



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra fyziky

A6M02FPT – Fyzika pro terapii

ULTRAZVUK

Fyzikální principy, využití v medicíně a terapii

Daniel Tokar

tokardan@fel.cvut.cz

Obsah

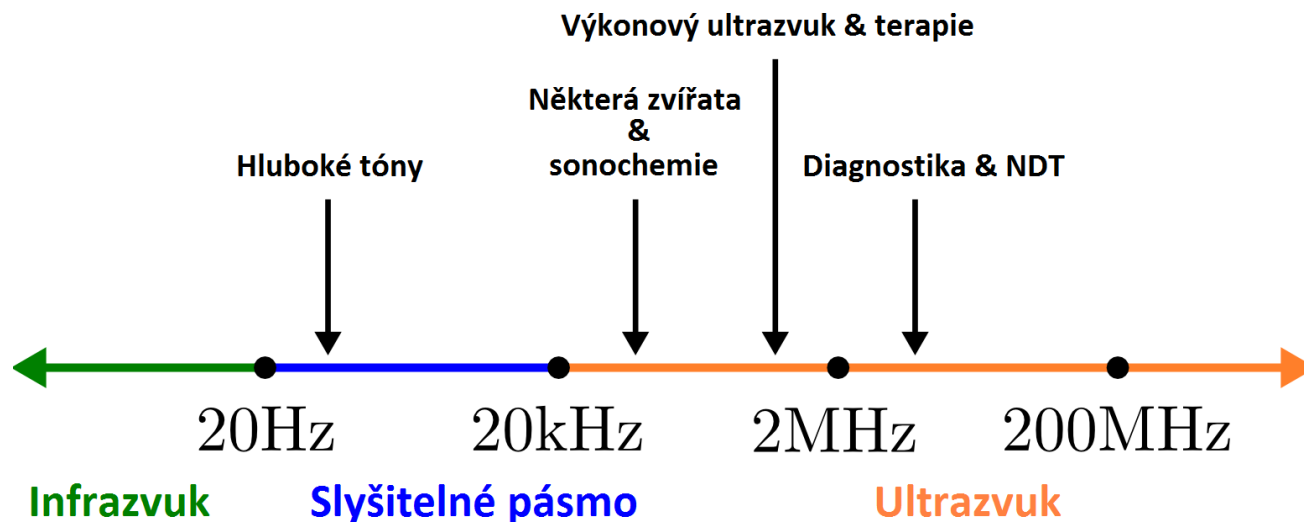
O čem bude tato přednáška...

- základní popis a druhy ultrazvukového vlnění
- související fyzikální veličiny
- šíření ultrazvukové vlny prostředím
- generování ultrazvuku
- biologické účinky ultrazvuku
- diagnostický vs. terapeutický ultrazvuk
- výhody a nevýhody pro použití v medicíně
- příklady využití ultrazvuku v medicíně a terapii

Fyzikální podstata ultrazvuku

Zvuk a jeho frekvenční rozsah

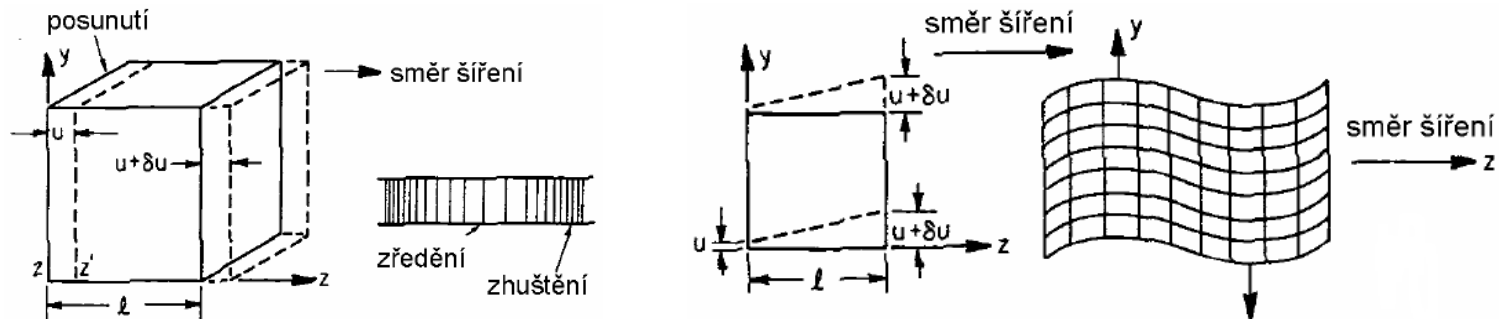
- Zvuk je mechanické vlnění šířící se daným prostředím (plyny, kapaliny, pevné látky) v podobě kmitání částic – vychylování z rovnovážné polohy a postupné předávání energie
- Při frekvencích kmitání částic větších než 20 kHz hovoříme o ultrazvuku.



Fyzikální podstata ultrazvuku

Základní druhy ultrazvukového vlnění

- podélné vlnění
 - kmitání částic paralelně se směrem šíření vlny
- příčné vlnění
 - kmitání částic kolmo ke směru šíření vlny
- kombinace obou typů
- specifické typy vlnění v závislosti na vlastnostech prostředí



- V měkkých tkáních se šíří zejména podélné vlny, příčné vlny se šíří zejména v kostech.

Související fyzikální veličiny

Rychlost šíření ultrazvukové vlny

- rychlost šíření v plynech c_p

$$c_p = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

- rychlost šíření v kapalinách c_k

$$c_k = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

- rychlost šíření v pevných látkách c_{pl}

$$c_{pl} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

κ plynová konstanta

p_0 ... klidový tlak v plynu

ρ_0 ... klidová hustota plynu

ρ hustota kapaliny (pevné látky)

K modul objemové stlačitelnosti kapaliny

E Youngův modul pružnosti

G modul pružnosti ve smyku

μ Poissonův poměr

Související fyzikální veličiny

Rychlost šíření ultrazvukové vlny

- orientační hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku v různých prostředích:

Prostředí	Rychlost ultrazvuku c_1 (m s ⁻¹)
Vzduch při teplotě 0 °C	330
Vzduch při teplotě 20 °C	344
Voda	1 500
Krev	1 580
Svalovina	1 560
Kůže	1 620
Mozek	1 540
Játra	1 570
Kost	3 360
Ocel	5 950
Hliník	6 300

Související fyzikální veličiny

Útlum ultrazvukové vlny

- Během šíření ultrazvukové vlny dochází k absorpci její energie daným prostředím a tedy k postupnému útlumu vlny.
- Intenzita vlny I resp. amplituda A tak exponenciálně klesá se vzdáleností dle vztahu

$$I(x) = I(0) e^{-2\mu x} \text{ resp. } A(x) = A(0) e^{-\mu_a x}$$

x vzdálenost od místa vybuzení

μ koeficient útlumu ultrazvukové vlny

$$\mu_a = -\frac{1}{x} \cdot \ln \frac{A(0)}{A(x)} \quad (\text{Np} \cdot \text{cm}^{-1})$$

$$\alpha = 20 \mu_a \cdot \log_{10} e \cong 8,7 \mu_a$$

- Koeficient útlumu α je charakteristická veličina pro dané prostředí a udává se zpravidla v jednotkách $[\alpha] = \text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ vztažený na 1 MHz.
- Útlum ultrazvukové vlny tedy přímo-úměrně závisí na její frekvenci, biologické tkáně dosahují hodnot $(0,1 - 3) \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$.

Související fyzikální veličiny

Vlnová délka a hloubka průniku vlny

- Mezi rychlostí šíření ultrazvukové vlny c , její frekvencí f a vlnovou délkou λ platí vztah

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (\text{m}).$$

- Aby bylo možné rozlišit jemné struktury ve zkoumané tkáni, musí být vlnová délka λ menší, než nejmenší struktura, kterou chceme rozlišit.
- Se zvyšující se frekvencí roste rozlišovací schopnost, ale klesá hloubka průniku vlny vlivem vysokého útlumu.

Související fyzikální veličiny

Akustická impedance prostředí

- Akustická impedance (specifická impedance) je charakteristickou veličinou každého prostředí, kterým se vlna šíří a je dána vztahem

$$Z_a = \rho \cdot c \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) .$$

- orientační hodnoty akustické impedance pro různá prostředí:

Prostředí	Akustická impedance $Z_a \cdot 10^6 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
Vzduch	0,004
Voda	1,5
Krev	1,62
Játra	1,64
Mozek	1,55 – 1,66
Svalovina	1,65 – 1,74
Kost	3,75 – 7,38

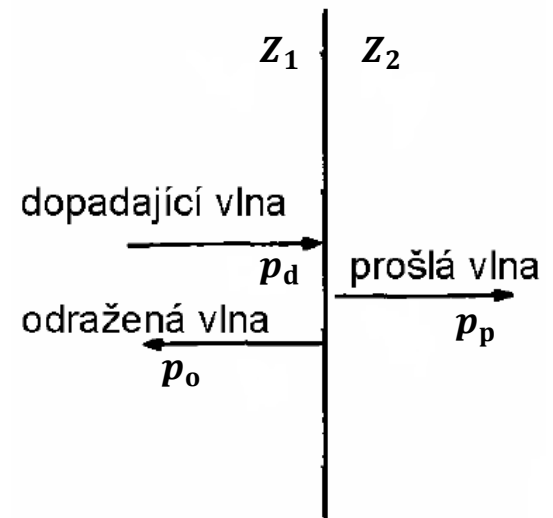
Šíření ultrazvukové vlny prostředím

Vlna na rozhraní dvou prostředí

- Při dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou akustickou impedancí Z_1 a Z_2 se část energie dopadající vlny odrazí zpět a část energie projde rozhraním.
- Koeficienty odrazu vlny R a průchodu vlny D jsou dány vztahy

$$R = \frac{p_o}{p_d} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad D = 1 + R = \frac{p_p}{p_d} = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1}.$$

- Čím větší je rozdíl akustických impedancí obou prostředí, tím větší část energie dopadající vlny se odrazí.
- Je žádoucí impedanční přizpůsobení vhodným vazebním médiem (gely).



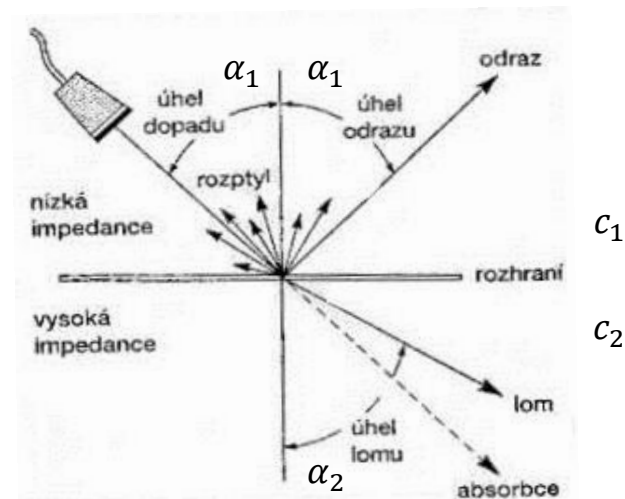
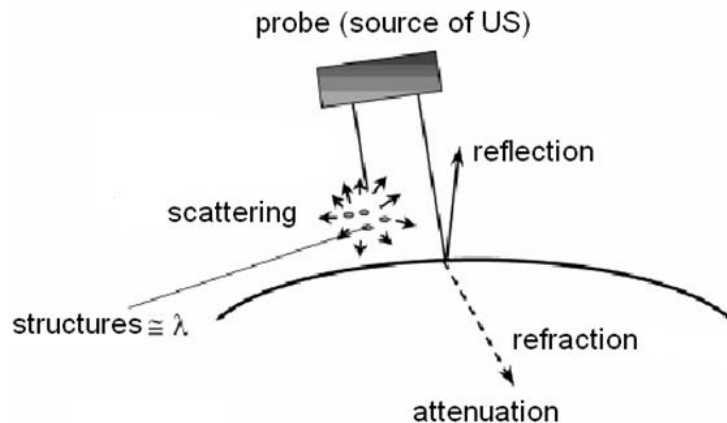
Šíření ultrazvukové vlny prostředím

Vlna na rozhraní dvou prostředí

- Při dopadu vlny na rozhraní pod určitým úhlem dochází k odrazu a lomu vlny dle Snellova zákona

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} .$$

- Současně může docházet i k transformaci vlny a vzniku nových typů vln – využití např. v NDT.



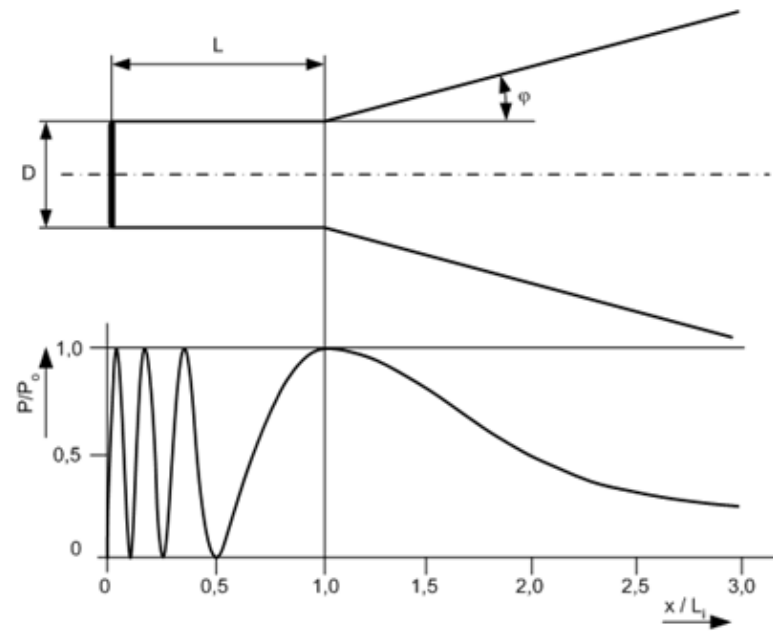
Šíření ultrazvukové vlny prostředím

Blízké a vzdálené pole

- Ultrazvuková vlna vybuzená kruhovým měničem o průměru D vytváří akustické pole, kolem osy měniče je rozložen akustický tlak p .
- V oblasti před měničem dochází ke změnám v rozložení akustického tlaku v důsledku interference vlnění – oblasti minim a maxim p/p_0 .
- Oblast do vzdálenosti L , která je dána existencí posledního maxima nazýváme blízké pole

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

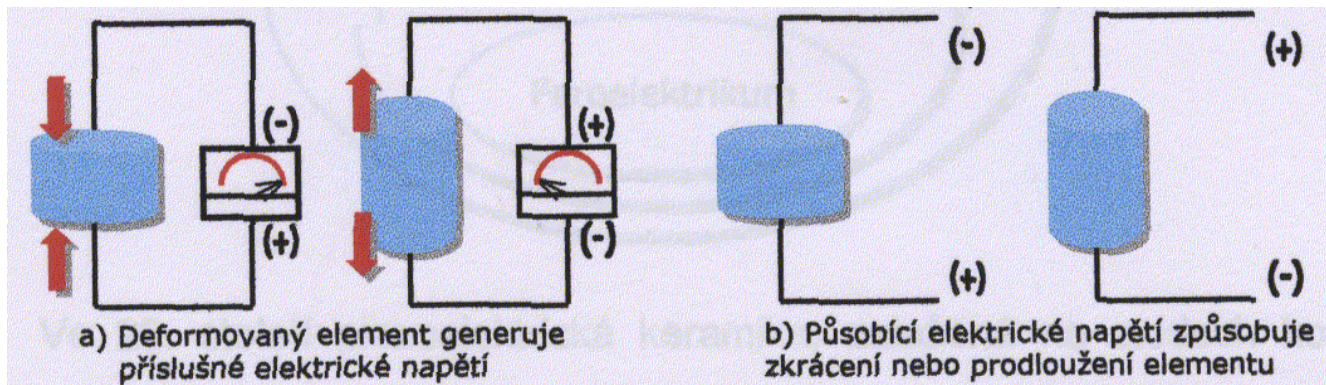
$$\varphi = \arcsin\left(1,22 \frac{\lambda}{D}\right)$$



Generování ultrazvuku

Piezelektrické měniče

- Piezelektrické měniče využívají přímého (přijímače) a nepřímého (vysílače) piezelektrického jevu.

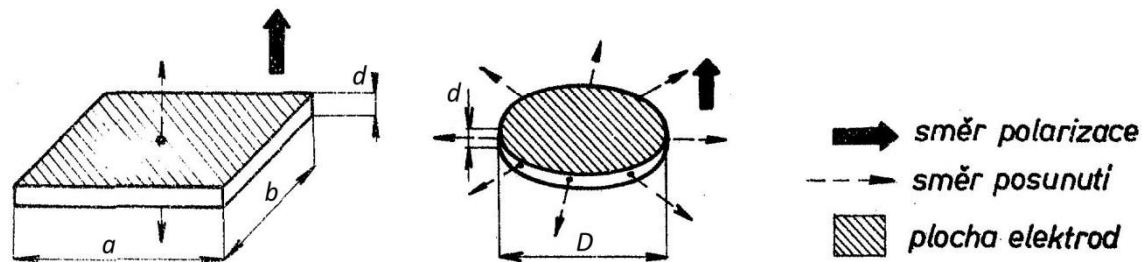


- vlastnost některých krystalických materiálů – nejčastěji PZT měniče
 - PZT – Plumbum-Zirconate-Titanate
 - prášek lisovaný do požadovaného tvaru měniče

Generování ultrazvuku

Piezoelektrické měniče

- Měníče požadovaného tvaru a polarizace jsou laděny na určitou rezonanční frekvenci a vytváří specifické kmity.



- Ultrazvukové hlavice používané v lékařské diagnostice a terapii využívají měniče s tloušťkovými kmity, jejichž frekvence je dána vztahem

$$f_r = n \frac{c}{2 \cdot d} \quad (\text{Hz}), \quad n = 1, 3, 5 \dots$$

c ... rychlost šíření ultrazvukové vlny

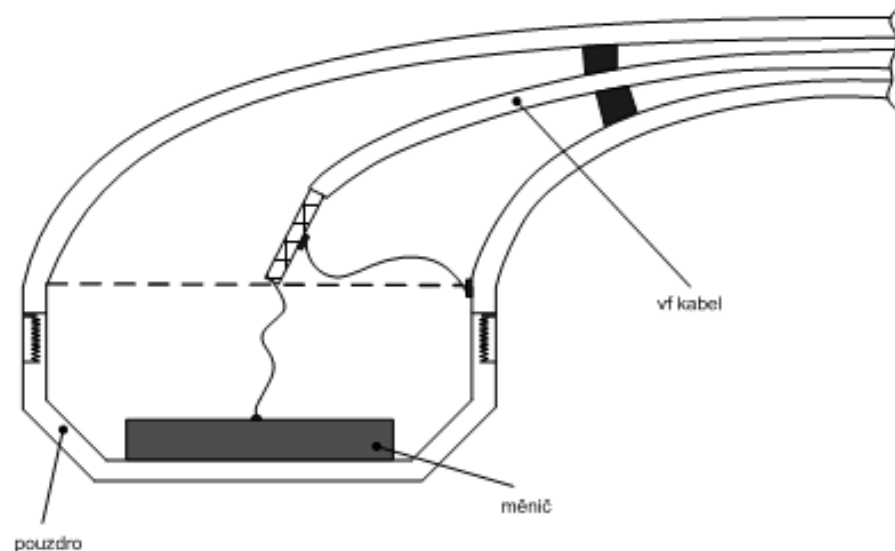
d ... tloušťka měniče

Generování ultrazvuku

Ultrazvuková hlavice

- Na plochy (elektrody) měniče je přiveden vysokofrekvenční budící puls z generátoru, kmitočet pulsu je naladěn na f_r , čímž je vybuzena ultrazvuková vlna požadované frekvence.
- Měníč je uložen v pouzdře hlavice a v místě kontaktu s lidským tělem chráněn zpravidla kovovou krycí vrstvou.

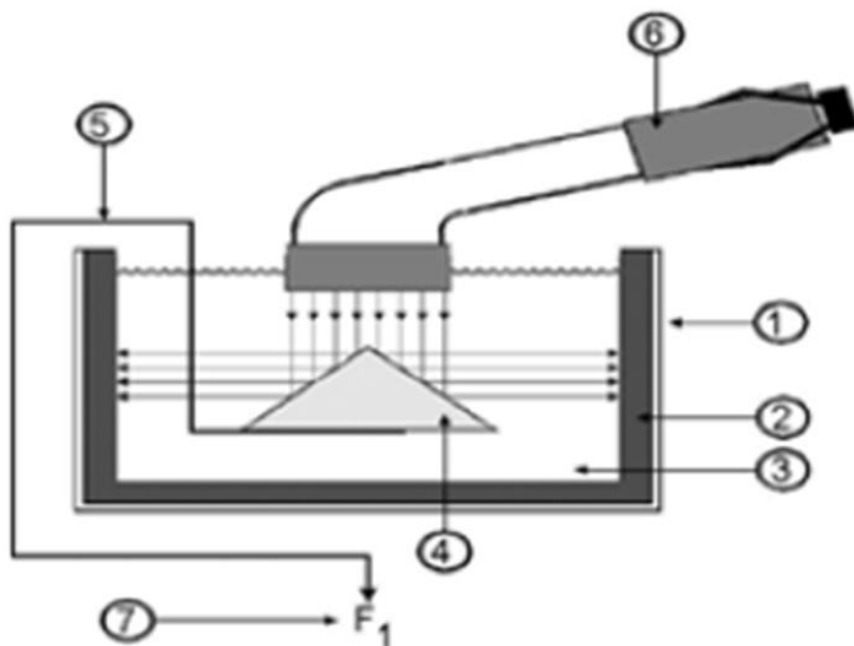
- průměr měniče 1 – 10 cm
- tloušťka měniče dle požadované frekvence a aplikace
- využívá se blízké pole měniče



Generování ultrazvuku

Měření výkonu ultrazvukové hlavice

- princip měření ultrazvukového výkonu pomocí ultrazvukových vah:



1. testovací rezervoár
2. absorbér ultrazvukového vlnění
3. testovací médium: odplyněná voda
4. kónický terč
5. spojení terče s váhou
6. testovaná ultrazvuková sonda
7. váha měřící sílu působící na terč

Biologické účinky ultrazvuku

Absorpce energie prostředím

- plyny – velký činitel útlumu α → velká absorpce energie
- kapaliny a pevné látky – nižší činitel útlumu α (nejmenší u kovů)
- Absorpce energie vlny v tkáni, kterou se vlna šíří vyvolává biologické účinky:
 - mechanické účinky
 - tepelné účinky
 - chemické účinky
- Tyto účinky mohou být v závislosti na délce aplikace a zejména aplikovaném výkonu:
 - biopozitivní – do výkonu $1,5 \text{ W/cm}^2$
 - reversibilní – do výkonu 3 W/cm^2
 - destruktivní (nereversibilní) – výkony nad 3 W/cm^2

Biologické účinky ultrazvuku

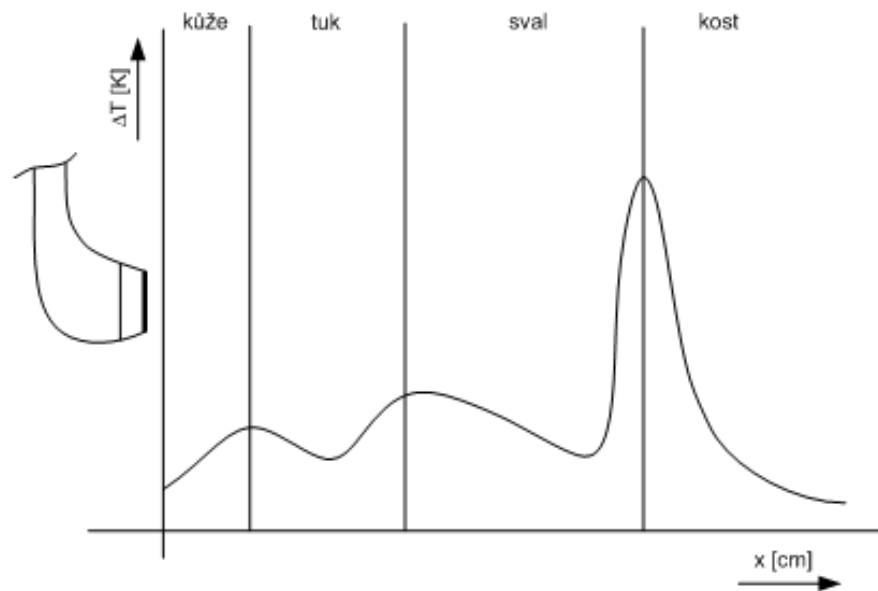
Mechanické účinky

- jevy vyvolané mechanickým kmitáním částic prostředí
- **Kavitace** - průchodem ultrazvukové vlny dochází ke zhušťování a zředování částic
 - ultrazvuk o vysoké intenzitě vyvolává velké změny tlaku
 - v kapalinách dochází ke vzniku kavitační bubliny jako důsledek lokálního poklesu tlaku a narušení spojitosti kapaliny (tahové síly v kapalině > hydrostatické)
- Během kolísání tlaku dochází k postupné tvorbě, růstu a zániku kavitačních bublin.
- Zánik kavitační bubliny je spojen s velkým lokálním nárůstem tlaku a teploty – změny na úrovni molekul či zánik buněk.

Biologické účinky ultrazvuku

Tepelné účinky

- Tepelné účinky ultrazvuku jsou důsledkem absorpce energie vlny, která se mění na teplo během kmitání a tření částic prostředí.
- rozhraní tkání s odlišnou Z_a → velká absorpce energie a uvolnění tepla (nejvíce na rozhraní měkká tkáň-kost)



Biologické účinky ultrazvuku

Chemické účinky

- urychlování chemických reakcí vlivem excitace molekul (příprava jemných suspenzí, emulzí apod.)
- zvyšování difuze v tkáních vlivem zvýšené propustnosti permeabilní membrány (často v kombinaci s tepelnými účinky) – prokrvení tkání a urychlená látková výměna
- alkalóza tkáně (zvýšení pH) při nižších intenzitách ultrazvuku, acidóza (pokles pH) při vysokých intenzitách
- v souvislosti s tepelnými účinky lokální ohřev a prokrvení tkání, zvýšení metabolismu tkání

Biologické účinky ultrazvuku

Výhody a nevýhody použití ultrazvuku v medicíně

■ **Výhody:**

- relativně nízká pořizovací cena přístroje
- minimální náklady na vyšetření či aplikaci
- při dodržení limitů aplikovaného výkonu nejsou známy žádné zdravotní škodlivé následky
- nedochází k ozařování těla škodlivým zářením (RTG, CT)

■ **Nevýhody:**

- kvalita ultrazvukové diagnostiky závisí na zkušenostech lékaře
- není vhodné pro vyšetřování plic a mozku

Aplikace ultrazvuku v medicíně

Diagnostický vs. terapeutický ultrazvuk

- srovnání vybraných parametrů ultrazvuku pro aplikace v medicíně:

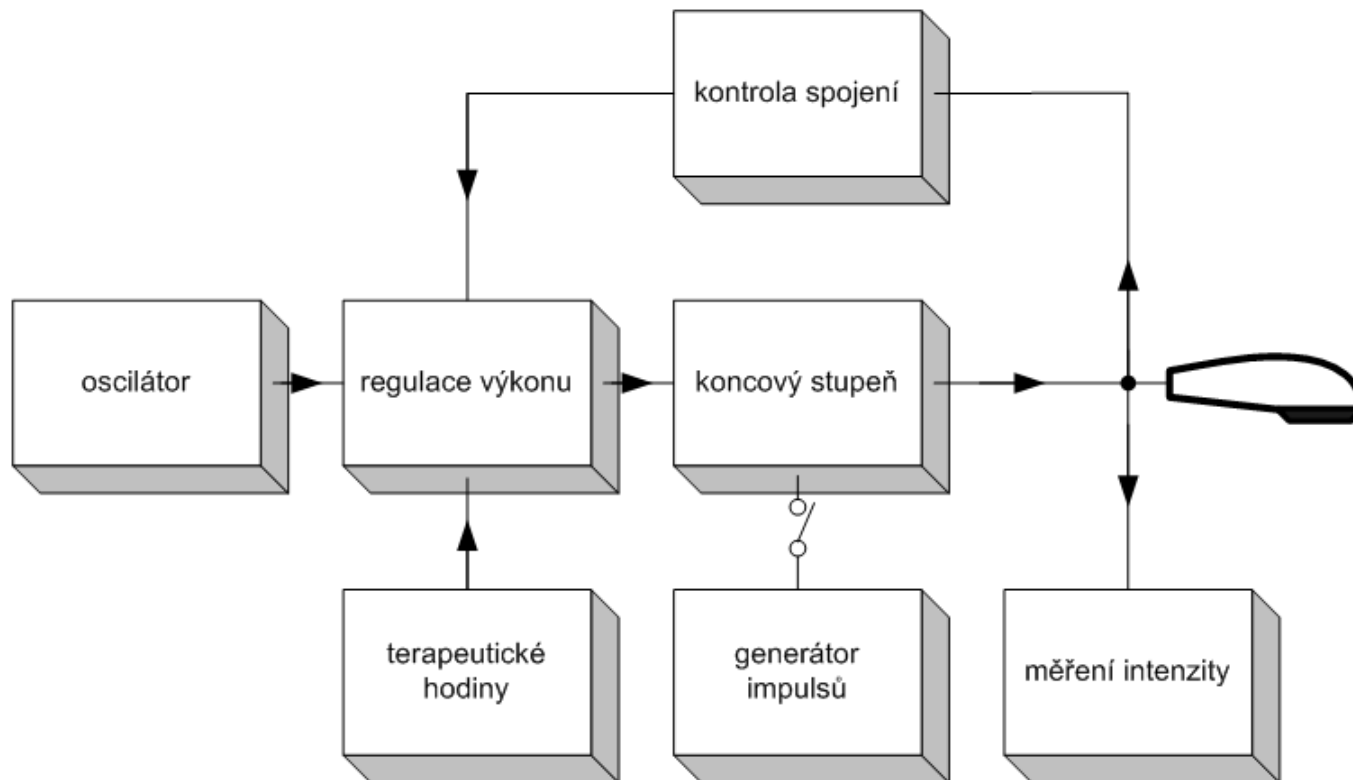
	Diagnostický ultrazvuk	Terapeutický ultrazvuk
Frekvence vln	1 – 30 MHz	500 kHz – 3 MHz
Aplikované výkony	max. 0,1 W/cm ²	max. 3 W/cm ²
Délka působení	max. 10 minut*	max. 15 minut*
Hlavice (aplikátor)	pole měničů	měníč s velkým průměrem

*dle doporučení Světové zdravotnické organizace (WHO)

Aplikace ultrazvuku v medicíně

Terapeutický ultrazvukový přístroj

- blokové schéma obecného terapeutického přístroje:



Aplikace ultrazvuku v medicíně

Ultrazvukové čištění

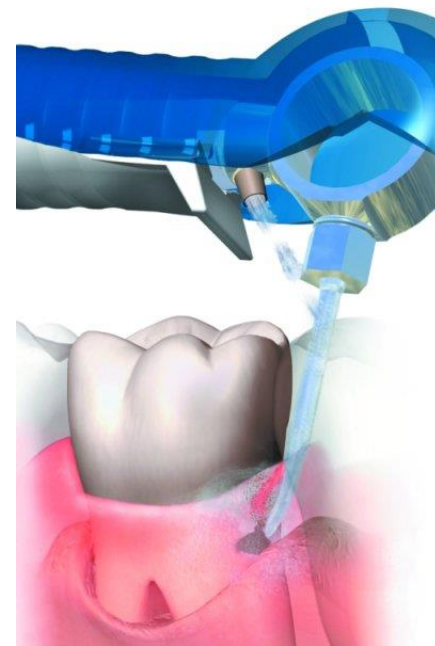
- využití mechanických kmitů a kavitace (vodní lázeň)
- frekvence vlnění 20 – 200 kHz dle velikosti nečistot
- intenzita ultrazvuku vyšší než $0,5 \text{ W/cm}^2$



Aplikace ultrazvuku v medicíně

Odstraňování zubního kamene

- využití mechanických kmitů a kavitace
- frekvence vlnění 20 – 40 kHz
- intenzita ultrazvuku přibližně 10 – 20 W/cm²



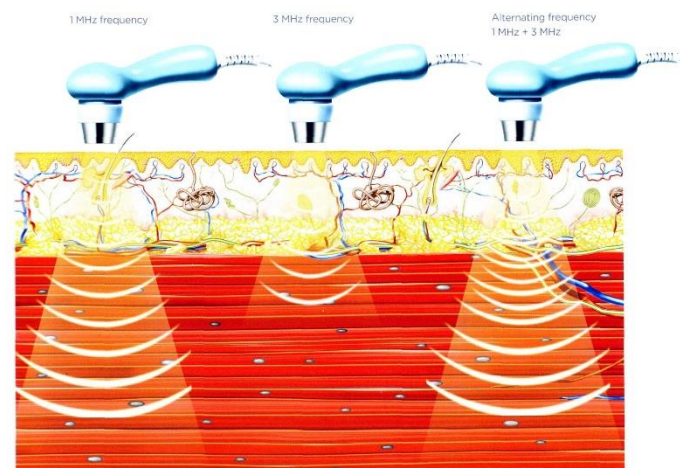
Aplikace ultrazvuku v medicíně

Rehabilitace a další obory

- Tepelných a fyzikálně chemických účinků se široce využívá v rehabilitačním lékařství a ortopedii.
- zvýšený metabolismus tkání, lokální prokrvení, snížení přenosu nervových vzruchů (přerušeni vodivosti nervových vláken) – analgetické účinky

- příklady indikací:

- revmatoidní artritida
- záněty svalů a kloubů
- nervová onemocnění

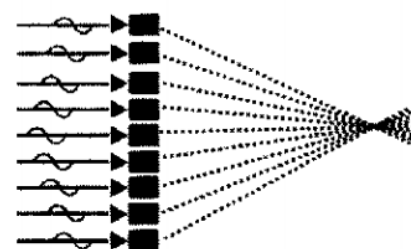
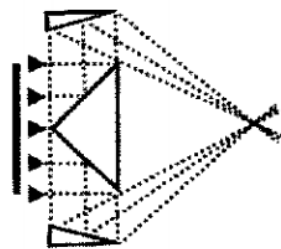
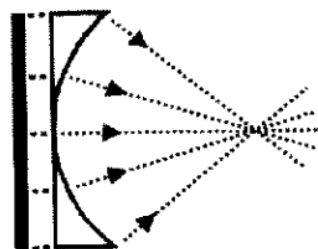
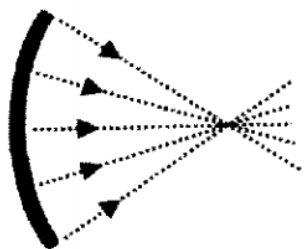


- zhmožděniny, poranění měkkých tkání
- odbourávání tukové tkáně kavitací

Aplikace ultrazvuku v medicíně

Ultrazuková hypertermie a HIFU

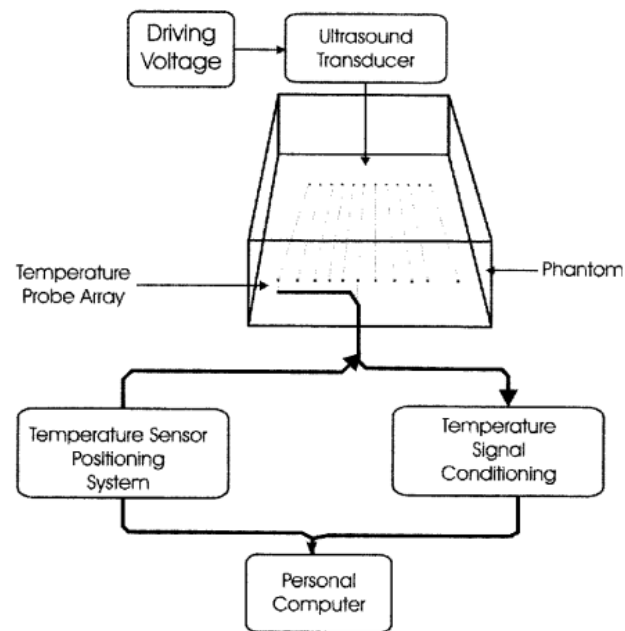
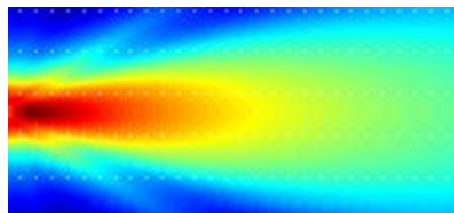
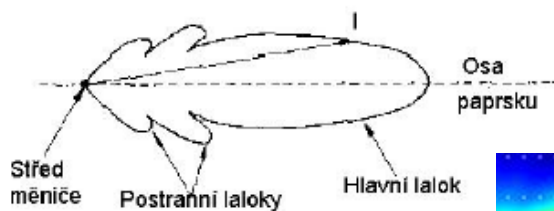
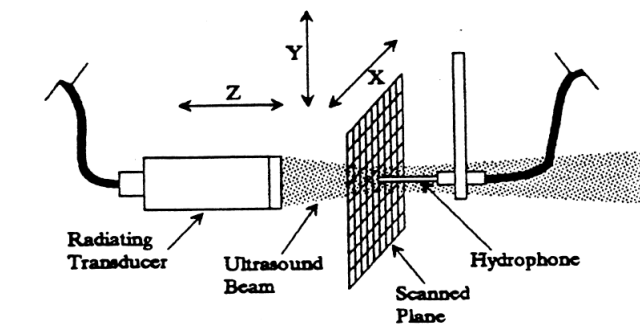
- využití tepelných účinků ultrazvuku pro léčbu nádorů
- aplikace výkonového ultrazvuku o frekvenci 2 – 3 MHz
- ohřev nádorové tkáně na teplotu 41– 45 °C → fokusace většího počtu měničů do postižené tkáně
- aplikace v řádu i desítek minut



Aplikace ultrazvuku v medicíně

Ultrazvuková hypertermie a HIFU

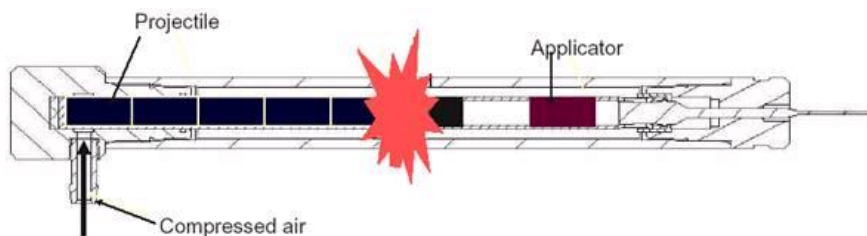
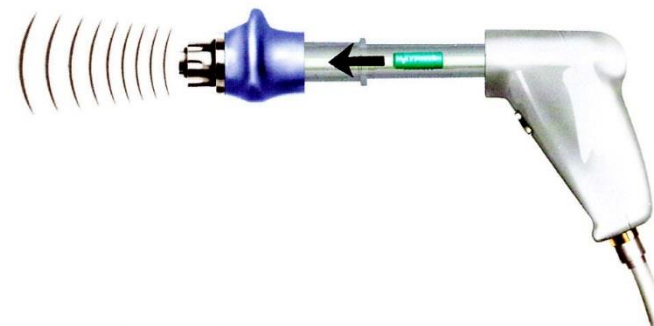
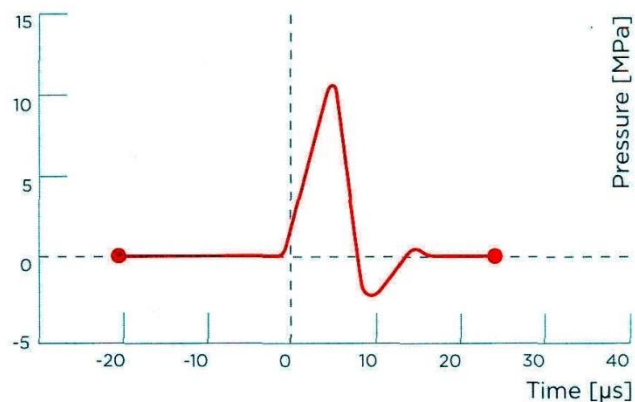
- pro minimalizaci působení energie na okolní zdravou tkáň je nutné znát pole vyzařování měniče a míru ohřevu tkáně
- měření vyzařovaného pole skenovací metodou v lázni a fantomech



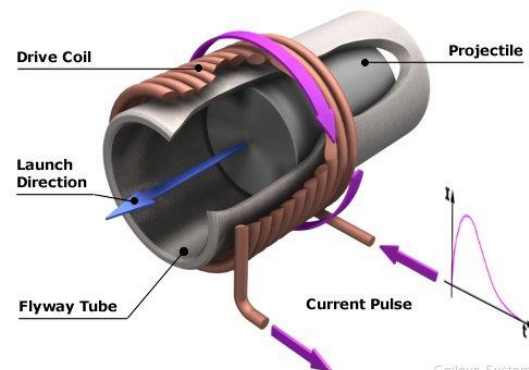
Aplikace ultrazvuku v medicíně

Rázová vlna - SWT

- **rázová vlna** – silný tlakový impuls o hodnotě 10 až 100 MPa
- využití v urologii, ortopedii, fyzioterapii



Simple Reluctance Launcher



Callgun Systems
©2004

Aplikace ultrazvuku v medicíně

Rázová vlna a ESWL

- **Extracorporal Shock Wave Lithotripsy** – drcení konkrementů rázovou vlnou



- **Indikace pro SWT**

- patní ostruhy
- achillodynie – záněty Achillovy paty
- záněty a kalcifikace úponu šlach ramenního kloubu
- paklouby
- spoušťové body bolesti - bolestivé body ve svalech, apod.



Literatura

- literatura ke studiu:

[1] Navrátil, L., Rosina, J. a kol.: *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada Publishing, 2005.

[2] Rozman, J. a kol.: *Elektronické přístroje v lékařství*. Praha: Academia, 2006.

- další zdroje informací:

[3] Arnau, A. et al.: *Piezoelectric Transducers and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

[4] Škvor, Z.: *Elektroakustika a akustika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2012.