

Ultrazvuk v terapii

Doc. Ing. Jana Kolářová, PhD.

Rozman J a kol. Elektronické přístroje v lékařství,
Academia 2006.

Val Robertson at al. Electrotherapy explained,
Butterworth-Heinemann; 4 edition (July 11, 2006).

Charakteristika zvuku

- **Mechanické vlnění**

- vlnová délka, frekvence, rychlost šíření, velikost (amplituda)
- podélné vlnění

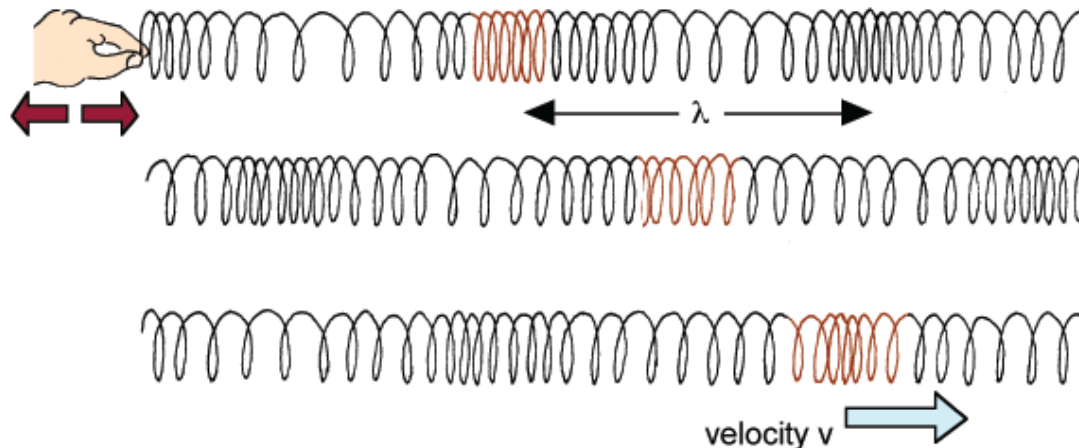


Figure 9.2
Longitudinal waves in a spring.



Figure 9.3
Diagrammatic representation of a sound wave.

Ultrazvuk

ultrazvuk je akustické vlnění s frekvencí od 20kHz do 1GHz.

pro lékařské aplikace (diagnostiku a terapii) se používají frekvence 2–30 MHz.

budiče - piezoelektrické nebo magnetostrikční

biofyzika ultrazvuku:

- aktivní interakce: uzv energie je pohlcována prostředím - vyvolává jeho změny - biologické účinky uzv (terapie, chirurgie)
- pasivní interakce: aplikace nízkých hodnot, nevyvolá biologické účinky, zjišťování vlastností o akustických vlastnostech tkáně (diagnostika)

Ultrazvuk

využití ultrazvuku v terapii:

- aplikace **výkonového ultrazvuku** ve fyzikální terapii,
- v inhalační terapii,
- v ultrazvukových chirurgických přístupech, litotripsie – drcení kamenů v ledvinách,

Fázová rychlost zvuku závisí na prostředí a jeho teplotě.

Pro rychlost zvuku ve vzduchu platí přibližný vztah:

$$v_t = (331,82 + 0,61 \{t\}) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

t je teplota v Celsiových stupních, $\{t\}$ je hodnota teploty.

Rychlost zvuku ve vzduchu je (při teplotě 0 °C a hustotě suchého vzduchu 1,293 kg.m³): 331,82 m.s⁻¹.

Fyzikální vlastnosti uzv

- ultrazvuk prochází hmotným prostředím pomocí vibrací částic
- šíření uzv prostředím - přenos vibrace na sousední částice
- zpoždění přenosu energie - elastická vazba mezi částicemi o určité hmotnosti
- absorpce energie → teplo

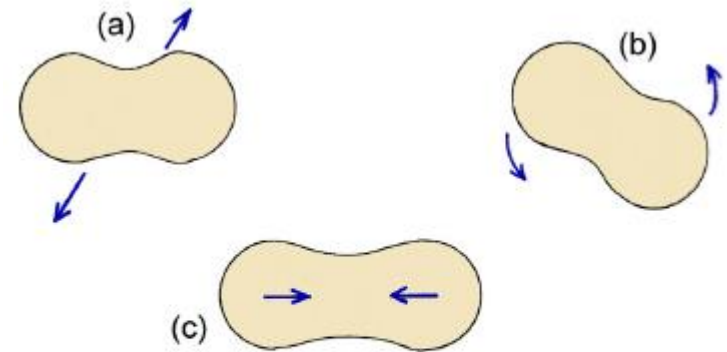


Figure 9.6
(a) translational oscillation (b) rotation and (c) Internal vibration of a diatomic molecule.

pro popis ultrazvuku musíme zavést některé veličiny:

- akustický tlak p
- rychlost částic v - rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy
- rychlost šíření uzv vlny c
- hustota prostředí ρ

Akustický tlak

- $P' = P - P_0$

P ... celkový tlak v daném bodě zvukového pole,
 P_0 ... trvalá hodnota atmosférického tlaku ($2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$),
 P' ... proměnná složka tlaku, která je superponována k atmosférickému tlaku za přítomnosti zvuku.
($P'_{\text{max}} \sim 102 \text{ Pa}$ - 1000x menší hodnotu než P_0)

- hladina (úroveň) akustického tlaku - určuje, o co je daná (změřená) hodnota vyšší, než referenční hodnota. Udává se v dB.

$$L = 20 \log (P' / P_0)$$

dvojnásobná hlasitost = o 6dB větší hladina ak. tlaku
desetinásobná hlasitost = o 20 dB větší hladina ak. tlaku

Intenzita zvuku

- $I = P / S$ [W/m²]
- I... intenzita zvuku
- P... výkon akustického vlnění
- S... plocha, na kterou vlnění dopadá
 - Měrný výkon - výkon dopadající na jednotku plochy.
- hladina intenzity zvuku

$$LI = 10 \log I / I_0$$

I_0 ... referenční hodnota $I_0 = 10^{-12}$ W.m⁻²

- Sčítání úrovní zvuku - zvuk se sčítá na výkonové úrovni, proto máme-li dva zvuky 80dB naměříme 83 dB, tedy 2x takový výkon.

Intenzita ultrazvuku

- intenzita uzv vlnění v prostoru je ovlivněna
 - rozptylem vlnění,
 - interferencí,
 - vlastní absorpcí.
- od místa generování dochází tedy s rostoucí vzdáleností k poklesu intenzity:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-2\alpha x}$$

- I_0 je vztažná hodnota intenzity uzv,
- kde α [dB/m] je činitel útlumu (je závislý především na absorpci a také se označuje jako koeficient absorpce).
- x vzdálenost.

Parametry tkání

- rychlost šíření uzv
- akustická impedance
- útlum ultrazvuku

Parametry tkání

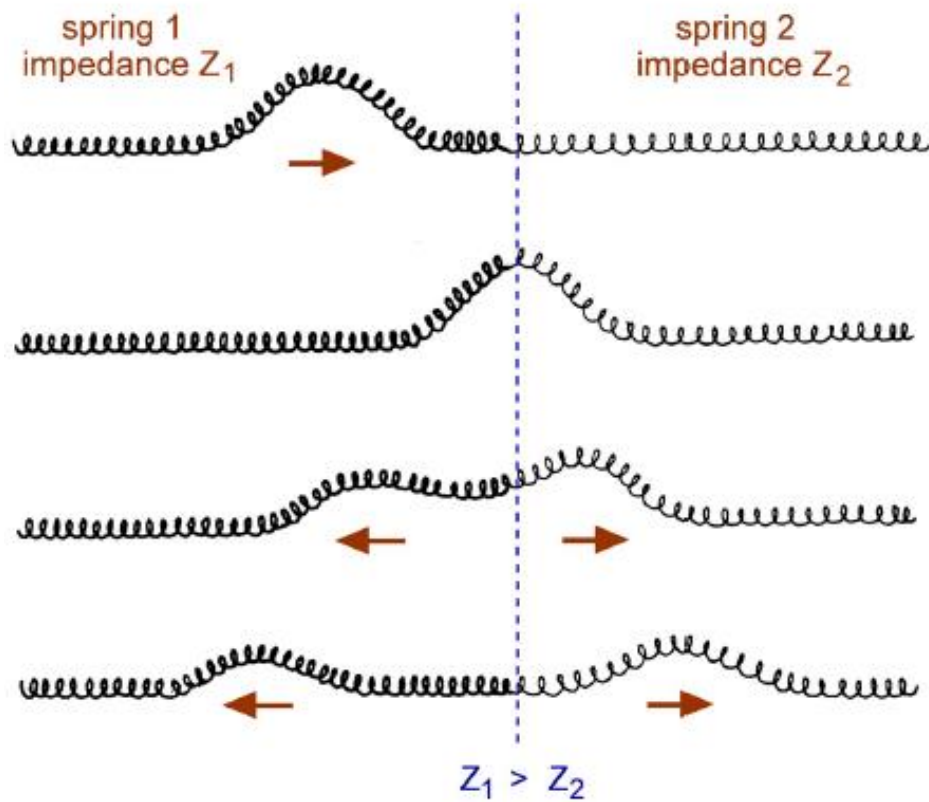


Figure 9.8
Reflection from a low impedance boundary.

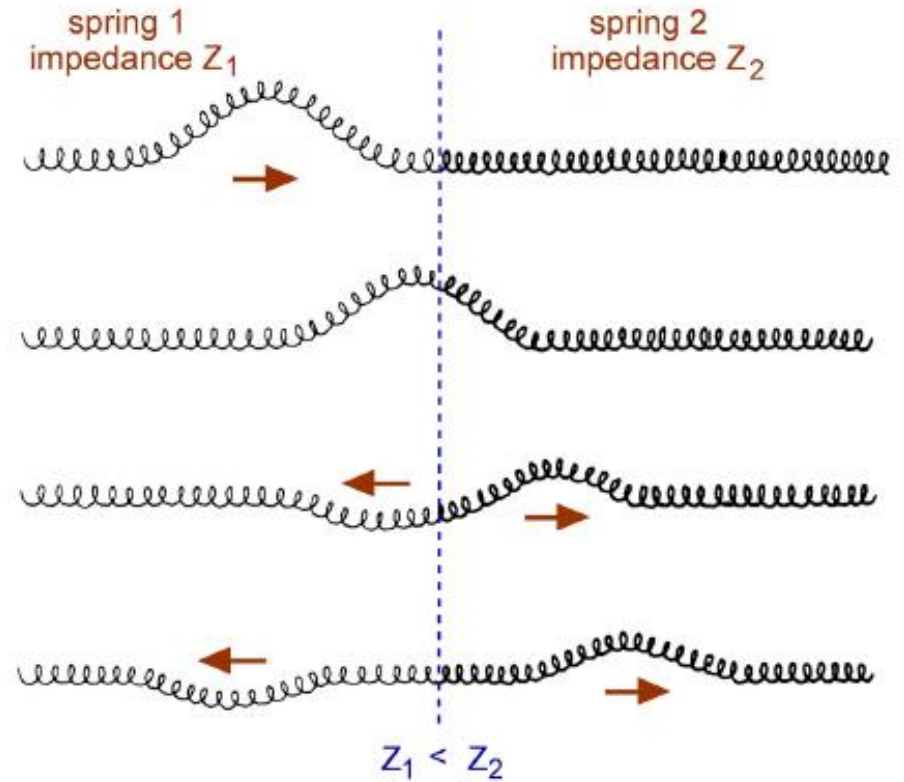


Figure 9.9
Reflection from a high impedance boundary.

Parametry tkání

rychlost šíření uzv živou tkání -
nehomogenní prostředí

- vliv nehomogenit \sim vlnový odpor a rozměry
ve vztahu k vlnové délce
- rozhraní látek - odraz, lom, popř. rozptyl

měkké tkáně - $1450-1650 \text{ ms}^{-1}$

kosti - 3380 ms^{-1} (lebeční 4080 ms^{-1})

plíce - nedef.

Parametry tkání

- rychlost šíření (podélných) vln je závislá na parametrech prostředí:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

kde E je Youngův modul pružnosti [Pa].

- rychlost šíření ultrazvuku v různých tkáních je v širokém rozsahu nezávislá na frekvenci, můžeme využít jednoduchý vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí ultrazvuku:

$$\lambda = c/f$$

akustická impedance

Parametry tkání

- **útlum ultrazvuku**
- **závislý na teplotě vzorku**
- **různá velikost útlumu u svalů při měření podél a napříč vláken**
 - nejvyšší hodnoty činitele útlumu α jsou u plynů (vzduch $0,14 \text{ dB/mm.MHz}$),
nejnižší jsou u kovů hliník $8,7 \cdot 10^{-3} \text{ dB/mm.MHz}$)
 - biologické tkáně dosahují hodnot $0,01 \div 3,3 \text{ dB/cm.MHz}$,
(lebeční kost 20 dB/cm.MHz)

Parametry tkání

- činitel útlumu uzv
- α je závislý na použité frekvenci

$$\alpha = f (f)$$

To znamená, že vyšší frekvence jsou tlumeny více a proniknou tedy do menších hloubek. Pro vyšetřování hlouběji uložených orgánů je tedy nutné použít menší frekvence (2-5MHz). To má však za následek horší rozlišení (větší vlnová délka)!

Hloubka vniku δ [cm]

| | δ [cm] / tuk | δ [cm] / sval | δ [cm] / kost |
|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| ultrazvuk 1MHz | 7,2 | 1,7 | 0,22 |
| ultrazvuk 2MHz | 4,8 | 1,2 | 0,15 |
| ultrazvuk 3MHz | 2,4 | 0,6 | 0,07 |

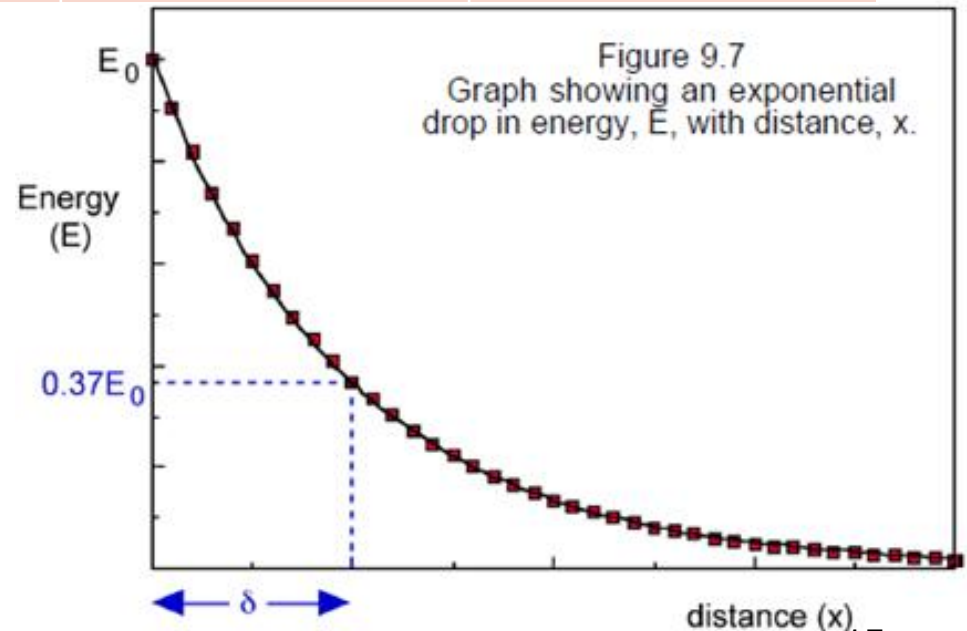
$$E = E_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

E ... energie zvuku

E_0 ... počáteční energie zvuku

x ... hloubka vniku

δ ... charakteristická hloubka vniku



Použití uzv obecně

- výrazně se zeslabují ve vzduchu (s rostoucí frekvencí)
- malá absorpce ultrazvuku ve vodě (použití - sonary)

zeslabení $I_x = I_0/2$

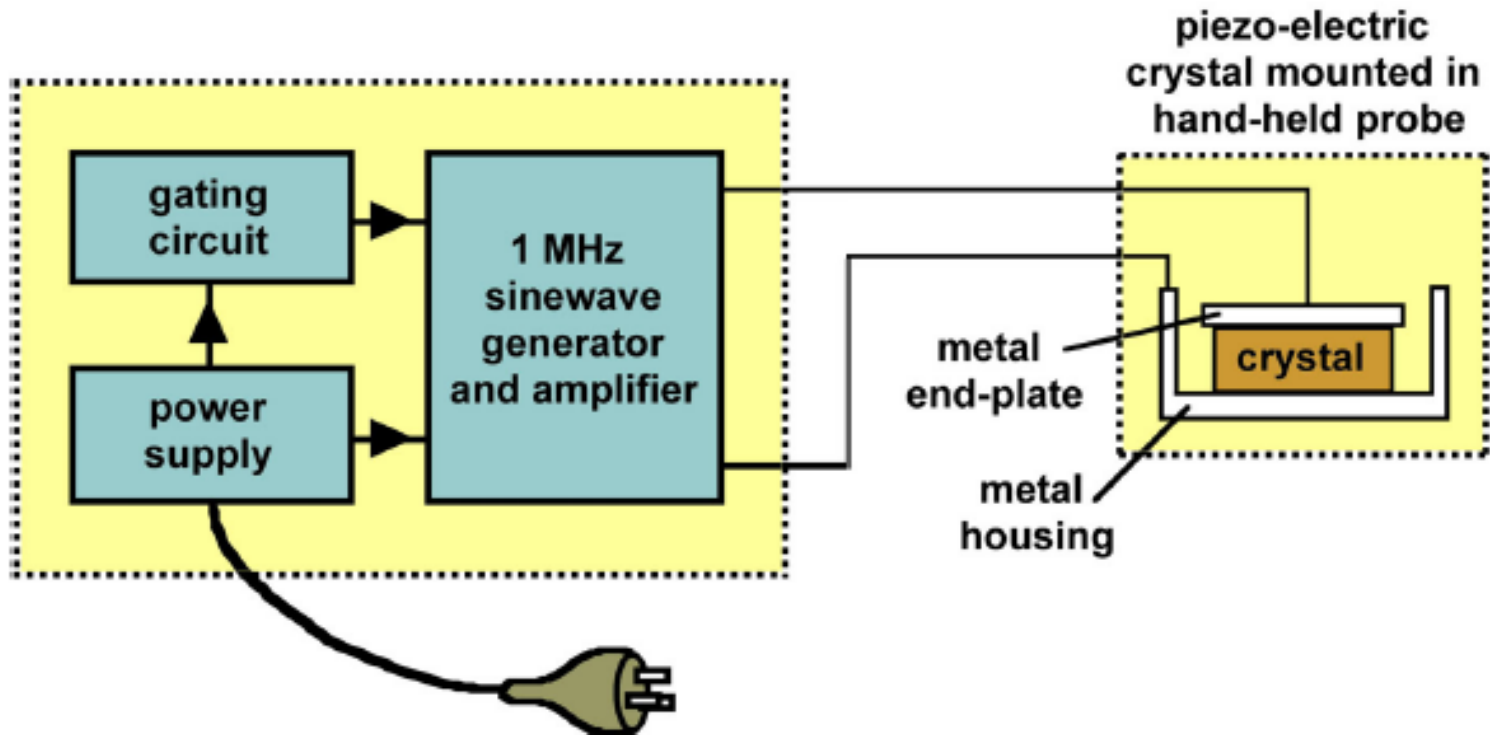


| Materiál | $f=100$ kHz | $f=1000$ kHz |
|----------|--------------|---------------|
| voda | $x = 1400$ m | $x = 14$ m |
| vzduch | $x = 2,6$ m | $x = 0,026$ m |
| hliník | $x = 58$ m | $x = 0,58$ m |

Generování ultrazvuku


- k vybuzení vibrační částic, které tvoří uzv vlnu je potřeba dodat
 - určitou energii [J];
 - za jednotku času - výkon [W].
 - - vztažený na jednotku plochy pak definuje intenzitu I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]
- pro terapii: max $30\text{kW}/\text{m}^2$ ($3\text{W}/\text{cm}^2$) při expoziční době 15min)
- dávka: součin intenzity uzv a doba aplikace
- různé klinické účinky na různé tkáně a orgány těla
- pracovní frekvence, druh provozu, chlazení...

Generování ultrazvuku



piezoelektrický jev: schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci,
opačný jev: krystal se působením elektrického napětí deformuje.

fyzikální terapie

- **pracovní frekvence** - se volí podle požadované hloubky vniku
 - 800kHz, 1600kHz (hloubka vniku jednotky cm)
 - nižší frekvence - větší hloubka
 - vyšší frekvence - menší hloubka - velká absorpce - pouze povrchové působení na tkáň
- **dávka**
 - malá - **pod $0,5W/cm^2$** - mikromasážní účinky, urychlení fyziologických procesů
 - střední - **$1-5W/cm^2$** - interbuněční látková výměna
 - vysoká - **nad $5W/cm^2$** - dochází k poškození buněk, tkáně, až odumření (uzv chirurgie)
- hodnoty platí pro spojitě vysílanou uzv vlnu, pro impulsní režim je doba působení delší.
- **reverzibilní změny** $3W/cm^2$ **ireverzibilní změny**


Fyzikální terapie

- návrh terapie s ohledem na bezpečnost pacientů jsou platné pro všechny aplikace ve **fyzioterapii**:
 - volba pracovní frekvence,
 - průměry uzv měničů,
 - užitá dávka,
 - konstrukční řešení přístrojů

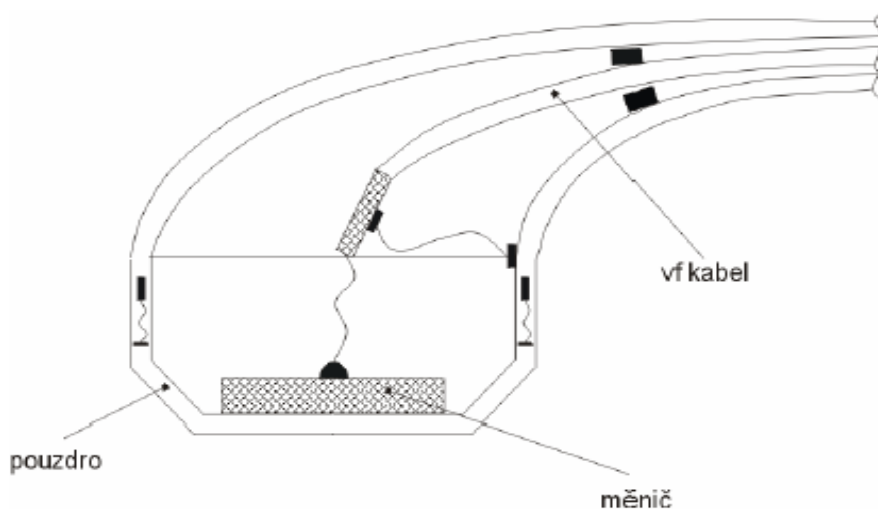
Konstrukční řešení

technické hledisko

- pracovní frekvence,
 - požadovaná hloubka vniku \rightarrow 800 kHz, 1,6 MHz s ohledem na odpovídající poloviční hloubku vniku 5 ÷ 7 cm ve tkáni.
poloviční hloubka vniku je hloubka ve tkáni, ve které intenzita uzv vůči intenzitě na povrchu těla má poloviční hodnotu. Při vyšších frekvencích je však absorpce uzv tak velká, že dochází jen k působení na tkáně uložené co nejblíže povrchu těla.
- provedení uzv hlavice,
- konstrukční řešení vlastního přístroje,
- druh provozu,
- velikosti dávek, kontrola dávek

Terapeutická hlavice

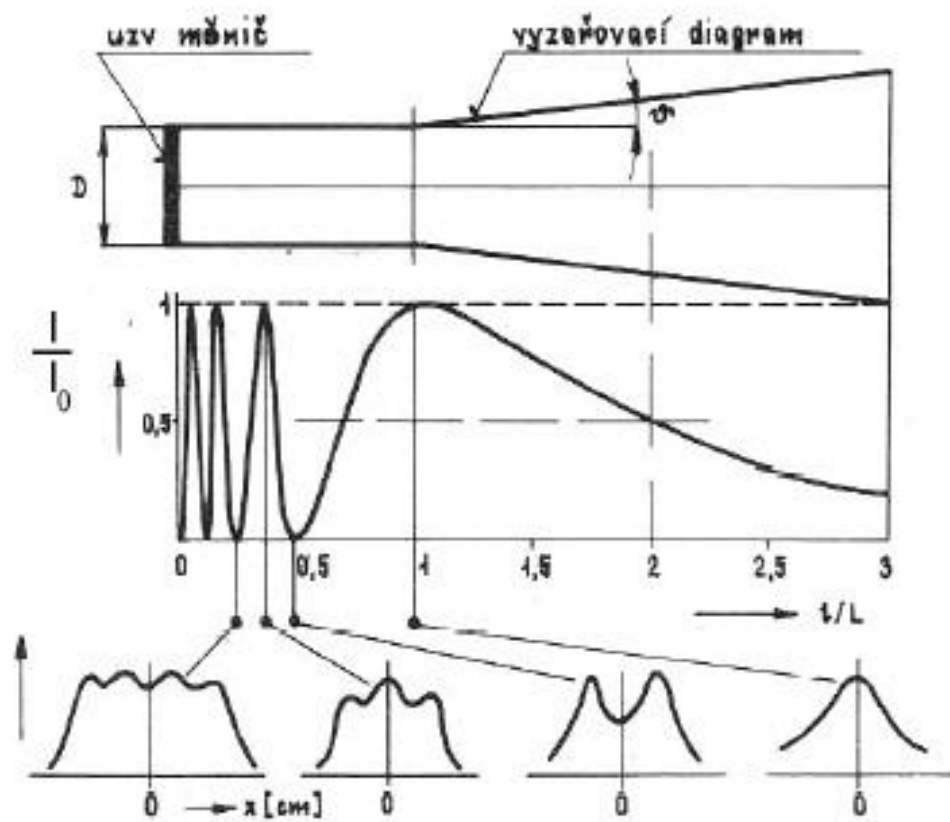
- průměr užitých uzv měničů bývají $10 \div 30$ mm,
- krycí vrstva měničů - rezonanční tloušťka,
- zadní strana měničů bývá tlumena jen vzduchem.
- pouzdro hlavice je obvykle hermeticky uzavřeno pro možné subaquální aplikace.



Konstrukční řešení

- požadavky uživatele,
- napájení je zpravidla ze sítě přes oddělovací transformátor.
- velikost zařízení (přenosné),
- počet hlavice,
- přídatná zařízení (modulace nosné vlny) ap.

Ultrazvukové pole



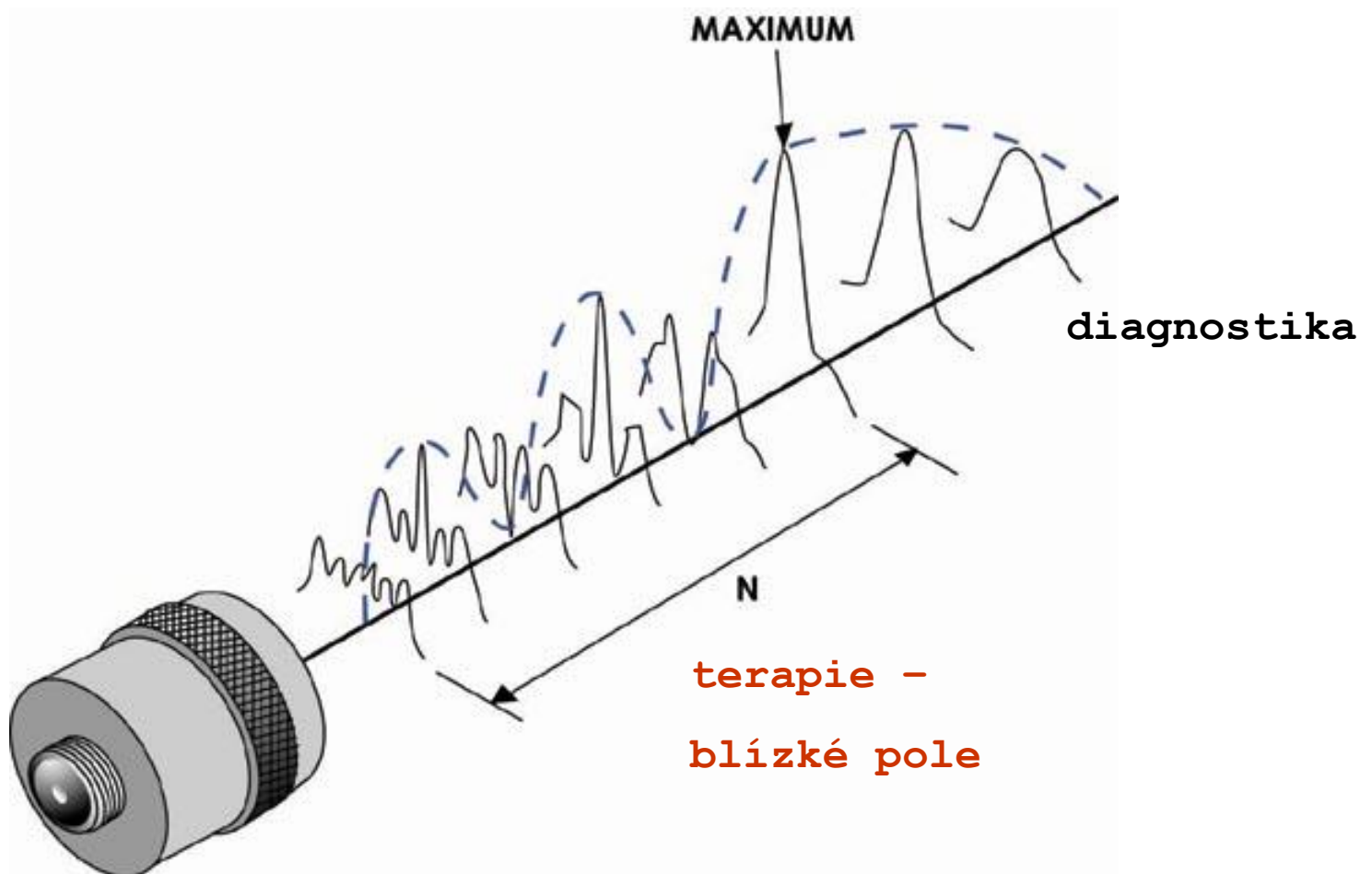
Velikost blízkého pole určíme ze vztahu

$$L = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}$$

a úhel rozbíhavosti svazku

$$\theta = \arcsin 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Ultrazvukové pole ve 3D



Fyziologické účinky výkonového ultrazvuku

- při působení výkonového uzv na biologické systémy se jedná o *aktivní interakce*, při kterých pohlcená uzv energie vyvolá v biologických systémech změny. Cílené využití těchto změn je v uzv terapii a chirurgii.
- biologické účinky zásadně dělíme na:
 - primární - dané mechanickým působením uzv,
 - sekundární - způsobované jinými druhy energie v něž se uzv energie transformovala (tepelná, chemická, ap.)
- podle způsobu interakce hovoříme o působení:
 - přímém - projevujícím se během aplikace,
 - nepřímém - zprostředkovaném buď fyzikálně, chemicky nebo reflexně.
- z hlediska mechanismu působení můžeme biologické účinky rozdělit na:
 - kavitační,
 - tepelné,
 - ostatní - s převahou účinků mechanických a chemických.

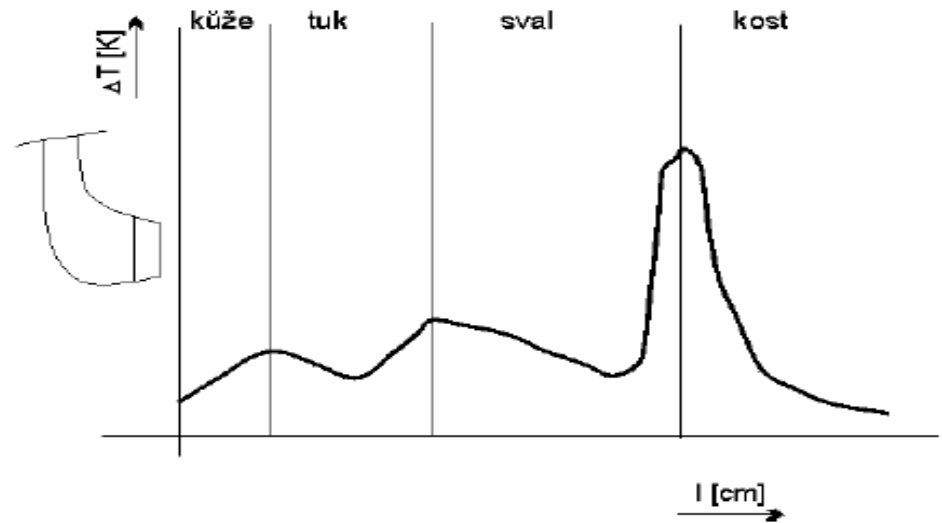
Biologické účinky ultrazvuku

- **mechanické účinky** - zhušťování a zředování prostředí vede k rychlým tlakovým změnám při kmitání molekul. Rychlým střídáním tlaků v malých objemech může dojít k mechanickému rozrušení různých materiálů.
- biologické účinky jsou komplexní a závislé na intenzitě, kmitočtu a trvání expozice. Výsledkem jsou i strukturální změny (rozpad červených krvinek, koagulace bílkovin, rozrušení buněčného jádra).
- Účinky jsou:
 - **zvýšení membránové permeability** (zrychlení difúze ve tkáních)
 - **porušení vodivosti nervových vláken** (tlumivý účinek na přenos vzruchů)
 - **změna pH tkání** (po ozvučení ultrazvukem se pH zvyšuje, po nadměrné intenzitě může prudce klesnout)
 - **analgetický a spasmolytický účinek** (tišení bolesti)
 - **změkčování vazivové tkáně** změněné chorobnými procesy
 - **Zlepšení trofiky** (výživa tkání) (zvýšení místního krevního oběhu a tím zvýšení metabolismu)

Tepelné účinky

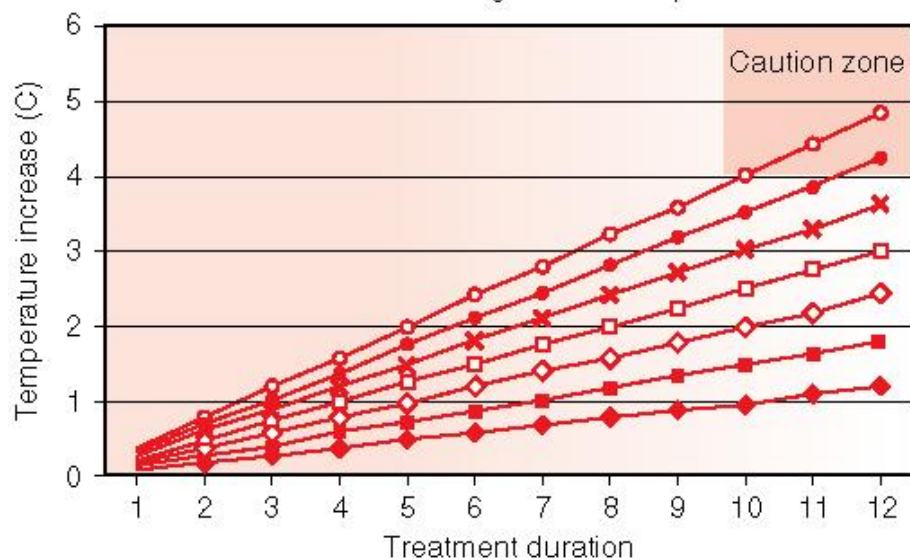
- tepelná energie - důsledek absorpce uzv energie a někdy také jako následek impedančních vazeb.
- na rozhraní různých akustických impedancí tkání - vznik teplotního rozdílu
- absorpce uzv ve tkáních je závislá na
 - frekvenci,
 - kinetické viskozitě
 - termoregulačním mechanismu kůže, který konvekcí zabezpečuje převod tepla do ostatních tkání těla. Podstatnou roli zde sehrává krevní oběh.
- zvýšení teploty tkání po ozvučení
 - pro celý objekt x samostatné tkáně

Tepelné účinky

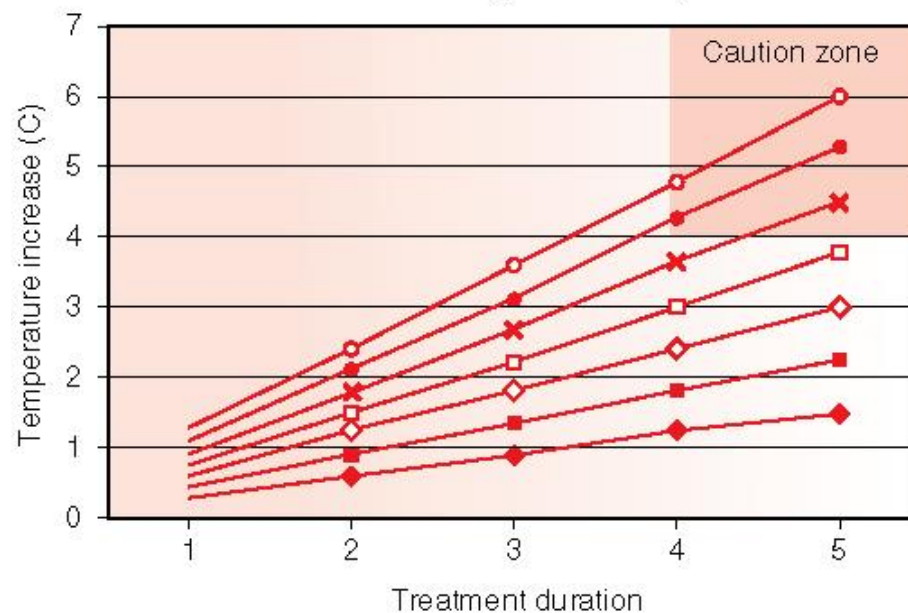


Tepelné účinky

Rate of heating—1 MHz output



Rate of heating—3 MHz output



Mechanické a chemické účinky

- mechanické účinky

- vznik mikromasáže - urychlení procesů na úrovni buněk → tkáni
- důsledkem je lokální ohřev, a uvolnění histamínu → prokrvení tkáně, látková výměna
- nevratné změny ve tkáních - při vyšších intenzitách uzv pole - **chirurgie**

- chemické účinky

- reakce v ozvučovaných tkáních
- funkční makromolekuly mění svou aktivitu
- změny vazby v prostředí, elektrochemické vlastnosti

Riziko uzv aplikací

- základní kritérium při posuzování rizika uzv aplikací v lékařství.
 - **intenzita uzv pole**
- Světová zdravotnická organizace (WHO) posoudila v r. 1976 publikované výsledky z oblasti biologických účinků při aplikacích uzv a vypracovala následující doporučení.
- diagnostické postupy
 - ve frekvenčním rozsahu 1 ÷ 20 MHz
maximální hodnota intenzity uzv 7,2 kW/m² (720 mW/cm²)
-nove hodnoty
při expozičních časech 1 ÷ 500 s, dávka: 10⁵ J/m².
- **uzv terapie**
 - maximální hodnota intenzity uzv 30 kW/m² (3 W/cm²)
při maximální expoziční době 15 minut.
 - Doposud nebyly publikovány nálezy, podle kterých by bylo možné označit tyto dávky v uzv aplikacích za zdraví škodlivé či nebezpečné.

Léčebná hlediska

- aplikace
 - lokálně - nepřímo,
 - paravertebrálně (ozvučování nervově přidružených segmentů páteře).
- realizace
 - přímým kontaktem hlavice s kůží pacienta přes vazební prostředí (olej, gel),
 - zprostředkovaně (subaquálně) ve vodní lázni 1 ÷ 3 cm od kůže. Poloha pacienta není rozhodující.
- přenos uzv energie do tkáně
 - statickým ozvučováním,
 - masážovitými pohyby hlavicí.
- dávky
 - dávka statické ozvučování je 1/5 uvažované,
 - dávka subaquální ozvučování masážovitými pohyby se dávka zvyšuje,
 - velikosti intenzit i počet dávek jsou závislé na charakteru a stadiu onemocnění.