



# **Elektroakustika**

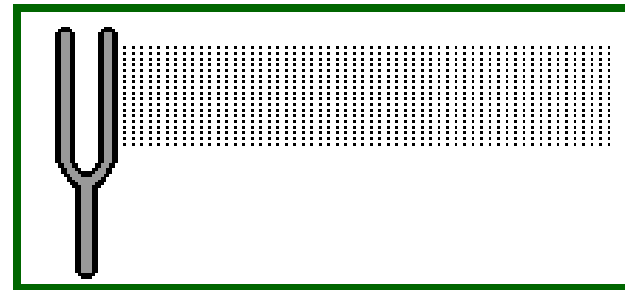
## **L01: Základné pojmy**

**prof. Ing. Jozef Juhár, PhD.**

**<http://kemt.fei.tuke.sk>**

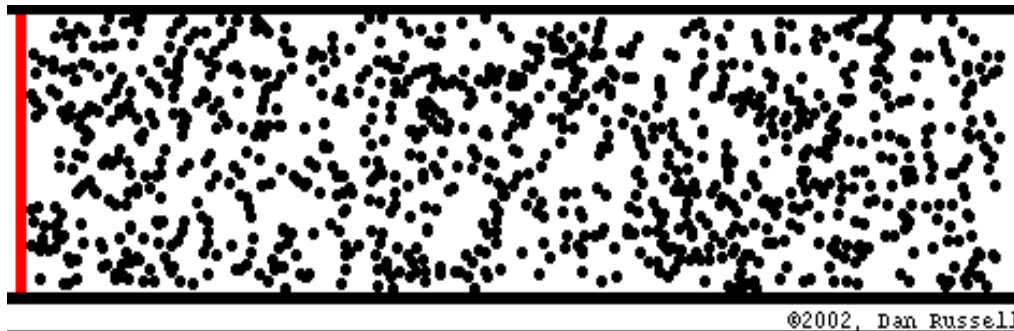
# Akustika

- Akustika je veda, zaoberajúca vznikom, šírením, príjmom a pôsobením **zvuku**.
- Jej názov je odvodený od gréckeho slova „**akoustos**“, ktorého pôvodný význam je „počúvanie“ resp. „počutie“.
- Už od svojich počiatkov aplikácie akustiky hrajú dôležitú rolu v každodennom živote ľudí:
  - hudba
  - architektúra
  - engineering
  - armáda
  - medicína
  - psychológia
  - lingvistika
  - ...



# Zvuk

- Zvuk je mechanický rozruch, ktorý
  - vzniká v **pružnom** prostredí vychyľovaním častíc prostredia zo svojej rovnovážnej polohy
  - šíri sa prostredím vo forme zvukovej **vlny** (odovzdávaním energie kmitania medzi susediacimi časticami)
  - je vnímateľný sluchovými orgánmi ľudí, zvierat a iných živých tvorov, alebo detekovateľný špeciálnymi prístrojmi (sonar)

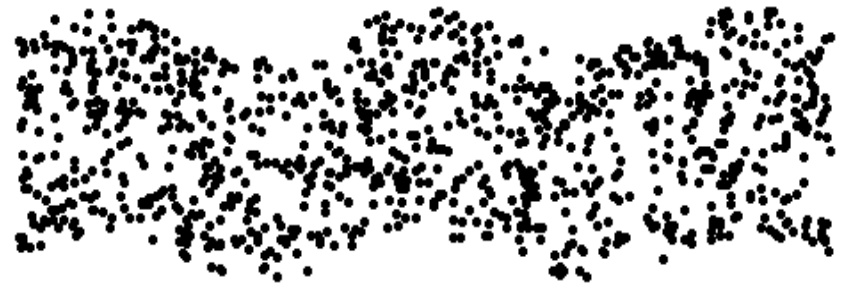


- Nazývame ho tiež **zvukovým (akustickým) vlnením**

# Zvukové vlnenie

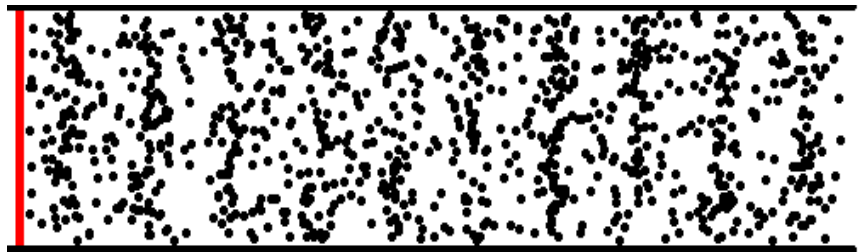
- priečne (transverzálne)

- častice sa vychyľujú v smere kolmom na smer šírenia rozruchu
- tangenciálne sily
- pevné látky



- pozdĺžne (longitudinálne)

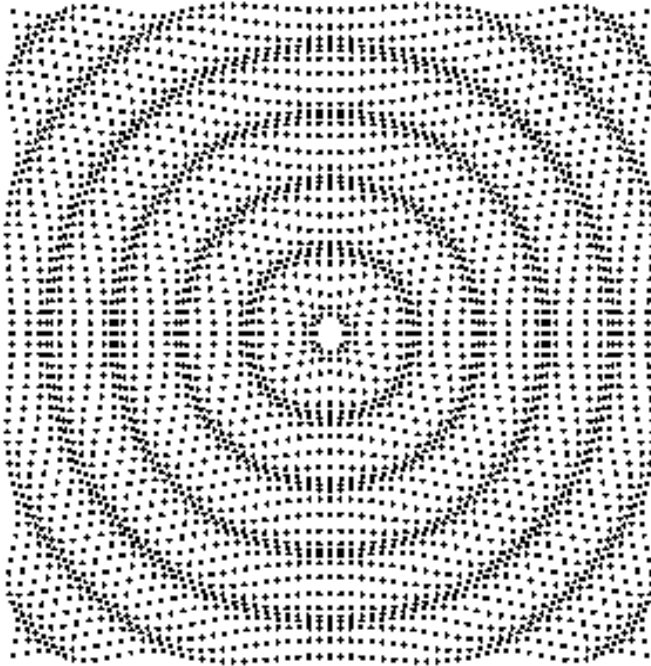
- častice sa vychyľujú v smere šírenia rozruchu
- normálové sily
- kvapalné a plynné látky



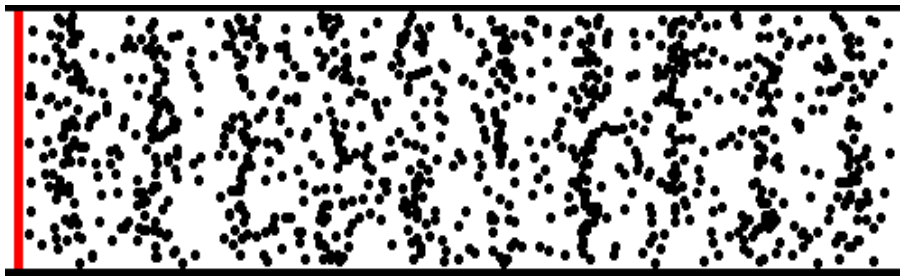
# Vlnoplocha, čelo vlny, zvukový lúč

- Vlnoplocha
  - geometrické miesto bodov prostredia, v ktorých častice prostredia kmitajú s rovnakou fázou
- Čelo vlny
  - geometrické miesta bodov, do ktorých zvukové vlnenie dorazilo v určitom okamihu a v ktorých kmitajú častice prostredia s rovnakou fázou
- Zvukový lúč
  - smer šírenia zvukového vlnenia
  - v izotropnom prostredí je kolmý na vlnoplochu

# Rovinná a guľová zvuková vlna



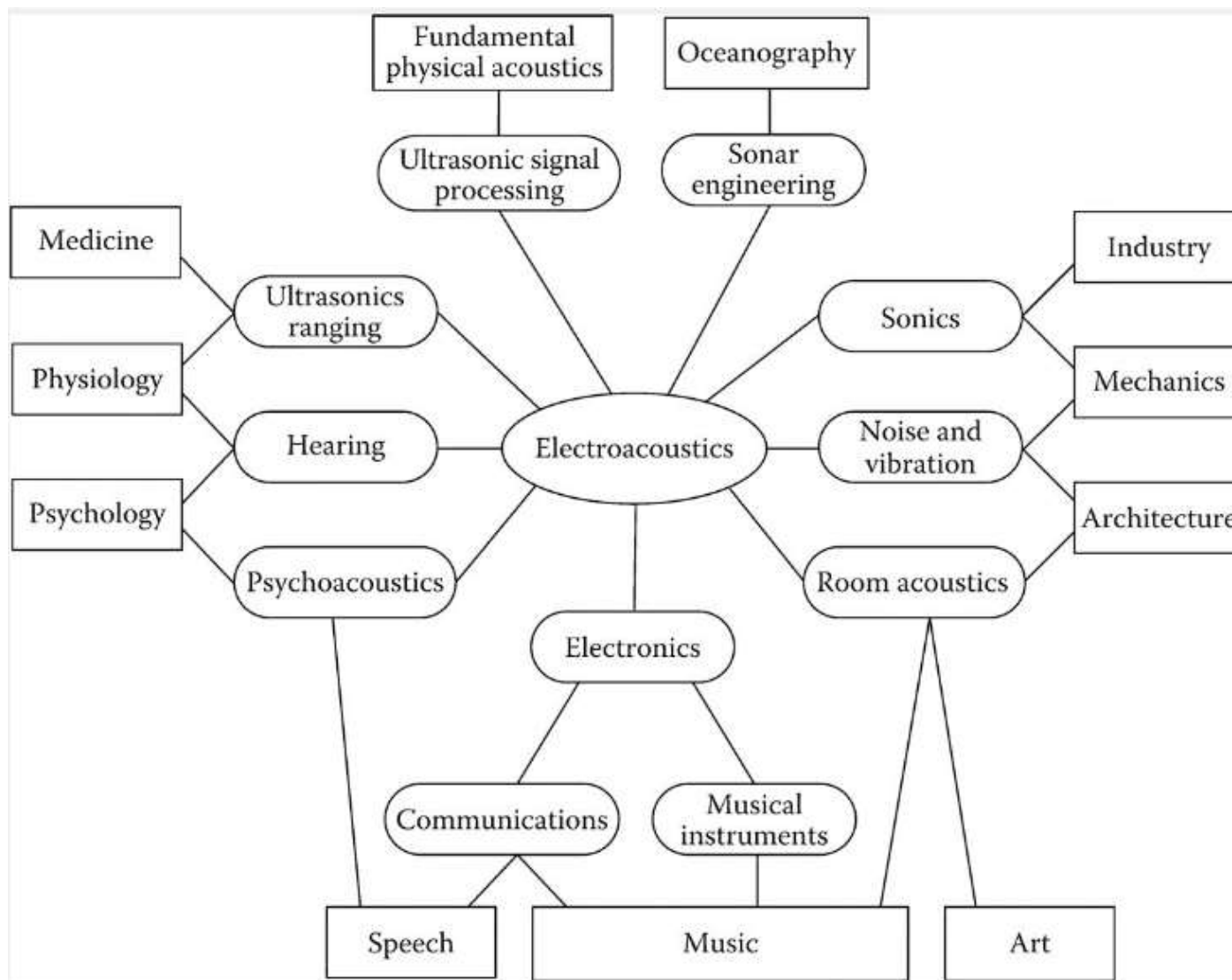
- Guľová zvuková vlna
  - vlnoplochy v tvare koncentrických guľ
  - zvukové lúče v tvare sférických radiál
  - každý zvukový zdroj, ktorého rozmery sú oveľa menšie, ako je vlnová dĺžka vysielaného zvukového vlnenia
- Rovinná zvuková vlna
  - vlnoplochy v tvare paralelných rovín
  - zvukové lúče v tvare súbežných priamok
  - teoretickým zdrojom je nekonečná rovina
  - simuluje sa v akustických trubiciach, guľová vlna vo veľkej vzdialenosti od zdroja
- Valcová (cylindrická) vlna
  - vlnoplochy v tvare sústredných valcov
  - zvukové lúče v tvare paralelných radiál
  - teoretickým zdrojom je „pulzujúca“ priamka



# Odbory akustiky

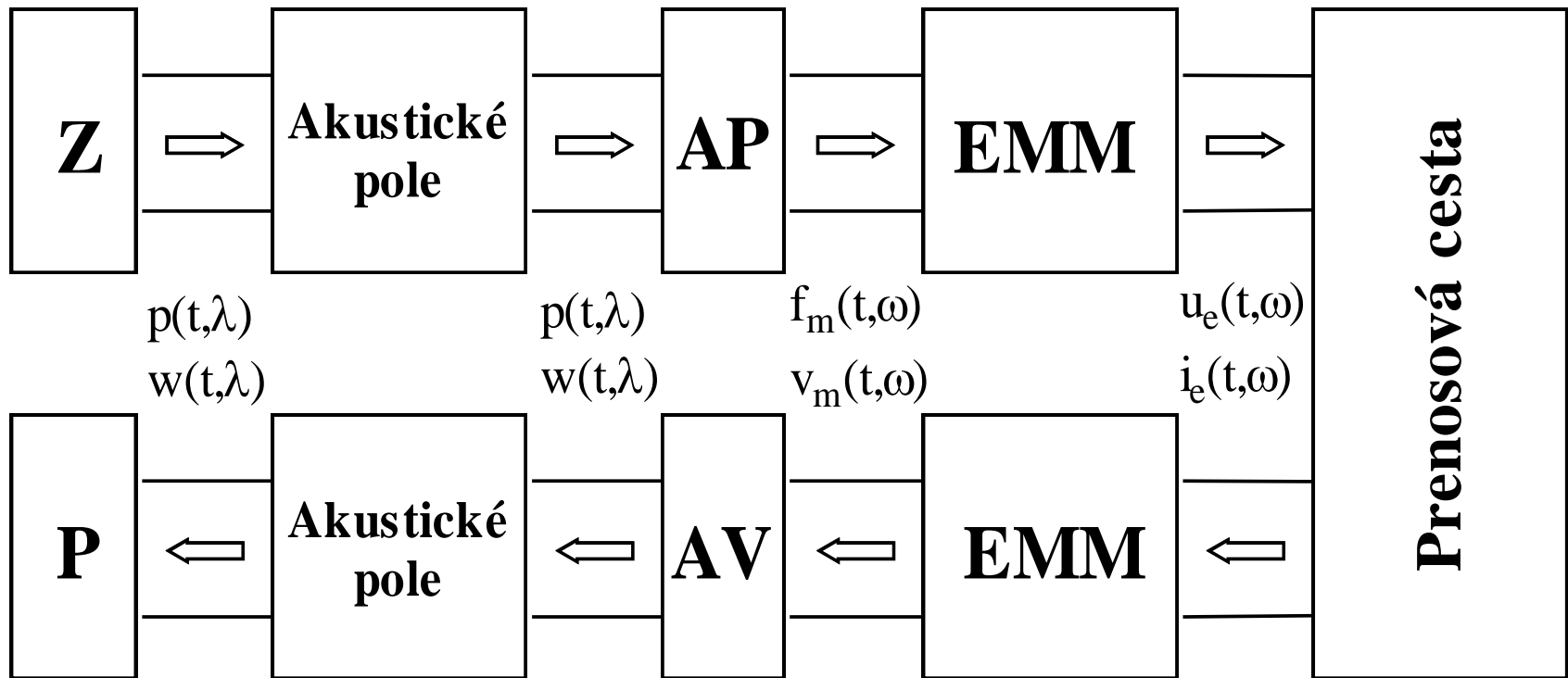
- Fyzikálna akustika
  - Náuka o vzniku a šírení zvuku.
- Fyziologická akustika a psychoakustika
  - Zaoberá sa mechanizmom spracovania zvukového rozruchu sluchovým orgánom, nervovým systémom a interpretáciou zvukového obrazu mozgom človeka (psychoakustika) a akustikou hlasu a reči.
- Priestorová akustika
  - Riešenie akustickej kvality uzavretých priestorov s dôrazom na optimálny tvar a veľkosť priestoru (geometrická akustika) a použité materiály na jeho výstavbu a vybavenie (stavebná akustika - náuka o pohlcovaní zvuku a zvukovej izolácii).
- Komunikačná akustika
  - Aplikácie akustiky v informatike a telekomunikáciách.
- Hudobná akustika
  - Analýza, syntéza a rozpoznávanie hudobných signálov, konštrukcia hudobných nástrojov, elektronické komponovanie atď.
- **Elektroakustika**
  - Premena akustických signálov na elektrické, ich spracovanie a opätovnou premenou na signály akustické - **zvukový (elektroakustický) systém.**

# Elektroakustika a jej vzťah k ďalším odborom akustiky





# Elektroakustický systém



**Z** - Zdroj zvuku

**AP'** - Akustický prijímač

**P** - Prijímateľ zvuku

**AV** - Akustický vysielač

**EMM** - Elektromechanický menič

# Typické časti elektroakustického systému

- zdroj zvuku / prijímateľ zvuku
- akustické pole (akustický priestor)
- akustický prijímač / akustický vysielateľ
- elektromechanický menič
- (elektrická) prenosová cesta

# Zdroj zvuku

- **Užitočný – nesúci informáciu**

- Reč, hudba, výstražné zvuky, ...

- Závisí od situácie – hluk električky je užitočný v prípade, že nás vystríha ak stojíme na koľajniciach

- **Neužitočné – nenesúci informáciu**

- Rôzne hluky

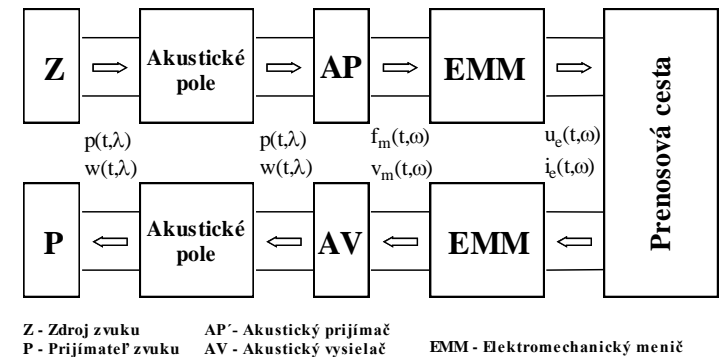
- Závisí od situácie – rozprávanie davu ľudí je v dialógu dvoch neužitočným hlukom

- **Prirodzený**

- človek – reč, spev, neartikulované zvuky
- ostatné živé tvory (zvieratá, ...)
- prírodné javy (šum lístia, úder hromu, ...)
- ....

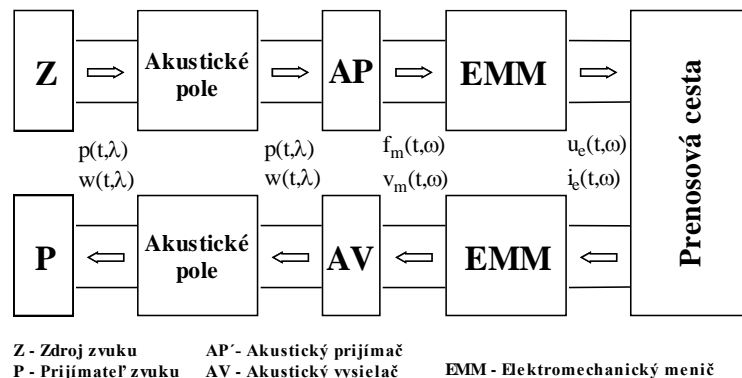
- **umelý (vyrobený človekom)**

- hudobné nástroje
- stroje
- ...



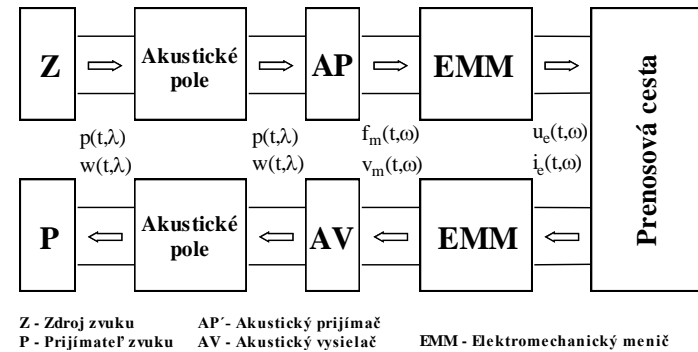
# Akustické pole

Priestor, v ktorom sa šíri  
zvukové (akustické) vlnenie



- Podľa počtu akustických zdrojov:
  - akustické pole s **jedným** zvukovým zdrojom
  - akustické pole s **viacerými** zvukovými zdrojmi – **princíp superpozície !!!**
- Podľa vzdialenosti od zvukového zdroja
  - **Blízke pole** („malá“ vzdialenosť od zdroja)
  - **Vzdialené pole** („veľká“ vzdialenosť od zdroja)
- Podľa ohraničenosti akustického poľa:
  - **Otvorené** (ulica, štadión, ... )
  - **Zatvorené:**
    - malé (obývačka, nahrávacie štúdio, menšia poslucháreň, ...)
    - veľké (športová hala, kostol, kongresová sála, staničná budova, ...)

# Akustický prijímač



- Vlnenie prostredia mení na svoje vlastné kmitanie
- **Reálny**
  - membrána
  - páska
  - ...
- **Teoretický** (matematické modely)
  - nultého rádu (bodový prijímač)
  - prvého rádu
  - druhého a vyšších rádov
  - rady a polia bodových akustických prijímačov

# Akustické vysielajúce

- reálne

- mechanické

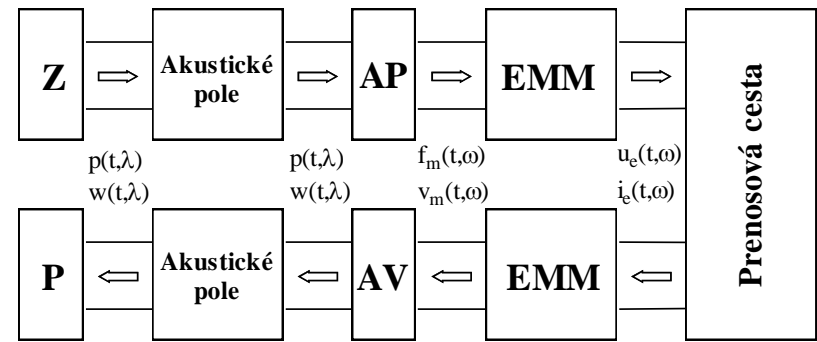
- kmitajúce telesá – ich povrchom sa prenáša kmitanie do okolitého prostredia
      - membrány, struny, ...
    - nárazy a trenie telies

- aerodynamické

- turbulentné prúdenie vzduchu (voľné resp. v trubici/štrbine)
    - obtekanie telies prúdom vzduchu

- teoretické (matematické modely)

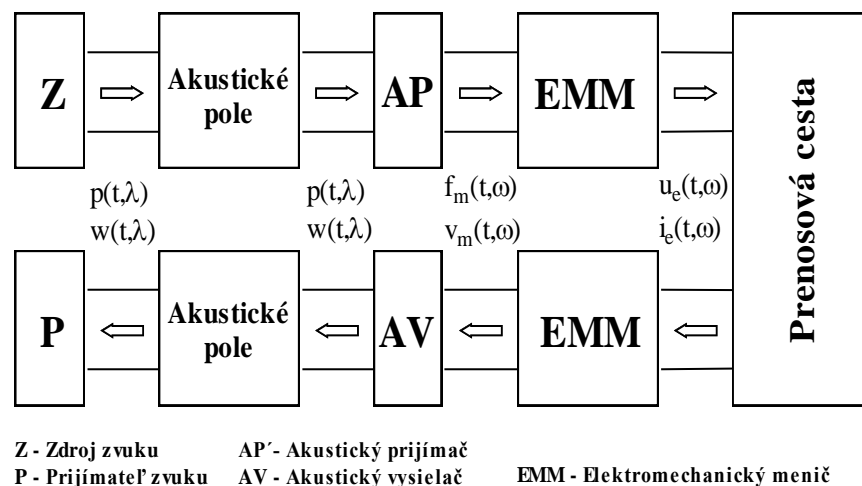
- pulzujúca guľa (bodový vysielateľ, vysielateľ nultého rádu)
  - akustický dipól (vysielateľ prvého rádu)
  - sférické vysielateľe druhého a vyšších rádov
  - rady a polia bodových zdrojov
  - priamkové, valcové a piestové vysielateľe



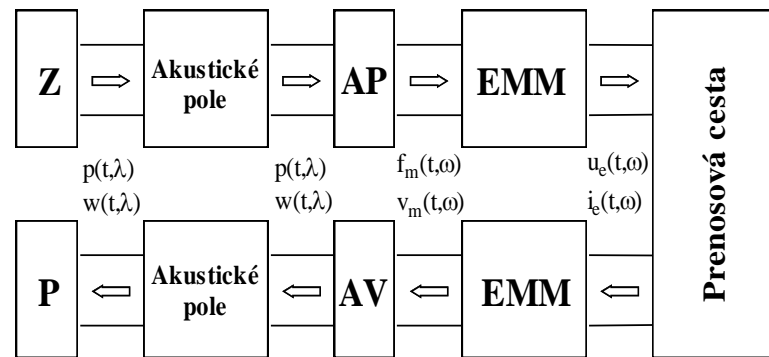
Z - Zdroj zvuku      AP - Akustický prijímač  
P - Prijímateľ zvuku      AV - Akustický vysielateľ      EMM - Elektromechanický menič

# Elektromechanický menič

- podľa fyzikálneho princípu činnosti
  - elektromagnetický
  - elektrodynamický
  - elektrostatický
  - piezoelektrický
  - ...
- podľa smeru premeny energie
  - jednosmerné (nerecipročné)
  - obojsmerné (recipročné)
- ...



# Prenosová cesta



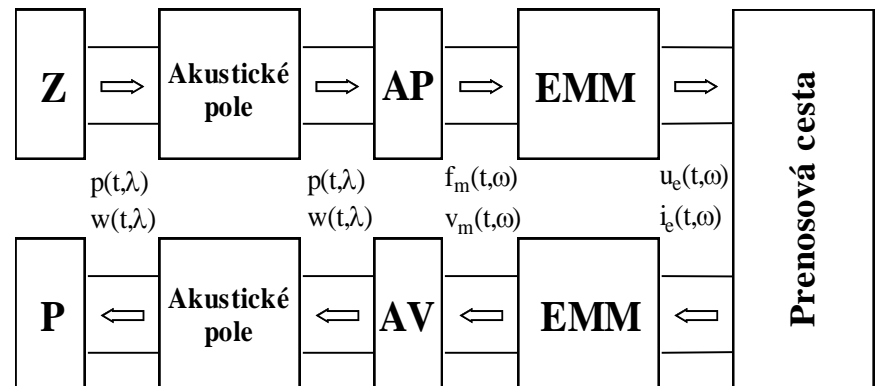
Z - Zdroj zvuku      AP - Akustický prijímač  
P - Prijímateľ zvuku      AV - Akustický vysielač      EMM - Elektromechanický menič

- obvody elektronického spracovania
  - zosilňovače
  - efektové procesory
  - AD/DA prevodníky
  - ...
- záznamové systémy
- drôtové a bezdrôtové prenosové cesty
- meracie prístroje
- riadiace a kontrolné systémy
- systémy automatického rozpoznávania reči
- rečové a hudobné syntetizátory
- ...



# Prijímateľ' zvuku: človek

- sluchové ústrojenstvo človeka – premena zvukového vlnenia na nervové vzruchy (elektrické signály) auditórnych nervov – **fyzilogická akustika**
- mozog – tvorba zvukového obrazu - **psychoakustika**



Z - Zdroj zvuku      AP' - Akustický prijímač  
P - Prijímateľ' zvuku      AV - Akustický vysielač      EMM - Elektromechanický menič

# Subsystémy zvukového systému

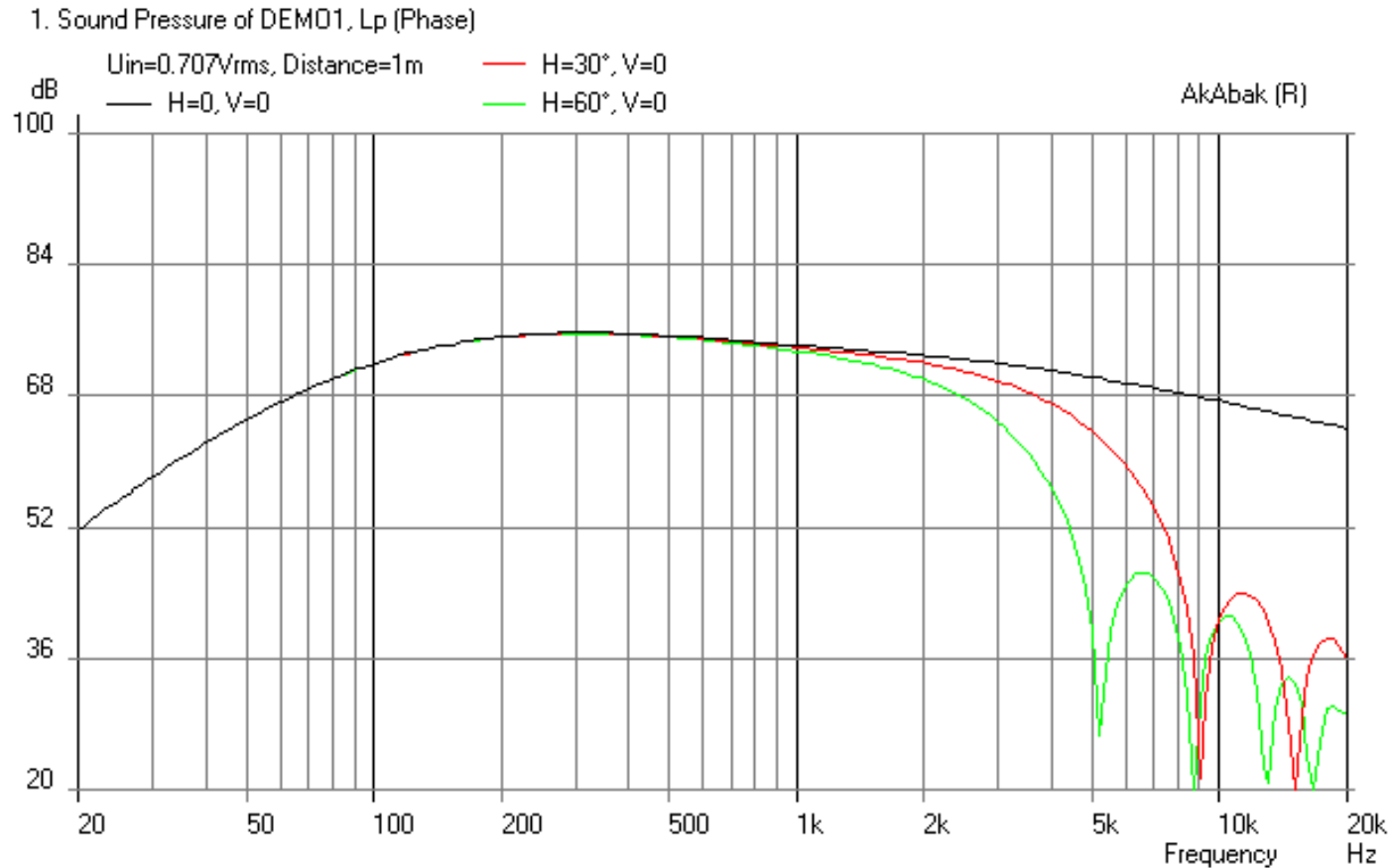
- **Ozvučovací/prizvučovací systém**
  - slúži na zásobovanie ohraničeného priestoru zvukovým signálom v reálnom čase
  - ak je v ozvučovanom priestore aj samotný zdroj zvuku, hovoríme o prizvučovacom systéme.
- **Systém na reprodukciu zvuku**
  - zosilňujú zvukový signál zo záznamového zariadenia alebo zo vzdialeného zdroja (hudobné prehrávače, bezdrôtový alebo drôtový rozhlas, ...);
- **Syntetizátorové systémy**
  - systémy s umelými zdrojmi zvuku (hudobné a hlasové syntetizátory)
  - "speech privacy systems", ktoré slúžia na maskovanie ľudskej reči šumom
- **Pamäťové systémy**
  - záznamové zvukové systémy všetkých druhov
- **Meracie systémy**
  - elektroakustické meracie prístroje (ale aj metódy merania), ktoré sa používajú na meranie parametrov zvukového systému tak v jeho elektronickej ako aj akustickej časti
  - môžu byť prenosné alebo môžu byť stálou súčasťou zvukového systému (v jeho kontrolnej a riadiacej časti);
- **Riadiace a kontrolné subsystémy**
  - používajú sa na kontrolu a riadenie iných častí zvukového systému (napr. automatická regulácia hlasitosti ovládaná hladinou šumu v miestnosti, systémy na zamedzenie akustickej spätnej väzby apod.)
- **Komunikačné subsystémy**
  - zabezpečujú prepojenie dvoch alebo viacerých lokálnych alebo vzdialených (remote) zvukových systémov
  - (prepojenie dvoch konferenčných miestností, audio-konferenčné systémy, prepojenie zvukových štúdií v rámci lokálnej alebo rozľahlej počítačovej siete a pod.).
- Iné

# Charakteristiky elektroakustického systému

- sú dôležité pri návrhu elektroakustického systému (resp. jeho častí)
- **charakteristiky zvukového vlnenia ako signálu**
  - časový priebeh signálu
  - nelineárne skreslenie
  - dynamický rozsah
  - frekvenčné spektrum signálu
  - štatistické charakteristiky (hustota pravdepodobnosti, momenty prvého a vyšších rádov, ...)
  - ...
- **charakteristiky čiastkových komponentov (podsystemov) a celková charakteristika systému**
  - impedančné charakteristiky (na vstupe a výstupe)
  - prenosové charakteristiky
    - amplitúdová (magnitúdová) frekvenčná charakteristika
    - fázová frekvenčná charakteristika
    - skupinové oneskorenie
  - prechodová a charakteristika
  - impulzová odpoveď
  - ...
- **iné dôležité charakteristiky**
  - vlastnosti materiálov (zvuková pohltivosť, vzduchová nepriezvučnosť, ...)
  - smerové charakteristiky ak. vysieláčov a prijímačov
  - účinnosť elektroakustických meničov
  - doba dozvuku v priestore a dozvuková vzdialenosť
  - charakteristiky sluchových a hlasových orgánov človeka

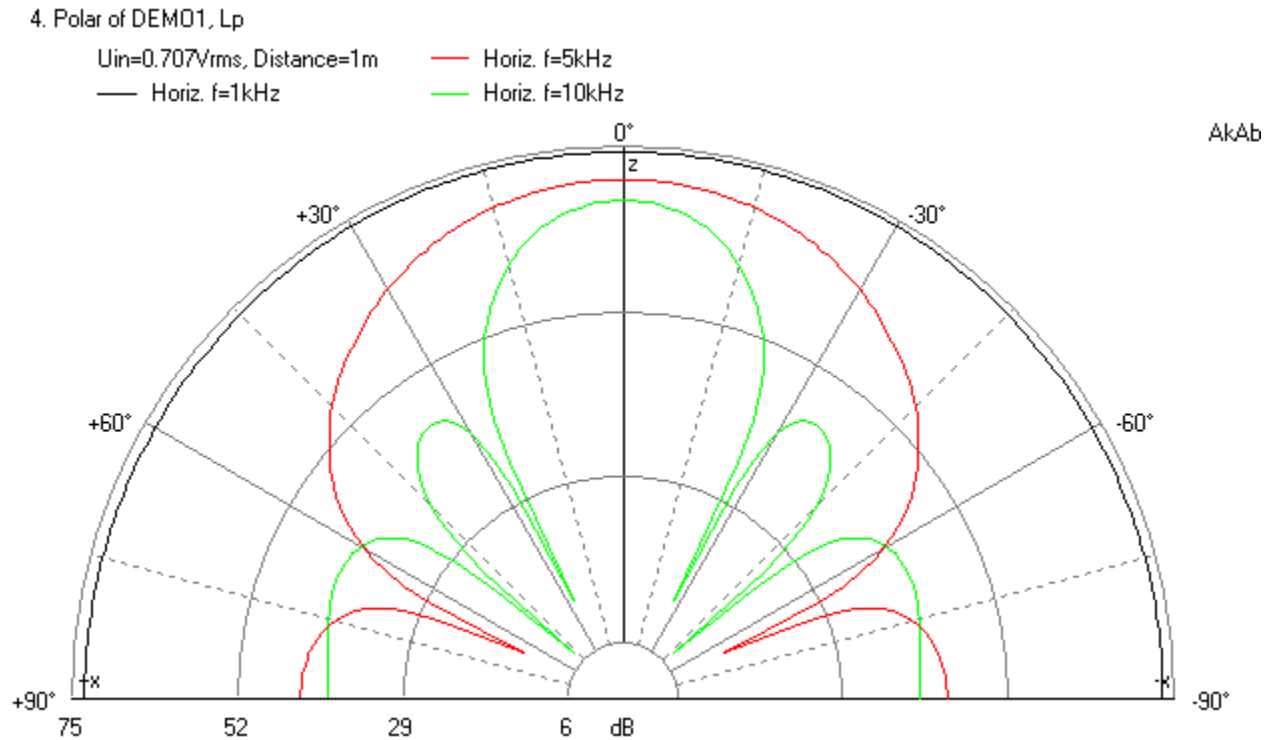
# Príklad

## Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici



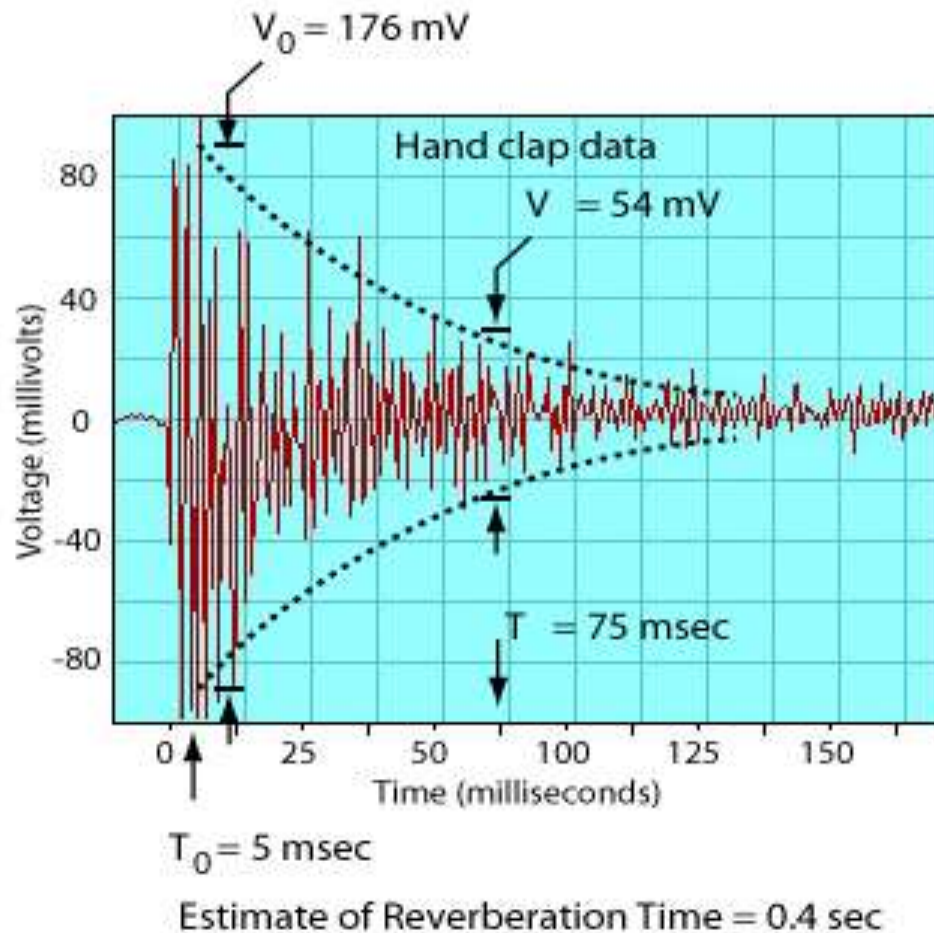
# Príklad

## Smerová charakteristika nízkotónového reproduktora



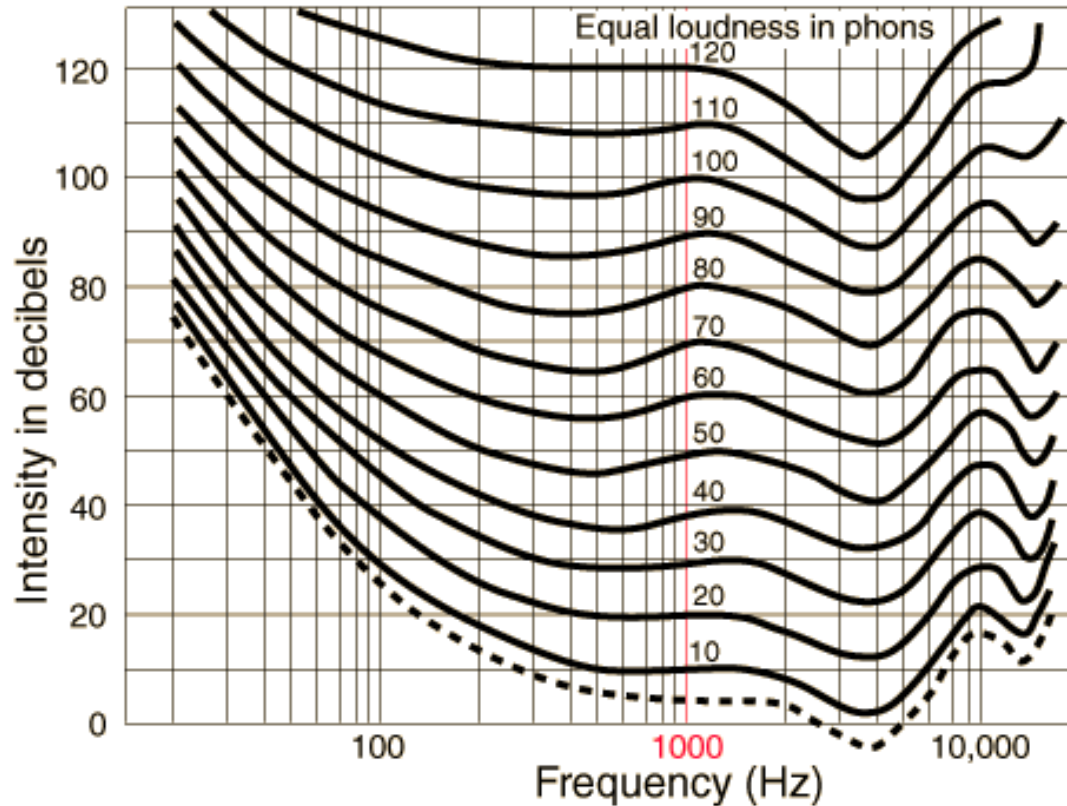
# Príklad

## Časový priebeh zvukového signálu pri meraní doby dozvuku



# Príklad

## Krivky rovnakej hlasitosti



- ukazujú rozdiel medzi hladinou akustického tlaku (intenzity) a spôsobom jeho vnímania (percepcie) sluchovým ústrojenstvom človeka
- uplatňujú sa aj pri technickom návrhu elektroakustických zariadení (fyziologické regulátory hlasitosti, moderné telefónne kodeky, kompresia audiosignálov, ...)

# Vybrané veličiny (charakteristiky) zvuku a zvukového pole (akustického) pole

- Rýchlosť zvuku
- Frekvencia a vlnová dĺžka zvuku
- Akustická výchylka a akustická rýchlosť
- Akustický tlak
- Vlnová impedancia (akustická impedancia)
- Akustický výkon a akustická intenzita



# Rýchlosť zvuku

- Je to rýchlosť, ktorou sa šíri zvukové vlnenie v pružnom prostredí
- Závisí od teploty, hustoty látky, ....
- Pre plyny (teda aj vzduch) platí:

$$c_0 = \sqrt{\frac{\chi p_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{\chi p_{00}}{\rho_0} (1 + \gamma T)} \doteq 331,8 + 0,61T \quad [\text{ms}^{-1}]$$

$\chi$  - Poissonova konštanta

$p_{00}$  - statický (barometrický) tlak vzduchu pri 0°C

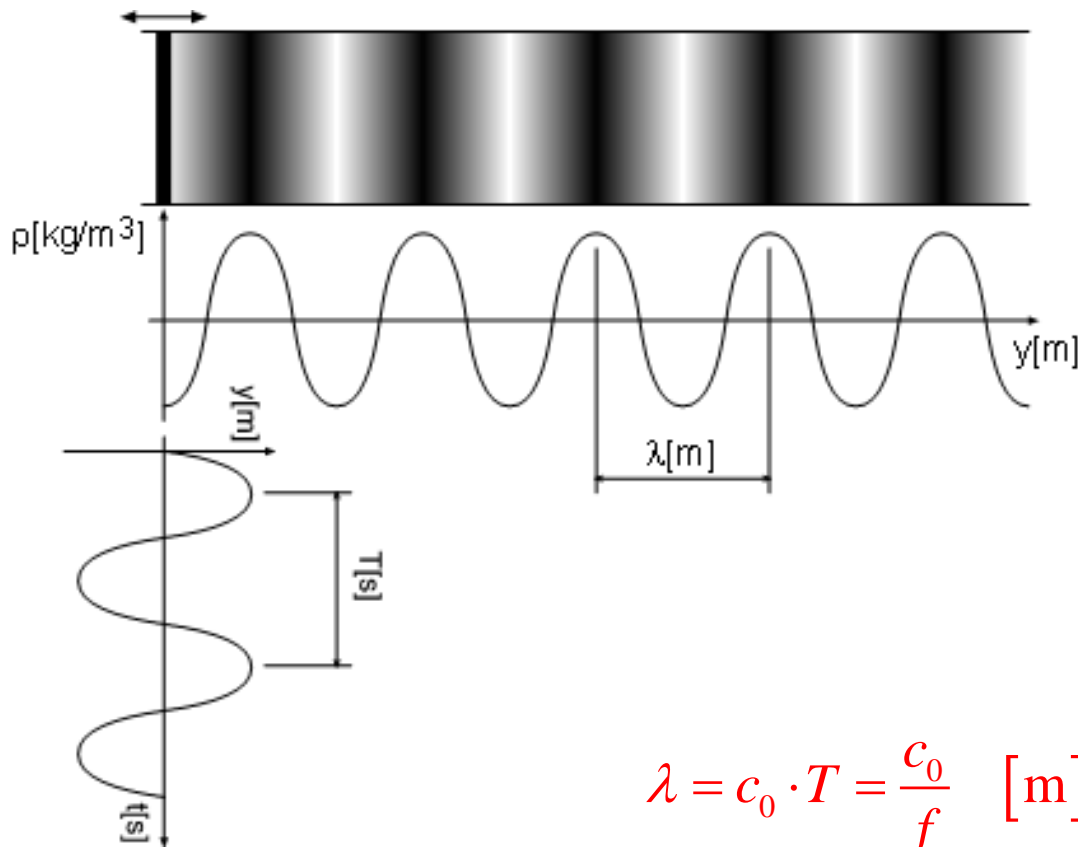
$\rho_0$  - hustota vzduchu pri 0°C

$\gamma$  - koeficient objemovej roztlačnosti plynov

$T$  - teplota v 0°C

| Teplota<br>[°C] | Rýchlosť zvuku<br>[m/s] |
|-----------------|-------------------------|
| 0               | 331,8                   |
| 5               | 334,9                   |
| 10              | 337,9                   |
| 15              | 341,0                   |
| 20              | 344,0                   |
| 25              | 347,0                   |
| 30              | 350,1                   |

# Frekvencia, perióda a vlnová dĺžka zvuku



$$\lambda = c_0 \cdot T = \frac{c_0}{f} \quad [\text{m}]$$

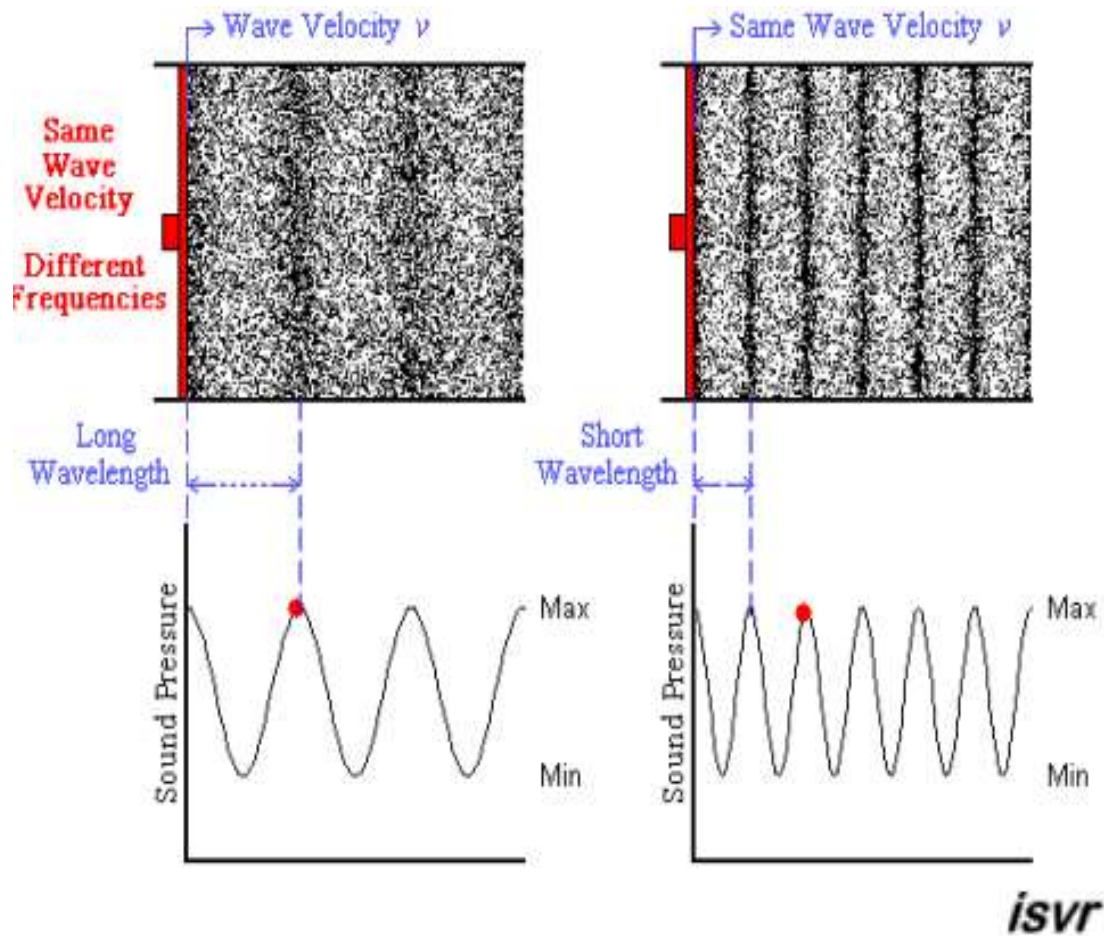
$\lambda$  [m] - vlnová dĺžka

$T$  [s] - perióda kmitania

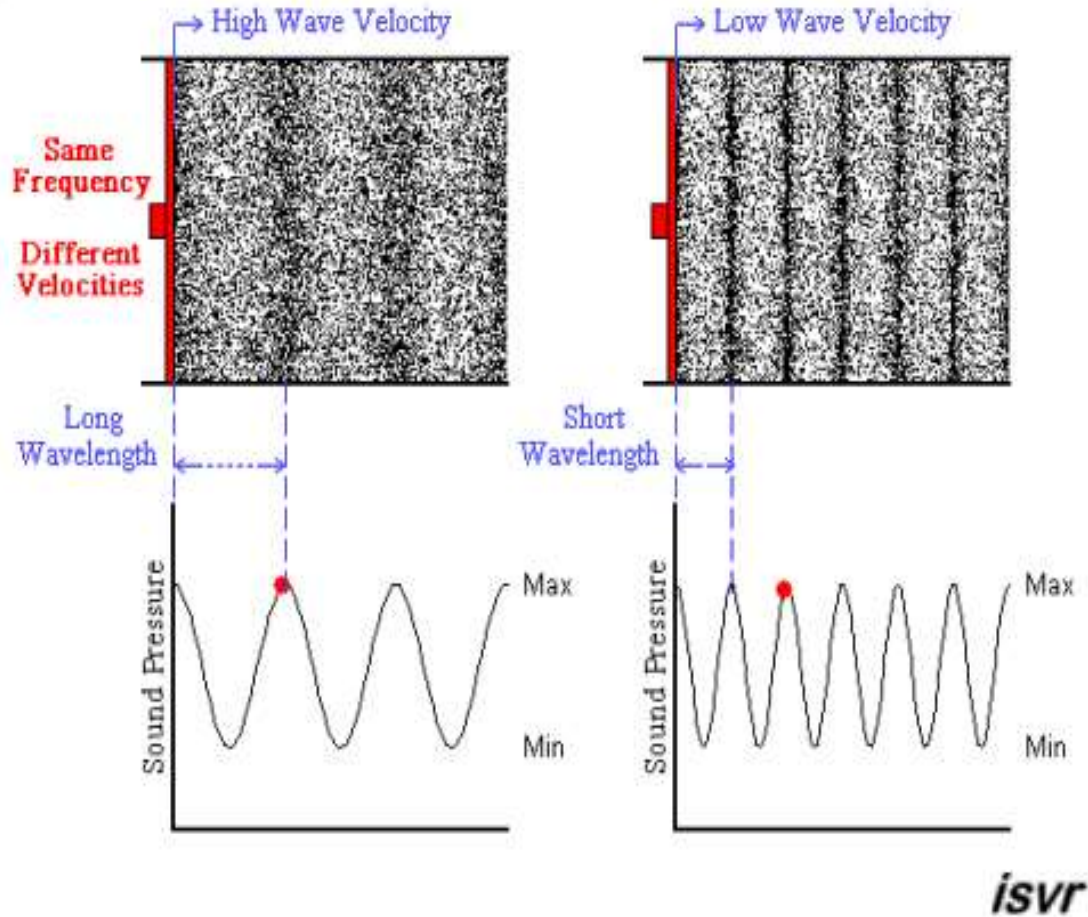
$f$  [Hz] - frekvencia

$c_0$  [m s<sup>-1</sup>] - rýchlosť zvuku

# Vlnové dĺžky zvukového vlnenia rôznych frekvencií v prostredí s rovnakou rýchlosťou šírenia zvuku

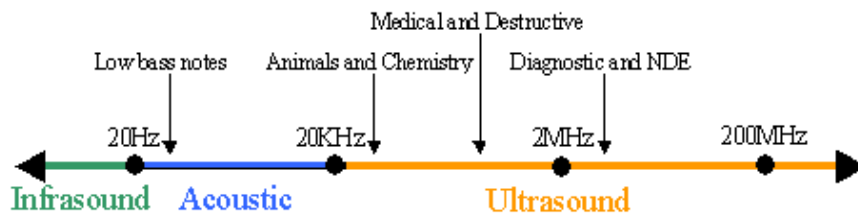
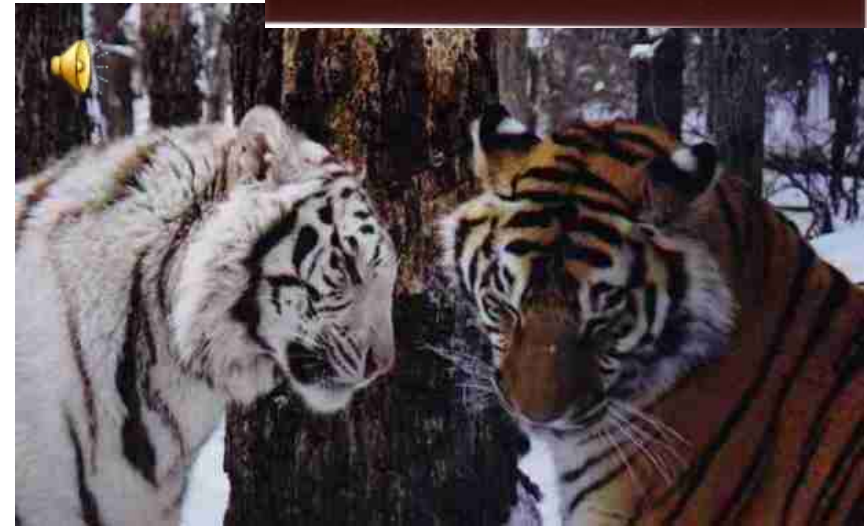


# Vlnové dĺžky zvukového vlnenia rovnakých frekvencií v prostrediach s rôznou rýchlosťou šírenia zvuku



# Zvuk, ultrazvuk a infrazvuk

- Infrazvuk
  - zemetrasenia, povodne, požiare, víchrice, automobilové a letecké motory
  - zvieratá (slony, tigre, žraloky, ...) (umožňuje komunikáciu na veľké vzdialenosti)
  - The Sonic Weapon of Vladimir Gavreau (infrazvukové píšťaly – organ)
- Ultrazvuk
  - zvieratá (psy, myši, delfíny, netopiere, hmyz, ...)
  - diagnostická sonografia v medicíne
  - nedeštruktívna priemyselná diagnostika
  - lokalizácia objektov (sonar)
  - ultrazvukové čistenie
  - komunikácia (modulovaný ultrazvuk) medzi ponorkami



zvuk:  $f \in \langle 16, 22000 \rangle \text{ Hz}$

$\lambda \in \langle 21.5 \text{ m}, 1.5 \text{ cm} \rangle$

ultrazvuk:  $f > 22000 \text{ Hz}$ ;  $\lambda < 1.5 \text{ cm}$

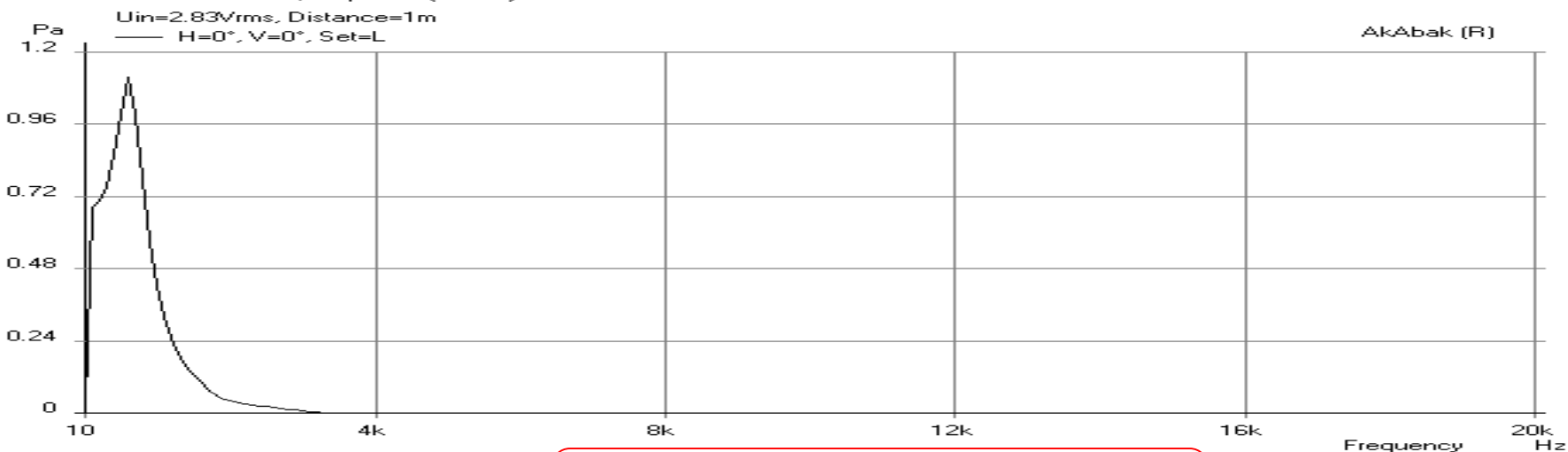
infrazvuk:  $f < 16 \text{ Hz}$ ;  $\lambda > 21.5 \text{ m}$

# Lineárna a nelineárne frekvenčné stupnice (škály)

- Prečo?
  - zobrazenie akustických signálov (amplitúdové/fázové frekv. charakteristiky, smerové charakteristiky, spektrogramy, ....),
  - návrh a konštrukcia elektroakustických zariadení (banky filtrov),
  - konštrukcia a ladenie hudobných nástrojov
- Aké stupnice?
  - hudobné stupnice – stupňovitý rad tónov, zoradených tak, aby ladili ľudskému sluchu – tzv. tónové sústavy
    - diatonické stupnice (durové, molové)
    - chromatická stupnica
    - iné stupnice
  - „matematické“ stupnice
    - logaritmická stupnica
    - oktávová, pol-oktávová a tretino-oktávová stupnica
  - „percepčné“ stupnice - odvodené od vlastností ľudského sluchu
    - melovská stupnica
    - Barkova stupnica

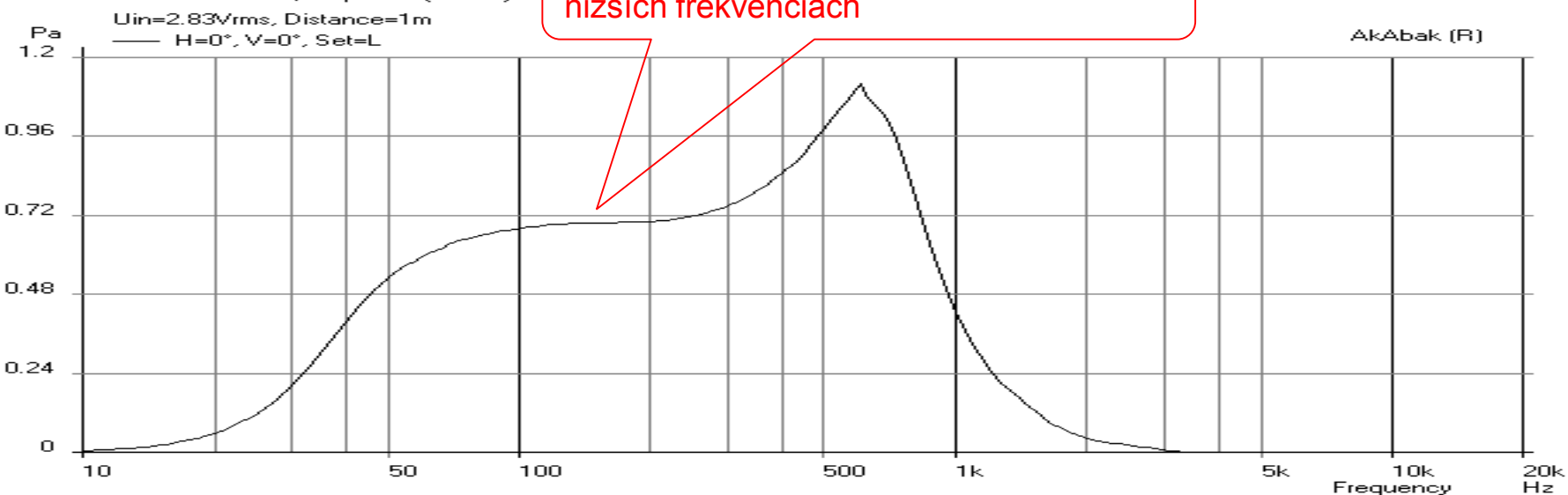
# Frekvenčná závislosť akustického tlaku, zobrazená na lineárnej a nelineárnej (logaritmickej) frekvenčnej stupnici

4. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



Logaritmická stupnica zvýrazní detaily pri nižších frekvenciách

3. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



# Oktávové frekvenčné pásma

- v profesionálnej zvukovej technike sa na analýzu a úpravu zvukových signálov často používajú frekvenčné analyzátory, ktoré sú založené na tzv. oktávových (tretinooktávových) frekvenčných filtroch
- stredné a hraničné frekvencie týchto filtrov upravuje norma ISO:

stredná frekvencia filtra:  $f_{n,c} = 1000 \times 2^{\frac{n}{q}}$   $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

$$q = \begin{cases} 1 & \text{- oktávová škála} \\ 2 & \text{- pol-oktávová škála} \\ 3 & \text{- tretino-oktávová škála} \end{cases}$$

medzné frekvencie filtra:  $\frac{f_{n,h}}{f_{n,d}} = 2^{\frac{1}{q}}$

$$f_{n,c} = \sqrt{f_{n,h} \cdot f_{n,d}}$$



# Príklad: Frekvenčné pásma oktávovej škály

$$q = 1$$

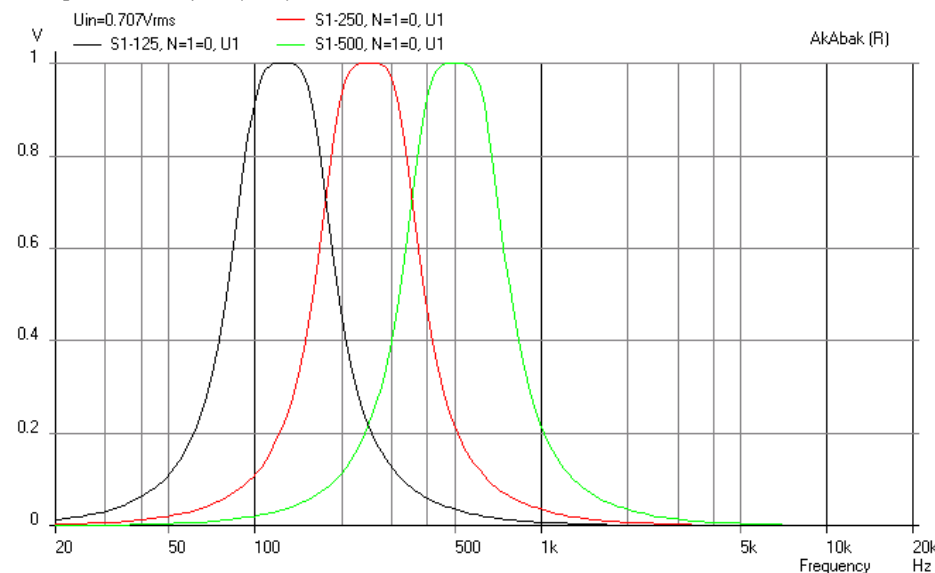
Centrálne frekvencie:

$$f_{n,c} = 1000 \times 2^n \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

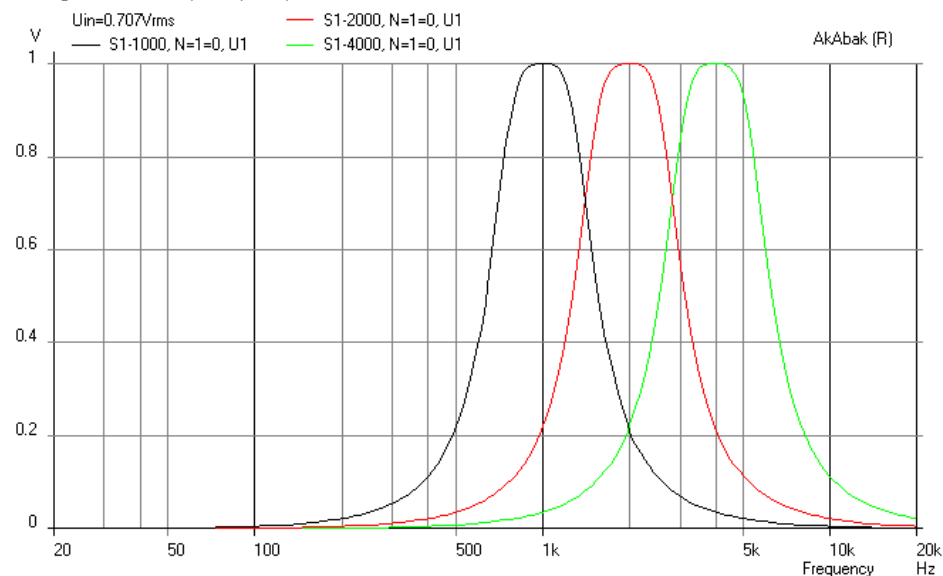
$$f_{n,c} = 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 \quad [\text{Hz}]$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{f_{n,h}}{f_{n,d}} = 2 \\ f_{n,c} = \sqrt{f_{n,h} \cdot f_{n,d}} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} f_{n,d} = \frac{f_{n,c}}{\sqrt{2}} \\ f_{n,h} = f_{n,c} \cdot \sqrt{2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} f_{n,d} = 88.5, 177, 353.5, 707, 1414, 2828.5, 5657, 11314 \quad \text{Hz} \\ f_{n,h} = 177, 353.5, 707, 1414, 2828.5, 5657, 11314, 22628 \quad \text{Hz} \end{array}$$

1. Voltage of OKTAVY, Amplitude (Phase)



2. Voltage of OKTAVY, Amplitude (Phase)



# Akustická výchylka – $x(t)$ , $y(t)$ , $z(t)$ , $r(t)$

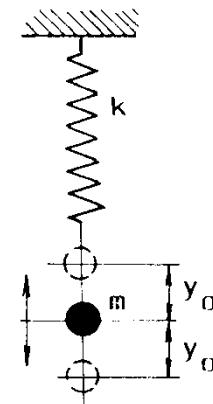
- Je to výchylka, o ktorú sa pri šírení zvukového vlnenia prostredím vychýľujú častice prostredia zo svojej rovnovážnej polohy
- akustická výchylka je striedavou veličinou
- je funkciou času a priestoru (pre zvukovú vlnu šíriacu sa v priestore)
- jej základnou jednotkou je [m]
- Typické hodnoty akustickej výchylky:
  - Maximálna výchylka  $\sim 40 \mu\text{m}$  ( $10^{-6}$ )
  - Normálna výchylka  $\sim 40 \text{ nm}$  ( $10^{-9}$ )
  - Minimálna výchylka  $\sim 80 \text{ pm}$  ( $10^{-12}$ )

# Lineárny oscilátor – matematický model pohybu hmotnej častice, prenášajúcej zvukovú vlnu

Pohyb hmotného bodu lineárneho oscilátora je periodický, prebiehajúci po priamke a jeho časový priebeh možno získať riešením diferenciálnej rovnice, ktorá je vlastne pohybovou rovnicou hmotného bodu oscilátora:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + s y = 0 \quad \text{kde } y \text{ [m]} \quad \text{výchylka} \quad (1)$$

|     |       |                           |
|-----|-------|---------------------------|
| $m$ | [kg]  | hmotnosť kmitajúceho bodu |
| $t$ | [s]   | čas                       |
| $s$ | [N/m] | tuhosť pružiny            |



Riešením tejto rovnice je výraz pre tzv. voľné kmity bez tlmenia:

$$y = y_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{kde } \omega_0 \text{ [1/s]} \quad \text{vlastný uhlový kmitočet } (\omega_0 = 2\pi f_0)$$

|             |     |                             |
|-------------|-----|-----------------------------|
| $\varphi_0$ | [-] | fázový uhol                 |
| $y_0$       | [m] | amplitúda výchylky kmitania |

Spätným dosadením rovnice (2) do (1) dostaneme informáciu o tzv. vlastnom kmitočte (frekvencii) oscilátora:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s}{m}} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}}$$

# Časový priebeh harmonického kmitania

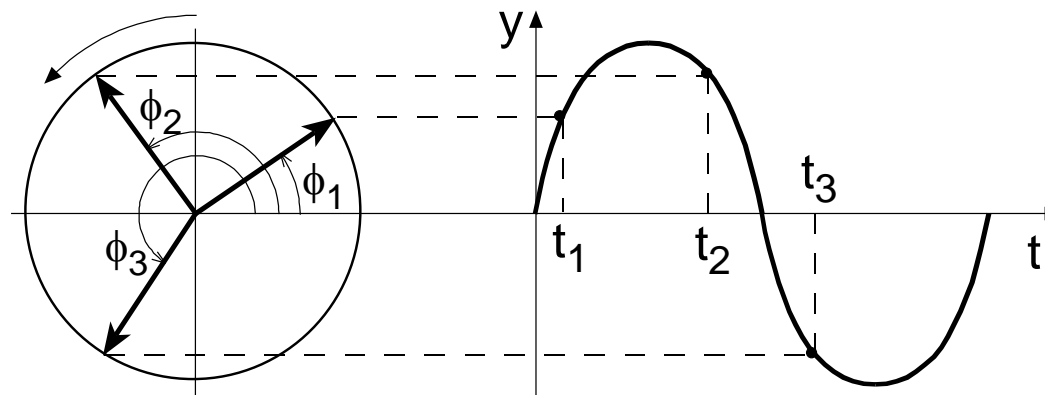
- Pohyb lineárne kmitajúceho hmotného bodu si môžeme predstaviť ako priemet vektora (fázora), otáčajúceho sa konštantnou uhlovou rýchlosťou.
- Okamžitú hodnotu výchylky môžeme vyjadriť ako reálnu alebo imaginárnu časť výrazu, popisujúceho vektor, rotujúci konštantnou uhlovou rýchlosťou

(Eulerov vzorec)

$$\left. \begin{array}{l} \cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi} \\ \varphi = \omega t + \varphi_0 \end{array} \right\} \Rightarrow \vec{y} = y_0 \cdot e^{j(\omega t + \varphi_0)}$$

$$y = \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}\} = y_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$y = \operatorname{Im}\{\mathbf{Y}\} = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$



# Akustická rýchlosť – $v(t)$

- (mechanická) rýchlosť, ktorou častice prostredia kmitajú okolo svojej rovnovážnej polohy
- striedavá veličina – funkcia času a priestoru
- základnou jednotkou je  $[\text{ms}^{-1}]$
- Typické hodnoty akustickej rýchlosti:
  - Maximálna  $\sim 0,25 \text{ m/s}$
  - Normálna  $\sim 0,25 \text{ mm/s}$
  - Minimálna  $\sim 0,05 \text{ }\mu\text{m/s}$

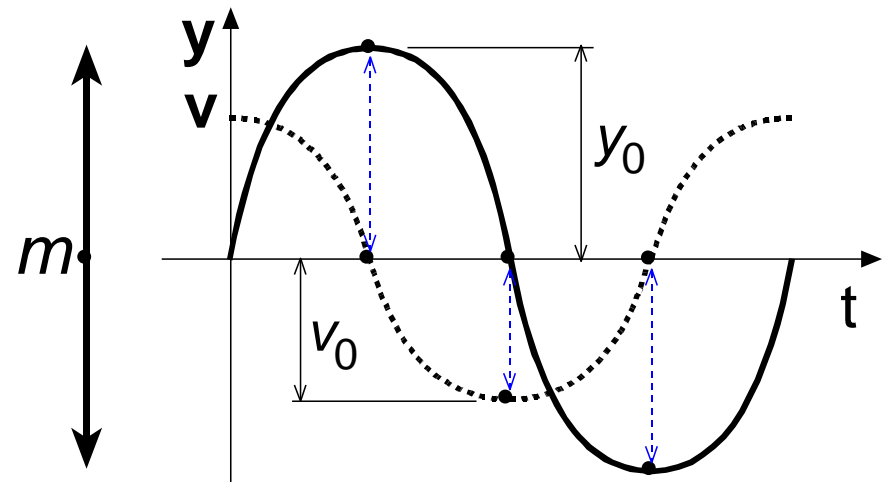
# Akustická rýchlosť – rýchlosť kmitania hmotného bodu

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{d\left(y_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)}\right)}{dt} = y_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)} \cdot j\omega = \omega y_0 e^{j\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)} = v_0 e^{j\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)}$$

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{d\left(y_0 \sin(\omega t + \varphi_0)\right)}{dt} = \omega y_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = v_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$$

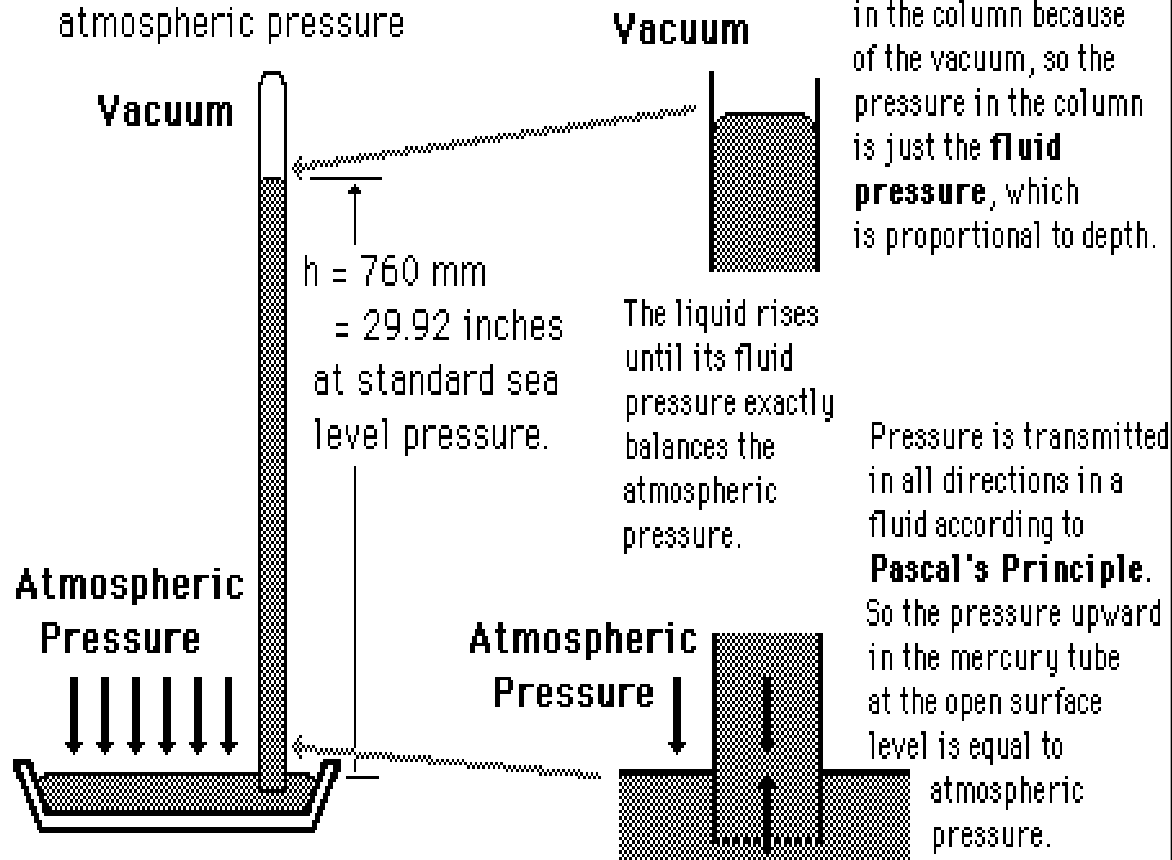
$$v_0 = \omega y_0 \quad \left[\text{ms}^{-1}\right]$$

- Fázový posun medzi rýchlosťou a výchylkou



# Atmosférický (statický) tlak

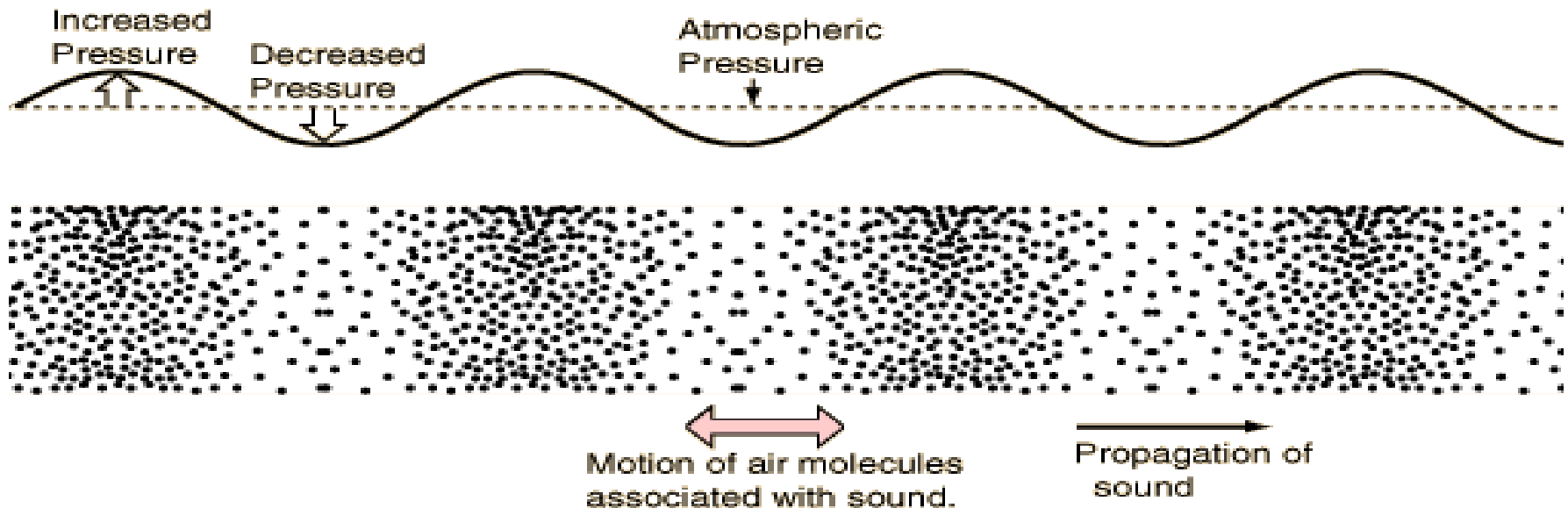
A device for measuring atmospheric pressure



- zvuková vlna sa šíri v prostredí, v ktorom pôsobí stály „barometrický“ tlak
- tlak, ktorý v danom mieste existuje aj bez prítomnosti zvukovej vlny
- barometrický tlak
- závisí od nadmorskej výšky a teploty vzduchu
- jednotkou je Pascal ( $1\text{Pa}=1\text{Nm}^{-2}=1\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
- označovanie  $p_0$  [ $\text{Nm}^{-2}$ ; Pa]
- priemerná hodnota pri bežnej teplote ( $20^\circ\text{C}$ ) je približne  $p_0=10^5$  Pa

# Akustický tlak - $p_A$ [ $\text{Nm}^{-2}$ ;Pa]

- rozdiel medzi okamžitou a referenčnou (strednou) hodnotou atmosférického tlaku v danom mieste prostredia
- striedavá veličina, t.j. nadobúda kladné i záporné hodnoty a je skalárom (matematicko-fyzikálne hľadisko)
- bežné hodnoty akustického tlaku:
  - Prah počutia  $\sim 10 \mu\text{Pa}$
  - Bežná konverzácia  $\sim 100 \text{mPa}$
  - Prah bolesti  $\sim 100 \text{Pa}$





# Hladina akustického tlaku

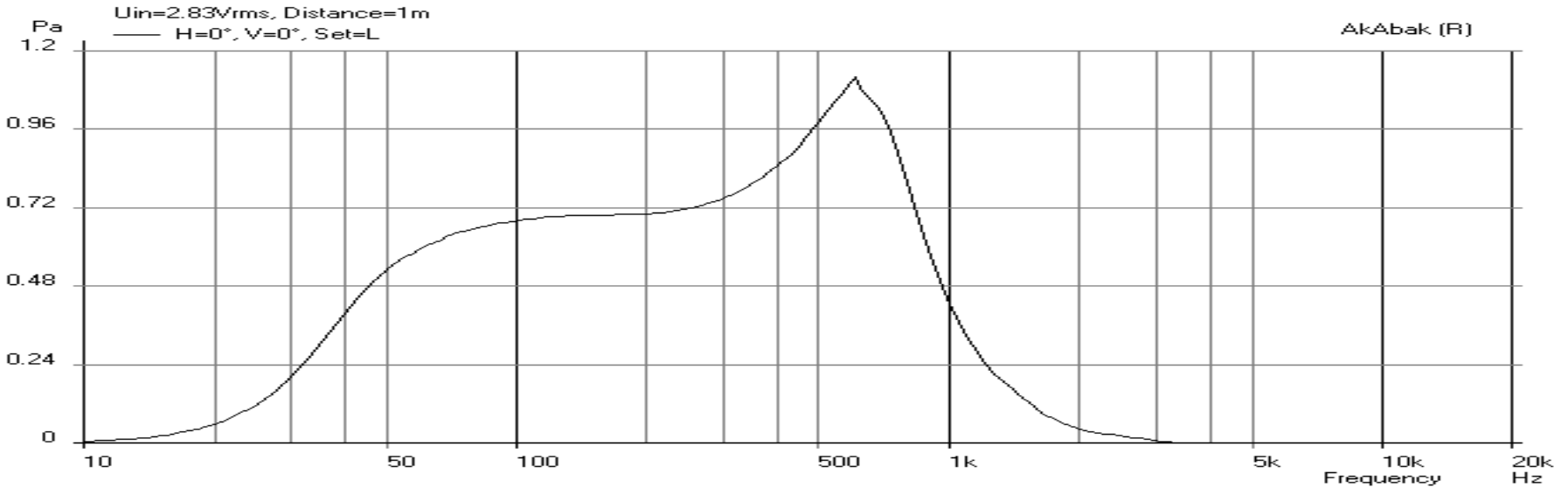
- Rozsah akustických tlakov, vyskytujúcich sa v prírode, od šepotu až po hluk turbín veľkých lietadiel je veľmi veľký a ľudské ucho vníma akustické tlaky v rozpätí od 0,00002 Pa až po 200 Pa.
- Pretože zápis ich hodnôt na lineárnej stupnici je málo prehľadný, používa sa v akustike častejšie **logaritmická** stupnica.
- Pri vyjadrovaní hodnôt akustického tlaku na logaritmickú stupnicu sa vychádza z logaritmu podielu akustického tlaku a jeho medzinárodne štandardizovanej **referenčnej** hodnoty.
- Takto získaná veličina sa nazýva hladina akustického tlaku. Vyjadruje sa v decibeloch.

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p_A}{p_{A,ref}} = 20 \cdot \log \frac{p_A}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \cdot \log p_A + 94 \quad [\text{Pa}; \text{dB}]$$

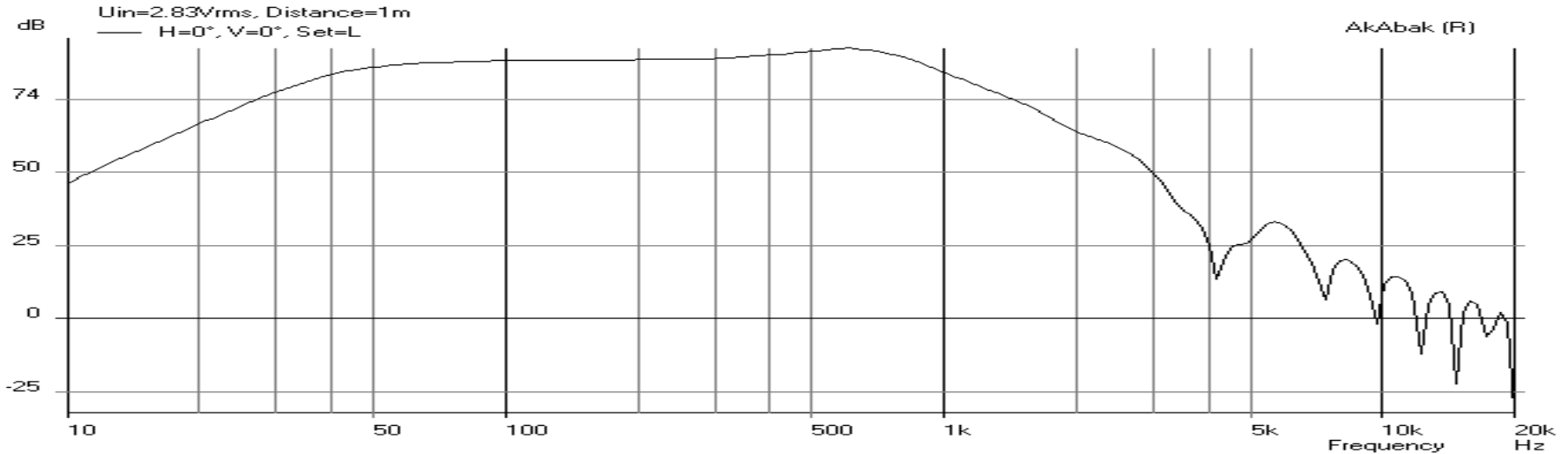
$$p_{A,ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

# Akustický tlak a hladina akustického tlaku, zobrazená na nelineárnej frekvenčnej stupnici

3. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



1. Sound Pressure of L12, Lp (Phase)



# Akustické tlaky a hladiny akustických tlakov

**Table 2-5.** Some common sound-pressure levels and sound pressures.

| Sound Source   | Sound pressure (Pa)          | Sound level* (decibels, A-weighted) |
|--|------------------------------|-------------------------------------|
| Saturn rocket  | 100,000.<br>(one atmosphere) | 194                                 |
| Ram jet  | 2,000.                       | 160                                 |
| Propeller aircraft   | 200.                         | 140                                 |
| Threshold of pain  |                              | 135                                 |
| Riveter  | 20.                          | 120                                 |
| Heavy truck  | 2.                           | 100                                 |
| Noisy office, }<br>Heavy traffic }                               | 0.2                          | 80                                  |
| Conversational speech  | 0.02                         | 60                                  |
| Private office   |                              | 50                                  |
| Quiet residence  | 0.0002                       | 40                                  |
| Recording studio   |                              | 30                                  |
| Leaves rustling  | 0.0002                       | 20                                  |
| Hearing threshold, good ears at frequency of maximum sensitivity |                              | 10                                  |
| Hearing threshold, excellent ears at frequency maximum response  | 0.00002                      | 0                                   |

\* Reference pressure (take your pick, these are identical):  
 20 micropascal ( $\mu\text{Pa}$ )  
 0.00002 pascal  
 $2 \times 10^{-5}$  newton/meter<sup>2</sup>  
 0.0002 dyne/cm<sup>2</sup> or microbar

Desaťnásobná zmena akustického tlaku = zmena hladiny akustického tlaku o 20 dB

# Vlnová (merná akustická) impedancia

- komplexný pomer akustického tlaku a akustickej rýchlosti zvukového vlnenia v danom prostredí
- komplexná veličina, ktorá vyjadruje reakciu prostredia na činnosť akustického zdroja
- jej reálna časť je **vlnový odpor prostredia** ktorého hodnota závisí iba od vlastností prostredia

$$z_V = \frac{p_A}{v} = r_V + j x_V \left[ \text{Nsm}^{-3}; \text{rayl} \right]$$

$$r_V = c_0 \cdot \rho_0 = 344 \cdot 1,18 = 406 \text{ Nsm}^{-3}$$

vlnový odpor

rýchlosť zvuku

merná hmotnosť (hustota) prostredia

# Akustický výkon

- pri šírení zvukového vlnenia dochádza k pôsobeniu akustického tlaku na plochu silou, ktorá je daná veľkosťou akustického tlaku a veľkosťou a tvarom uvažovanej plochy
- definícia akustického výkonu vychádza zo všeobecnej definície výkonu, ktorý možno matematicky vyjadriť v tvare skalárneho súčinu vektorov sily a akustickej rýchlosti, t.j.:

$$P_A = \vec{F} \cdot \vec{v} [\text{W}]$$

# Akustický výkon

$$P_A = p_A \cdot S \cdot v \cdot \cos(\psi)$$

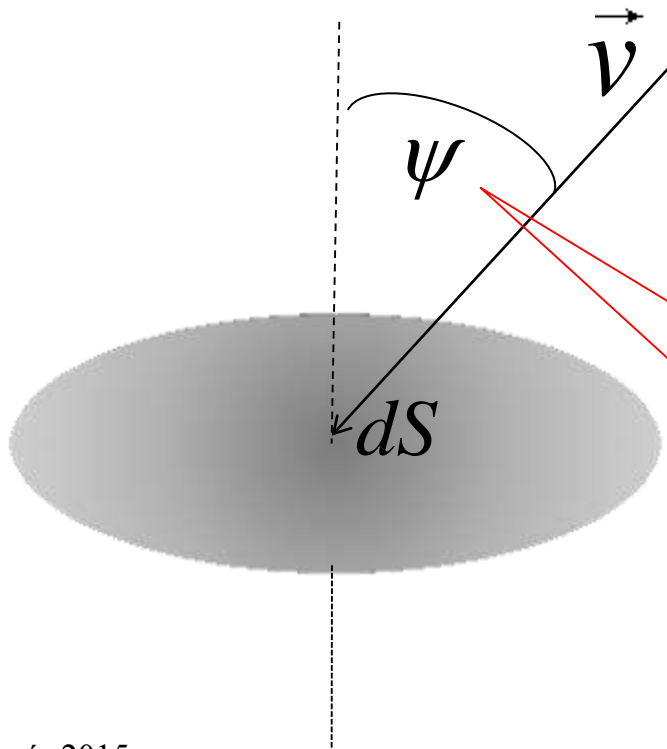
Ak akustický tlak pôsobí na plochu rovnomerne.

Ak akustický tlak pôsobiaci na plochu  $S$  sa spojitou mení (napr. v prípade zakrivenej plochy).

$$P_A = \iint_S dP_A$$

$$dP_A = p_A \cdot v \cdot \cos(\psi) \cdot dS$$

$\psi$  je uhol medzi normálou k ploche  $S$  a vektorom akustickej rýchlosti.



# Akustický výkon hudobných telies/nástrojov

| Instrument      | Peak Power (W) |
|-----------------|----------------|
| Full orchestra  | 70             |
| Large bass drum | 25             |
| Pipe organ      | 13             |
| Snare drum      | 12             |
| Cymbals         | 10             |
| Trombone        | 6              |
| Piano           | 0.4            |
| Trumpet         | 0.3            |
| Bass saxophone  | 0.3            |
| Bass tuba       | 0.2            |
| Double bass     | 0.16           |
| Piccolo         | 0.08           |
| Flute           | 0.06           |
| Clarinet        | 0.05           |
| French horn     | 0.05           |
| Triangle        | 0.05           |

(from Sivian et al.)

**TABLE 5-2** Peak Power of Musical Sources

# Akustická intenzita

- množstvo energie, prechádzajúce za jednotku času cez jednotku plochy, kolmej na smer šírenia zvukovej vlny
- akustický výkon prechádzajúci plochou  $S$ , orientovanou kolmo na smer šírenia akustickej energie:

$$I_A = \frac{dP_A}{dS} = \frac{p_A \cdot v \cdot dS}{dS} = p_A \cdot v \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

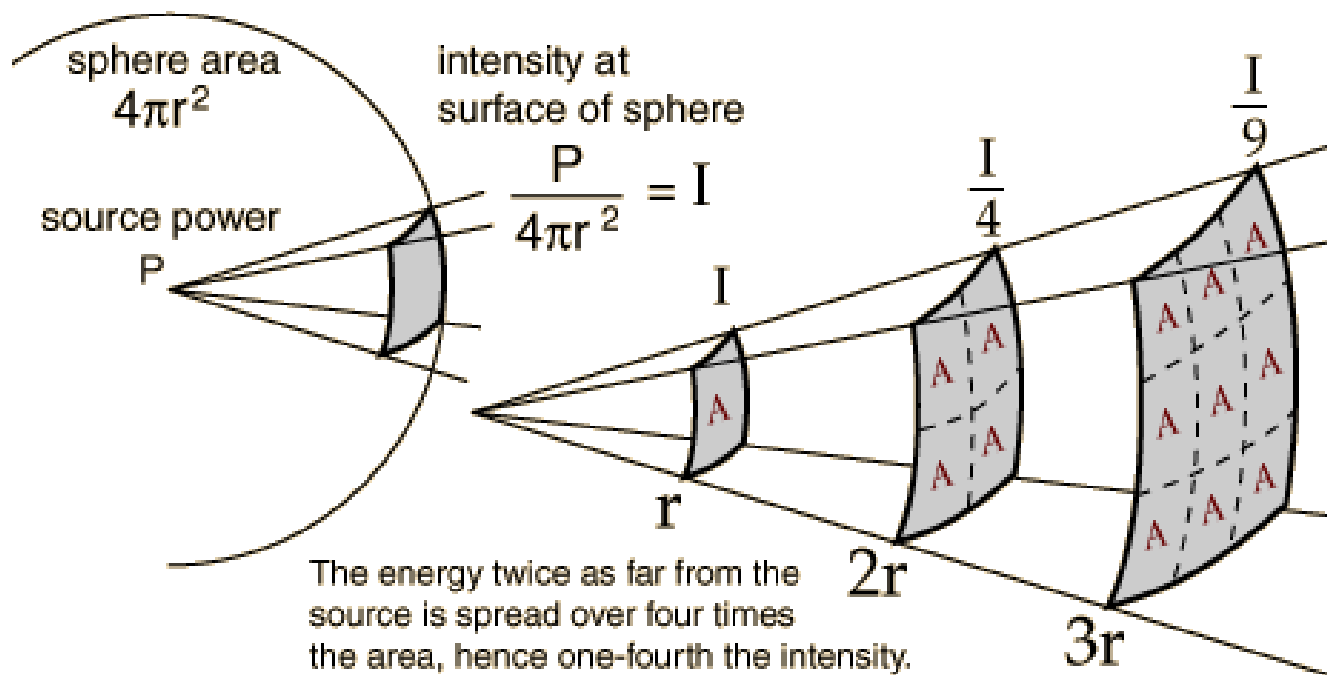


# Inverse square law

(Zákon inverzného štvorca)

- Pri konštantnom akustickom výkone zvukového zdroja zdroja zvuku a šírení zvuku všetkými smermi akustická intenzita s rastom vzdialenosti klesá.
- Ak predpokladáme rovnomerné všesmerové šírenie zvuku, t.j. guľovú zvukovú vlnu, akustická intenzita guľovej zvukovej vlny sa znižuje úmerne so štvorcom vzdialenosti

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{\frac{P_A}{4\pi r_1^2}}{\frac{P_A}{4\pi r_2^2}} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$



# Hladina akustického výkonu a intenzity

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P_A}{P_{A,ref}} = 10 \cdot \log(P_A) + 120 \quad [\text{W}; \text{dB}]$$

$$P_{A,ref} = 10^{-12} \text{ W}$$

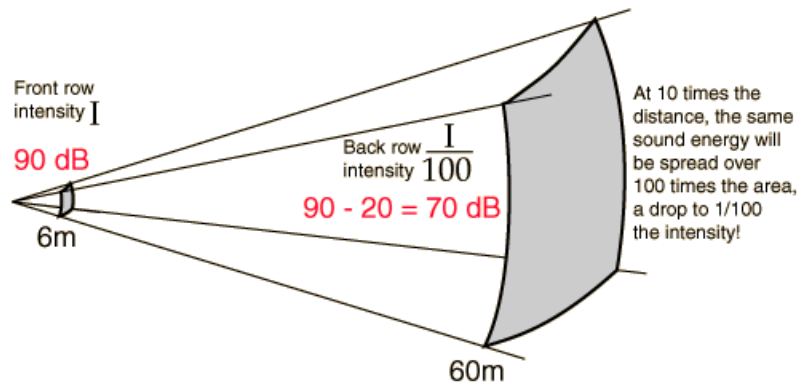
$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I_A}{I_{A,ref}} = 10 \cdot \log(I_A) + 120 \quad [\text{Wm}^{-2}; \text{dB}]$$

$$I_{A,ref} = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

# Inverse square law

- Desaťnásobné zväčšenie vzdialenosti znamená pokles hladiny akustickej intenzity o 20dB
- Dvojnásobné zväčšenie vzdialenosti znamená pokles hladiny akustickej intenzity o 6dB

$$L_{I1} - L_{I2} = 10 \cdot \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} = \begin{cases} 20 \text{ dB} & r_2 = 10r_1 \\ 6 \text{ dB} & r_2 = 2r_1 \end{cases}$$



# Kontrolné otázky

1. Vymenujte aspoň **tri charakteristické veličiny** zvuku resp. akustického poľa
2. Referenčná hodnota **akustického tlaku**, zodpovedajúca približne prahu počutia je:
  - a)  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa
  - b) 94 dB
  - c)  $10^{-12}$  W
3. Čo je to **oktáva**
4. Aký je rozdiel medzi **rýchlosťou** zvuku a **akustickou rýchlosťou**
5. Čo platí v akustickom poli s **viacerými** zdrojmi zvuku

