

**MUNI**  
PHARM

# Akustika

biofizika

# Akustika

- Zabývá se vznikem zvukových vln, jejich šířením v prostoru a vnímáním zvuku
  - **Fyzikální akustika** – zkoumá způsob vzniku zvuku a jeho šířením v prostoru, odrazem a pohlcování různými materiály
  - **Fyziologická akustika** – tvorba zvuku v hlasivkách a vnímání zvuku ve sluchovém ústrojí, vliv hluku

## Zvuk

- Příčinou vzniku zvuku je **uspořádaný kmitavý pohyb částic prostředí**, který nastává po dodání energie částicím
- V důsledku vzájemného působení částic se kmitavý pohyb přenáší i na sousední částice = šíření **zvukové vlny**

# Šíření zvukové vlny

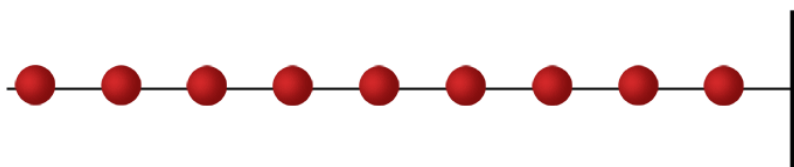
– **Rychlost šíření** závisí na:

- Prostředí (hustota částic, pružnost)
- Teplota, tlak
- Vlhkost

## **Longitudální vlnění** (podélné)

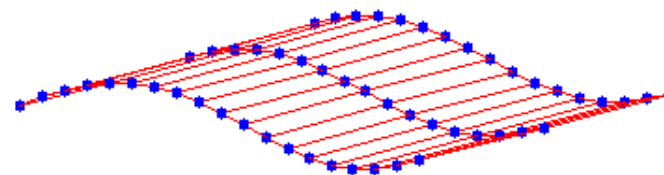
Plynné, kapalně i pevné prostředí  
Zhušťování a zředování částic

Podélná vlna



## **Transverzální vlnění** (příčné)

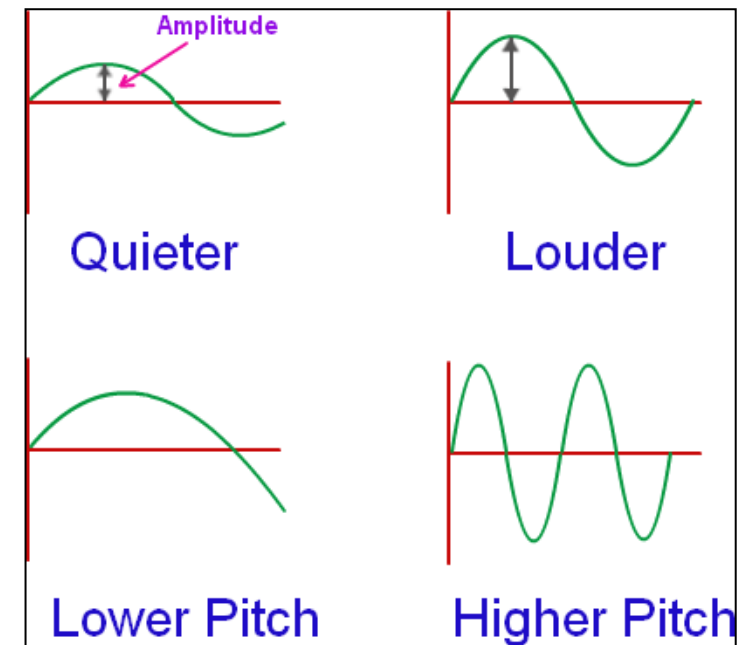
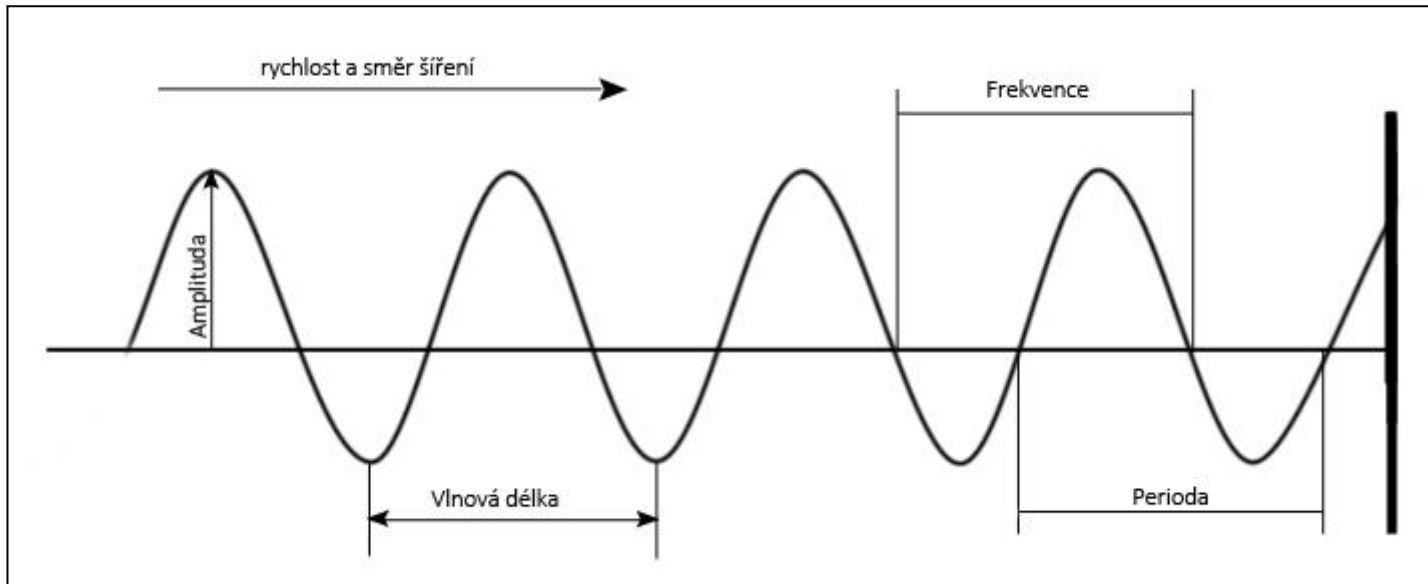
pevné prostředí  
Částice kmitají kolmo na směr šíření vlny



# Základní veličiny

- Frekvence kmitavého pohybu  $f$  (Hz)
- Perioda kmitavého pohybu  $T$  (s)
- Rychlost šíření  $c$  (m.s<sup>-1</sup>)
- Vlnová délka  $\lambda$  (m)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = c.T$$



# Zvukové vlnění

- Infrazvuk

- Nízká frekvence (16 až 20 Hz), pro lidský sluch neslyšitelné

- Oblast slyšitelného zvuku

- (20 – 20 000 Hz)

- Ultrazvuk

- Frekvence vyšší jak 20 000 Hz

# Zvuk

## Zvuky

- **Tóny** - grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase je **periodická funkce** (samohlásky)
  - Jednoduché  
mají harmonický průběh, tj. grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase je funkce sinus
  - Složené  
jejich průběh je periodický, ale už se nejedná o sinusoidu. Zvuky obsahují kromě základní frekvence ještě i tzv. vyšší harmonické, na základě nichž dokážeme jednotlivé zdroje zvuku odlišit.
- **Hluky** - grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase není periodická funkce (souhlásky)
- Výška – závisí na frekvenci
- Barva – závisí na intenzitě alikvotních tónů

# Akustická výchylka

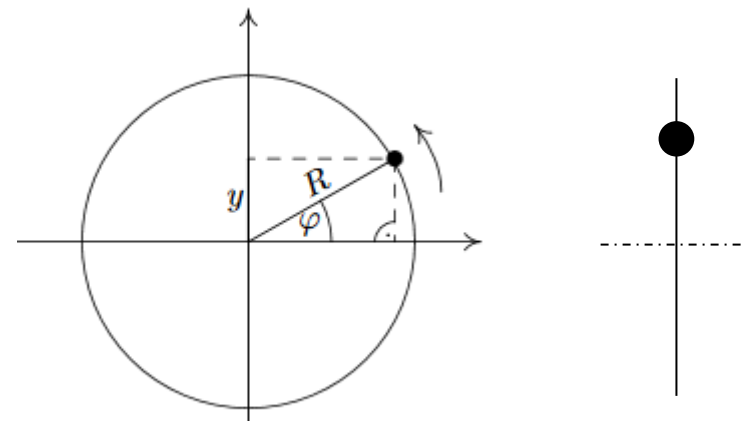
- Akustická výchylka je výchylka hmotné částice z její rovnovážné polohy
- Vyhovuje-li výchylka kmitajícího bodu vztahu:

$$a = a_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) = a_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

- pak kmitající bod kmitá harmonicky v závislosti na čase  $t$
- $a_{\max}$  = amplituda

Vychází z úhlové frekvence

- $\Delta\varphi = \omega\Delta t$
- $\omega = 2\pi f$



# Akustická rychlost kmitavého pohybu

– **Okamžitá rychlost** pohybu kmitající částice:

$$v = v_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) = v_{\max} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$v_{\max} = a_{\max} \cdot \omega = a_{\max} \cdot 2\pi \cdot f$$

## Akustický tlak

– Kmitající molekuly svým pohybem vyvolávají v místě své polohy tlakové změny

$$p = p_{\max} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$p_{\max} = \rho \cdot c \cdot v_{\max}$$



# Efektivní hodnoty

- okamžité hodnoty akustické rychlosti a akustického tlaku můžeme při některých výpočtech nahradit tzv. efektivními hodnotami
- Pro harmonický průběh kmitání lze efektivní hodnoty tlaku a rychlosti zjistit ze vztahů:

$$v_{ef} = \frac{v_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$p_{ef} = \frac{p_{\max}}{\sqrt{2}}$$

# Akustická impedance

- **(Měrný) Akustický odpor (impedance)** popisuje akustické vlastnosti prostředí. Vypočítá se jako poměr efektivní hodnoty akustického tlaku  $p_{ef}$  a efektivní hodnoty akustické rychlosti  $v_{ef}$

$$Z = \frac{p_{ef}}{v_{ef}} \quad Z = c \cdot \rho \quad \text{Pa.s.m}^{-1}$$

- Impedance je charakteristická pro každé prostředí; ovlivňuje velikost odrazu při průchodu mezi rozhraními
- Průchodem přes rozhraní se mění rychlost šíření zvukové vlny  $c$
- Průchodem přes prostředí může dojít k částečné absorpci energie (zmenšení amplitudy a okamžité akustické rychlosti)

# Intenzita

$$I = \frac{P}{S}$$

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c}$$

- **Intenzita** ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) – množství energie, která projde plochou kolmou ke směru šíření vlnění za jednotku času (akustický měrný výkon)
- Intenzita průchodem prostředí exponenciálně klesá :

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha d}$$

$d$  = délka vrstvy (m);  $\alpha$  = absorpční koeficient ( $\text{m}^{-1}$ );  $I_0$  = počáteční intenzita

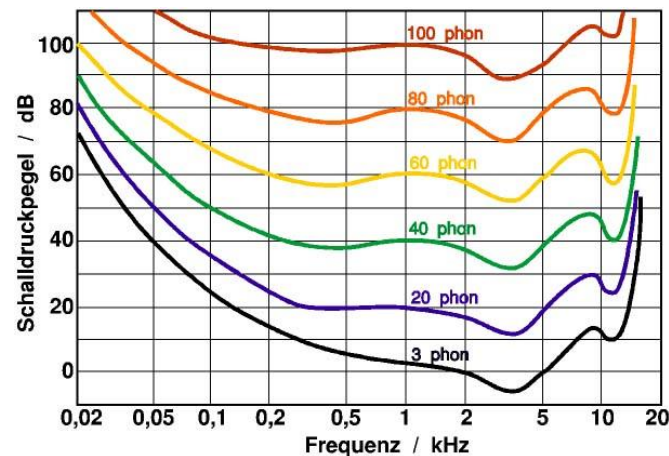
- Srovnání intenzit dvou zvuků = **hladina intenzity**. Vzhledem k velkému rozpětí slyšitelných intenzit ( $10^{12}$ ) byl zaveden logaritmický poměr s jednotkou bel (B), v praxi decibel (dB).

$$L_{(dB)} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Referenční intenzita zvuku (prahová intenzita tónu 1 kHz)  $I_0 = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (referenční akustický tlak  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ).

# Hlasitost

- Vnímání hlasitosti je subjektivní; lidský sluch různě citlivý pro různé frekvence = **Hladina hlasitosti  $\Lambda$**
- Ph – fón; 1 fón odpovídá hladině intenzity 1 dB pro referenční tón o frekvenci 1 kHz
- 1 Ph je nejmenší rozdíl hlasitosti, který ucho dovede rozlišit.



- Spojení prahových intenzit slyšitelných frekvencí = nulová izofóna
- Spojení intenzit, při níž pocit zvuku přechází v bolest – izofóna prahu bolesti
- Oblast hladin intenzity mezi prahem slyšení a prahem bolesti = sluchové pole

**MUNI**  
PHARM

**Fyziologická  
akustika**

# Hlas

- **Hlasivky**: dva vazy napnuté mezi štítnou chrupavkou a hlasivkovými chrupavkami, mezi hlasivkami **hlasová štěrbina**
- Při řeči jsou **hlasivky napínány** (svaly hrtanu), což mění **průsvit** hlasové štěrbiny
- Vydechovaný **vzduch rozechvívá hlasivky** => kmitající hlasivky rytmicky přerušují proud vzduchu jdoucího z průdušnice
- Velký vliv na konečnou podobu zvuku má **rezonance**
- Hltan, dutina ústní a nosní a nosohltan = nástavná hlasová trubice (zbarvení hlasu)
- Konečná formulace do slabik je dále možná díky horním cestám dýchacím, dutině ústní, jazyku, rtům a zubům
- Síla hlasu se zvyšuje se zvýšením průtoku vzduchu přes hlasivkovou štěrbinu

# Rezonance

- **Rezonance** představuje schopnost systému kmitat při určitých frekvencích na větší amplitudě = rezonanční frekvence
- Při těchto frekvencích i malé **pravidelné** síly způsobí velké amplitudy kmitů, protože systém uchovává energii kmitání.
- Rezonanční systém musí umět uchovávat a následně snadno převést energii
  - z potenciální energie na kinetickou energii a zpět
- Mezi jednotlivými cykly ztráty, tzv. útlum. Při malých ztrátách je rezonanční frekvence přibližně rovna vlastní frekvenci systému

# Sluch

Zevní – střední – vnitřní ucho

## Zevní ucho

- zachytává a vede signál
- boltec a zevní zvukovod
- nejlépe slyšitelné jsou zvuky dopadající pod úhlem  $15^\circ$  na osu obou uší
- Zevní zvukovod = rezonátor = zesiluje zvuky o frekvenci 2 - 6 kHz (až +12 dB)



# Sluch

## Střední ucho

- Bubínek (vazivová blanka;  $60 \text{ mm}^2$ ) Kladívko (přirůstá k bubínku), kovadlinka, třmínek (přirůstá k oválnému okénku)
- Přenos akustického signálu z vnějšího prostředí do tekutiny vnitřního ucha
- Přenosem mezi prostředími dochází ke ztrátě intenzity; kompenzace:
  - Změna amplitudy a tlaku – vzduch velká amplituda, malý tlak
  - Bubínek s velkou plochou => oválné okénko s malou ( $3 \text{ mm}^2 = 20\text{ti}$  násobné zvýšení tlaku)
  - Kladívko - kovadlinka: nerovnoramenná páka; rotační pohyb

# Sluch

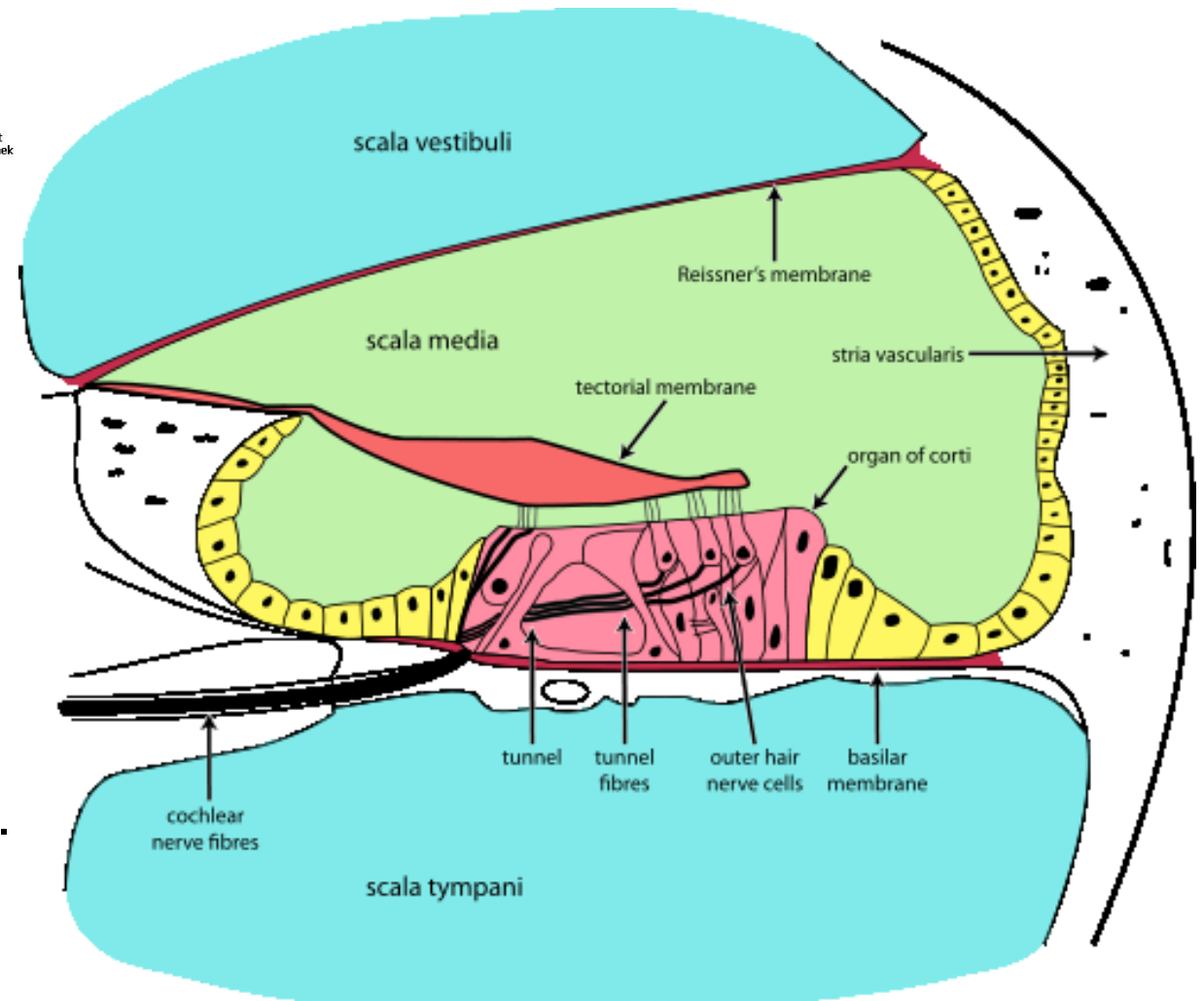
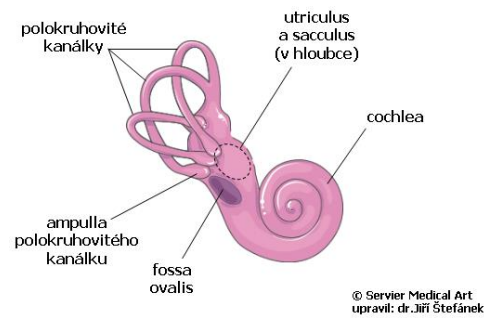
## – Vnitřní ucho

- Střední ucho / Vnitřní ucho: přepážka
- Vnitřní ucho je uloženo ve skelné kosti - labyrint, v něm sluchová část hlemýžď (cochlea) 35 mm dlouhý kostěný kanálek, ve kterém je uložen samotný Cortiho orgán

Bazilární membrána  
Tektoriální membrána

### Cortiho orgán:

- Smyslové **buňky vláskové** (vnitřní a vnější). V hlemýždi je asi **4000 vnitřních** a **20 000 zevních** vláskových buněk.
- **Vnitřní** smyslové buňky mají funkci samotného **receptoru**
- **Vnější** smyslové buňky mají funkci **zesilování zvuku**



# Sluch

Kmitání se přes kůstky přenáší do perilymfy; přenos kmitání na bazilární membránu Békésyho teorie postupující vlny: Zvuk rozkmitá bazilární membránu a oblast maxima rozkmitu se posouvá s kmitočtem od vrcholu hlemýždě k bázi.

- Nastává posun tektoriální membrány vůči membráně bazilární
- Změna polohy stereocilií vláskových buněk vnějších = nejprve depolarizace – zmenšení velikosti – poté hyperpolarizace – zvětšení velikosti = zvýšení signálu
- stereocilia vnitřních buněk drážděny pohybem tekutiny v ductus cochlearis = depolarizace = na synapsi s aferentním vláknem vznik elektrického impulsu.

## Dosažení zvuku receptoru

- **Vedení kůstkové** – nejúčinnější (vzdušné)
- Vedení kostní – přes kosti lebky
- Vedení kruhovým okénkem – málo účinné

# Vyšetření sluchu

Foniatrie – obor zabývající hlasem, řečí, sluchem a jejich poruchami

## – Sluchové poruchy

### – Porucha vedení zvuku středním uchem

(zátka, hlen, zánět); kompenzace kostním vedením

Převodní poruchy

### – Poruchy vnímání ve vnitřním uchu

Únava ústrojí působením hluku, degenerace, porušení funkce vláskových buněk; kostní vedení nemůže tento typ poruchy kompenzovat

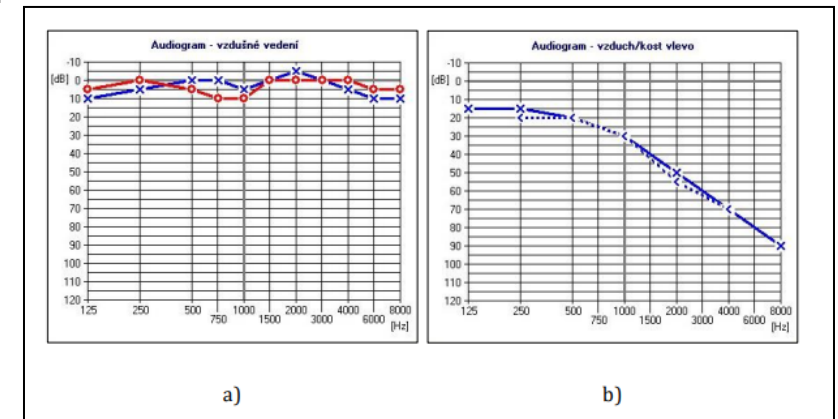
Percepční poruchy

# Vyšetření sluchu

- Audiometrie – vyšetření prahu slyšení v celém spektru akustických frekvencí
  - **Audiometr** – nízkofrekvenční oscilátor; generace akustického signálu
  - Vyšetřuje se každé ucho zvlášť; v akusticky odstíněném prostoru
  - Záznam hladiny intenzity pro jednotlivé frekvence

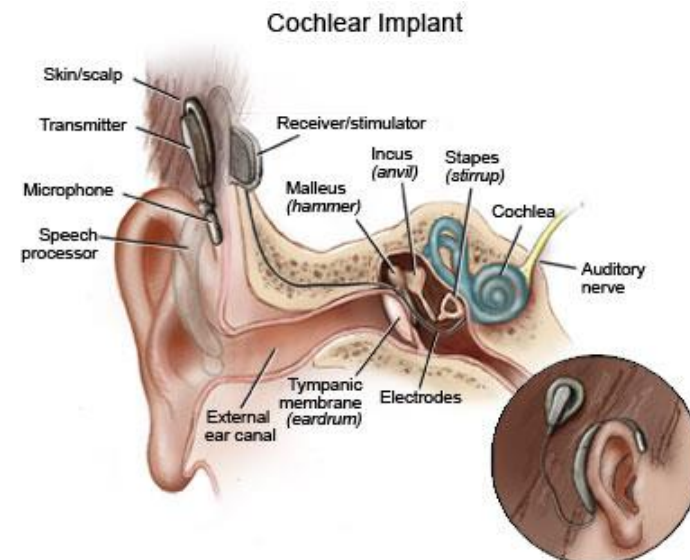
## – Ladičkové vyšetření

- slouží k rozlišení poruchy vnímání a poruchy vedení
- **Weberova** zkouška – ladička doprostřed čela, srovnává kvalitu slyšitelnost v jednotlivých uších
- **Rinneho** zkouška – ladička 256/400 Hz - srovnání kostního a vzdušného vedení
- **Schwabachova** zkouška – srovnává délku kostního slyšení pacienta a lékaře (předpokládá, že lékař má sluch zdravý)



# Vyšetření sluchu

- Sluchadla – mikrofon, zesilovač, reproduktor
- Sluchadla pro kostní vedení
- Kochleární implantáty – kompenzace nedostatečnosti nebo ztráty vnitřního ucha
  - Mikrofon – signálový procesor – vysílač/přijímač – elektrodové pole s kontakty



# Vyšetření poslechem

- Stetoskop – dříve ve formě trubice; dnes oboustranný hrudní díl – zvoncová strana (nízké frekvence) a membránová strana (vysoké frekvence) => vzniklý akustický tlak se přenáší vzduchem naplněnými dutými trubicemi k uším vyšetřujícího => fonendoskop
- Stetofon – konverze akustického signálu na elektrický (využití piezoelektrického jevu) a následné elektronické zesílení signálu



**MUNI**  
**PHARM**

# **Ultrazvuk a ultrazvuková diagnostika**



# Ultrazvuk

## – Ultrazvuk

- Akustické vlnění
- Frekvence vyšší jak 20 000 Hz
- Za hranicí slyšitelnosti

## – Tvorba ultrazvuku

### – Magnetostrikční generátory

Změna objemu feromagnetické látky vlivem okolního magnetického pole

Maximální frekvence 60 kHz

### – Piezoelektrické generátory

Nepřímý piezoelektrický efekt = deformace materiálu vlivem elektrického napětí

Obvykle 1-20 MHz



# Účinky ultrazvuku

- **Mechanické** – zvuk = kmitání částic = střídání tlaků = narušení materiálu
- **Disperzní** – příprava jemných emulzí a suspenzí
- **Tepelné** – tření kmitajících částic prostředí; velké množství tepla vzniká na rozhraní tkání s různým akustickým odporem
- **Fyzikální, chemické** – dodání energie => excitace, urychlení chemických reakcí; depolymerizace, tvorba radikálů ve vodném prostředí

# Ultrazvuk v laboratoři

Ultrazvukové lázně

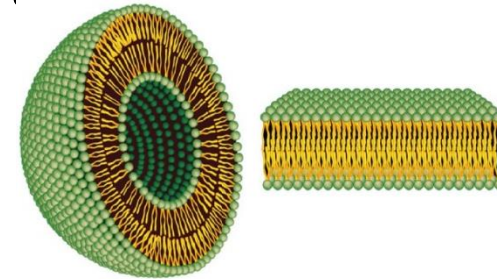
Ultrazvukové homogenizátory

- Čištění
- Odplynění
- Rozpouštění
- Homogenizace
- Tvorba emulzí



# Příprava lipozomů

- Složeny z polárních lipidů – fosfolipidy (fosfoglyceridy, sfingolipidy) a cholesterol
- Velikost 25 – 2500 nm



- Příprava
- 1. odsušení roztoku lipidů v organickém rozpouštědle
- **2. dispergace lipidů ve vodném médiu**
- 3. purifikace
- 4. analýza



# Biologický účinek ultrazvuku

- Zvýšení membránové permeability
  - Snížení vodivosti nervových vláken
  - Zvýšení pH v tkáních
  - Analgetický, spasmolytický účinek
- 
- Do intenzity  $1,5 \text{ W.cm}^{-2}$  pozitivní efekt
  - Do intenzity  $3 \text{ W.cm}^{-2}$  negativní efekt reverzibilní
  - Nad intenzitu  $3 \text{ W.cm}^{-2}$  ireverzibilní efekt

# Ultrazvuk - diagnostika

- Ultrazvukové detekční přístroje využívají piezoelektrického jevu
- Schopnost jeho deformace v elektrickém napětí (zdroj kmitání) a schopnost krystalu při jeho deformování generovat elektrické napětí (detekce)
- Ultrazvukový měnič – krystaly oxidu křemičitého, keramické materiály
- Na rozhraní dvou prostředí, které se liší akustickou impedancí (odporem), dochází k odrazu ultrazvukového vlnění

Poměr dopadající a odražené intenzity =  $R$

- $R = 0$ : homogenní prostředí
- $R$  blízko 0: tkáně s podobnou impedancí
- $R$  blíže 1: rozhraní kost a měkká tkáň

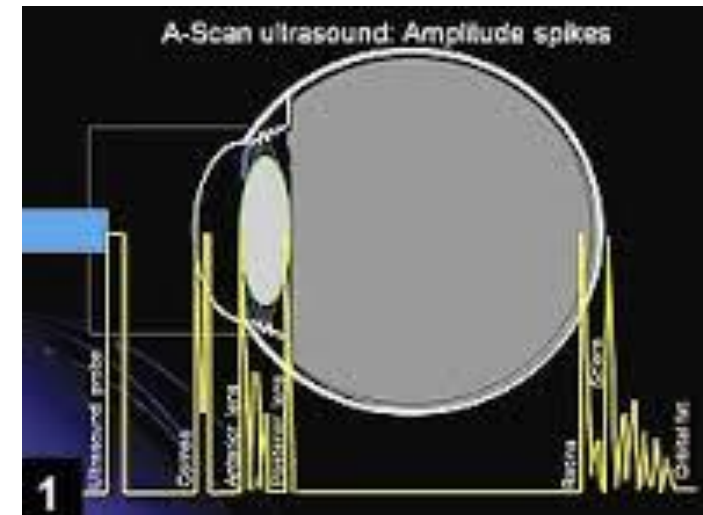
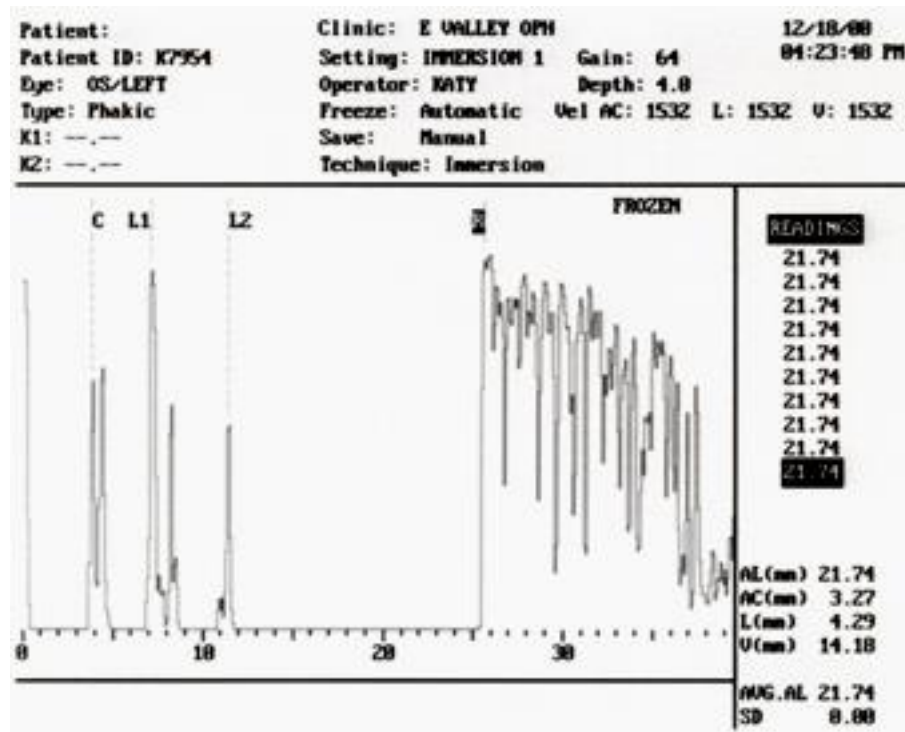
$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

# Diagnostika ultrazvukem

- Kromě odrazů na rozhraních tkání dochází také k absorpci vlnění tkáněmi
- Míra absorpce ultrazvuku je přímo úměrná jeho frekvenci, tzn. Vlnění s vyšší frekvencí bude mít nižší pronikavost
- Vyšší frekvence na druhou stranu zajišťuje lepší rozlišovací schopnosti
- Přeladitelnost přístroje

# Diagnostika ultrazvukem

Zobrazení typu A – signál zobrazen jako impulzy na časové ose





# Diagnostika ultrazvukem

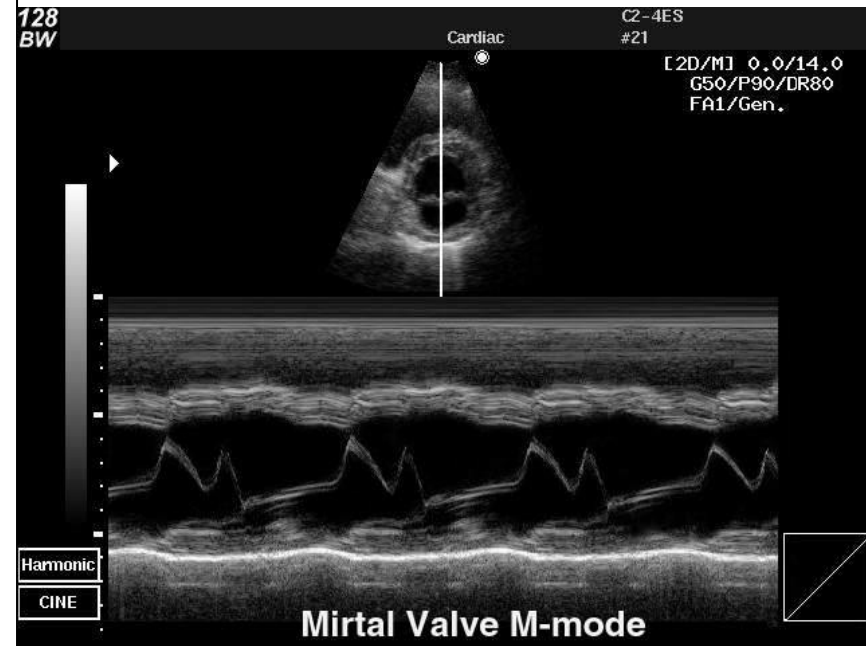
## Zobrazení typu B

- signál zobrazen jako body na monitoru o různém jasnosti
- tkáně s vyšší mírou odrazu jsou jasnější (echogenní)



## M-zobrazení

- podtyp zobrazení typu B
- pohybující se strukturu v závislosti na čase



# Diagnostika ultrazvukem

- 3D zobrazení – skládáno z 2D obrázků; vhodné pro struktury, které jsou delší dobu v klidu



# Terapie ultrazvukem

## **Frekvence 800 – 1000 kHz**

- Využívá biologických efektů ultrazvuku na organismus (zvýšení permeability, zvýšení pH, snížení nervového přenosu)
- Zvyšuje se prokrvení tkání, metabolismus
- Spasmoanalgetický efekt

## **Nízko frekvenční ultrazvuk 20 – 30 kHz (magnetostrikční zdroj kmitů)**

- Odstraňování zubního kamene
  - Využívá principu kavitace
  - vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí

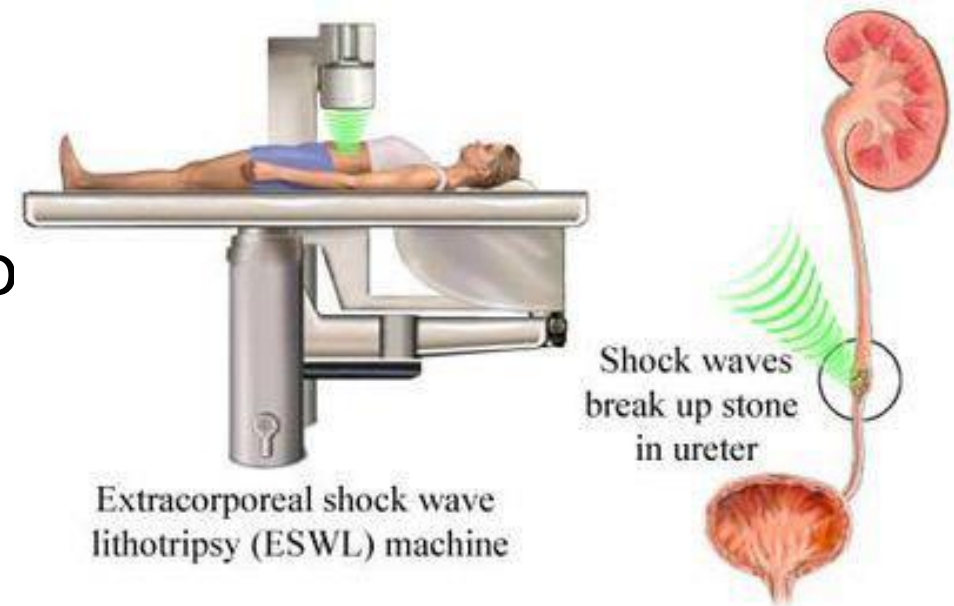
# Terapie ultrazvukem

## – Rázové vlny

- Na rozdíl od kontinuálního ultrazvukového vlnění se jedná o jeden kmit ( $\mu\text{s}$ )
- Vysoký akustický tlak
- Litotripse (LERV)
- 100 až 1000 rázových vln k rozbití kamene

## – Nutnost dbát na minimální poškození o

- Maximalizace absorpce energie v daném místě
- Zaměření vlnění do daného bodu (fokusace)
  
- ledvinové kameny – využitelné u cca 70 % případů
- žlučnickové kameny – využitelné u cca 20 % případů



# Terapie infrazvukem

- Lze údajně využít i k terapeutickým účinkům
  - Akutní a chronická bolest
  - Bolest kloubů a ztuhlost
  - Svalová bolest
  - únava
  - Poruchy spánku