



Elektroakustika

L01: Základné pojmy

doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.

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

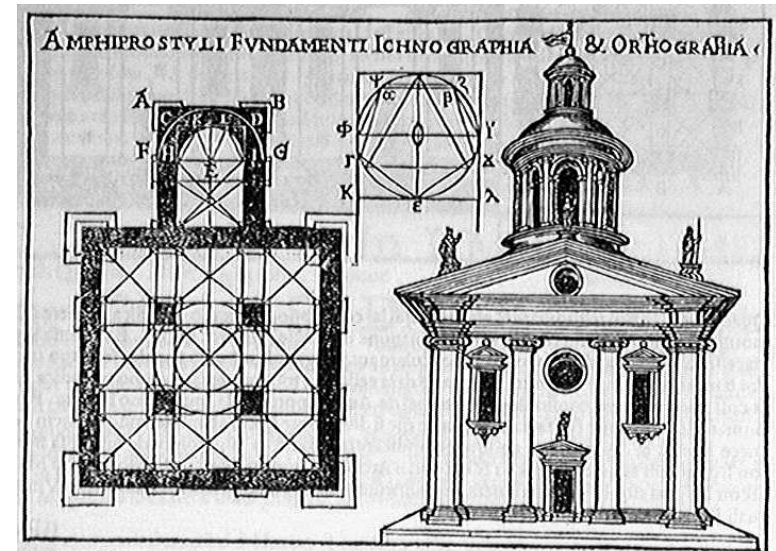
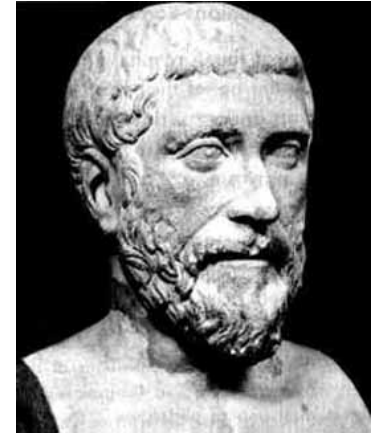
Akustika

- 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
 - ...



História akustiky: Prvé experimenty

- Vznik akustiky je všeobecne spájaný s gréckym filozofom Pythagorasom (6. stor. BC), ktorý experimentálne skúmal vzťah medzi výškou tónu a dĺžkou strún hudobných nástrojov – definoval prvú hodobnú stupnicu (Pythagorova tónová stupnica).
- Aristoteles (4. stor. BC) formuloval hypotézu, že zvuk sa šíri vo vzduchu prostredníctvom pohybu malých, neviditeľných častíc. Mylne sa napríklad domnieval, že vysoké frekvencie sa šíria rýchlejšie než nízke.
- Rímsky architekt Vitruvius (1. stor. BC) skúmal mechanizmus šírenia zvukových vln a prispel podstatnou mierou k metodike akustického návrhu vtedajších divadiel.
- Rímsky filozof Boethius (6. stor. AD) – zaoberal sa akustikou hudby – prvýkrát sformuloval predpoklad, že percepcia výšky tónu (subjektívny vnem) súvisí s frekvenciou (fyzikálna vlastnosť)



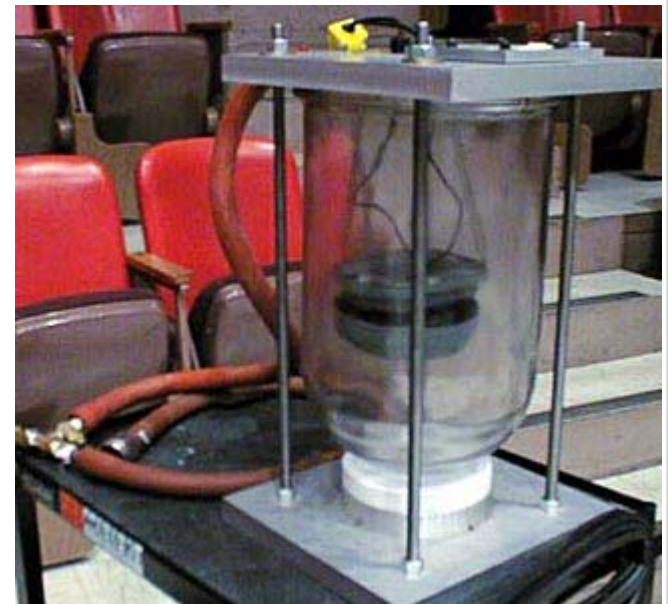
História akustiky: Prvé experimenty

- Galileo Galilei (1564–1642) – aplikoval **vedecké** metódy pri štúdiu vibrácií telies a vzťahu medzi výškou tónu a frekvenciou
- Francúzsky matematik Marin Mersenne (1588-1648) študoval vibrácie strún – jeho publikácia Harmonicorum Libri (1636) je základom modernej hudobnej akustiky
- Anglický fyzik Robert Hooke (1635-1703) zostrojil mechanický prístroj, pomocou ktorého dokázal generovať zvuk známej frekvencie – dokázal tak priradiť frekvenčnú stupnicu k hudobnej stupnici
- Na prácu Roberta Hookea nadviazal francúzsky fyzik Félix Savart (1791-1841) zostrojením dokonalejšieho „Savartovho kolesa“
- Joseph Sauveur (1653-1716) detailne študoval vzťah medzi výškou tónu a frekvenciou zvukových vln, generovaných strunami, navrhov základ akustickej terminológie a ako prvý navrhol názov akustika pre vedný odbor



“Bell-in-vacuum” experiment

- jeden z najzaujímavejších a najkontroverznejších historických experimentov, ktorým sa doposiaľ demonštruje prenos zvuku vzduchom
- odčerpávaním vzduchu sa postupne znižuje hlasitosť zvončeka, umiestneného v sklenenej banke
- až do 17. storočia mnoho filozofov a vedcov verilo, že nositeľmi zvuku sú neviditeľné častice, ktoré sa šíria od zdroja zvuku do priestoru
- koncepcia zvuku ako vlnenia zmenila tento pohľad, nobolo to však dokázané experimentálne
- „bell-in-vacuum experiment“ bol prvýkrát uskutočnený Athanasiom Kircherom, nemeckým učiteľom, ktorý ho opísal v knihe Musurgia Universalis (1650)
- Kircher zistil, že aj po odčerpaní vzduchu z banky bol zvuk zvončeka počuteľný, na základe čoho skonštatoval, že vzduch na prenos zvuku nie je potrebný
- v skutočnosti bol zvuk počuteľný preto, že vzduch bol odčerpaný nedostatočne – v banke nebol absolútne vákuum
- v roku 1660 anglo-írsky vedec Robert Boyle zlepšil technológiu vákuovej pumpy, pomocou ktorej dosiahol zníženie počuteľnosti zvuku pod prah počutia
- na základe toho správne skonštatoval, že na prenos zvuku je potrebné nejaké médium – vzduch
- hoci tento záver bol korektný, jeho zdôvodnenie bolo zavádzajúce
- dokonca aj so súčasnými pumpami sa nedá dosiahnuť absolútne vákuum a súčasné experimenty potvrdzujú, že množstvo vzduchu, ktorý zostane vo vákuovej banke je na prenos zvuku postačujúci
- skutočným dôvodom zníženia hladiny zvuku bolo (a je) impedančné neprispôsobenie medzi zvončekom a vzduchom na jednej strane a vzduchom a stenou banky na druhej strane, spôsobené veľkým rozdielom v hustotách prostredí (zvonček, vzduch, stena banky, vzduch), vďaka čomu bol prenos zvuku medzi týmito prostrediami veľmi neefektívny
- nehľadiac na to, tento experiment prispel rozhodujúcou mierou k tomu, že zvuk sa začal považovať za vlnenie a nie „žiarenie“



Measuring the speed of sound

- Once it was recognized that sound is in fact a wave, measurement of the speed of sound became a serious goal.
- In the 17th century, the French scientist and philosopher **Pierre Gassendi** made the earliest known attempt at measuring the speed of sound in air. Assuming correctly that the speed of light is effectively infinite compared with the speed of sound, Gassendi measured the time difference between spotting the flash of a gun and hearing its report over a long distance on a still day. Although the value he obtained was too high — about 478.4 metres per second — he correctly concluded that the speed of sound is independent of frequency.
- In the 1650s, Italian physicists **Giovanni Alfonso Borelli** and **Vincenzo Viviani** obtained the much better value of 350 metres per second using the same technique.
- Their compatriot **G.L. Bianconi** demonstrated in 1740 that the speed of sound in air increases with **temperature**. The earliest precise experimental value for the speed of sound, obtained at the Academy of Sciences in Paris in 1738, was 332 metres per second—incredibly close to the presently accepted value, considering the rudimentary nature of the measuring tools of the day. A more recent value for the speed of sound, 331.45 metres per second, was obtained in 1942; it was amended in 1986 to 331.29 metres per second at 0° C.
- The speed of sound in **water** was first measured by Daniel Colladon, a Swiss physicist, in 1826. Colladon came up with a speed of 1,435 metres per second at 8° C; the presently accepted value interpolated at that temperature is about 1,439 metres per second.
- Two approaches were employed to determine the velocity of sound in solids. In 1808 Jean-Baptiste Biot, a French physicist, conducted direct measurements of the speed of sound in 1,000 metres of iron pipe by comparing it with the speed of sound in air. A better measurement had earlier been carried out by a German, Ernst Florenz Friedrich Chladni, using analysis of the nodal pattern in standing-wave vibrations in long rods.

Rýchlosť zvuku

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

$$c_0 = \sqrt{\frac{\chi P_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{\chi P_{00}}{\rho_0} (1 + \gamma T)} \doteq 331,8 + 0,61T \quad [\text{ms}^{-1}]$$

χ - Poissonova konštanta

P_{00} - statický tlak vzduchu pri 0°C

ρ_0 - hustota vzduchu pri 0°C

γ - koeficient objemovej rozťažnosti plynov

T - teplota v 0°C

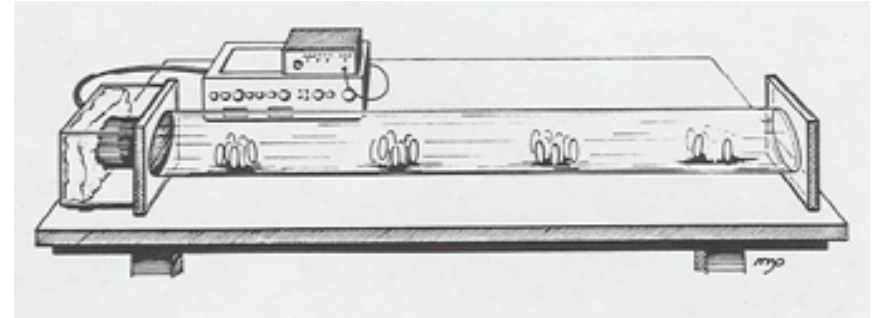
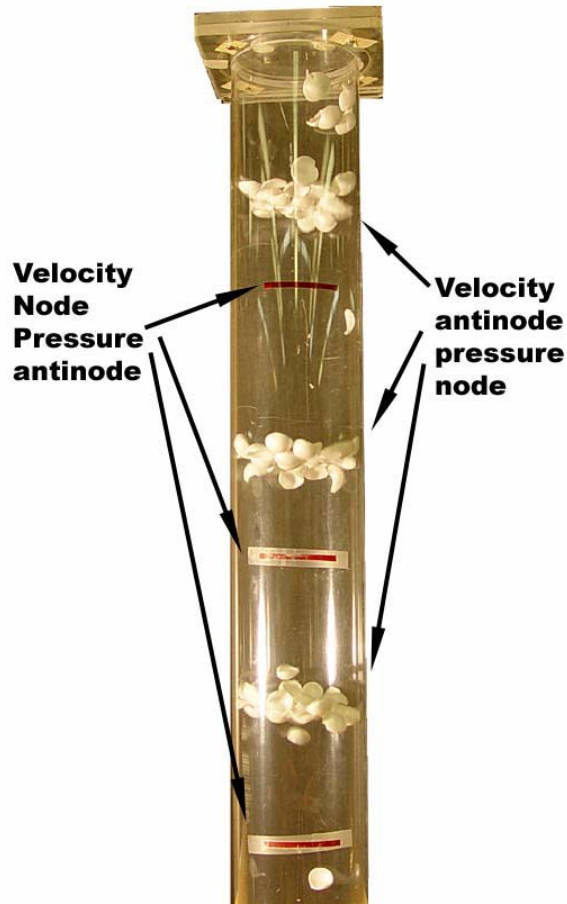
Teplota [°C]	Rýchlosť zvuku [m/s]
0	331,8
5	334,9
10	337,9
15	341,0
20	344,0
25	347,0
30	350,1

Matematické metódy – základy modernej akustiky I

- Simultaneous with these early studies in acoustics, theoreticians were developing the mathematical theory of waves required for the development of modern physics, including acoustics.
- In the early 18th century, the English mathematician **Brook Taylor** developed a **mathematical theory of vibrating strings** that agreed with previous experimental observations, but he was not able to deal with vibrating systems in general without the proper mathematical base. This was provided by **Isaac Newton** of England and **Gottfried Wilhelm Leibniz** of Germany, who, in pursuing other interests, independently developed the theory of calculus, which in turn allowed the derivation of the **general wave equation** by the French mathematician and scientist **Jean Le Rond d'Alembert** in the 1740s.
- The Swiss mathematicians **Daniel Bernoulli** and **Leonhard Euler**, as well as the Italian-French mathematician **Joseph-Louis Lagrange**, further applied the new equations of calculus to waves in strings and in the air.
- In the 19th century, **Siméon-Denis Poisson** of France extended these developments to **stretched membranes**, and the German mathematician **Rudolf Friedrich Alfred Clebsch** completed Poisson's earlier studies.
- A German experimental physicist, **August Kundt**, developed a number of important techniques for investigating properties of sound waves. These included the **Kundt's tube**, discussed below.
- One of the most important developments in the 19th century involved the theory of **vibrating plates**. In addition to his work on the speed of sound in metals, **Chladni** had earlier introduced a technique of observing **standing-wave patterns** on vibrating plates by sprinkling sand onto the plates—a demonstration commonly used today. Perhaps the most significant step in the theoretical explanation of these vibrations was provided in 1816 by the French mathematician **Sophie Germain**, whose explanation was of such elegance and sophistication that errors in her treatment of the problem were not recognized until some 35 years later, by the German physicist **Gustav Robert Kirchhoff**.

Kundtova trubica

Styrofoam chips levitating in a vertical Kundt's tube



- na jednom konci zatvorená a na druhý koniec sa privádza zvukový signál
- v trubici dochádza k superpozícii priamej a odrazenej vlny
- vhodnou voľbou vlnovej dĺžky (frekvencie) a dĺžky trubice vzniká tzv. stojatá vlna
- vznik stojatej vlny je pozorovateľný pomocou vznášajúcich sa kúskov veľmi ľahkej hmoty, koncentrovaných na miestach, kde sa nachádzajú uzly akustického tlaku

Matematické metódy – základy modernej akustiky II

- The analysis of a complex periodic wave into its **spectral components** was theoretically established early in the 19th century by **Jean-Baptiste-Joseph Fourier** of France and is now commonly referred to as the Fourier theorem.
- The German physicist **Georg Simon Ohm** first suggested that the ear is sensitive to these spectral components; his idea that the ear is sensitive to the amplitudes but not the phases of the harmonics of a complex tone is known as **Ohm's law of hearing** (distinguishing it from the more famous Ohm's law of electrical resistance).
- **Hermann von Helmholtz** made substantial contributions to understanding the mechanisms of hearing and to the psychophysics of sound and music. His book *On the Sensations of Tone As a Physiological Basis for the Theory of Music* (1863) is one of the classics of acoustics. In addition, he constructed a set of resonators, covering much of the audio spectrum, which were used in the spectral analysis of musical tones.
- The Prussian physicist **Karl Rudolph Koenig** designed many of the instruments used for research in hearing and music, including a frequency standard and the **manometric flame**. The flame-tube device, used to render standing sound waves “visible,” is still one of the most fascinating of physics classroom demonstrations.
- The English physical scientist **John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh**, carried out an enormous variety of acoustic research; much of it was included in his two-volume treatise, **The Theory of Sound**, publication of which in 1877–78 is now thought to mark the beginning of modern acoustics. Much of Rayleigh's work is still directly quoted in contemporary physics textbooks.
- The study of ultrasonics was initiated by the American scientist **John LeConte**, who in the 1850s developed a technique for observing the existence of ultrasonic waves with a gas flame. This technique was later used by the British physicist **John Tyndall** for the detailed study of the properties of sound waves.
- The **piezoelectric effect**, a primary means of producing and sensing ultrasonic waves, was discovered by the French physical chemist **Pierre Curie** and his brother **Jacques** in 1880. Applications of ultrasonics, however, were not possible until the development in the early 20th century of the electronic oscillator and amplifier, which were used to drive the piezoelectric element.
- Among **20th-century innovators** were the American physicist **Wallace Sabine**, considered to be the originator of modern architectural acoustics, and the Hungarian-born American physicist **Georg von Békésy**, who carried out experimentation on the ear and hearing and validated the commonly accepted place theory of hearing first suggested by Helmholtz. Békésy's book **Experiments in Hearing**, published in 1960, is the magnum opus of the modern theory of the ear.

Manometric flame

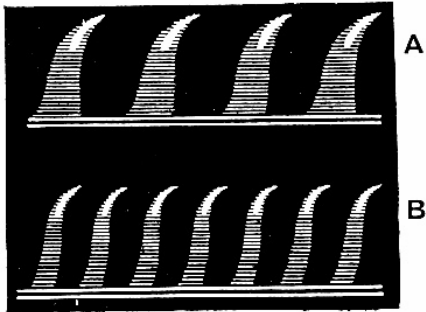


FIG. 653.—Manometric flame seen in revolving mirror.

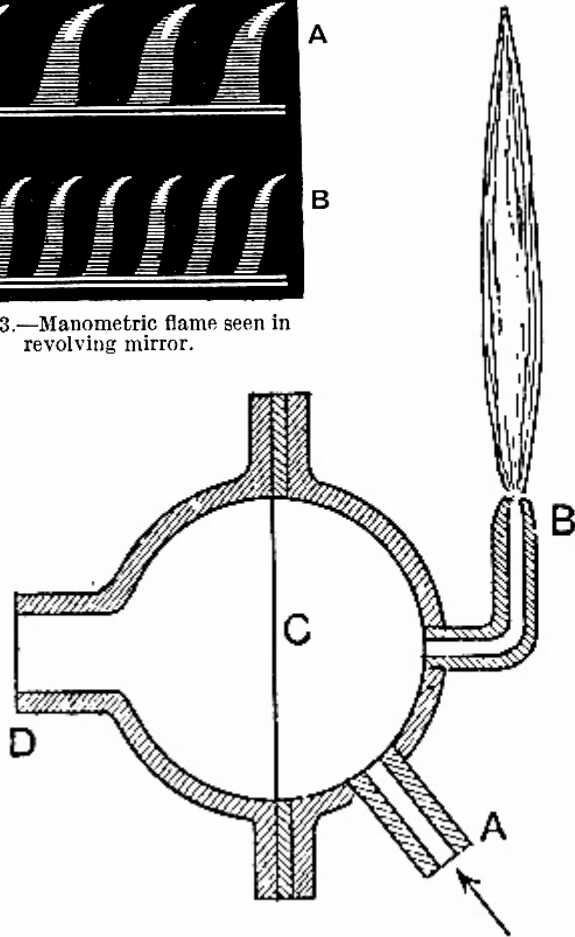


FIG. 651.—Manometric flame.

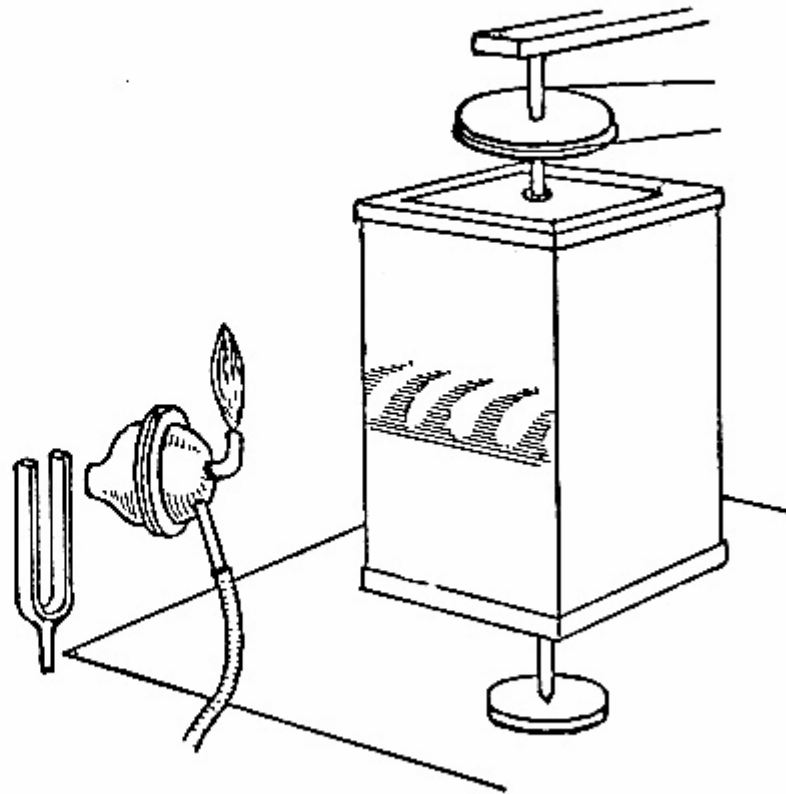
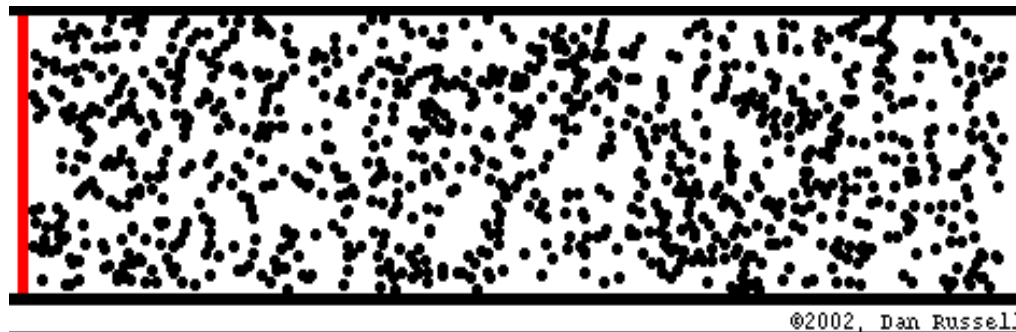


FIG. 652.—Revolving mirror for viewing manometric flame.

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)

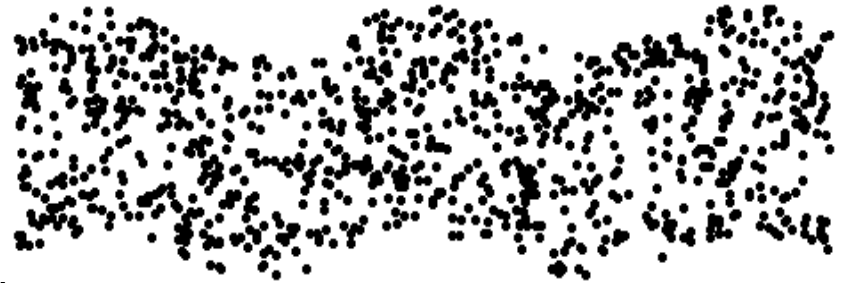


- Nazývame ho tiež **zvukovým (akustickým) vlnením**

Zvukové vlnenie

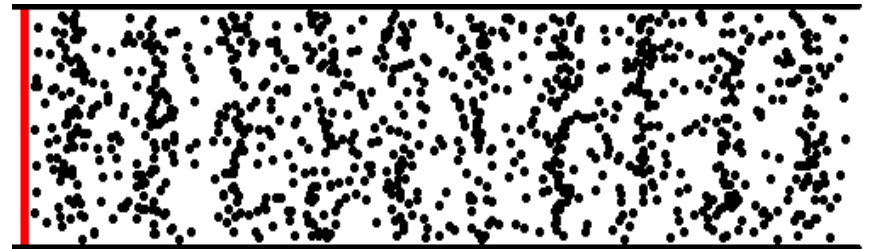
- priečne (transverzálne)

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



- pozdĺžne (longitudinálne)

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

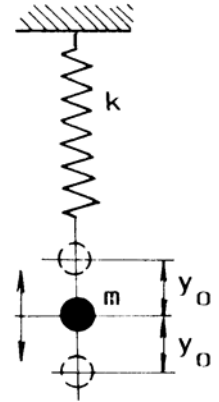


Lineárny oscilátor – matematický model pohybu hmotnej častice, prenášajúcej zvukovú vlnu

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:

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

m [kg] hmotnosť kmitajúceho bodu
 t [s] čas
 k [N/m] tuhosť pružiny



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

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

φ_0 [-] fázový uhol
 y_0 [m] amplitúda výchylky kmitania

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

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

Časový priebeh harmonického kmitania

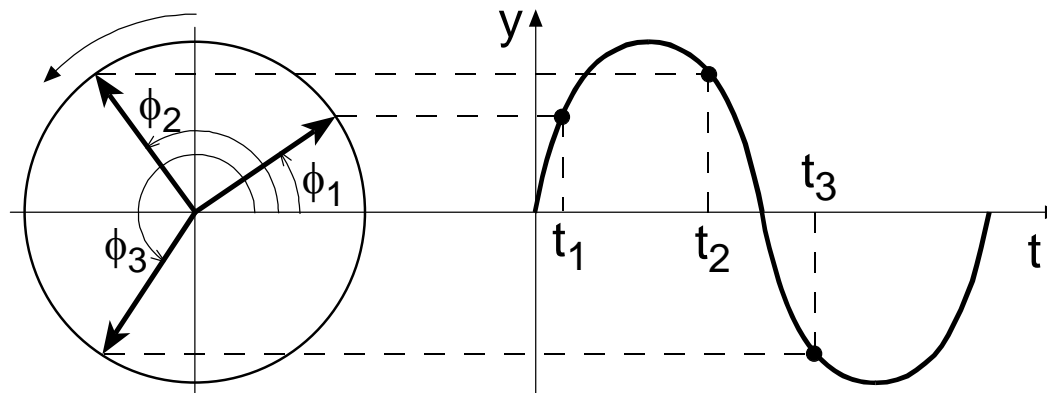
- Pohyb lineárne kmitajúceho hmotného bodu si môžeme predstaviť ako priemet vektora (fázora), otáčajúceho sa konštantnou uhlovou rýchlosťou.
- Okamžitú hodnotu výchylky môžeme vyjadriť ako reálnu alebo imaginárnu časť výrazu, popisujúceho vektor, rotujúci konštantnou uhlovou rýchlosťou

(Eulerov vzorec)

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

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

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

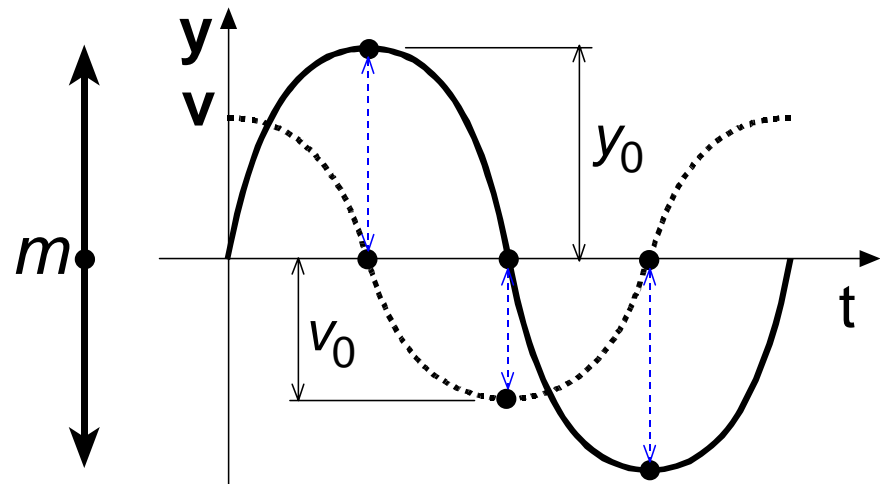


Rýchlosť kmitania hmotného bodu

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

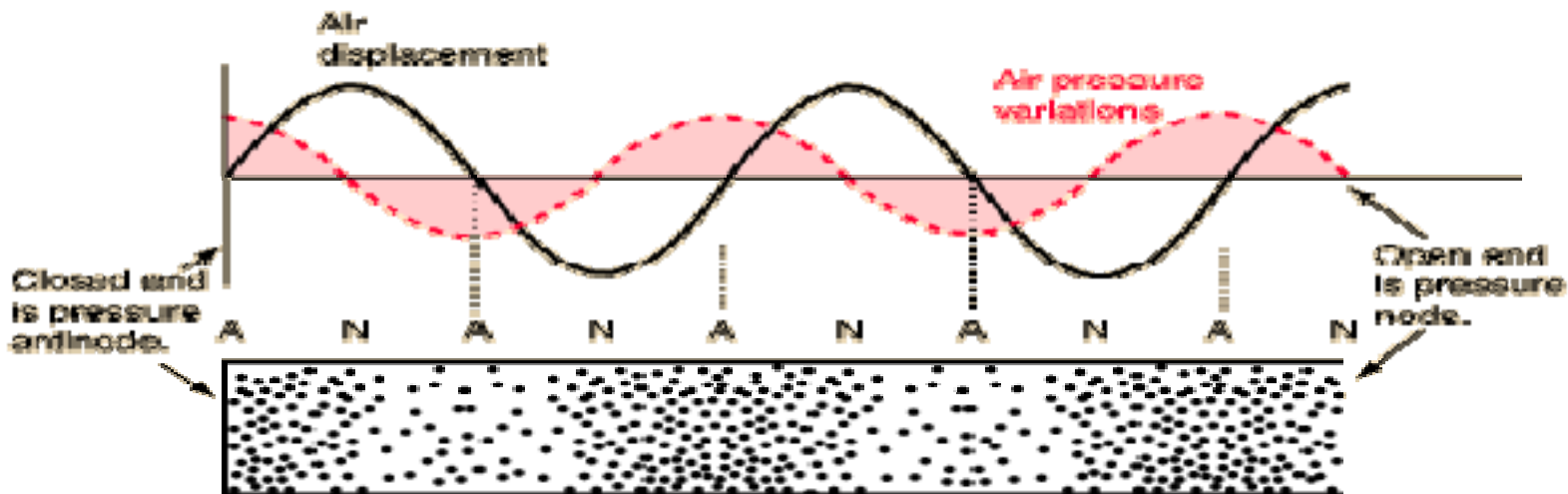
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{d\left(y_0 \sin(\omega t + \varphi_0)\right)}{dt} = \omega y_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = v_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$$

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



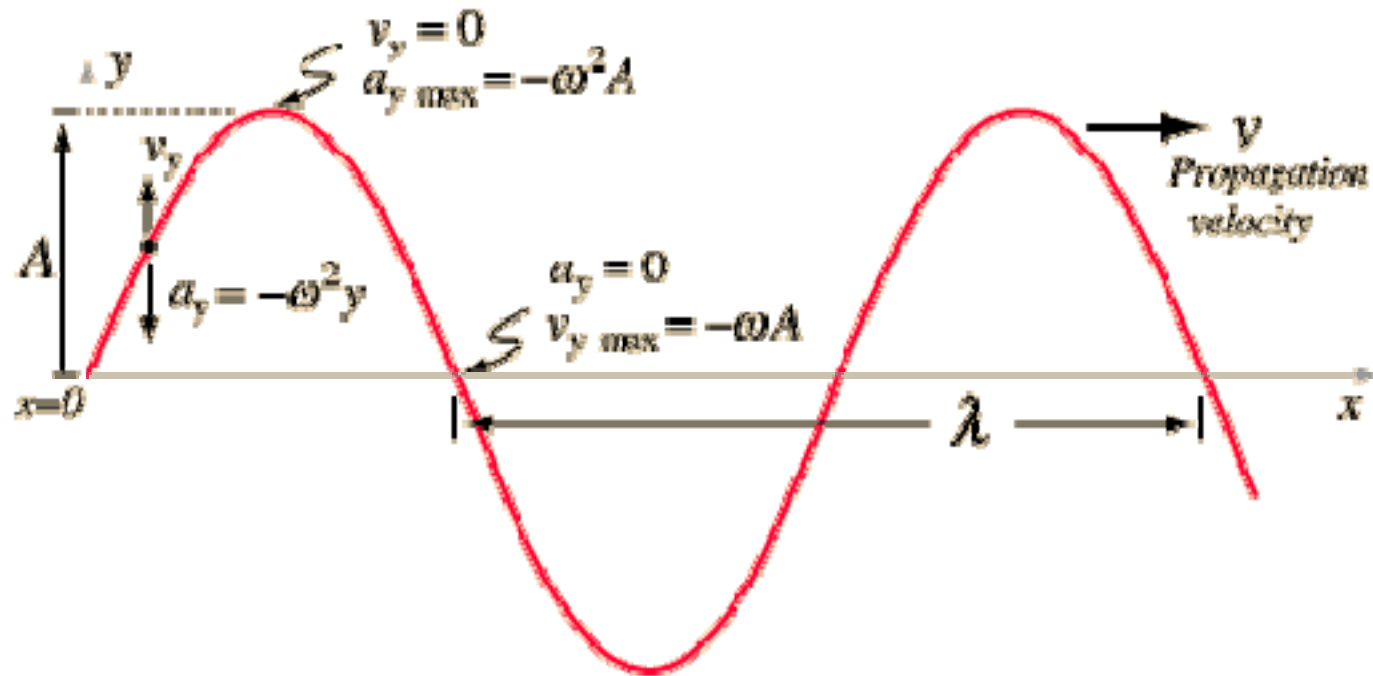
Akustická výchylka

- výchylka, o ktorú sa pri šírení zvukového vlnenia prostredím vychylujú častice prostredia zo svojej rovnovážnej polohy
- akustická výchylka je striedavou skalárnou veličinou
- je funkciou času a priestoru (pre zvukovú vlnu šíriacu sa v priestore)
- jej základnou jednotkou je [m]
- označovanie $-y(x,t)$, $y(r,t)$



Akustická rýchlosť a zrýchlenie

- (mechanická) rýchlosť (zrýchlenie), ktorou častice prostredia kmitajú okolo svojej rovnovážnej polohy
- striedavá veličina – funkcia času a priestoru, ktorá je určená nielen veľkosťou, ale i smerom – vektor
- základnou jednotkou je $[\text{ms}^{-1}]$ – $v(x,t)$, $v(r,t)$
- resp $[\text{ms}^{-2}]$ – $a(x,t)$, $a(r,t)$



*Description of
the transverse
motion.*

$$\frac{2\pi v}{\lambda} = 2\pi f = \omega$$

$$v = f\lambda$$

$$y(x, t) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

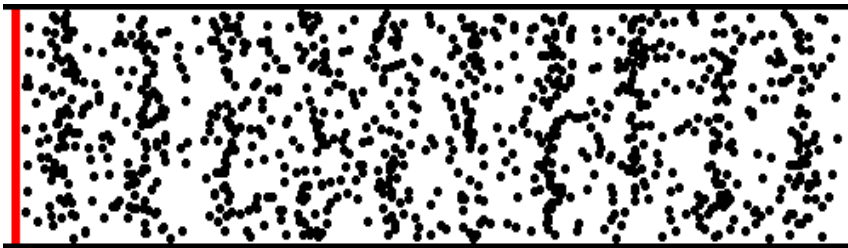
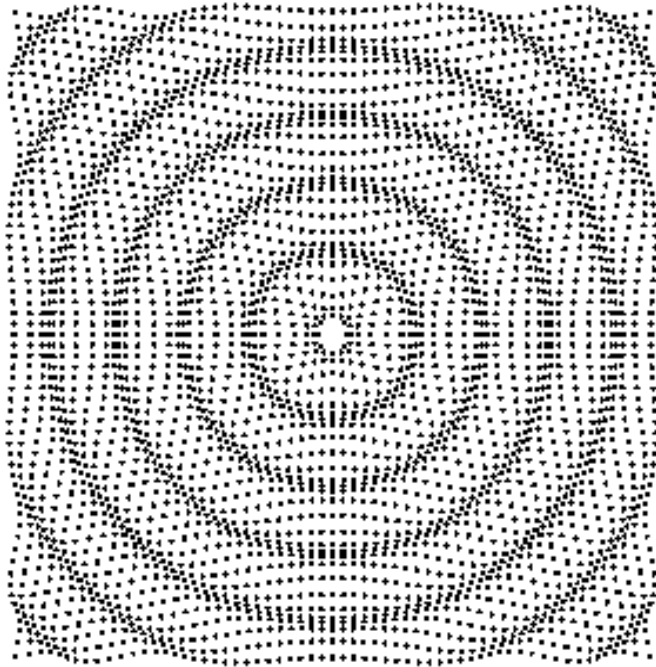
$$v_y(x, t) = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

$$a_y(x, t) = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 y = -\omega^2 A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

Vlnoplocha, čelo vlny, zvukový lúč

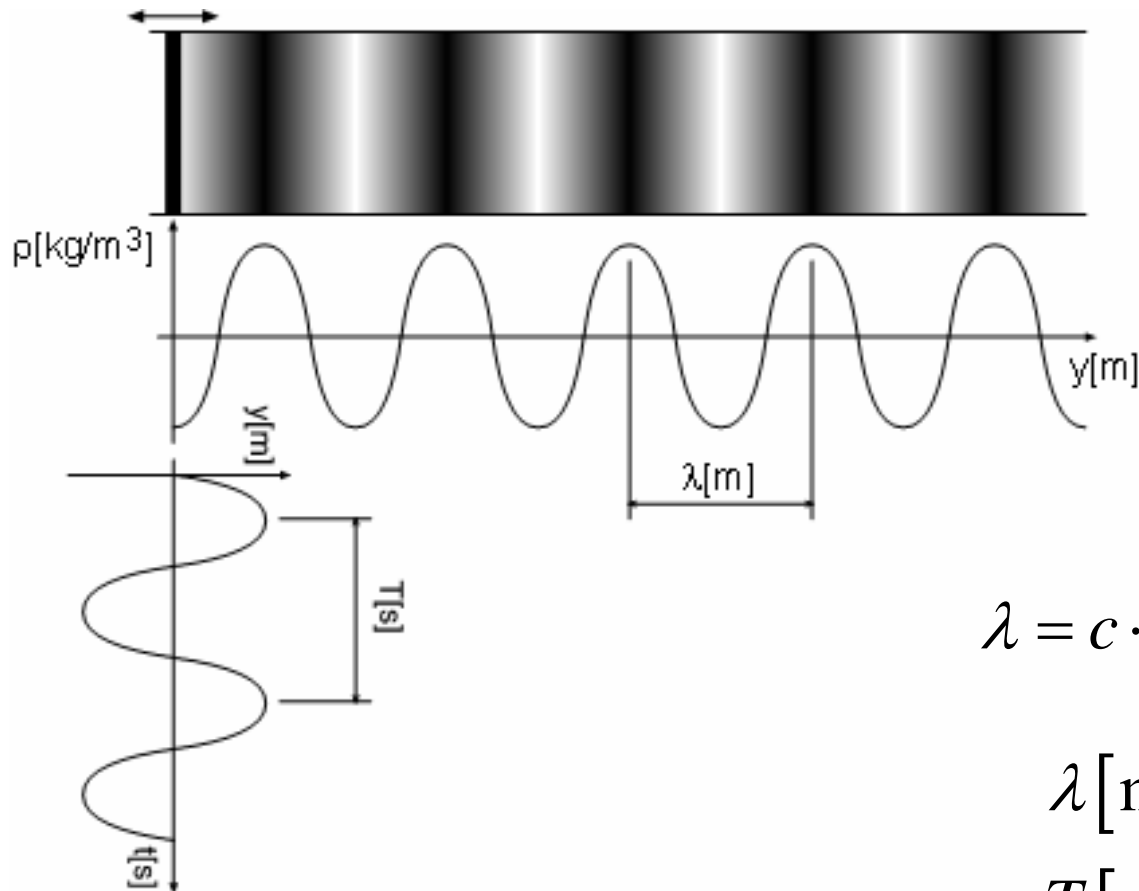
- Vlnoplocha
 - geometrické miesto bodov prostredia, v ktorých častice prostredia kmitajú s rovnakou fázou
- Čelo vlny
 - geometrické miesta bodov, do ktorých zvukové vlnenie dorazilo v určitom okamihu a v ktorých kmitajú častice prostredia s rovnakou fázou
- Zvukový lúč
 - smer šírenia zvukového vlnenia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

Frekvencia, perióda a vlnová dĺžka zvuku



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

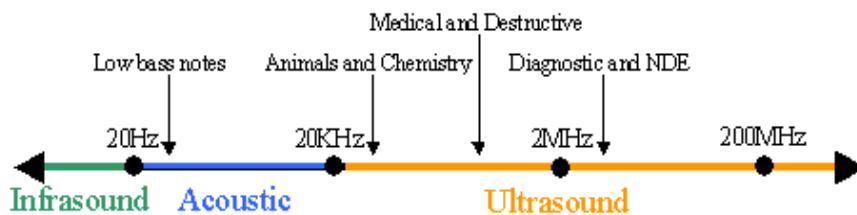
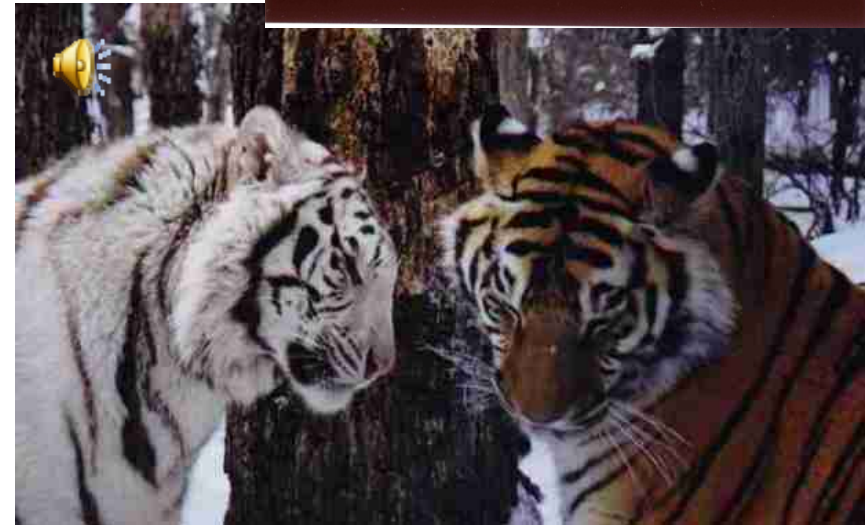
λ [m] - vlnová dĺžka

T [s] - perióda kmitania

f [Hz] - frekvencia

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



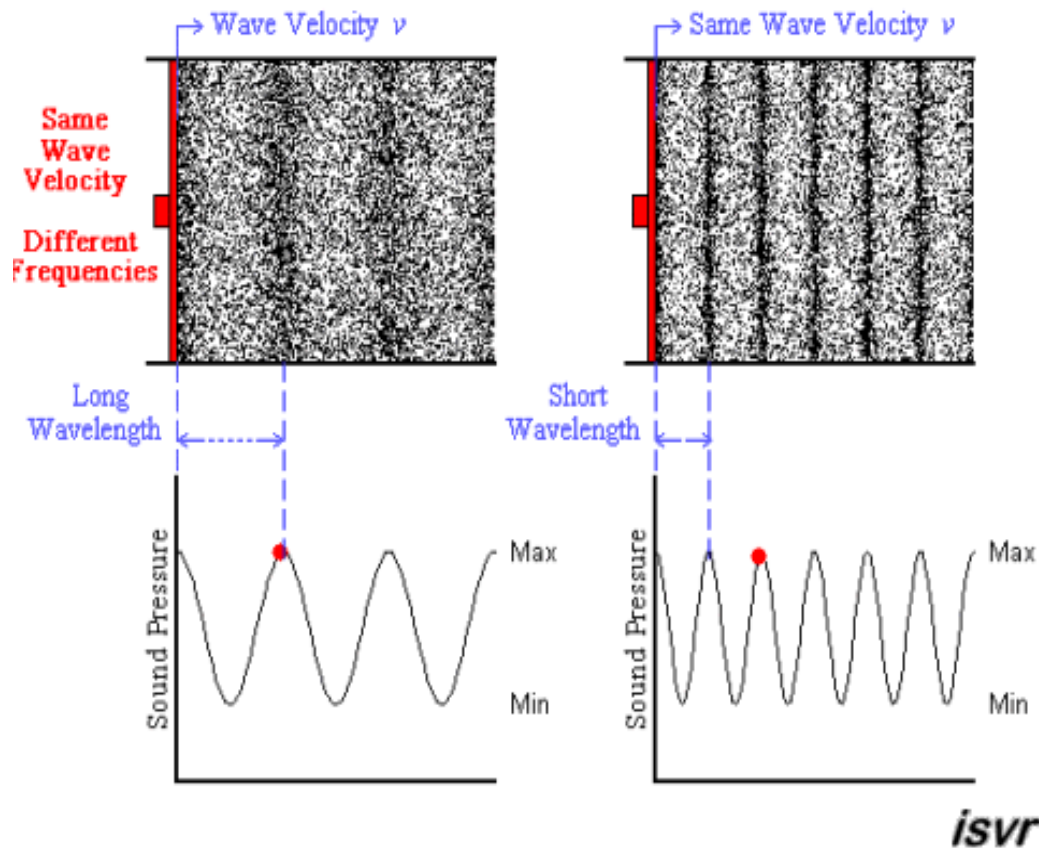
zvuk: $f \in \langle 16, 22\,000 \rangle$ Hz

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

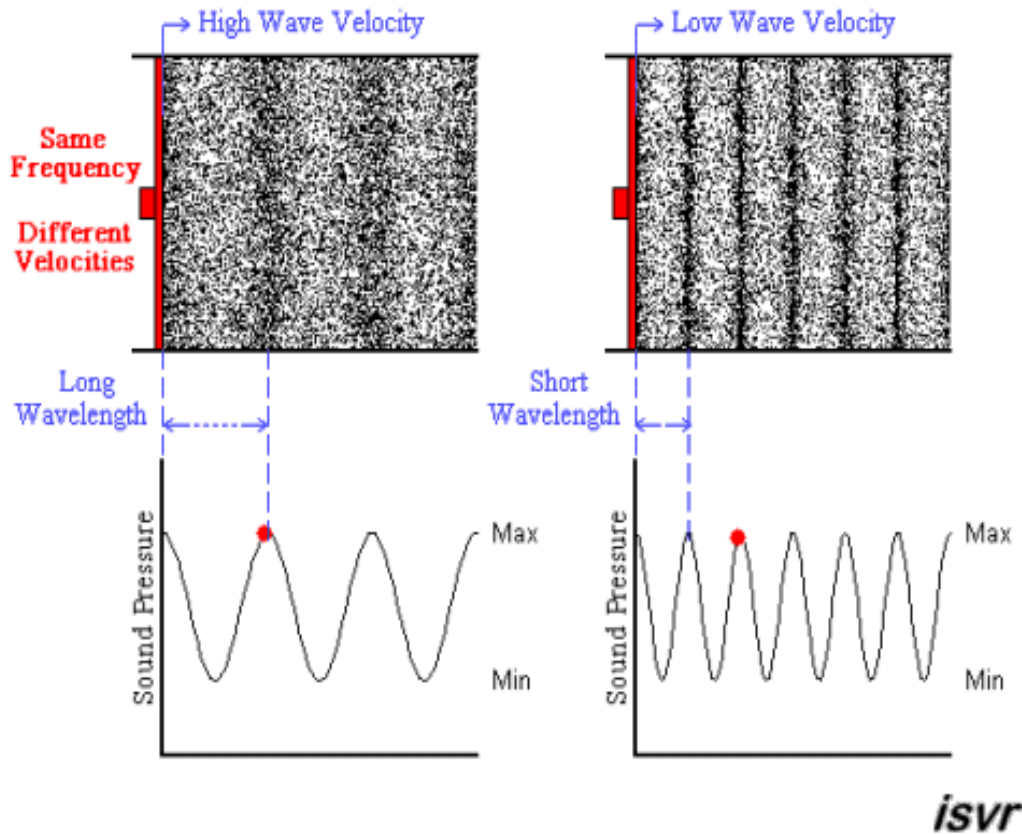
ultrazvuk: $f > 22\,000$ Hz; $\lambda < 1.5\text{ cm}$

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

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



Lineárna a nelineárne frekvenčné stupnice

- frekvencia versus výška tónu
- hudobné stupnice – empiricky určené frekvenčné intervaly
- „matematické“ stupnice
 - logaritmická stupnica
 - oktávová, poloktávová a tretino-oktávová stupnica
- stupnice odvodené od vlastností ľudského sluchu
 - melova stupnica
 - barkova stupnica

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:

$$\text{Oktáva: } \frac{f_2}{f_1} = 2$$

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

$$\text{Pol – oktáva: } \frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{2}}$$

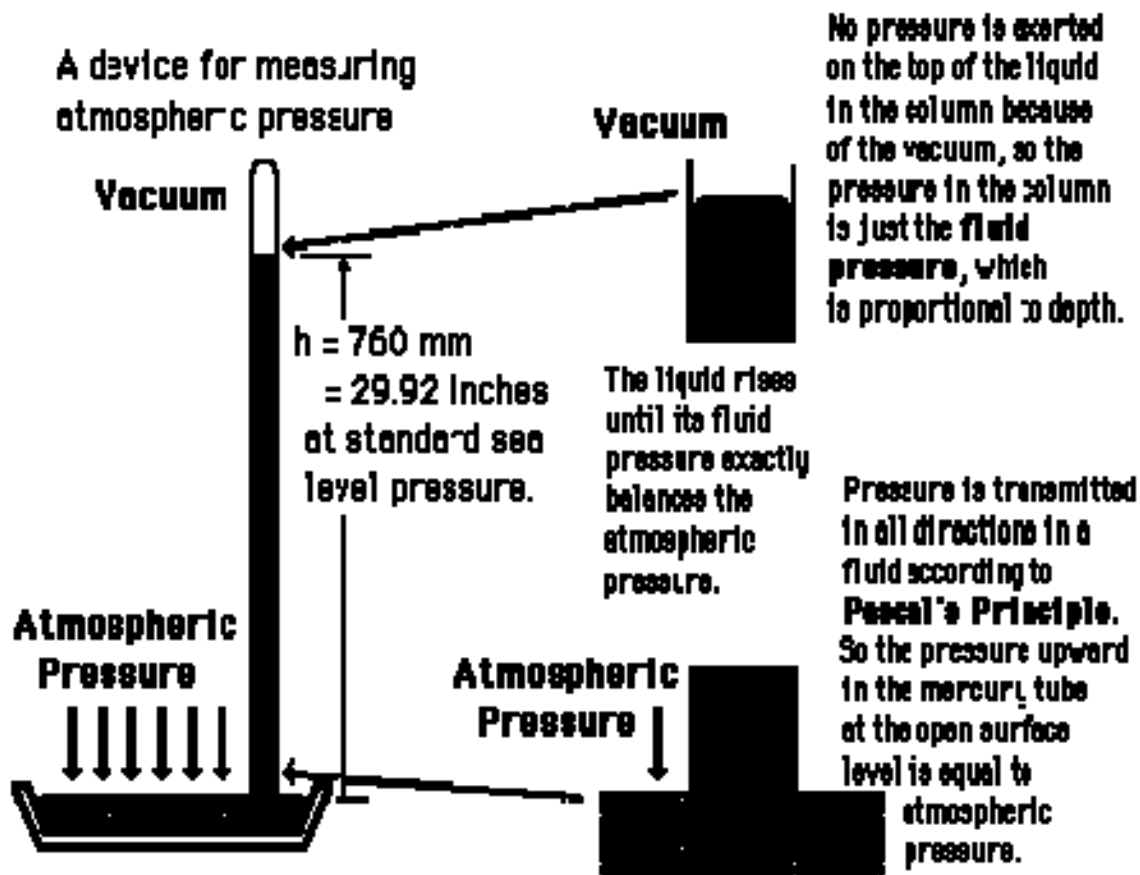
$$\frac{f_{n,h}}{f_{n,d}} = 2^{\frac{1}{q}}$$

$$\text{Tretino – oktáva: } \frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{3}}$$

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

Príklad

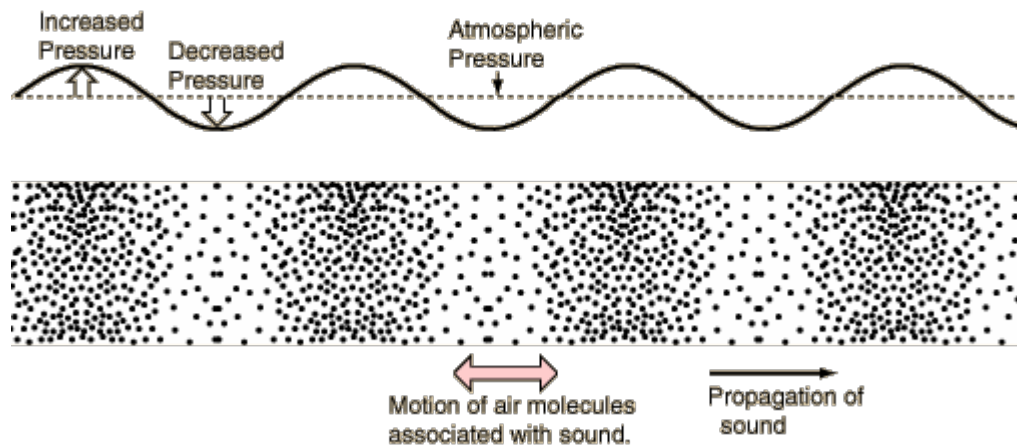
Atmosférický (statický) tlak



- 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 [Nm^{-2} ; Pa]
- priemerná hodnota pri bežnej teplote (20°C) je približne $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$

Akustický tlak

- 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 pokrývajú rozsah hodnôt rádovo od 10^{-5} Pa až po 10^2 Pa
- označovanie p_A [Nm^{-2} ;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 normovanej referenčnej hodnoty.
- Takto získaná veličina sa nazýva hladina akustického tlaku. Vyjadruje sa v decibeloch.

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

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 ($r_V = c \cdot \rho_0$)

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

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 v tvare skalárneho súčinu vektorov sily a akustickej rýchlosti, t.j.:
- Ak akustický tlak pôsobí na plochu rovnomerne, bude pre akustický výkon platiť:

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

- ψ je uhol medzi normálou k ploche S a vektorom akustickej rýchlosti
- Ak akustický tlak pôsobiaci na plochu S sa spojito mení:

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

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

Akustická intenzita

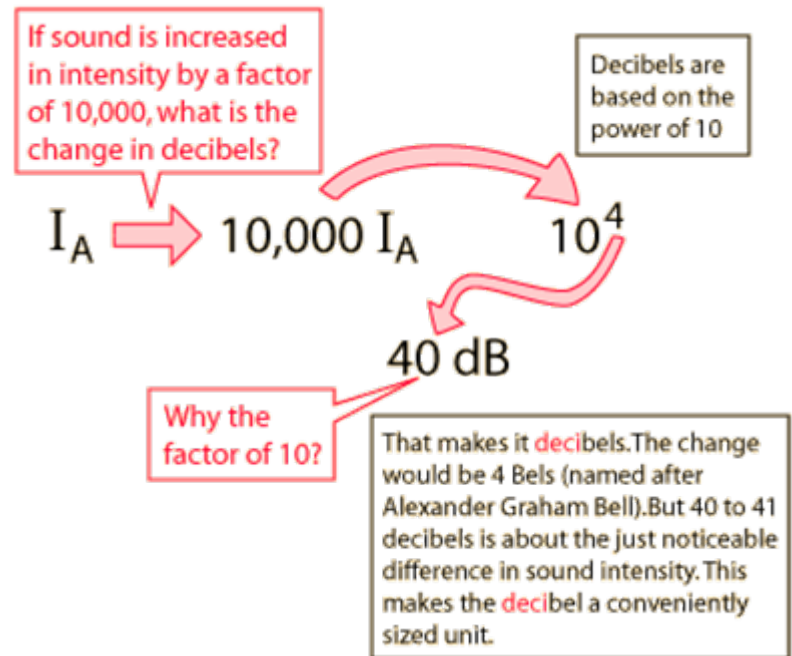
- množstvo energie, prechádzajúce za jednotku času cez jednotku plochy, kolmej na smer šírenia zvukovej vlny
- akustickú intenzitu definuje akustický výkon prechádzajúci plochou S , orientovanou kolmo na smer šírenia akustickej energie:

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

Hladina akustického výkonu a intenzity

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

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



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

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

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. (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, } 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 (μPa)
 0.00002 pascal
 2×10^{-5} newton/meter²
 0.0002 dyne/cm² or microbar

Inverse square law

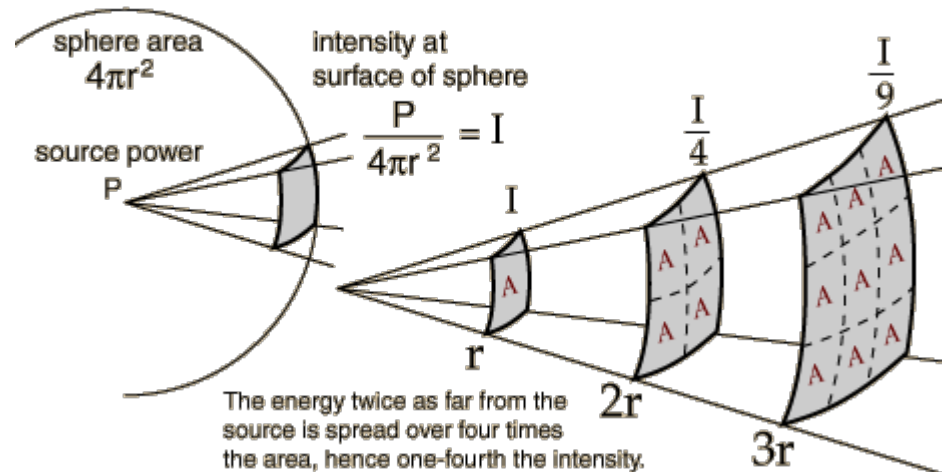
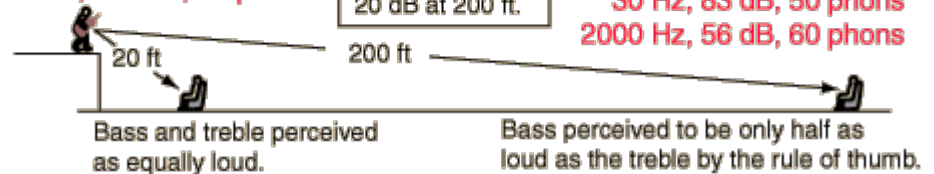
Assume that the close listener hears both the low bass at 30 Hz and the midrange frequency 2000 Hz at the same loudness of 80 phons. Because of the difference in hearing sensitivity, the dB levels required are

30 Hz, 103 dB, 80 phons
2000 Hz, 76 dB, 80 phons

By the inverse square law, each of these levels will drop by 20 dB at 200 ft.

Although the dB levels of the two sounds will drop by the same amount, the loudness of the low frequency drops more than than of the high frequency because of the ear's discrimination against bass.

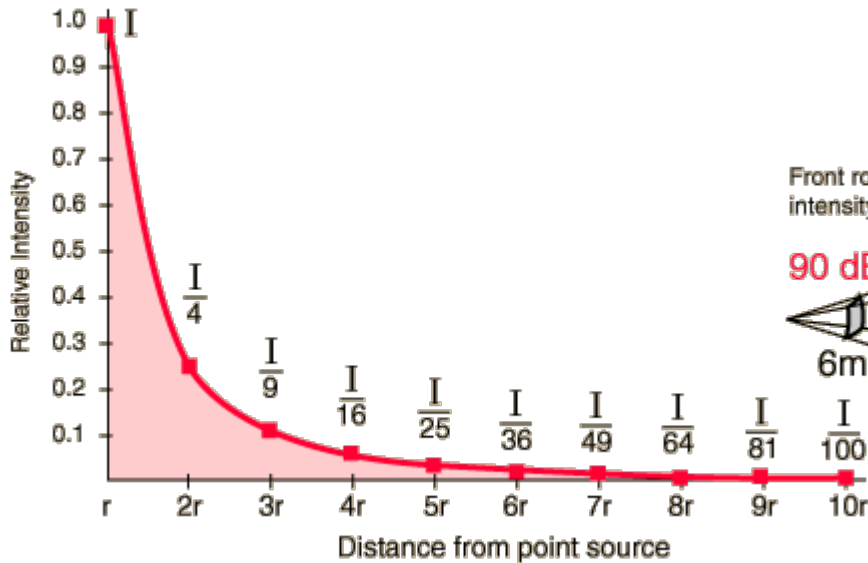
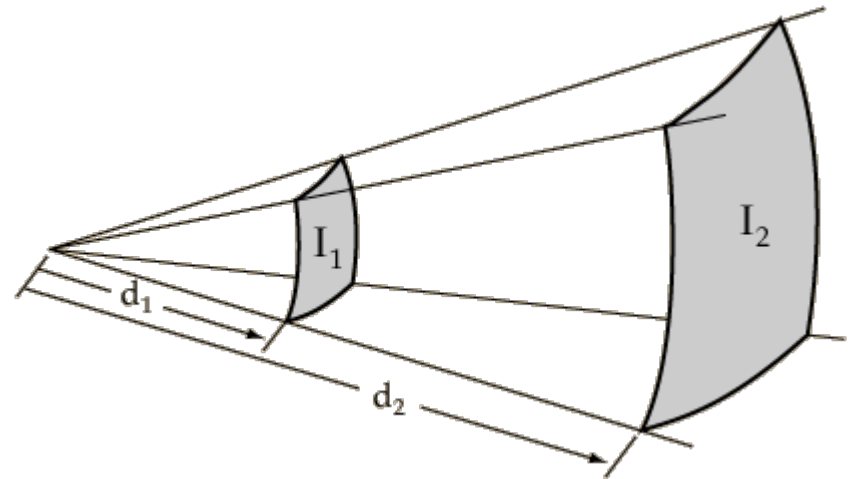
30 Hz, 83 dB, 50 phons
2000 Hz, 56 dB, 60 phons



Inverse square law

• ...

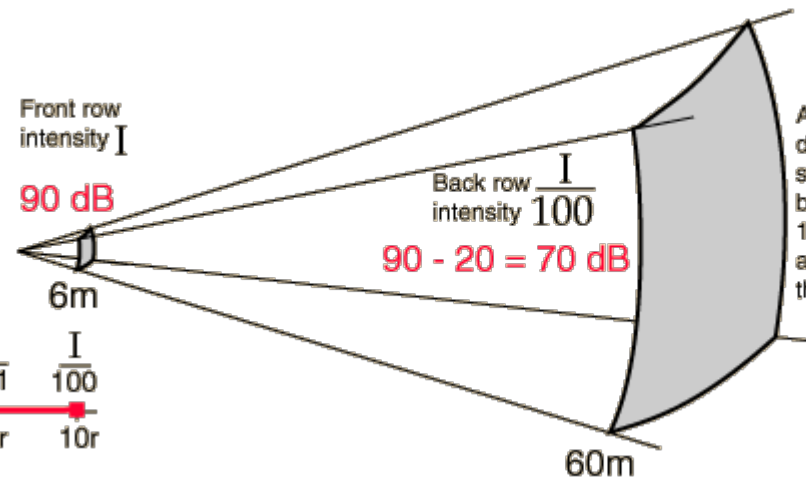
$$\frac{I_2}{I_1} = \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^2$$



Front row intensity I

90 dB

6m



Back row intensity $\frac{I}{100}$

90 - 20 = 70 dB

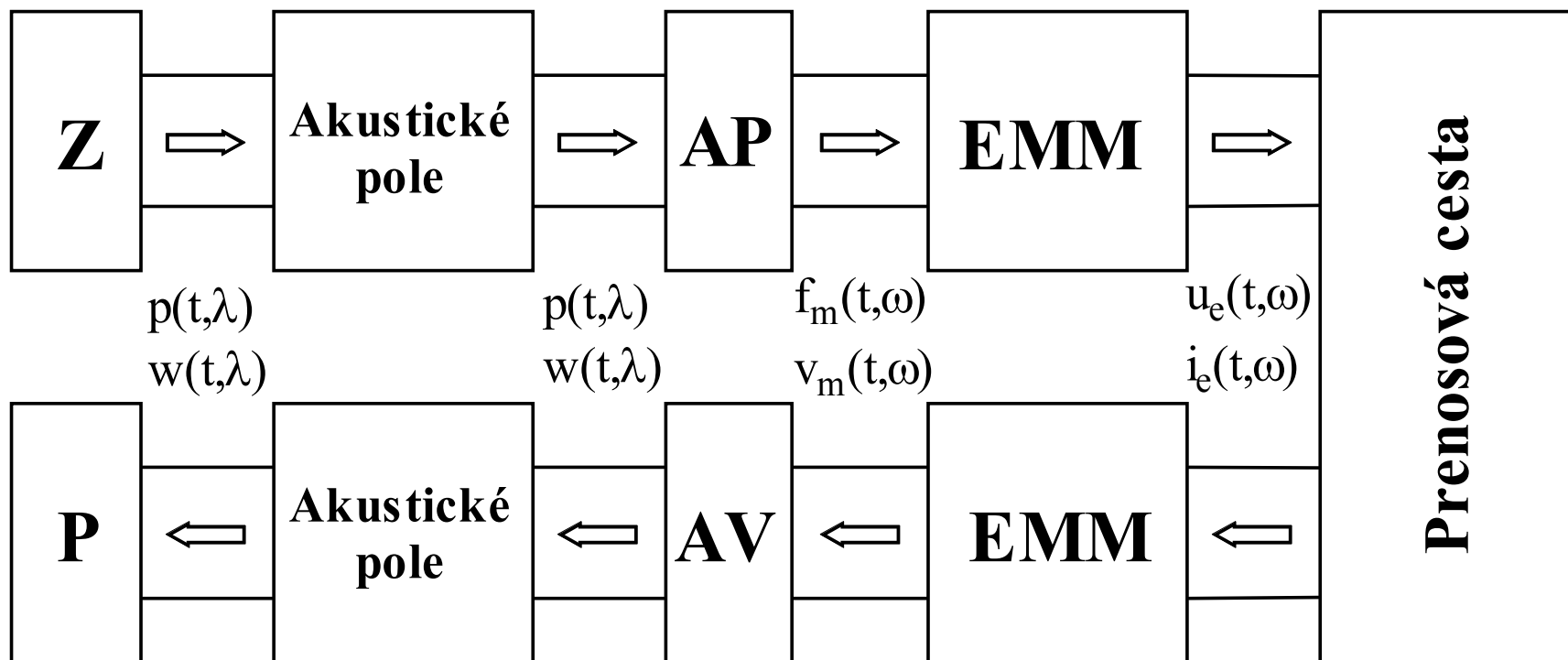
60m

At 10 times the distance, the same sound energy will be spread over 100 times the area, a drop to 1/100 the intensity!

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).
- Vibroakustika
 - Štúdium hluku a vibrácií strojov a zariadení.
- Hydroakustika
 - Štúdium šírenia zvuku v tekutinách a jeho praktické aplikácie (detekcia plávajúcich objektov)
- Elektroakustika
 - Premena akustických signálov na elektrické, ich spracovaním a opätovnou premenou na signály akustické - **zvukový (elektroakustický) systém**.

Elektroakustický systém



Z - Zdroj zvuku

AP' - Akustický prijímač

P - Prijímateľ zvuku

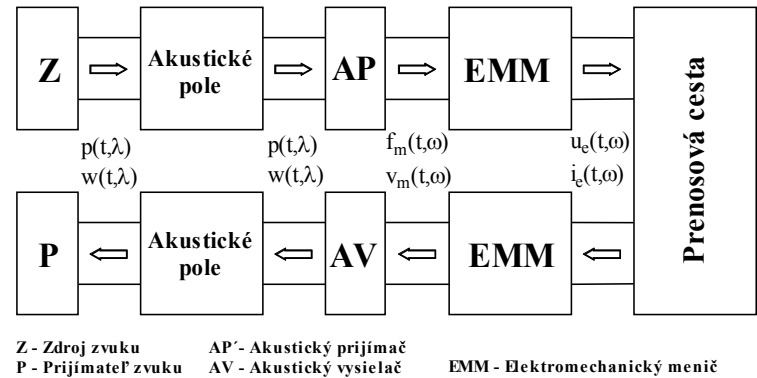
AV - Akustický vysielač

EMM - Elektromechanický menič

Typické časti elektroakustického systému

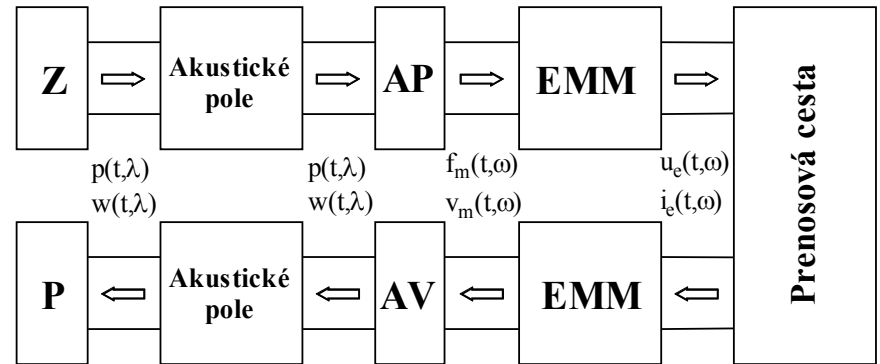
- zdroj zvuku / prijímateľ zvuku
- akustické pole (akustický priestor)
- akustický prijímač / akustický vysielateľ
- elektromechanický menič
- (elektrická) prenosová cesta

Zdroj zvuku



- prirodzený
 - človek – reč, spev, neartikulované zvuky
 - ostatné živé tvory (zvieratá, ...)
 - prírodné javy (šum lístia, úder hromu, ...)
 -
- umelý (vyrobený človekom)
 - hudobné nástroje
 - stroje
 - ...

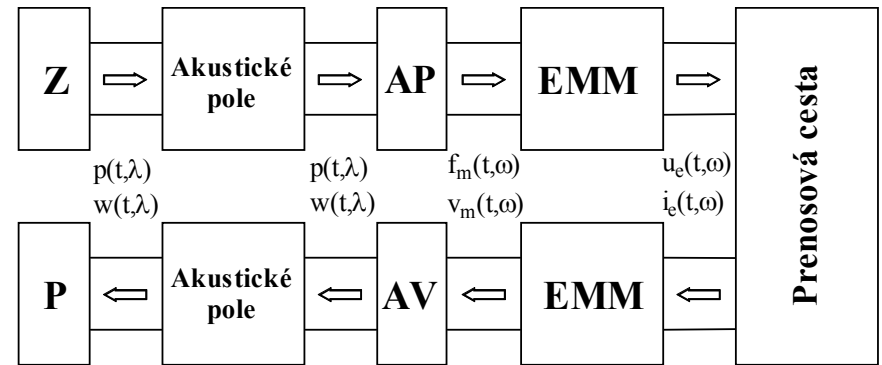
Akustické pole



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

- **otvorené**
 - ulica, štadión, ...
- **zatvorené**
 - malé (obývačka, nahrávacie štúdio, menšia poslucháreň, ...)
 - veľké (športová hala, kostol, kongresová sála, staničná budova, ...)
- priestor, v ktorom sa šíri zvukové (akustické) vlnenie
 - akustické pole jediného zvukového zdroja
 - akustické pole viacerých zvukových zdrojov – princíp superpozície

Akustický přijímač



Z - Zdroj zvuku AP - Akustický přijímač
P - Příjímateľ zvuku AV - Akustický vysílač EMM - Elektromechanický menič

- **reálny**

- membrána
- páska
- ...

- **teoretický**

- nultého rádu (bodový prijímač)
- prvého rádu
- druhého a vyšších rádov
- rady a polia bodových akustických prijímačov

Akustické vysielateľe

- reálne

- mechanické

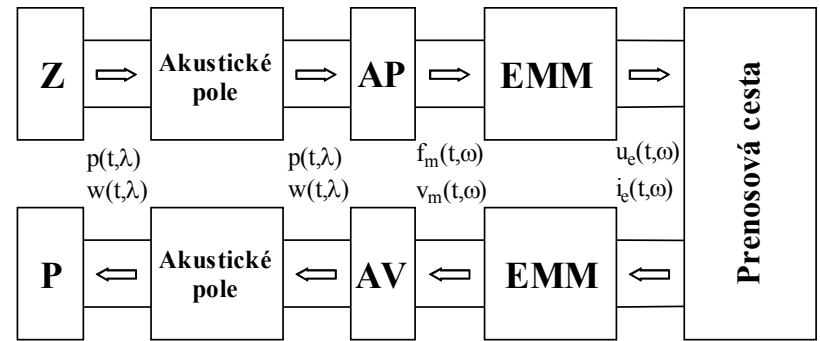
- kmitajúce telesá – ich povrchom sa prenáša kmitanie do okolitého prostredia
 - membrány, struny, ...
 - nárazy a trenie telies

- aerodynamické

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

- teoretické (matematické modely)

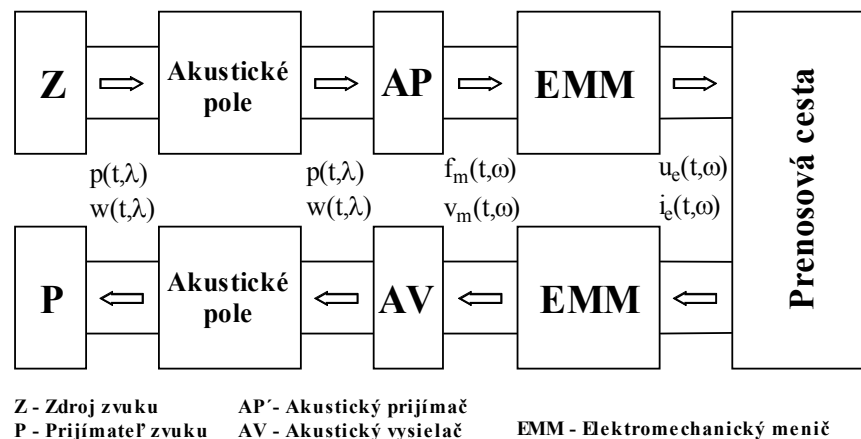
- pulzujúca guľa (bodový vysielateľ, vysielateľ nultého rádu)
 - akustický dipól (vysielateľ prvého rádu)
 - sférické vysielateľe druhého a vyšších rádov
 - rady a polia bodových zdrojov
 - priamkové, valcové a piestové vysielateľe



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

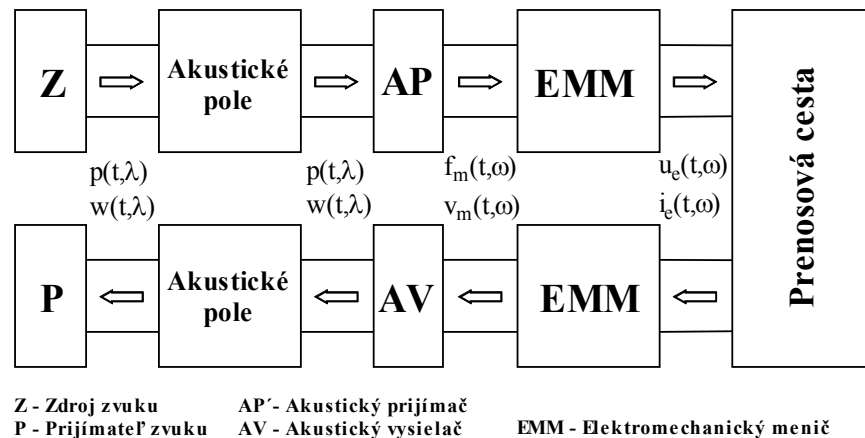
Elektromechanický menič

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



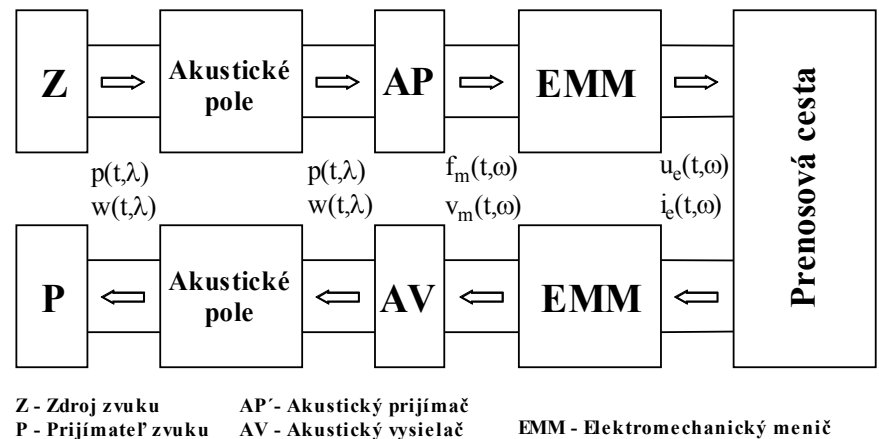
Prenosová cesta

- obvody elektronického spracovania
 - zosilňovače
 - efektové procesory
 - AD/DA prevodníky
 - ...
- záznamové systémy
- drôtové a bezdrôtové prenosové cesty
- meracie prístroje
- riadiace a kontrolné obvody
- ...



Prijímateľ zvuku: človek

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



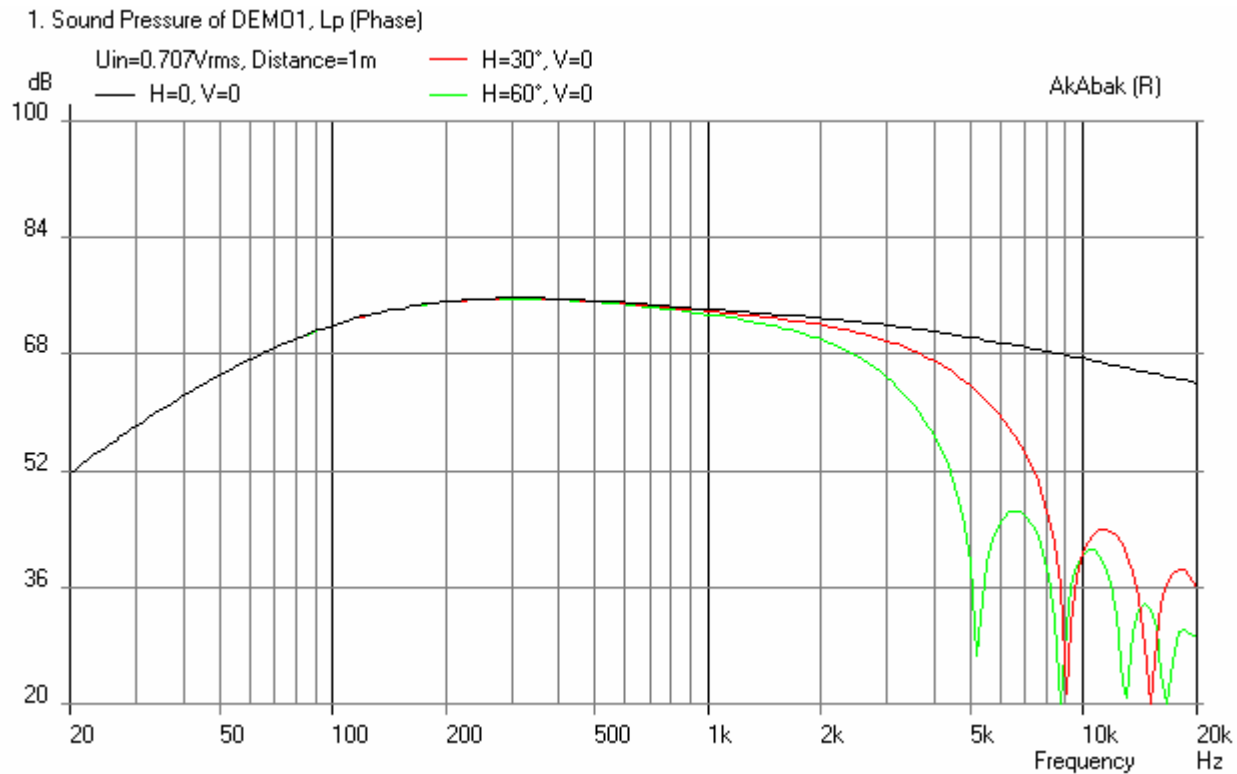
Subsystémy zvukového systému

- 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 (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.).

Charakteristiky elektroakustického systému

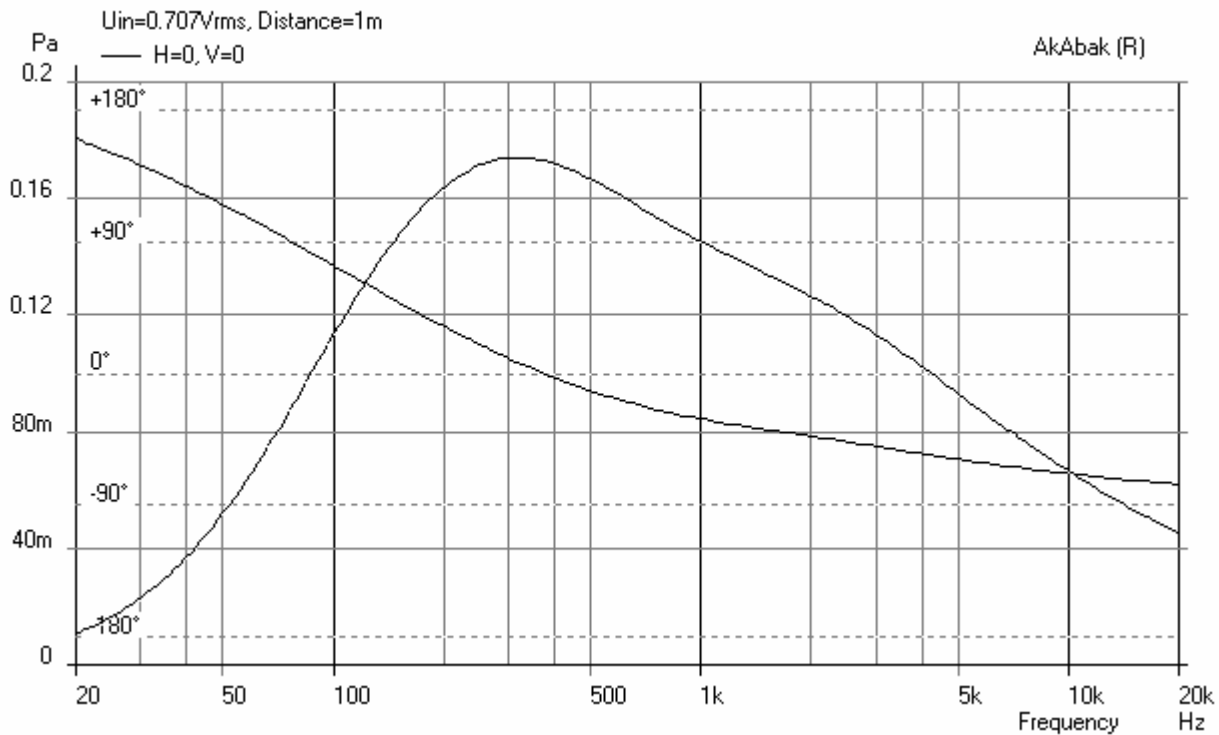
- zvukové vlnenie ako signál a jeho charakteristiky
 - časový priebeh signálu
 - frekvenčné spektrum signálu
 - nelineárne skreslenie
 - dynamický rozsah
 - štatistické charakteristiky (...)
 - ...
- charakteristiky čiastkových komponentov (podsystemov) a celková charakteristika systému
 - impedančné 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
 - doba dozvuku a dozvuková vzdialenosť
 - ...

Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici

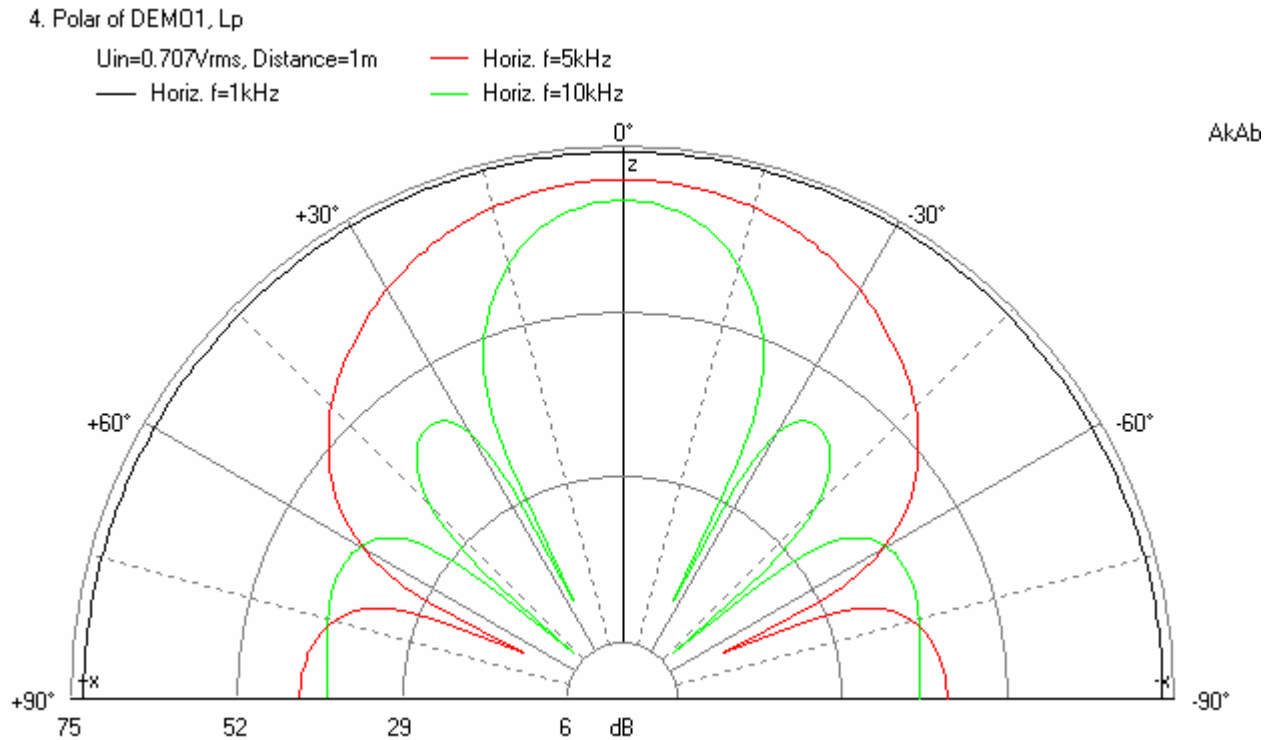


Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici

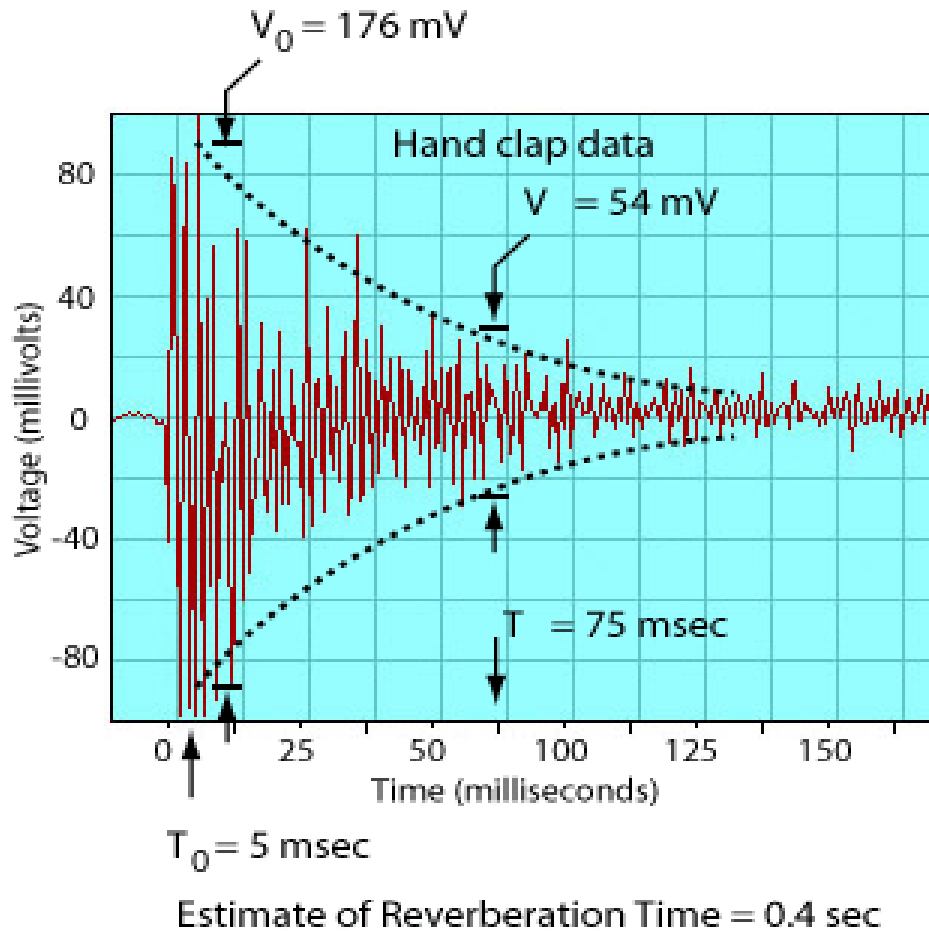
2. Sound Pressure of DEMO1, Amplitude (Phase)



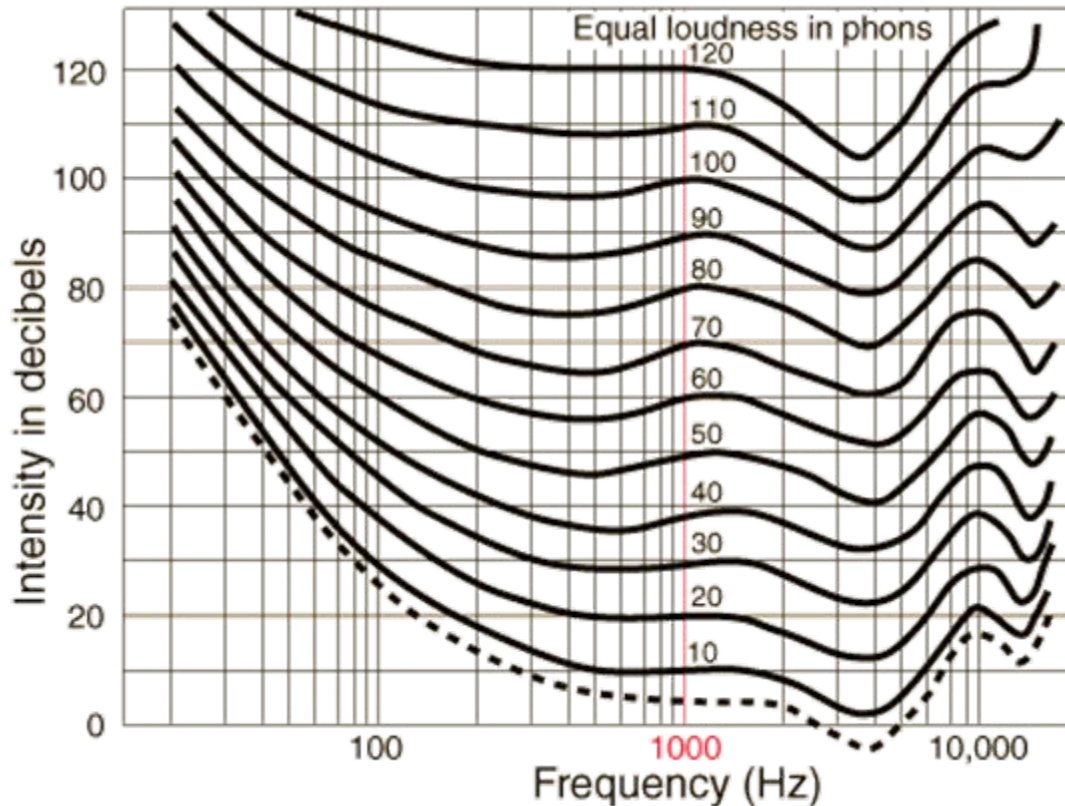
Smerová charakteristika nízkotónového reproduktora



Časový priebeh zvukového signálu pri meraní doby dozvuku



Krivky rovnakej hlasitosti



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

Test

- Ako sa nazýva kniha, ktorú napísal John William Strutt, barón Rayleigh ešte v 19. storočí a je považovaná za jedno zo základných diel akustiky?
- Aký je základný rozdiel medzi pozdĺžnou a priečnou vlnou?
- Vlnová dĺžka zvuku sa s rastúcou frekvenciou:
 - a) zväčšuje
 - b) zmenšuje
 - c) nemení

