** - se zabývá záznamem, reprodukcí a šířením zvuku.

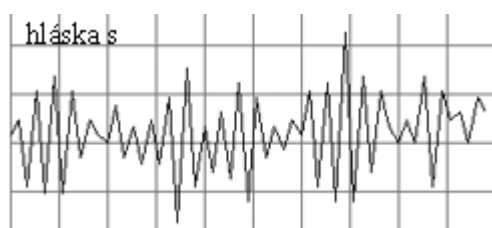
## VZNIK A DRUHY ZVUKU

Zdrojem zvuku může být každé chvějící se těleso, tj. těleso, ve kterém vzniklo stojaté vlnění. Mohou to být hudební nástroje, ladičky, hlasivky, ale i jiná chvějící se tělesa, např. součástky strojů, motory apod. U hudebních nástrojů se jako zdroje zvuku používají

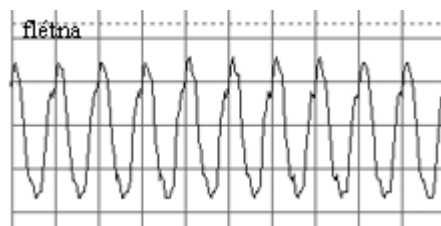
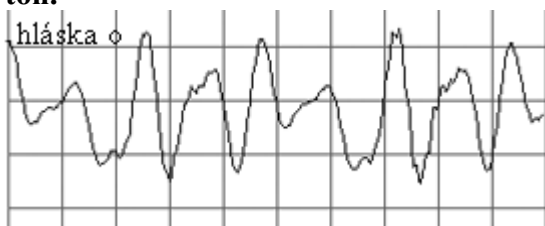
- **struny** – napjaté pevné vlákno, upevněné na obou koncích. Struny se rozechvívají smyčcem, drnkáním nebo nárazem. Po rozechvění struny se z místa rozruchu šíří oběma směry postupné příčné vlnění k oběma pevným koncům struny, kde se odráží s opačnou fází. Původní a odražené vlnění interferuje a vzniká příčné stojaté vlnění – chvění.
- **tyče** (xylofon),
- **desky** – rozechvívají se smyčcem nebo nárazem. Vlnění se v deskách šíří z místa vzniku různými směry, odráží se od okrajů a interferencí vzniká stojaté vlnění. V bodech s nulovou výchylkou se vytvářejí uzlové čáry. O tom bychom se mohli přesvědčit posypáním desky jemným písek, písek by se během kmitání přesunul do uzlových čar a vznikly by tzv. Chladniho obrazce.
- **membrány** – jsou upevněny na okrajích. Vlastní kmity membrány jsou silně utlumené, a proto mohou membrány rezonovat v širokém oboru frekvencí. Membrány i desky se užívají k reprodukci zvuku v mikrofonech, reproduktorech a v hudebních nástrojích (buben). Ušní bubínek je rovněž tvořen blánou, která má v uchu funkci přijímače zvuku.
- **píšťaly** jsou trubice, v nichž se uvádí vzduchový sloupec do podélného chvění foukáním proti ostré hraně zvané ret nebo chvěním pružného jazýčku. Ret nebo jazýček mají funkci zdroje kmitů a vzduchový sloupec rezonátoru a zesilovače zvuku.
- **hlasivky**

Podle povahy zvukového vjemu rozlišujeme zvuky

- **nehudební (neperiodické)** se nazývají také **hluk** nebo **šum**, jsou způsobeny nepravidelnými mechanickými rozruchy a vnímáme je jako praskání, šramot, vrzání, bouchnutí apod. Také souhlásky mají nepravidelný průběh



- **hudební (periodické)** neboli **tóny** jsou způsobeny periodickým chvěním. Patří mezi ně nejen zvuky hudebních nástrojů, ale i samohlásek. Nejjednodušší hudební zvuk, který má sinusový průběh nazýváme **jednoduchý tón**. Složitější periodické tóny nazýváme **složený tón**.



# ŠÍŘENÍ ZVUKU

Ze zdroje zvuku se šíří zvukové vlnění do okolního prostředí. V kapalinách a plynech se šíří jako postupné vlnění podélné, v pevných látkách jako postupné vlnění podélné i příčné. **Nutnou podmínkou pro šíření zvuku je pružné prostředí.** V nepružném prostředí (vlna, korek, plst' apod.) se zvuk šíří špatně. Takové látky používáme jako **zvukové izolátory**. Ve vzduchoprázdnu se zvuk nešíří.

Zvukové vlnění má všechny vlastnosti vlnění v prostoru. Pro vlnovou délku  $\lambda$  platí vztahy  $\lambda = vT$ ,

$\lambda = \frac{v}{f}$ , kde  $T$  je perioda a  $f$  frekvence vlnění. Vlnové délky zvuku jsou v rozmezí od 21 m pro

frekvenci 16 Hz do 21 mm pro frekvenci 16 kHz.

**Rychlost zvuku** závisí na druhu, hustotě prostředí a na teplotě  $t$ , dále na přítomnosti dalších látek, vodní páry a vlhkosti vzduchu. Pro rychlost zvuku ve vzduchu platí vztah

$$v_t = kt + v_0$$

kde  $v_t$  je velikost rychlosti zvuku při teplotě  $t$ , konstanta  $k = 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $v_0 = 331,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Obvykle počítáme s **hodnotou  $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$** , která odpovídá teplotě vzduchu asi  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . V kapalných a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu.

Prostřední	Rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
voda	1 440
beton	1 700
led	3 200
dřevo	4 000
ocel	5 000
sklo	5 200

## Absorpce zvuku

V důsledku toho, že při dopadu zvukového vlnění na stěnu část zvukové energie proniká do druhého prostředí a jen zbytek se vrací, intenzita odraženého vlnění  $I$  je vždy menší než intenzita na stěnu dopadajícího vlnění  $I_0$ . Podíl

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

se nazývá **koeficient absorpce zvuku při odrazu** a závisí především na materiálu stěny, ale mění se i s výškou zvukového vlnění - pro nižší tóny je koeficient absorpce tónu menší a pro vyšší tóny je naopak o něco vyšší. Přesvědčit se o tom můžeme například v lese, kde na stromech dochází k útlumu vysokých frekvencí. Koeficienty absorpce některých pevných materiálů pro zvuk s frekvencí 512 Hz popisuje následující tabulka.

Materiál	Koeficient absorpce	Materiál	Koeficient absorpce
mramor	0,010	dřevěná podlaha	0,10
beton	0,015	linoleum	0,12
sklo	0,027	obrazy	0,28

omítnutá stěna	0,025	koberce	0,29
neomítnutá stěna	0,032	plyš	0,59
stěna obložená dřevem	0,10	celotex	0,64

Celkovou absorpci  $A$  místnosti získáme tak, že velikosti ploch jednotlivých stěn vynásobíme jejich absorpčními koeficienty a získané součiny sečteme. Absorpční koeficient otevřeného okna se rovná 1 (od otevřeného okna se zvukové vlnění neodráží), a proto se absorpce otevřeného okna rovná jeho ploše. To znamená, že absorpci otevřeného okna s plošným obsahem  $1 \text{ m}^2$  je  $A = 1 \text{ m}^2$ . Díky tomuto poznatku se jednotka celkové absorpce (rozměr  $\text{m}^2$ ) nazývá "otevřené okno". Při počítání celkové absorpce je třeba brát v úvahu i absorpci těl osob, přítomných v místnosti a absorpci nábytkem. Tak například na 1 osobu připadá průměrně  $0,42 \text{ m}^2$  (otevřených oken), na dřevěnou židli  $0,01 \text{ m}^2$  a na čalouněné křeslo  $0,09$  až  $0,28 \text{ m}^2$ .

## Odraz zvuku

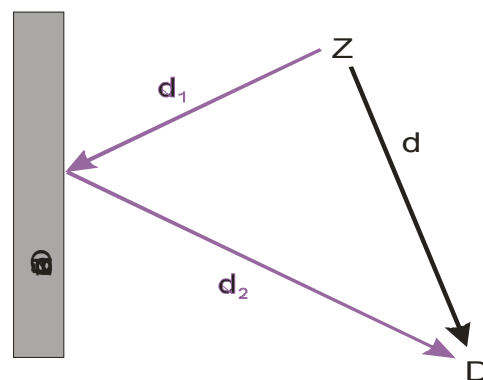
Při dopadu zvuku na rozhraní dvou prostředí dochází k částečnému odrazu zvuku. Množství odražené energie závisí na druhu obou prostředí. Např. vzduch – voda přechází jen  $1/1000$  energie zvuku, voda – ocel  $13 \%$  energie zvuku. Množství odražené energie zvuku závisí na hustotě obou prostředí.

Odraz zvukových vln můžeme pozorovat při odrazu zvuku na velké překážce, např. na skalní stěně, velké budově apod. Sluchem můžeme rozlišit dva krátké zvuky následující po sobě tehdy, je-li mezi nimi časový interval alespoň  $0,1 \text{ s}$ . Dostane-li se zvukové vlnění od zdroje k překážce a zpět za  $0,1 \text{ s}$  nebo za dobu delší, vnímáme odražený zvuk jako samostatný zvukový vjem – vznikla **ozvěna**. Při rychlosti zvuku  $340 \text{ m/s}$  musí být stěna od nás vzdálena minimálně  $17 \text{ m}$ . Čas  $0,1 \text{ s}$  potřebujeme přibližně k vyslovení jedné slabiky, proto v tomto případě vznikne ozvěna jednoslabičná. Při vzdálenosti  $17n$  vznikne ozvěna  $n$ -slabičná. Je-li několik překážek, na kterých se může zvuk odrážet, pak při jejich vhodné vzdálenosti vnímáme po sobě odrazy téhož zvuku. V Teplických skalách u Broumova můžeme slyšet trojnásobnou ozvěnu sedmislabičnou. V kapli Chapel of the Mausoleum v Hamiltonu ve Velké Británii postavené v letech  $1840 - 1855$  je nejdelší ozvěna, která trvá  $15$  sekund a následuje po zabouchnutí dveří.

Jiná situace nastane, je-li zdroj zvuku a posluchač na jiném místě. V tomto případě spočívá fyzikální princip vzniku ozvěny v rozdílu vzdáleností, kterou urazí zvuk jdoucí přímo od zdroje k posluchači a vzdáleností, kterou urazí zvuk jdoucí k posluchači od zdroje po odrazu od odrazné stěny. Časový interval mezi přímým zvukem a zvukem odraženým od odrazné stěny je dán vztahem:

$$\Delta t = \frac{d_1 + d_2 - d}{v}$$

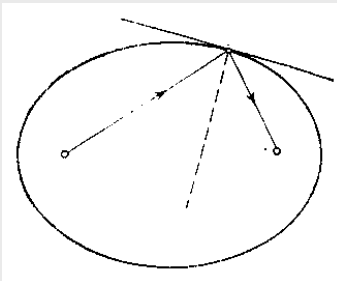
kde  $v$  je rychlost zvuku.



Je-li odrážející stěna blíže ke zdroji zvuku než  $17 \text{ m}$ , ozvěna nevzniká, ale prodlužuje se trvání zvuku původního – vzniká **dozvuk**. V malých místnostech slouží k zesílení sluchového vjemu, neboť následuje po původním zvuku tak rychle, že s ním splývá. Splývá-li odražený zvuk se zvukem následujícím, konce slov se prodlužují a řeč se stává nesrozumitelnou. Tento jev známe

např. z nádražních hal. S dozvukem je třeba počítat při projektování konferenčních a hudebních sálů, rozhlasových studií, továrních hal apod.

Zajímavou vlastnost má **elipsoid** (těleso vytvoření při rotaci elipsy kolem hlavní osy). Zvuk jdoucí z jednoho ohniska se odráží do druhého ohniska

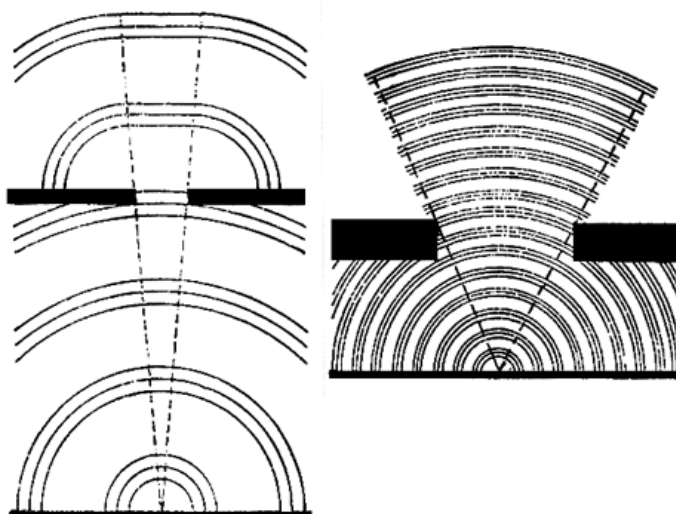


Proto např. v kostele, kde strop má tvar přibližně části elipsoidu mohli mniši v dobách inkvizice odposlouchávat cizí tiché hovory, aniž by si toho kdokoli všiml. Obdobný tvar má i kukaň nápovědy v divadle.

## Ohyb zvuku

Vzniká za otvory/předměty (zvukovými izolátory), které mají stejné nebo menší rozměry než vlnová délka zvukové vlny. Má-li však otvor/překážka velké rozměry proti vlnové délce zvuku, vzniká v prostoru za překážkou **akustický stín**, tj. prostor, kde se zvuk nešíří.

Frekvence lidského hlasu je přibližně 1000 Hz, tomu odpovídá vlnová délka 30 cm, proto se lidský hlas na otvorech menších ohýbá.



# VLASTNOSTI ZVUKU

Zvukové vlnění můžeme charakterizovat:

## Výška

Výšku jednoduchého tónu udává jeho frekvence. Čím vyšší je frekvence chvění zdroje zvuku, tím má zvuk větší výšku. Slyšitelné zvukové vlnění má frekvenci od 16 Hz do 16 kHz.

U jednoduchého tónu určuje frekvence **absolutní výšku tónu**. U složeného tónu, který obsahuje složky různých frekvencí, je výška dána základní tj. nejnižší frekvencí.

Vzhledem k tomu, že absolutní výšku tónu většinou nedokážeme přímo určit sluchem, zavádíme **relativní výšku tónu**. Je dána poměrem frekvence daného tónu k frekvenci tónu základního. Jako **základní tón** byl v hudební akustice mezinárodní dohodou hudebníků ve Vídni z roku 1885 stanoven tón o frekvenci 435 Hz, avšak nyní je to tón o frekvenci 440 Hz. Je označován jako komorní a. V technické praxi se jako základní tón používá tón o frekvenci 1 kHz.

Proč hmyz často vydává bzučivé zvuky? Bzučení - slyšitelné jen za letu - je způsobeno tím, že letící hmyz kmitá křídly i několiksetkrát za vteřinu. Křídlo je v tomto případě vlastně kmitající destička vydávající tón určité výšky. Proto, když chceme zjistit kolikrát za vteřinu ten který brouk mávne křídly, stačí zjistit výšku tónu, který vydává. Zjistilo se, že každý hmyz má kmitočet křídel téměř neměnný. Hmyz řídí let tím, že mění jen velikost rozkmitu ("amplitudu") a sklon křídel, kdežto počet kmitů za vteřinu se zvyšuje jen vlivem chladu. Proto také tón, který hmyz při letu vydává, se nemění.

Bylo například zjištěno, že moucha domácí (vydávající za letu tón f) udělá za vteřinu 352 kmitů křídly, čmelák mávne křídly za tutéž dobu 220krát. Včela letící bez zatížení vydává tón a, mávne tedy křídly 440krát za vteřinu, je-li však obtížena medem, jen 330krát (tón e). Brouci vydávají při letu nižší tóny a pohybují tedy křídly pomaleji. Zato komár mávne křídly 500-600krát za vteřinu. Pro srovnání uveďme, že vrtuli letadla "stačí" už asi 25 otáček za vteřinu.

## Barva

Umožňuje subjektivně rozlišit tóny stejné výšky, které vydávají různé zdroje, např. hudební nástroje. Říkáme, že zvuky hudebních nástrojů i lidské hlasy mají různé zabarvení.

Podle Fourierovy teorie lze libovolnou periodickou funkci s periodou  $T$  zapsat jako lineární kombinací harmonických funkcí s periodami  $\frac{T}{n}$ , kde  $n$  je přirozené číslo. Právě koeficienty v této

lineární kombinaci matematicky popisují barvu tónu. Frekvence  $f = \frac{1}{T}$  se nazývá **frekvencí základní**, frekvence odpovídající přirozeným násobkům této základní frekvence  $f_n = n \cdot f$  nazýváme **vyššími harmonickými frekvencemi**, výsledek analýzy nazýváme **frekvenční spektrum**.

Amplituda vyšších tónů harmonických je různá, ale podstatně menší než amplituda tónu základního. Výsledný zvuk je vlivem vyšších tónů harmonických pro daný zdroj zvuku zcela charakteristický. Čím více takových harmonických složek daný tón obsahuje a čím výrazněji tyto složky znějí, tím je

barva tónu plnější, sytější. Když jsou z vyšších harmonických tónů silné jen některé, zvuk nabývá pronikavosti a lesku, jako například zvuk houslí. Tóny chudé na vyšší tóny harmonické znějí dutě, prázdně. Barvu tónu u jednotlivých hudebních nástrojů můžeme ovlivňovat tvarem a materiálem rezonanční skříňky. Tím se zesilují nebo zeslabují určité vyšší harmonické tóny.

## Intenzita zvuku

Zvukové vlny vycházející ze zdroje způsobují periodické zhušťování a zředování okolního pružného prostředí. Při šíření zvuku tedy dochází k tlakovým změnám, které ucho vnímá jako zvuk o různé hlasitosti. Nejnižší tlaková změna, která již vyvolá v uchu sluchový vjem, je asi  $10^{-5}$  Pa a nazývá se **práh slyšení**. Naopak nejvyšší tlaková změna, při které ještě nevzniká v uchu pocit bolesti, je asi  $10^2$  Pa, a nazývá se **práh bolesti**.

K porovnávání zvuků, které vnímáme, se užívá fyzikální veličina **hladina intenzity zvuku**

$$L = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

kde  $P_0$  je výkon  $10^{-12}$  W, tzv. práh slyšení). Její jednotkou je decibell (dB). Práh slyšení pro tón o frekvenci 1 kHz odpovídá 0 dB. Hladina intenzity zvuku se zvýší o 1 dB, když se intenzita zvuku zvýší asi o čtvrtinu.

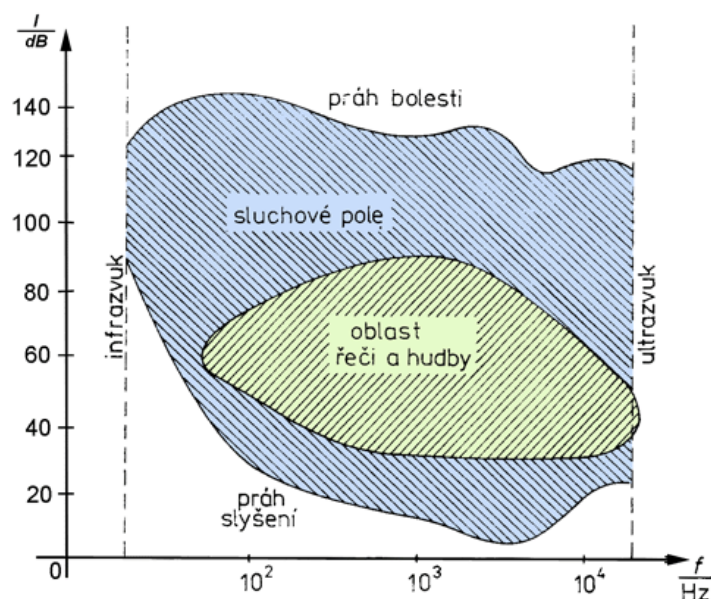
práh slyšení	0 dB
tíkot náramkových hodinek u ucha	10 dB
šepot	30 dB
hlasitý hovor na 1 m	50 dB
pouliční hluk při silném provozu	80 dB
motocykl	90 dB
sbíječka a velmi silná hudba	100 dB
práh bolesti	130 dB

Několik zdrojů se stejnou intenzitou zvuku zvýší hladinu zvuku jen málo, např. dva motocykly z 90 dB na 93 dB a osm motocyklů na 99 dB, kdežto deset na 100 dB. Z tohoto důvodu se hlučné provozy soustřeďují na jedno místo.

## Hlasitost

Přicházejí-li k našemu uchu dva tóny o stejné akustické intenzitě, ale s různou frekvencí, nevnímáme je jako stejně hlasité, ačkoliv i akustický tlak je v obou případech stejný. Tento rozdíl v subjektivním vnímání hlasitosti tónů je způsoben nestejnou citlivostí sluchového orgánu k různým akustickým frekvencím. Přibližně tuto závislost vystihuje **Weber-Fechnerův zákon**: roste-li fyzikální intenzita tónu i dané frekvence geometricky, jeho subjektivní účinek se zvětšuje přibližně jen aritmeticky. Poměrně největší citlivost je v oblasti asi 3 kHz. Směrem k horní i dolní mezi slyšení citlivost sluchu klesá.





Grafické znázornění závislosti hladiny intenzity zvuku a akustického tlaku pro různé frekvence je na obrázku. Oblast zvuků ohraničená prahem slyšení a prahem bolesti je **sluchové pole**. Frekvenční a intenzivní oblast řeči a tónu tvoří jen část celkového sluchového pole.

## INFRAZVUK, ULTRAZVUK

Člověk vnímá sluchem zvukové vlnění o frekvenci přibližně od 16 Hz do 16 000 Hz. Některá zvířata vnímají zvuky až do 100 000 Hz. Nejvyšší tón o frekvenci 60 GHz byl vytvořen laserovým paprskem zaměřeným na safírový krystal v Massachusetts Ins. v září 1964. Nejnižší zvuk vydaný píšťalou vytvořil Lavaser. Jeho píšťala vydávala tón zhruba 8 Hz, byl to poslední zvuk, který slyšel.

### Infrazvuk

Vlnění o nižší frekvenci než 16 Hz lidské ucho nevnímá a nazýváme ho **infrazvuk**. Do infrazvuku řadíme především:

- otřesy a záchvěvy půdy.
- těžké dopravní prostředky vyvolávají kmity budov a půdy v rozmezí frekvencí 1 – 10 Hz
- zemětřesení způsobuje kmity o frekvenci nižší než 1 Hz.

Vzhledem k tomu, že frekvence vlastních kmitů budov a jejich částí leží často v oblasti frekvence infrazvukových vln, mohou tyto kmity vyvolat nebezpečné **rezonanční jevy**. K registraci infrazvukových vln se dají využít seismografy (přístroje na měření seismických vln vznikajících při zemětřeseních.)

Sloni používají infrazvuk k vzájemnému dorozumívání. Mohou se tak slyšet až na vzdálenosti několika kilometrů.

Infrazvuk může nepříznivě působit na člověka. Frekvence 7 Hz odpovídá frekvenci alfa rytmů mozkových, které odpovídají stavu dušního klidu a pohody. Je-li člověk vystaven frekvencím blízkým, pak se nemůže uvést do klidu a soustředit se. Dokonce se uvažovalo o použití infrazvuku jako biologické zbraně. Nevýhodou však je, že působí i na obsluhu zdroje zvuku.



Jak se bránit infrazvuku? Je to velmi obtížné, protože jeho útlum v různých materiálech je nepatrný, nedochází téměř k žádné absorpci. Jedinou možností je ho akusticky zamazkovat, tj. překrýt jiným slyšitelným zvukem.

## Ultrazvuk

Mechanické vlnění o frekvenci vyšší než 16 kHz lidské ucho rovněž nevnímá. Nazýváme ho **ultrazvuk**. Ultrazvuk se vytváří pomocí křemenné destičky napojené na proměnné elektrické napětí. Destička se v rytmu napětí smršťuje a roztahuje a tak kmitá. Tento jev se nazývá piezoelektrický. Krystaly křemene jsou však jako zdroj ultrazvuku drahé a málo výkonné; používá se jich obvykle v laboratořích. V technické praxi se osvědčily syntetické látky, například keramický titaničitan barnatý.

Ačkoli ultrazvuky neslyšíme, přece jen jejich účinek můžeme velmi dobře pozorovat. Ponoříme-li například kmitající destičku do nádoby s olejem, vytvoří se na hladině kapaliny vypuklina vysoká 10 cm a olejové kapky vystřikují až do výšky 40 cm. Když do takové olejové lázně ponoříme konec skleněné trubice dlouhé asi 1 m a druhý konec držíme v ruce, ucítíme, že se trubice silně rozpálila a ožehla nám kůži. Konec takové rozkmitané trubice propálí dokonce otvor do dřeva; energie ultrazvuku se tu mění v teplo.

Ultrazvukové kmity mají velmi silný účinek na živý organismus: trhají vlákna vodních řas, drtí živočišné buňky, rozrušují krvinky; malé ryby a žáby usmrtí ultrazvuk za 1 až 2 minuty. Tělesná teplota pokusných zvířat vystavených ultrazvuku se zvyšuje, u myši například na 45 °C.

Ultrazvuková pípnutí slouží netopýřům a delfinům k vyhledávání kořisti. Prozradí ji ozvěna, kterou zachytí citlivé sluchové ústrojí – jakýsi zvukový radar. Čínská žába *Amolops tormotus* žije u bouřlivě tekoucích bystřin a ozývá se „ptačím zpěvem“. Při analýzách vědci zjistili, že žabí „zpěv“ obsahuje značnou porci ultrazvuku. To je celkem překvapivé, protože většina obojživelníků, plazů a ptáků není s to zachytit zvuky s frekvencí nad 12 kHz.

### Netopýři

Netopýři mají špatný zrak, přesto se velmi dobře orientují a za letu bezpečně loví drobný hmyz. Dlouho se spekulovalo o tom, který smysl netopýři používají. Vzhledem k velkým uším se předpokládalo, že je to velmi citlivý sluch. Nicméně se dlouho nevědělo, jak se netopýr orientuje ve tmě, jak zjistí polohu překážek, které žádný zvuk nevydávají.

Tyto pozoruhodné netopýří vlastnosti poprvé zkoumal italský vědec **Spallanzani** v roce 1793. Své výzkumy prováděl tak, že postupně odstranil jednotlivé smysly netopýra. Nejprve zbavil netopýra zraku. K svému podivení zjistil, že i slepý netopýr se orientuje stejně dobře, jako kdyby viděl. Další na řadu přišel čich. Zacpal tedy netopýru nosní otvory. Opět se netopýr bezpečně orientoval a nalézal kořist. Stejný výsledek získal, když netopýra zbavil chuti. Zbýval pouze hmat a sluch. Aby zbavil netopýra hmatu pokryl celé jeho tělo lakem. Avšak ani toto nemělo vliv na jeho schopnost orientace za letu. Zbýval tedy sluch. Stačilo netopýrovi zacpat ušní otvory, aby úplně ztratil schopnost orientace a při letu bezmocně narážel na různé překážky.

Tento výzkum nedal odpověď na otázku, pomocí čeho se netopýři orientují ve tmě. Teprve roku 1920 však poznal **Hartring**, že netopýr používá ultrazvuk. Netopýři vysílají nosem ultrazvukové signály o kmitočtu 30 až 120 kHz. Před startem vysílá netopýr takových signálů pět až deset za vteřinu, v letu však desetkrát více, každý trvající asi jednu setinu vteřiny.

To, že ultrazvuk člověk neslyší, zdaleka neznamená, že ho nedokáže využít. Ultrazvukovými vlnami, které se díky své krátké vlnové délce málo ohýbají se dá zkoumat např. mořské dno, poloha ledovce, tah ryb apod. Ultrazvuková defektoskopie využívá ultrazvuk k vyhledávání skrytých vad materiálu. Je založena na odrazu ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí (pevné těleso –

vzduch). Je-li v materiálu nějaká vada (dutina, trhлина), ultrazvuková vlna se na ní odrazí a je zachycena zpět přijímačem. Ze vzdálenosti záznamů vyslaného a odraženého impulsu lze určit hloubku vady pod povrchem.

Intenzita ultrazvukových vln je podstatně větší než intenzita slyšitelného zvuku. Při průchodu ultrazvukové vlny prostředím nastává tlaková změna větší než  $10^5$  Pa. Ultrazvukem lze tedy přenášet značnou energii a udělovat tak částicím prostředí značné zrychlení. Ultrazvuk se proto může používat na:

- drobení látek (výroba suspenze z mědi a kapaliny, nebo olova a kapaliny)
- shlukování drobných částic (např. částičky obsažené ve vzduchu a v plynech, částice prachu a kouře, ve větší celky, které pak klesají k zemi)
- tvorbu emulzí (např. oleje a vody),
- k urychlování chemických reakcí,
- při výrobě jemné fotografické emulze,
- ke zrychlení procesů založených na difúzi kapaliny pórovitou látkou (barvení látek, vydělávání kůží).
- ultrazvuk také odstraní potíže při pájení některých kovů, např. hliníku. Zbavuje totiž hliník povrchové vrstvy oxidu hlinitého, a tím umožňuje dokonalý kontakt kovu s pájkou.
- v lékařství při diagnostice (řádově MHz).
- kavitace: v kapalinách se vlivem ultrazvuku tvoří drobné dutiny, které mohou porušit povrch kovových předmětů ponořených v kapalině.

#### **První použití ultrazvuku**

Za první světové války působily německé ponorky francouzské námořní flotile velké ztráty. Každá loď, která vyplula z anglického nebo francouzského přístavu, vydávala se v nebezpečí, že bude potopena. Pokusy o boj s ponorkami byly neúspěšné.

Francouzský fyzik **Langevin** zkonstruoval přístroj na hledání ponorek. V tomto přístroji, nazvaném ultrazvukový lokátor, zdroj ultrazvukových kmitů vysílal do zvoleného směru pod vodou úzký ultrazvukový paprsek. Ultrazvuk se šířil přímočaře rychlostí jeden a půl kilometru za vteřinu a měl-li volnou dráhu, ztratil se v prostorách oceánu. Vyskytl-li se na dráze paprsku nějaký předmět, který se svou hustotou lišil od hustoty vody, ultrazvukové vlny se odrazily od tohoto předmětu a vrátily se zpět ke zdroji.

Zdroj ultrazvuku se po vyslání ultrazvukové vlny přepojil na přístroj, který naslouchal, zda se jím vyslaná vlna nevrací zpět a nenese zprávu o ponorce.

Jestliže se do 20 sekund nevrátila ozvěna vyslaného signálu, bylo jisto, že do vzdálenosti 15 kilometrů není žádná ponorka.

---

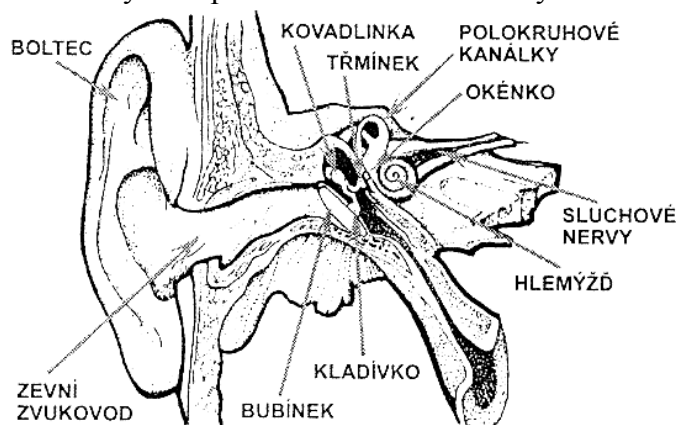
## ZÁKLADY FYZIOLOGICKÉ AKUSTIKY

---

**Lidský hlas** se tvoří v hrtanu mezi dvěma hlasovými vazami – hlasivkami. Mezi hlasovými vazami je úzká hlasová štěrbin, kterou prochází vzduch. Proudem vzduchu z plic se okraje hlasivek rozechvívají a vzniklé tóny se zesílí rezonancí dutiny ústní, hrudní a nosohltanové. V kratších hlasivkách (12 mm) u žen a dětí se tvoří základní tón vyšší, v delších hlasivkách (18 mm) u mužů tón nižší.

**Ucho** – je složeno z ucha vnějšího, středního a vnitřního. K **vnějšimu uchu** patří **boltec**, který zachycuje zvukové vlny, a **zvukovod**. Zvukovodem se vede zvuk na pružnou blanku – **bubínek** (pružná asi 0,1mm silná a 1cm velká blána). Úkolem **středního ucha** (čtyři pružné kůstky) je snižovat amplitudu výchylky akustických kmitů a převádět je k systému vnitřního ucha. Ve **vnitřním uchu**, které je vyplněno kapalinou, je vlastní sluchový orgán, tzv. **Cortiho ústrojí**, které obsahuje sluchové buňky.

Dopadne-li na bubínek zvuková vlna zachycená boltcem, přeneše se energie zvukového vlnění kůstkami středního ucha na tekutinu ve vnitřním uchu. Zde vznikne stojaté vlnění, kterým se rezonancí rozkmitávají jemná vlákna sluchového nervu uložená na Cortiho ústrojí. Nejvíce se rozkmitá to vlákno, jehož vlastní frekvence je stejná jako frekvence dopadajícího vlnění. Sluchový vjem se přenáší pomocí elektrických impulsů do nervové soustavy.



Zkuste tento pokus: vezměte pevně do zubů kapesní hodinky (klasické mechanické) a prsty si dobře zacpěte uši; místo tikotu hodinek uslyšíte těžké údery. Právě tak i hluchí, kterým zůstalo zdravé vnitřní ucho, mohou tancovat podle hudby, neboť zvuky přicházejí k jejich sluchovému nervu podlahou a kostmi. A stejně tak proto ostatní slyší náš vlastní hlas jinak než my.

## ZÁKLADY HUDEBNÍ AKUSTIKY

V hudbě používáme jen určité tóny, jejichž relativní výšky jsou dány určitými čísly. Relativní výšku neboli poměr dvou absolutních výšek vnímá ucho jako **hudební interval**.

Základním intervalem je **oktáva**. Je to interval mezi dvěma tóny, jejichž poměr frekvencí je 2:1. Říkáme, že vyšší tón o relativní výšce 2 je oktávou k základnímu tónu nebo že zní hudební interval oktávy. Interval oktávy tvoří každé dva tóny libovolných výšek, např. tóny 3 kHz a 6 kHz, pokud je poměr jejich frekvencí 2:1. Přehled hudebních intervalů je uveden v tabulce:

Interval	Poměr frekvence
oktáva	2 : 1
kvinta	3 : 2
kvarta	4 : 3
velká tercie	5 : 4
malá tercie	6 : 5
velký celý tón	9 : 8

malý celý tón	10 : 9
velký půltón	16 : 15
malý půltón	25 : 24

Intervaly až po malou tercii považujeme za **konsonantní** (libozvučné), další intervaly jsou **disonantní** (nelibozvučné). Platí, že souzvuk je tím libozvučnější, čím menšími celými čísly je dána poměr frekvencí. V průběhu staletí se značně měnily názory na to, které souzvučky jsou konsonantní a které disonantní. Ve starověké hudbě byly označovány za dokonale konsonantní dvojjzvuky pouze oktávy a kvinty. Teprve od konce 15. století byly obecně uznány za konsonantní i intervaly velké a malé terciie.

Soubor tónů s definovanými intervaly (vzhledem k základnímu) tónu určuje hudební stupnici. Jednou z takových tónových řad je **diatonická stupnice dur** (tvrdá). Stupnice dur obsahuje v rozmezí oktávy 8 tónů: prima, sekunda, velká terciie, kvarta, kvinta, velká sexta, velká septima, oktáva. Tyto tóny se označují písmeny c, d, e, f, g, a, h, c<sup>1</sup>. Jejich relativní výšky jsou  $1, \frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3},$

$\frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8}, 2.$

Tóny užívané v hudbě jsou v rozsahu od 16 Hz do 4 000 Hz. Jsou rozloženy do osmi po sobě jdoucích oktávních intervalů (oktáv). Zahrajeme-li po sobě dva sousední tóny stupnice, vnímá sluch jejich interval stejně, ať zní v kterékoliv oktávě.

---

## ŠKODLIVÉ ÚČINKY ZVUKU

---

Opravdové ticho je vzácné, za ticho považujeme nízkou hladinu hluku. Dlouhý pohyb v úplném tichu působí depresivně. Delší pobyt v prostředí s hladinou zvuku nad 70 dB je zdraví škodlivý. Hluk působí především na nervovou soustavu, zvyšuje únavu a zpomaluje reakce. U některých lidí vyvolává bolesti hlavy, popř. nevolnost, poruchy biochemických reakcí apod.

Při hladině zvuku nad 80 dB je již ohrožen sluch. Dlouhodobý pobyt v hlučném prostředí snižuje schopnost vnímat slabé zvuky a člověk se postupně stává **nedoslýchavým**. Z toho důvodu jsou pro pobyt v hlučném prostředí předepsány chrániče sluchu.

Hluk se v provozech snižuje mazáním třecích ploch, antivibračními nátěry, které brání kmitání plechů, správnou tolerancí pohyblivých součástí strojů apod. Dále pak zvukovou izolací a soustředěním hlučných pracovišť do místností s různými úpravami, které snižují hlučnost prostředí.

---

## DOPPLERŮV JEV

---

Pokud jste někdy byli diváky automobilových nebo motocyklových závodů, mohli jste si všimnout, že před tím, než kolem vás projede závodní stroj, vnímáte sluchem vyšší frekvenci zvuku motoru, a ta při průjezdu kolem vás prudce poklesne. Popsaný jev nastává vždy při vzájemném pohybu zdroje zvuku a pozorovatele a je tím výraznější, čím rychleji se zdroj zvuku vzhledem k pozorovateli

pohybuje. Pozorovatel pak vnímá zvuk jiné frekvence, než je frekvence kmitání zdroje. Podstatu tohoto tzv. **Dopplerova jevu** objasnil v polovině 19. století Ch. J. Doppler.

Nejdůležitější jsou následující případy Dopplerova jevu:

**1. Zdroj zvuku Z je v klidu a přijímač zvuku ( $P_1$ , popř.  $P_2$ ) se pohybuje** po vzájemné spojnici konstantní rychlostí  $u$ , která je menší než rychlost zvuku  $v$ .

Zdroj Z vysílá zvukové vlnění o vlnové délce  $\lambda = v/f$  ( $f$  je frekvence zdroje vlnění), které je na obrázku znázorněno soustavou soustředných vlnoploch. Jestliže jsou přijímače zvukového vlnění  $P_1$  a  $P_2$  v klidu, dospěje k nim za jednotku času stejný počet vlnoploch a přijímače registrují zvukové vlnění stejné frekvence  $f = v/\lambda$ .

Jestliže se přijímač  $P_1$  rychlostí  $u$  ke zdroji zvuku přibližuje, dospěje k němu za jednotku času větší počet vlnoploch a přijímač registruje vyšší frekvenci zvuku.

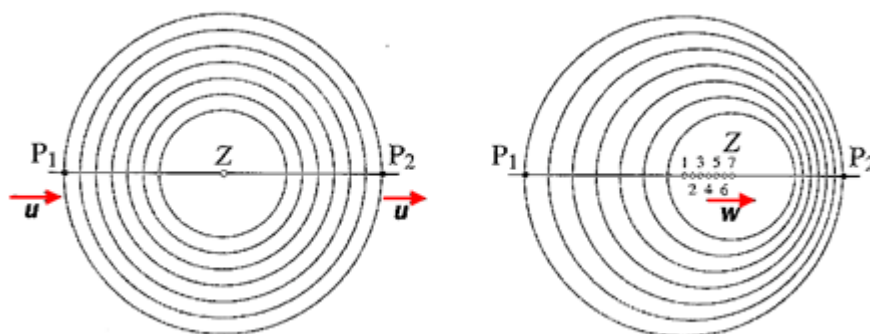
$$f_1 = \frac{v+u}{\lambda} = \frac{v+u}{v} f = \left(1 + \frac{u}{v}\right) f$$

Pro názornou představu: při přibližování ke zdroji při rychlosti asi 70 km/h vzroste frekvence zhruba o 6 %.

Přijímač  $P_2$ , který se od zdroje zvuku rychlostí  $u$  vzdaluje, zachytí méně zvukových vln a registruje nižší frekvenci zvuku:

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

Kdybychom se vzdalovali rychlostí zvuku, pak bychom žádný zvuk neslyšeli, protože z předchozího vzorce by frekvence byla nulová. Jestliže bychom se vzdalovali rychlostí větší než rychlost zvuku, pak bychom slyšeli zvyšující se frekvence.



**2. Přijímač zvuku je v klidu a zdroj zvuku se pohybuje** rychlostí  $w$  od přijímače  $P_1$  k přijímači  $P_2$ .

Zdroj zvuku se od přijímače  $P_1$  vzdaluje a to se projevuje jako zvětšení vlnové délky zvukového vlnění (zvětšuje se vzdálenost mezi jednotlivými vlnoplochami). Vlnová délka  $\lambda_1 = (v+w)/f$  a přijímač  $P_1$  registruje frekvenci

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

která je nižší než frekvence zdroje.

Naopak v místě přijímače  $P_2$  je vlnová délka zvukového vlnění kratší  $\lambda_2 = (v-w)/f$  a přijímač  $P_2$  registruje frekvenci

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

která je vyšší než frekvence zdroje.

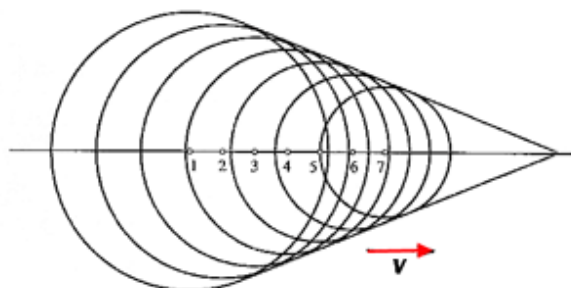
Dopplerův jev vzniká i u elektromagnetického vlnění a je na něm například založeno měření rychlosti automobilů pomocí radaru. Radar pracuje tak, že vysílá elektromagnetické vlnění určité frekvence směrem k vozidlu a od vozidla přijímá odražené vlnění, jehož frekvence se vlivem Dopplerova jevu poněkud liší. Skládáním vyslaného a přijatého signálu vznikají rázy o slyšitelné frekvenci, která je přímo úměrná rychlosti vozidla. Měření rychlosti se tak převádí na měření frekvence.

## Rázová vlna

Zvláštní pozornost si zaslouhuje případ, kdy se rychlost pohybu zdroje zvuku  $w$  přiblíží k rychlosti zvuku  $v$ , popř. ji i překročí. Snadno dospějeme k závěru, že pro pozorovatele  $P_2$  v případě, že  $w = v$  je  $\lambda_2 = 0$  a pojem zvuková vlna ztrácí smysl. Tato situace není jen teoretickým modelem zvláštního případu Dopplerova jevu, ale je reálnou skutečností např. u letadel nebo střel, které se pohybují nadzvukovou rychlostí. V letectví se při popisu rychlosti používá jednotka **Machovo číslo**, která nese jméno podle fyzika Ernsta Macha (1838 – 1916). Udává poměr rychlosti letu k rychlosti zvuku.

Blíží-li se rychlost proudění tekutiny při obtékání rychlosti šíření zvuku  $v$  daném prostředí, začíná se tekutina stlačovat, hromadí se před tělesem a její hustota se značně zvětšuje. Odpor prostředí za této situace prudce roste, neboť lokální „zhuštění“ tekutiny před tělesem se nestačí přenést do okolí. Před tělesem se tak vytváří tzv. **tlaková (zvuková) bariéra**, tlačaná tělesem dopředu.

Při překonávání tlakové bariéry dochází k vyrovnání velmi rozdílných tlaků před a za tělesem, provázenému zvukovými efekty značné intenzity – z místa tohoto neobyčejně intenzivního rozruchu se šíří tzv. **rázová vlna**, která tvoří obal vlnoploch na obrázku.

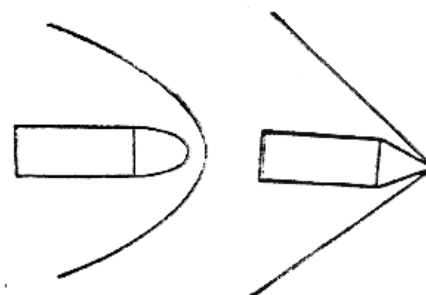


Při překonávání tlakové bariéry je těleso vystaveno extrémnímu silovému působení.

Když rázová vlna dosáhne k zemskému povrchu, vnímáme ji sluchem jako silnou ránu podobající se výstřelu. Tento zvuk označujeme jako **akustický třesk**. Vznik akustického třesku je jedním z důvodů, proč se letadla mohou pohybovat nadzvukovou rychlostí jen ve velkých výškách.

Při konstrukci tělesa, které by se mělo pohybovat nadzvukovou rychlostí je třeba dbát na jeho tvar protože:

- **zaoblený tvar tělesa** snižuje turbulenci, která vzniká odporem vzduchu. Je vhodný pro tělesa pohybující se podzvukovou rychlostí, protože rázová vlna má také zaoblený tvar a je podstatně dál o špičky tělesa.
- **špičatý tvar tělesa** zvyšuje turbulenci. Naopak rázová vlna se dotýká špičky a působí proto menším odporem při jejím překonání. Je vhodný pro tělesa pohybující se nadzvukovou rychlostí.



Velkým problémem pro nadzvuková letadla je velké zahřívání špičky při nadzvukových rychlostech. Teplota roste přibližně se čtvercem rychlosti. Při podzvukových rychlostech může být pouhých 60 °C, ale při nadzvukových rychlostech může být 240 °C, při trojnásobné rychlosti zvuku až 820 °C. Při rychlostech nad 10 km/s už se každé těleso vypaří (meteor).

---

## LITERATURA

---

- [1]. Bednařík M., Kunzová V., Svoboda E.: *Fyzika II.*, SPN Praha 1984
- [2]. Lepil O., Bednařík M., Hýblová R.: *Fyzika II.*, Prometheus Praha 2001
- [3]. Štoll I.: *Fyzika*, Prometheus Praha 2001
- [4]. Řešátko M.: *Fyzika pro SOU*, SPN Praha 1984
- [5]. Landau L.D.: *Fyzika pro každého*, Horizont Praha 1975
- [6]. Macháček M.: *Fyzika pro základní školy a víceletá gymnázia 7 - 9*, Prometheus Praha 2002
- [7]. Kolesnikov V.: *Mechanika*, Olomouc 1988
- [8]. Lepil O.: *Mechanické kmitání a vlnění*, Prometheus Praha 2001
- [9]. Maršák J.: *Fyzika v sešitě*, Fortuna Praha 1991
- [10]. Kudrjavcev B. B.: *Neslyšitelné zvuky*, Naše vojsko 1953
- [11]. přednáška doc. Ing. Karla Malinského, Csc: *Zvuky, které neslyšíme*
- [12]. Mašek B.: *Fysika pro vyšší třídy středních škol*, Prometheus Praha 1947