



Elektroakustika

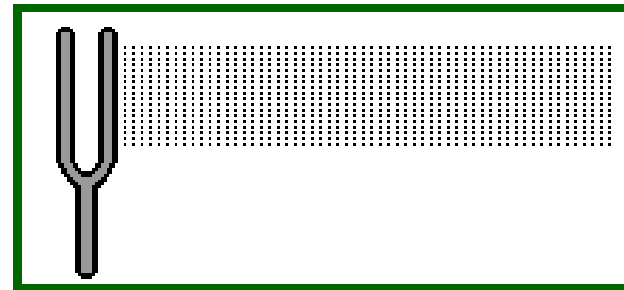
L01: História a základné pojmy

doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.

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

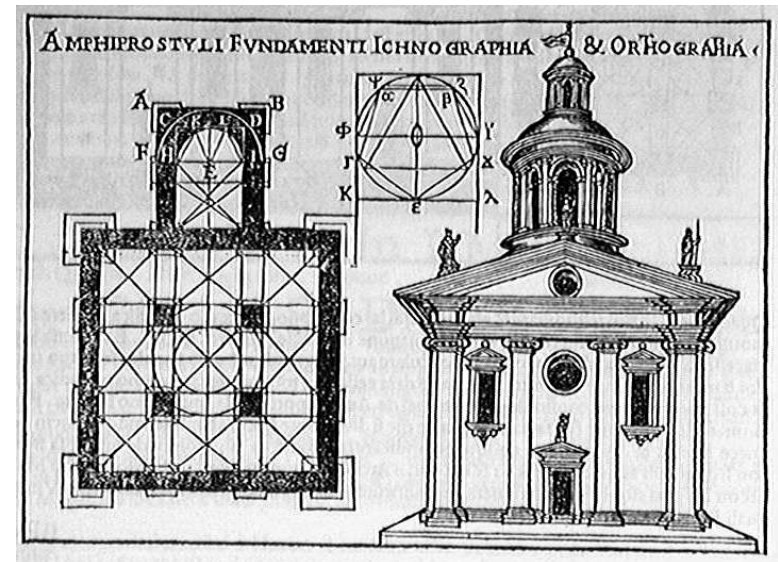
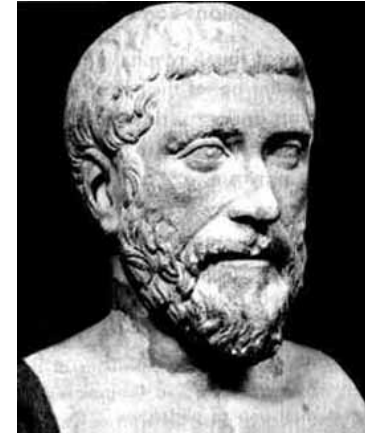
Akustika

- 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 **hudobnú 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 tóny 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 *percepčia 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 Hooka 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, navrhol základ **akustickej terminológie** a ako prvý navrhol názov akustika pre vedný odbor



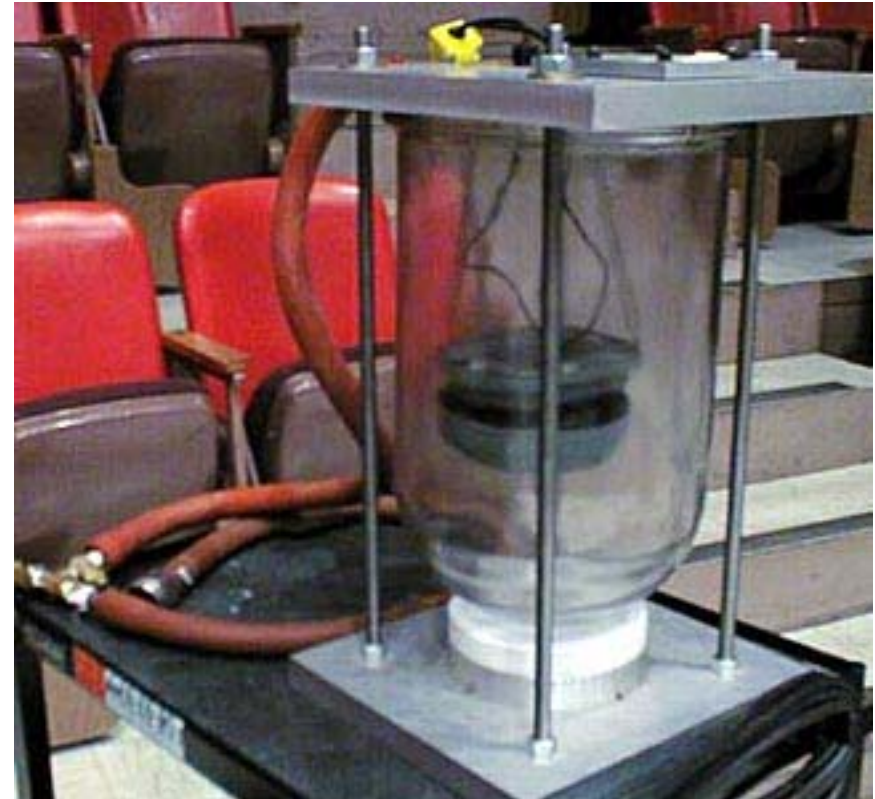
“Bell-in-vacuum” experiment

- jeden z najzaujímavejších a najkontroverznejších historických experimentov, ktorým sa doposiaľ demonštruje prenos zvuku vzduchom
- Jeho podstata spočíva v pozorovaní, že odčerpávaním vzduchu sa postupne znižuje hlasitosť zvončeka, umiestneného v sklenenej banke
- „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
- Potvrdil tým dovtedy platnú filozofické a vedecké tvrdenie, že nositeľmi zvuku sú neviditeľné častice, ktoré sa šíria od zdroja zvuku do priestoru
- v skutočnosti bol zvuk počuteľný preto, že vzduch bol odčerpaný nedostatočne – v banke nebolo absolútne vákuum
- koncepcia zvuku ako vlnenia nebola dokázaná experimentálne a mala mnohých odporcov



“Bell-in-vacuum” experiment

- v roku 1660 anglo-írsky vedec **Robert Boyle** zlepšil technológiu vákuovej pumpy, pomocou ktorej dosiahol zníženie počutelnosti 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 postačujúce



- 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“

Meranie rýchlosti zvuku

- Akonáhle sa dokázalo, že zvuk je vlnenie a prenáša sa hmotnými časticami prostredia, ďalším vážnym vedeckým cieľom sa stalo meranie rýchlosti zvuku (speed of sound).
- V 17. storočí francúzsky filozof a vedec **Pierre Gassendi** ako prvý zdokumentoval (a publikoval) svoje pokusy s meraním rýchlosti zvuku vo vzduchu. *Gassendi zmeral rýchlosť zvuku ako rozdiel medzi okamihom svetelného a zvukového vnemu výstrelu z pištole vo veľkej vzdialenosti*. Hoci hodnota, ktorú získal, bola v porovnaní s dnešnými poznatkami príliš vysoká (asi 478.4 m/s), dospel aj ke jednému korektnému záveru – **rýchlosť zvuku nezávisí od jeho frekvencie**.
- V roku 1650 taliansky fyzik **Giovanni Alfonso Borelli** a **Vincenzo Viviani** rovnakým spôsobom dospel k presnejšej hodnote **350 m/s**.
- 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

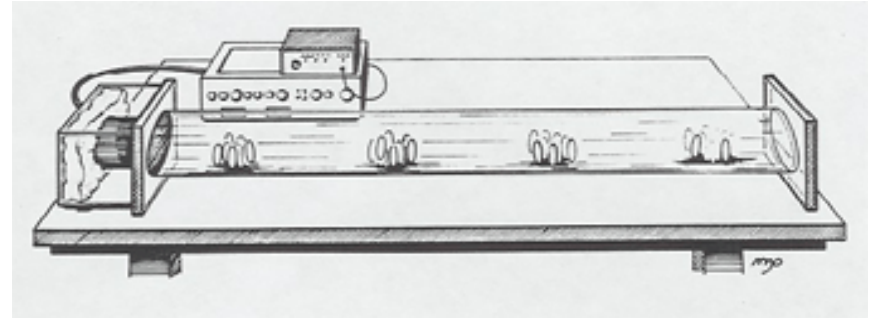
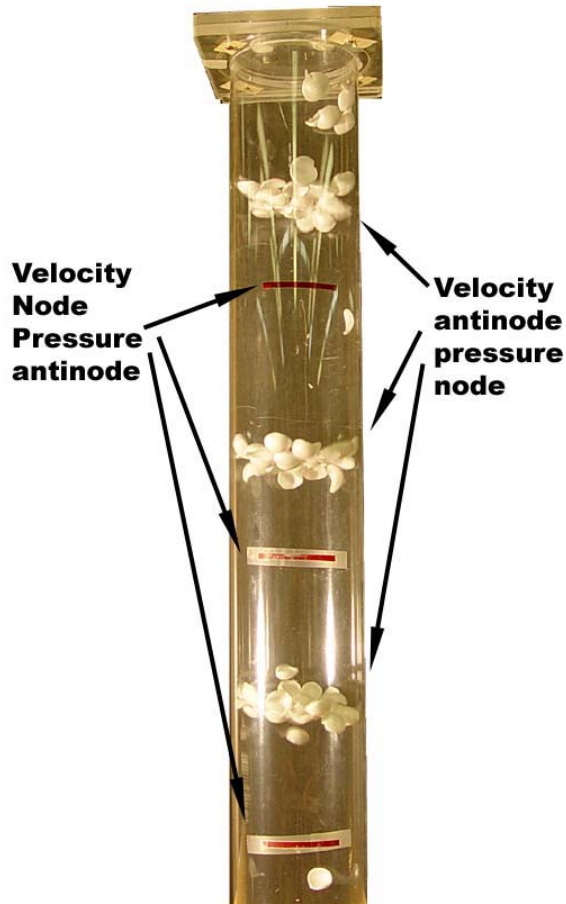
Teplota [°C]	Rýchlosť zvuku [m/s]
0	331,8
5	334,9
10	337,9
15	341,0
20	344,0
25	347,0
30	350,1

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 apparatus

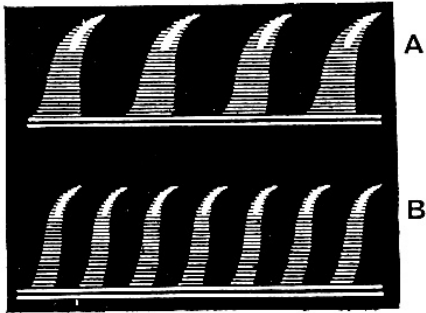


FIG. 653.—Manometric flame seen in revolving mirror.

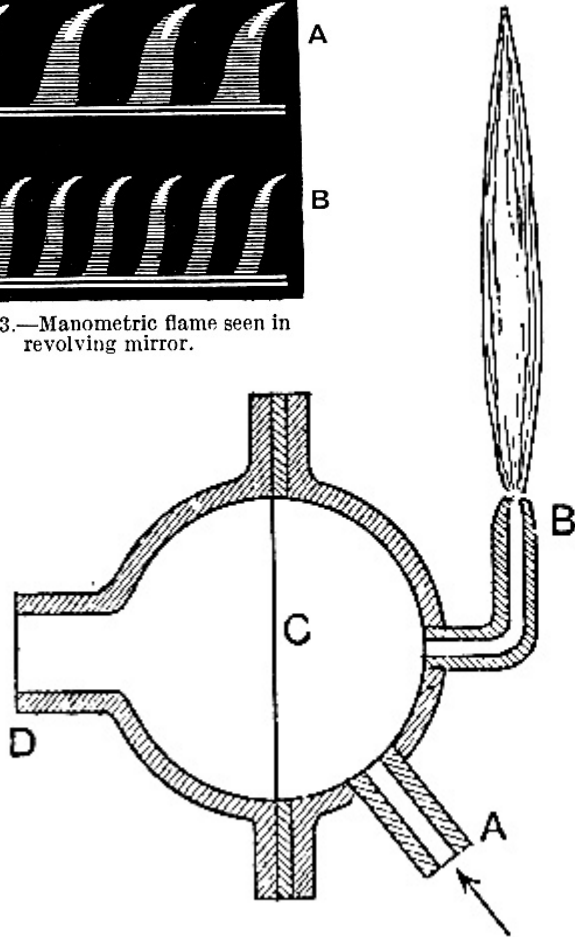


FIG. 651.—Manometric flame.

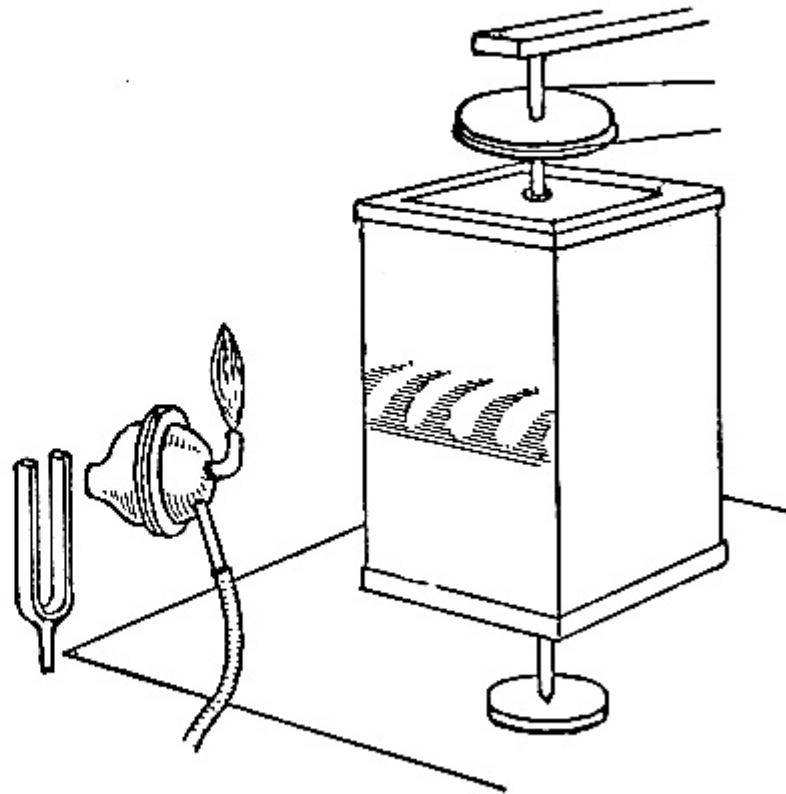
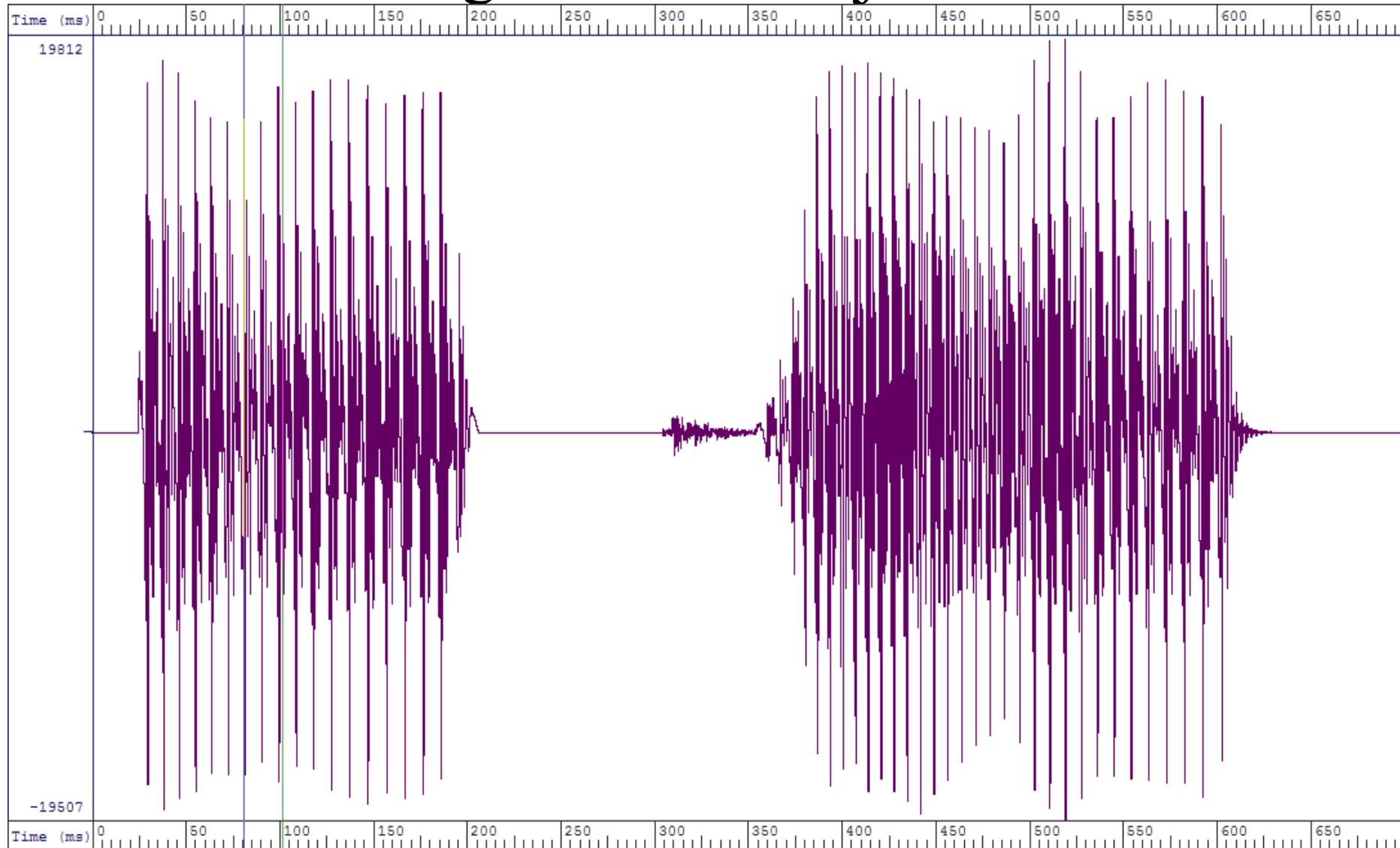
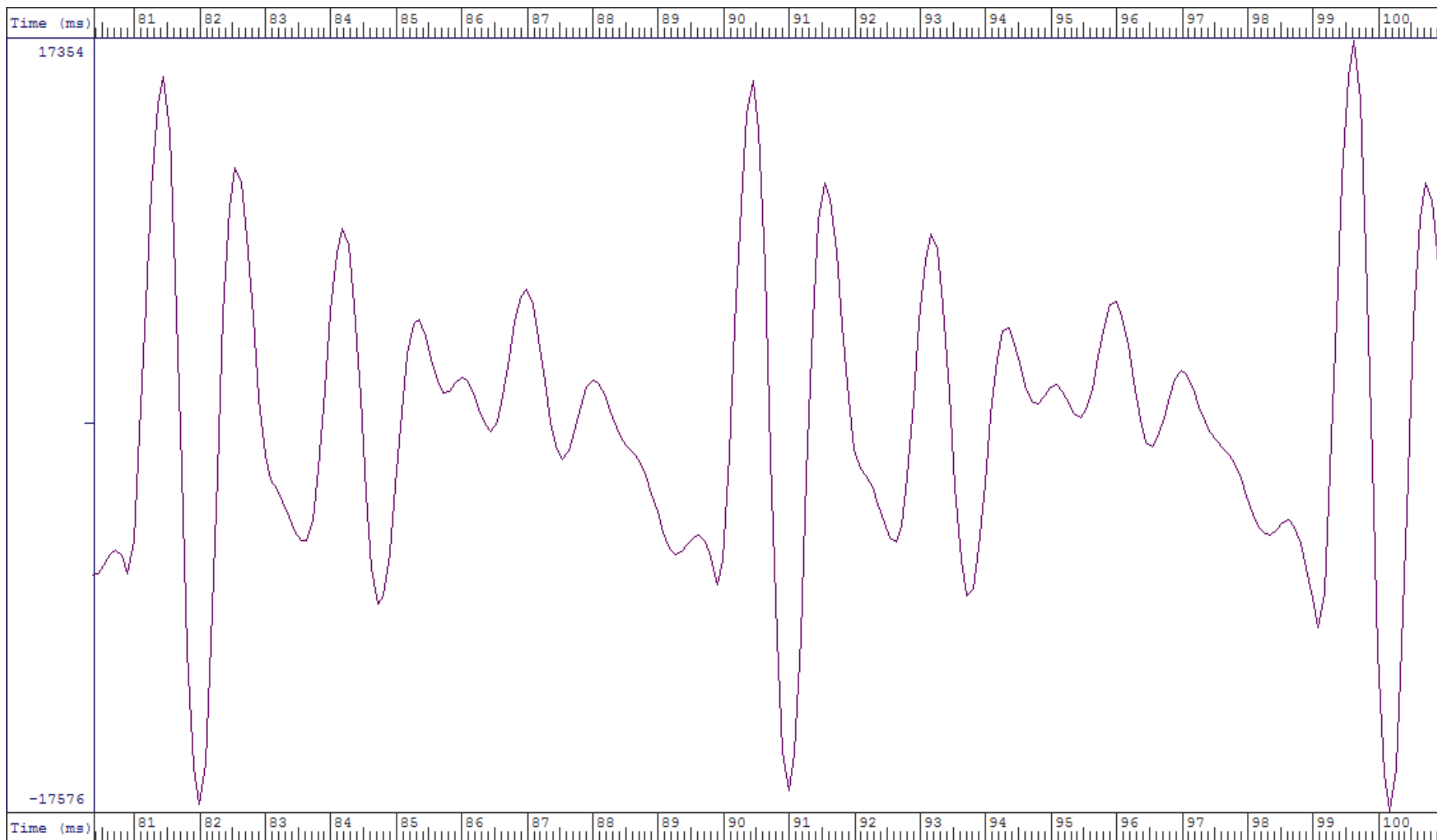


FIG. 652.—Revolving mirror for viewing manometric flame.

Zobrazenie vlnového priebehu akustického signálu - ľudskej reči

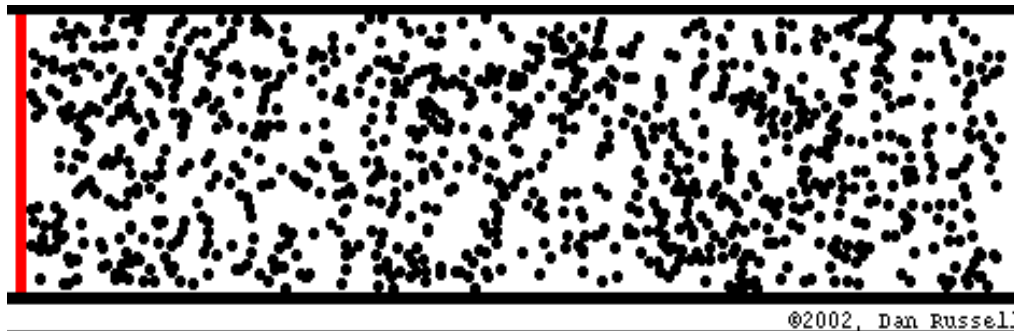


Zobrazenie vlnového priebehu reči - detail



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)

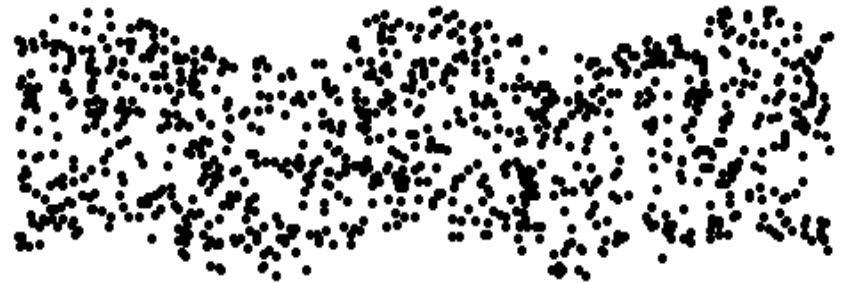


- Nazývame ho tiež **zvukovým (akustickým) vlnením**

Zvukové vlnenie

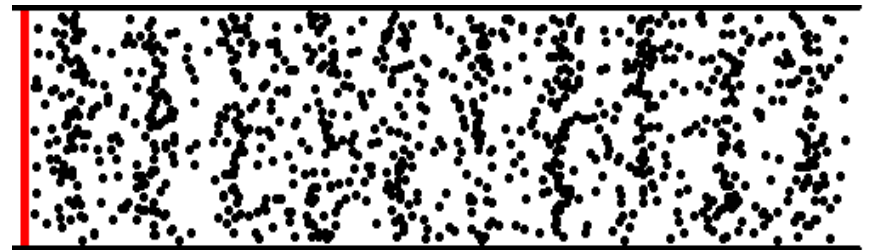
- priečne (transverzálné)

- 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



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:

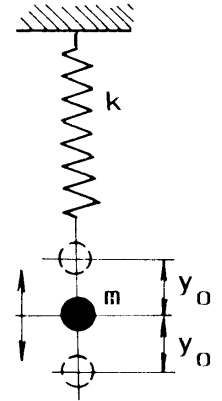
$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + s y = 0 \quad \text{kde } y \text{ [m]} \quad \text{výchylka} \quad (1)$$

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

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

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

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



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

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

Časový priebeh harmonického kmitania

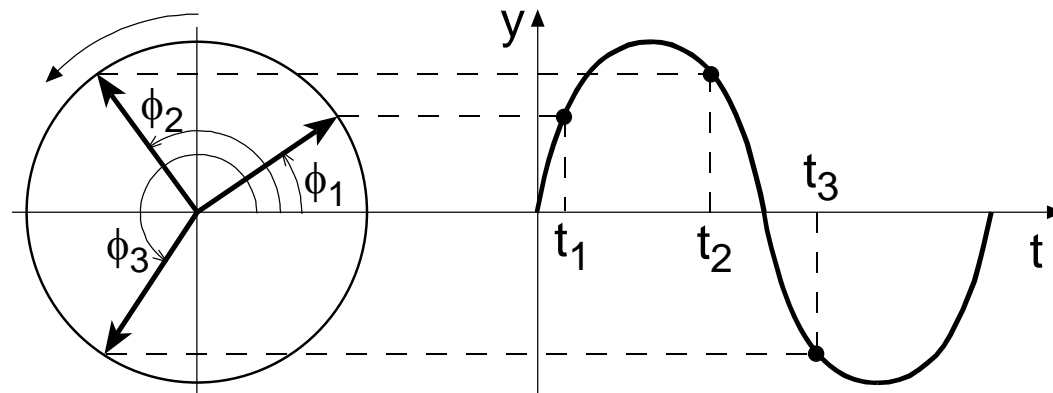
- Pohyb lineárne kmitajúceho hmotného bodu si môžeme predstaviť ako priemet vektora (fázora), otáčajúceho sa konštantnou uhlovou rýchlosťou.
- Okamžitú hodnotu výchylky môžeme vyjadriť ako reálnu alebo imaginárnu časť výrazu, popisujúceho vektor, rotujúci konštantnou uhlovou rýchlosťou

(Eulerov vzorec)

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

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

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

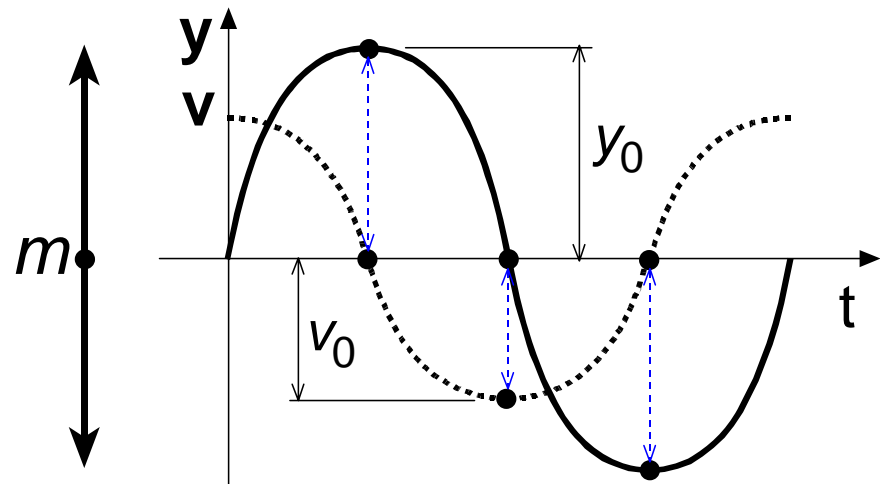


Rýchlosť kmitania hmotného bodu

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

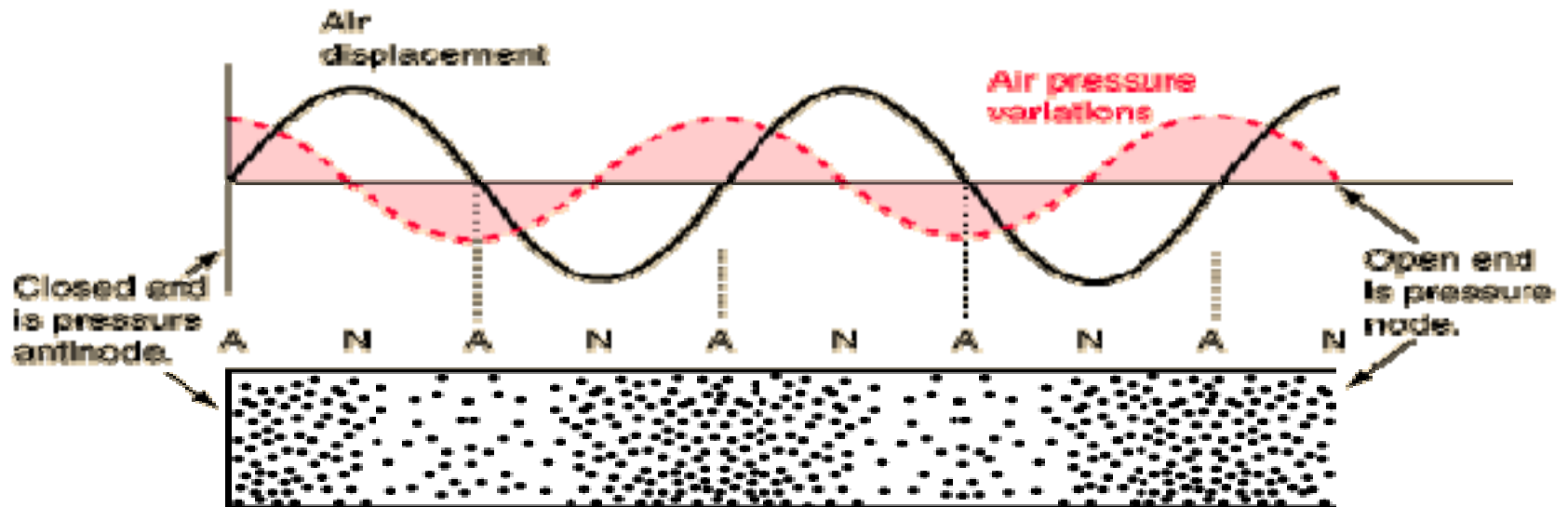
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{d\left(y_0 \sin(\omega t + \varphi_0)\right)}{dt} = \omega y_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = v_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$$

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



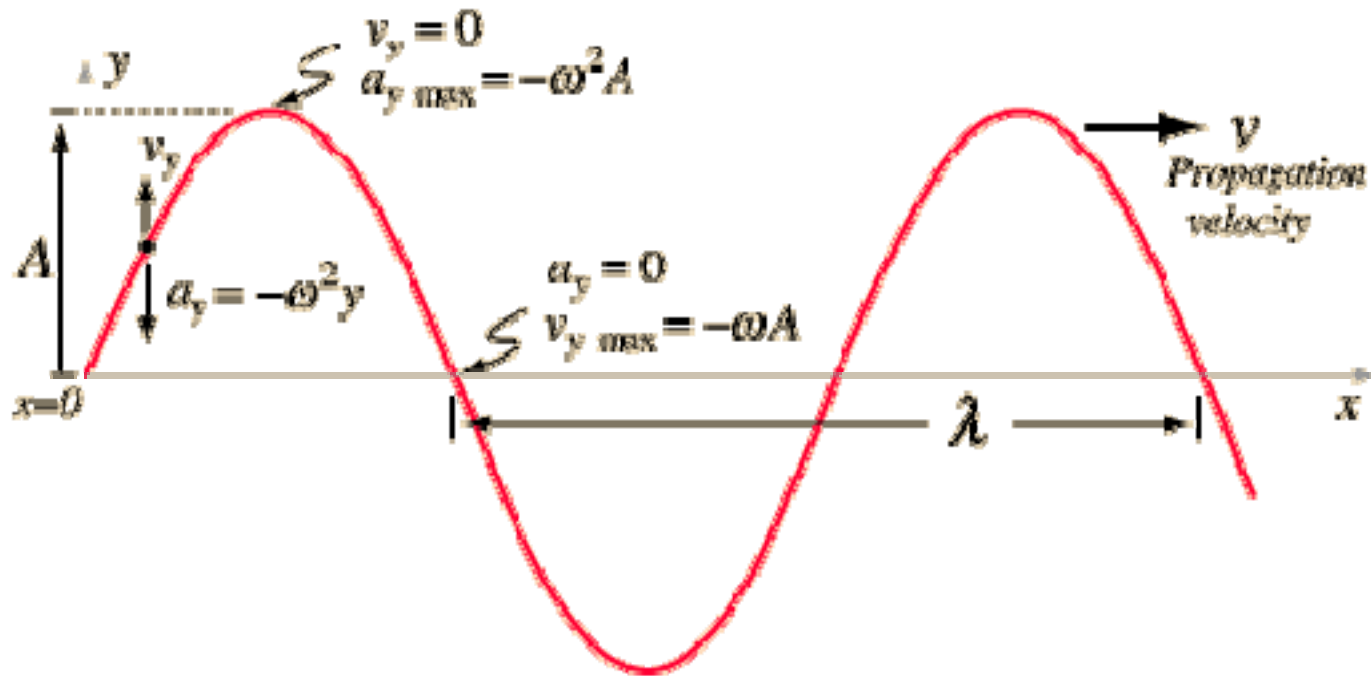
Akustická výchylka

- 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 $[\text{ms}^{-1}]$ – $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$, $\mathbf{v}(\mathbf{r},t)$
- resp $[\text{ms}^{-2}]$ – $\mathbf{a}(\mathbf{x},t)$, $\mathbf{a}(\mathbf{r},t)$



*Description of
the transverse
motion.*

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

$$v = f\lambda$$

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

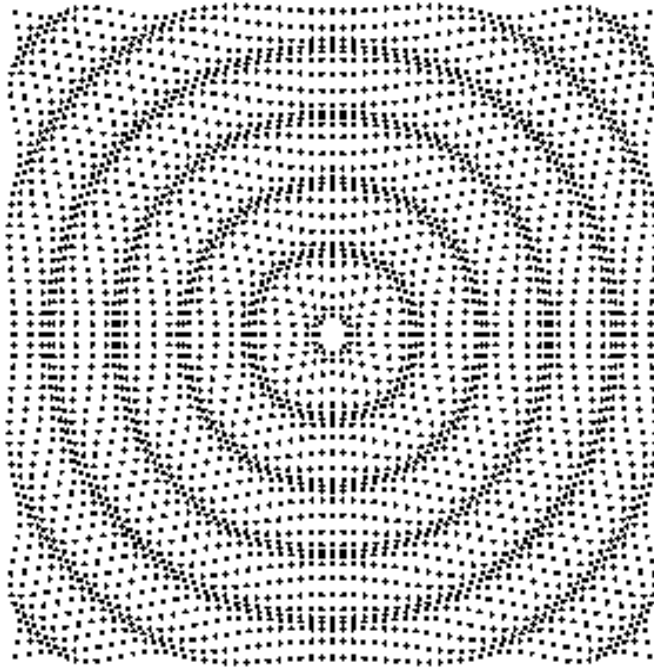
$$v_y(x,t) = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

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

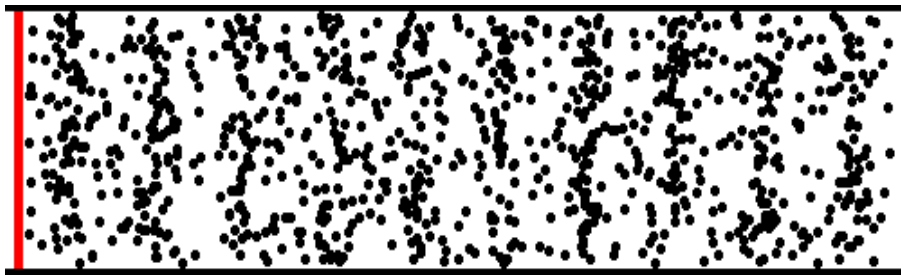
Vlnoplocha, čelo vlny, zvukový lúč

- 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

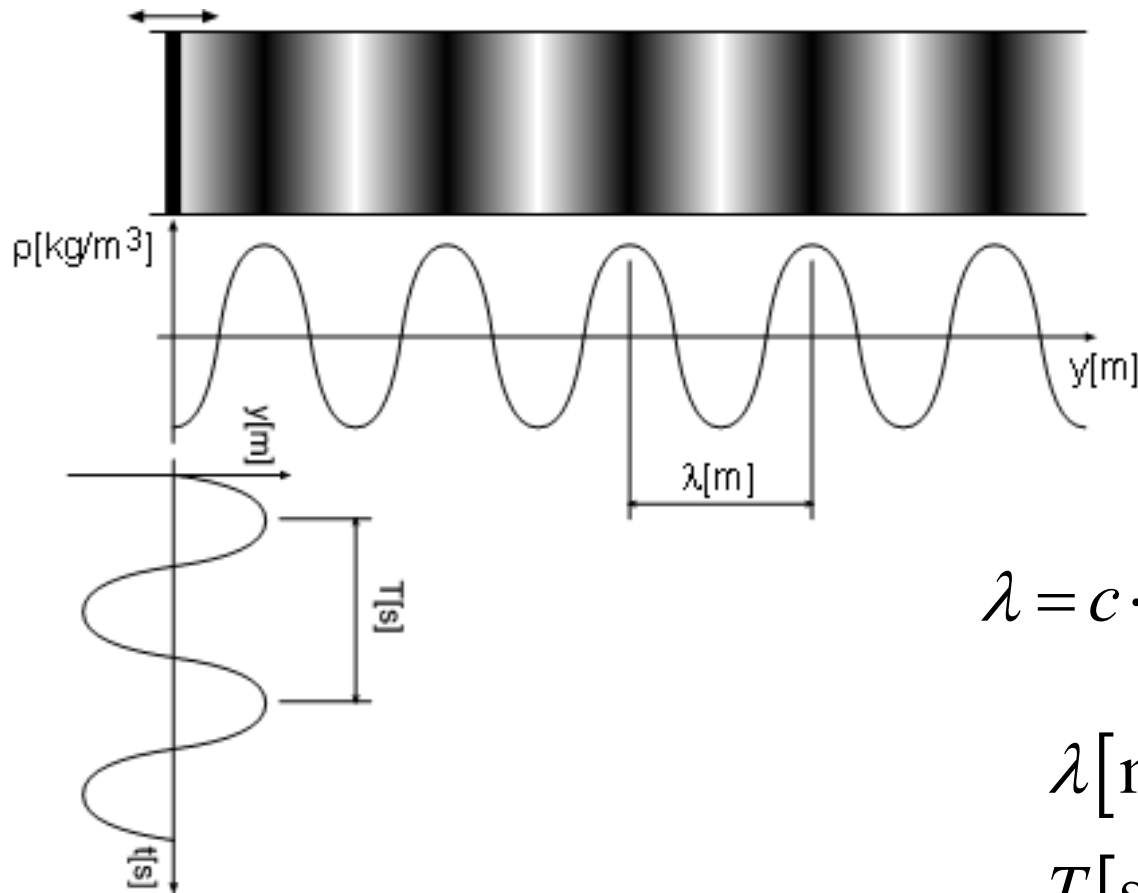
Rovinná a guľová zvuková vlna



- 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



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

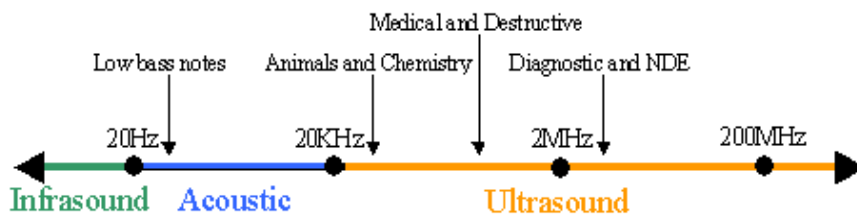
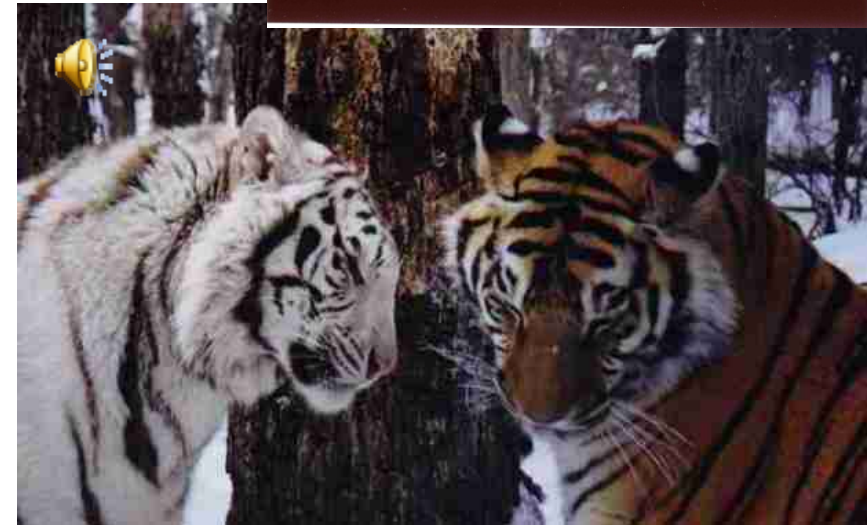
λ [m] - vlnová dĺžka

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



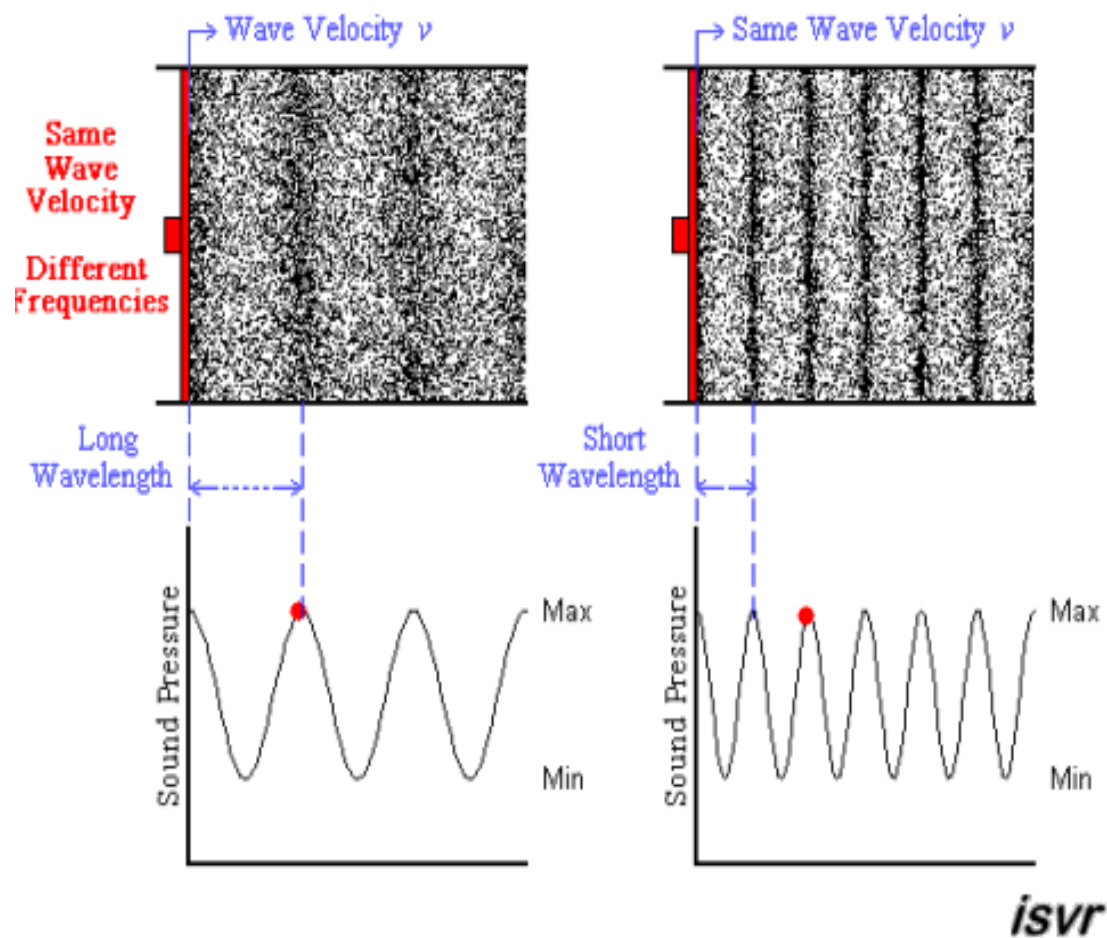
zvuk: $f \in \langle 16, 22\,000 \rangle$ Hz

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

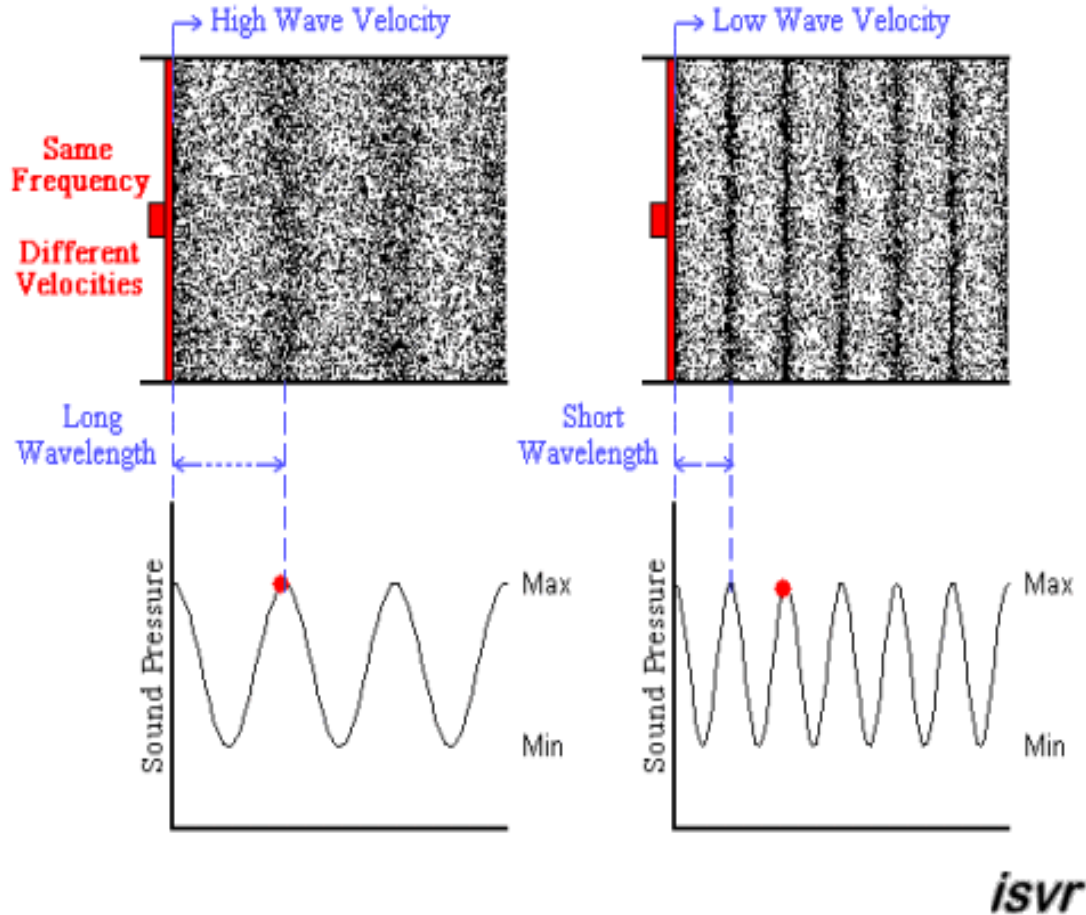
ultrazvuk: $f > 22\,000$ Hz; $\lambda < 1.5\text{ cm}$

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

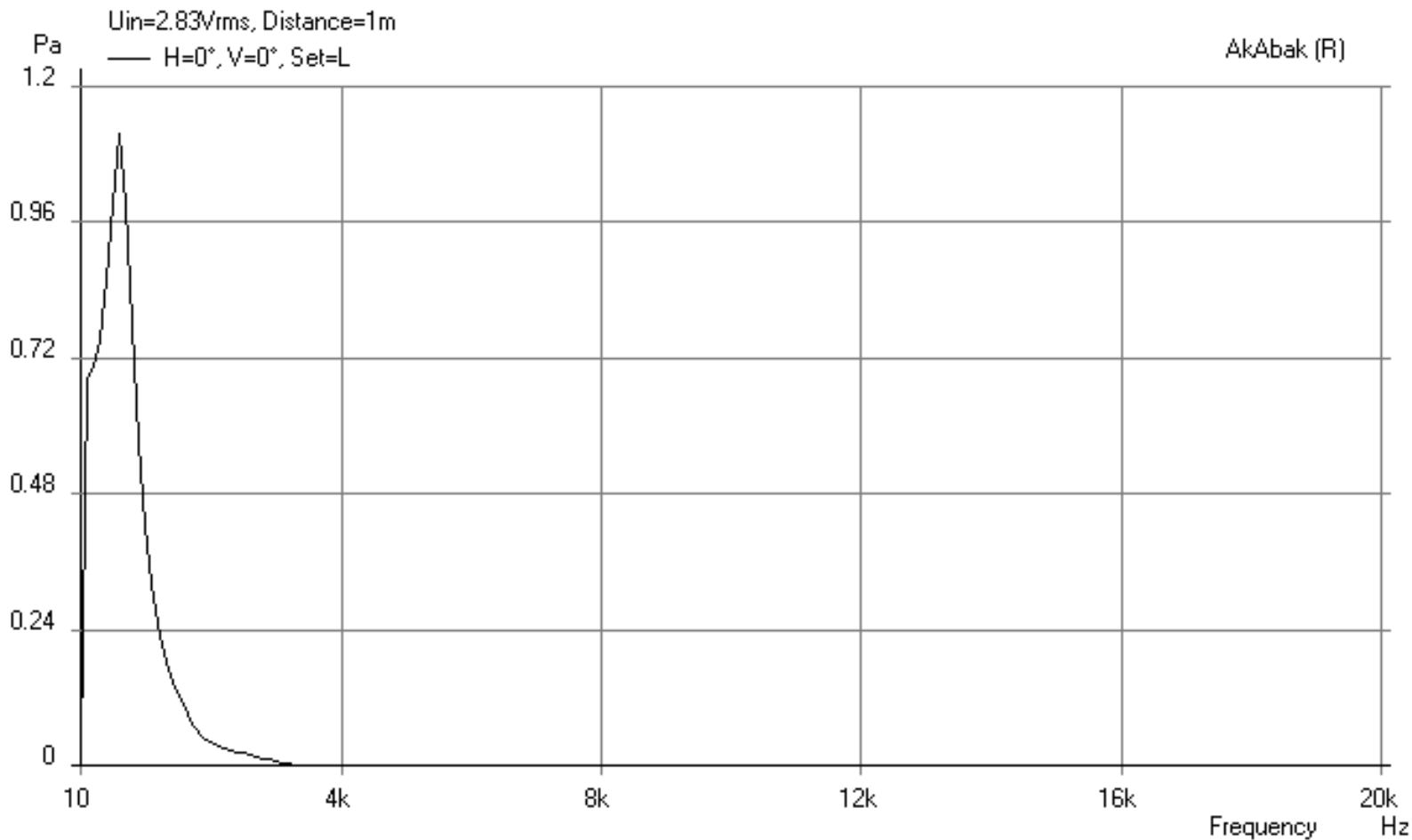


Lineárna a nelineárne frekvenčné stupnice

- zobrazenie akustických signálov (amplitúdové/fázové frekv. charakteristiky, smerové charakteristiky, spektrogramy,), návrh a konštrukcia elektroakustických zariadení (banky filtrov), konštrukcia a ladenie hudobných nástrojov
- hudobné stupnice – empiricky určené frekvenčné intervaly (frekvencia versus výška tónu) – tónové sústavy
- „matematické“ stupnice
 - logaritmická stupnica
 - oktávová, pol-oktávová a tretino-oktávová stupnica
- stupnice odvodené od vlastností ľudského sluchu
 - melova stupnica
 - barkova stupnica

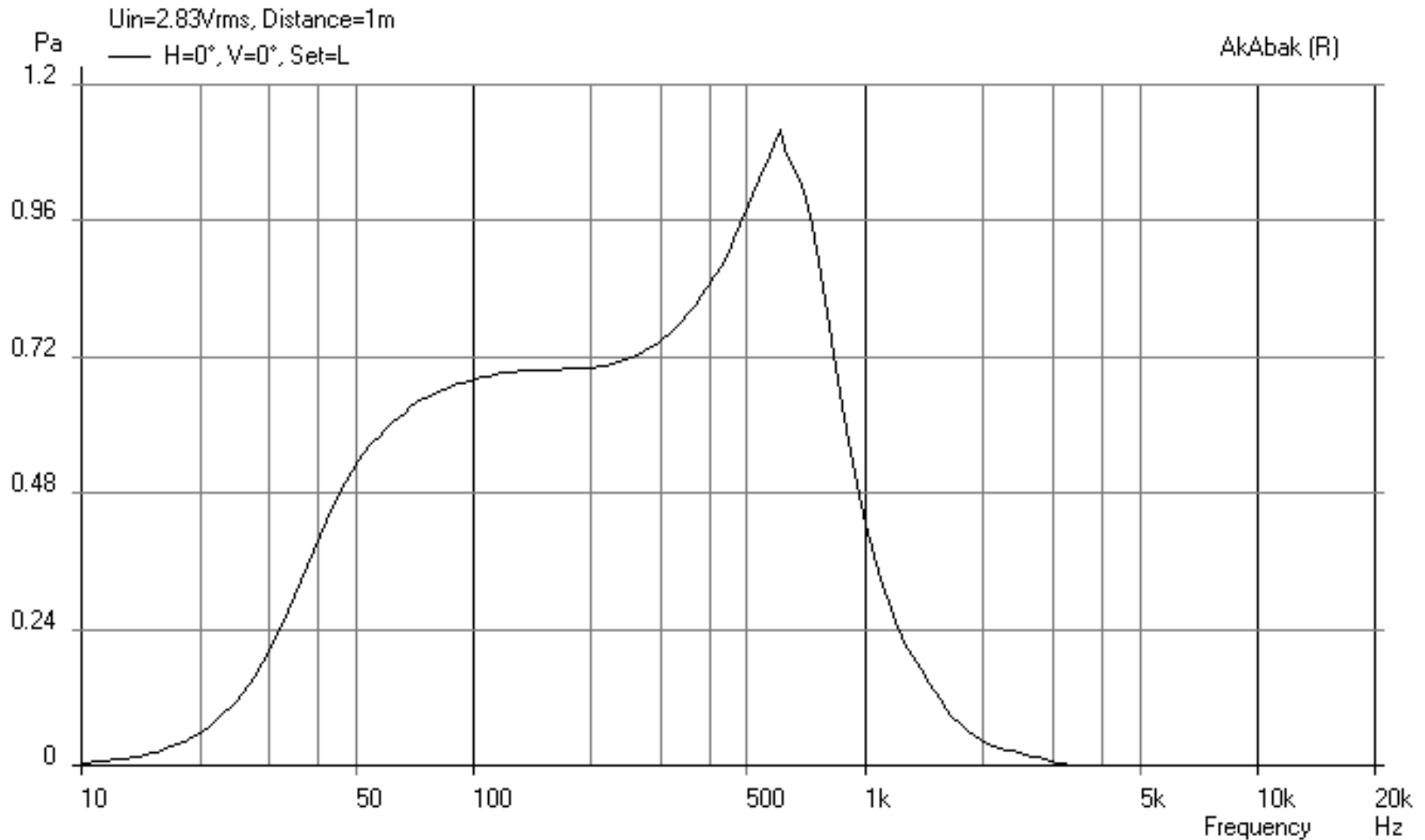
Lineárna frekvenčná stupnica

4. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



Logaritmická frekvenčná stupnica

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:

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

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

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

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

Príklad: Frekvenčné pásma oktávovej škály

$$q = 1$$

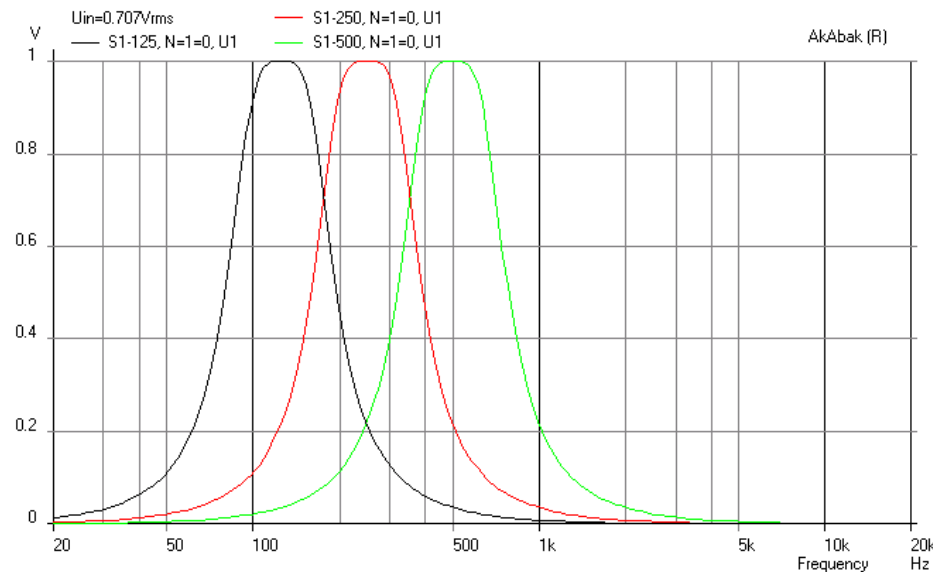
Centrálne frekvencie:

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

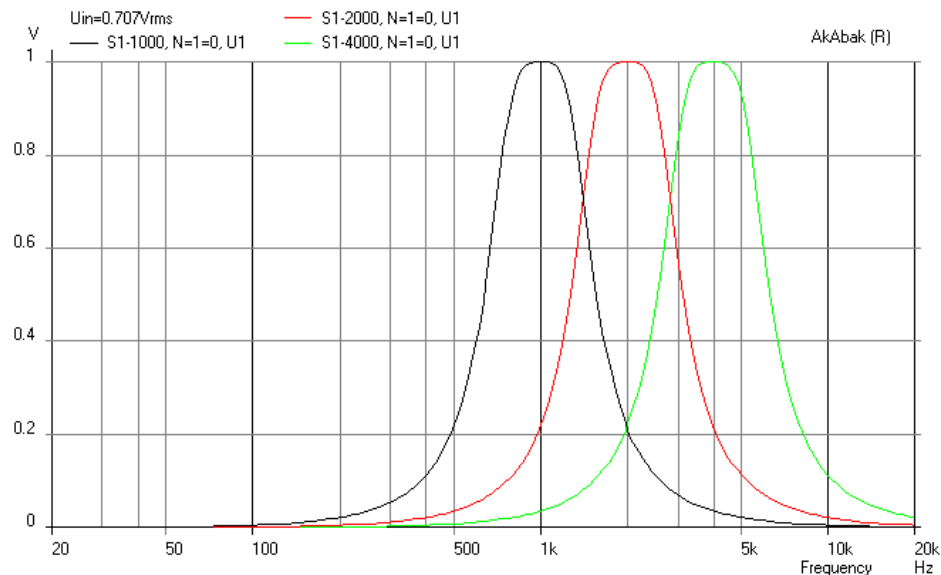
$$f_{n,c} = 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 \quad [\text{Hz}]$$

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

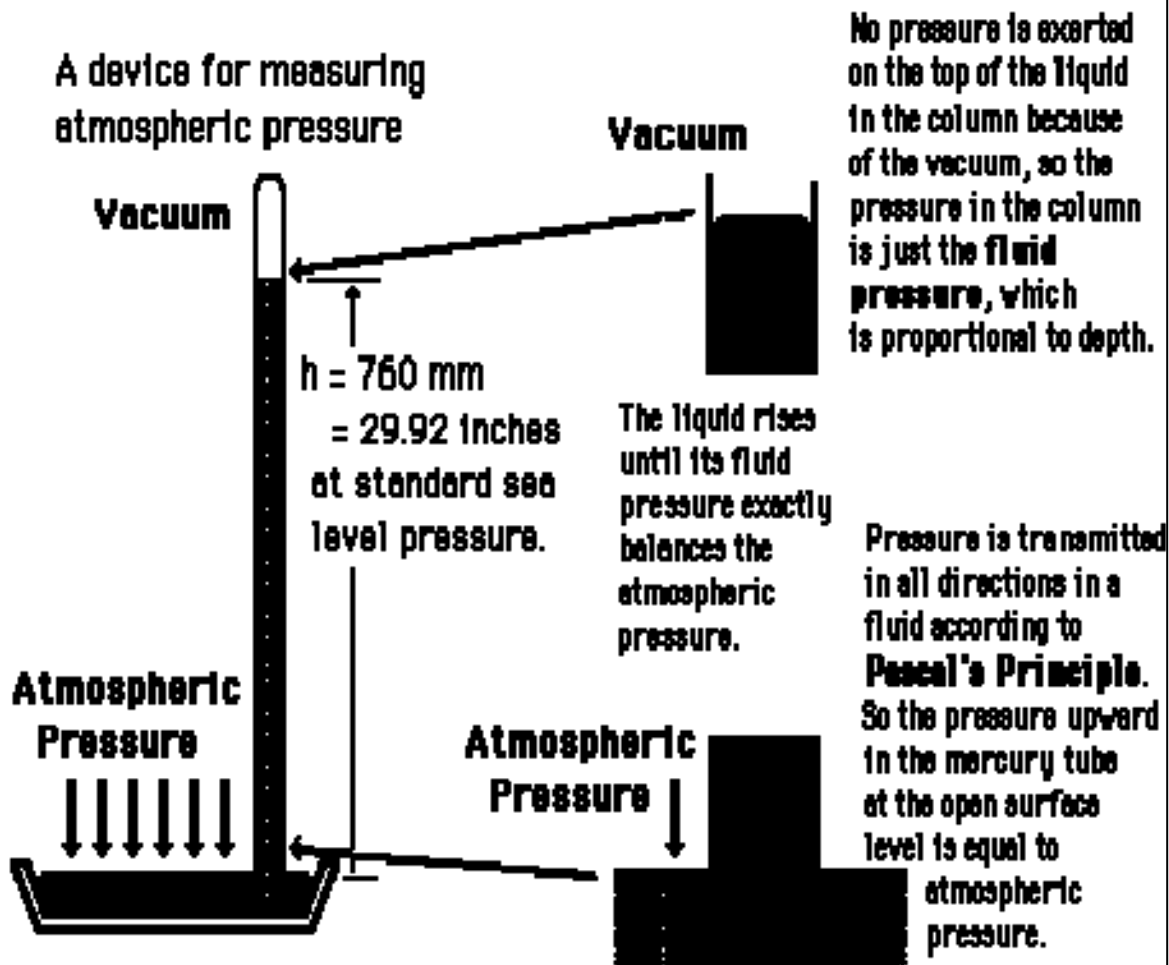
1. Voltage of OKTÁVY, Amplitude (Phase)



2. Voltage of OKTÁVY, Amplitude (Phase)



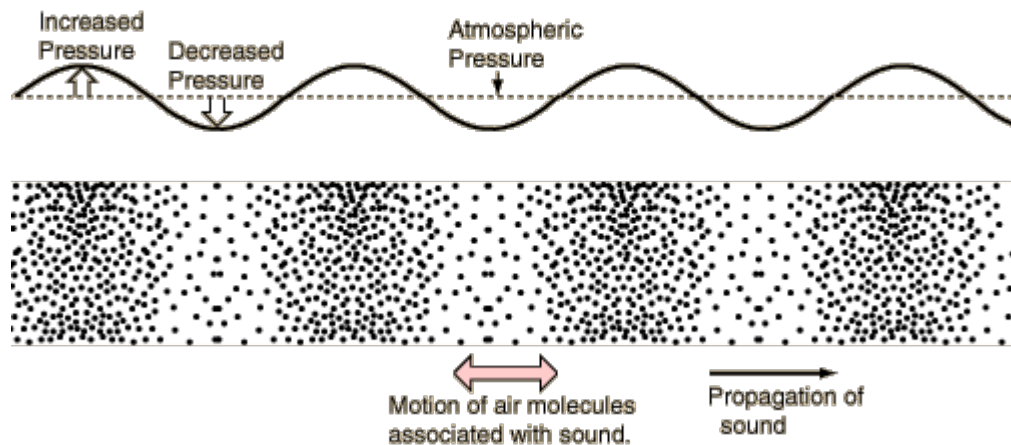
Atmosférický (statický) tlak



- 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

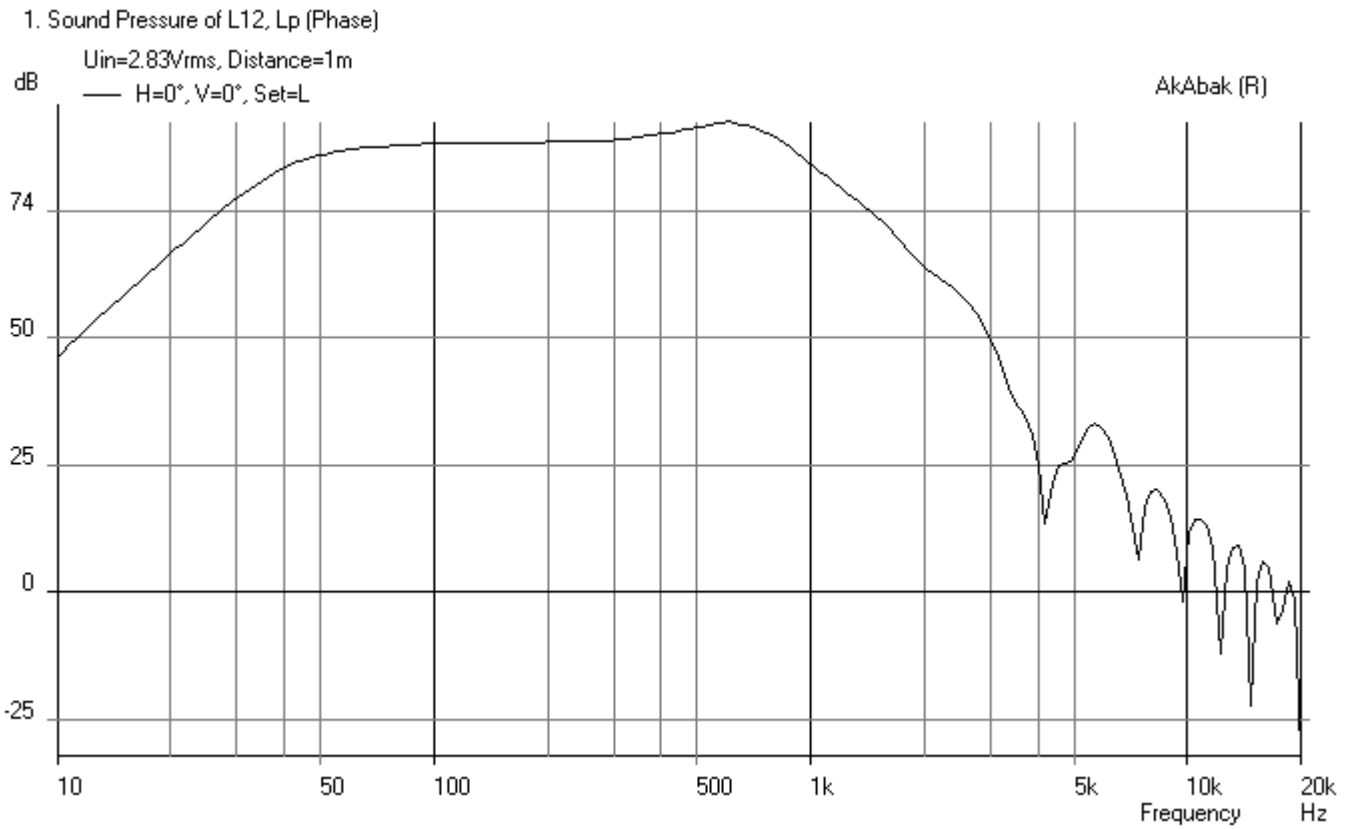
- rozdiel medzi okamžitou a referenčnou (strednou) hodnotou atmosférického tlaku v danom mieste prostredia
- striedavá veličina, t.j. nadobúda kladné i záporné hodnoty a je skalárom (matematicko-fyzikálne hľadisko)
- bežné hodnoty akustického tlaku pokrývajú rozsah hodnôt rádovo od 10^{-5} Pa až po 10^2 Pa
- označovanie p_A [Nm^{-2} ; Pa]

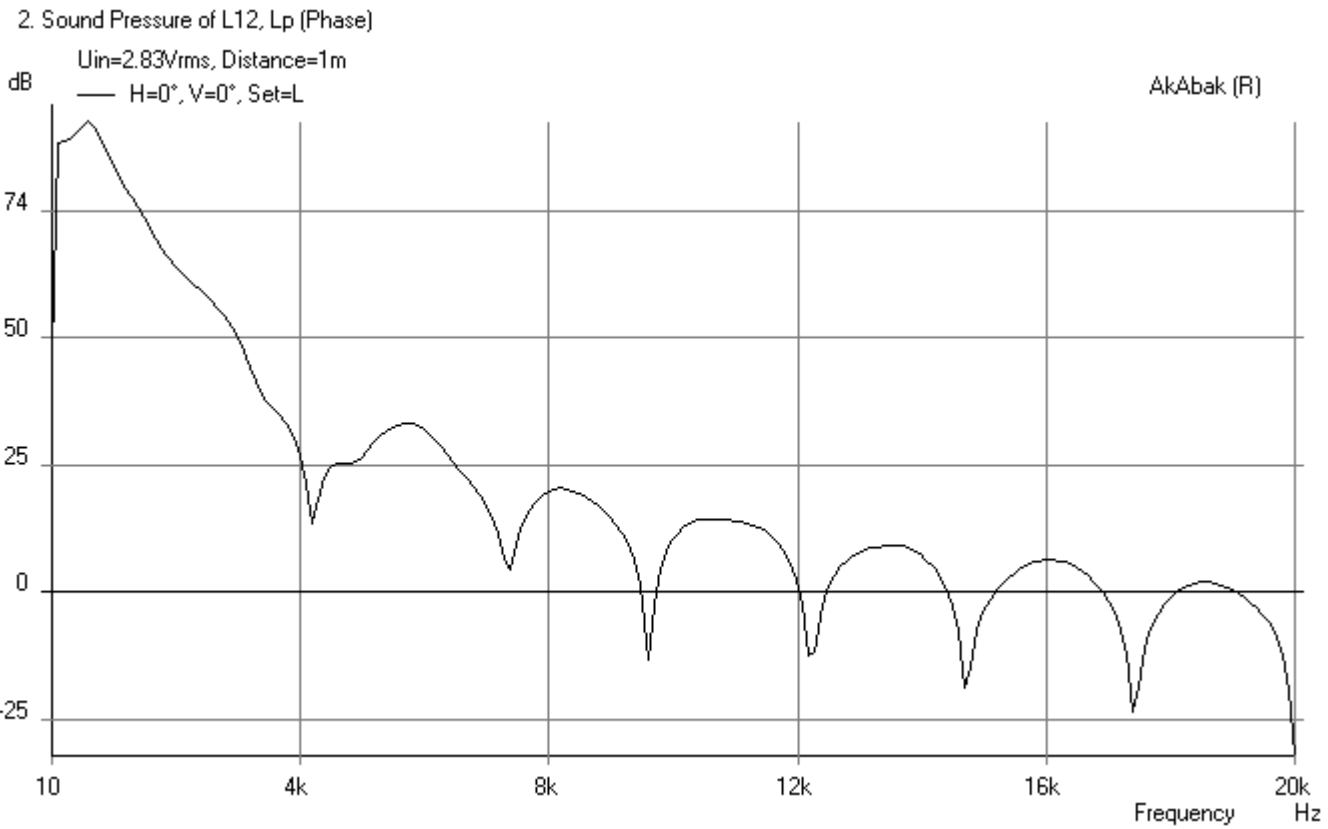


Hladina akustického tlaku

- 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 ($r_V = c \cdot \rho_0$)

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

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.:

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

- 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:

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

Akustická intenzita

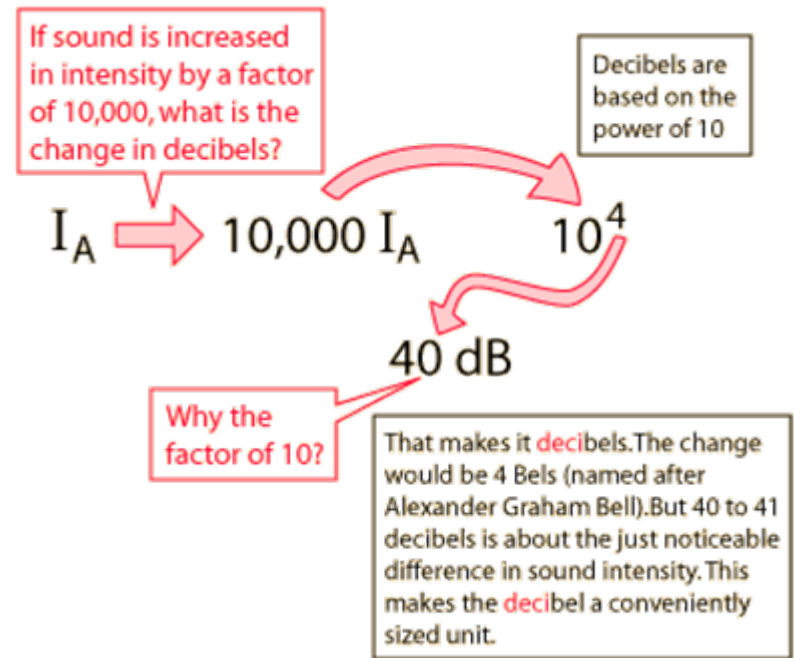
- množstvo energie, prechádzajúce za jednotku času cez jednotku plochy, kolmej na smer šírenia zvukovej vlny
- akustickú intenzitu definuje akustický výkon prechádzajúci plochou S , orientovanou kolmo na smer šírenia akustickej energie:

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

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

• ...

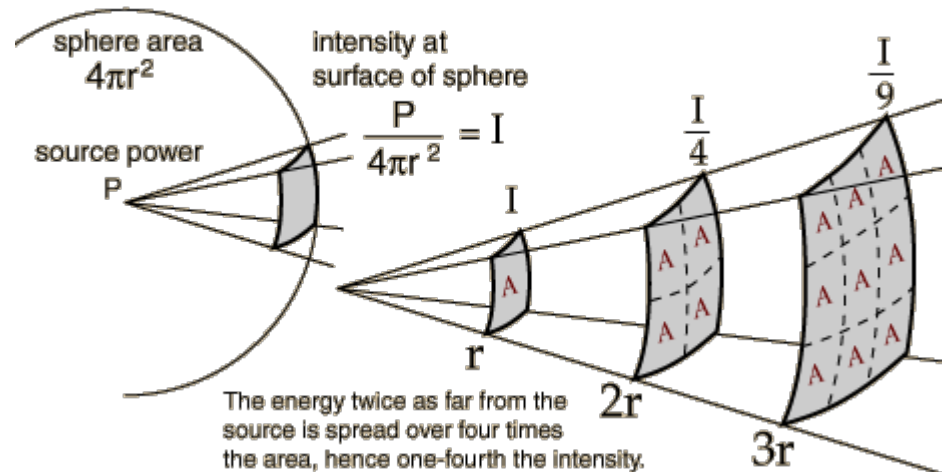
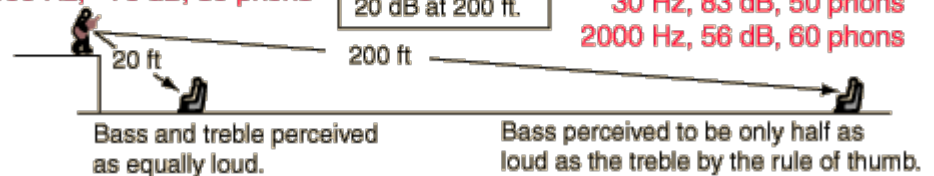
Assume that the close listener hears both the low bass at 30 Hz and the midrange frequency 2000 Hz at the same loudness of 80 phons. Because of the difference in hearing sensitivity, the dB levels required are

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.

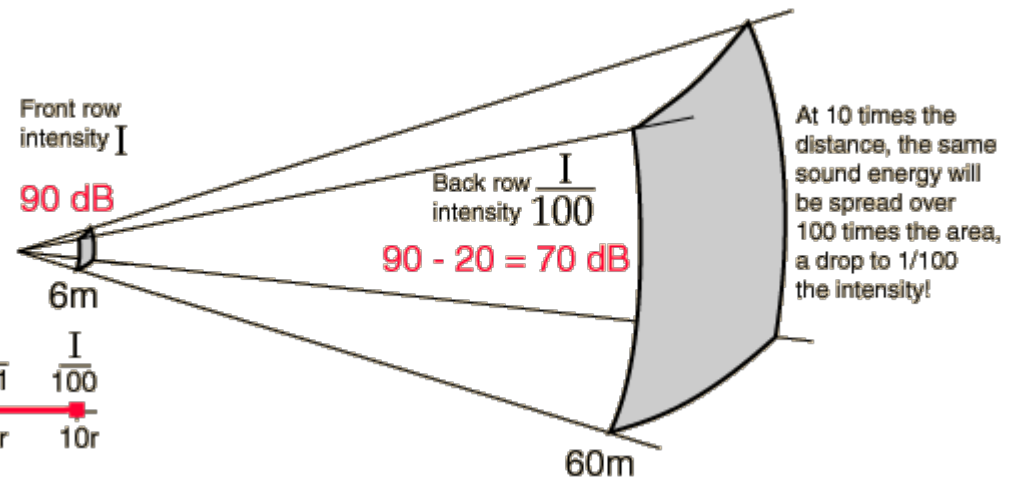
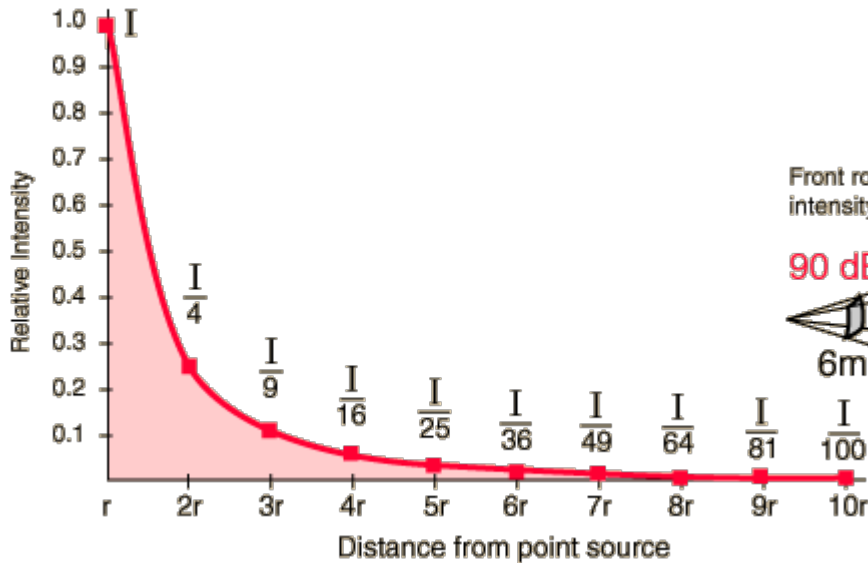
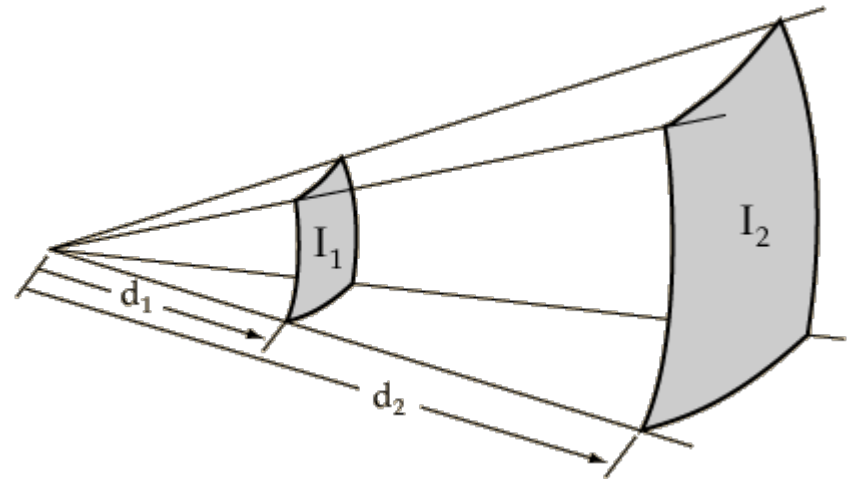
30 Hz, 83 dB, 50 phons
2000 Hz, 56 dB, 60 phons



Inverse square law

• ...

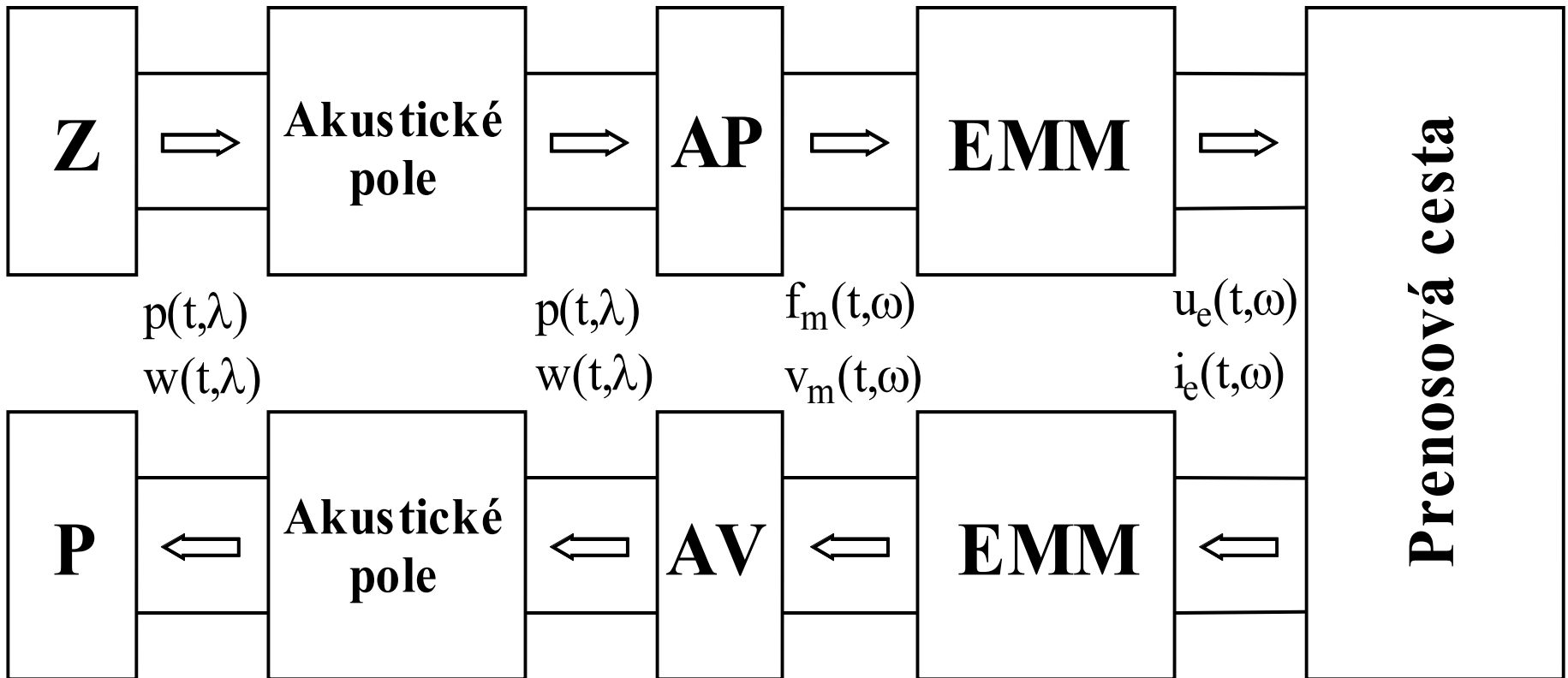
$$\frac{I_2}{I_1} = \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^2$$



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

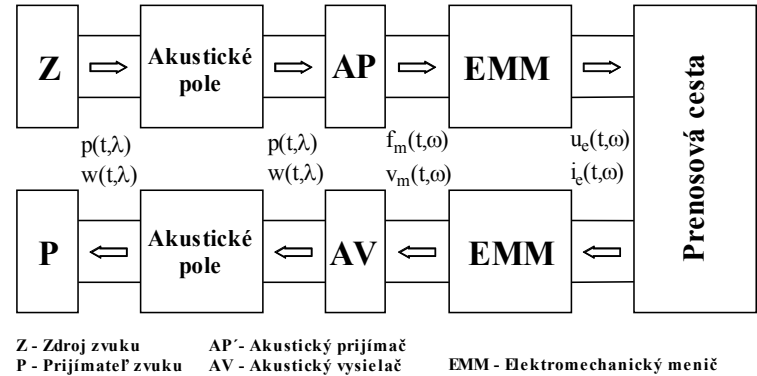
AV - Akustický vysielač

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

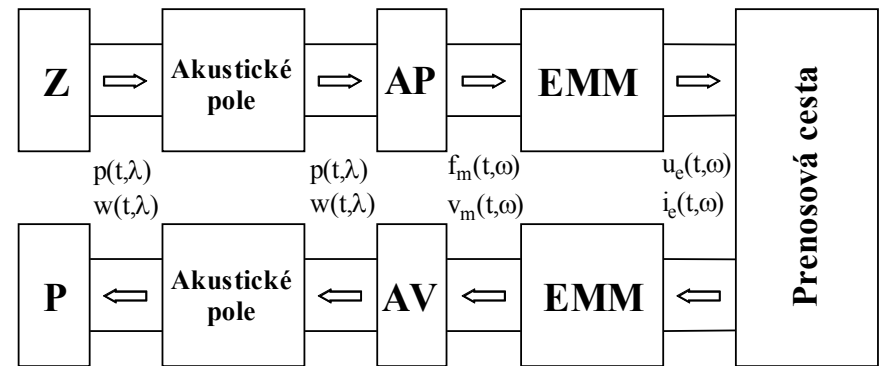
- **otvorené**

- ulica, štadión, ...

- **zatvorené**

- malé (obývačka, nahrávacie štúdio, menšia poslucháreň, ...)

- veľké (športová hala, kostol, kongresová sála, staničná budova, ...)



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

- priestor, v ktorom sa šíri zvukové (akustické) vlnenie

- akustické pole jediného zvukového zdroja
- akustické pole viacerých zvukových zdrojov – princíp superpozície

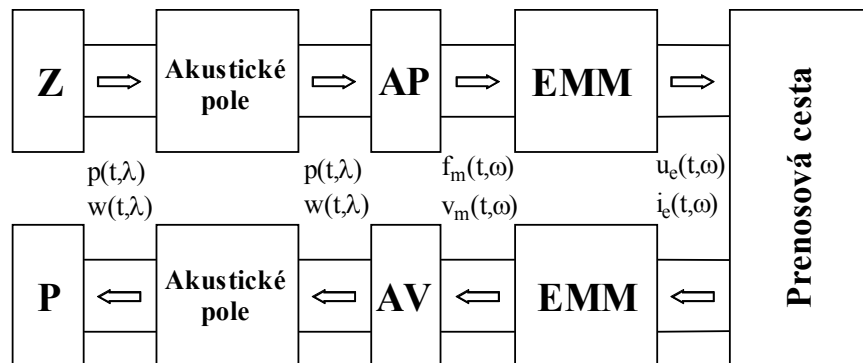
Akustický prijímač

- **reálny**

- membrána
- páska
- ...

- **teoretický**

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



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

Akustické vysieláče

- reálne

- mechanické

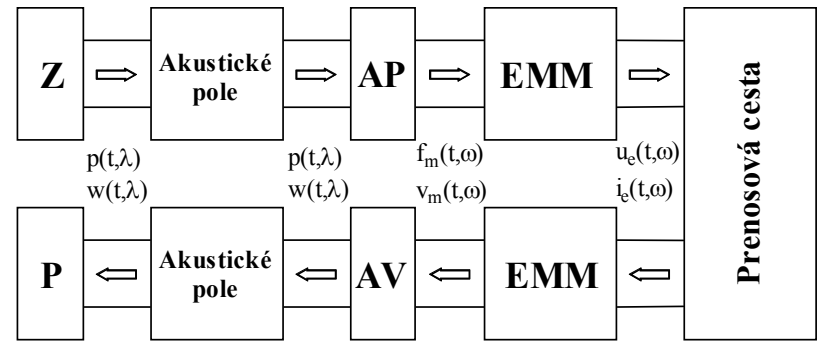
- kmitajúce telesá – ich povrchom sa prenáša kmitanie do okolitého prostredia
 - membrány, struny, ...
 - nárazy a trenie telies

- aerodynamické

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

- teoretické (matematické modely)

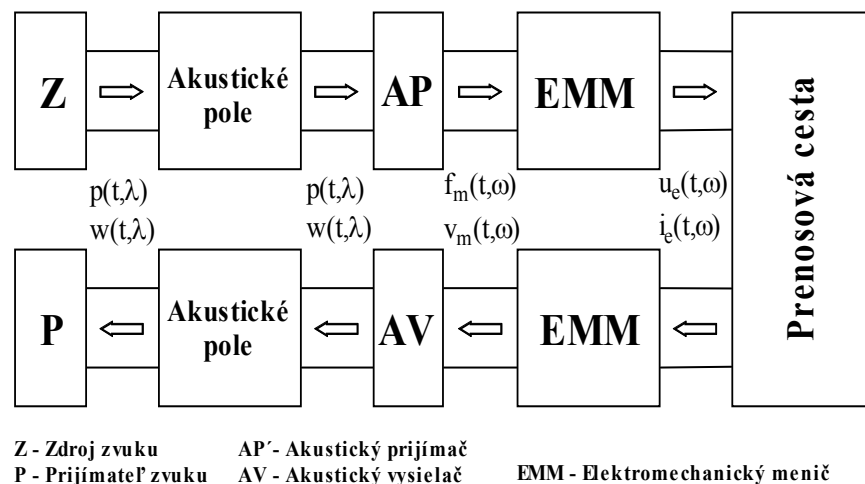
- pulzujúca guľa (bodový vysielateľ, vysielateľ nultého rádu)
 - akustický dipól (vysielateľ prvého rádu)
 - sférické vysieláče druhého a vyšších rádov
 - rady a polia bodových zdrojov
 - priamkové, valcové a piestové vysieláče



Z - Zdroj zvuku
Akustické pole - Akustické pole
AP - Akustický prijímač
AV - Akustický vysielateľ
EMM - Elektromechanický menič

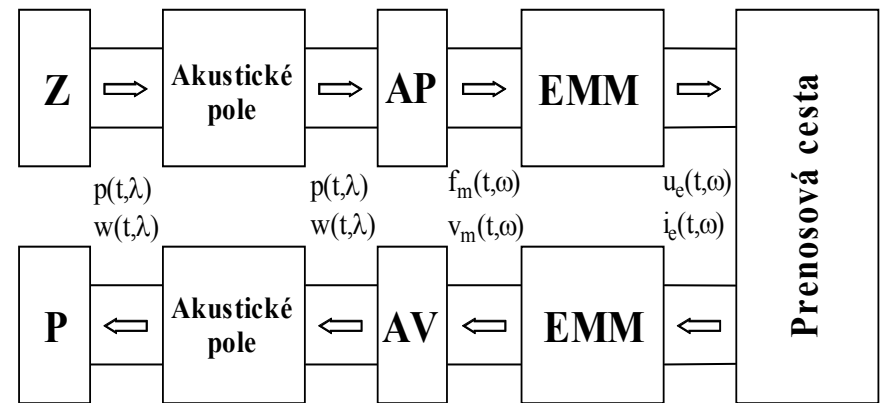
Elektromechanický menič

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



Prenosová cesta

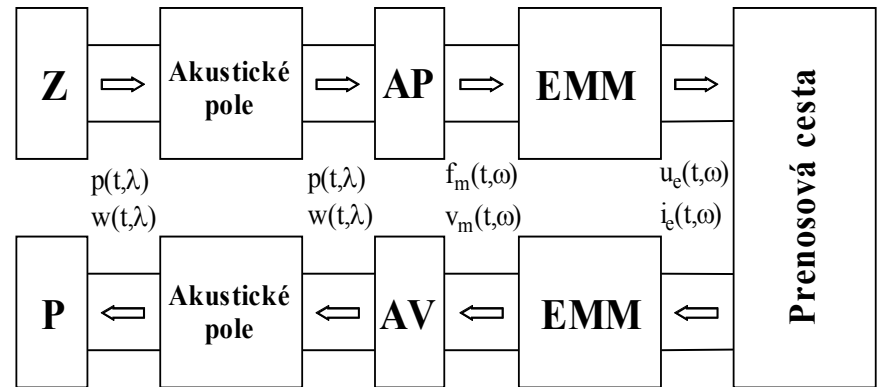
- obvody elektronického spracovania
 - zosilňovače
 - efektové procesory
 - AD/DA prevodníky
 - ...
- záznamové systémy
- drôtové a bezdrôtové prenosové cesty
- meracie prístroje
- riadiace a kontrolné obvody
- ...



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

Prijímateľ' zvuku: človek

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



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

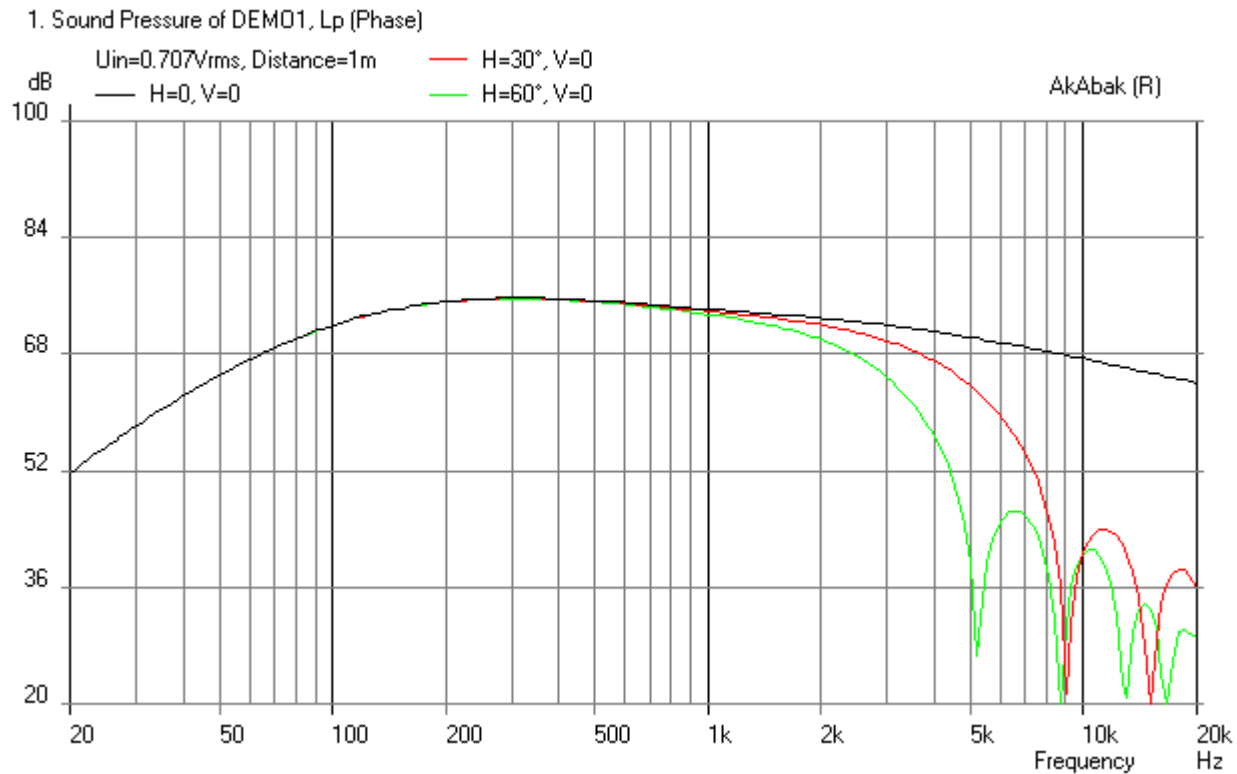
Subsystémy zvukového systému

- 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 (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.).

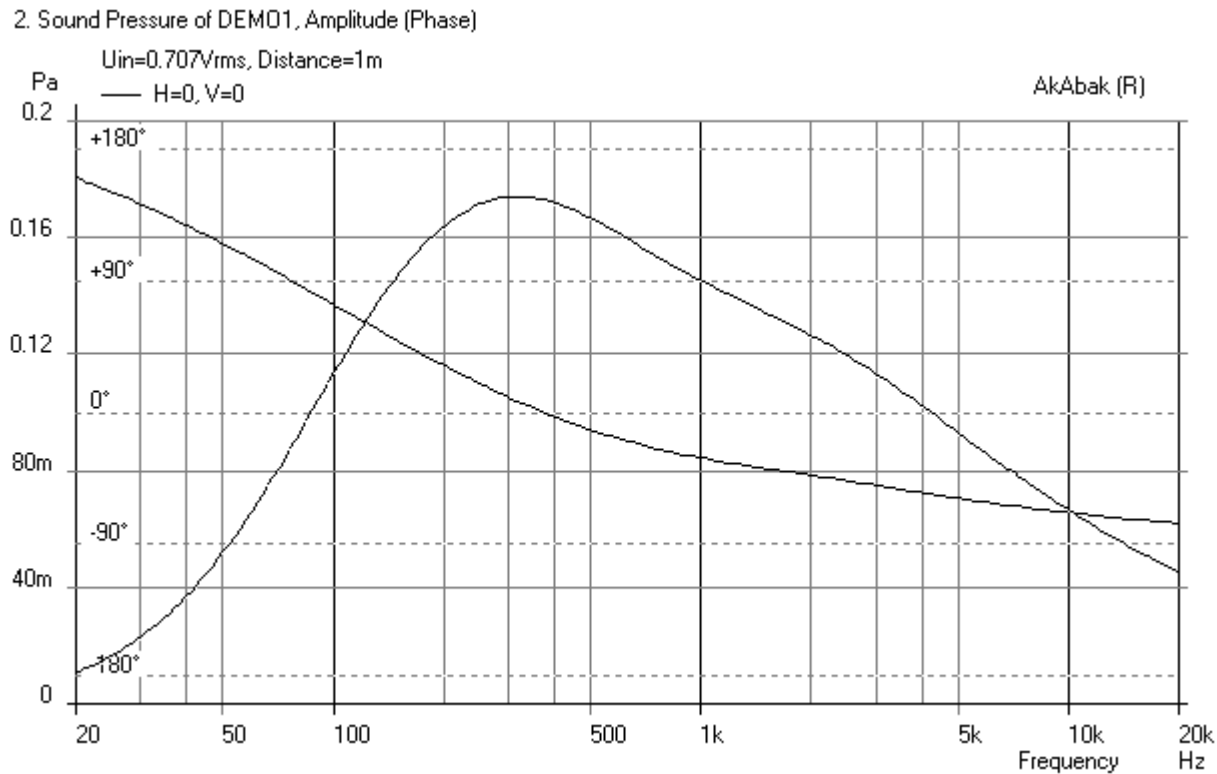
Charakteristiky elektroakustického systému

- 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
 - ...

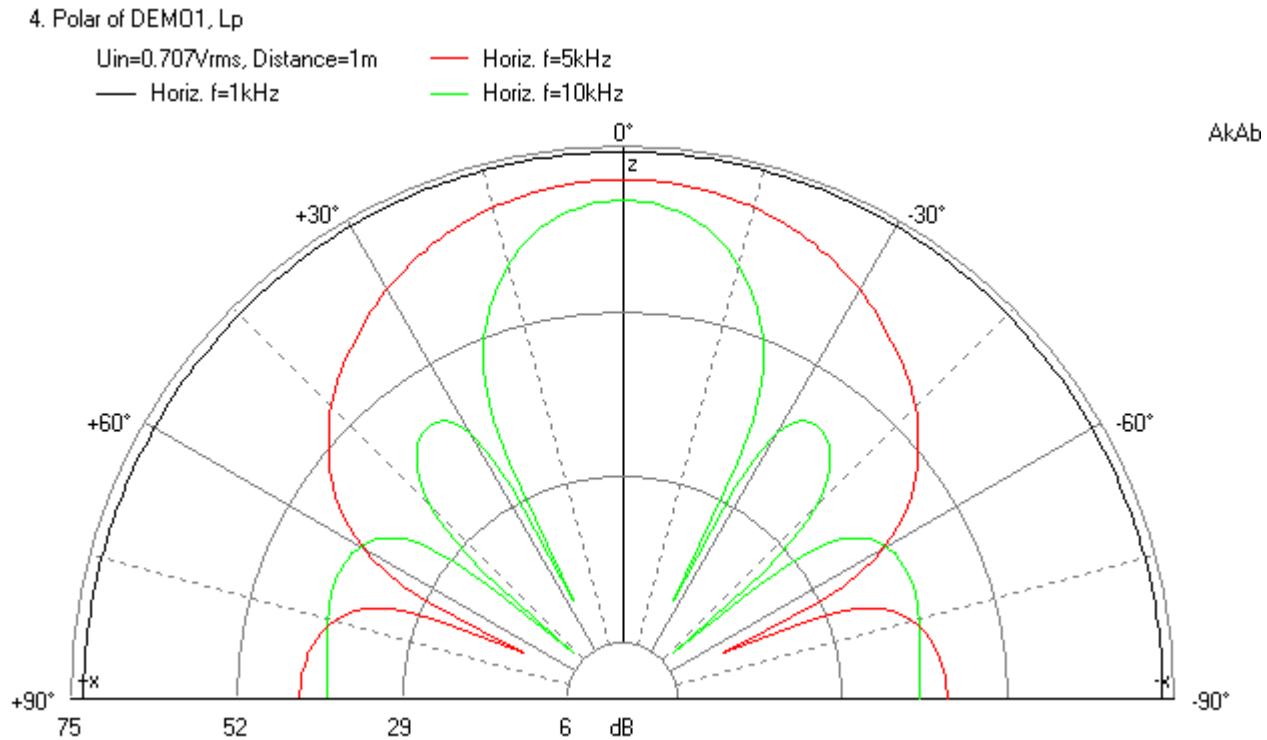
Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici



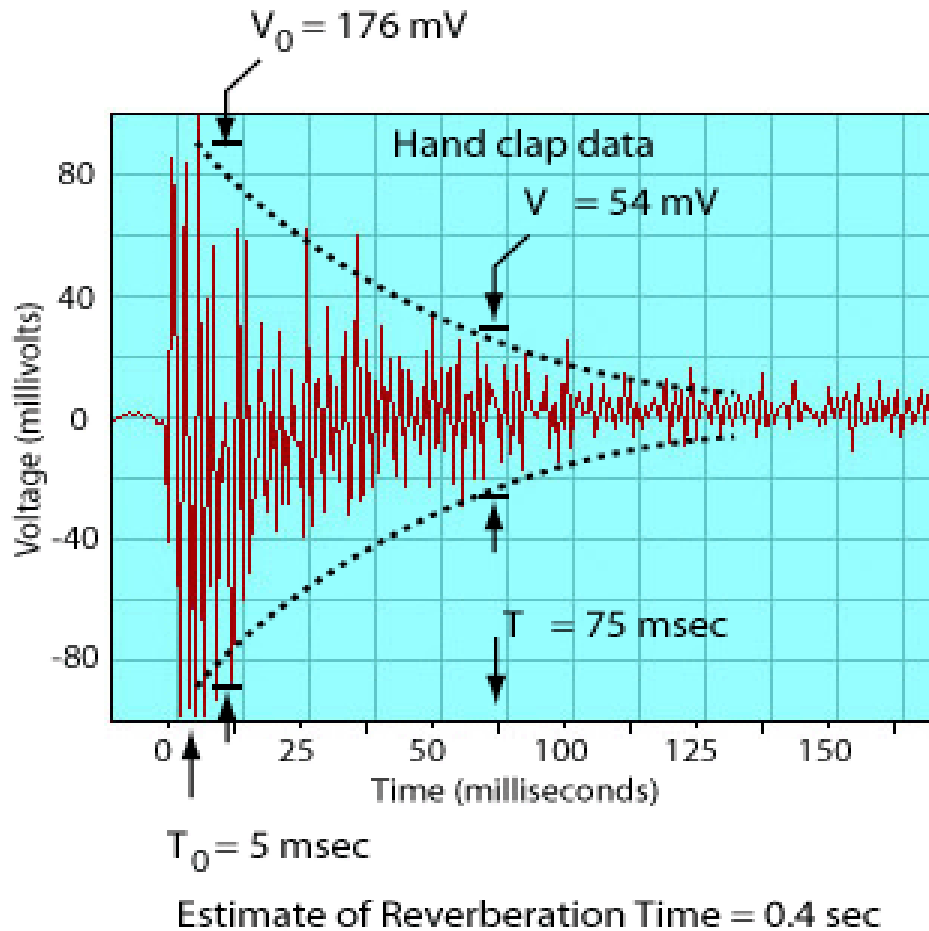
Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici



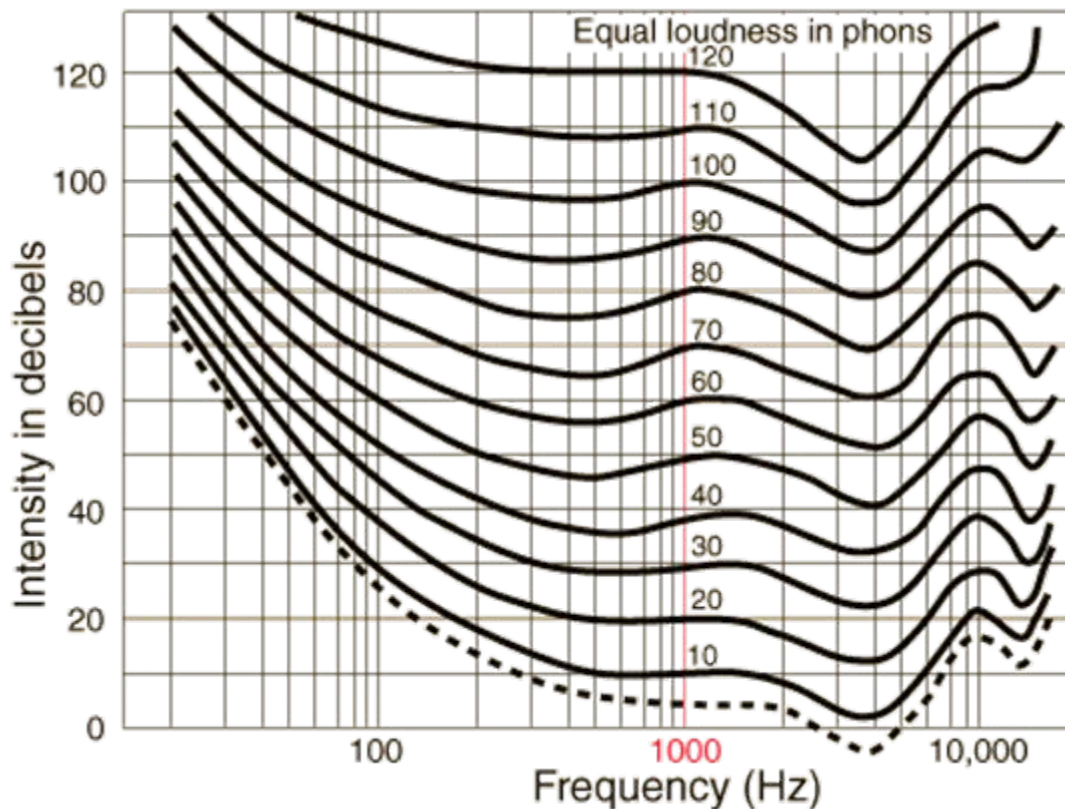
Smerová charakteristika nízkotónového reproduktora



Časový priebeh zvukového signálu pri meraní doby dozvuku



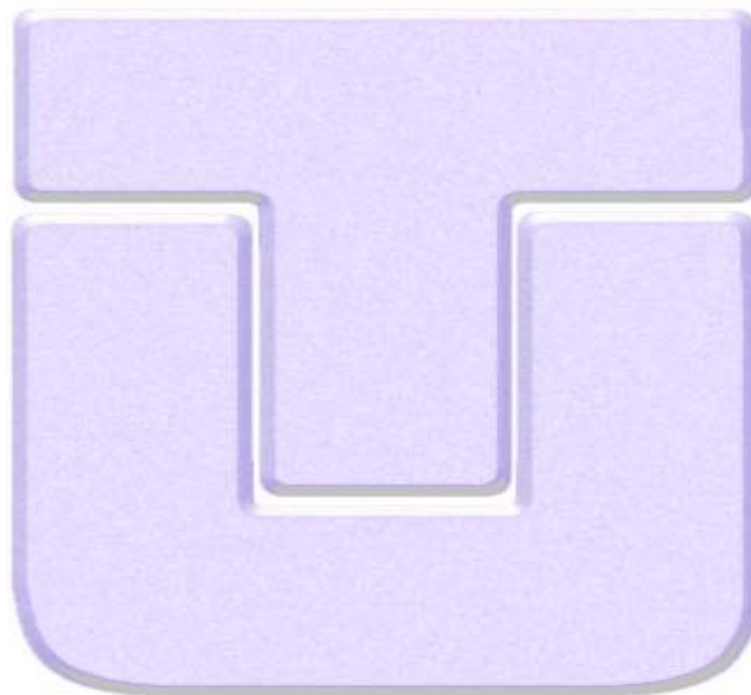
Krivky rovnakej hlasitosti



- ukazujú rozdiel medzi hladinou akustického tlaku (intenzity) a spôsobom jeho vnímania (percepcie) 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



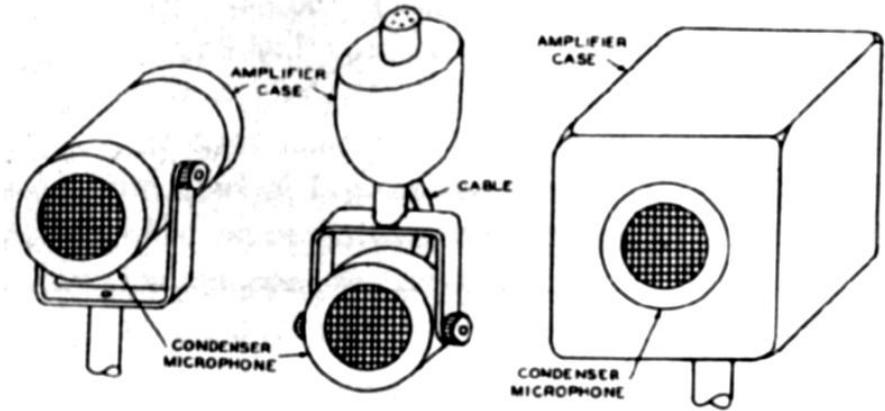
Recording Technology History

- Origins (1877 – 1889)
- Cylinder vs. Disc (1890 - 1918)
- New Popular Music (1917 – 1929)
- Electric Era Replaces Acoustic Era (1925 – 1931)
- Music for the Masses (1933 – 1942)
- Magnetic Tape Recording Invented (1928 – 1944)
- Tape Recording Comes to America (1944 – 1948)
- War of the Speeds (1948 – 1951)
- Rock and Roll (1947 – 1956)
- From Stereo to Cassette (1945 – 1969)
- Video Tape Recording (1950 – 1989)
- Digital Revolution (1982 - ...)

- In 1827, Sir Charles Wheatstone (1802-1875) was the first person to coin the phrase "microphone."
- The word "microphone" comes from the Greek words "micro", meaning "small", and "phone" meaning "voice". It first appeared in a dictionary in 1683 as "*an instrument by which small sounds are intensified*". This was in reference to acoustical hearing devices such as the ear trumpets and megaphones of that era.
- In 1876, Emile Berliner invented the first microphone (*liquid transmitter*) used as a telephone voice transmitter in Bell Company telephone.
- Invented in 1878, David Hughes's (1831-1900) *carbon microphone* was the early model for the various carbon microphones now in use.

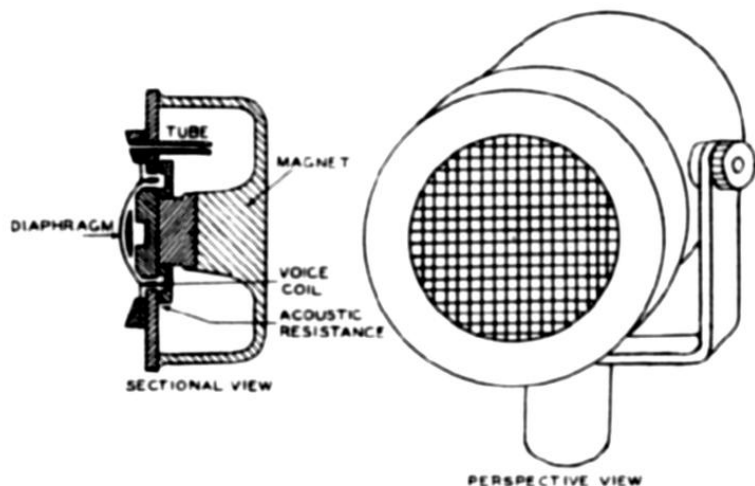


- The first capacitor microphone (and associated impedance converter/amplifier set) was developed by E.C. Wente in 1917, based on work at Bell Laboratories in America.



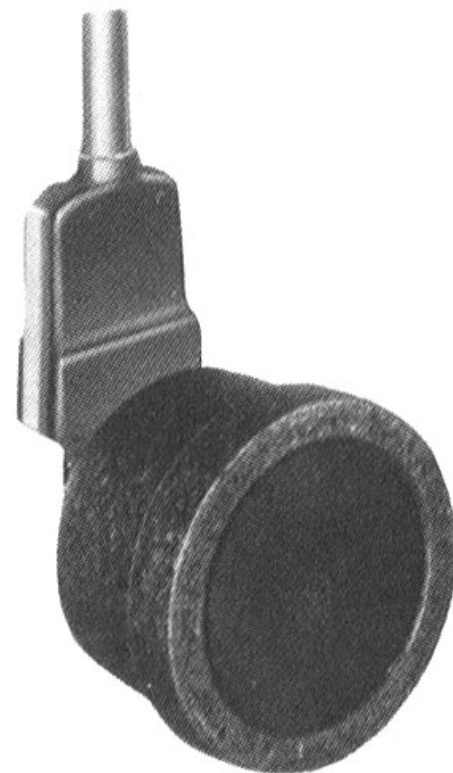
- The condenser microphone required an amplifier enclosure, containing a vacuum tube amplifier very close to the microphone element in order to amplify the faint signal to a more distant phonograph pickup or radio transmitter.

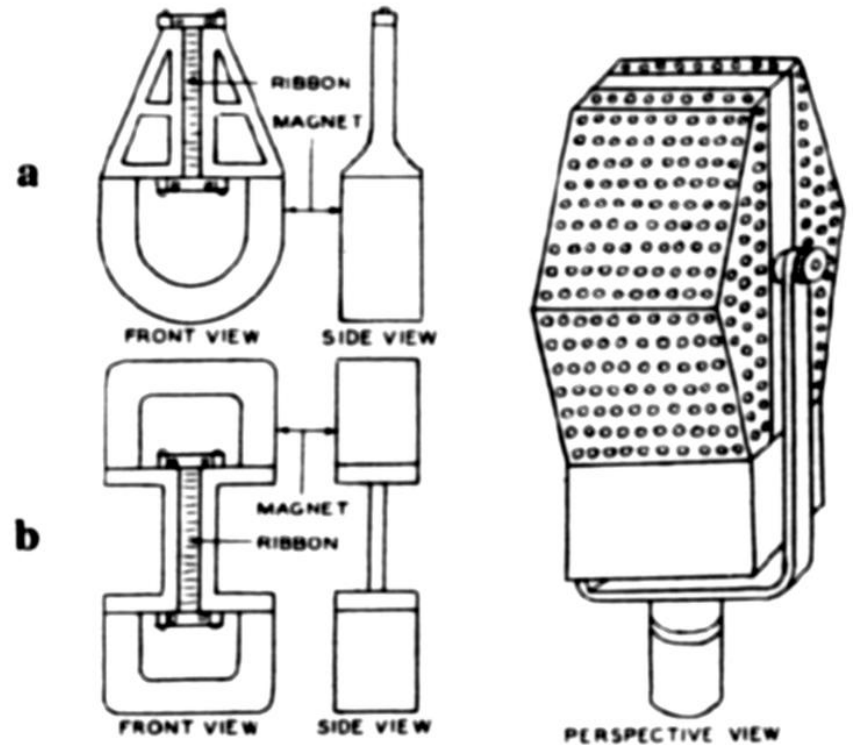




Electromagnetic microphones (moving coil, moving iron and ribbons) were relatively late on the scene because permanent magnets were very weak and only electromagnets could create sufficient flux densities. As a consequence, the first moving coil microphones were very large and required power supplies! The Marconi-Sykes magnetophone (developed from a patent by Sykes in 1920) was the first design to become popular and was adopted by the BBC in 1923, where it was known as the 'Meat Safe'.

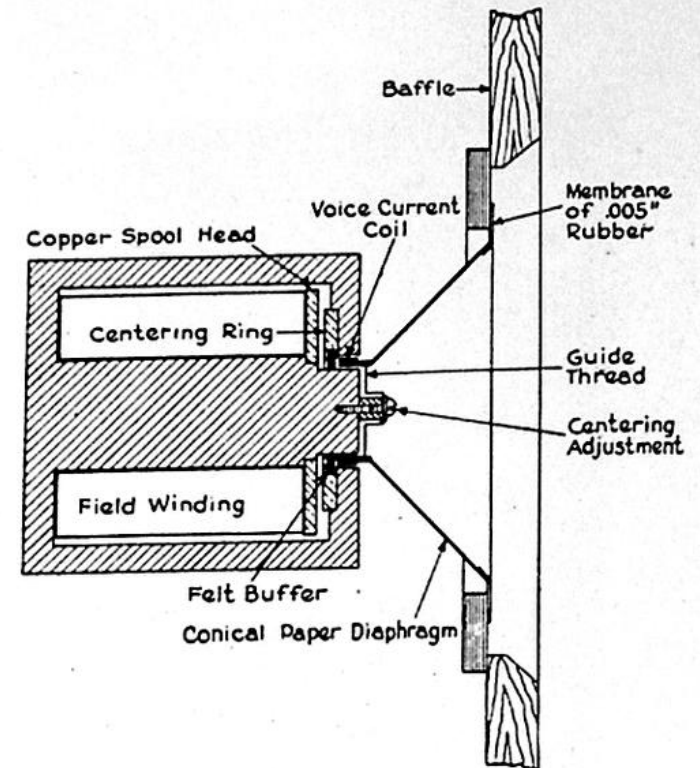
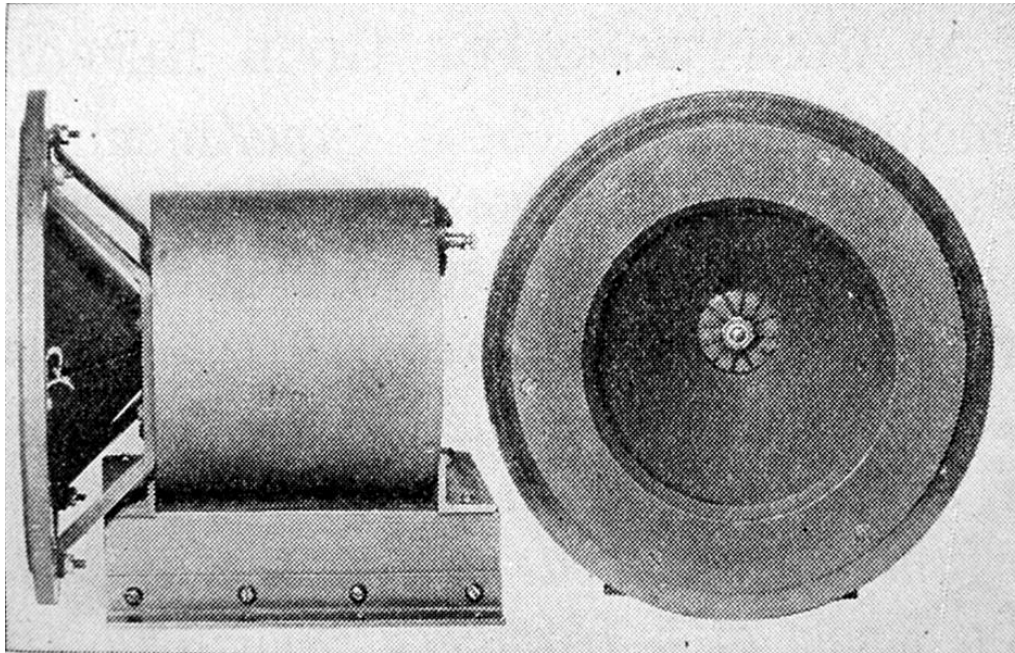
The moving-coil, or "dynamic" microphone was developed by W. C. Wentz and A. C. Thuras at Bell Labs in the late 1920's, and was patented in 1931. Unlike the earlier condenser design with a fixed plate behind the vibrating diaphragm, this microphone used a wire coil behind the diaphragm that moved with a "velocity" independent of the sound frequency. The sensitivity of the voltage output depended on the resistance, or "impedance" of the moving coil system. A low impedance of 30 ohms allowed transmission over a long cables without loss of quality. The model 618A was unidirectional and the later model 630A was omnidirectional with a frequency response of 30-15,000 Hz.





The ribbon, or "velocity" microphone was introduced by RCA in 1931 as the model 44A and became one of the most widely used microphones in vocal recording. It used a small ribbon 2 inches (50 mm) long and 2.4 mm wide that moved inside a magnetic field according to the difference in sound pressure on each side of the ribbon. The velocity of the moving ribbon was independent of the sound frequency, producing a high-impedance signal. The mic was bidirectional with a pickup pattern like a figure-8, toward the front and back, eliminating unwanted noise from the sides. The advantages of high sensitivity and directionality made it ideal for "crooners" like Bing Crosby. The disadvantage of large size with a weight of over 8 lbs made it suitable only for fixed locations such as the recording studio or movie sound stage.

Reproduktor



- The research paper in 1925 by Chester W. Rice and Edward W. Kellogg at General Electric was important in establishing the basic principle of the direct-radiator loudspeaker with a small coil-driven mass-controlled diaphragm in a baffle with a broad midfrequency range of uniform response. Edward Wente at Bell Labs had independently discovered this same principle, filed patent No. 1,812,389 Apr. 1, 1925, granted June 30, 1931. The Rice-Kellogg paper also published an amplifier design that was important in boosting the power transmitted to loudspeakers. In 1926, RCA used this design in the Radiola line of a.c. powered radios.

Basreflex

- 1930 - Albert L. Thuras filed patent No. 1,869,178 on Aug. 15, 1930, granted July 26, 1932, for the bass-reflex principle while working at Bell Labs. Early cabinets used a passive baffle to direct sound to the front, allowing the back of the cabinet to be open for the low sounds. The bass-reflex enclosure kept the low-frequency sounds from being lost from the rear of the diaphragm.

July 26, 1932.

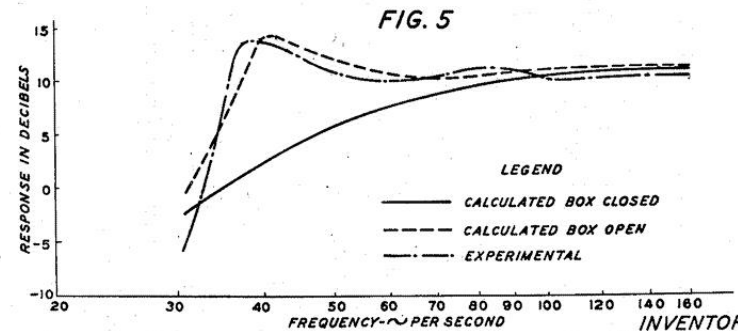
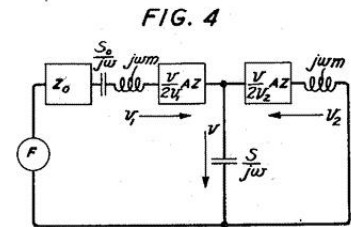
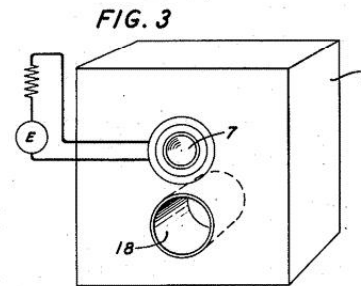
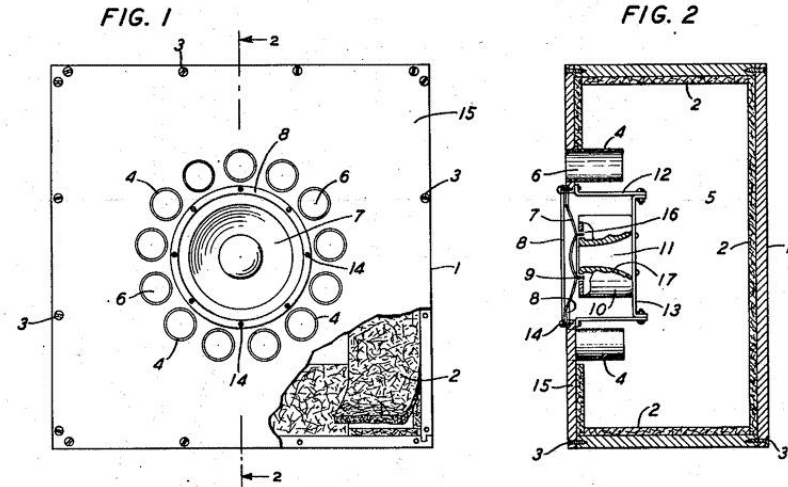
A. L. THURAS

1,869,178

SOUND TRANSLATING DEVICE

Filed Aug. 15, 1930

3 Sheets-Sheet 1



INVENTOR
A. L. THURAS
BY
Walter C. Kiesel
ATTORNEY



Kochleárny implantát

- Zvuky prostredia a zvuky reči sú zachytené mikrofónom, odkiaľ sa informácia po kábliku odosiela do rečového procesora.
- Rečový procesor vyberá a kóduje zvuky tak, aby sa informácie o charakteristikách prenášaného zvuku čo najvernejšie premenili na elektrické stimuly.
- Z rečového procesora je kódovaný signál odoslaný do vysielacej cievky a odtiaľ sa cez kožu pomocou elektromagnetických vln vysieľa do prijímača.
- Prijímač mení kódované signály na bifázické prúdové elektrické impulzy. Elektrické impulzy sú vysielané k elektródam tak, aby stimulovali sluchové nervové vlákna.
- Mozog rozoznáva signály ako sluchové vnemy.

