

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky



Bakalářská práce

Zvuk a ultrazvuk ve středoškolské fyzice

(Sound and ultrasound in secondary school physics)

Vedoucí práce: doc. RNDr. Roman Kubínek CSc.
Vypracoval: Vít Habáň
Obor: Fyzika-Matematika (učitelství)
Forma studia: prezenční

Olomouc 2014

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Vít Habáň
Název práce:	Zvuk a ultrazvuk ve středoškolské fyzice
Typ práce:	bakalářská
Pracoviště:	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Roman Kubínek CSc.
Rok obhajoby práce:	2014
Počet stran:	48
Jazyk:	český
Abstrakt:	Tato bakalářská práce se zabývá popisem mechanického vlnění speciálně zvukem a ultrazvukem. Částí práce je také kapitola o využití ultrazvuku v technice a přírodě.
Klíčová slova:	mechanické vlnění, zvukové vlnění, ultrazvuk, využití ultrazvuku

Bibliographical identification

Author's first name and surname:	Vít Habáň
Title:	Sound and ultrasound in secondary school physics
Typ of thesis:	bachelor
Department:	Department of experimental Physics
Supervisor:	doc. RNDr. Roman Kubínek CSc.
Year of presentation:	2014
Number of pages:	48
Language:	czech
Abstract:	This bachelor work is about mechanical wave, especially about sound and ultrasound. Another part of work is about using ultrasound in many technical fields and in nature.
Key words:	mechanical wave, sound wave, ultrasound, using of ultrasound

Tímto prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc. a uvedl v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další zdroje.

V Olomouci dne:

Poděkování

Poděkování bych chtěl věnovat doc. RNDr. Romanovi Kubínkovi, CSc. za trpělivost a za poskytnutí cenných rad, informací a podnětů, které byly k dokončení mé práce nezbytné. Také bych chtěl poděkovat panu Zdeňkovi Weinlichovi za pomoc při výrobě fantomů.

Obsah

Úvod.....	8
1. Popis mechanického vlnění	8
1.1 Rovnice harmonické postupné vlny.....	9
1.2 Huygensův princip.....	10
1.3 Zákon odrazu	12
1.4 Zákon lomu	12
1.5 Ohyb vlnění, difrakce	14
1.6 Interference vlnění	15
1.7 Odraz vlnění. Stojaté vlnění.....	17
1.7.1 Odraz vlnění.....	17
1.7.2 Stojaté vlnění	18
1.8 Srovnání mechanického a elektromagnetického vlnění.....	19
2. Zvukové vlnění	21
2.1 Zdroje zvuku	21
2.2 Rychlost zvuku	22
2.3 Vlastnosti zvuku	24
2.3.1 Hlasitost a intenzita zvuku.....	24
2.3.2 Výška zvuku	25
2.3.3 Barva zvuku	26
2.4 Dopplerův jev	26
2.5 Akustická impedance prostředí.....	28
3. Ultrazvuk	28
3.1 Zdroje ultrazvuku.....	28
3.2 Využití ultrazvuku v přírodě.....	31

3.2.1 Echolokace.....	31
3.3 Využití ultrazvuku v technické praxi.....	34
3.3.2 Ultrazvuková defektoskopie	34
3.3.3 Ultrazvukové čištění	36
3.3.4 Svařování ultrazvukem	37
3.3.5 Ultrazvuk v lékařství (sonografie)	38
3.3.6 Sonar	40
4. Experimentální část.....	41
Závěr	46
Použitá literatura	47

Úvod

Zvukové vlnění je nedílnou součástí našeho života a bez akustických vln si vůbec nedovedeme představit naši existenci. Jsme jím obklopeni a dokážeme ho také v určitých frekvencích vnímat, a proto jeho studium je důležité pro pochopení tohoto pro člověka velmi důležitého fyzikálního děje. Dalším také velice důležitým vlněním jsou vlny elektromagnetické, které mají jiný fyzikální původ než vlnění mechanické. Bude o nich menší zmínka, když je budu v jedné kapitole porovnávat s mechanickým vlněním.

Věda zabývající se studiem vzniku zvukového vlnění, jeho šířením a také jeho následným vnímáním se nazývá akustika. K účelu vnímání zvuku jsme byli vybaveni smyslovým orgánem – uchem. K pochopení toho jak zvukové vlnění vzniká a jak se šíří, se musíme podívat na mechanické vlnění. Proto první kapitolou této práce bude základní popis mechanického vlnění. Hlavní část se věnuje ultrazvukovému vlnění (vzniku, využití v přírodě i v technické praxi).

Cílem této práce je sepsat příručku zabývající se zvukem a ultrazvukem se zaměřením na ultrazvuk (zdroje, využití v praxi atd.) pro rozšiřující seminář fyziky na úrovni středoškolské fyziky a matematiky. Součástí této práce je i pár ilustračních příkladů na téma ultrazvuk.

1. Popis mechanického vlnění

Mechanické vlnění vzniká ve všech látkových prostředích díky tomu, že věci kolem nás ať už pevné látky, plyny nebo kapaliny jsou složeny z obrovského počtu molekul, které jsou v neustálém pohybu a také díky existenci vazebných sil mezi těmito jednotlivými částicemi (atomy, molekulami). Proto když uvedeme do kmitavého pohybu jednu molekulu, uvedou se vzájemnou vazbou a nárazy do kmitavého pohybu sousední molekuly. Současně se také na tuto molekulu přenesou energie a hybnost kmitavého pohybu. Ale samotné částice zůstávají na místě.

1.1 Rovnice harmonické postupné vlny

Počáteční bod kmitá harmonicky s frekvencí ω a amplitudou y_m , pak pro okamžitou výchylku v čase t platí

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1.1)$$

kde φ_0 je počáteční fáze, y_m je amplituda a ω je úhlová frekvence, která s frekvencí f a periodou T souvisí těmito vztahy

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (1.2)$$

kde $f = 1/T$. Než vlnění dospěje do bodu M, který je ve vzdálenosti x uběhne doba $\tau = x/c$. O tuto dobu je kmitání bodu M zpožděno oproti kmitání zdroje. A proto platí vztah:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= y_m \sin[\omega(t - \tau) + \varphi_0] = \\ &= y_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right]. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Vztah (1.3) ještě můžeme upravit dosazením $\omega = 2\pi/T$ a $c = \lambda/T$ a dostaneme vztah

$$y(x, t) = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right], \quad (1.4)$$

který nazveme **rovnice harmonické postupné vlny**. Argument harmonické funkce

$$\Phi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (1.5)$$

nazveme **fáze vlnění**, která je důležitým parametrem popisujícím harmonickou vlnu.

Zavedeme-li vlnový vektor \vec{k} definicí

$$\vec{k} = \frac{\omega}{c} \vec{n}^0 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}^0, \quad (1.6)$$

kde \vec{n}^0 je jednotkový vektor ve směru šíření vlny. Vlnový vektor nám sděluje informaci o směru šíření vlny. Jeho význam se projeví, pokud se vlna bude šířit v rovině nebo prostoru. V případě, když se vlna šíří pouze ve směru osy x má vlnový vektor pouze jednu složku a to $\pm k_x$, její znaménko nám potom říká, jestli se vlna šíří ve směru nebo proti směru osy x . Pomocí vlnového vektoru můžeme rovnici (1.3) přepsat do tvaru:

$$y(x, t) = y_m \sin(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (1.7)$$

kde $k = \omega/c$ nebo $k = 2\pi/\lambda$ nazýváme úhlový vlnčet. Fáze této harmonické vlny je potom rovna $\Phi = \omega t - kx$.

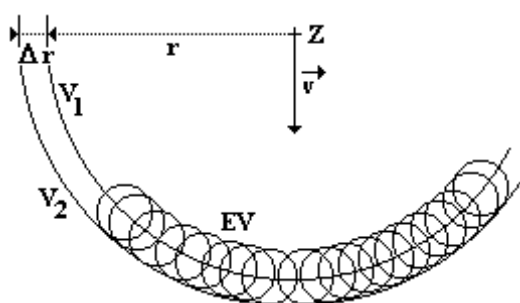
1.2 Huygensův princip

Vlnoplocha

Vlnoplocha je plocha v prostoru, která spojuje všechny body kmitající se stejnou fází. Vlnoplochy povrchových vln jsou křivky. Směr šíření vlny v daném bodě určuje **paprsek**, což je normála k vlnoploše. Vlnoplochy a paprsky mívají často různé tvary. Vlnoplochy v rovině jsou často kruhové, v prostoru hovoříme o kulových. Paprsky potom tvoří rozbíhavý svazek vycházející z jediného bodu. V dostatečné vzdálenosti od zdroje můžeme vlnu brát jako rovinnou. Paprsky takové vlny jsou potom rovnoběžné.

Huygensův princip

Jako první se pokusil vysvětlit mechanismus šíření vln v prostoru Holanďan Christian Huygens. V roce 1678 popsal princip, který publikoval až v roce 1690. Předpokládal, že prostředí, ve kterém se vlna šíří, je složeno z částic. Tyto částice se rozkmitají, když k nim dorazí vlna v_1 a stanou se zdroji elementárního sekundárního vlnění EV . Vlnoplocha v_2 je potom vnější obálka všech elementárních vlnoploch.



Obr. 1. K výkladu Huygensova principu.¹

Nová vlnoplocha v_2 vznikne jako vnější obálka elementárních vlnoploch. Tyto elementární vlnoplochy vzniknou po rozechvění všech částic ležících na vlnoploše v_1

¹ Obr. 45. In: fyzika.jreichl [online]. Licence CC. [cit. 4.5.2014]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/170-vlneni-v-izotropnim-prostredi>

Huygens – Fresnelův princip

Huygensův princip nám umožňuje elementárně vysvětlit zákon odrazu, zákon lomu a také kvalitativně popsat ohyb (difrakci) vlnění. Abychom mohli přesněji popsat ohyb vlnění, musíme rozšířit původní Huygensův princip. Zpřesnění provedl Augustin – Jean Fresnel. Podle něj byl později nazván Huygens – Fresnelův princip. Fresnel dodal, že výsledný stav vlnění je určen superpozicí všech elementárních vlnění.

Historická poznámka

Christian Huygens (1629-1695) byl holandský matematik, fyzik a astronom. Proslavil se konstrukcí nového typu dalekohledu, se kterým potom objevil Saturnův měsíc Titán. Vysvětlil povahu prstence kolem planety Saturn. V roce 1656 si nechal patentovat kyvadlové hodiny, které zlepšili v té době měření času. V matematice pracoval na pravděpodobnostním počtu. Známým se také stal díky svým objevům ve fyzice, hlavně v optice, kde se zabýval zkoumáním vlastností světla (vlnová teorie světla), zavedl do fyziky opět pojem ethér, který se později sice ukázal jako chybný, ale na mnoho let ovlivnil fyzikální uvažování.

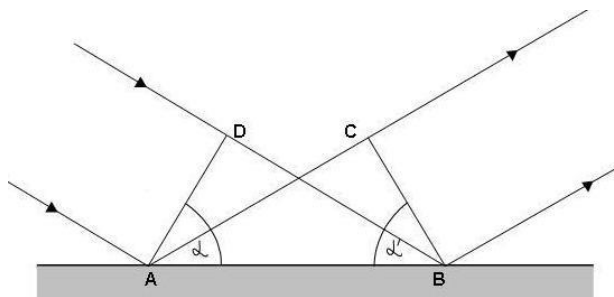


Obr. 2. Christian Huygens.²

² Christiaan Huygens-painting. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 1.5.2014]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens-painting.jpeg

1.3 Zákon odrazu

Pomocí Huygensova principu odvodíme známý zákon odrazu, který říká, že úhel odrazu α' , který s překážkou svírá odražená vlnoplocha se rovná úhlu dopadu α , který s překážkou svírá dopadající vlnoplocha.



Obr. 3. Odvození zákona odrazu

Předpokládejme, že k rozhraní se blíží vlnoplocha AD (obr. 3.). Jako první dospěje k rozhraní bod A , který se stává elementárním zdrojem rozruchu. Než se bod D dostane k rozhraní, rozšíří se z bodu A vlna o poloměru $|AC|$. Odražená vlnoplocha se vytvoří jako obálka BC odražené sekundární vlny. Ze shodnosti trojúhelníků $\triangle ABC$ a $\triangle ABD$ ($|AC| = |BD|$, společná strana AB a dva úhly jsou pravé) plyne, že úhly α a α' jsou shodné a můžeme proto psát zákon odrazu ve tvaru:

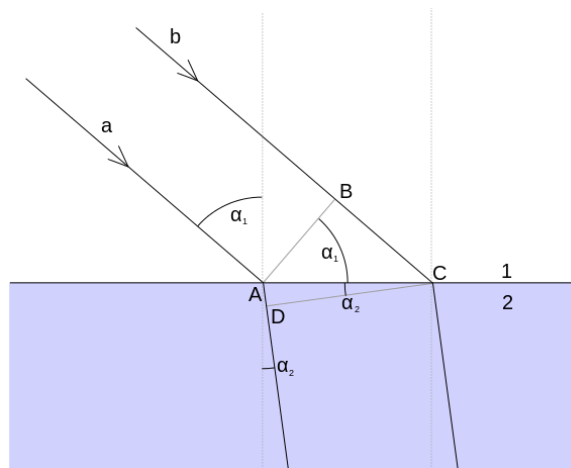
$$\alpha = \alpha'. \quad (1.8)$$

Zákon odrazu tedy zní:

Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu dopadu. Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu určené dopadajícím paprskem a normálou rozhraní.

1.4 Zákon lomu

Když vlnění dospěje na rozhraní dvou prostředí, zároveň se odrazí a také pronikne do druhého prostředí. Při průchodu rozhraním se vlnění láme, tento jev proto nazýváme lom vlnění. Důvod lomu je změna rychlosti šíření vlny. Rozlišujeme lom ke kolmici a lom od kolmice. Lom ke kolmici nastane, když vlna projde do prostředí, kde je rychlost šíření menší a naopak pokud je rychlost šíření vyšší, nastane lom od kolmice. Podobně jako u zákona odrazu využijeme k odvození zákona lomu Huygensův princip.



Obr. 4. Odvození zákona lomu³.

Předpokládejme, že se k rozhraní blíží vlnoplocha AB (obr. 4.). Vlnoplocha AB se šíří v prvním prostředí rychlostí v_1 potom dopadá na rozhraní AC a láme se do druhého prostředí. V druhém prostředí se šíří rychlostí v_2 , která se liší od rychlosti v_1 . Jako první dospěje k rozhraní bod A , který se stává elementárním zdrojem rozruchu. Než vlnoplocha dospěje z bodu B k rozhraní, rozšíří se z bodu A elementární vlnoplocha o poloměru $|AD| = v_2\tau$. Lomená vlnoplocha se vytvoří jako obálka CD lomené sekundární vlny. Z obr. 4. plyne

$$\frac{|BC|}{|AD|} = \frac{v_1\tau}{v_2\tau} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1.9)$$

Protože platí $|BC| = |AC|\sin\alpha_1$ a $|AD| = |AC|\sin\alpha_2$, můžeme psát

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (1.10)$$

kde α_1 je úhel dopadu a α_2 je úhel lomu. Platí tedy **zákon lomu vlnění**:

Poměr sinů úhlu dopadu a úhlu lomu se rovná poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Lomený paprsek zůstává po lomu v rovině dopadu určené dopadajícím paprskem a normálou rozhraní.

Při lomu od kolmice pro úhly větší než **mezní úhel** α_M nedochází k lomu, ale všechno vlnění se odráží zpět. Nastává tedy úplný odraz (totální reflexe). Vztah pro

³ Lom vlnoplocha rovinna. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 1.5.2014]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lom_vlnoplocha_rovinna.svg

mezní úhel odvodíme ze vztahu (1.10), kdy úhel dopadu se rovná meznímu úhlu a paprsek se potom láme do rozhraní, tj. $\beta = 90^\circ$. Platí

$$\frac{\sin\alpha_M}{1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.11)$$

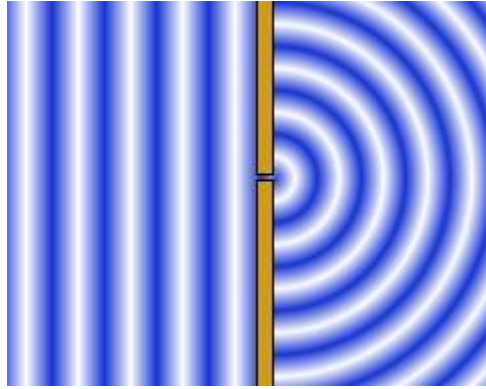
Větší význam než lom u mechanického vlnění má lom světla, který popisuje Snellův zákon. Zákon lomu se nazývá podle svého autora Willebrorda Snella. Snell jej nikdy nepublikoval a až po jeho smrti se vědecká veřejnost z prací Christiana Huygense dozvěděla, že to byl právě Snell, kdo tento zákon objevil.

Historická poznámka

Willebrord van Royen Snell (1580 – 1626) byl holandský matematik a astronom. V roce 1617 navrhl metodu měření obvodu Země. Je také považován za zakladatele geodézie. Vylepšil metodu výpočtu přibližné hodnoty čísla π pomocí polygonů. V roce 1621 objevil zákon lomu známý jako Snellův zákon.

1.5 Ohyb vlnění, difrakce

Ohyb vlnění je jev, při kterém se vlnění dostává i za překážku tedy do oblasti geometrického stínu. Ohyb vlnění je složitý jev, jehož podstatu objasníme pomocí Huygensova principu. Pokud se vlnoplocha dostane k překážce, stává se každý bod vlnoplochy zdrojem elementárního rozruchu, šířící se všemi směry a tedy také za překážku. Za překážkou dochází k interferenci a to vede k zvětšení nebo zmenšení amplitudy výsledného vlnění. Ohyb závisí na vlnové délce vlnění a také na rozměrech překážky. Vezměme si třeba zvukové vlnění o vlnové délce řádově 10^{-1} m a světelné vlnění o vlnové délce řádově 10^{-7} m. Díky výraznému ohybu zvukového vlnění mnohem dříve slyšíme tramvaj, než ji spatříme. Naproti tomu světlo se na běžných překážkách ohýbá zanedbatelně a vzniká tedy za nimi stín. Tedy čím menší vlnová délka tím menší vliv ohybu na překážce nebo šterbině.



Obr. 5. Ohyb vlnění na bodové štěrbině⁴.

1.6 Interference vlnění

Pokud se v nějakém bodě setkají dvě nebo více vlnění, můžeme v místech, kde se vlny překrývají pozorovat, že jednotlivé vlny mají různou velikost amplitudy. Tento jev je výsledkem interference vlnění (skládání vlnění). Pro interferenci vlnění se uplatňuje princip superpozice, který nám říká, že výsledná výchylka je dána součtem jednotlivých výchylek. Pro jednoduchost uvažujeme dvě stejná vlnění ze dvou různých zdrojů, která kmitají se stejnou počáteční fází. Tedy obě vlnění mají stejnou vlnovou délku λ a stejnou amplitudu y_m , šířící se stejnou rychlostí řadou bodů. Obě vlnění tedy popíšeme rovnicemi

$$y_1 = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) \text{ a } y_2 = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right) \quad (1.12)$$

Po jejich součtu dostaneme

$$\begin{aligned} y &= y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) + y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right) = \\ &= 2y_m \cos\left(\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}\right) \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{(x_1 + x_2)}{2\lambda}\right). \end{aligned} \quad (1.13)$$

U poslední rovnosti využijeme vzorce pro součet goniometrických funkcí

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right). \quad (1.14)$$

Výsledek rovnice (1.13) je opět rovnice vlnění s amplitudou $A = 2y_m \cos\left(\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}\right)$. Vidíme, že tato amplituda není závislá na čase, ale závisí na výrazu $x_2 - x_1$, tedy na vzdálenosti od obou zdrojů vlnění. Tento výraz se nazývá

⁴ Difrakce sterbina bodova In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 1.5.2014]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Difrakce_sterbina_bodova.png

dráhový rozdíl d . Budeme uvažovat dva případy. První když amplituda A bude maximální tedy $A = 2y_m$ a druhý případ, když amplituda bude minimální tedy $A = 0$.

První případ nastane, když

$$\cos\left(\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}\right) = \pm 1$$

$$\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda} = k\pi, k \in \mathbb{Z}$$

a tedy pro dráhový rozdíl bude platit

$$d = x_2 - x_1 = k\lambda. \quad (1.15)$$

Nastává interferenční maximum, protože interferující vlnění se setkávají se stejnou fází. Výsledná amplituda se potom rovná součtu amplitud složek $y_m = y_{m1} + y_{m2}$. Hovoříme také o konstruktivní interferenci.

Druhý případ nastane, když

$$\cos\left(\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}\right) = 0$$

$$\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda} = \frac{\pi}{2} + k\pi, k \in \mathbb{Z}$$

a tedy pro dráhový rozdíl bude platit

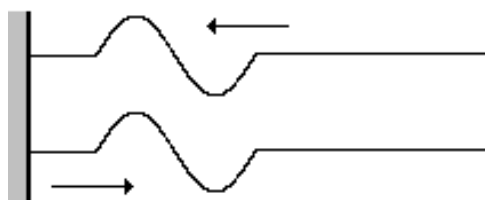
$$d = x_2 - x_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (1.16)$$

Nastává interferenční minimum, protože interferující vlnění se setkávají s opačnou fází. Výsledná amplituda se potom rovná absolutní hodnotě rozdílu amplitud složek. Pokud jsou amplitudy stejné, vlnění se navzájem ruší $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$. Hovoříme také o destruktivní interferenci.

1.7 Odraz vlnění. Stojaté vlnění

1.7.1 Odraz vlnění

Pokud necháme vlnění šířit se proti překážce, dochází k ději zvaný odraz vlnění.



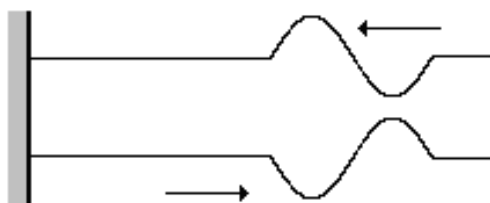
Obr. 6. Odraz vlnění na pevné překážce.⁵

Na pevném konci se vlnění odráží s opačnou fází. Tedy dospěl-li k překážce nejprve vrch, po odrazu je situace opačná. Nejprve postupuje důl (obr. 6.). Pokud popíšeme původní vlnění rovnicí $y = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$. Odražené vlnění má rovnici

$$y = y_m \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) + \pi \right], \quad (1.17)$$

kde znaménko + v argumentu goniometrické funkce znamená, že odražené vlnění postupuje opačným směrem.

Jestliže dochází k odrazu vlnění na volném konci, tak jako na obr. 7, ke změně fáze odražené vlny nedojde. Fáze odražené vlny zůstane stejná



Obr. 7. Odraz vlnění na volném konci.⁶

Pro odražené vlnění můžeme psát

⁵ Obr. 35. In: fyzika.jreichl [online]. Licence CC [cit. 4.5.2014]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni>

⁶ Obr. 36. In: fyzika.jreichl [online]. Licence CC [cit. 4.5.2014]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni>

$$y = y_m \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right]. \quad (1.18)$$

Ozvěna je způsobena odrazem zvuku od nějaké rozlehlé překážky. Odraz u vln na moři se nazývá příboj a u elektromagnetických zapříčiňuje nežádoucí jev na obrazovkách televizorů tzv. duchy.

1.7.2 Stojaté vlnění

Setkají-li se přímé a odražené vlnění dochází k interferenci. Rozlišíme dva případy nejprve odraz na pevném konci a potom odraz na volném konci.

Pokud se vlna odráží na pevném konci, obě vlny popíšeme rovnicemi $y_1 = y_m \sin(\omega t - kx)$ a $y_2 = -y_m \sin(\omega t + kx)$. Ty spolu interferují a jejich složením dostaneme

$$y = y_1 + y_2 = 2y_m \sin(kx) \cos(\omega t). \quad (1.19)$$

Složením tedy vzniká zvláštní druh vlnění, nazývaný **stojaté vlnění**. Amplituda nezávisí na čase, a tedy vlnění se nepohybuje. Závísí jen na poloze. Nastávají tedy dva zvláštní případy v místech, která splňují podmínku

$$\sin(kx) = \pm 1$$

$$kx = \frac{\pi}{2} + l\pi, l \in \mathbb{Z},$$

kmitají body s největší možnou amplitudou $y_{max} = 2y_m$. Nazýváme je kmitny. A body, které splňují podmínku

$$\sin(kx) = 0$$

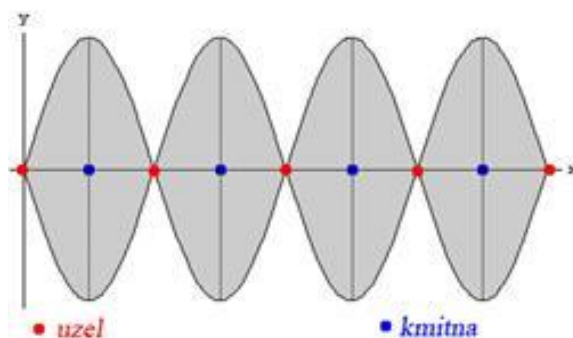
$$kx = l\pi, l \in \mathbb{Z},$$

nazýváme uzly. Tyto vůbec nekmitají, protože $y_{max} = 0$.

Pokud se vlna odráží na volném konci, obě vlny popíšeme rovnicemi $y_1 = y_m \sin(\omega t - kx)$ a $y_2 = y_m \sin(\omega t + kx)$. Ty spolu opět interferují a jejich složením dostaneme

$$y = y_1 + y_2 = 2y_m \cos(kx) \sin(\omega t). \quad (1.20)$$

Opět vidíme, že je to stojaté vlnění, ale je oproti stojatému vlnění na pevném konci posunuto o $\pi/2$. Můžeme vidět, že tam, kde mělo stojaté vlnění na pevném konci kmitny, tam má stojaté vlnění na volném konci uzly a naopak.

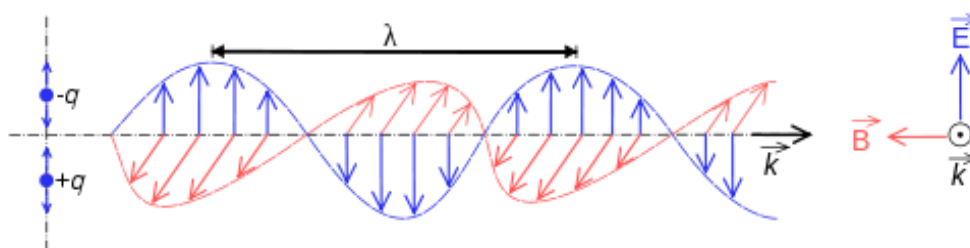


Obr. 8. Stojaté vlnění.⁷

U strunných hudebních nástrojů a dechových nástrojů se můžeme potkat se stojatým vlněním. Strunné nástroje využívají stojaté vlnění strun a dechové nástroje využívají chvění vzduchového sloupce (podélné chvění).

1.8 Srovnání mechanického a elektromagnetického vlnění

V této části srovnáme mechanické a elektromagnetické vlnění. Najdeme jejich společné rysy a specifické rysy pro každé vlnění zvlášť. Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné, které je charakterizované dvěma složkami, vektorem elektrické intenzity \mathbf{E} a vektorem magnetické indukce \mathbf{B} , které jsou navzájem neoddělitelné a kmitají kolmo ke směru šíření.



Obr. 9. Elektromagnetická vlna⁸.

⁷Obr. 38. In: fyzika.jreichl [online]. Licence CC [cit. 4.5.2014]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni>

⁸ Onde electromagnetique. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 4.5.2014]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.svg

Při kmitání mechanického pružinového oscilátoru dochází k přeměně potenciální energie pružnosti na kinetickou energii a naopak. Perioda kmitání je závislá na vlastnostech oscilátoru vztahem

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1.21)$$

kde m je hmotnost závaží, k je tuhost pružiny.

U elektromagnetického oscilátoru dochází k přeměně energie elektrického pole na energii magnetického pole a naopak. Perioda kmitání je také závislá na parametrech oscilátoru vztahem

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (1.22)$$

kde L je indukčnost cívky v oscilačním obvodu a C je kapacita kondenzátoru v oscilačním obvodu. Tento vztah se nazývá **Thomsonův vztah**. Z uvedeného můžeme vidět jistou paralelu mezi mechanickým a elektromagnetickým vlněním. Vidíme, že u obou uvedených vztahů perioda závisí pouze na parametrech oscilátorů a ne na počátečních podmínkách.

Zákon odrazu má stejné znění jak pro mechanické vlnění, tak pro elektromagnetické vlnění. I ohyb elektromagnetického vlnění se řídí stejnými pravidly jako mechanické vlnění. Pokud jsou rozměry překážky srovnatelné s vlnovou délkou λ nebo menší, nastává ohyb vlnění. Pokud rozměry překážky jsou větší než vlnová délka λ vlnění se odráží, případně se pohltí a za překážkou vzniká stín.

Elektromagnetické vlnění na rozdíl od vlnění zvukového není vázáno na látkové prostředí. Elektromagnetické vlnění proto můžeme pozorovat i ve vakuu (konstanta c rychlost světla je rychlost světla ve vakuu). Ale stejně jako zvukové vlnění je rychlost elektromagnetického vlnění závislá na prostředí, ve kterém se šíří. Rychlost elektromagnetického vlnění nemůže překročit danou hodnotu c , ale rychlost zvukového vlnění, může být různá (viz rychlost zvuku v kovech nebo ve vzduchu). Rychlost elektromagnetického vlnění závisí na prostředí vztahem

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}, \quad (1.23)$$

kde ϵ_r a μ_r jsou relativní permitivita a relativní permeabilita prostředí. Důkaz tohoto vztahu vyplývá z Maxwellovy teorie elektromagnetického pole a je prostředky středoškolské matematiky nepostihnutelný.

2. Zvukové vlnění

Zvukové vlnění je podélné postupné vlnění, které se šíří v nějakém pružném látkovém prostředí, nejčastěji je jím vzduch. Zvuk vydávají pružná chvějící se tělesa. Takto vzniklá mechanická vlna se přenáší do vzduchu, kde dochází k pravidelnému smršťování a rozpínání vzduchu. Jako slyšitelný zvuk je označováno mechanické vlnění v rozsahu frekvencí 16 Hz až 16 kHz. Tento rozsah je ale individuální, ne všichni jsou schopni vnímat celé pásmo. Mechanické vlnění s frekvencemi vyššími než 16 kHz nazýváme ultrazvuk a vlnění s frekvencemi nižšími než 16 Hz nazýváme infrazvuk. Matematický popis zvukové vlnění je podobný jako pro jiné druhy vlnění

$$y = y_m \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v_z} \right) \right], \quad (1.24)$$

kde v_z je rychlost zvuku a y_m je amplituda zvukového vlnění.

2.1 Zdroje zvuku

Za zdroj zvuku považujeme každé chvějící se těleso. Při školních pokusech se nejčastěji využívá ladička (obr. 10), jejíž charakteristickou vlastností je, že průběh kmitání je harmonický s určitou frekvencí. Ramena ladičky se po úderu paličkou rozkmitají příčně, kmitání je potom zesíleno v rezonanční skříňce. Ladička, jak s názvu vyplývá, slouží k ladění hudebních nástrojů. Také při pokusech můžeme použít generátor střídavého napětí připojený k reproduktoru - tónový generátor. Tónový generátor umožňuje měnit frekvenci zvukového vlnění. Protože průběh střídavého napětí je harmonický má i zvukové vlnění harmonický průběh. Samozřejmě většina zdrojů zvuku nemá jednoduchý harmonický průběh, ale naopak velmi složitý.

Tónem nazýváme zvuk s periodickým průběhem. Jednoduchý tón je tón s harmonickým průběhem (ladička) a obsahuje jedinou frekvenci. Složené tóny jsou

periodické, ale jejich průběh není harmonický. Zvuky, které nemají periodický průběh, nazýváme **hluky** (vrzání, šustění, atd.).



Obr. 10. Ladička s rezonanční skříňkou.

2.2 Rychlost zvuku

Ze zdroje zvuku se vlnění rozšíří do okolního látkového prostředí. Rychlost zvuku není na rozdíl od rychlosti světla konstanta, ale rychlost šíření zvuku do okolí závisí na prostředí, ve kterém se zvukové vlnění šíří. Pokud umístíme zdroj zvuku do vzduchoprázdna, žádné vlnění nevznikne. Vztah pro rychlost zvuku není dost dobře možné odvodit středoškolskou matematikou, proto zde uvedu konečný vztah

$$v = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}}, \quad (1.25)$$

kde $\kappa = c_p/c_v$ je Poissonova adiabatická konstanta, R je univerzální plynová konstanta, T je absolutní teplota a M je molární hmotnost. Z uvedeného vidíme, že rychlost zvuku nezávisí na jeho frekvenci, ale prakticky jen na absolutní teplotě prostředí a jeho molární hmotnosti. Pro rychlost zvuku ve vzduchu za normálních podmínek $v \approx 330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V pevných látkách a kapalinách se zvukové vlnění šíří rychleji než v plynech.

látka	$v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	látka	$v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
vzduch	343	cihly	3600
voda (25°C)	1500	ocel	5000
beton	1700	sklo	5200

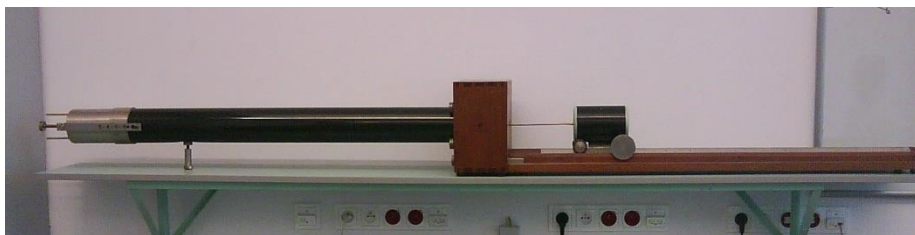
Tab. 1. Rychlosti šíření zvuku.

Pokud není uvedeno jinak v Tab. 1. jde o rychlosti při běžných teplotách (okolo 20°C).

První pokusy změřit rychlost zvuku byly značně nepřesné, až v 18. století změřila přesně rychlost zvuku Akademie věd v Paříži. První pokusy spočívali v praktickém využití vzorce $v = l/t$, kde známe vzdálenost l a změříme čas t , za který uslyšíme výstřel děla, potom co uvidíme záblesk. V laboratořích se pro experimentální měření zvuku využívá Kundtova trubice (obr. 11). V Kundtově trubici vytvoříme stojatou vlnu, kterou zvýrazníme pomocí jemného prášku. Potom pozorujeme chvějící se proužky v místech kmiten. V uzlech je prášek nehybný. Když změříme vzdálenost d kmiten, která se rovná polovině vlnové délky λ , získáme pro rychlost zvuku vzorec

$$v = \lambda f = 2fd, \quad (1.26)$$

kde f je frekvence zdroje, kterým jsme vytvořili stojaté vlnění v trubici.



Obr. 11. Kundtova trubice.

Podobně jako u mechanického vlnění, když zvukové vlnění dospěje k překážce, dojde k jeho odrazu i ohybu. Když zvukové vlnění dospěje k nějaké rozlehlé překážce (např. skalní masiv, prostorná místnost bez nábytku a všeho co zvuk rozptyluje) dochází k **ozvěně** (echo). Ozvěna vznikne, pokud se odražená vlna vrátí později než za 0,1 s. To je dáno našim sluchem, protože doba 0,1 s je potřebná k rozlišení dvou následujících zvuků. Z uvedeného vychází, že zvuk se musí odrážet na stěně vzdálené alespoň 17 m, aby vznikla ozvěna. Ozvěna je nežádoucí jev v koncertních sálech nebo divadlech, kde kazí náš sluchový vjem. Potlačujeme ji tak, že stěny a podlahy pokrýváme materiály, které dobře pohlcují zvuk (např. koberce, zvlněné závěsy). K potlačení ozvěny také přispívá přítomnost nábytku.

2.3 Vlastnosti zvuku

Mezi základní subjektivní vlastnosti zvuku patří jeho hlasitost a intenzita, výška a barva zvuku, které si podrobněji rozebereme v následujících odstavcích.

2.3.1 Hlasitost a intenzita zvuku

Šíření zvukové vlny je spojeno s přenosem energie. Zavádíme proto veličinu **akustický výkon** P , která je dána vztahem

$$\Delta P = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (1.27)$$

Tedy výkon P je přímo úměrný přenesené energii za jednotku času. Akustický výkon měříme ve wattech. Dále zavádíme veličinu akustická intenzita I , jejíž jednotkou je $W \cdot m^{-2}$. Akustická intenzita je dána vztahem

$$I = \frac{P}{S \cos \theta}, \quad (1.28)$$

kde θ je úhel o který je skloněna plocha S vůči směru šíření akustického vlnění. Pro plochu kolmou ke směru šíření zvukového zrychlení dostáváme vztah

$$I = \frac{P}{S}. \quad (1.29)$$

Nejtisší zvuk, který sluchem ještě můžeme vnímat, nazýváme práh slyšení. Jsou to zvuky o velmi malém akustickém výkonu $10^{-12} W$. Naopak zvuky o velkém akustickém výkonu kolem $100 W$ mohou způsobovat až bolestivé vjemy. Hodnotu $100 W$ nazýváme práh bolesti.

K popisu relativního poměru akustického výkonu používáme logaritmickou míru, protože interval hodnot akustického výkonu je rozsáhlý. Jednotku, která určuje poměr, nazýváme bel (B). V praxi využíváme jednotku menší decibel (dB), platí $1 B = 10 dB$.

Hladinu akustického výkonu L_p vyjádříme jako poměr akustického výkonu P k referenční hodnotě P_0 , která odpovídá prahu slyšení ucha tedy $P_0 = 10^{-12} W$. Vztah pro hladinu akustického výkonu

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (1.30)$$

kde číslo 10 v činiteli vyjadřuje naši snahu měřit hladinu akustického výkonu v decibelech. Prahu slyšení odpovídá hladina $0 dB$. Prahu bolesti odpovídá

$$\{L_p\} = 10 \log \left(\frac{100}{10^{-12}} \right) = 140 \text{ dB}. \quad (1.31)$$

Historická poznámka

Alexander Graham Bell (1847 – 1922) byl americký inženýr a vynálezce. Proslavil se vynálezem telefonu, ale má na kontě mnoho dalších vynálezů a objevů. Je po něm pojmenovaná jednotka bell.

zdroj zvuku	hladina akustického výkonu (dB)
krajina v noci	20
řeč	70
rušná ulice	80
rockový koncert	120
stadion Galatasaray S.K. 28.3.2011	131,76 ⁹

Tab. 2. Hladiny akustického výkonu pro různé zdroje.

2.3.2 Výška zvuku

Výška zvuku je určena jeho frekvencí f . Vysoké tóny jsou tóny o vyšších frekvencích. Hluboké tóny jsou tóny o nižších frekvencích. Absolutní výška tónu určuje jeho frekvence např. tón a^1 má výšku $f = 440 \text{ Hz}$. Relativní výška dvou tónů neboli **hudební interval** se udává jako poměr jejich frekvencí. Hudební interval dvou tónů $f_1 = 100 \text{ Hz}$ a $f_2 = 200 \text{ Hz}$ je $2/1$. Nejdůležitějším a základním hudebním intervalem je **oktáva** (interval $2/1$). Říkáme pak, že tón f_2 je o oktávu vyšší než tón f_1 .

interval	poměr frekvencí
prima	1/1
kvinta	3/2
kvarta	4/3
velká tercie	5/4
oktáva	2/1

Tab. 3. Délka základních intervalů.

⁹ Zdroj: <http://www.cbssports.com/nfl/eye-on-football/23678037/seahawks-fans-set-guinness-world-record-for-loudest-stadium>

2.3.3 Barva zvuku

Tóny, které vydávají hudební nástroje, nejsou jenom čisté tóny, ale spolu se základním tónem o frekvenci f_1 obsahují tzv. vyšší harmonické tóny (aliquotní tóny). Jejich frekvence jsou celistvé násobky základní frekvence $f_k = kf_1, k \in \mathbb{Z}$. Právě přítomnost vyšších harmonických tónů ve výsledném tónu určuje charakteristickou **barvu zvuku**. Díky této vlastnosti zvuku dokážeme rozlišit stejně vysoký tón vydaný kytarou, klavírem nebo houslemi. Podle barvy zvuku rozeznáváme také lidské hlasy. Platí, že liché násobky základní frekvence zvuk „ochlazují“ (zostřují). Naopak sudé násobky základní frekvence zvuk „oteplují“ (zjemňují).

2.4 Dopplerův jev

Dopplerův jev je jev, při kterém dochází ke změně frekvence přijímaného vlnění, způsobené relativním pohybem zdroje a pozorovatele. Je vyzněl r. 1842 profesorem pražské techniky Christian Doppler. Při výkladu si jev rozdělíme na dva nejdůležitější případy.

1. Pozorovatel se pohybuje ve směru šíření vln (od zdroje) konstantní rychlostí u , která je menší než rychlost zvuku v

Zdroj vysílá zvukové vlnění o vlnové délce

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1.32)$$

kde f je frekvence zdroje vlnění. Pozorovatel pohybující se od zdroje zachytí méně vlnoploch, a proto zaznamená nižší frekvenci zvuku. Vlnoplochy mají vzhledem k pozorovateli relativní rychlost $v - u$. Proto přijme jen

$$f_p = \frac{v - u}{\lambda} = \frac{v - u}{v} f. \quad (1.33)$$

2. Zdroj se pohybuje vzhledem ke klidnému pozorovateli rychlostí u ($u < v$).

Zdroj vlnění se k pozorovateli přibližuje, proto jsou vlnoplochy směrem k pozorovateli zhuštěny a jejich vlnová délka se snižuje

$$\lambda = \frac{v - u}{f}. \quad (1.34)$$

Pozorovatel zaznamená frekvenci

$$f_p = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{v - u} f, \quad (1.35)$$

která je větší než frekvence zdroje $f_p > f$. Když se rychlost zdroje blíží rychlosti zvuku $u = v$ je $\lambda = 0$. K tomu dochází hlavně u moderních stíhacích letounů při přechodu do nadzvukové rychlosti. Dochází k rázové vlně, která má velkou energii a když dosáhne povrchu, ozve se silná rána. Mluvíme o akustickém třesku.

Nadzvuková rychlost se počítá v Machových číslech M , které vyjadřují násobky rychlosti zvuku. Proto $M = 1$, odpovídá rychlosti $v \approx 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Nejmodernější stíhačky dosahují rychlosti až 2,5 M.



Obr. 12. FA-18 Hornet při překročení hranice rychlosti zvuku.¹⁰

V předešlých dvou případech jsme uvažovali, že zdroj i pozorovatel jsou na přímce. Samozřejmě se mohou také pohybovat po mimoběžkách nebo jiných křivkách, potom ale musíme použít složitější vzorce.

Dopplerova jevu se také využívá v astronomii pro měření posuvů vlnových délek světla pocházejícího z galaxií. Když se vlnová délka zmenšuje, hovoříme o **modrém posuvu** (modrá má kratší vlnovou délku). Frekvence se zvyšuje a proto zdroj i pozorovatel se přibližují. Pokud se vlnová délka zvyšuje, hovoříme o **rudém posuvu**, frekvence se snižuje a zdroj a pozorovatel se vzdalují. Astronomové při

¹⁰ FA-18 Hornet breaking sound barrier. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FA-18_Hornet_breaking_sound_barrier_%287_July_1999%29.jpg

měření posuvů světla z vesmíru zjistili, že se vlnová délka světla ze všech hvězd a galaxií zvyšuje (rudý posuv) a proto se od nás vzdalují.

2.5 Akustická impedance prostředí

Akustická impedance je veličina popisující vztah mezi ultrazvukovou vlnou a prostředím, kterým prochází. Akustická impedance je dána vztahem

$$Z = \frac{p_{ef}}{v_{ef}} = v\rho, \quad (1.36)$$

kde p_{ef} je akustický tlak, v_{ef} akustická rychlost, v je rychlost zvuku v prostředí a ρ je hustota prostředí. Ze vzorce vyplývá, že impedance je přímo úměrná hustotě prostředí. Tedy čím větší hustotu prostředí má, tím větší má i akustický odpor.

3. Ultrazvuk

Mechanické vlnění s frekvencemi vyššími než 16 kHz nazýváme ultrazvuk. Ultrazvuk využíváme v mnoha odvětvích průmyslu např. jako ultrazvukové čističky pro složitá zařízení, svářečky a další. Rybáři využívají ultrazvuk pro zjišťování rybích hejn. Ultrazvuk se ve velké míře vyskytuje v přírodě, kde jej netopýři používají k nočnímu lovu kořisti, delfini a jiní mořští savci jej využívají k dorozumívání. Co bylo v tomto úvodu lehce nastíněno, rozebereme v dalších kapitolách. V první kapitole si probereme možnosti vzniku ultrazvuku.

3.1 Zdroje ultrazvuku

Ultrazvukové zdroje tvoří nedílnou součást každého ultrazvukového technického zařízení, které vyzařuje ultrazvukovou energii do okolí. Nejčastěji používané jsou elektroakustické ultrazvukové zdroje, méně už mechanické zdroje.

Mechanické ultrazvukové zdroje nejsou už moc rozšířené a používají se už jen v některých technických aplikacích např. na ozařování plynných a kapalných prostředí. V principu využívají přeměnu kinetické energie rychle se pohybujících plynů nebo kapalin na ultrazvukovou energii.

Ultrazvukový elektroakustický zdroj je složen z ultrazvukového měniče a ultrazvukového generátoru. Ultrazvukové elektroakustické měniče převádějí

elektrickou energii na ultrazvukovou a naopak. Tato energie je potom vyzařována do prostředí anebo naopak přijímána zpět. Měníče tedy plní funkci vysílače i přijímače.

„Na přeměnu energie v ultrazvukových měničích využíváme různé fyzikální principy, podle kterých je rozdělujeme na dvě skupiny

- a) mechanické měniče
- b) elektromechanické měniče

mechanické měniče můžeme dále rozdělit:

- píšťaly
- sirény

elektromechanické měniče dále dělíme:

- magnetostrikční
- piezoelektrické
- elektrodynamické
- elektromagnetické“ [6]

V současnosti největší uplatnění a rozšíření našli magnetostrikční a piezoelektrické měniče. V dalším textu si proto rozebereme jen nejvýznamnější měniče, které se používají v ultrazvukových technologických zařízeních.

Mechanické měniče

Mechanické měniče přeměňují energii rychle tekoucích plynů nebo kapalin přímo na zvukovou nebo ultrazvukovou energii. Mechanické děliče můžeme dělit podle principu přeměny na píšťaly nebo sirény. Jejich hlavní předností je jejich konstrukční jednoduchost.

Píšťaly jsou nejjednodušším typem mechanického měniče. Kmitání vzniká, když rychle proudící vzduch dopadá na hrany uvnitř píšťaly, čímž se vzduch rozkmitává. Výšku takto vzniklého zvukového vlnění ovlivňují rozměry dutiny. Když se rozměry zmenší, výška tj. frekvence zvukového vlnění se zvýší a když dosáhneme určité hodnoty, lidské ucho přestane zvuk vnímat a tím se dostaneme do oblasti ultrazvukového spektra. „Protože ultrazvukový výkon a účinnost popisované píšťaly jsou velmi malé ($\eta < 5\%$), byly na tomto principu zkonstruované speciální píšťaly,

využívající především energii většího proudu a rychlosti zvuku. Nejznámější píšťaly jsou Galtonova a Hartmanova. Obě využívají poznatky, které jsme popsali u obyčejné píšťaly a to ve snaze dosáhnout větší ultrazvukový výkon“.[6]

Ultrazvukové sirény

Vhodnou konstrukcí můžeme z obyčejných sirén, známé jako zdroje pronikavých zvukových signálů, vytvořit zdroje ultrazvukového vlnění. Siréna se skládá s diskového statoru a rotoru, na nichž je kolem 100 otvorů. Při otáčení rotoru se otvory na rotoru a na statoru budou překrývat jen v určitých okamžicích. Proudící vzduch z tlakové komory proto bude při konstantním otáčení rotoru pravidelně přerušovaný. Frekvence vzniklého vlnění proto bude záviset na počtu otvorů a na frekvenci rotoru. Účinnost ultrazvukových sirén se pohybuje kolem 70%.

Elektromechanické generátory

Piezoelektrické generátory

Piezoelektrický jev

Nejdříve se podíváme na to, co to vlastně piezoelektrický jev je. Piezoelektrický (z řeckého slova piezos, tj. tlak) jev poprvé pozorovali na krystalu turmalínu (skupina klencových minerálů) v roce 1880 bratři Pierre a Jacques Curieové. Piezoelektrický jev je jev, který se objevuje u některých krystalů, kdy při jejich elastické deformaci dochází k deformaci krystalické mřížky. Tímto dochází ke vzniku elektrického dipólového momentu a na celém krystalu dochází ke vzniku elektrického náboje, který je přímo úměrný velikosti působícího tlaku. Tuto konstantu úměrnosti nazýváme piezoelektrická konstanta. Tento jev se také označuje jako přímý piezoelektrický jev. Inverzní jev k piezoelektrickému jevu se nazývá elektrostriktce (nepřímý piezoelektrický jev). K elektrostriktci dochází při změně elektrického pole, které působí na krystal. Následkem toho dojde ke vzniku elastických kmitů. Je-li změna elektrického pole periodická s frekvencí rovnou frekvenci elastických kmitů, dochází k rezonanci. Přímý piezoelektrický jev se využívá k příjmu ultrazvukových vln. Krystal mění mechanické deformace, které jsou způsobeny ultrazvukovými vlnami na elektrický signál. Elektrostriktce se

využívá pro buzení ultrazvukových vln, kdy díky vlivu elektrického pole na krystal dochází k mechanické deformaci a tím k buzení ultrazvukových vln.

Piezelektrické měniče patří do skupiny elektromechanických měničů, ve kterých se mění elektrická energie na mechanickou energii využitím některých speciálních vlastností v přírodě se vyskytujících látek. „Piezelektrické vlastnosti mají například přírodní krystaly nerostů, jako např. křemen, turmalín, Seignettova sůl. Kromě přírodních látek mají piezelektrické vlastnosti i uměle vytvořené krystaly.

Praktický význam v ultrazvukové technice mají jen některé látky, které splňují určité vlastnosti a to křemen (oxid křemičitý SiO_2) a křemenný krystal, který se v přírodě vyskytuje v šestibokých útvarech.

Magnetostrikční generátory

Magnetostrikční měniče podobně jako piezelektrické měniče patří mezi elektromechanické měniče. Na přeměnu elektrické kmitavé energie na mechanickou energii využívají magnetostrikční jev ve feromagnetických materiálech. Mezi feromagnetické látky řadíme železo, kobalt, nikl a jejich slitiny. Při působení magnetického pole na feromagnetické látky se mění rozměry. Takže například tyč z feromagnetického materiálu se v magnetickém poli buď prodlouží, nebo zkrátí. Záleží to na materiálu, z kterého je tyč vyrobena a na velikosti intenzity magnetického pole. Tento jev se nazývá magnetostrikcí.

3.2 Využití ultrazvuku v přírodě

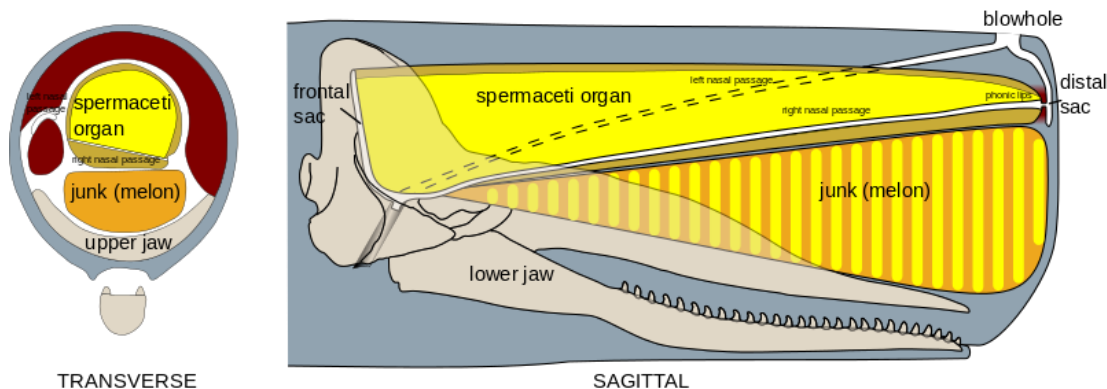
3.2.1 Echolokace

Echolokace je proces využití ultrazvuku. Je to způsob orientace některých živočichů. Využívají jej netopýři při lovu své kořisti a také kytovci převážně k orientaci a lovu ryb, ale také k dorozumívání. Poprvé spolehlivě prokázal echolokaci u netopýřů S. Dijkgraaf v roce 1947. Už v roce 1793 Ital L. Spallanzani poukazoval na to, že se netopýři dokážou dobře orientovat i bez použití zraku. V roce 1953 dokázal americký vědec W. Schewill schopnost echolokace i u kytovců. Echolokaci kytovci využívají při orientaci na větší vzdálenosti a na kratší vzdálenost při špatné viditelnosti nebo v kalné vodě. Proto sonar, jak se orgán nazývá, je pro kytovce nejdůležitějším prostředkem k jejich orientaci. Můžeme se také setkat

s označením asdic což je zkratka pro anglické (Allied Submarine Detection Investigation Committee). ASDIC byl název pro ultrazvukový lokační přístroj, který za druhé světové války sloužil k lokalizaci nepřátelských ponorek nebo hlubinných min. Když jej posádky zapnuly, byli překvapeni ohromným množstvím zvuků, které pod vodou vydávali ryby, kytovci, ale také množství korýšů a jiných bezobratlých organismů. Můžeme proto s nadsázkou říct, že první výzkumníci echolokace byli námořníci a obsluhy sonarů na bojových plavidlech. Po válce byla proto část sonarů pro vojenské využití předělána pro vědecké účely.

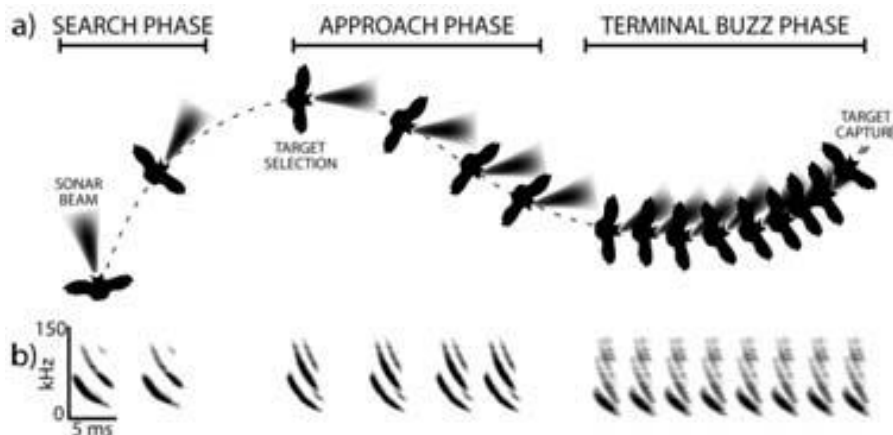
Kytovci k tvorbě a vysílání ultrazvukových vln využívají dva odlišné způsoby. Při prvním způsobu rozechvívají vzduchový sloupec v hrtanu. Takto vznikají zvuky o nižších frekvencích. A při druhém způsobu rozechvívají vzduchový sloupec v systému váčků (divertikula) vychlípených z nosní trubice. To jsou zvuky o nižších frekvencích. Díky tomu mohou kytovci zároveň vzájemně komunikovat a vysílat echolokační signály (orientace, potrava). Ale jsou také známy výjimky např. kosticovcům (velryby, plejtváci atd.) schází divertikula a proto všechny ultrazvukové signály vznikají v hrtanu.

Kytovcům zcela scházejí ušní boltce a zvuková trubice se zužuje do štěrbiny a většinou úplně zarůstá. Důvod je prostý, obrovský tlak vody v hloubkách by bubínek úplně roztrhal. Bylo zjištěno, že zvukové vlny vnikají do vnitřního ucha nejen zakrnělým zvukovodem, ale i okolní kůží, tukovými, svalovými a kostními tkáněmi. U ozubených kytovců (delfini, kosatky, atd.) se nachází zvláštní orgán ultrasonický reflektor. Výzkumy prokázaly, že tento orgán funguje jako akustická čočka. Široký svazek ultrazvukových vln usměrňuje do úzkého svazku širokého jen několik centimetrů. Nejdokonaleji adaptovaným kytovcem pro echolokaci je vorvaň. V jeho obrovské hlavě se nachází největší, nejsložitější a nejvýkonnější echolokační aparát. Na obr. 10. vidíme obrovský disk akustického zrcadla (frontal sac) a výkonnou akustickou čočku (spermacti organ – liší se od ultrasonického reflektoru u ozubených kytovců svým složením, ale funkce mají stejné).[8]



Obr. 13. Řez vorvaňovou hlavou.¹¹

Netopýři jsou další savci známí díky využívání echolokace. V podstatě echolokaci využívají k orientaci při letu a při lovu kořisti v noci. Ultrazvukové signály vyluzují netopýři třemi odlišnými způsoby a to mlaskáním jazyka, údery křídly, ale většinou signály vyluzují pomocí hrtanu. Typy signálu se liší podle účelu při lovu kořisti. První s dlouhou vlnovou délkou a s nízkým opakováním slouží k vyhledávání kořisti. Další tzv. přibližovací fáze zkracuje se délka pulzu a opakování se zvyšuje. Poslední fáze těsně před ulovením kořisti se vyznačuje velmi krátkou vlnovou délkou pulzů a vysokým opakováním.



Obr. 14. Diagram netopýřího lovu.¹²

Netopýři vydávají ultrazvuk o frekvencích mezi 8 kHz až 220 kHz.

¹¹Sperm whale. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sperm_whale_head_anatomy_%28transverse_%2B_sagittal%29.svg

¹² Schematic of insect approach and capture in echolocating bats. In: batlab [online]. Dostupné z: <http://www.batlab.umd.edu/project/melproject.html>

3.3 Využití ultrazvuku v technické praxi

3.3.2 Ultrazvuková defektoskopie

Velká přednost ultrazvuku je možnost nedestruktivního zkoušení vlastností tuhých materiálů popřípadě součástek vyrobených z těchto materiálů. Další předností ultrazvukové defektoskopie na rozdíl od jiných nedestruktivních metod je její nezávislost na elektrických vlastnostech materiálu. Při použití ultrazvukové defektoskopie se využívá průchod ultrazvukové vlny a její odraz od případných dutin, prasklin a jiných kazů ve zkoumaném materiálu. Metody ultrazvukové defektoskopie jsou různé. Metody dělíme podle principu na průchodové a odrazové metody, podle budícího signálu na spojitě a impulsové. Také dělíme metody podle akustické vazby a to na kontaktní a bezkontaktní metody a zvláštní imerzní metody, kdy je testované těleso potopené do kapaliny. Nejčastěji se používá vodní lázeň. Rozdělení metod podle budícího signálu záleží na časovém průběhu elektrického signálu vysílaného z generátoru (také jinak pulzer). Na generátor je připojen elektroakustický měnič, který přeměňuje elektrický signál na ultrazvukovou vlnu. Když vlna projde zkoumaným materiálem, na elektroakustickém měniči se indukuje elektrický signál, který se nazývá ultrazvukový signál. Pokud vychází z generátoru harmonický a spojitý elektrický signál je i ultrazvukový signál harmonický a spojitý.

V další části se zaměříme na **akustickou vazbu**, pomocí níž se uskutečňuje přenos akustické energie. Je dána prostředím mezi sondou a zkoumaným předmětem. Rozdělení je napsáno výše v odstavci. U kontaktní akustické vazby je sonda v těsném kontaktu se zkoumaným předmětem, mezera a nerovnosti povrchu jsou vyplněny tzv. vazebním prostředím (většinou výrobci sond dodávají svoje vlastní prostředí, ale dá se i použít např. hustý olej, petrolej, glycerín, atd.). Vazebné prostředí musí splňovat několik podmínek, aby nedošlo ke zkreslení měření. Hlavní je, že nesmí obsahovat bublinky anebo jiné nečistoty a její tloušťka se nesmí během měření měnit. Dále nesmí měnit vlastnosti zkoumaného tělesa. Použití kontaktní akustické vazby je velmi složité, protože aplikace vazebního prostředí je složitá a musí být velmi přesná. Také sonda musí být na těleso přitlačována konstantní silou a toho lze docílit jen za pomoci speciálních lepidel, jejichž odstranění je potom velmi složité. Pro kontaktní vazbu je uváděna podmínka

$$\frac{d}{\lambda} < 1, \quad (1.37)$$

kde d je tloušťka vazebního prostředí a λ vlnová délka ultrazvukových vln.

Při bezkontaktní akustické vazbě je vazebním prostředím vzduch. U imerzní vazby je zkoumané těleso i sonda ponořeny do kapaliny. Touto kapalinou bývá nejčastěji voda, a proto si opět při vlastním měření musíme dávat pozor na vzduchové bublinky, které by mohli způsobovat námi nechtěné odrazy.

Průchodová metoda využívá zeslabení ultrazvukové vlny při průchodu vadou. Pro použití průchodové metody se mezi vysílací a přijímací sondu umístí námi sledované těleso. Vysílací sonda vysílá buď spojitý, nebo impulzní signál. Ale sondy vysílací spojitý signál se už nevyrábí. Její nevýhodou je, že pouze zjistíme, že v materiálu nějaká vada je. Ale nejsme schopni říct kde přesně.

U odrazové metody detekujeme odraženou vlnu od vad v zkoumaném předmětu. Proto nepoužíváme dvě sondy, ale stačí nám jen jedna, která slouží jako vysílač i přijímač. Výhodou této metody je, že jsme schopni lokalizovat místo s vadou.

Sondy pro ultrazvukovou defektoskopii využívají převážně piezoelektrický jev. Piezoelektrické měniče nevyužívají přírodních ani modifikovaných křemenů, ale využívá se piezokeramických materiálů (např. trioxid olovnato – titaničitý PbTiO_3) a piezoelektrických polymerů (např. polyvinylidenfluorid PVDF), ale piezoelektrický jev se objevuje i u polyvinylchloridu (PVC) a polyvinylfluoridu (PVF).

V závěru tohoto odstavce ještě uvedeme stručně srovnání s jinými nedestruktivními metodami a to magnetickou a radiodefektoskopickou metodou. Magnetická metoda prášková se používá pro feromagnetické materiály (dají se zmagnetovat) ke zjišťování povrchových vad. Při zjišťování vad se zkoumaný předmět nejprve zmagnetizuje. Během magnetizace se na předmět nanese zkušební prostředek (prášek nebo suspenze) a poté provedeme kontrolu zkoumané plochy UV nebo viditelným světlem. Nevýhodou na rozdíl od ultrazvukové metody je, že poznáme jen povrchové vady a nelze použít na jiné materiály než feromagnetické.

Při použití radiodefektoskopické metody se zkoumaný materiál prozáří vhodným zářičem (podle použitého zářiče dělíme na rentgenografii, gamagrafii nebo se používá tvrdé záření s urychlovače). Za zkoumaným předmětem je umístěn fotocitlivý materiál (film), na kterém vzniká plošný obraz. Film se potom vyhodnotí na zeslabení záření po průchodu. Výsledky dostáváme v reálném čase, ale tato

metoda není vhodná pro zkoumání povrchových vad. Na to se hodí více magnetická prášková metoda.

3.3.3 Ultrazvukové čištění

Ultrazvukové čištění využívá ultrazvukovou energii, která způsobuje intenzivní kavitaci. Ultrazvukové čištění slouží především k odstraňování nečistot z povrchů velmi složitých součástek z oblastí jemné mechaniky, elektrotechniky a strojírenství, kde jsou na čistotu součástek kladeny vysoké požadavky. Ultrazvukové čisticí zařízení se vyrábí v různých variantách. K dispozici jsou jednoduché vaničky s obsahem 1 až 10 litrů, ale také rozměrné celky pro čištění leteckých motorů a raket.

Princip ultrazvukového čištění

Čištění ultrazvukem je komplexní proces, při kterém se objevuje více faktorů. Mezi ty nejdůležitější patří tyto faktory: intenzita a frekvence ultrazvukových vln v čisticí kapalině, druh čisticí kapaliny a to jaký stupeň vyčištění požadujeme a samozřejmě druh znečištění. Nejdůležitějším jevem při čištění je kavitace. Kavitace v kapalině vzniká, když maximální tlak ultrazvukové vlny překoná určitou hodnotu (kavitační práh). Rychlé změny tlaku v kapalině vyvolají vznik dutinek, které jsou naplněny plynem anebo párami. Jejich zánik vyvolá vznik nárazové vlny, která má několikanásobně větší amplitudu tlaku, než měla původní ultrazvuková vlna. Tato nárazová vlna způsobuje odstranění nečistot z povrchu. Protože při zvyšování intenzity kavitace, může docházet k nežádoucím vlivům, jako je narušení a eroze povrchu součástky, musíme dbát na vhodné nastavení intenzity ultrazvukových vln.



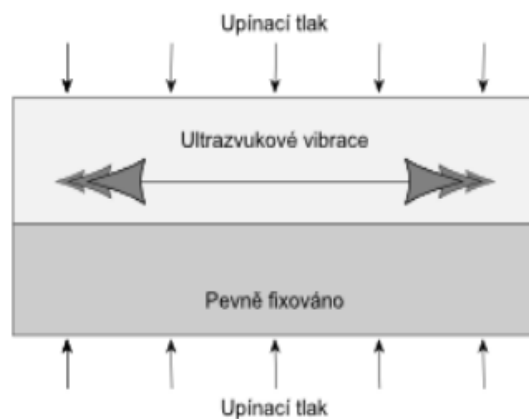
Obr. 15. Kavitace na lopatkách lodního šroubu.¹³

¹³ Caviting. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cavitating-prop.jpg>

Kavitace je jev, který je z hlediska energetické bilance škodlivý. Dochází při něm k absorpci energie ultrazvukové vlny. Na jedné straně kavitaci pro její účinek na povrch tělesa potřebujeme, na druhé straně nepotřebujeme snižování intenzity ultrazvukového pole, které je vyvoláváno ztrátami energie ultrazvukových vln. Tuto kavitaci nazýváme objemovou kavitací a chceme, aby se vyskytovala v kapalině co nejméně. Jev kavitace se nevyužívá jenom k ultrazvukovému čištění, ale i v lékařství např. při odstraňování zubního kamene, nebo k odstraňování ledvinových kamenů pomocí rázových vln. Moderním využitím kavitace je také ultrazvuková liposukce (tedy odbourávání tuků).

3.3.4 Svařování ultrazvukem

Ultrazvukové sváření se v současnosti využívá pro svařování téměř veškerých plastů a kovů. Velkou výhodou ultrazvukového sváření je krátký čas sváření, nepřesahuje 2 až 3 sekundy. Metoda ultrazvukového sváření je nedestruktivní metoda, nedochází k deformaci materiálu. Také není závislá na elektrických vlastnostech materiálu, proto můžeme svařovat kovy s nekovy. Fyzikální princip ultrazvukového svařování využívá akustické energie vln, která je přeměněna na tepelnou energii. Jedna část je pevně zafixována, druhou část k ní pevně přitlačíme a rozkmitáme sondou, přičemž na sondu je připevněn vlnovod, který zesiluje amplitudu kmitání. Jeho funkcí je zvýšení výkonu svářečky. Na vlnovod je napojena tzv. sonotroda, která přivádí ultrazvukové vlnění do místa sváru. Amplitudu kmitání, ale nemůžeme zvýšit nad tzv. kritickou amplitudu, po jejímž překročení by se plochy natavily a vznikl by tak nekvalitní svár. Nejvhodnější kovy pro svařování jsou měď, molybden, železo a stříbro a také takové materiály, které mají kubickou, plošně centrovanou mřížku (hliník, nikl, kobalt). Se zvyšující se tvrdostí kovů se kovy svařují hůře. Svářečky se dělí podle kmitů, které vysílají a to na příčné, podélné, ohybové a torzní svářečky. U sváření kovů musí být směr výchylky svářecího hrotu rovnoběžný se svářecí rovinou. A při svařování plastů se musí směr výchylky svářecího hrotu pohybovat kolmo k rovině spoje.



Obr. 19. Ultrazvukové svařování.¹⁴

3.3.5 Ultrazvuk v lékařství (sonografie)

V lékařství se ultrazvukové vlny využívají především k diagnostice a terapii. Pokud změříme dobu t mezi vysláním signálu a příjmem jeho odrazu, můžeme velmi přesně určit vzdálenost mezi povrchem sondy a objektem od kterého se vlnění odrazilo. Rychlost šíření ultrazvuku ve všech tkáních je si velmi podobná a rovná se hodnotě 1540 m/s. Pro diagnostické účely se využívá přístroj zvaný ultrasonograf. Hloubka obrazu je zjišťována pomocí měření doby od vyslání impulzu do přijetí jeho odrazu (echa). Na základě porovnávání amplitudy vyslaného a přijatého impulzu se zjišťuje informace o místě odrazu. Problém nastává, když je energie vlnění pohlcována (např. v kostech) a námi zkoumaný objekt se nachází v takto vzniklém akustickém stínu. Zvyšováním frekvence ultrazvukových vln se zlepšuje prostorová rozlišovací schopnost sonografů, ale na druhou stranu se zvyšováním frekvence se také exponenciálně zvyšuje útlum vlnění ve tkáních. Proto se pro zobrazení orgánů v břišní dutině využívá vlnění o frekvenci 3 až 5 MHz a pro povrchové vyšetření se využívá vlnění o frekvenci 5 až 10 MHz. Abychom od ultrazvukového vlnění dospěli k obrazu na monitoru, musí signál projít přes složitý elektronický systém (tzv. zpracování signálu), který je ale řízen počítačem. Tento systém má za úkol např. zesílit signál, pokud je slabý, také převádí tento zesílený signál na videosignál, který se pak zobrazí na monitoru. Typy ultrazvukového obrazu jsou jednorozměrné A-zobrazení (A = Amplitude = amplituda), další používanou

¹⁴ Obr. 1 Princip ultrazvukového svařování [online]. [cit. 5.5.2014]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>

metodou je dvourozměrná ultrasonografie B-zobrazením (B = brightness = jas). U A-zobrazení je obraz tvořen na osciloskopu, kde poloha výchylky odpovídá místu odrazu a její amplituda vyjadřuje množství odražení vlny. Obraz vytvořený u B-zobrazení je dvourozměrný a je tvořen jednotlivými body, jejichž jas odpovídá amplitudě od nich odraženého vlnění. Využití nachází především v případech, kdy se vyšetřují měkké tkáně nebo dutiny vyplněné nějakou tělní tekutinou. Proto našel obrovské uplatnění právě v oboru gynekologie a porodnictví, protože plod se nachází v plodové vodě uvnitř dutiny děložní. Tyto podmínky jsou pro šíření ultrazvukové vlnění velmi dobré. Kvůli neschopnosti B-zobrazení zachytit ultrazvukové obrazy pohyblivých struktur (bijící srdce atd.), byla propracována metoda M-zobrazení (M = Motion = pohyb).

Dalšími dvěma metodami používanými v diagnostice je 3D a 4D zobrazení. Abychom získali 3D obraz, musíme použít speciální volumetrickou sondu a ve vyhodnocovacím přístroji musí být nainstalovaný příslušný software, který je schopný zpracovat data ze sondy. K vytvoření třírozměrného obrazu musíme danou oblast nasnímat a získat tak po sobě následující 2D obrazy. V počítači potom proběhne rekonstrukce obrazu. Ve 4D režimu probíhá snímání a vyhodnocování současně. Díky tomu můžeme např. pozorovat pohybující se lidský plod v děloze.

Dalším diagnostickým přístrojem, který našel uplatnění ve zdravotnictví je ultrazvukový měřič rychlosti průtoku krve (tzv. Dopplerovský rychloměr). Jak z názvu přístroje vyplývá, k měření se využívá Dopplerův jev. Pokud se vlnění odráží od pohybujícího se zdroje, dojde ke změně frekvence oproti původní frekvenci. Tato změna se dá vyjádřit vztahem

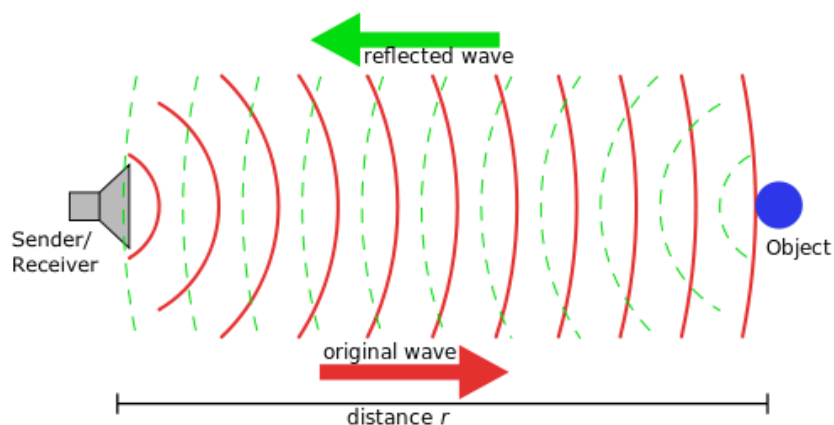
$$\Delta f = \frac{2vf_0 \cos \alpha}{c}, \quad (1.38)$$

kde f_0 je frekvence původního vlnění, c je rychlost vlnění v daném prostředí, v je námi hledaná rychlost krve a α je úhel mezi osou ultrazvukového svazku a směrem toku krve. Vidíme tedy, že pokud sonda vysílá svazek kolmo na směr proudění krve, nedostaneme žádný signál. Proto se používá pro úhel α podmínka

$$0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ. \quad (1.39)$$

3.3.6 Sonar

Slovo sonar vzniklo jako akronym z anglického SOund Navigation And Ranging. Sonar je přístroj, využívající ultrazvukové vlnění k navigaci, komunikaci nebo detekci objektů na nebo pod hladinou moře. Předchůdci sonaru se objevili už kolem roku 1912, jako reakce na potopení Titaniku. Během první světové války se kvůli hrozbě ponorek rozběhly snahy o vytvoření přístroje, který by je mohl lokalizovat. Britové začali používat tzv. hydrofony (pasivní sonar). V roce 1916 se začalo s výzkumem a v roce 1918 Britové a Francouzi sestrojili první prototypy tzv. ASDIC. Během druhé světové války dochází k rozmachu ponorkového boje a tím i k rozšíření a vzniku sonarů takových jaké známe teď. Vzniká mnoho zařízení sloužících k detekci. Mezi ně můžeme zařadit sonobojku, která se po vyhození z letadla rozloží. Nad hladinou zůstává radiový vysílač a pod hladinou je hydrofon, který zachycuje podezřelé zvuky, které jsou potom pomocí vysílače odvysílány k rozluštění. Ihned po válce sloužil sonar k mírumilovné činnosti, jakou bylo odminování přístavů. Také jej začali využívat rybáři na svých lodích k detekci rybích hejn. Dalšími, kdo začali využívat sonary pro svou práci, se stali výzkumníci, oceánografové a biologové zkoumající mořské savce (speciálně jejich dorozumívání a chování). Hlavní využití sonaru v oceánografii je zobrazení dna případně zjišťování hloubky moře.



Obr. 18. Princip sonaru.¹⁵

¹⁵ Sonar principle. In: wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar_Principle_DE.svg

Hloubka moře je zjišťována pomocí sonaru, kdy měříme dobu, za kterou se odražená vlna vrátí zpátky k sonaru. Za pomoci jednoduchého vztahu z kinematiky dostáváme

$$H = \frac{vt}{2}, \quad (1.40)$$

kde v je rychlost zvuku ve vodě nebo v prostředí, ve kterém se zvuk šíří.

4. Experimentální část

Pro účely této kapitoly jsem s pomocí pana Zdeňka Weinlicha vyrobil tři fantomy (viz následující obrázky) Pro zobrazování jsem používal přístroj B&K Medical Cheetah 2003 se sondou, která pracovala v režimu tří frekvencí (3,5 MHz, 4,3 MHz a 5,0 MHz). Přístroj pracuje v B-zobrazení a v M-módu. Přístroj je už velmi starý, protože firma B&K Medical na svých stránkách už neviduje tento přístroj, nejsem schopen zjistit, kdy se tento stroje vyráběl. Určité vodítko jsem našel na internetové stránce, kde je uveden rok výroby 1998. Každopádně pro naše účely plně postačoval. Přístroj jsem alespoň vyfotografoval, aby si každý mohl udělat obrázek (obr. 19)

První model (pingpongový míček s plíškem) by měl představovat model oka (obr. 20). Druhý model (krabíčka se třemi kuličkami) bude pro ilustraci vlastností ultrazvuku (obr. 21). Třetí model (krabíčka s různě vzdálenými přepážkami) bude využit k měření vzdáleností ultrazvukem (obr. 22).



Obr. 19. Přístroj B&K Medical Cheetah 2003.



Obr. 20. Model oka (pingpongový míček).



Obr. 21. Tři kuličky (zleva: hliněná, olověná a polystyrenová kulička).



Obr. 22. Krabička s přepážkami.

Měření vzdáleností pomocí přístroje Ultrasonograf 2003

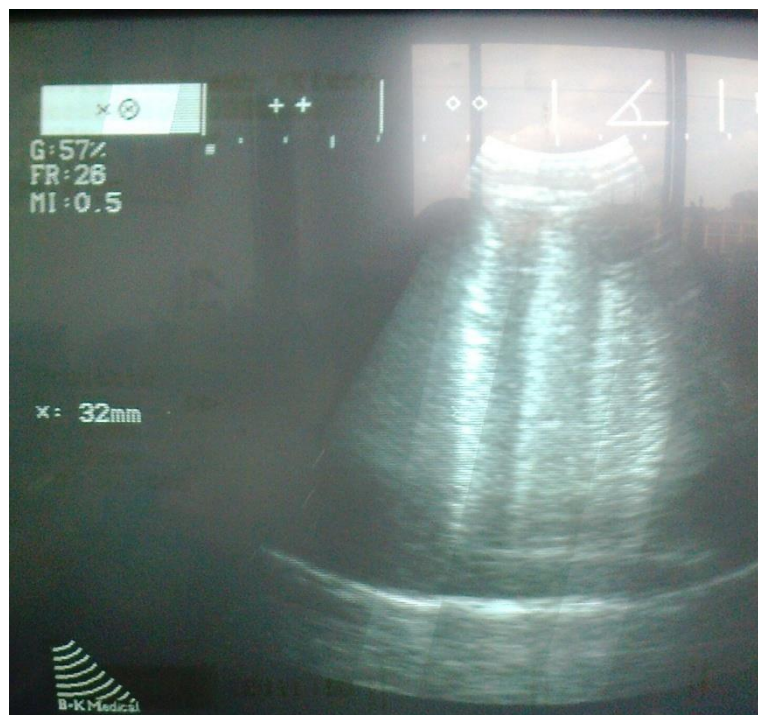
Přístroj Ultrasonograf 2003 umožňuje snadné měření vzdáleností pomocí funkce Measure. Zvolil jsem vzdálenost sklíček 2 cm a zobrazil jsem krabičku na obrazovku. Po zmáčknutí tlačítka Freeze se obraz „zmrazí“. Potom můžeme použít funkci Measure a po stisknutí tlačítka F1 (měření vzdáleností) se nám objeví na obrazovce 2 kurzory. Pomocí trackballu umístíme oba kurzory na obrazy obou

sklíček a na monitoru se nám ihned zobrazí vzdálenost 20 mm (obr. 22). Můžeme také různě měnit vzdálenosti nebo přidávat další sklíčka.



Obr. 23. Obrázek dvou sklíčků vzdálených 20mm.

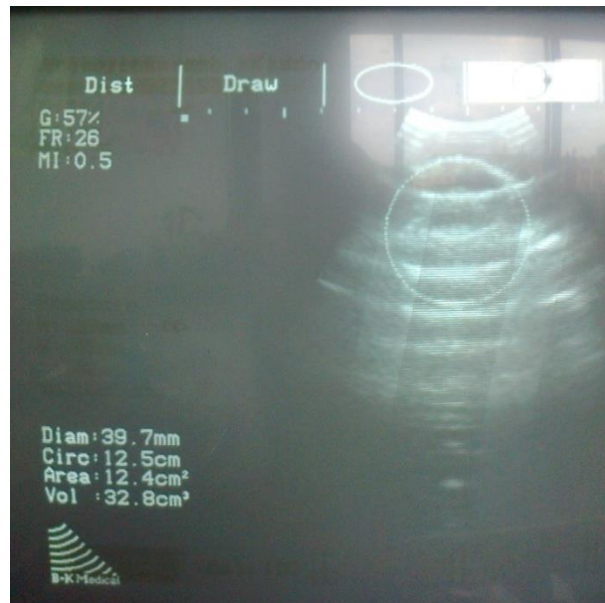
Pro zajímavost ještě uvedu obrázek tří sklíčků. (obr. 23)



Obr. 24. Obrázek tří sklíčků.

Model oka (pingpongový míček s plíškem)

Model oka ponoříme pod vodu pro lepší přenos ultrazvukového vlnění a pomocí sondy jej zobrazíme na monitor. Z obr. 23, na kterém je vidět obraz pingpongového míčku, můžeme vyčíst, že se ultrazvukové vlnění odráží od stěn nádoby, od plíšku i od balónku. Na obr. 23 je pomocí funkce Measure vyznačen obvod míčku. Na prvním řádku je údaj Diam: 39,7 mm, tedy průměr míčku je necelých 40 mm.



Obr. 25. Obraz pingpongového míčku.

Tři kuličky

Model kuliček ponoříme do vody (tady jsem zvolil nešťastně hliněnou kuličku, možná se bude muset po čase vyměnit) a zobrazíme pomocí ultrazvuku. Na obrázku můžeme rozpoznat tři kuličky (obr. 25) Ta nejmenší je právě hliněnka.



Obr. 26. Obráz tří kuliček.

Závěr

Téma diplomové práce jsem zvolil s ohledem na partii učiva mechaniky, která mě zaujala tím, že umožňuje najít řadu mezipředmětových vazeb a rovněž poskytuje prostor pro integraci znalostí ve fyzice. Mezipředmětové vazby v této práci lze najít mezi fyzikou, technikou a biologií. Ultrazvukové vlny využívají různí živočichové např. v podobě echolokace. V technické praxi potom má ultrazvuk velmi široké použití při defektoskopii, svařování, čištění a patrně nejznámější je využití ultrazvuku ve zobrazovacích metodách používaných v klinické praxi.

Středoškolské osnovy fyziky neposkytují takový prostor pro popis těchto aplikací, proto jsem se pokusil shrnout základní fyzikální znalosti mechanického vlnění, srovnat je stručně s elektromagnetickými vlnami a soustředit se na popis zvukového vlnění počínaje jejich základními parametry, jak ve slyšitelné oblasti, tak v oblasti ultrazvukových vln.

V experimentální části využívám vyřazený sonografický přístroj, určený pro klinické využití. Pokusil jsem se vyvinout tzv. fantomy, na kterých jsem ověřoval možnosti zobrazení. Bohužel, zde se projevoval již nedostatek času, vyrobit takové pomůcky, které by se daly zařadit do praktika školních pokusů v partii akustiky a zejména vlastností ultrazvukových vln. Tomuto tématu bych se rád věnoval v diplomové práci. Na těchto fantomech bych vysvětlil vztah útlumu ultrazvukových vln v závislosti na změně frekvence a intenzity vln apod. Rovněž bych chtěl v rámci

své školské praxe zjistit, jak je toto učivo vnímáno žáky a nakolik by jim pomohl přehledný text, použitelný pro semináře z fyziky, zaměřené na integraci učiva a mezipředmětové vazby.

Použitá literatura

- [1] VESECKÁ, Jaroslava. *Kmitání, vlnění a akustika: fyzika pro zahraniční studenty*. 2., nezměn. vyd. Praha: Karolinum, 2011, 109 s. ISBN 978-80-246-1934-7.
- [2] KOPAL, Antonín. *Fyzika I: mechanika - kmity, vlny - nauka o teple*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 152 s. ISBN 80-708-3903-1.
- [3] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. Praha: Prometheus, 1994, 135 s. ISBN 80-901-6196-0.
- [4] BAJER, Jiří. *Mechanika: Mechanické kmitání a vlnění*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2004, 470 s. ISBN 80-244-1293-4.
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Překlad Jan Obdržálek. Brno: Vutium, 2000, viii s., s. 330-576, příl. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] ŠVEHLA, Štěpan. *Ultrazvuk v technologii*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1984, 521 s.
- [7] KUBÍNEK, Roman. *Elektrina a magnetismus: studijní modul*. 1. vyd. [1] Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 223 s. ISBN 978-80-244-3360-8.
- [8] MAZÁK, Vratislav. *Kytovci*. Vyd. 1. Praha: Státní zemědělské nakl., 1988, 307 s.
- [9] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia: elektrina a magnetismus*. 4. upr. vyd. Praha: Prometheus, 1998, 398 s. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-719-6088-8.
- [10] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2012, 574 s. ISBN 978-80-01-05034-7.

- [11] DOLEŽAL, Ladislav. *Základy sonografie v porodnictví a gynekologii*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 1998, 154 s. ISBN 80-706-7835-6.
- [12] HRBEK, Jaroslav. *Velká válka na moři*. 1. vyd. Praha: Libri, 2001-2002, 5 v. ISBN 80-85983-84-2.
- [13] KREIDL, Marcel. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha: Starmans electronics, 2011, 217 s. ISBN 978-80-254-6606-3.
- [14] *Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1995, 206 s. ISBN 80-858-4984-4.

Internetové zdroje:

<http://www.ultrazvuk.cz>- stránky o ultrazvuku. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.ultrazvuk.cz/index.php>

Ultrazvukové svařování. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>

Nedestruktivní defektoskopie. PEXA, Martin. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://tf.czu.cz/~pexa/Budejovice/Prednasky/P-Nedestruktivni_defektoskopie.pdf

Huygens biography. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Huygens.html>

Snell biography. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Biographies/Snell.html>

Cheetah 2003 B&K Medical. [online]. [citováno. 2014-08-07]. Dostupné z: <http://www.medwow.com/used-ultrasound-diagnostic/bk-medical/2003-cheetah/271045186.item>