

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA PEDAGOGICKÁ

KATEDRA MATEMATIKY, FYZIKY A TECHNICKÉ VÝCHOVY

Měření rychlosti zvuku

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ivana Rauchová

Přírodovědná studia, Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: PhDr. Pavel Kratochvíl, Ph.D.

2018

ZDE SE NACHÁZÍ ORIGINAL ZADÁNÍ KVALIFIKAČNÍ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně
s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

Plzeň, 29. června 2018

.....
vlastnoruční podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucí práce PhDr. Pavlu Kratochvílovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, vstřícné jednání a pomoc s výběrem tématu.

Obsah

ÚVOD.....	7
1. HISTORIE	8
2. ZVUK	10
2.1. AKUSTIKA.....	11
2.2. ZÁKLADNÍ POJMY:	11
2.3. ZDROJE ZVUKU	12
2.4. ŠÍŘENÍ ZVUKU.....	13
2.5. ODRAZ, LOM ZVUKU	15
2.6. DOPPLERŮV JEV	15
3. ZPRACOVÁNÍ ZVUKU.....	17
3.1. MIKROFONY	17
3.1.1. <i>Odporové mikrofony (uhlíkové)</i>	18
3.1.2. <i>Elektrodynamické mikrofony</i>	19
3.1.3. <i>Elektromagnetické mikrofony</i>	19
3.1.4. <i>Krystalové (Piezoelektrické) mikrofony</i>	20
3.1.5. <i>Elektrostatické mikrofony (kondenzátorové)</i>	20
3.2. REPRODUKTORY	22
3.2.1. <i>Elektrodynamické reproduktory</i>	22
3.2.2. <i>Elektromagnetické reproduktory</i>	22
3.2.3. <i>Piezoelektrické reproduktory</i>	23
3.2.4. <i>Elektrostatické reproduktory (kondenzátorový)</i>	23
3.2.5. <i>Širokopásmové reproduktory</i>	23
3.2.6. <i>Koaxiální reproduktory</i>	23
3.3. VERNIER LABQUEST 2.....	24
3.4. PROGRAM AUDACITY	24
3.5. PROGRAM SIGVIEW	24
4. PRAKTICKÁ ČÁST	26
4.1. STANOVENÍ RYCHLOSTI ZVUKU POMOCÍ OSCILOSKOPU	27
4.1.1. <i>Zhodnocení</i>	28
4.2. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU VE VZDUCHU REZONANČNÍ METODOU.....	29
4.2.1. <i>Zhodnocení</i>	30
4.3. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU POMOCÍ AUDACITY	31
4.3.1. <i>Zhodnocení</i>	32
4.4. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU POMOCÍ QUINCKEHO TRUBICE	33
4.4.1. <i>Zhodnocení</i>	34
4.5. MĚŘENÍ ZVUKU TLESKNUTÍM DO ROURY	35

4.5.1. Zhodnocení.....	35
4.6. ZMĚŘENÍ RYCHLOSTI POMOCÍ LADIČKY A ROURY	37
4.6.1. Zhodnocení.....	37
4.7. ODRAZ CINKNUTÍ OD TABULE	39
4.7.1. Zhodnocení.....	40
4.8. MĚŘENÍ ZVUKU V KOVOVÉ TYČI	41
4.8.1. Zhodnocení.....	42
4.9. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU POMOCÍ KUNDTOVY TRUBICE	43
4.9.1. Zhodnocení.....	43
4.10. MĚŘENÍ RYCHLOSTI POMOCÍ DOPPLEROVA JEVU	44
4.10.1. Zhodnocení.....	46
4.11. ZMĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU NA LOUCE.....	47
4.11.1. Zhodnocení.....	47
4.12. MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU ODRAZEM.....	48
4.12.1. Zhodnocení.....	48
ZÁVĚR.....	49
SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM TABULEK.....	55

Úvod

Téma měření rychlosti zvuku jsem si vybrala, jelikož mi přijde, že je to jedno z nejvíce opomíjených témat výuky na základních a středních školách. Akustika byla jedna z prvních zkoumaných disciplín fyziky pro objasnění právě sluchových vjemů. Sluch je druhý nejdůležitější sensorický proces k poznávání, proto si myslím, že by nauka o zvuku měla být více řazena do školního učiva už od základní školy. Měření rychlosti zvuku v různých prostředích by mohlo být pro děti zábavné, poučné a získané informace potřebné i do jejich budoucnosti. Chtěla bych ukázat, že existují jednoduché a některé dokonce zábavné metody měření.

Cílem bakalářské práce je seznámení s historií akustiky, se základními pojmy, které jsou důležité pro práci v praktické části, a zpracování zajímavých návodů na školní experimenty na měření rychlosti zvuku, které budou zhodnocené a doporučené.

V první se seznámíme se stručnou historií akustiky, měřením zvuku a nejznámějšími jmény odborníků akustiky a vynálezci elektroniky, kterou dnes hojně používáme právě k měření.

V druhé oblasti bych se chtěla věnovat teorii zvuku uvádějící jeho nejdůležitější zdroje, dále vysvětlit základní pojmy a jevy. Všechny tyto informace budeme využívat v praktické části.

Ve třetí části se chci věnovat popisu elektrotechniky a programů, které byly použity při měření laboratorních prací. Popsat druhy mikrofonů, reproduktorů, zřízení Vernier a programy Audacity a SIGVIEW. Tato část by měla pomoci s výběrem používané techniky k měření. Nesprávný výběr může negativně ovlivnit hodnoty zaznamenaných již zmíněnou technikou.

Čtvrtá část bude praktická. Měla by obsahovat nejméně devět laboratorních úloh, které budou odměřené žáky gymnázia a následně vyhodnocené. U změřených úloh vypíšu výhody, nevýhody a problémy, jež nastaly při měření s žáky, a do kterého ročníku školy bychom je doporučili. Chtěla bych, aby práce s dětmi při laboratorním měření vycházela z konstruktivního modulu výchovy, a aby děti zaujala, aktivně se účastnily a získaly informace pro využití v praktickém životě.

1. Historie

„Akustika je jednou z nejstarších oblastí vědění, jež se zrodila z potřeb objasnit sluchové jevy, zejména řeč a hudbu.“ (1, s. 119–120) Název akustika je odvozen z řeckého akustikos a znamená sluchový. Základy akustiky vznikly v antice v 6. století před našim letopočtem, kde Pythagoras jako první věděl, že výška tónu struny je nepřímo úměrná její délce. Aristoteles popsals zvuk jako zhuštění a zředění vzduchu šířící se od zdroje. Ozvěnu vysvětlil odrazem zvuku od překážek.

Ve středověku se akustika tak zřetelně nerozvíjela, až nástupem renesance zažívala pokrok. Leonardo da Vinci se zabýval odrazem zvuku, formuloval princip nezávislosti šíření zvukových vln vycházejících od různých zdrojů.

Až po roce 1600 se stává akustika samostatnou fyzikální vědou. Galilei podal důkaz těsných vztahů mezi kmitajícím tělesem a zvukem. Roku 1638 objevil, že výška tónu je dána jeho frekvencí a intenzita je dána jeho amplitudou. Františkánský mnich Marin Mersenne vychází z poznatků Galileiho a poprvé určil rychlost zvuku ve vzduchu s hodnotou kolem $430 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jeho pokus byl postaven na výstřelu z kanónu, který pozoroval zpovzdálí a měřil čas mezi zábleskem výstřelu u hlavně a zvuku výstřelu. V roce 1636 také objevil, že frekvence tónu je přímo úměrná odmocnině z napívací síly a nepřímo úměrná odmocnině z lineární hustoty struny. Na počátku 17. století našeho letopočtu provedl Pierre Gassendi měření rychlosti s výsledkem $478 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ale přesnějšího výsledku došli roku 1650 Giovanni Alfonso Borelli a Vincenzo Viviani s výsledkem $350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Roku 1660 dokázal Robert Boyle, že zvuk se nešíří vzduchoprázdnem. Zakladatelem fyzikální akustiky je Joseph Sauveur, který objevil stojaté vlny a určil polohy uzlů a kmiten na struně pomocí papírových jezdců, také začal používat pojem akustika. Isaac Newton stanovil závislost rychlosti zvuku na stlačitelnosti a hustotě

vzduchu vzorcem $c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}}$. Mezi největší objevy Erstnena Florenze Friedricha Chladniho patří měření rychlosti zvuku v kovech a také tónometr, přístroj na měření výšky tónů, zjištění podélných vln v tyčích a zviditelnění vln zvuku pomocí chvění destiček – Chladniho obrazce. Příčné kmity byly již známy. Kapaliny byly dlouho považovány za nestlačitelné a jako prostředí, ve kterém se nepropaguje zvuk. Až v roce 1826 Félix Savart dokázal, že se v kapalinách šíří zvuk stejně jako v tuhých látkách a v roce 1830 určil rozmezí slyšitelnosti lidským uchem kolem 14–16 Hz až 14 kHz. V roce 1827 Jean-Daniel Colladon ve spolupráci s Jacques Charles François Sturm zjistil, že ve vodě se zvuk šíří 4x rychleji než ve vzduchu. Experiment zkoušeli na Ženevském jezeře, ve kterém umístili dvě loďky od sebe

vzdálené 13,5 km. Na první lodi ve stejný okamžik vystřeli a udeřili do zvonu, který byl ponořený ve vodě. Na druhé loďce pozorovatel zjistil časový rozdíl mezi výstřelem a úderem do zvonu. Rychlost zvuku ve vodě jim vyšla kolem $1435 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při teplotě 8°C . Další významnou osobností je Christian Andreas Doppler. V roce 1842 zjistil, že nastává změna frekvence vln, když se zdroj vlny a pozorovatel navzájem pohybují a tento úkaz nazval Dopplerův jev. Bratři Wilhelm a Ernest Weberovi zavedli pojem vlnová délka. „Velmi přesná měření rychlosti zvuku ve vzduchu, v dalších plynech a v kovech provedl při kladení potrubí pařížského vodovodu a plynovodu Henri Victor Regnault. Měření rychlosti zvuku v plynech zpracoval profesor fyziky August Kundt technikou stojatých vln v Berlíně v roce 1866. Zákony lomu a odrazu zvuku objasnil fyzik John Tyndall. „*Předzvěstí nové doby v akustice jsou objevy možnosti trvalého záznamu a reprodukce zvuku, a ovšem i přenos zvuku elektroakustickou cestou.*“ (1, s.126) „*Roku 1878 vynalezl David Hughes uhlíkový mikrofon, roku 1917 Edward Wente Kondenzátorový, a roku 1927 dynamický mikrofon, roku 1919 A. M. Nicolson piezoelektrický, roku 1964 James West elektretový mikrofon a roku 1877 patentoval Ernst Siemens první reproduktor.*“ (2, s. 501)

1.1. Použité prameny

(1, s.121–124) (2, s.499–500)

2. Zvuk

„Zvuk je vlnění látkové prostředí schopné vyvolat sluchový vjem.“ (3, s. 649) Dále je infrazvuk o frekvenci menší než 16 Hz a ultrazvuk o frekvenci vyšší než 20 kHz. Hranice mezi druhy zvuku nejsou ostré. Jsou to průměrné hodnoty slyšitelné populací.

Ultrazvukové vlny o větších frekvencích, než je 10^9 Hz, se nazývají hyperzvuk. Hyperzvuk vyšší než 10^{13} Hz se nemůže šířit v běžných látkách, neboť vlnová délka je nižší než vzdálenost atomů v látkách.

Ultrazvuk je slyšitelný i pro některé živočichy, jako je delfín (maximálně 175 kHz), netopýr (maximálně 100 kHz), pes (maximálně 22 kHz), sleď (maximálně 180 kHz). Ultrazvuk se šíří přímočaře a jeho vlastnosti více odpovídají světlu, také pro něj platí zákon odrazu a lomu, dokáže se soustředit na jeden bod, proto se využívá i k zobrazování. Nejčastější využití ultrazvuku je v kapalinách, protože v atmosféře je silně pohlcován. Využívá se ve formě sonografie v lékařství, jako sonar k rybolovu a lokalizaci trosk, pro vojenské účely.

Infrazvuk je neslyšitelný, v blízké frekvenci tlukotu srdce je i pro člověka nebezpečný a díky omezení rozsahu sluchu člověka umožňuje například klidný spánek, protože neslyšíme vlastní krevní oběh.

2.1. Akustika

Akustika je obor fyziky, specifičtěji mechaniky, který se zabývá vlastnostmi zvukového vlnění, jeho vznikem, šířením a účinky na sluchové orgány. Neboli nauka o slyšitelném zvuku v přibližném rozsahu frekvencí 16 Hz a 20 kHz.

Akustika se dělí na:

akustiku fyzikální – zabývá se vznikem, šířením, odrazem zvuku a pohlcování v různých materiálech,

akustika fyziologická – jejím předmětem je vznik zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímání v uchu,

akustika hudební – cílem jsou zvuky a jejich kombinace s ohledem na potřeby zpěvu a hudby,

akustika stavební – hlavním záměry jsou ochrana před přílišným hlukem a vibracemi a zajištění nejvhodnějších akustických vlastností prostorů se zřetelem na jejich užívání,

elektroakustika – zabývá se záznamem, reprodukcí šíření zvuku pomocí elektrického proudu.

2.2. Základní pojmy:

Abychom mohli pracovat se zvukem, musíme si zavést určité pojmy:

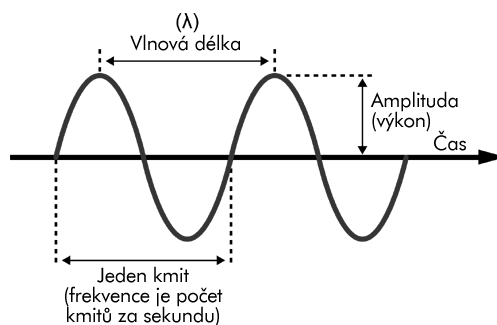
perioda je doba, kdy se těleso (bod) vrátí do stejné polohy a má opět stejný směr rychlosti, znak je T a jednotka s [sekunda],

frekvence je poměr počtu period T za čas t , znak je f a jednotka je Hz [hertz] $f = \frac{1}{T}$,

vlnová délka představuje vzdálenost, kterou urazí vlna za jeden kmit, znakem je řecké písmeno λ a jednotka je metr [m],

amplituda je maximální hodnota kmitu, značí se písmem A , jednotka je metr [m],

úhlová rychlost je vektorová veličina, která udává úhel opsaný průvodičem za jednotku času, znak ω a jednotkou je $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ [radián za sekundu] a je dán vztahem $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$.



Obrázek 1 - Zvuková vlna (5).

2.3. Zdroje zvuku

Zdrojem zvuku je jakékoliv kmitající těleso. Nejčastěji se využívá struna, píšťala, Helmholtzův rezonátor, lidský hlas, reproduktor a ladička.

Struna – pružný a soudržný drát natažený mezi dvěma pevnými body. Rychlost zvuku ve struně závisí na napětí struny a obvykle bývá menší než rychlost ve vzduchu.

Píšťala – vzduchové víry vznikají prouděním vzduchu kolem ostré hrany (o ret). Proudící vzduch vytváří za ostrou hranou víry, které vzduch rozechvějí a rozezvučí, tyto píšťaly nazýváme retné. Dalším zdrojem v píšťale může být kmitající jazýček, jenž rozechvěje proudícím vzduchem, tyto nazýváme jazýčkové.

Helmholtzův rezonátor – velká dutá nádoba s tenkým úzkým hrdlem. V dutině se rozkmitává vzduch z důsledku pružnosti vzduchu.

Lidský hlas – v hrtanu jsou dvě pružné blány (hlasivky), ty se při řeči napnou, mezi nimi se vytvoří malá štěrbinka a průchodem vzduchu z plic se hlasivky rozkmitají, tím i vzduch v hrtanu a ústní dutině, tímto způsobem se vytváří jednotlivé souhlásky v řeči. Samotná hláska je ale formována až ústní dutině pomocí jazyka, rtů a zubů.

Reproduktor – zvuk vzniká tak, že např. čtečka CD pošle elektrický signál do cívky, uložené v prstencové mezeře radiálního magnetu a ta signál zesílí. Elektrický proud uvede cívku do kmitavého pohybu, rozkmitá i membránu reproduktoru, která je pružně přichycena k cívce. Velká plocha membrány rozkmitá vzduch v okolí a z reproduktoru se rozezní hudba. Pro velmi kvalitní zvuk musí být membrána i cívka co nejlehčí, aby měly zanedbatelnou setrvačnost.

Další zdroje – zvuková ladička vytváří zvuk vibrací ramének. Frekvence ladičky závisí na rozměrech a pružnosti materiálu. Zvon je rozezníván údery těžkého srdce (vnitřní části zvonu). Úderem srdce do stěny těla se zvon rozechvěje. Seebeckova siréna funguje tak, že do rotujícího kotouče, který má po obvodě vyvrtané otvory, necháme proudit stlačený vzduch, ten proniká

periodicky otvory v kotouči a vydává intenzivní tón. Frekvenci vypočítáme ze vztahu $f = n \cdot N$, kde N je počet otvorů a n je počet otáček za jednotku času. Savartova siréna je kolo se zuby, na které naráží plíšek s frekvencí $f = n \cdot N$, kde N je počet zubů a n je počet otáček za jednotku času.

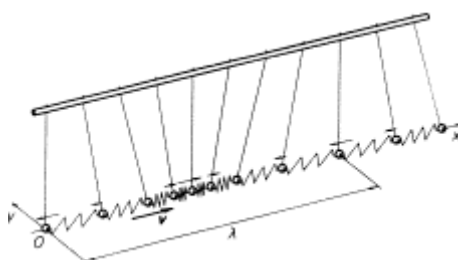
2.4. Šíření zvuku

Zvuk v plynech a kapalných látkách se šíří jen podélné postupné vlnění, ovšem v pevných látkách se může šířit jak podélné, tak i příčné postupné vlnění. Ve vakuu se zvuk nešíří vůbec.

Podélné kmity v tyči:

Tyč musí být pevná a pružná, u které dominuje jeden rozměr než zbylé dva, a tím je délka. Oproti struně se tyč rozkmitá bez působení vnějšího napětí. Podélné vlny jsou kmity které se šíří po směru podélné osy tyče. Podélné vlnění je zhušťování a ředění látek neboli kmitání částic ve směru šíření zvuku (viz Obrázek 2). Rychlost šíření podélných vln v tyči je dána vztahem

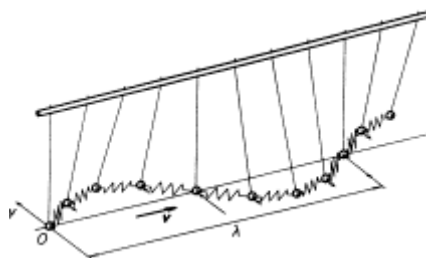
$c_{po} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, kde E je modul pružnosti v tahu a ρ je hustota tyče.



Obrázek 2 - Podélné vlnění (6).

Příčné kmity v tyči:

Zvuk kmitá kolmo k podélné ose tyče, a aby vznikl v tyči, musíme do ní udeřit kolmo na podélnou osu. Pro rychlost příčných vln je dán vztah $c_{př} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$, kde G je modul pružnosti ve smyku a ρ hustota tyče. Příčné vlny se šíří dvakrát pomaleji než podélné a vydávají značně nižší tón.



Obrázek 3 - Příčné vlnění (6).

Podélné vlny v tekutinách:

Vztah pro rychlost zvuku v kapalinách vychází ze vztahu rychlosti zvuku v tyči a je dán

vztahem $c_v = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$, kde C je modul objemové stlačitelnosti a ρ hustota kapaliny.

Podélné vlnění v plynu:

Taktéž vychází ze vztahu rychlosti zvuku v tyči a je dán vztahem $c_{pl} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$, kde κ je Poissonova konstanta, p je tlak plynu a ρ je hustota plynu.

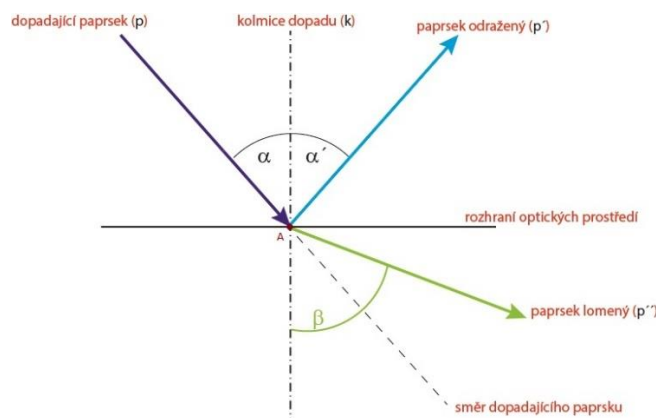
Rychlost zvuku není ovlivněna tlakem, frekvencí ani intenzitou vzduchu, z toho vychází, že frekvence je pro všechny zvukového vlnění je stejná. Je ovlivněna překážkami, kterými jsou odraz nebo ohyb zvuku. V kapalných, pevných a některých plynných látkách bývá rychlost zvuku vyšší než ve vzduchu.

Tabulka 1 - Rychlost zvuku v látkách (7, s.83)

Látka	Rychlost zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
Vzduch (0°)	331,82
Voda (25°)	1500
Rtuť	1400
Beton	1700
Led	3200
Dřevo	4000
Ocel	5000
Sklo	5200

2.5. Odraz, lom zvuku

Příkladem odrazu zvuku od rozsáhlé překážky je **ozvěna**. Jsou to dva po sobě jdoucí zvuky. Musí být mezi nimi časový rozdíl alespoň 0,1 s, to je doba, která je potřebná na vyslovení jedné slabiky. Zvuk urazí celkovou vzdálenost 34 m, což znamená, že pokud je překážka vzdálena 17 m, vzniká jednoslabičná ozvěna. S překážkou situovanou dál může vznikat i víceslabičná ozvěna. Je-li překážka vzdálena méně než 17 metrů, lidské ucho už zvuk nerozlišuje, a proto odražený zvuk splývá s původním, to se projeví prodloužením zvuku. Tento jev nazýváme **dozvuk**. Vlny se na rozhraní dvou prostředí odrážejí nebo procházejí, v nichž se vlny šíří jinou rychlostí. Úhel odrazu α' , který svírá s překážkou, je stejný jako úhel dopadu α , svíraném s dopadající plochou. **Zákon odrazu** říká, že úhel odrazu α' se rovná úhlu dopadu $\alpha \rightarrow \alpha = \alpha'$. Lom se projevuje změnou směru šíření zvuku při průchodu z prvního do druhého prostředí. V prvním prostředí se šíří zvuk rychlostí v_1 a druhém v_2 za podmínky, že $v_1 > v_2$. **Zákon lomu** říká, že poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí stálá veličina a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Nazývá se index lomu vlnění n pro daná prostředí. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu. $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$



Obrázek 4 - Odraz a lom zvuk (9).

2.6. Dopplerův jev

Pokud se pohybuje zdroj nebo přijímač, dochází ke změně vnímané frekvence u přijímače oproti klidnému stavu zdroje i přijímače. Zdroj vyzařuje sférické vlny, které se zhušťují směrem pohybu zdroje (před zdrojem), tím se zkracuje vlnová délka λ a zvětšuje frekvence f . Naopak za zdrojem se sférické vlny zředňují, vlnová délka λ se zvětšuje a frekvence f zmenšuje. Viz obrázek č. 5. Když je přijímač oproti zdroji v pohybu, tak přijímač vnímá frekvenci: $f_1 = \left(1 \pm \frac{v_p}{v_v}\right) f$, kde v_p je rychlost pohybu přijímače, $v_v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, f je frekvence zdroje. Kladná hodnota je přiblížení a záporná oddálení. Pokud je zdroj v pohybu naproti přijímači, vnímaná

frekvence je dána vztahem: $f_2 = \frac{v_v}{v_v \pm v_z} f$, kde v_z je rychlost pohybu zdroje. Záporná hodnota je přiblížení a kladná oddálení zdroje od přijímače.

2.7. Použité prameny

(2, s. 483-488) (2, s. 460-462) (2, s. 465-467) (2, s. 468-469) (2, s. 218); (4); (5); (6, s. 81-82) (7, s. 90); (8, s. 27); (9) (10 a); (11, s. 229-230) (11, s. 233-234) (11, s. 237-238); (12, s.71-73); (13, s.100-102) (13, s. 146-147)

3. Zpracování zvuku

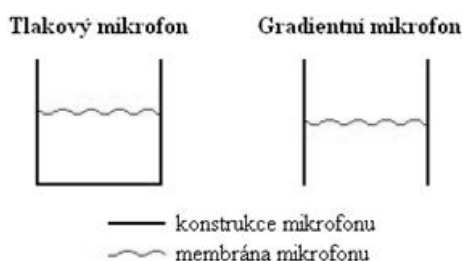
Popis druhů mikrofonů, reproduktorů, Vernieru a programů, které byly využity při měření laboratorních prací.

3.1. Mikrofony

K měření zvuku je často potřeba mikrofonu. Většina mikrofonů obsahuje membránu. Membrána je tenké vrstva pohybující se podle proměnlivého tlaku zvuku. Dopadající vlny na membránu se mění na elektrický proud.

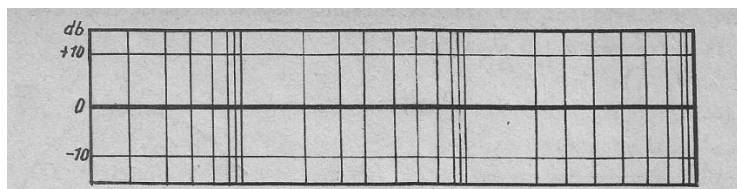
Existuje mikrofon tlakový a gradientní. **Tlakové mikrofony** fungují tak, že vyvolaný tlak, který je způsobený akustickým tlakem, působí jen na jednu stranu membrány. Její maximální výchylka neboli amplituda, nezávisí na vzdálenosti ani na směru zdroje zvuku, ale na akustickém tlaku. K pevné konstrukci mikrofonu je připevněná membrána a na tu dopadá pouze z jedné strany zvuková vlna. Deformace membrány je způsobena akustickým tlakem. Má kruhovou membránu na krajích upevněnou a se značnou setrvačností. Akustická tuhost mikrofonu je větší než okolí. **Gradientní mikrofony** naopak fungují tak, že na obě strany membrány dopadá akustický signál, tudíž výchylka membrány závisí na rozdílu akustického tlaku, ale ne na jeho absolutní hodnotě. Čím vyšší výchylka membrány, tím je větší rozdíl akustického tlaku a naopak. Gradientní mikrofon má dva přístupy k membráně, přední a zadní vstup. Pokud přichází zvuková vlna z boku, tak se rozdělí a dopadne na obě strany membrány. Hodnota výchylky je stejná z obou stran, a tudíž membrána zůstává v klidu a nezaznamená žádný zvuk. Zde je membrána volná a pohybuje se stejně jako částice v okolí

Rozdíl konstrukce mezi tlakovým a gradientním mikrofonem je znázorněný na obrázku č. 5.



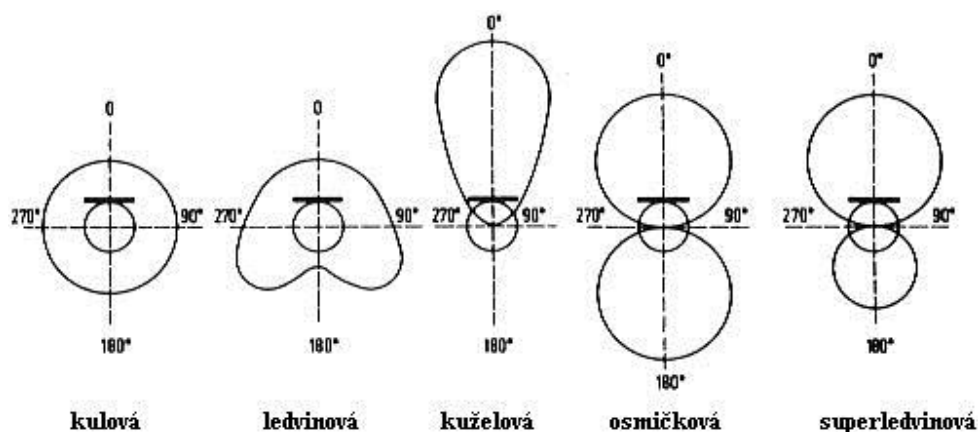
Obrázek 5-konstrukce mikrofonů (10 b)

Frekvenční charakteristika ideálního mikrofonu je křivka citlivosti vůči akustickým frekvencím a má být rovnoběžná s osou frekvencí (Obrázek 6).



Obrázek 6- Charakteristika ideálního mikrofonu (13, s.235)

Směrová charakteristika informuje o citlivosti mikrofonu v různých směrech. Ideálně by měl přijímat ze všech stran, tomu odpovídá kulová směrová charakteristika. Ta je typická pro tlakové mikrofony.



Obrázek 7 - Směrová charakteristika mikrofonu (10 b)

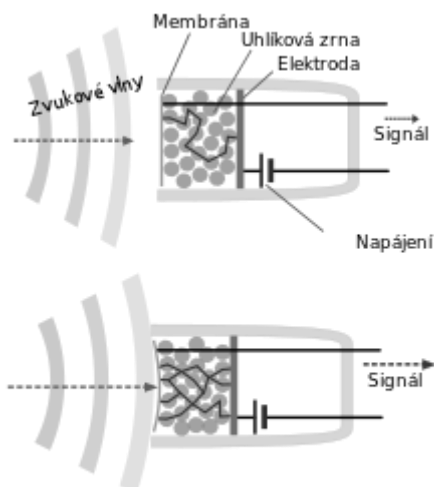
Druhy mikrofonů:

3.1.1. Odporové mikrofony (uhlíkové)

Uhlíkový mikrofon je vzorem tlakového mikrofonu a funguje na principu stlačování uhlíku membránou, a tím se mění odpor v uhlíku a napětí (viz obrázek 8.). Z jedné strany jsou vrstvy uhlíkových zrněk ohrazeny pružnou kovovou membránou a z druhé zvlněnou uhlíkovou destičkou. Dopadající zvuková vlna rozkmitá membránu, uhlíková zrna se komprimují, tlak se mění a tím i elektrický odpor zrněk.

V primárním obvodu transformátoru dochází ke změně proudu ze stejnoměrného na proud modulovaný, což je stejnoměrný proud se střídavou složkou. Tudíž proud se mění díky změnám odporu, jež jsou závislé na amplitudě dopadajícího zvuku. Proto časový průběh změn proudu odpovídá časovému průběhu zvuku, který tento proud vyvolal. Modulovaný proud z primárního obvodu indikuje v sekundárním obvodu transformátoru modulovaný střídavý proud nízké frekvence, takže proud v transformátoru může být zvětšen, a tudíž není konstantní. Mají nerovnou frekvenční charakteristiku a jsou velmi citlivé, nekvalitní a zkreslují zvuk. Jejich pohybem vydávají chřastivé až šumivé zvuky, proto bývaly připevněny do pouzder a

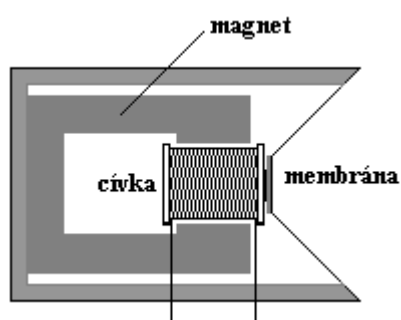
odpružené. Dnes se využívají v telefonních zařízeních nebo v přístrojích, kde není potřeba velká kvalita zvuku.



Obrázek 8 - odporový mikrofon (10 b)

3.1.2. Elektrodynamické mikrofony

Patří do druhu gradientního mikrofonu. Tento mikrofon využívá elektromagnetickou indukci (viz obrázek 9). V magnetickém poli, které je tvořeno permanentním magnetem, se pohybuje lehká cívka nebo příčně zvlněný hliníkový pásek. Cívka či pásek jsou spojeny s pružnou membránou, na kterou dopadají zvukové vlny. Při vlnění se v cívce detekují střídavé proudy v taktu akustických změn. Podporou zesilovače se zvětší amplituda proudu a dostatečným výkonem se přenáší do dalších částí sdělovací soustavy. Dynamické mikrofony jsou méně citlivé a více odolné proti poškození než kondenzátorové. Jsou dobré pro hlasitý zpěv, živá vystoupení, pro veřejné shromáždění, apod.



Obrázek 9 - elektrodynamický mikrofon (10 b)

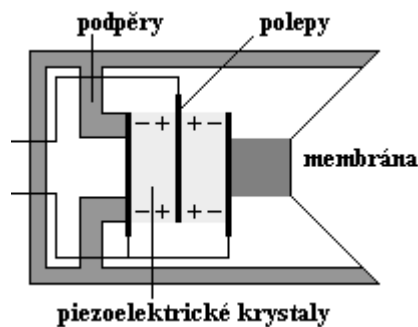
3.1.3. Elektromagnetické mikrofony

Elektromagnetický mikrofon funguje na podobném principu jako elektrodynamický mikrofon s rozdílem, že u elektromagnetického mikrofonu není cívka spojena s membránou. Magnetický

tok procházející cívkou se mění díky pohybu membrány. V cívce se indukuje nízkofrekvenční signál. Výhody elektromagnetického mikrofону jsou malé rozměry, nízké ceny. Nevýhodou je, že jsou citlivé jen pro nízké frekvence. To je dělá ideálními pro vyšetření zvuků v lidském těle.

3.1.4. Krystalové (Piezoelektrické) mikrofony

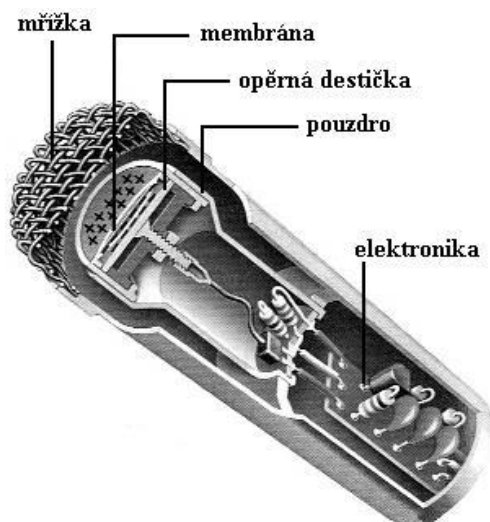
Fungují na piezoelektrickém jevu. Na piezoelektrické destičky působí tlak vzniklý membránou, na kterou dopadají zvukové vlny. Na elektrodách destičky vlivem tlaku vzniká různé napětí a tím i elektrický proud, který protéká zbytkem částí zvukové aparatury. Krystalové mikrofony mají velkou impedanci a citlivost, ale jsou již méně kvalitní.



Obrázek 10 - krystalový mikrofón (10 b)

3.1.5. Elektrostatické mikrofony (kondenzátorové)

Patří mezi tlakové mikrofony. Představme si dvě krystalické desky, většinou ze Seignettovy soli, které jsou z obou stran pokované. Mezi krystalickými deskami je izolace. Na jednu desku kondenzátoru v mikrofónu dopadají zvukové vlny, tato deska představuje membránu. V kondenzátoru se shromažďuje elektrický náboj. Druhá deska kondenzátoru je pevná elektroda, ke které je připojený stejnoměrné polarizované napětí. Membrána se rozkmitá změnou akustického tlaku, z důsledku toho se mění vzdálenost desek kondenzátoru, tudíž i kapacita. Pomocí rezistoru je zaručeno pomalé vyrovnávání náboje při změně kapacity a zároveň u zdroje polarizačního napětí zvýšení vnitřního odpor. Pomocí elektretu získáme náboj na kondenzátoru, nebo díky zdroji stejnoměrného polarizovaného napětí. Elektret je dielektrický materiál nesoucí permanentní elektrický náboj a zde je nanesen na jednu elektrodu. Charakteristika je přibližně souběžná s osou. Elektrostatické mikrofony jsou vysoce citlivé, mají velmi malé zkreslení, a stabilní vlastnosti. Patří mezi nejkvalitnější. Využívají se pro profesionální zápis zvuku, jako je ve studiích a při měřeních.



Obrázek 11 - kondenzátorový mikrofon (10 b)

3.1.6. Použité prameny

(10 b) (13, s 234-241) (14, s151-164)

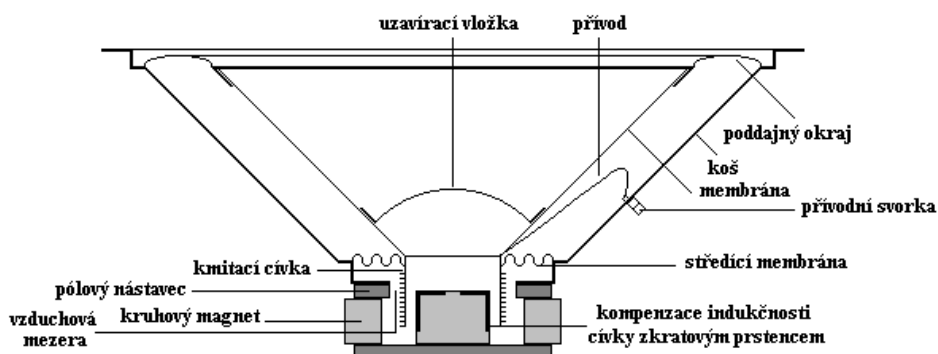
3.2. Reprodukory

Dělíme podle způsobu vyřazování na přímo vyzařující a na nepřímo vyzařující. **Přímo** vyzařující reproduktory fungují tak, že kmitající membrána vyzařuje akustickou energii. Membrána navazuje na prostředí, do kterého je energie přemísťována. **Nepřímo** vyzařující reproduktor má mezi membránou, která kmitá, a elektroakustickým převodníkem vložený zvukovod. Zvukovod zvětšuje zatížení membrány. Zvukovodem rozumíme uzavřený prostor specificky vybavený reflexními stěnami, kde jeden rozměr dominuje nad ostatními.

Další dělení je podle konstrukce:

3.2.1. Elektrodynamické reproduktory

Skládá se z kmitající cívky upevněné k membráně v permanentním magnetickém poli. Cívka s membránou je umístěna v pružných závěsech. Střídavý proud je převáděn z nízkofrekvenčního zesilovače a vychyluje cívku. Elektrický kmitočet proudu odpovídá frekvencím načteným ze zdroje nahrávky. Podstatnou vlastností reproduktoru je průměr membrány, neboť kmitočty nižší než 100 Hz nelze vyzářit malou membránou.



Obrázek 12 - Elektrodynamický mikrofon (10c).

3.2.2. Elektromagnetické reproduktory

Elektromagnetické reproduktory se v dnešní době nevyužívají. Pouze v jednodušším provedení slouží v mobilních telefonech jako sluchátko. Součástí telefon je plochá škatulka, obsahující silně magnetickou podkovu. Kolem pólu magnetu je obtočena cívka c_1 a c_2 a uzavřená ferromagnetickou membránou. Těsně nad magnetem je připevněný k ferromagnetický jazýček, který vyvolává zvýšení mikrofonního proudu v cívce. Membrána je spojena s jazýčkem a lesklou spojkou a tvoří s jazýčkem spřaženou kmitající soustavu.

Využívají silového působení elektromagnetu na ferromagnetickou kostru (kotvu). Magnetické pole podle přiváděného střídavého proudu kotvu rozkmitá, a protože ta je spojena třmenem s membránou vyvolá zvuk reproduktoru.

3.2.3. Piezoelektrické reproduktory

Využívají piezoelektrický jev. Působením elektrického pole vzniká napětí, a to vyvolává síly, které deformují určité druhy materiálu, jako jsou krystaly, Seignettova sůl, speciální keramika, plasty atd. Deformace se převede na výchylku kmitajícího systému. Nejčastěji se využívají keramické měniče. Piezoelektrické reproduktory jsou nejčastěji využívané, ale jejich kvalita je nižší.

3.2.4. Elektrostatické reproduktory (kondenzátorový)

Fungují na principu odpuzování a přitahování nabitých elektrických destiček. Jedna elektroda kondenzátoru je pevná a druhá pohyblivá. Membrána je naproti pevné elektrodě, a mezi nimi je napojeno stejnoměrné polarizační napětí. Kmitání membrány způsobuje nízkofrekvenční signál. Vlastnosti reproduktoru závisí na předpětí, frekvenčním rozsahu a na membráně. Využívají se nejčastěji na vysoké tóny.

3.2.5. Širokopásmové reproduktory

Problematika reprodukce je u kmitočtů, které jsou na ohraně slyšitelného zvuku. Nižší frekvence jsou pouze naznačeny a vysoké kmitočty jsou vyzařovány malými horničkami napojenými na kmitací systém a (nebo) jako vlastními kmitými membrány. Vysoké frekvence ve finálním zvuku jsou obvykle slyšitelné, nicméně mohou být vyzařovány membránou nepřímo a neodpovídají kmitům cívky. Zvuk takto vyvíjený bývá fázově posunutý, což je v podstatě parazitní vyzařování. U běžného reprodukčního zařízení to může často způsobovat zkreslení.

3.2.6. Koaxiální reproduktory

Jeden magnet upevněn ke dvěma kmitajícím systémům, a to k výškovému a basovému. Výškový systém je umístěn vzadu a zvuk je veden zvukovodem. Případně středová část magnetu je prodloužena a výškový kmitací systém je umístěn vpředu (automobilové reproduktory). Koaxiální reproduktory s výškovým kmitacím systémem vzadu více směřují, protože konická membrána reproduktoru působí jako horna.

3.2.7. Použité prameny

(10c) (14, s.36-64)

3.3. Vernier LabQuest 2

Je senzor určený pro měření nejen zvukových hodnot ve fyzice, biologii, chemii a jiných oborech. Lze s ním měřit i v terénu, zdroj energie je baterie, nebo jej lze zapojit k osobnímu počítači. Je lokalizován i v českém jazyce. Displej má barevný a dotykový. Je vybaven integrovanými senzory, jako jsou GPS, mikrofón, osvětlení, 3D akcelerometr. Zobrazuje okamžitě výsledky, tímto umožňuje následnou analýzu (zjišťovat a odečítat hodnoty, zvětšovat grafy atd.). Je možnost sdílení změřených hodnot do telefonů, tabletů či počítačů pomocí připojení k Wi-Fi a aplikace LabQuest Viewer, která je stažitelná na oficiálních stránkách. Dále Vernier obsahuje stopky, kalkulačku, periodickou tabulku prvků a jiné.

3.3.1. Použité prameny

(15 a)

3.4. Program Audacity

Program Audacity je zvukový rekordér. Audacity je kompatibilní s operačními systémy Microsoft Windows, Mac OS X, GNU/Linux a dalšími. Byl vyvinut skupinou dobrovolníků jako open source, takže je zadarmo, zdrojový kód je volně přístupný a mohou se v něm volně provádět modifikace.

Funkce Audacity:

- Záznam zvuku, i pro více kanálů (využití více mikrofónů)
- Ořezávání zvuku
- Zobrazování zvuku v grafu, hodnoty zvuku
- Import a export formátu zvuku (MP3, WAV, AIFF apod.)
- Úprava zvuku – mixování, kopírování, vkládání, označování, zeslabování hlasitosti, odstraňování šumu, stříhání a jiné.

3.4.1. Použité prameny

(16)

3.5. Program SigView

SigView je program pro analýzu zvuku. Má širokou škálu nástrojů pro analýzu, statistických funkcí, a komplexní vizualizační systém. Tento program je distribuován jako shareware (zkušební verze), což znamená, že si program můžete stáhnout v plné verzi na 21 dní. Pokud se pak uživatel rozhodne na dále užívat tento program, musí si zakoupit licenci.

Funkce SigView:

- Import/export – WAV, MP3, ASCII, WMA, AU, aj.
- Optimalizovaný algoritmus FFT - lze nastavovat vlastní parametry
- Filtrování signálů
- Statistické funkce – držení špiček, zprůměrování hodnot, vyhlazování zvuku atd.
- Pokročilé zobrazování – neomezené překryvy, kopírování, vkládání, zoom atd.

A další

3.5.1. Použité prameny

(16)

4. Praktická část

V praktické části se budeme věnovat různým způsobům měření rychlosti zvuku, která jsou vhodná na výuku do středních škol, tak i na výuku do základních škol. Praktika se zaměřují na porovnání přesnosti různých měření, závislosti na teplotě apod. Přímé a nepřímé metody a které z nich jsou přesnější. Některé úlohy jsou odměřené se žáky gymnázia ročníků kvarta, kvinta osmiletého studia a septima čtyřletého studia.

Každý pokus je strukturován. Na začátku jsou vypsány potřeby důležité k měření. V další části se věnujeme teorii a postupu. Na konci jsou změřené hodnoty, zhodnocení práce dětí a doporučení, a od kterého ročníku je vhodný zadat žákům. Získané hodnoty porovnááme s tabulkovými.

Poslední čtyři praktika bohužel nebyla odzkoušena. Nicméně jejich náplň můžeme považovat za velmi poutavou a vhodnou nejen kvůli aktivní činnosti žáků, ale i jako inspiraci pro další interaktivní laboratorní práce.

4.1. Stanovení rychlosti zvuku pomocí osciloskopu

Úkolem je stanovit rychlost zvuku ve vzduchu s pomocí osciloskopu.

Potřeby: Nízkofrekvenční generátor AO 3001 C, osciloskop OS-5020, trubice s mikrofonem a reproduktorem, zesilovač se zdrojem, metr, teploměr

Teorie: Rychlost šíření zvukových vln v plynech je dán vztahem $v = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$, kde ρ je hustota plynu a $\kappa = -V \frac{dp}{dV}$ je modul objemové pružnosti. Šíření zvuku je adiabatický děj ($pV = \text{konst.}$ κ), z důvodů rychlého stlačování a rozpínání plynu při procházení zvukové vlny. Spojením stavové rovnice ideálního plynu a uvedených vztahů dostaneme vztah pro rychlost zvuku $v =$

$$\sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa R T}{M}} = \sqrt{\frac{\kappa R \cdot 273,15}{M} \left(1 + \frac{t}{273,15}\right)} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273,15}}$$

V tomto vztahu κ je Poissonova konstanta, p je tlak, R univerzální plynová konstanta, M molární hmotnost, T absolutní teplota (Kelviny) a t teplota ve stupních Celsia. Pro měření rychlosti zvuku se obvykle používají rozdílné nepřímé metody, kdy se měří vlnová délka λ a frekvence f a rychlost v se určí podle známého vztahu $v = \lambda \cdot f$.

Postup měření: Změříme vlnovou délku λ zvukové vlny pro frekvence 600 Hz, 1000 Hz, 1400 Hz, 1800 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz a 4000 Hz. Pro frekvence do 1800 Hz i včetně provedeme měření „po celé λ “. Nastavíme požadovanou frekvenci. Přesuneme mikrofon do výchozí polohy k reproduktoru. Při měření „po celé λ “ hledáme posouváním mikrofonu takovou jeho polohu, při které se na obrazovce osciloskopu objeví úsečka procházející jen jedním způsobem (např. procházející jen 1. a 3. kvadrantem). Po nalezení této polohy posouváme dál mikrofonem, dokud se nám nezobrazí stejná úsečka ve stejných kvadrantech. Vzdálenost těchto dvou poloh si změříme a zapíšeme do tabulky do sloupce λ . (Pro výpočet rychlosti zvuku si převed'te na metry) Pro každou frekvenci f spočteme rychlost zvuku v .

Doplňující úlohy: Pro vyšší frekvence f najdeme pět (nebo i více) vlnových délek λ na jedné rouři a vypočítáme rychlost zvuku v . (Změřenou hodnotu musíme vydělit počtem λ . Pracujeme s průměrnou hodnotou vlnové délky λ .)

Alternativně hodnotu λ můžeme také hledat podle sluchu – 2 minima/maxima, nezapomeňme, že takto hledaná hodnota je $\frac{\lambda}{2}$. Které měření je přesnější a proč?

Výsledky:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žákyněmi z gymnázia ze 4. a 5. ročníku (kvarta, kvinta).

Tabulka 2- Výsledky měření osciloskopem.

f [Hz]	λ [m]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
466,73	0,634	295,91
572,84	0,609	348,86
605,50	0,573	346,95
Získaná hodnota c	330,57 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$	344,30 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
Hodnota z tabulky (20 °C)	343,80 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	

Doplňující úloha:

Tabulka 3 - Výsledky měření osciloskopem – doplňující úloha.

f [Hz]	$\lambda/2$ [m]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
256,7	0,635	326
426	0,41	349,32
697,3	0,225	313,785
Získaná hodnota c	329,70 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	

4.1.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota vyšla 330,57 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ze vztahu $c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21$ °C, dostali hodnotu $v = 344,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Získaná hodnota je o 13,231 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ menší a v pořadí **páté** nejpresnější měření. V doplňujícím úkolu naměřili rychlost $v = 329,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a hodnota je o 14,101 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ menší a v pořadí je tato úloha **šestá** nejpresnější. Pro výpočet rychlosti každého měření jsme využili vzorec $v = \lambda \cdot f$, který je již výše uveden (v teorii laboratorní práce). Největší chyby nastávaly při prvním měření, kdy vyšla rychlost $v = 295,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. První hodnotu bych vyškrtla z výpočtů průměrné hodnoty z důvodů, že se děti seznamují s přístroji a postupem měření úkolu. Ovšem další důvody pro nepřesnost získané hodnoty mohly způsobit individuální sluch člověka, citlivost přístroje na nastavení přesného obrazce, časté zaokrouhlování výsledků, projíždění tramvaje v okolí učebny a hluk spolužáků v místnosti. Žáky tato laboratorní práce značně nezaujala. Doporučila bych ji určitě na střední školu a nejlépe do 3. a 4. ročníku (septima, oktáva).

4.1.2. Použité prameny

(18, s.166) (19, s.42)

4.2. Měření rychlosti zvuku ve vzduchu rezonanční metodou

Úkolem je vymežit rychlost zvuku ve vzduchu při pokojové teplotě rezonanční metodou.

Potřeby: 2 trubice různých délek, mikrofon, nízkofrekvenční milivoltmetr, tónový generátor, číslicový měřič frekvence, délkové měřítko, držák trubic, reproduktor, spojovací vodiče, teploměr

Teorie: Základem rezonanční metody pro měření rychlosti zvuku je rezonance vzduchového sloupce v trubici, která je na jednom konci neprodyšně uzavřena. Při rezonanci se v trubici vytvoří stojaté vlnění. Při praktickém provádění tohoto pokusu však zjistíme, že určitý vliv má tzv. okrajová chyba. Vlivem této chyby nevzniká kmitna na okraji trubice, ale až ve vzdálenosti d od okraje. Započteme-li tento vliv, můžeme pro rezonanci odpovídající počtu čtvrt vln k ($k = 1, 3, 5, 7, 9$ atd.) s frekvencí f_k a při délce trubice L psát $k \cdot \frac{\lambda_k}{4} = \frac{k \cdot c}{4 \cdot f_k} = L + d$ kde λ_k je vlnová délka rezonance a c je rychlost zvuku v trubici. Abychom mohli vypočítat neznámou v rovnici, c , musíme pro dvě trubice různých délek (L_1 a L_2) provést dvě měření, při kterých zjistíme příslušná pořadí rezonancí (k_1 a k_2) s odpovídajícími frekvencemi f_{k_1} a f_{k_2} . Pak platí

$$c = \frac{4 \cdot (L_1 - L_2) \cdot f_{k_1} \cdot f_{k_2}}{k_2 \cdot f_{k_1} - k_1 \cdot f_{k_2}}$$

Postup při měření: Změříme délky L trubice. Do držáku vložíme nejdelší trubici. Vypočítáme přibližně frekvenci základní rezonance s $k = 1$. Použijeme vzorec $f = \frac{c}{4 \cdot l} \cdot k$, kde $c = 331,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vypočítanou frekvenci pro $k = 1$ si nastavíme na generátoru a hledáme v jejím okolí rezonanci. Orientačně se můžeme řídit sluchem, s co největší přesností pak nastavíme frekvenci podle maxima na milivoltmetru. Upravíme přitom rozsah milivoltmetru a amplitudu na generátoru tak, aby maximum leželo v poslední třetině stupnice. Hodnotu zapíšeme, jen když se oba údaje budou shodovat v rámci chyby čítače a kolísání frekvence generátoru (0,2 Hz). Během měření může být totiž údaj zkreslen rušivými impulzy z okolí. Pak hledáme všechna další rezonanční maxima a měříme stejným způsobem frekvence alespoň pro $k = 3, 5, 7, 9, 11, 13$. Je-li průběh některé rezonance příliš *plochý* nebo má rezonance dokonce dva vrcholy, poznamenejme si to. Takovou frekvenci pak při dalším zpracování úlohy nepoužíváme. Postup opakujeme pro další dvě trubice. Nakonec vypočítáme rychlost zvuku c .

Výsledky:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žáky z gymnázia ze 7. ročníku (septima).

Tabulka 4- Měření rezonanční metodou – frekvence rezonancí.

L [cm]	f_1 [Hz]	f_3 [Hz]	f_5 [Hz]	f_7 [Hz]	f_9 [Hz]	f_{11} [Hz]	f_{13} [Hz]
80	103	309	515	721	927	1133	1339
60	135	405	675	945	1215	1485	1755

Tabulka 5- Měření rezonanční metodou - získané hodnoty pro výpočet rychlosti zvuku.

	L_2 [m]	L_1 [m]	f_{k1} [Hz]	f_{k2} [Hz]	k_1	k_2	c [m · s ⁻¹]
1	0,8	0,6	309	1485	3	11	347,625
2	0,8	0,6	515	675	5	5	347,625
3	0,8	0,6	927	1485	9	11	347,625
4	0,8	0,6	1339	905	13	3	347,625
5	0,8	0,6	721	135	7	1	347,625
Získaná hodnota c		347,625 m · s ⁻¹					
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$		344,30 m · s ⁻¹					
Hodnota z tabulky		343,801 m · s ⁻¹					

4.2.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota vyšla 347,625 m · s⁻¹. Ze vztahu $c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21$ °C, dostali hodnotu $v = 344,30$ m · s⁻¹. Rozdíl mezi získanou hodnotou a tabulkovou je o 3,824 m · s⁻¹ a je to **druhé** nejpřesnější měření. Tato laboratorní práce, je jedna z nepřesnějších. Pro měření můžeme použít i více trubek o různých délkách. Pro výpočet byly použity vzorce $f = \frac{c}{4 \cdot l} \cdot k$ a

$$c = \frac{4 \cdot (L_2 - L_1) \cdot f_{k_1} \cdot f_{k_2}}{k_2 \cdot f_{k_1} - k_1 \cdot f_{k_2}}$$

Chyby mohly nastat rušením hluku z okolí, jako je například projíždějící tramvaj v ulici nebo zvuk z vedlejšího měření od jiné skupiny. Ovlivňujícím faktorem taktéž může být citlivost stroje při manipulaci a individuální sluch měřícího žáka. Jak je již uvedeno v teorii, vliv na výsledek také má okrajová chyba, kdy kmitna nevzniká na okraji trubice, ale až ve vzdálenosti d za okrajem. V tomto případě to nemělo být větší než 2 cm od kraje.

4.2.2. Použité prameny

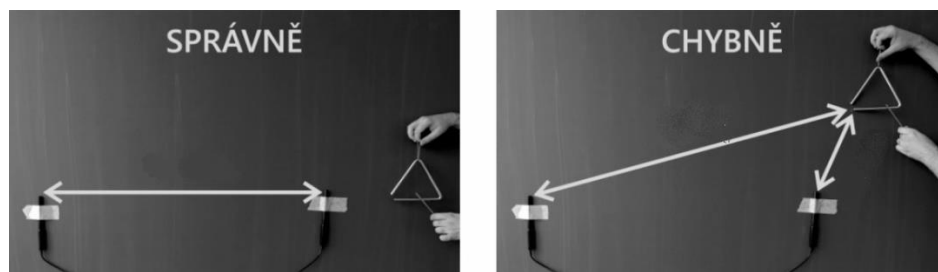
(11, s.117) (20)

4.3. Určení rychlosti zvuku pomocí Audacity

Úlohou je stanovit rychlost zvuku pomocí softwaru Audacity.

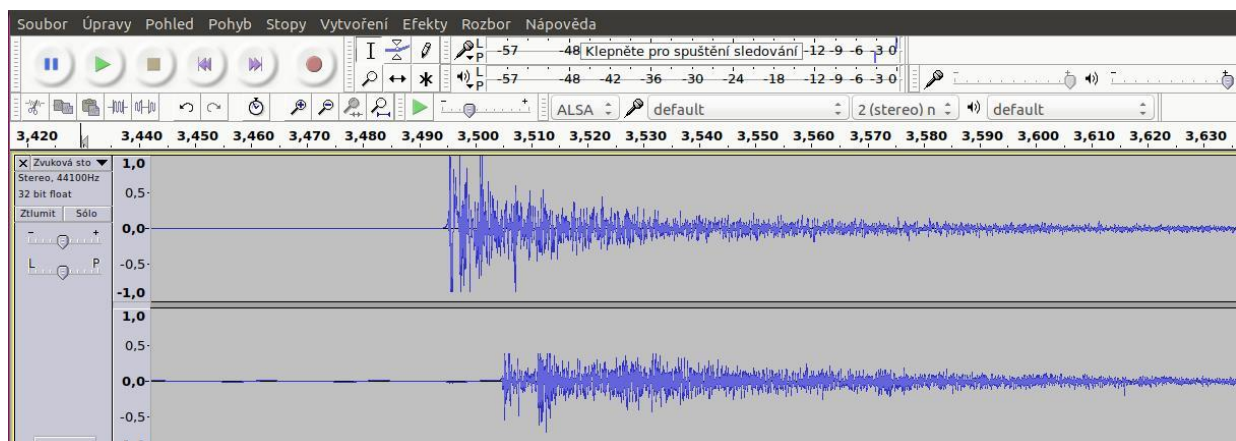
Potřeby: dva mikrofony, PC (notebook) se softwarem Audacity, metr, zdroj zvuku (tlesknutí, triangl aj.), lepicí páska, teploměr

Postup měření: Notebook zapojíme do elektrické sítě a zapneme. Po zapnutí připojíme mikrofony a připevníme je páskou tak, aby jejich konce byly od sebe 5 m, alternativně je umístíme do stojanů. V softwaru Audacity nastavíme hodnoty potřebné k měření a připravíme na nahrávání. Spustíme měření a tleskneme (cinkneme do trianglu. Záleží, co je k dispozici.) u jednoho z mikrofonů. Aby byl rozdíl opravdu 5 m, musí tlesknutí i oba mikrofony ležet v přímce (viz obrázek 13).



Obrázek 13 – Ukázka správného a špatného měření (15b).

Po ukončení měření se objeví dva grafy (viz obrázek č. 14) s naměřenými hodnotami a z grafů si запиšeme dvě souřadnice a to τ_1 a τ_2 , kde τ_1 je čas počátku zvuku z nejbližšího mikrofону od zdroje zvuku a τ_2 je čas počátku zvuku ze vzdálenějšího mikrofónu od zdroje zvuku. Postup opakujeme celkově 10krát (nebo podle časové náročnosti hodiny).



Obrázek 14 – Graf zachyceného zvuku oběma mikrofóny (vlastní screenshot monitoru počítače)

Rozšiřující úloha

Postup měření provedeme i ve vodě. Ovšem musíme ochránit mikrofony před vlhkem a zároveň nesmíme ovlivnit jejich vlastnosti. Na ochranu použijeme nafukovací balónek. Pod vodou je nejlepší pro zdroj použít cinknutí dvou lžiček. Rychlost zvuku ve vodě spočítáme vztahem

$$v_{vo} = \frac{s}{\Delta\tau}$$

Výsledky měření:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žákyněmi z gymnázia ze 4. a 5. ročníku (kvarta, kvinta).

Tabulka 6 - Měření pomocí programu Audacity.

Číslo měření	$\Delta\tau$ [s]	s [m]	v [m.s ⁻¹]
1	0,015	5	333,3
2	0,015	5	333,3
3	0,013	5	384,62
Získaná hodnota c	350,41 m . s ⁻¹		
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$	344,30 m . s ⁻¹		
Hodnota z tabulky	343,801 m . s ⁻¹		

4.3.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota vyšla 350,41 m . s⁻¹. Ze vztahu $c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21$ °C, dostali hodnotu $v = 344,30$ m . s⁻¹. Získaná hodnota je o 6,609 m . s⁻¹ větší a v pořadí **čtvrté** nejpresnější měření. Pro výpočet rychlosti zvuku použijeme vztah $v = \frac{s}{\Delta\tau}$, kde $\Delta\tau$ je rozdíl časů od zachycení zvuku mikrofony neboli čas, který urazil zvuk od jednoho mikrofonu k druhému a je dán vztahem: $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$. Největší chyba nastala při třetím měření, kdy vyšla rychlost $v = 384,62$ m . s⁻¹. Příčinou chyby byla žákyně držící zdroj zvuku. Ta jej umístila tak, že zdroj zvuku a mikrofony nebyly v jedné přímce. Další chybu měření mohla způsobit kvalita mikrofonů a hluk z okolí.

Rozšiřující úloha by měla ukázat žákům rozdílnou velikost rychlosti zvuku v plynech a v kapalinách. Měření ve vzduchu by mělo vycházet kolem hodnoty 343 m . s⁻¹ a ve vodě kolem 1300 m . s⁻¹.

Úloha žáky zaujala díky fyzické aktivitě a práce na notebooku. Laboratorní práci bych doporučila do 9. třídy základních škol (gymnázium kvarta) a na střední školu celkově, jako obohacení výuky, kdy žáci ocení fyzickou aktivitu při hodině.

4.3.2. Použité prameny

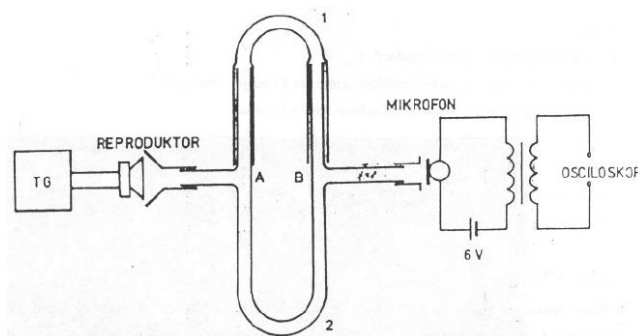
(15 b) (21)

4.4. Měření rychlosti zvuku pomocí Quinceho trubice

Úlohou je určit rychlost zvuku ve vzduchu pomocí Quinceho trubice.

Pomůcky: Tónový generátor, reproduktor, skleněná trubice, délkové měřidlo s přesností na mm, mikrofon, zesilovač, voltmetr, Quinceho trubice, transformátor baterie, teploměr

Teorie: V Quinceho trubici (viz Obrázek 15) se zvuk rozdělí v místě A do dvou zvukovodů, první je proměnné a druhý pevné délky. Subjektivně nebo elektroakustickým snímačem sledujeme výsledek interference obou vlnění v části B. Hledáme rozdíly délek obou zvukovodů pro maxima intenzity zvuku. Rozdíl délky proměnného zvukovodu při dvou po sobě následujících maximech a minimech je roven vlnové délce zvuku. Při měření zpravidla určujeme minima intenzity zvuku, protože jejich určení je přesnější než u maxim. Měření je vhodné pro zvuky vyšších kmitočtů. Pro nízké kmitočty by zařízení muselo mít velké rozměry.



Obrázek 15 – Obvod zapojené Quinceho trubice (22).

Postup měření: Nastavíme si frekvenci f (4 kHz a výše). Posouváním volné části hledáme vzdálenosti dvou minim. Zjištěnou vzdálenost mezi minimy musíme vynásobit dvěma (vzdálenost je na obou dvou stranách trubice). Vypočítáme rychlost pomocí vzorce $v = \lambda \cdot f$.

Výsledky:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žáky z gymnázia ze 7. ročníku (septima).

Tabulka 7 - Měření pomocí Quinceho trubice – žáci septima.

Číslo měření	f [Hz]	$\lambda_{\min 1}$ [mm]	$\lambda_{\min 2}$ [mm]	$\Delta \lambda$ [m]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
1	4000	20	50	0,06	240
2	6269	40	65	0,05	313,2
3	8534	17	38	0,042	358,4
4	10279	21	36	0,03	308,22
Získaná hodnota c		304,96 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žákyněmi z gymnázia ze 4. a 5. ročníku (kvarta, kvinta).

Tabulka 8 - Měření pomocí Quinceho trubice – žákyně kvarta, kvinta.

Číslo měření	f [Hz]	$\lambda_{\min 1}$ [mm]	$\lambda_{\min 2}$ [mm]	$\Delta \lambda$ [m]	v [m.s ⁻¹]
1	4060	18	10	0,082	332,92
2	4608	16	92	0,076	350,21
3	4830	12	88	0,076	367,07
4	5030	24	88	0,064	321,92
Získaná hodnota c		343,03 m . s ⁻¹			
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$		344,3 m . s ⁻¹			
Hodnota z tabulky		343,801 m . s ⁻¹			

4.4.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota u žáků vyšla 304,96 m · s⁻¹ a u žákyně 343,03 m · s⁻¹. Ze vztahu

$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21$ °C, dostaly obě skupiny hodnotu $v = 344,30$ m · s⁻¹. Získaná hodnota u žáků je o 38,841 m · s⁻¹ menší, a je to **nejhůře** vycházející měření. K výpočtu rychlosti zvuku v jsme použili vztah $v = \lambda \cdot f$.

Mezi výpočty dívek a chlapců došlo k velmi vysokému rozdílu výsledků. Žákyně byly velmi přesné, naopak žáci mají velký rozdíl s tabulkovou hodnotou. Jsem v domnění, že žákyně si dopočítávaly hodnoty namísto měření z důvodu zjednodušení a zrychlení splnění úkolů. S Quinceho trubicí šlo velmi špatné manipulovat. Ani vedoucímu práce nešlo u trubicí plynule nastavovat pozice. V přípravách prací pro děti vycházela tato úloha nejhůře. Největší chyba je v prvním měření u chlapců, kde jim vyšla rychlost $v = 240$ m · s⁻¹. Chyba byla ve špatném pochopení hledání vlnových délek λ . Po vysvětlení dosáhli lepších výsledků. Pokud vyškrtnu první měření z výpočtu průměrné hodnoty, dosáhli by výsledku $c = 326,61$ m · s⁻¹, hodnota se zvýší, ale stále patří mezi nejméně přesné (druhá nejhorší). Další chyby mohli nastat opět kvůli rušení vedlejší skupiny pracující na jiném měření, projíždějící tramvají, špatnému změření vlnové délky pomocí metru. a již zmíněnou špatnou manipulovatelností s Quinceho trubicí.

Laboratorní práci bych doporučila do vyšších ročníků středních škol, 3. a 4. ročník (septima, oktáva).

4.4.2. Použité prameny

(18, s. 170) (22)

4.5. Měření zvuku tlesknutím do roury

Určete rychlost zvuku ve vzduchu (doplňující úloha: určení rychlosti v závislosti na teplotě).

Potřeby: Mikrofon, PC se softwarem Audacity, metr, zdroj zvuku (tlesknutí), roura, teploměr (k doplňujícímu úkolu je potřeba fén nebo horkovzdušná pistol)

Postup měření: Změříme si délku roury l . nezapomeňme, že odražený zvuk urazí 2x delší cestu. Ke konci roury položíme mikrofon a spustíme nahrávání. Tleskneme do stejného konce jako je mikrofon, který zaznamenává jak přímý, tak i odražený zvuk. Z každého měření si zapíšeme čas τ pro pozdější výpočet. Po všech změření vypočítáme rychlost zvuku v .

Doplňující úkol: V trubce můžeme změnit teplotu pomocí fénu. Nejlépe vzduch nahřát na $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotu si hlídáme pomocí čidla digitálního teploměru. Měříme vždy při poklesu teploty o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z naměřených hodnot a tabulkových hodnot vytvoříme graf teploty vzduchu τ v závislosti na rychlosti zvuku v .

Výsledky:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žáky z gymnázia ze 7. ročníku (septima).

Tabulka 9 Měření tlesknutím do roury.

Číslo měření	τ [s]	l [m]	v [m.s ⁻¹]
1	0,0113	4	359,98
2	0,0116	4	344,83
3	0,0112	4	357,14
4	0,0119	4	336,13
5	0,0111	4	341,88
Získaná hodnota c		347,992 m . s ⁻¹	
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$		344,3 m . s ⁻¹	
Hodnota z tabulky		343,801 m . s ⁻¹	

4.5.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota vyšla $347,992\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ze vztahu $c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, dostali hodnotu $344,30\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Získaná hodnota je o $4,191\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ menší a v pořadí **třetí** nejpřesnější.

K výpočtu rychlosti zvuku v jsme použili vztah $v = \frac{l}{\tau}$. Z počátku byl u žáků problém s

nalezením pozice mikrofonu a místa tlesknutí. Další chyby mohly nastat, již zmíněným, rušením z vedlejší skupiny pracující na jiném měření, projíždějící tramvají.

Laboratorní práci bych doporučila do 8. a 9. třídy základních škol (gymnázium tercie a kvarta) a na střední školu celkově, jako obohacení výuky.

4.5.2. Použité prameny

(23)

4.6. Stanovení rychlosti zvuku pomocí ladičky a roury

Cílem je určit rychlost zvuku pomocí zdroje ladička.

Potřeby: Roura, válcová nádoba kolem 70 cm vysoká, voda, ladička, kladívko, 2 gumičky, metr, teploměr

Postup měření: Do nádoby nalijeme vodu a vložíme do ní rouru s navléknutými gumičkami. Na konci roury rozeznáme ladičku pomocí kladívka, ta poté rozezní vzduch v rouře. Posouváním roury dolů a nahoru hledáme maximum intenzity zvuku, které si označíme gumičkou. Následovně si najdeme druhé maximum a též si ho označíme druhou gumičkou. Po nalezení obou maxim si změříme vzdálenost mezi gumičkami, jež představuje vlnovou délku, ale pozor naměřená hodnota je $\frac{\lambda}{2}$. Změřených hodnot vypočítáme rychlost v .

Doplňující úloha: Změřte stejným způsobem, ale hledejte vzdálenost dvou minim a vypočítejte rychlost. Jaké měření je přesnější?

Výsledky

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žáky z gymnázia ze 7. ročníku (septima).

Tabulka 10 - Měření pomocí ladičky a roury ponořené ve vodě.

Číslo měření	f [Hz]	λ [m]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
1	440	0,45	198
2	440	0,80	352
3	440	0,65	286
4	440	0,78	343
5	440	0,85	374
Získaná hodnota c		310,6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$		343,7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
Hodnota z tabulky		343 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	

4.6.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota vyšla $v = 310,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ze vztahu $c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, dostali hodnotu $v = 344,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Získaná hodnota je o $33,201 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ menší a v pořadí **druhá**

nejhorší. Pomocí vztahu $v = f \cdot \lambda$ jsme vypočítali rychlost zvuku. Největší rozdíl je při prvním měření, kdy vyšla rychlost $v = 198 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Žáci zapomněli, že změřená vzdálenost je $\frac{\lambda}{2}$, a tudíž získanou hodnotu nevynásobili dvěma. Další chyby mohly nastat rušením hluku z okolí, nepřesné označení hodnot na trubce, individuální sluch měřícího žáka.

Laboratorní práci bych doporučila do 8. a 9. třídy základních škol (gymnázium tercie a kvarta) a na střední školu, jako obohacení výuky, kdy žáci ocení fyzickou aktivitu při hodině.

4.6.2. Použité prameny

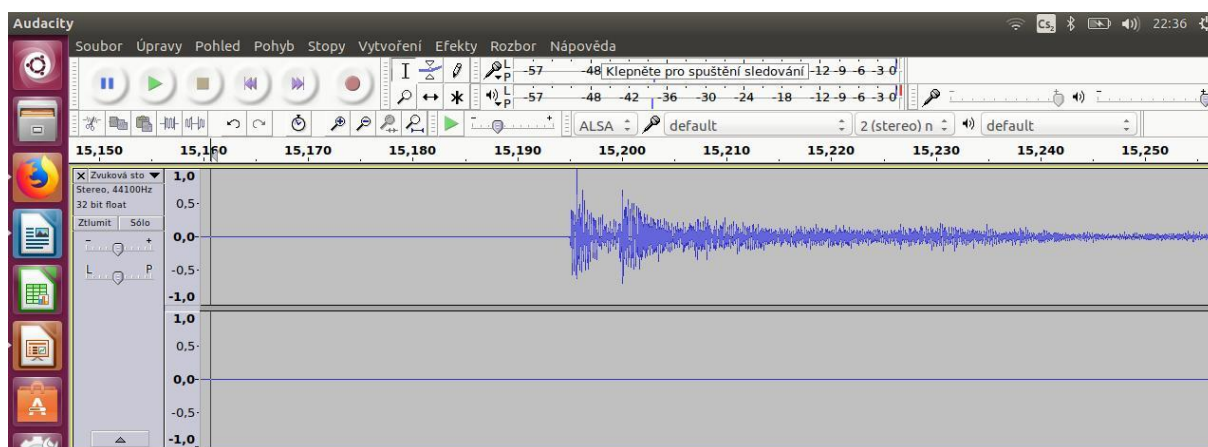
(18, s.163)

4.7. Měření zvuku odrazem od tabule

Úkolem je změřit rychlosti zvuku při odrazu o tabuli či stěnu v místnosti.

Potřeby: Mikrofon, PC se softwarem Audacity, metr, zdroj zvuku, teploměr

Postup měření: Mikrofon podržíme nebo upevníme ve vzdálenosti 1 m od tabule nebo od stěny (Při vzdálenost tam a zpět 2 m jde o čas nižší než 7 ms.). Za mikrofonem (tedy o něco dál od tabule, než je mikrofon) krátce tleskneme nebo ťukneme o sebe dvěma lžičkami apod., ale zvuk musí být opravdu krátký a ostrý. Vše musíme provádět v přímce. Zvuk přitom nahráváme a mikrofon zaznamenává jak přímý tak i odražený zvuk (viz obrázek 16). Dávejte ovšem pozor na odraz zvuku od nábytku v okolí měření a od podlahy V záznamu je rozlišíme, a vypíšeme oba dva změřené časy τ_1 a τ_2 a vypočteme jeho rychlost v .



Obrázek 16 – Graf zachyceného zvuku (Vlastní screenshot).

Výsledky:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žákyněmi z gymnázia ze 4. a 5. ročníku (kvarta, kvinta).

Tabulka 11 - Měření odrazem od tabule.

Číslo měření	$\Delta \tau$ [s]	s [m]	v [m.s ⁻¹]
1	0,006	2	333,3
2	0,003	1	333,3
3	0,004	1.5	375
Získaná hodnota c	347,2 m · s ⁻¹		
$c = 331,7 + 0,6 \cdot t$	344,3 m · s ⁻¹		
Hodnota z tabulky	343,801 m · s ⁻¹		

4.7.1. Zhodnocení

Průměrná hodnota vyšla $347,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ze vztahu $c = 331,7 + 0,6 \cdot t$, kde $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, dostali hodnotu $v = 344,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Získaná hodnota je o $3,339 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ větší a **nejlépe vycházející** úloha.

Pro výpočet rychlosti zvuku použijeme vztah $v = \frac{s}{\Delta\tau}$, kde $\Delta\tau$ je rozdíl času přímého a odraženého zvuku zachycené mikrofonom, a je dán vztahem: $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$.

Toto měření je nejpřesnější ze všech odměřených laboratorních prací. Ale i tak nastaly chyby měření. Jako vyrušování od druhé skupiny, projíždějící tramvaj, odraz zvuku od zbylého nábytku, kvalita mikrofونů. Nicméně úloha žáky zaujala díky fyzické aktivitě.

Laboratorní práci bych doporučila do 8. 9. třídy základních škol (gymnázium tercie a kvarta) a na střední školu. Pro žáky je to aktivní účast v učivu.

4.7.2. Použité prameny

(24)

4.8. Měření zvuku v kovové tyči

Úkol: Určit rychlost zvuku v kovové tyči a určit modul pružnosti v tahu a ve smyku.

Potřeby: Stojan, kovová tyč, kladívko, metr, váha, mikrofon, PC se softwarem Audacity, teploměr

Teorie: Nejdříve si zjistíme hustotu kovu ρ . Budeme vycházet ze vzorce pro hustotu $\rho = \frac{m}{V}$, kde m je hmotnost tyče a V je její objem - $V = \pi \cdot r^2 \cdot l$. Poté si vypočítáme rychlost v tyči podle vzorce $c = \lambda \cdot f$. Pro výpočet modulu pružnosti v tahu E použijeme vztah $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (platí pro podélné šíření), a pro výpočet modulu pružnosti ve smyku G použijeme vztah $c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (platí pro příčné šíření).

Postup měření: Změříme si délku tyče l , poloměr tyče r a zvážením tyče zjistíme jeho hmotnost m . Ze získaných hodnot vypočítáme objem tyče V a hustotu tyče ρ . Na jednom konci tyče přidržíme mikrofon a do druhého konce tyče udeříme. Z grafu zjistíme frekvenci daného kovu pro příčné a podélné vlnění. Spočítáme rychlosti a moduly pružnosti tahem E a ve smyku G .

Výsledky:

Hodnoty v tabulkách jsou změřeny žákyněmi z gymnázia ze 4. a 5. ročníku (kvarta, kvinta).

Tabulka 12 - Měření zvuku v kovové tyči – hodnoty pro výpočet hustoty.

l [m]	r [m]	V [m ³]	m [kg]	ρ [kg/m ³]
0,25	0,006	8,48	0,655	7721,96

Tabulka 13 - Měření zvuku v kovové tyči – hodnoty rychlosti příčného a podélného vlnění.

Číslo měření	Příčné vlnění			Podélné vlnění		
	λ [m]	f [Hz]	c [m · s ⁻¹]	λ [m]	f [Hz]	c [m · s ⁻¹]
1	1,5	2203	3304,5	1,5	4656	6984
2	1,5	2221	3301,5	1,5	3453	5179,5

Tabulka 14 - Měření zvuku v kovové tyči – porovnání hodnot

	v (příčné) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	v (podélné) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	E [Pa]	G [Pa]
Získaná hodnota	3303	6081,75	$3,7 \cdot 10^{11}$	$8,4 \cdot 10^{10}$
Tabulková hodnota	3235	5960	$2,1 \cdot 10^{11}$	$8,1 \cdot 10^{10}$

4.8.1. Zhodnocení

Výsledky nemůžou být přesně hodnoceny, protože tyč, na které probíhalo měření, je ocelová. Ocel je slitina železa, uhlíku a jiných legujících prvků, a abychom mohli udělat přesné hodnocení výsledků, byla by potřeba vědět přesný procentuální obsah uhlíku v tyči. Ovšem pro představu jsem vybrala průměrné hodnoty. Rychlost podélného vlnění v žákům vyšla o $121,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ větší a rychlost příčného vlnění v vyšla o $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ větší. Moduly pružnosti tahem E vyšel o $1/3$ méně a modul ve smyku G vyšel o $0,3 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ menší.

Při měření je potřeba dávat pozor na mikrofon, abychom ho udrželi co nejbližší, ale nedotýkali se tyče, což byla jedna z chyb při měření. Další chyba vznikala při slabém úderu kladívkem pro vyvolání kmitů.

Laboratorní práci bych doporučila na střední školu, protože je potřeba znalosti modulu pružnosti tahem E a modulu ve smyku G .

4.8.2. Použité prameny

(25) (26)

4.9. Určení rychlosti zvuku pomocí Kundtovy trubice

Úkol: Změření rychlosti zvuku pomocí Kundtovy trubice a korkové drti.

Pomůcky: Kundtova trubice o délce 1 m, korkový prášek nebo krupice, milimetrové měřítko (měřítko může být i na trubici), reproduktor, tónový generátor, teploměr

Postup měření: Do trubky nasypeme korkovou drť tak, aby byla podél celé trubice v úzkém proužku. Z jedné strany připevníme reproduktor a druhou stranu uzavřeme, aby se nám při měření nevysypaly pilinky korku ven.

Puštěním reproduktoru vyvoláme chvění vzduchu a pilinky se v kmitnách zvíří a posunou se do nejnižší polohy, naopak v uzlech zůstanou na svých místech. Jestliže se nám podaří vytvořit dostatečně ostrý obrazec, můžeme měřením vzdálenosti uzlů určit λ_0 . Rychlost c_0 zvuku ve vzduchu určíme při dané teplotě z tabulek.

Skleněná trubice musí být před měřením dobře vysušena, a taktéž i korkový prášek musí být dokonale suchý a jemný. Měření je nutno několikrát opakovat.

4.9.1. Zhodnocení

Pro výpočet použijeme vztah $v = f \cdot \lambda$. Pokus se nám nepodařil zprovoznit z důvodů nevhodného reproduktoru. Jeden z reproduktorů byl velmi velký a druhý nedokázal vyvolat potřebnou frekvenci pro zvlnění korkové drti.

4.9.2. Použité prameny

(27)

4.10. Stanovení rychlosti pomocí Dopplerova jevu

Cílem je změření rychlosti zvuku pomocí Dopplerova jevu.

Pomůcky: PC s programem SigView, mikrofon, PC větráček s upevněným dřevěným ramenem a plastovým měřidlem, laboratorní svěrák, zdroj napětí, piezoelektrický bzučák, dvě 9 V baterie, dvě gumičky nebo kovové svorky k zahradní hadici o průměru 2 cm, stativový materiál.

Teorie: Pro dopplerovské frekvence platí známý vztah:

$$f_{1,2} = f_0 \frac{v_{zv}}{v_{zv} \pm v'}$$

kde f_0 je základní frekvence zdroje zvuku v klidu, f_1 je frekvence pozorovaná při přibližování zdroje zvuku k mikrofonu (pozorovateli), f_2 je frekvence zaznamenaná při oddalování oscilátoru od mikrofonu, v' je rychlost pohybu zdroje zvuku a v_{zv} je rychlost zvuku, můžeme frekvenci rázů, kterou je výrazně modulován zaznamenaný signál vypočítat z rozdílu frekvencí f_1 a f_2 . Pro frekvenci rázů pak dostaneme vztah: $f_r = f_0 v_{zv} \frac{2v}{v_{zv}^2 - v^2}$

Chceme-li z této rovnice vyjádřit rychlost zvuku, musíme po mírné úpravě řešit kvadratickou

rovnici, která dává řešení: $v_{zv\ 1,2} = v \frac{f_0 \pm \sqrt{f_0^2 + f_r^2}}{f_r}$

Platí-li, že $f_r \ll f_0$, můžeme tento vztah nahradit jednodušším vztahem, který s dostatečnou přesností umožňuje určit rychlost zvuku: $v_{zv} = 2v \frac{f_0}{f_r} = 2v f_0 T_r$

kde $v = \frac{2\pi r}{T}$ je rychlost pohybu zdroje zvuku, f_0 je vlastní frekvence oscilátoru a $T_r = \frac{1}{f_r}$ je perioda rázů. Frekvence rázů je řádově 10^2 Hz, takže ji lze vzhledem k vlastní frekvenci oscilátoru o velikosti $f_0 = 4420$ Hz zanedbat. Frekvenci rázů pak můžeme přímo vypočítat odečtením frekvenčních hodnot maxima a minima podle vztahu $f_r = f_{max} - f_{min}$.

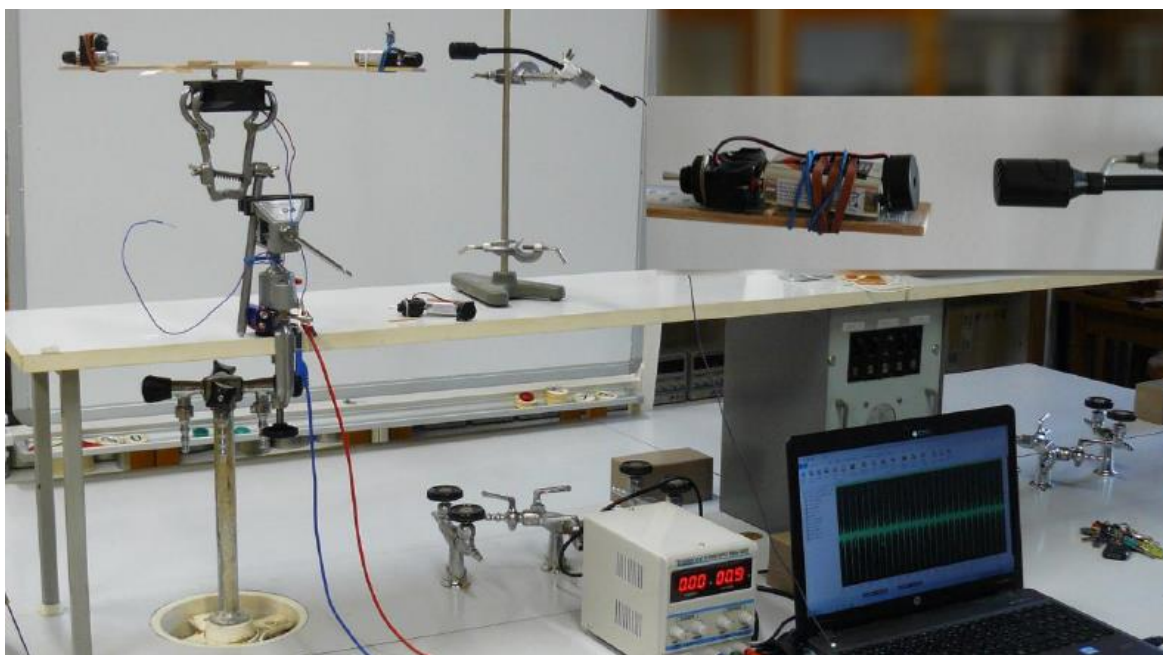
Postup práce: Na ramena větráčku připevníme metr (nejlépe papírový z Ikea), a pomocí metru nastavujeme vzdálenost zdroje zvuku od středu rotace. Na kraj jednoho ramene přichytíme pomocí gumičky nebo kovové svorky zdroj sinového signálu o jisté frekvenci. Nejlépe ve vzdálenosti 24 cm od středu. Zdrojem může být i mobilní telefon, ve kterém je nainstalovaná aplikace generátoru signálu, Na obrázku č. 17 je připevněný piezoelektrický zvukový měnič o frekvenci 4,4 kHz. Druhý konec otáčivého ramene vyvážíme něčím stejně těžkým, abychom zabránili nežádoucím kmitům celé soustavy při vyšších rychlostech. Mikrofonem snímáme

průběh signálu, a umístíme ho tak, aby byl ve výši roviny rotace ve vzdálenosti přibližně 2 cm od zdroje zvuku.

Před měřením si musíme nejdříve určit klidovou frekvenci f_0 a se vzdáleností r , od středu rotace ke zdroji, zapíšeme pomocí programu SigView. Po zapsání připojíme větráček ke zdroji napětí a postupně provádíme měření pro hodnoty napětí 6 V, 7 V a 8 V. Dále určíme hodnotu periody otáček ramene, pomocí které vypočítáme obvodovou rychlost oscilátoru $v = 2\pi r T$. Rychlost větráčku nad $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ způsobuje vibraci celého systému. Pomocí nastavení napětí, kolem 6–8 V, snížíme rychlost kolem 3 až $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V této rychlosti by nemělo docházet k vibracím.

Změřené hodnoty si pro lepší práci zvětšíme pomocí lupy. V programu najdeme funkci FFT, která provede spektrální analýzu signálu a vykreslí graf, a z těchto údajů najdeme hodnoty největší f_{max} a nejmenší frekvence f_{min} .

Pak použijeme nástroj na vyhledávání píků (špiček) nazvaný Peak Detector, který lze aktivovat pomocí pravého tlačítka myši nad grafem spektrální analýzy. Abychom výsledek hledání omezili pouze na jeden až dva největší píky v záznamu signálu, je dobré nastavit dolní mez pro hledanou hodnotu na ose y.



Obrázek 17 – Zapojený systém pro měření Dopplerova jevu (28).

Tabulka 15 - Měření pomocí Dopplerova jevu – ukázková tabulka.

f_0 [Hz]	U [V]	T [s]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	f_{max} [Hz]	f_{min} [Hz]	T_r [s]	v_{zv} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
-	-	-	-	-	-	-	-

4.10.1. Zhodnocení

V laboratorní práci je nejtěžší určit frekvenci rázů neboli jejich periodu. Rychlost větráčku lze stanovit třemi druhy metod – analýzou rázů, frekvenčním spektrem, pomocí fotodiody a osciloskopu. Všechny tři metody by měly dávat přibližně stejné výsledky. Programy Audacity je pro toto měření nevyhovující. Nejlepší pro měření Dopplerova jevu se jevil program Sigview, který používá Fourierovu transformaci (FFT) k analýze signálu.

Toto měření bych doporučila na střední školu a nejlépe zaměřenou na obory elektrotechnika a informatika, kde by byli žáci schopni vyzkoušet sestavení samotných součástek, vyzkoušet si to a zároveň měřit fyzikální úlohu.

4.10.2. Použité prameny

(28)

4.11. Změření rychlosti zvuku na otevřeném prostranství

Úkol: Určení rychlosti zvuku na velkém prostranství.

Pomůcky: délkové měřidlo – pásmo, stopky, dalekohled, vysílačky

Postup: Pro měření je potřeba velký prostor, nejlépe louka. S použitím teploměru stanovíme venkovní teplotu t . Délkovým měřidlem si odměříme vzdálenost $s = 400$ m. Nezapomeňte, že dráha musí být rovná, takže musíte stát v jedné přímce. Na jeden konec naměřené vzdálenosti se postaví žák s píšťalkou a druhý konec obsadí časoměřiči. Žák s píšťalkou pozdvihne ruku a vloží píšťalku do úst a vyčkává na signál od časoměřiče o jeho připravenosti. Jakmile zpozoruje ujednaný signál, tak mávne rukou směrem dolů a silně zapíská. Pokud jsou dostupné vysílačky, mohou se použít ty, místo domluvených signálů. Časoměřič ve chvíli, kdy zaznamená pohyb paže, spustí stopky a zastaví je v momentě, kdy zaslechne první zvuk píšťalky. Změřené čase si zapíšeme. Experiment opakujeme tak dlouho, až se každý ze studentů vymění v obou rolích, časoměřič a zdroj zvuku. Vypočítáte průměrnou hodnotu času τ ze zjištěných hodnot času a vypočítáme rychlost zvuku v_{vz} .

Tabulka 16 - Měření zvuku na otevřeném prostranství – ukázková tabulka.

Číslo měření	Čas τ [s]
1	-

4.11.1. Zhodnocení

Pro výpočet rychlosti v_{vz} použijeme vztah $v = \frac{s}{\tau}$ a porovnáme s tabulkovou hodnotou pro danou teplotu. Žáci by měli být schopni vyhodnotit chyby měření jako pozorovatelé i jako činitelé. Je to aktivní úloha, která by mohla více upoutat zájem dětí.

4.11.2. Použité prameny

(29)

4.12. Určení rychlosti zvuku odrazem

Cílem úlohy je zjistit rychlost zvuku ve vzduchu pomocí odrazu.

Potřeby: Notebook s programem Audacity nebo Vernier, mikrofon, zdroj zvuku (ozvučná dřívka), délkové měřidlo – pásmo, teploměr

Teorie: Minimální interval pro to, aby lidské ucho rozeznalo interval mezi dvěma údery je 0,1 s. Je-li interval mezi úderem a ozvěnou kratší než 0,1 s, je ozvěna neslyšitelná. Ozvěna je slyšitelná ve vzdálenosti asi 17 m od zdi, to nám dává informaci, že v bodě, kdy slyšíme ozvěnu, tak se zvuk šířil ke stěně a zpět za 0,1 s. Tzn., že rychlost zvuku je asi $34 \text{ m}/0,1 \text{ s}$ neboli 340 m/s.

Postup měření: Postavíme se čelem k velké zdi. Ve vzdálenosti asi 10 m od zdi udeříme o sebe dřívky a pomalu ustupujeme směrem od zdi, dokud neuslyšíme ozvěnu úderů. Změříme vzdálenost od zdi a ze stejného místa provedeme nahráti zvuku pomocí programu Audacity. V záznamu rozlišíme zdroj zvuku a ozvěnu, a vypíšeme oba dva změřené časy τ_1 a τ_2 a vypočteme jeho rychlost v .

4.12.1. Zhodnocení

Úloha se podobá práci Cinknutí o tabuli s rozdílem, že tento úkol měříme venku, kde může nastat větší chyba v měření rušením z ulic (auta aj.). Opět je potřeba aktivní účast žáka. Pro výpočet rychlosti zvuku použijeme vztah $v = \frac{s}{\Delta\tau}$, kde $\Delta\tau$ je rozdíl času přímého a odraženého zvuku zachycené mikrofonem, a je dán vztahem: $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$.

4.12.2. Použité prameny

(30)

Závěr

Cílem práce bylo seznámit s historií měření rychlosti zvuku, pojmy k práci pro praktickou část a zpracování zajímavých a poučných měření pro stanovení rychlosti zvuku a dokázat jejich přesnost.

Literatura obsahující historii fyziky se nejvíce zabývá starověkou a kvantovou fyzikou, takže získat čistě historii akustiky je náročné. Z nalezené literatury jsem se snažila vytáhnout nejdůležitější informace.

Teoretická část je téma samo o sobě, ovšem to nebylo hlavní myšlenkou práce. Pokusila jsem se stručně popsat základní pojmy a jevy, abych pak nenastala chyba porozumění experimentu. Dále obsahuje popis elektrotechniky použité u měření, jako je mikrofon, reproduktor, Audacity, aj.

V praktické části jsem tvořila úlohy tak, aby zaujaly mladší žáky aktivitou a zábavou a starší tak, aby jim přinesly nového poznatky a zkušenosti. Každý experiment obsahuje popis potřeb, postupu a zhodnocení, které upozorňuje na největší problémy při měření a zhodnocení výsledků podle tabulkové hodnoty. Zpracování závěrů změřených prací bylo obtížné. Někteří žáci nevyplnili půlku potřebných hodnot, a některé jsem si musela převádět. Další myšlenkou bylo, aby si každý učitel z různého druhu studia (základní škola, střední se zaměřením, technická či gymnázium) našel svoji úlohu. Dala jsem si cílem vytvořit devět prací, které jsem až na jednu se žáky odměřila. Ovšem jsem dodatečně, pomocí podnětu použité literatury, dala dohromady další tři, které už nejsou odměřené, ale jsou inspirací pro nejen moji budoucí praxi učitele.

Z výše uvedeného přehledu je zřetelné, že jsem splnila všechny dílčí cíle stanovené v úvodu práce.

Zároveň jsem získala sama mnoho poznatků do mojí budoucí praxe. Největší problém u dětí nastával v porozumění zadání, dělení se do skupin či bezdůvodné převádění jednotek, které ke všemu převedly špatně a vzájemné rušení z dalších stanovišť. Bylo třeba názorné ukázky manipulace s elektrotechnikou, hlavně u těžších prací, jako byla měření metodou rezonance, pomocí osciloskopu či stanovení rychlosti Quinckeho trubicí.

S možností se rozdělit do skupin dle své vůle děti naložily po svém a povětšinou se rozhodly se nerozdělit vůbec. Následkem byl nadměrný počet žáků ve skupině vedoucí k nerovnoměrnému rozdělení aktivit – jak pracovních, tak nepracovních. Mým doporučením je

rozdělit děti přímo do skupin po dvou, maximálně po třech žácích. V zájmu přesnosti měření navrhuji práci v místech pro měření určeným, v separátních místnostech.

Výhodou některých měření je využití počítače, notebooku nebo mobilního telefonu, které jsou v dnešní době součástí běžného života. K většině měření vystačí program Audacity, který si může pořídit každý žák. Pouze k Dopplerově jevu je potřeba program SigView, který obsahuje potřebnou funkci FFT.

Největším poznáním je, že v jednoduchosti je krása. Nejlepšího výsledku dosáhly děti v úloze měření zvuku odrazem od tabule.

RESUMÉ

Název práce: Měření rychlosti zvuku

Autor: Ivana Rauchová

Katedra: Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy

Vedoucí práce: PhDr. Pavel Kratochvíl, Ph.D.

Abstrakt: Cílem této práce je zpracování návodů na školní experimenty a měření. Data jsou zpracována pomocí zesilovače, mikrofonu, reproduktoru, osciloskopu, Quinckeho a Kundtovy trubice, PVC trubice, Vernier, počítače s programem Audacity a Sigview, metru a teploměru. Měřené hodnoty jsou porovnávány s tabulkovými hodnotami. Úlohy mohou být předlouhou. Hlavním zjištěním je, že nejtěžší způsob měření nemusí být nepřesnější.

Klíčová slova: Akustika, historie akustiky, historie měření rychlosti zvuku, zvuk, rychlost zvuku, fyzika, laboratorní práce, základní škola, střední škola, Kundtova trubice, kovová tyč, ladička, Quinckeho trubice, Audacity, Vernier, SigView, rezonanční metoda, osciloskop, odraz zvuku, rychlost zvuku ve vodě

Title: Measuring the velocity of sound

Author: Ivana Rauchová

Department: Department of Mathematics, Physics and Technical education

Supervisor: PhDr. Pavel Kratochvíl, Ph.D.

Abstract: This work aims at elaborating the instructions for experiments and means of measuring. The data is processed by an amplifier, a microphone, speakers, an oscilloscope, Quincke's tube, Kundt's tube, a PVC pipe, Vernier device, a computer with Audacity and SiegView software, measuring tape and a thermometer. Measured values are compared with table values. Tasks can be used as a template. The conclusion is the most complicated way of measuring is not necessarily the most accurate.

Keywords: acoustics, acoustics history, sound velocity measuring history, velocity sound, sound, physics, laboratory work, primary school, high school, Kundt's tube, metal rod, tuner, Quincke's tube, Vernier, SigView, resonance method, oscilloscope, sound reflection, sound velocity in the water

RAUCHOVÁ, Ivana. *Měření rychlosti zvuku*. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň, 2018. 55 stran. Vedoucí bakalářské práce PhDr. Pavel Kratochvíl, Ph.D.

Seznam použitých pramenů

- 1) MALÍŠEK, Vladimír. Co víte o dějinách fyziky. Vydání první. Praha: Horizont, 1986. Stran 272 + 16 stran černobílé přílohy.
- 2) BAJER, Jiří. *Mechanika 3*. Druhé rozšířené a doplněné vydání. Olomouc: Chlup.net, 2012. 542 stran. ISBN 978-80-903958-5-5.
- 3) *Ottova všeobecná encyklopedie*: ve dvou svazcích M - Ž. Aktualizované vydání. Praha: Ottovo nakladatelství, 2010. 752 stran. ISBN 978-80-7360-901-6
- 4) JANOUSĚK, Václav. *Ábíčko* [online]. 4. 8. 2007 [cit. 11. 6. 2018]. Dostupné z: <http://www.abicko.cz/clanek/precti-si-priroda/7907/slysi-neslysitejne-zvirata-pouzivajisonary.html>
- 5) *Paroc* [online]. 2018 [cit. 2. 3 2018]. Dostupné z: <https://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/obecne-informace-o-zvuku>
- 6) JANDORA, Radek. *Maturitní otázky do fyziky: Vlnění* [online]. 2000 [cit. 6. 3. 2018]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f11.htm>
- 7) LEPIL, Oldřich; ŠEDIVÝ, Přemysl. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání vlnění*. 1. vydání. Praha: Prometheus, 1994. 135 s. ISBN 80-901619-6-0
- 8) *Ottova všeobecná encyklopedie*: ve dvou svazcích A – L. Aktualizované vydání. Praha: Ottovo nakladatelství, 2010. 735 stran. ISBN 978-80-7360-900-9
- 9) PAZDERA, Václav; DIVIŠ, Jan. Elektronická učebnice: Odraz a lom světla [online]. 28. 8. 2015 [cit. 24. 3. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1694>
- 10) a) REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 8. 6. 2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/214-akustika-a-jeji-deleni>
b) REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 10. 6. 2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/377-mikrofony>
c) REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 10. 6. 2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/390-reproduktory>
- 11) SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. Dotisk 4., upravené vydání. Praha: Prometheus, 2006. 551 stran. ISBN 978-80-7196-307-3
- 12) GASHA, Heinz; Pflanz, Stefan. *Kompedium fyziky*. Vydání první. Praha: Euromedia Group, k. S. -Universum, 2008. 488 stran. ISBN 978-80-242-2013-0
- 13) ŠPELDA, Antonín, *Akustika*. Vydání první. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1955. Stran 290.

- 14) WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. 1. české vydání. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 191 s + čb. fot. ISBN 80-86056-26-0
- 15) a) Vernier: *Vybavení pro výuku přírodovědných oborů* [online]. 2018 [cit. 12. 6. 2018].
Dostupné z: <http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/labq2/>
- b) Vernier: *Vybavení pro výuku přírodovědných oborů* [online]. 2018 [cit. 12. 6. 2018].
Dostupné z: www.vernier.cz/stahnout/kucharka/kod/rychlost-zvuku
- 16) *Audacity* [online]. 2018 [cit. 12. 6. 2018]. Dostupné z: <https://www.audacityteam.org/>
- 17) *SIVIEW* [online]. 2018 [10. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.sigview.com/>
- 18) SVOBODA, Emanuel; HOUDEK, Václav; SVOBODA, Miroslav. *Pokusy z fyziky na střední škole*. 1. vydání. Praha: Prometheus, 1997. 176 stran. ISBN 80-7196-008-X
- 19) TÖLG, Tomáš a kol. *Fyzikální praktikum*. 6. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. 184 s. ISBN 978-80-7043-829-9.
- 20) *Fakulta pedagogická: oddělení fyziky* [online]. [cit. 15. 11. 2017]. Dostupné:
<https://kof.zcu.cz/st/sm/>
- 21) HOLFRICHTER, Tomáš. Souhrnný sborník *Veletrhu nápadů učitelů fyziky 4: Porovnání rychlosti zvuku ve vzduchu a ve vodě* [online]. 1999 [cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z:
<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/04-06-Hofrichter.html>
- 22) TESAŘ, J. *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky 8: klasické a inovované měření rychlosti zvuku* [online]. 3. 8. 2003 [cit. 10. 11. 2017]. Dostupné z:
<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/08-16-Tesar.html>
- 23) JERJE, Tomáš. Školská fyzika [online]. 2013 [cit. 5. 11. 2017]. Dostupné z:
https://sf.zcu.cz/data/2014/sf2014_01_2.pdf
- 24) DVOŘÁK, Leoš. *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [online]. 2007 [cit. 3. 11. 2017]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/12-21-Dvorak.html>
- 25) PATČ, Břetislav *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [online]. 2007 [cit. 3. 11. 2017]. Dostupné z: http://vnuf.cz/sbornik_old/Veletrh_07/07_14_Patch1.html
- 26) *RF cafe* [online]. [cit. 1. 5. 2018]. Dostupné z:
<http://www.rfcafe.com/references/general/velocity-sound-media.htm>
- 27) HEJNOVÁ, E. *Katedra fyziky* [online]. [cit. 26. 10. 2017]. Dostupné z:
<http://physics.ujep.cz/~ehejnova/>
- 28) KODEJŠKA, Čeněk. *Sound Card Laser Pointer eXperiment* [online]. 2012 [cit. 4. 3. 2018]
Dostupné z: <http://www.sclpx.eu/lab2R.php?exp=10>
- 29) *Fyzikweb: 711 ZŠ Bučovice* [online]. [cit. 12. 5 2018]. Dostupné z
http://fyzika711.cz/laboratorky/skolniLP/9r/rychlost_zvuku.pdf

30) HOLUBOVÁ, Renata. *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky 7: Co všechno můžeme slyšet* [online]. 2002 [cit. 2. 3. 2017]. Dostupné z:
<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/07-05-Holubova.htmls>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Zvuková vlna	12
Obrázek 2 - Podélné vlnění	13
Obrázek 3 - Příčné vlnění.....	14
Obrázek 4 - Odraz a lom zvuk.....	15
Obrázek 5-konstrukce mikrofonů.....	17
Obrázek 6- Charakteristika ideálního mikrofonu.....	18
Obrázek 7 - Směrová charakteristika mikrofonu	18
Obrázek 8 - odporový mikrofon.....	19
Obrázek 9 - elektrodynamický mikrofon	19
Obrázek 10 - krystalový mikrofon	20
Obrázek 11 - kondenzátorový mikrofon	21
Obrázek 12 - Elektrodynamický mikrofon.....	22
Obrázek 13 – Ukázka správného a špatného měření.....	31
Obrázek 14 – Graf zachyceného zvuku oběma mikrofony	31
Obrázek 15 – Obvod zapojené Quinceho trubice.....	33
Obrázek 16 – Graf zachyceného zvuku.....	39
Obrázek 17 – Zapojený systém pro měření Dopplerova jevu	45

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rychlost zvuku v látkách	14
Tabulka 2- Výsledky měření osciloskopem.	28
Tabulka 3 - Výsledky měření osciloskopem – doplňující úloha.....	28
Tabulka 4- Měření rezonanční metodou – frekvence rezonancí.....	30
Tabulka 5- Měření rezonanční metodou - získané hodnoty pro výpočet rychlosti zvuku.	30
Tabulka 6 - Měření pomocí programu Audacity.....	32
Tabulka 7 - Měření pomocí Quinceho trubice - žáci septima.	33
Tabulka 8 - Měření pomocí Quinceho trubice - žákyně kvarta, kvinta.....	34
Tabulka 9 Měření tlesknutím do roury.....	35
Tabulka 10 - Měření pomocí ladičky a roury ponořené ve vodě.	37
Tabulka 11 - Měření odrazem od tabule.	39
Tabulka 12 - Měření zvuku v kovové tyči - hodnoty pro výpočet hustoty.	41
Tabulka 13 - Měření zvuku v kovové tyči – hodnoty rychlosti příčného a podélného vlnění.	41

Tabulka 14 - Měření zvuku v kovové tyči – porovnání hodnot	42
Tabulka 15 - Měření pomocí Dopplerova jevu - ukázková tabulka	45
Tabulka 16 - Měření zvuku na otevřeném prostranství - ukázková tabulka	47