



Komunikačná akustika

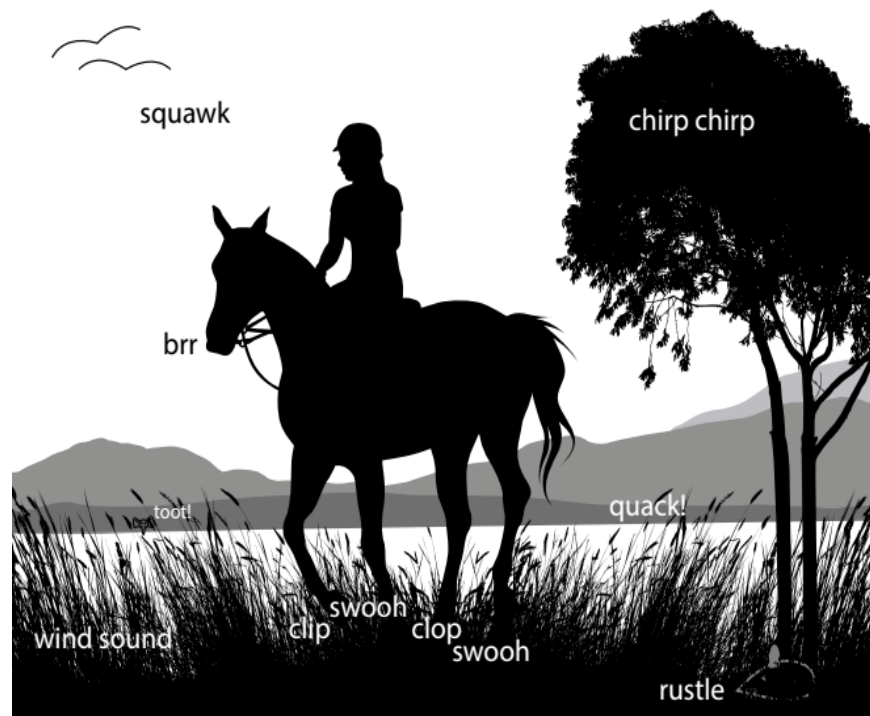
L01: Základné pojmy

prof. Ing. Jozef Juhár, PhD.

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

Na čo potrebujeme zvuk ?

- Na orientáciu v priestore
- Na komunikáciu medzi subjektami



Zvukové udalosti nám dávajú informáciu o okolitom prostredí.

Rečová komunikácia

- Reč ako dorozumievací prostriedok
 - najstarší a prirodzený
 - odlišuje človeka od zvierat - je znakom vyššej inteligencie
- Zvuk nesie informáciu od hovoriaceho k počúvajúcemu buď priamo (t.j. vzduchom), alebo prostredníctvom audio systému



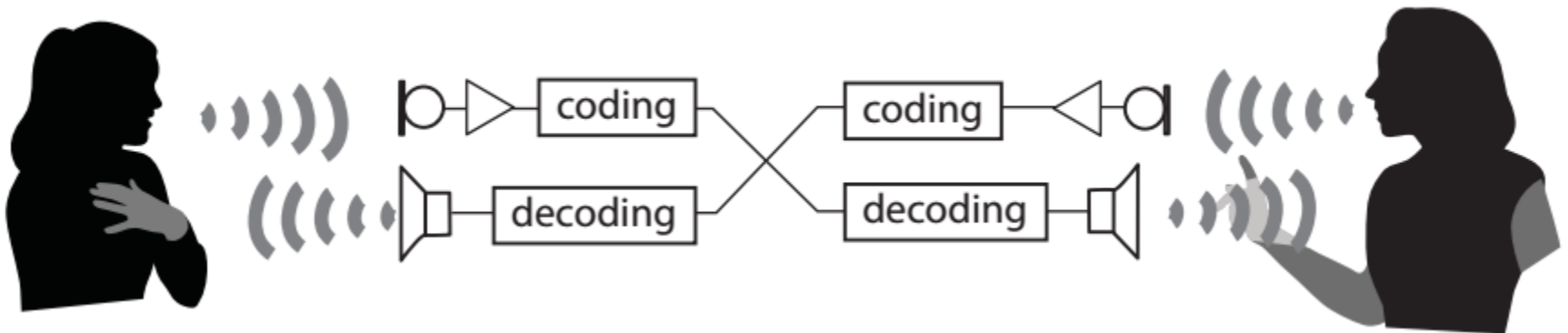
Komunikácia hudbou

- Hudobníci produkujú tzv. akustickú alebo elektronickú hudbu. Obecenstvo reaguje tleskaním, pískaním, volaním a pod.



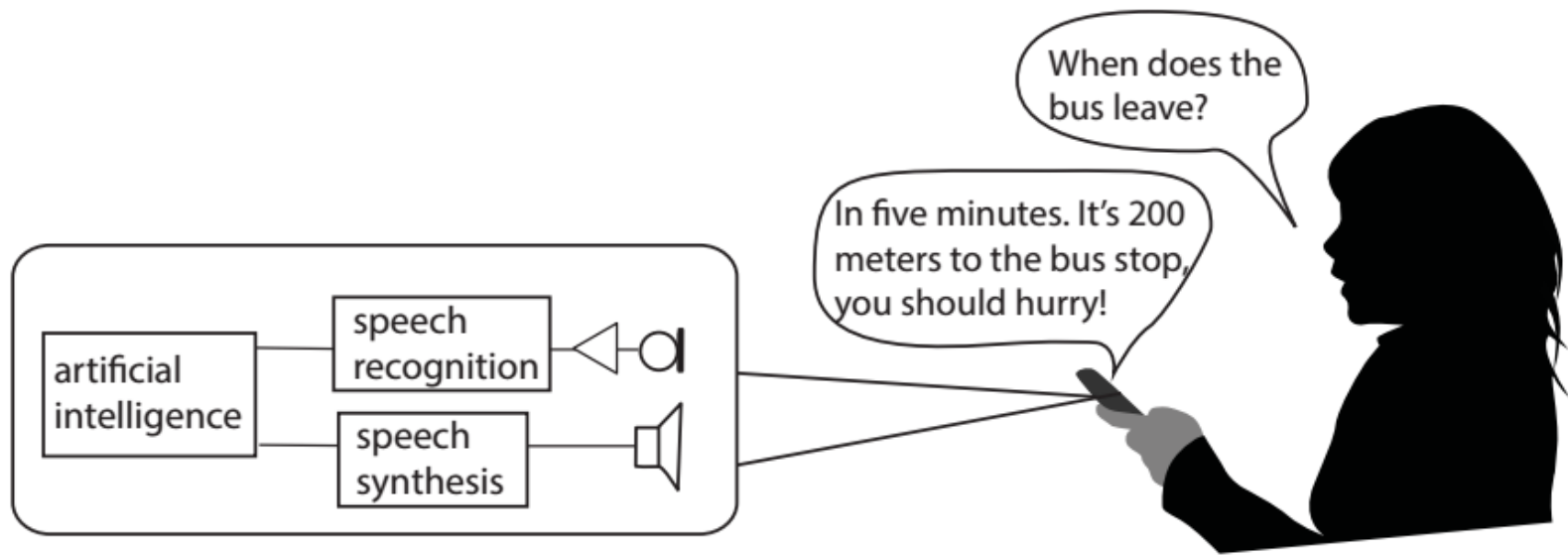
Komunikácia pomocou (elektronického) prenosového kanála

- Telefón / rádio (rozhlasové vysielanie)
- Záznam zvuku (gramofón, magnetofón, wakman, kompaktný disk, mp3 prehrávač a pod.)
- Kódovanie reči a audia
- ...



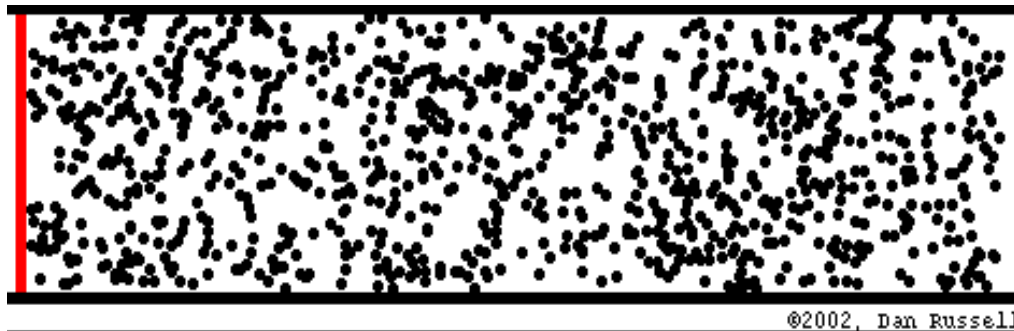
Komunikácia človeka so strojom

- diktovanie dokumentov a vyplňanie formulárov (jurisdikcia, klinická prax, ...)
- automatizovaný preklad z jazyka do jazyka
- hlasom ovládané počítačové hry
- hlasom ovládané verejné telefónne informačné systémy pre oblasť kultúry, služieb, obchodu a cestovného ruchu
- kontaktné telefónne centrá veľkých firiem s veľkým počtom zákazníkov
- bankové aplikácie cez telefón
- povelové a riadiace aplikácie napr. v automobilovom priemysle (zapnutie/vypnutie klimatizácie, ovládanie audio-zariadení, ...), v domácnostiach (hlasové ovládanie elektrických spotrebičov lokálne alebo na diaľku, napr. po telefóne)



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)

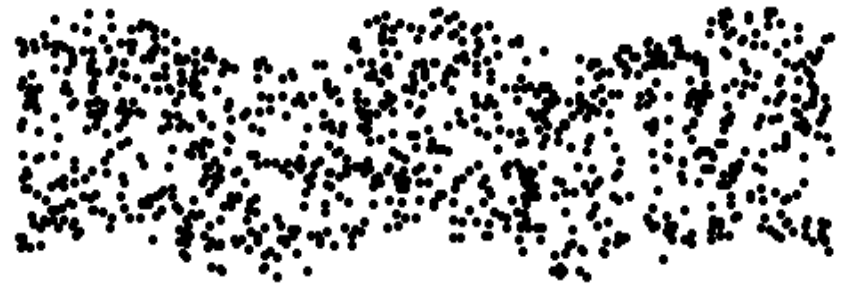


- Nazývame ho tiež **zvukovým (akustickým) vlnením**

Zvukové vlnenie

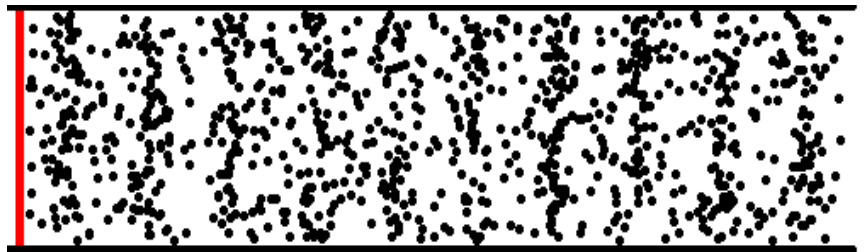
- priečne (transverzálne)

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

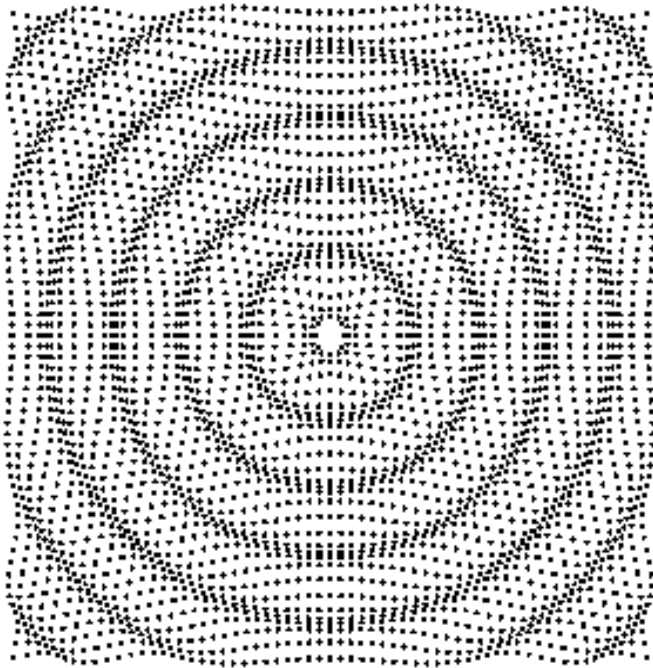


- pozdĺžne (longitudinálne)

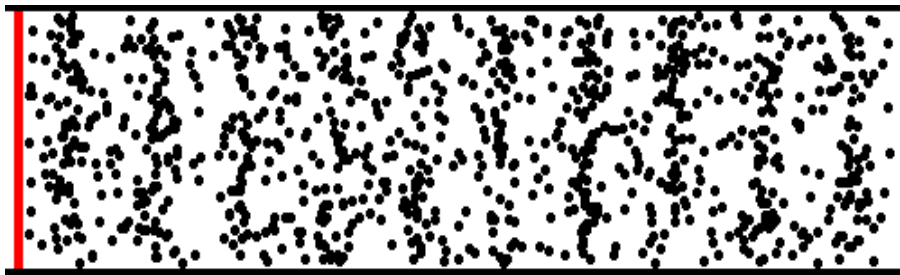
- častice sa vychyľujú v smere šírenia rozruchu
- normálové sily
- kvapalné a plynné látky



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



Akustika

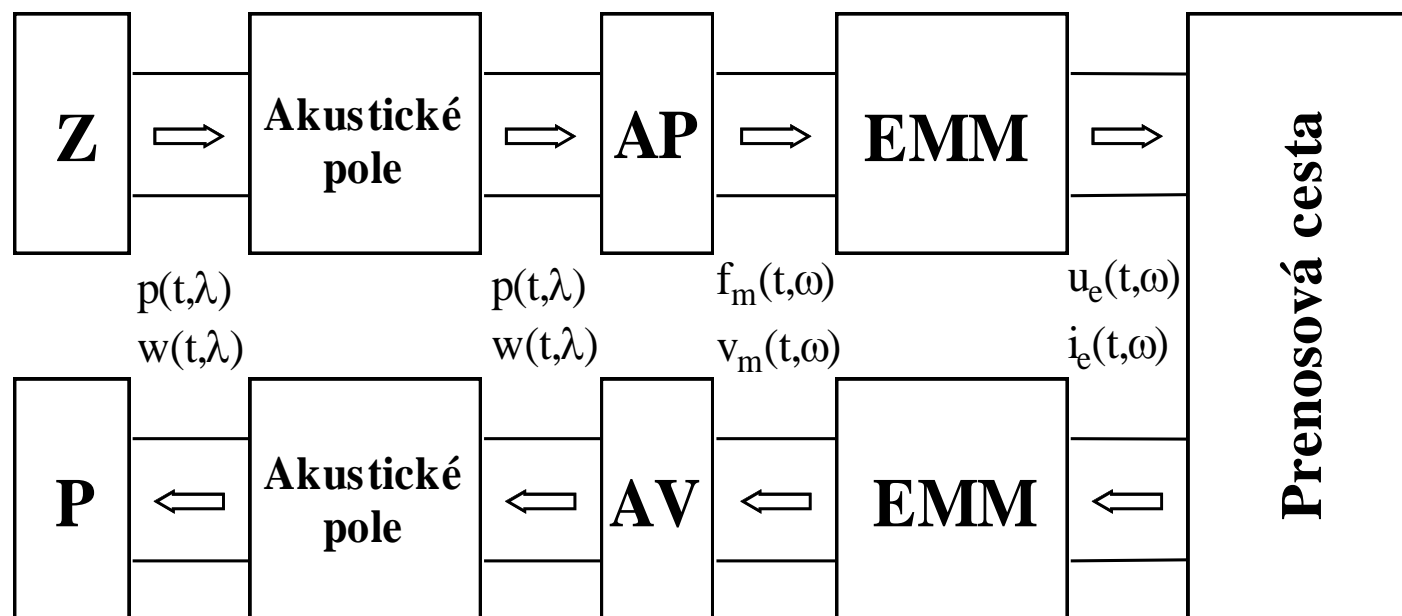
- Akustika je veda, zaoberajúca vznikom, šírením, vnímaním a pôsobením **zvuku**.
- Jej názov je odvodený od gréckeho slova „**akoustos**“, ktorého pôvodný význam je „počúvanie“ resp. „počutie“.
- Už od svojich počiatkov aplikácie akustiky hrajú dôležitú rolu v každodennom živote ľudí:
 - hudba
 - architektúra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



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.

(Elektro)akustický komunikačný systém



Z - Zdroj zvuku

AP' - Akustický prijímač

P - Prijímateľ zvuku

AV - Akustický vysielač

EMM - Elektromechanický menič

Typické časti (elektro)akustického komunikačného systému

- zdroj zvuku / prijímateľ zvuku
- akustické pole (akustický priestor)
- akustický prijímač / akustický vysielač
- 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

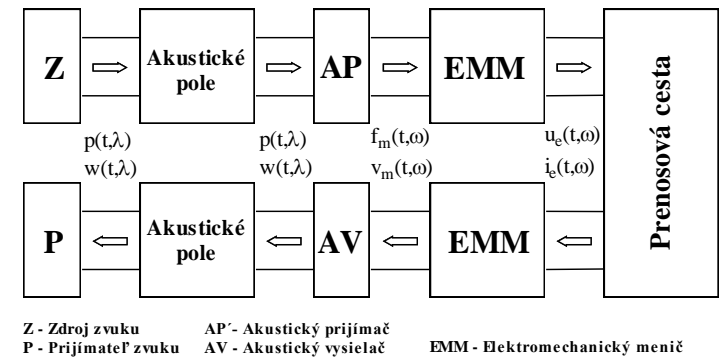
- Závisí od situácie – rozprávanie davu ľudí je v dialógu dvoch neužitočným hlukom

- **Prirodzený**

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

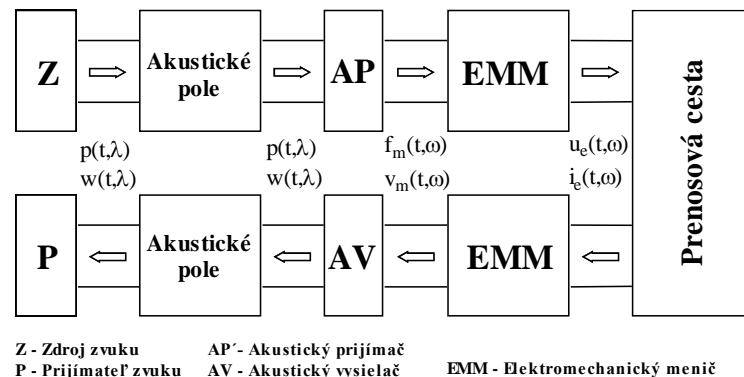
- **umelý (vyrobený človekom)**

- hudobné nástroje
- stroje
- ...



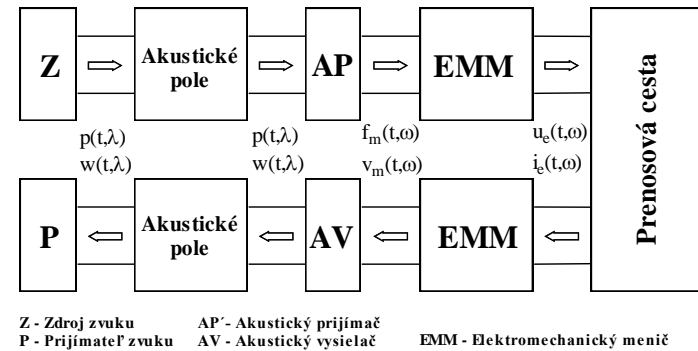
Akustické pole

Priestor, v ktorom sa šíri
zvukové (akustické) vlnenie



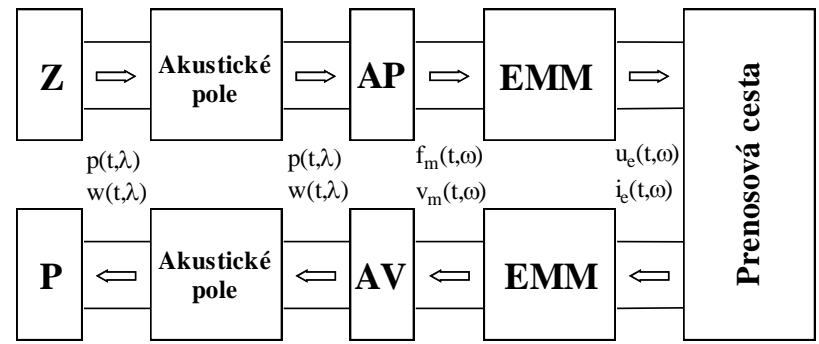
- Podľa počtu akustických zdrojov:
 - akustické pole s **jedným** zvukovým zdrojom
 - akustické pole s **viacerými** zvukovými zdrojmi – **princíp superpozície !!!**
- Podľa vzdialenosti od zvukového zdroja
 - **Blízke pole** („malá“ vzdialenosť od zdroja)
 - **Vzdialené pole** („veľká“ vzdialenosť od 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



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

- reálne

- mechanické

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

- aerodynamické

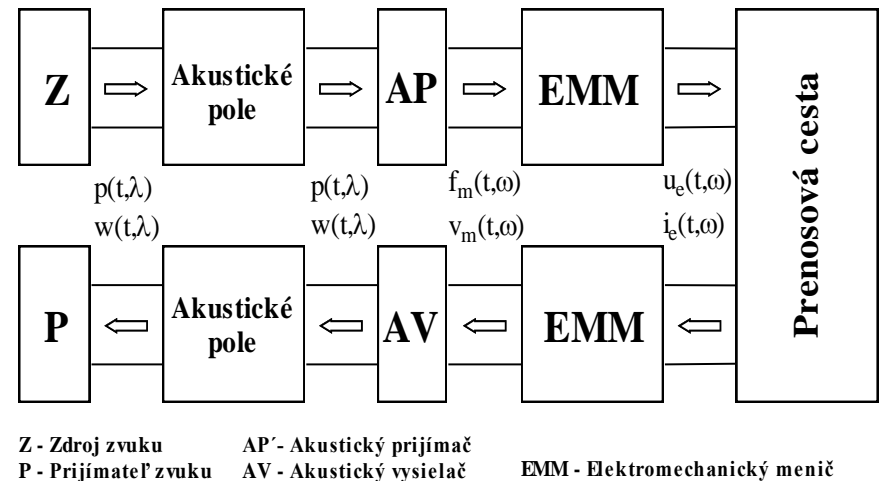
- turbulentné prúdenie vzduchu (voľné resp. v trubici/štrbine)
 - obtekanie telies prúdom vzduchu

- teoretické (matematické modely)

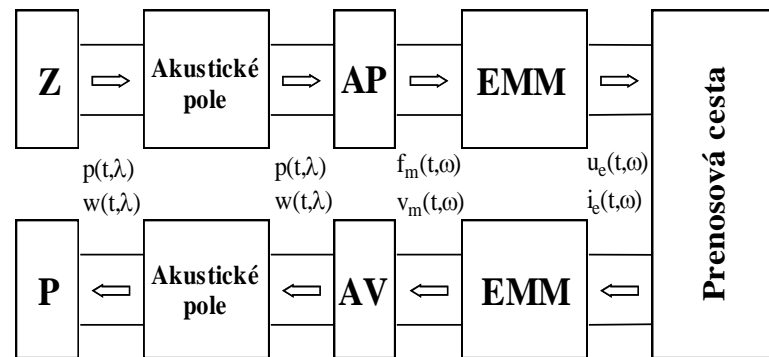
- pulzujúca guľa (bodový vysielateľ, vysielateľ nultého rádu)
 - akustický dipól (vysielateľ prvého rádu)
 - sférické vysielateľe druhého a vyšších rádov
 - rady a polia bodových zdrojov
 - priamkové, valcové a piestové vysielateľe

Elektromechanický menič

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



Prenosová cesta

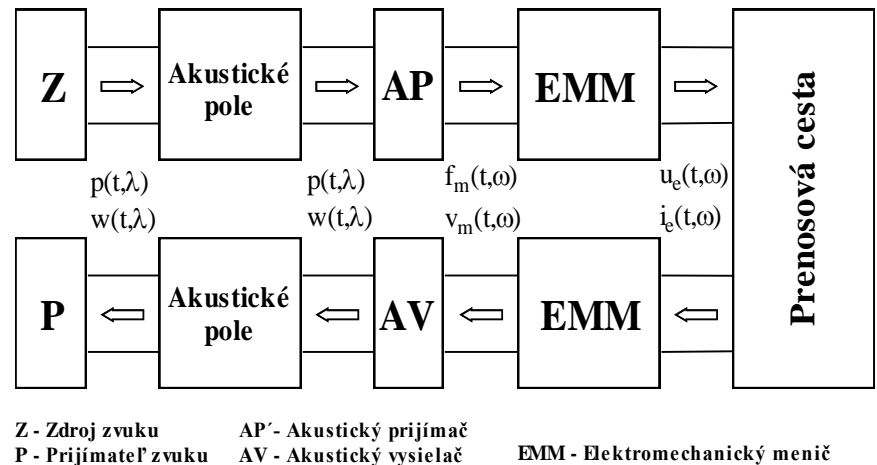


Z - Zdroj zvuku AP - Akustický prijímač
P - Prijímateľ zvuku AV - Akustický vysielač EMM - Elektromechanický menič

- obvody elektronického spracovania
 - AD/DA prevodníky
 - zosilňovače
 - efektové procesory
 - ...
- záznamové systémy
- drôtové (vrátane optických) a bezdrôtové prenosové cesty
- meracie systémy
- riadiace a kontrolné systémy
- systémy automatického rozpoznávania a syntézy 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**

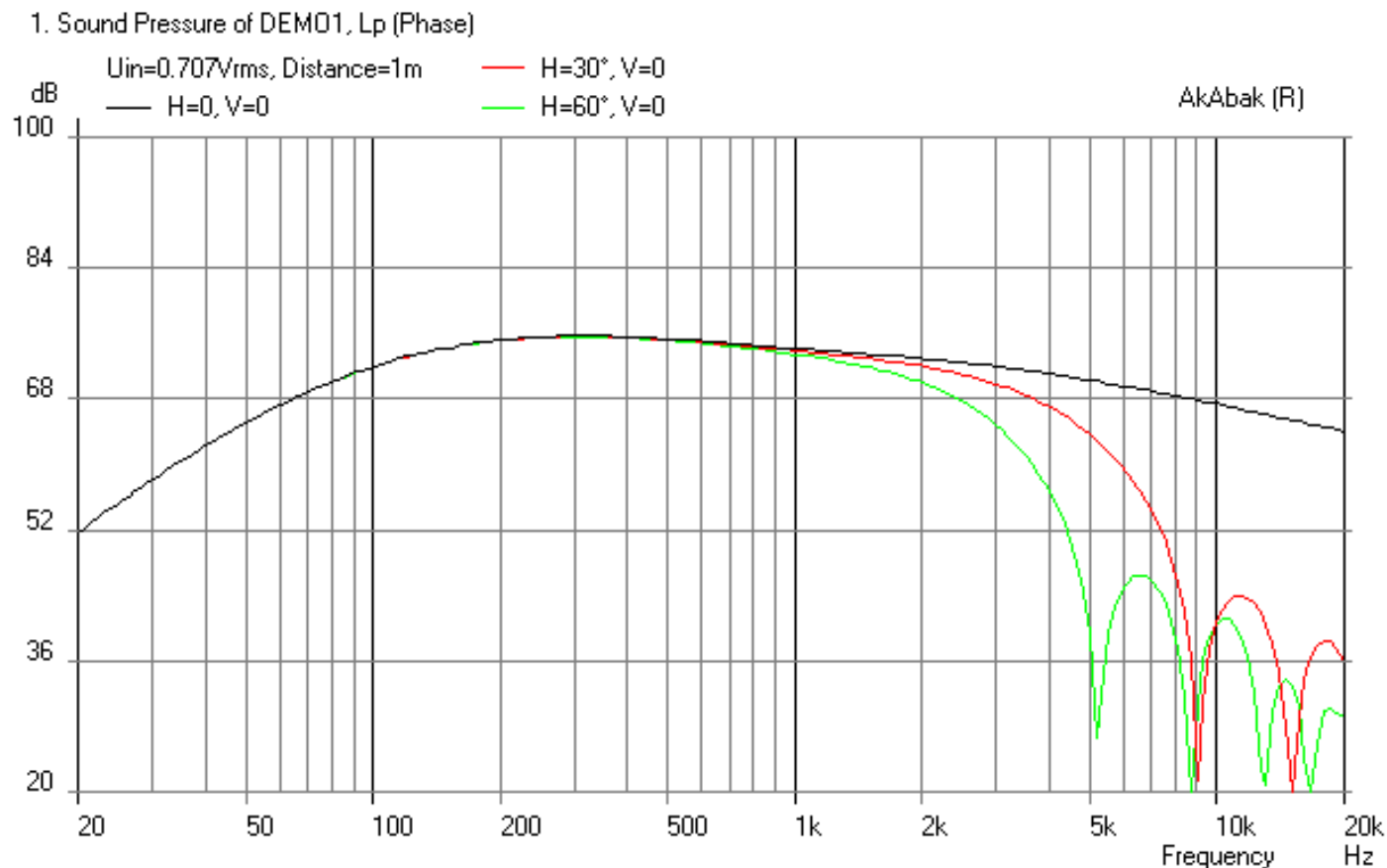


Charakteristiky elektroakustického systému

- **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

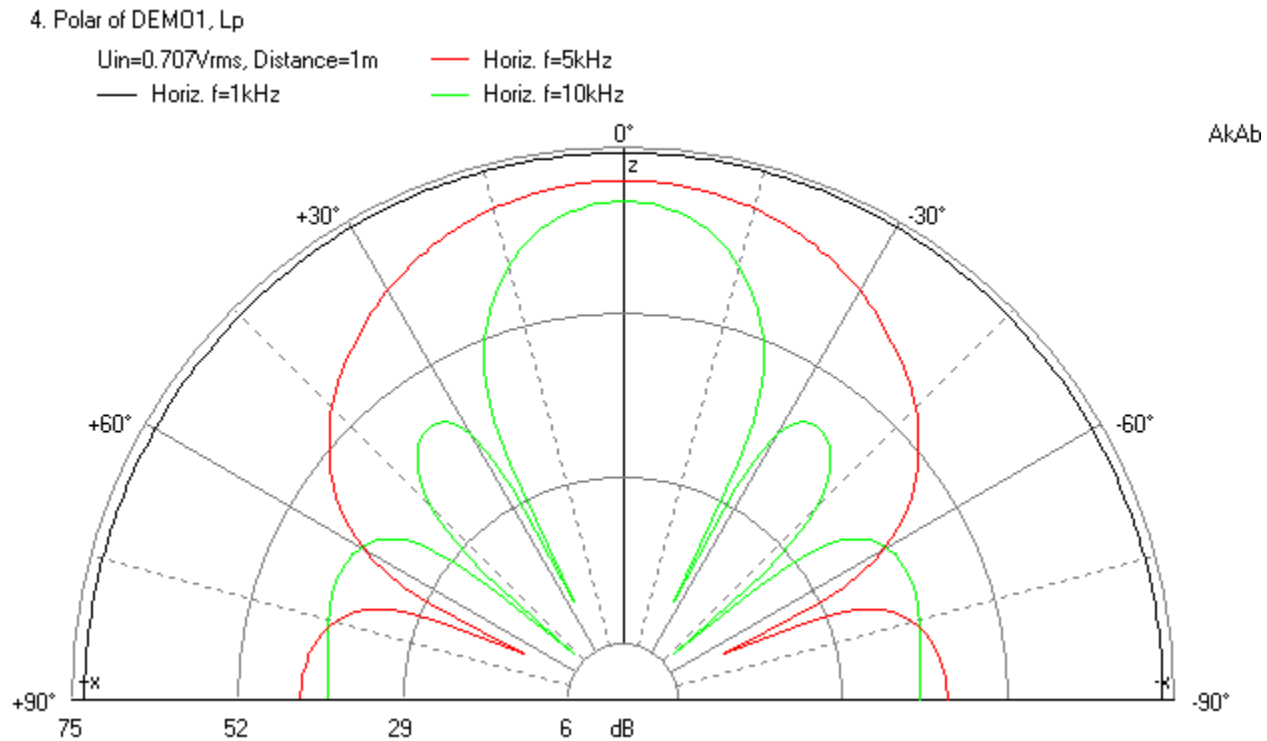
Príklad

Amplitúdová frekvenčná charakteristika nízkotónového reproduktora v zatvorenej ozvučnici



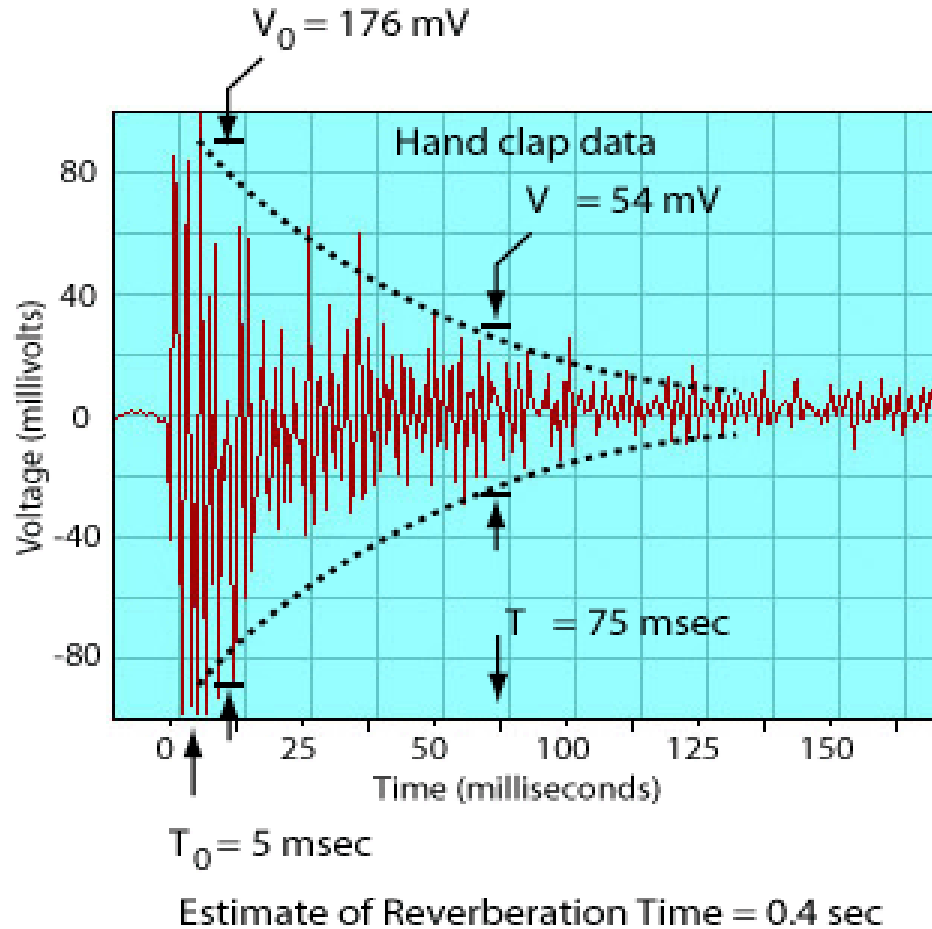
Príklad

Smerová charakteristika nízkotónového reproduktora



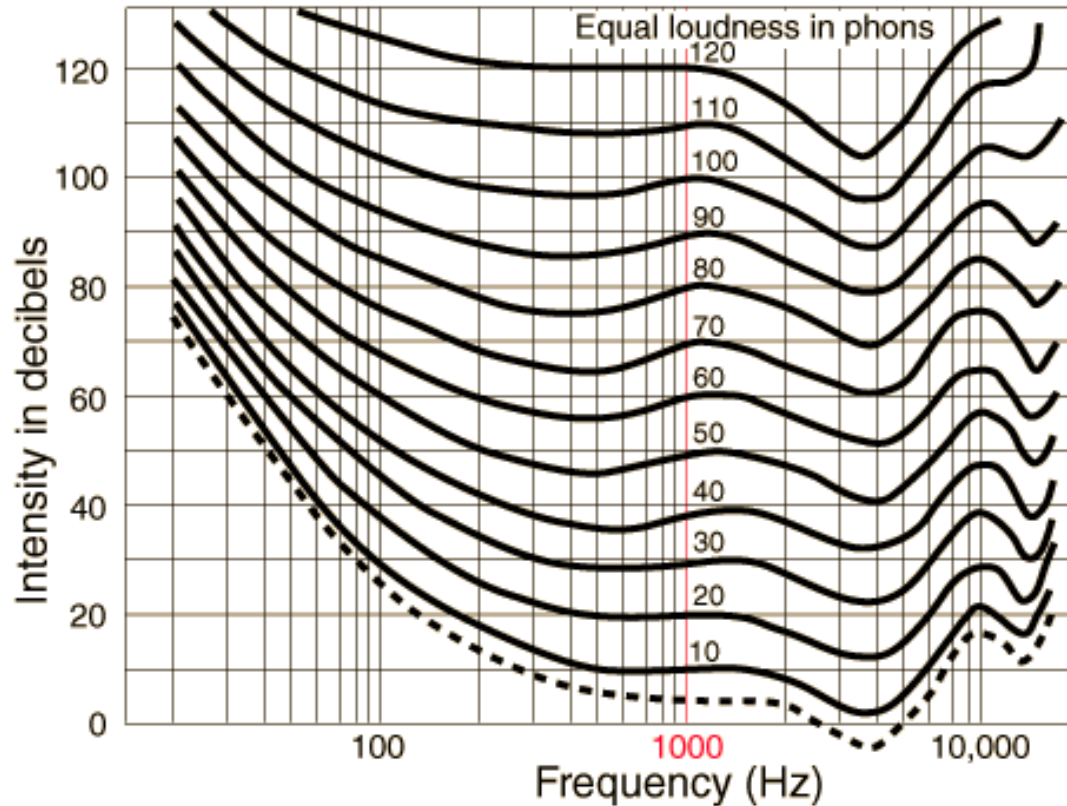
Príklad

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:

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

χ - Poissonova konštanta

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

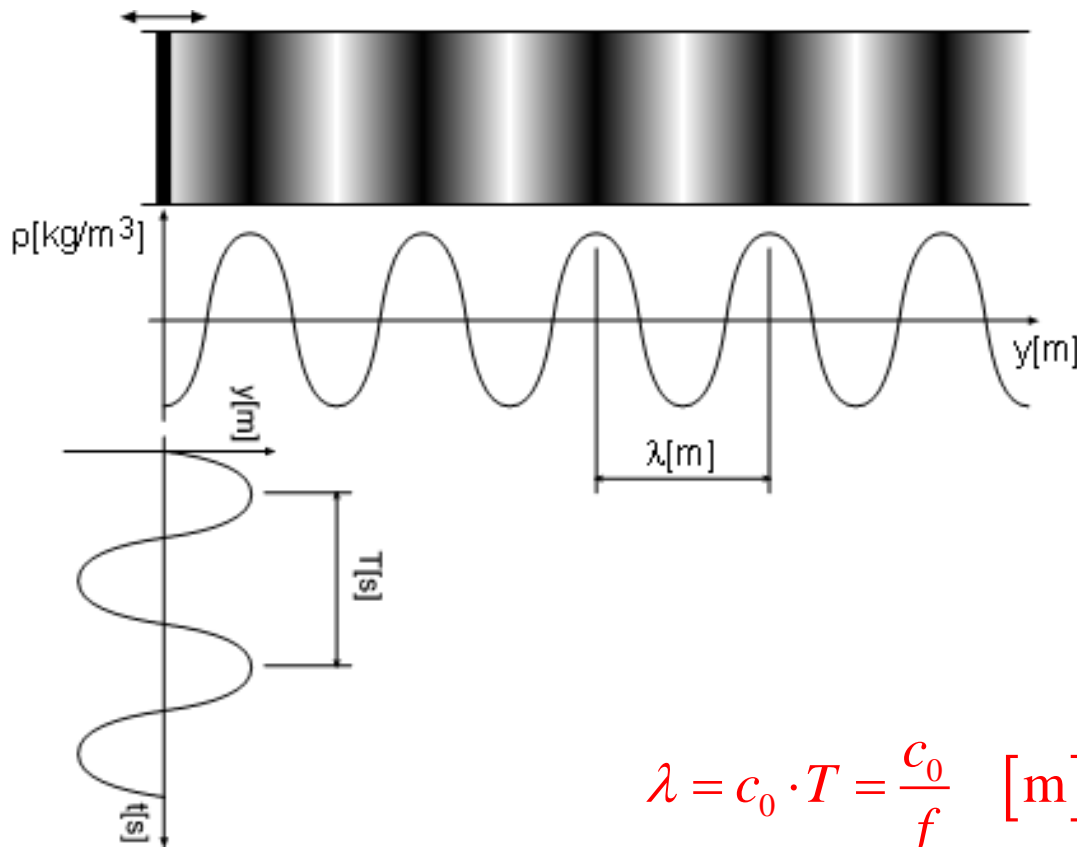
ρ_0 - hustota vzduchu pri 0°C

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

Frekvencia, perióda a vlnová dĺžka zvuku



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

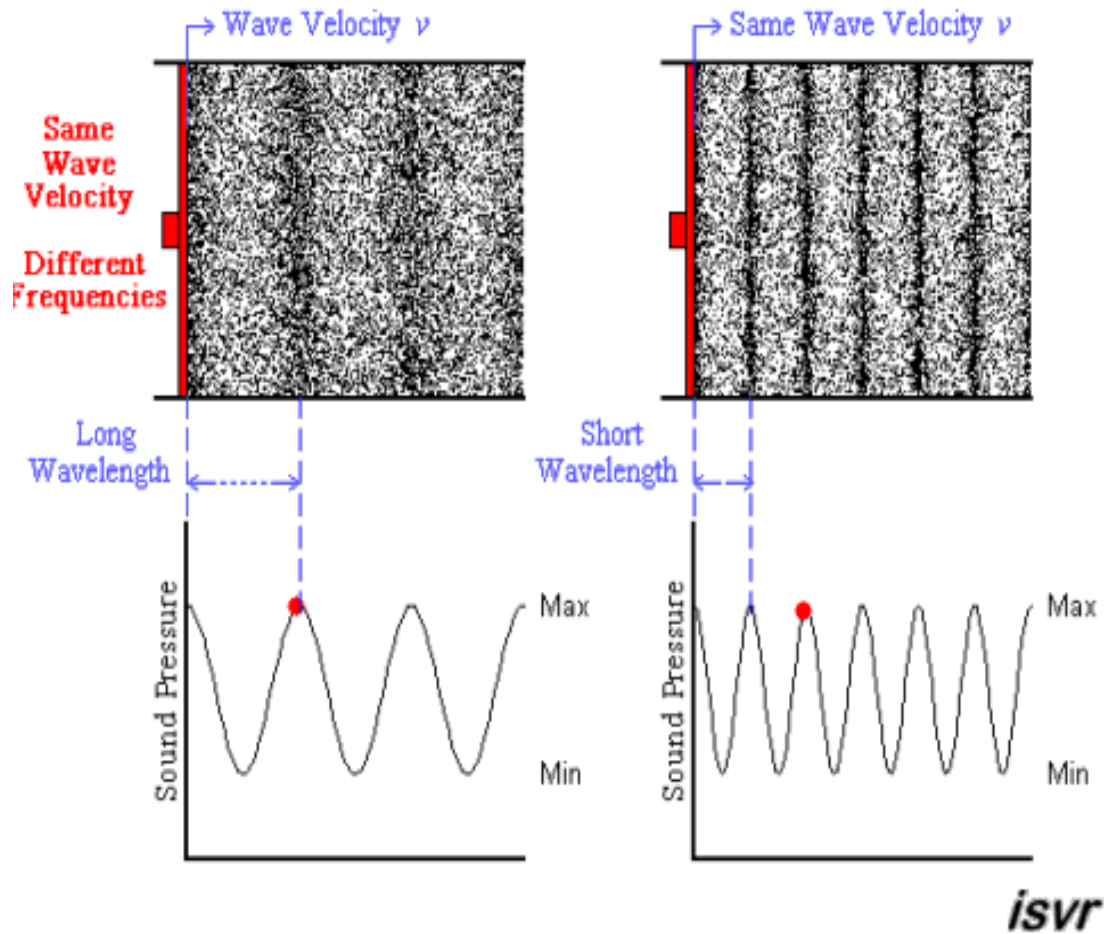
λ [m] - vlnová dĺžka

T [s] - perióda kmitania

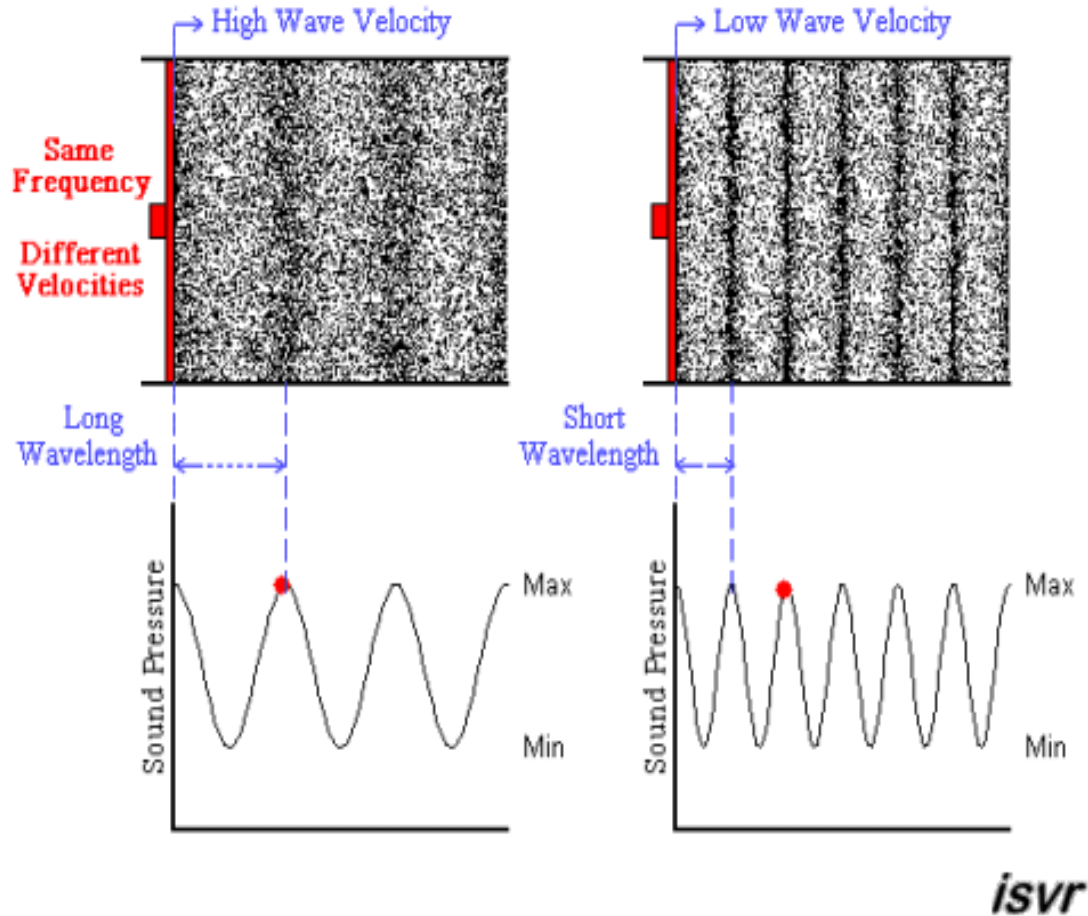
f [Hz] - frekvencia

c_0 [m s⁻¹] - rýchlosť zvuku

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

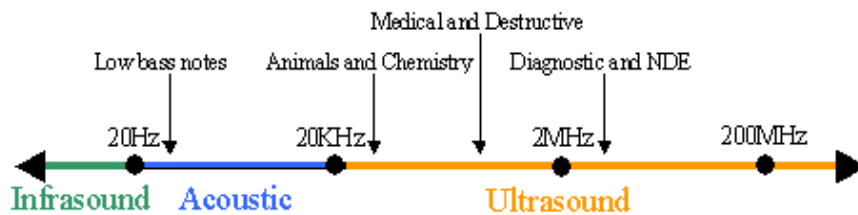


Vlnové dĺžky zvukového vlnenia rovnakých frekvencií v prostrediach s rôznou rýchlosťou šírenia zvuku



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

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

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

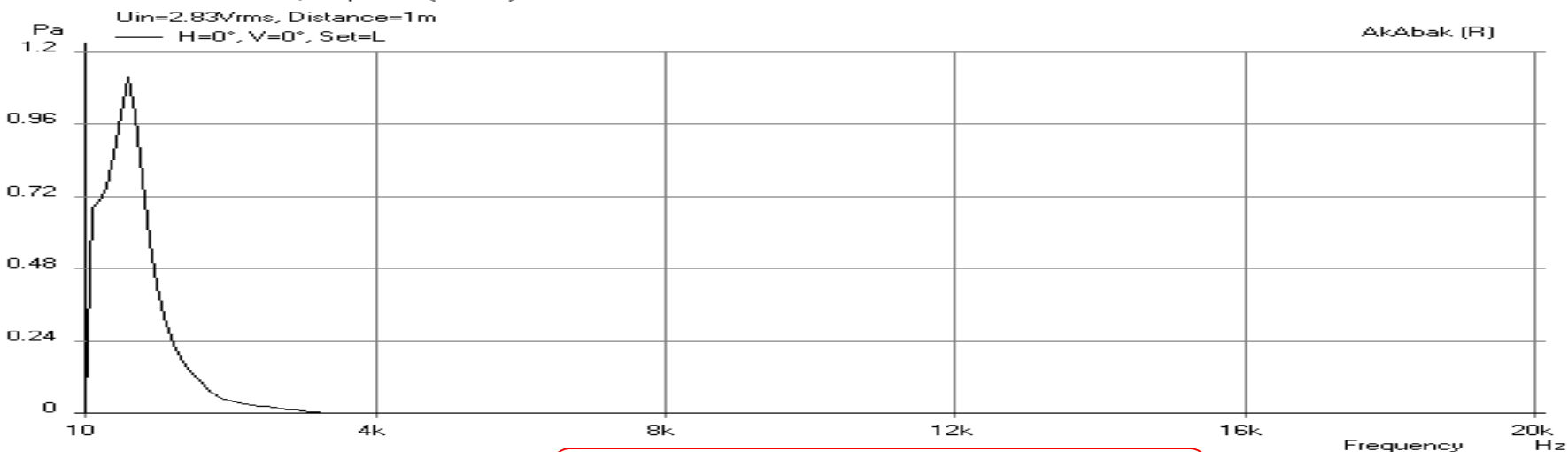
infrazvuk: $f < 16$ Hz; $\lambda > 21.5\text{ m}$

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
 - oktavová, pol-oktavová a tretino-oktavová stupnica
 - „percepčné“ stupnice - odvodené od vlastností ľudského sluchu
 - melovská stupnica
 - Barkova stupnica

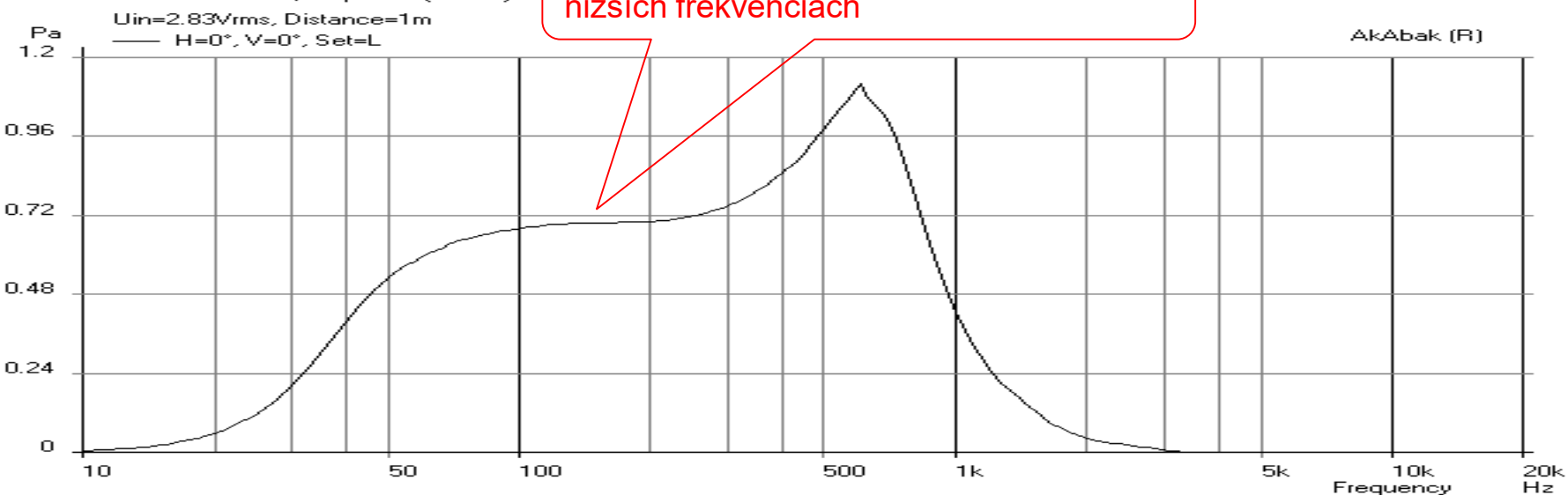
Frekvenčná závislosť akustického tlaku, zobrazená na lineárnej a nelineárnej (logaritmickej) frekvenčnej stupnici

4. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



Logaritmická stupnica zvýrazní detaily pri nižších frekvenciách

3. Sound Pressure of L12, Amplitude (Phase)



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

- Je to výchylka, o ktorú sa pri šírení zvukového vlnenia prostredím vychylujú 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:

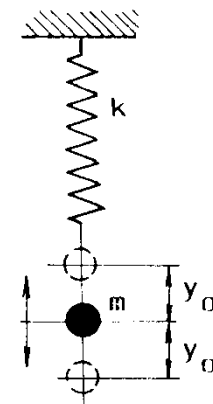
$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + s y = 0 \quad \text{kde } y \text{ [m]} \quad \text{výchylka} \quad (1)$$

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

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

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

φ_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

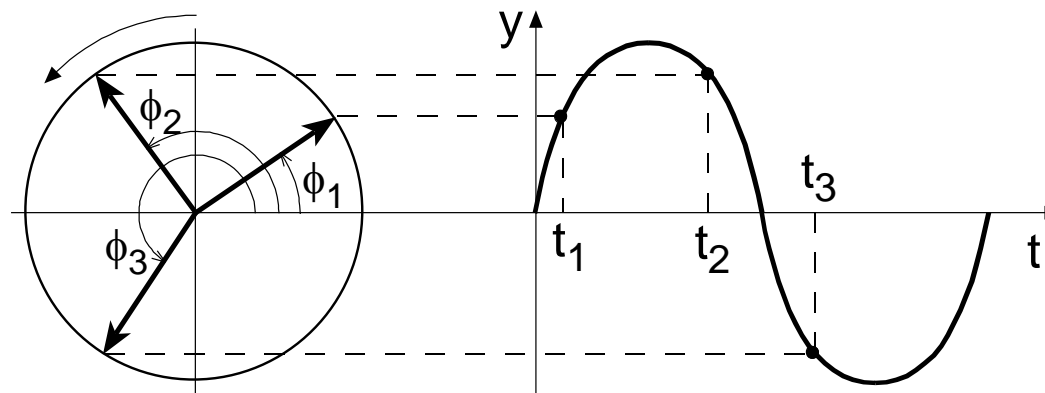
- Pohyb lineárne kmitajúceho hmotného bodu si môžeme predstaviť ako priemet vektora (fázora), otáčajúceho sa konštantnou uhlovou rýchlosťou.
- Okamžitú hodnotu výchylky môžeme vyjadriť ako reálnu alebo imaginárnu časť výrazu, popisujúceho vektor, rotujúci konštantnou uhlovou rýchlosťou

(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 $\sim 0,05 \text{ }\mu\text{m/s}$

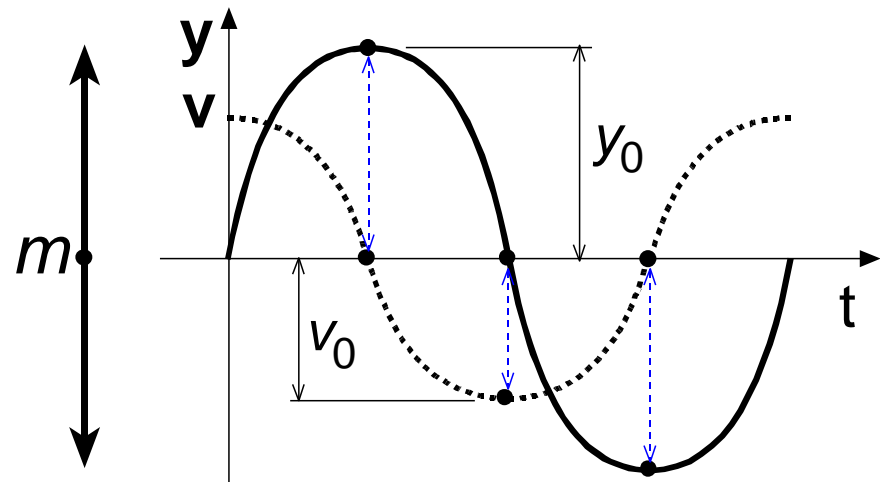
Akustická rýchlosť – rýchlosť kmitania hmotného bodu

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

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

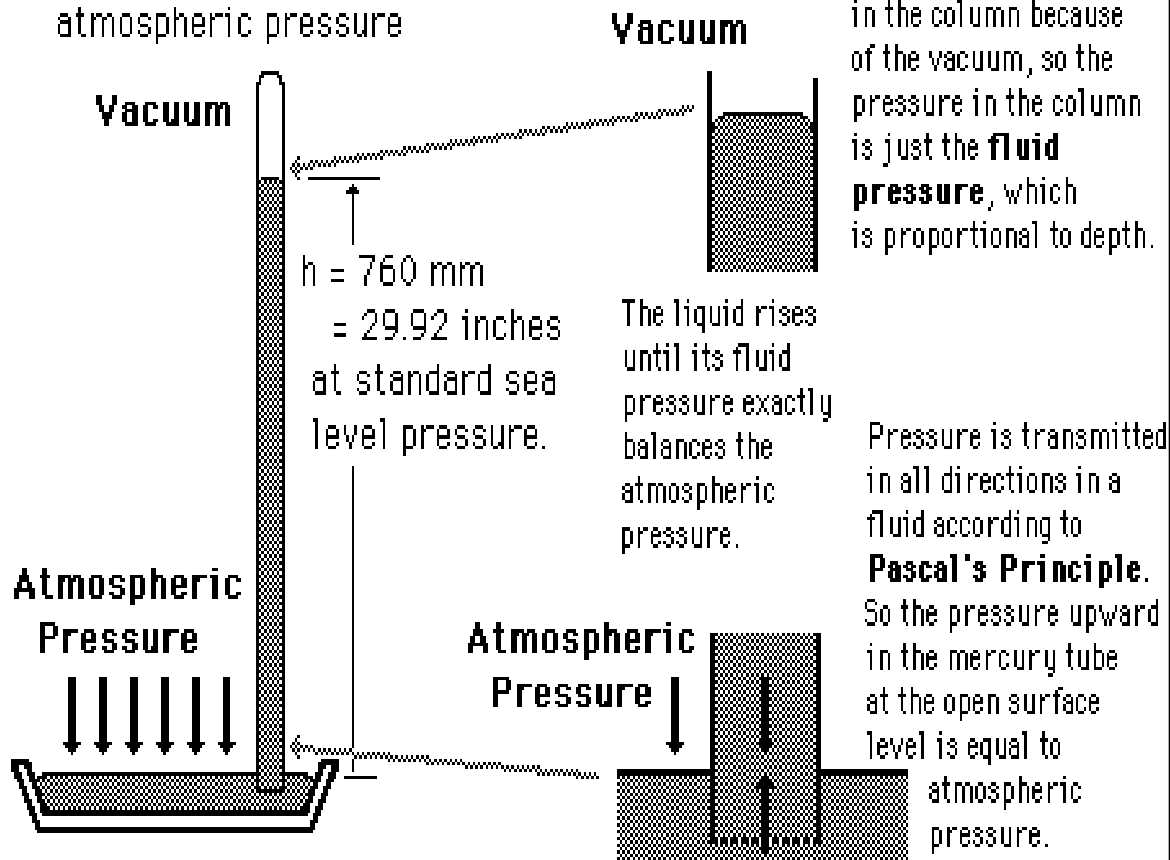
$$v_0 = \omega y_0 \quad \left[\text{ms}^{-1}\right]$$

- Fázový posun medzi rýchlosťou a výchylkou



Atmosférický (statický) tlak

A device for measuring atmospheric pressure



No pressure is exerted on the top of the liquid in the column because of the vacuum, so the pressure in the column is just the **fluid pressure**, which is proportional to depth.

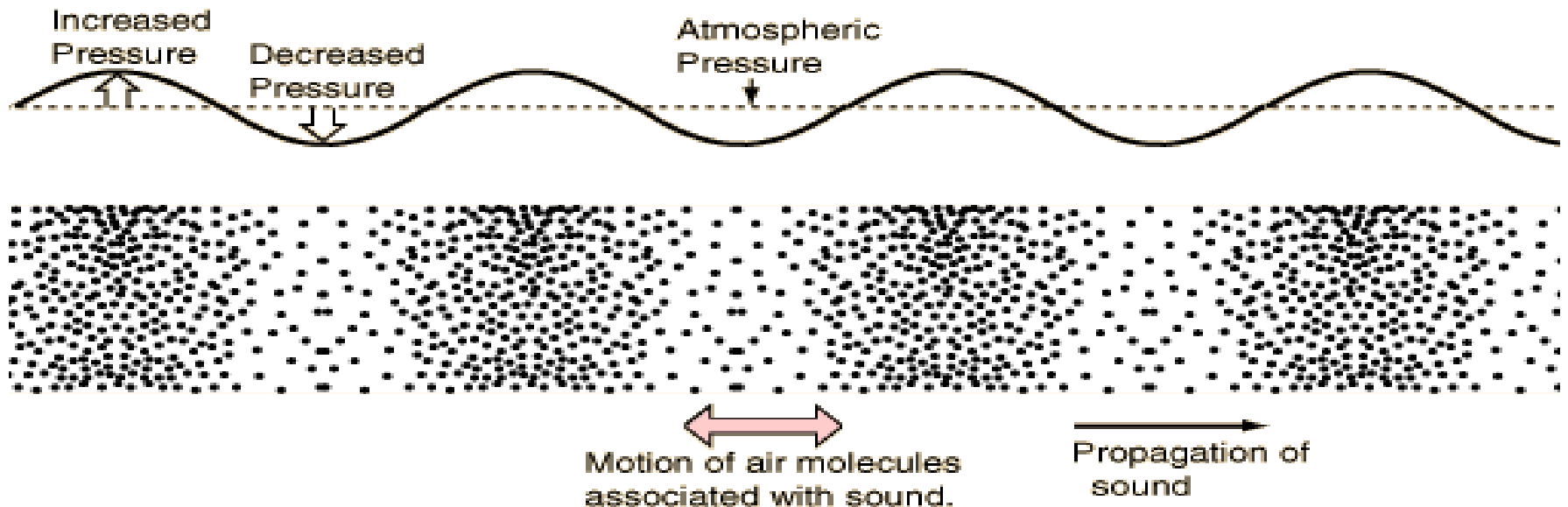
The liquid rises until its fluid pressure exactly balances the atmospheric pressure.

Pressure is transmitted in all directions in a fluid according to **Pascal's Principle**. So the pressure upward in the mercury tube at the open surface level is equal to 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 [Nm^{-2} ; Pa]
- priemerná hodnota pri bežnej teplote (20°C) je približne $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$

Akustický tlak - p_A [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

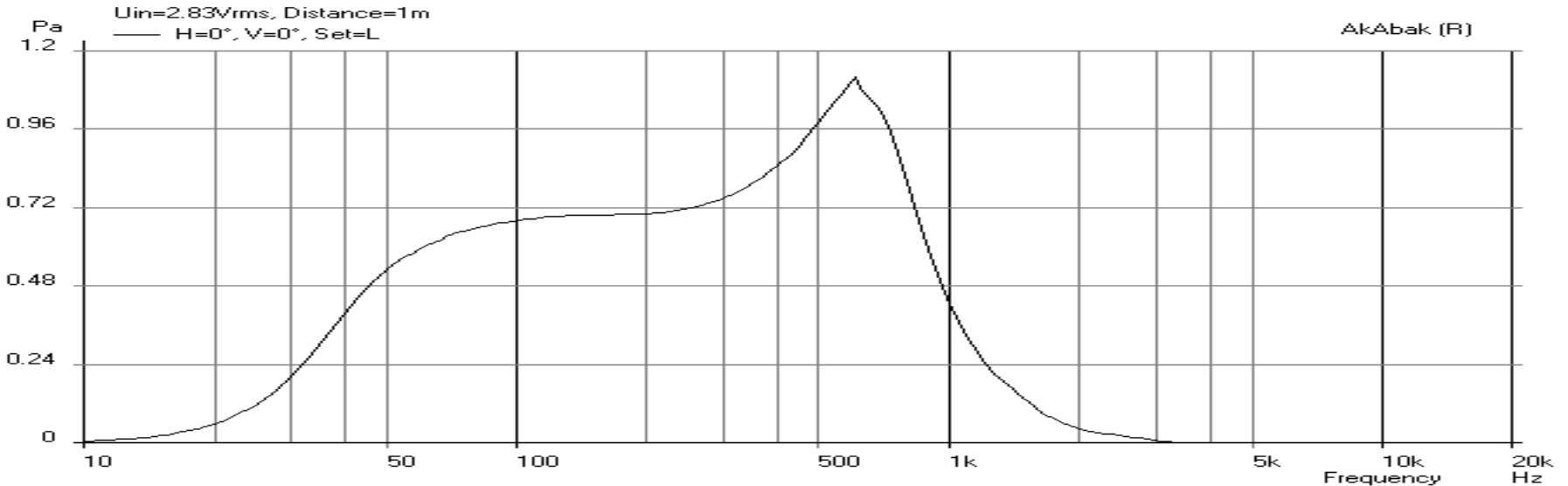
- Rozsah akustických tlakov, vyskytujúcich sa v prírode, od šepotu až po hluk turbín veľkých lietadiel je veľmi veľký a ľudské ucho vníma akustické tlaky v rozpätí od 0,00002 Pa až po 200 Pa.
- Pretože zápis ich hodnôt na lineárnej stupnici je málo prehľadný, používa sa v akustike častejšie **logaritmická** 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.

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

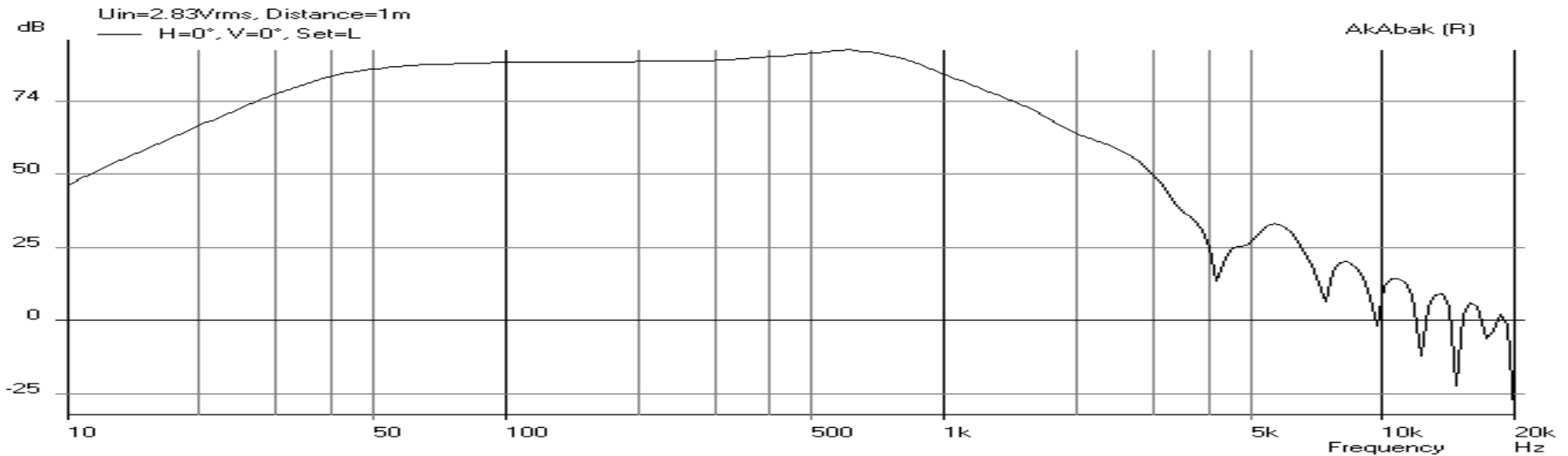
$$p_{A,ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

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. (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

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.:

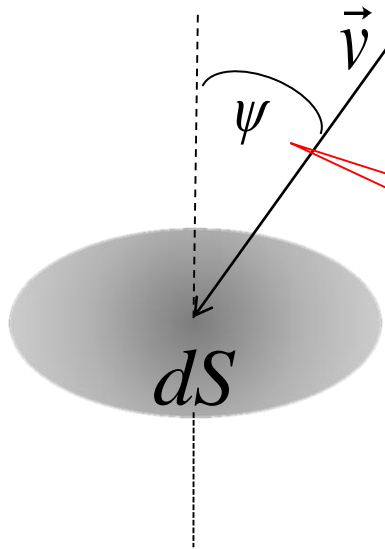
$$P_A = \vec{F} \cdot \vec{v} [\text{W}]$$

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 spojitne mení (napr. v prípade zakrivenej plochy).



$$P_A = \oiint dP_A = \oiint p_A \cdot v \cdot \cos \Psi \cdot dS$$

ψ je uhol medzi normálou k ploche S a vektorom akustickej rýchlosti.

- pri šírení zvukového vlnenia dochádza k pôsobeniu akustického tlaku na plochu silou, ktorá je daná veľkosťou akustického tlaku a veľkosťou a tvarom uvažovanej plochy

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:

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

Hladina akustického výkonu a intenzity

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

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

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

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

Kontrolné otázky

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

