

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra experimentální fyziky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Jednoduchá fyzikální měření s tabletem nebo chytrým
telefonem**



Autor:	Bc. Olga Smetanová
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	7504T055 Učitelství fyziky pro střední školy 7504T075 Učitelství chemie pro střední školy
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	Mgr. Lukáš Richterek, Ph.D.
Termín odevzdání práce:	Květen 2019

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Lukáše Richterka, Ph.D. a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci

.....

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Bc. Olga Smetanová
Název práce	Jednoduchá fyzikální měření s tabletem nebo chytrým telefonem
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	Mgr. Lukáš Richterek, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2019
Abstrakt	Tato práce popisuje jednoduché fyzikální experimenty, ke kterým se využívá různých senzorů smartphonu. Nejprve jsou zde uvedeny výhody používání smartphonů v hodinách fyziky, následně pak popsána práce s nimi. Tento text obsahuje také přehlednou rešerši fyzikálních experimentů proveditelných se smartphonem. Dále pak detailněji popisujeme osm experimentů, ke kterým se využívá senzoru hladiny intenzity zvuku a tónového generátoru. Jedná se o experimenty především z tematické části akustika, které jsou jednoduše proveditelné a použitelné ve výuce fyziky na střední škole.
Klíčová slova	Fyzika, fyzikální experimenty, fyzikální vzdělávání, telefon, smartphone, akustika, rázy, Dopplerův jev, sonar, zvuk, hlasitost zvuku, rychlost zvuku
Počet stran	142
Počet příloh	0
Jazyk	Český

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Bc. Olga Smetanová
Title	Simple physics measurements with a tablet or a smartphone
Type of thesis	Master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	Mgr. Lukáš Richterek, Ph.D.
The year of presentation	2019
Abstract	This thesis describes simple physical experiments with use of smartphone's sensors for their realization. Firstly, we describe the advantages of using smartphones in physical lessons, then we explain the use of them. This thesis also includes a brief overview of physical experiments with smartphones. After that, we describe in detail eight experiments using a sound level sensor and a tone generator. We concentrate on the acoustics experiments which are very easy to realize, and we can use them in high school physics education.
Keywords	Physics, physics experiments, physics education, smartphone, acoustics, Doppler effect, sonar, sound, sound intensity, speed of sound
Number of pages	142
Number of appendices	0
Language	Czech

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Mgr. Lukáši Richterovi, Ph. D. za odborné vedení mé práce, za jeho čas, který mi věnoval, za cenné a podnětné poznámky, možnost častých konzultací, a především za podporu a trpělivost při zpracování této práce.

Obsah

Úvod.....	8
1. Teoretická část	10
1.1. Proč využívat telefon.....	10
1.1.1. Je možné používat smartphone v hodinách fyziky?	10
1. 1. 2. Motivace a zájem studentů.....	11
1. 1. 3. Strategie digitálního vzdělávání do roku 2020.....	12
1. 2. Měřicí aplikace.....	14
1. 2. 1. Požadavky na aplikaci.....	14
1. 2. 2. Aplikace Phyphox	15
1. 2. 3. Ovládání phyphoxu	16
1. 3. Experimenty se smartphonem.....	20
1. 3. 1. Výukové materiály Science on Stage	20
1. 3. 2. Experimenty se smartphonem.....	21
1. 3. 3. Experimenty z oblasti akustiky.....	26
2. Experimentální část.....	29
2.1. Rázy.....	29
2.1.1. Teoretický popis.....	29
2.1.2. Metody měření	31
2.1.3. Realizace měření	35
2.1.4. Vyhodnocení	41
2. 2. Demonstrace akustické analogie řádkovací tunelové mikroskopie.....	43
2. 2. 1. Řádkovací tunelová mikroskopie	44
2. 2. 2. Teoretický popis experimentu	45
2.2.3. Metody měření	46
2. 2. 4. Realizace měření	47
2. 2. 5. Vyhodnocení	52
2. 3. Rychlost zvuku ve vzduchu.....	53
2. 3. 1. Teoretický popis	53
2. 3. 2. Metody měření.....	55
2. 3. 3. Realizace měření	62
2. 3. 4. Vyhodnocení	67
2. 4. Vlastnosti zvuku.....	68
2. 4. 1. Teoretický popis	68
2. 4. 2. Metody měření.....	69
2. 4. 3. Realizace měření	70
2. 4. 4. Vyhodnocení	87
2. 5. Hlasitost a intenzita zvuku.....	88
2. 5. 1. Teoretický popis	88
2. 5. 2. Metody měření.....	89
2. 5. 3. Realizace měření	94
2. 5. 4. Vyhodnocení	95
2. 6. Audiometrické měření.....	96
2. 6. 1. Teoretický popis	96
2. 6. 2. Metody měření.....	97

2. 6. 3. Realizace měření	98
2. 6. 4. Vyhodnocení	103
2. 7. Sonar	104
2. 7. 1. Teoretický popis	104
2. 7. 2. Metody měření.....	105
2. 7. 3. Realizace měření	107
2. 7. 4. Vyhodnocení	112
2. 7. 5. Aplikace ve škole	113
2. 8. Dopplerův jev	115
2. 8. 1. Teoretický popis	115
2. 8. 2. Metody měření.....	116
2. 8. 3. Realizace měření	120
2. 8. 4. Vyhodnocení	132
Závěr	133
Seznam použitých pramenů	135

Úvod

Smartphone většina lidí používá k telefonování, chatování či hledání informací na internetu, neuvědomujeme si ale, že může sloužit i jako mobilní laboratoř. Díky velkému množství vestavěných senzorů, z nichž můžeme jmenovat například senzor zrychlení, osvětlení, mikrofon, reproduktor, fotoaparát a další (počet senzorů se u různých telefonů liší a nemusí být k dispozici všechny), můžeme smartphone využít k realizaci různých fyzikálních měření. Jeho použití v hodinách fyziky je navíc velmi praktické. Smartphone vlastní téměř každý žák či student, umí s ním velmi dobře pracovat a jeho využití ve výuce může studenty zaujmout. To odpovídá i trendu „bring your own device“ (BYOD), který předpokládám že uživatel si nemusí zvykat na aplikace a zařízení instalovaná ve škole (popř. v zaměstnání), ale používá přístroje a programy, na které je zvyklý a lze předpokládat, že v jejich užívání je zběhlejší (Future Classroom Lab, © 2012-2019).

Experimentování se smartphony je dnes velmi aktuální téma, o čemž svědčí i řada článků z posledních let věnovaných této problematice (některé jsou uvedeny v přehledné rešerši experimentů v kapitole 1.3.). Studenti často nejsou dostatečně motivováni ke studiu fyziky, navíc školní laboratoře nejsou vždy vybaveny moderními technologiemi, které jsou potřeba k moderní výuce fyziky. Právě smysluplné využití smartphonů může být řešením těchto problémů. Řadu měření se smartphonem či tabletem lze provádět i v terénu mimo školu nebo doma, ať již v rámci domácích cvičení nebo méně tradičních forem výuky jako např. Just-in-time-teaching (Novak a kol., 1999).

Cílem této práce bylo vyhotovit soubor jednoduchých měření s tabletem či smartphonem vhodných k využití ve výuce fyziky. V teoretické části popíšeme výhody a nevýhody práce se smartphony. Zde také objasníme, jaký vliv má použití smartphonů ve výuce na motivaci a zájem studentů. Dále popíšeme, jaké aplikace jsou k měření vhodné a jak s nimi pracovat. Následně představíme několik experimentů, ve kterých využíváme různých senzorů smartphonů. Protože jsou některé úlohy velmi obsáhlé, představíme v praktické části 8 experimentů, ve kterých využijeme pouze senzor hladiny intenzity zvuku. Vybrali jsme takové experimenty, které by bez nahrávacího zařízení či tónového generátoru nebylo možné provést, a proto zde smartphone hraje důležitou roli. Navíc tyto experimenty často svou interpretací přesahují rámec samotné fyziky a uplatníme zde mezipředmětové vztahy mezi fyzikou a biologií či fyzikou a matematikou. V této části vždy připomeneme teoretický

základ ke každému experimentu a uvedeme podrobný postup měření. Následně představíme výsledky a interpretaci vlastního měření. Na závěr každého pokusu připojíme několik tipů, které by mohly být užitečné k použití těchto experimentů v hodinách fyziky.

1. Teoretická část

V této části popíšeme, z jakých důvodů používat smartphone v hodině fyziky a zda je to vůbec vhodné. Budeme zde studovat nejen vliv na motivaci a zájem žáků, ale také na osvojení daného učiva. Popíšeme si zde také vládní strategii digitalizace, a zkonstatujeme, zda je podle této strategie vhodné smartphone používat. Dále přejdeme už k samotnému popisu experimentů. Nejprve si popíšeme požadavky na telefonní aplikace a jak s nimi pracovat. V poslední podkapitole teoretické části představíme několik experimentů, ke kterým bychom mohli smartphone využít.

1.1. Proč využívat telefon

Smartphony jako experimentální nástroje nabízejí inspirativní možnosti použití pro vědecké vzdělávání. Hlavním důvodem je několik vestavěných senzorů, které umožňují měření (Hochberg, 2018). V první části vysvětlíme, zda je možné využít smartphonů v hodinách fyziky, dále popíšeme, jaký vliv má používání smartphonů na motivaci, zvědavost či osvojení učiva žáků. V poslední části ukážeme, jestli je smartphone vhodná pomůcka z hlediska začlenění moderních technologií do vzdělávání.

1.1.1. Je možné používat smartphone v hodinách fyziky?

Smartphony pronikly do života lidí velmi rychlým tempem. Chytré telefony jsou dnes téměř všude přítomné, 73 % dospívajících ve věku mezi 13 a 17 lety ve Spojených státech uvádí, že vlastní smartphone nebo k němu mají alespoň přístup (Hochberg, 2018).

Smartphony používáme například ke komunikaci, prohlížení internetu, k vyhledávání informací, pro mobilní bankovníctví či zábavu. Protože obsahuje několik vestavěných senzorů, můžeme ho využít jako mobilní kapesní laboratoř. S interními senzory je možné měřit například zrychlení, hladinu intenzity zvuku, frekvenci zvuku, intenzitu osvětlení, magnetickou indukci atd. Nezpochybnitelnou výhodou pak je, že měření můžeme provést kdykoliv a kdekoliv, a to vytváří nové možnosti výuky především v hodinách fyziky. Se smartphony je možné provádět experimenty zasahující téměř do všech částí fyziky – mechaniky, akustiky, elektromagnetismu, optiky, dokonce i radioaktivity. Smartphony pak

můžeme využít jako měřící zařízení, jako experimentální nástroj či pro dokumentaci experimentu. Použití smartphonů je praktické zejména proto, že nám dovoluje měřit velké množství experimentů pomocí jednoho či dvou smartphonů, a tyto experimenty následně snadno a rychle interpretovat. Aplikace generují tabulky, grafy nebo zobrazují jednotlivá naměřená data, a to přímo na obrazovce smartphonu. Jelikož téměř každý student má svůj smartphone, je možné provádět experiment téměř kdekoliv (ne pouze ve školní laboratoři) či jej dokonce zadat jako domácí úkol.

V poslední době se objevilo několik zajímavých publikací či článků věnujících se použití smartphonů ve výuce. Tomuto tématu se pravidelně od roku 2012 věnuje i časopis *Physics Teacher*, dále byly například sepsány výukové materiály – *Science on stage* (viz 1.3.1.).

V současné době zůstává v diskuzi vhodnost použití smartphonů ve výuce fyziky. Použití této technologie může být z jedné strany účinným způsobem, jak zvýšit zájem a motivaci u žáků. Na druhé straně může vést použití smartphonů k rozptýlení studentů a narušení učení. Značnou nevýhodou může být také nedostatek literatury či pracovních listů, které by mohly pomoci učitelům začlenit smartphony do svých hodin fyziky (Hochberg, 2018). Problémem by také mohlo být samotné užívání smartphonů. V dnešní době, především u mladých lidí, převládá komunikace přes smartphony nad osobní diskusí a interakce mezi lidmi se vytrácí. Používání smartphonů může být v takové míře, že se v mnoha případech stalo i závislostí. Přílišné používání navíc způsobuje, že student ztrácí čas a chuť k učení, vyhýbá se fyzickým zátěžím, nevnímá si okolního světa (například při přecházení silnice), u dětí nemůžeme kontrolovat, co přesně na smartphone sledují. Zejména mezi mládeží se používání smartphonů zvýšilo do té míry, že ovlivňuje osobní životy lidí (Nayak, 2018). Ve školách často bývají telefony zakázané, čas zde strávený tak může být jediným časem, který studenti netráví se smartphonem v ruce. Je tedy nutné být opatrný s nadměrným užíváním smartphonů a nemotivovat tak studenty k jeho častějšímu používání.

1. 1. 2. Motivace a zájem studentů

Učitelé často hledají možnosti, jak zvýšit motivaci a zájem u studentů, zejména v přírodovědných předmětech, které se můžou zdát studentům složité a nezábavné. V několika studiích bylo dokázáno, že experimentování se smartphony výrazně zvyšuje zájem studentů o dané téma a přírodní vědy. Používání smartphonů také podpořilo

zvědavost studentů, a to hlavně proto, že s běžnou pomůckou jako je smartphone našli uspokojivé řešení nastoleného problému. Ukazuje se, že i krátkodobé používání smartphonů k experimentování zvyšuje zájem a zvědavost studentů (Hochberg, 2018). Je pozoruhodné, že ani vzbuzený zájem, ani zvědavost nezávisí na předchozích znalostech žáků. Nezáleží však ani na jejich zkušenostech s experimentováním. To znamená, že pomocí smartphonů můžeme zvýšit motivaci jak u žáků slabších, tak i u nadaných. Zejména slabší žáci, kteří fyzice nerozumí, mají problém s motivací. Tím, že použijeme smartphone, který znají z běžného života a pomocí něj jednoduše a srozumitelně vyřešíme fyzikální problém, můžeme tedy jejich zájem, zvědavost či úspěch v daném předmětu zvýšit. Naopak u nadaných žáků může použití smartphonů vyvolat novou chuť do práce, tito studenti mohou sami zjistit, jak aplikace funguje a jakým způsobem provést experiment. Díky tomu, že studenti umí pracovat se smartphony, mohou na realizaci experimentu intuitivně přijít sami. Co se týče kognitivních znalostí, bylo dokázáno, že výsledky učení jsou stejné v případě, že používáme smartphone i když ho nepoužíváme (Hochberg, 2018). Žáci porozumí danému učivu v obou případech stejně. Je tedy velkým kladem, že používání smartphonů nemá negativní vliv na učení, nerozptyluje žáka a manipulace se smartphonem nemusí způsobovat žákovi žádné potíže. Na druhou stranu žáci umí ovládat smartphony a velice snadno zjistí, jak fungují jednotlivé aplikace. To jim ulehčí práci a nezatěžuje je. Použití jiných přístrojů může mít často negativní dopad právě v této oblasti, kdy studenti stráví více času tím, aby porozuměli měřícím přístrojům a naučili se s nimi pracovat, než aby si dostatečně osvojili dané učivo.

Z toho plyne, že fyzikální experimenty prováděné se smartphony neovlivňují negativně studenty. Ti pochopí stejně dobře učivo, jako při používání tradičních metod. Výhodou ale zůstává, že použití smartphonů motivuje studenty k práci, studenti mají o učivo větší zájem a jsou více zvědaví. Největší úspěch má používání smartphonů mezi slabšími studenty gymnázia, kteří díky jednoduché manipulaci s měřícími zařízeními lépe porozumí učivu a mají o něj větší zájem (Hochberg, 2018).

1. 1. 3. Strategie digitálního vzdělávání do roku 2020

Práce s moderními informačními technologiemi je v dnešní době stále častější a na studenty jsou v tomto ohledu vynakládány stále větší a větší požadavky. Je velmi

pravděpodobné, že ve svém profesním životě budou muset ovládat práci s moderními informačními technologiemi.

Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky vydalo strategický dokument týkající se základního, středního i vyššího odborného vzdělávání s názvem – Strategie digitálního vzdělávání do roku 2020. Digitálním vzděláváním je chápáno takové vzdělávání, které reaguje na změny ve společnosti související s rozvojem digitálních technologií a jejich užíváním. Jeho cílem je především zahrnout do vzdělávání nové metody a způsoby, které pracují s digitálními technologiemi, zlepšit kompetence žáků v oblasti práce s digitálními technologiemi a také rozvíjet inženýrské myšlení žáků. Důvodem zavedení této strategie bylo připravit studenty na jejich profesní život a pomoci jim uplatnit se na trhu práce, kde požadavky na znalosti a dovednosti v oblasti informačních technologií stále rostou (Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, © 2013-2019).

Učitelé uvádí, že největším problémem pro začlenění digitálních technologií do výuky je především nedostatek času na zkoumání nových technologií, jejich možností využití a na přípravu výukových materiálů. Dalšími komplikacemi pro učitele je nedostatečná znalost obsluhy digitálních technologií a to, že neumějí řešit základní technické problémy související s jejich používáním. Výhodou používání smartphonů v hodinách fyziky je, že většina učitelů vlastní nebo mají přístup ke smartphonům, mohou si proto nacvičit experiment třeba i doma. Navíc používat smartphone dnes umí už většina lidí, problém se znalostí obsluhy digitálních technologií se zde tedy vytrácí. Navíc sami studenti umí pracovat se smartphony, je to pro ně intuitivní a vyučující jim tedy nemusí nic v tomto směru vysvětlovat.

Z problémů využívání digitálních technologií na úrovni škol bývá nejčastěji uváděn nedostatek technické podpory a nedostatečná dostupnost digitálních technologií. Umístění počítačů je nejčastěji ve specializovaných počítačových učebnách, a ne v běžných třídách či fyzikálních učebnách. I v případě, že zde nějaké počítače jsou, si učitelé stěžují na problémy s organizací výuky s tím spojené, zejména v případě, kdy je více žáků na jeden počítač. Se smartphony tento problém není, jelikož většina studentů vlastní svůj smartphone, mohou tedy pracovat samostatně nebo po dvojicích a není zde potřeba stěhovat se do počítačových učeben. Navíc mohou experiment provést i za domácí úkol či si měření doma ještě zopakovat, což je v případě využití jiných technologií, které jsou přítomny na školách nemožné.

Komplikací ve výuce může být také zastaralé nebo nevhodné softwarové i hardwarové vybavení a nedostatek prostředků na jeho obnovu. V případě smartphonů si ale studenti mohou zdarma stáhnout výukové aplikace a tím se otevírá nabídka neustále nových experimentů, kterých bude v budoucnosti jistě přibývat (Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, © 2013-2019). Smartphony jsou tedy velmi moderní učební pomůcka, která může učitelům značně ulehčit práci a vyřešit jejich problémy se zapojením informačních technologií do výuky.

1. 2. Měřicí aplikace

Senzory v moderních smartphonech jsou slibným a efektivním nástrojem pro experimentování ve výuce fyziky. Už při prvním pokusu zrealizovat takový experiment je ale možné, že bude vyučující čelit problémům s výběrem správné aplikace. Dostupných aplikací je velké množství, a proto může zabrat nemálo času ozkoušet všechny aplikace a zvolit z nich tu nejvhodnější. V první podkapitole této části popíšeme právě požadavky, které by měla aplikace mít. Problémy zde popsané řeší aplikace „phyphox“, která nabízí nemálo experimentů. Hlavním kladem této aplikace je, že byla speciálně navržena pro využití experimentů ve výuce fyziky (Staacks, 2018). V další části se budeme věnovat podrobnému popisu této aplikace.

1. 2. 1. Požadavky na aplikaci

V této době jsou navrhovány další a novější experimenty využívající různé fyzikální senzory, a i když jsou tyto experimenty pro studenty motivující a umožňují nový přístup k fyzikálním měřením bez velkých nákladů, i zde existují určité překážky a problémy, které musí učitel překonat, aby mohl v praxi tyto experimenty realizovat. Aplikací využívající různé senzory k fyzikálním měřením je velké množství a vyznat se v tom, která je nejvhodnější může zabrat učitelům čas. Zde přiblížíme dva hlavní problémy, které brání rozvinutí plného potenciálu experimentu ve třídě. Jedním z nich je to, že je smartphone během experimentu nedostupný. Student pak provádí experiment (například používá-li smartphone jako kyvadlo) "slepě" a vidí naměřená data až na konci měření. Během experimentu je studium průběžných výsledků nemožné. Pokud by ale studenti byli schopni vidět data v reálném

čase během experimentu, mohli by asociovat různé fáze experimentu s různými částmi grafu. V opačném případě je experiment jaksi oddělený od naměřených dat a pro studenty se tak stane toto měření nezajímavé nebo mu dobře neporozumí.

Dalším problémem může být analýza dat. Většina aplikací poskytuje výstup ve formě grafu, uložení jednotlivých naměřených hodnot je ale nemožné a experimentátorovi nezbývá než graf uložit vyfocení obrazovky. Lepší přístup je ale ten, kdy si naměřená data mohou studenti exportovat do počítače, kde následně provádí analýzu dat, matematické ověření vztahů apod. Export dat však bývá složitý a časově náročný, může tak bránit v pokroku učení studentů. Student stráví víc času prací s počítačovým softwarem, a ne se skutečným experimentem. Tyto problémy mohou omezit motivaci a porozumění studentů. V extrémním případě může měření sloužit spíše jako úvod do analýzy dat než jako prostředek k objevování fyzikálních jevů. To pak způsobuje nezájem i ze strany učitelů a nechuť k používání smartphonu jako fyzikální pomůcky. Na Univerzitě RWTH Aachen byla však vytvořena aplikace Phyphox, která bere na vědomí tyto překážky a nabízí jejich řešení (Staacks, 2018).

1. 2. 2. Aplikace Phyphox

Phyphox je volně stažitelná aplikace jak pro systém Android, tak i pro iOS, to znamená, že učitel nemusí oslovovat zvláště studenty, kteří mají Android a ty, kteří ho nemají. Velkou výhodou této aplikace je, že si ji můžeme stáhnout v českém jazyce, je zdarma a bez reklamy. Aplikace se nazývá „Phyphox“, což je zkratka pro „Physical phone experiments“ neboli „Fyzikální experimenty s telefonem“ a je vydána již od září 2016 pracovníky Univerzity RWTH Aachen. Pro podporu uživatelů na celém světě byla ještě vytvořena webová stránka <http://phyphox.org>, která nabízí podrobné instrukce, ukázková videa a technické informace v angličtině a němčině. Samotná aplikace je však dostupná v řadě dalších jazyků.

Aplikace je dobře využitelná pro hodiny fyziky, a to především proto, že nepoužívá telefon jako jakousi černou skříňku, která generuje pouze výsledek měření. Poskytuje samotná data, která můžeme převést do několika dalších formátů a analyzovat je třeba i v počítači, dovoluje nám měnit podmínky a nastavení měření. Každý učitel tak může zkontrolovat i

upravit experiment, a to představuje velký didaktický potenciál. Aplikace by tedy měla být použitelná pro studenty různých věkových kategorií.

Existuje několik experimentů, při kterých není možné sledovat jejich průběh. Tato aplikace umožňuje propojení s dalším smartphonem, přes který pak můžeme kontrolovat a pozorovat experimentální data už během samotného pokusu. Aplikace také poskytuje naměřená data ve formě několika grafů, se kterými mohou studenti následně pracovat. Druhou možností zpracování výsledků měření je jejich export do Excelu. To nám dovoluje naměřená data analyzovat ještě podrobněji, popřípadě provádět různé matematické operace či ověřovat fyzikální vztahy (Staacks, 2018).

Aplikace obsahuje velké množství již předdefinovaných experimentů, podrobnou teorii a postup experimentu pak můžeme najít buď na webu nebo ve zkrácené verzi přímo v aplikaci. Nemusíme ale vždy používat tyto experimenty doporučené autory, je možné využít senzorů a nastavených experimentů k dalším vlastním měřením. Autoři uvádějí mezi nejdůležitější funkce a vlastnosti této aplikace také podporu exportu dat do široké škály formátů či dálkové ovládání experimentu (Staacks, 2018). Phyphox využívá k měření těchto sedmi senzorů: zrychlení, magnetometru, gyroskopu, senzoru okolního světla, tlaku, mikrofonu, senzoru přiblížení a GPS. Senzor zrychlení slouží k určení, zdali je telefon na šířku či na výšku, popřípadě jestli displej směřuje dolů nebo nahoru, magnetometr slouží například k detekci otevření a zavření flipových pouzder, gyroskop nám poskytuje data o natočení telefonu v prostoru vzhledem k předchozí poloze, pomocí senzoru okolního světla upravuje telefon jas displeje, barometr neboli senzor tlaku určuje atmosférický tlak, a tedy i nadmořskou výšku, což je doplňující informace pro GPS souřadnice. Senzor přiblížení slouží ke zhasnutí displeje při přiblížení telefonu k uchu během hovoru a vypnutí dotykové vrstvy (Chroust, 2015). Každý telefon však nemusí obsahovat všechny zmíněné senzory, pak jsou tyto experimenty neaktivní. Za zmínku také stojí přehledné grafické provedení programu, které umožňuje rychlou a jednoduchou orientaci v aplikaci (Kilián, 2018).

1. 2. 3. Ovládání phyphoxu

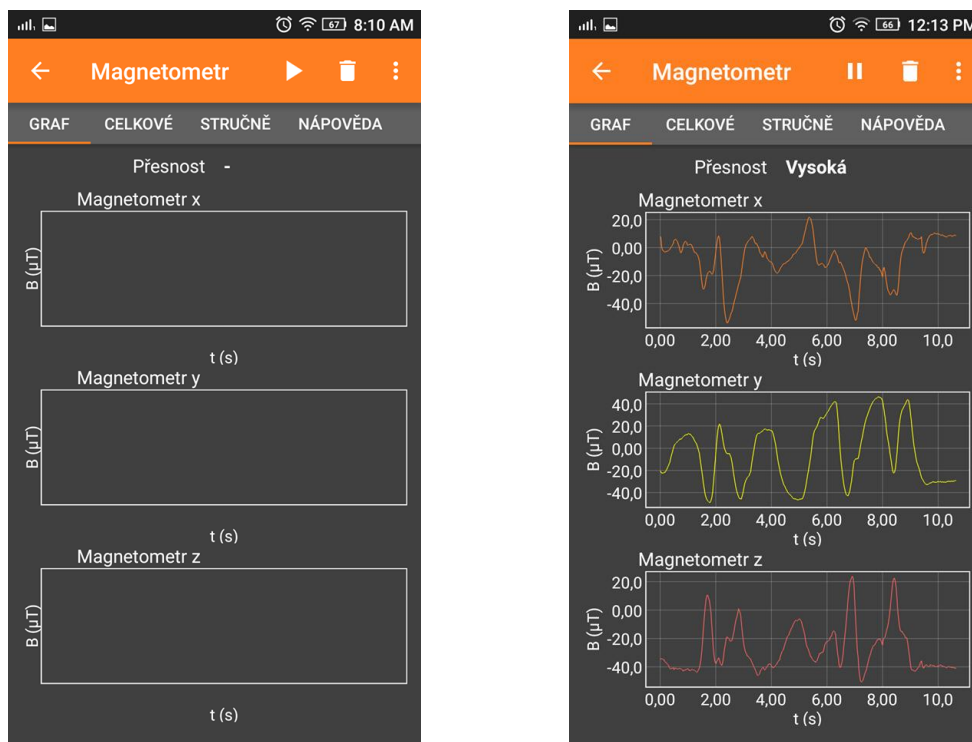
V této části se podrobněji podíváme na to, jak funguje aplikace Phyphox a jak s ní pracovat. Při zapnutí této aplikace ve smartphonu se zobrazí téměř třicítka experimentů, rozdělených

do šesti částí – Senzory, Akustika, Běžný život, Mechanika, Měření času a Nástroje (Obrázek 1).



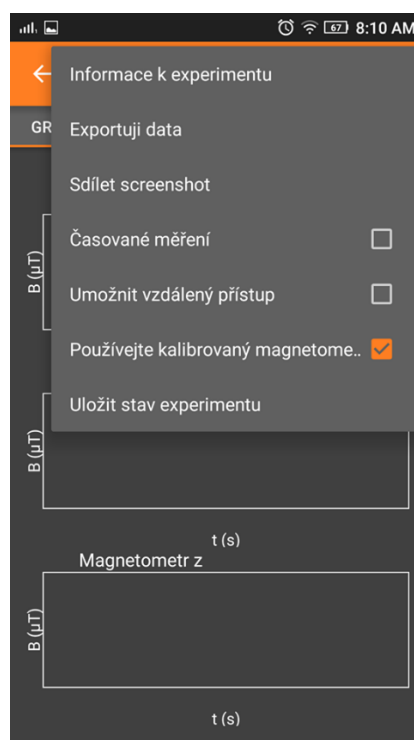
Obrázek 1: Phyxox – Seznam experimentů

Po otevření zvoleného experimentu se na obrazovce zobrazí měřicí rozhraní (Obrázek 2). Aplikace ihned nabízí informace k experimentu tak, aby pro nás bylo použití této aplikace co nejjednodušší. Některé experimenty nabízí různá měření a jsou tak rozdělena do několika sekcí, mezi kterými můžeme přepínat horizontálním posunem (Kilián, 2018). Experiment spustíme tlačítkem pro přehrávání v horní liště. Měření pak ukončíme tlačítkem „pauza“.



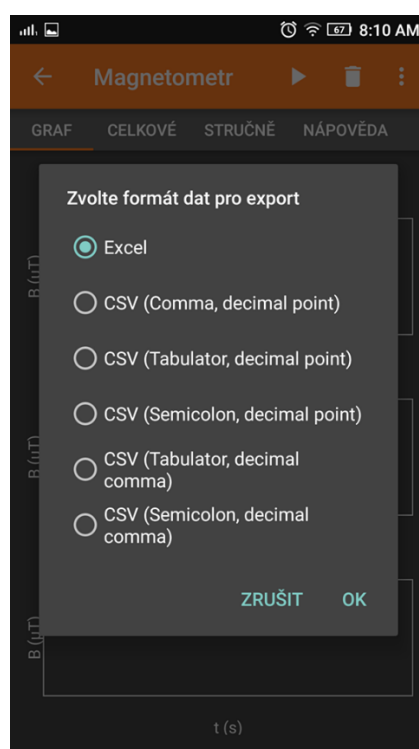
Obrázek 2: Obrazovka experimentu

Při zvolení ikony v pravé horní části obrazovky, se zobrazí nabídka s několika možnostmi nastavení experimentu (Obrázek 3).



Obrázek 3: Phyphox – Možnosti experimentu

Zde je možné dozvědět se víc informací k experimentu. Výhodou zůstává, že v aplikaci jsou informace v češtině, kdežto na webových stránkách phyphoxu pouze v angličtině či němčině. Dále je možné sdílet screenshot neboli snímek obrazovky – ne vždy je potřeba mít podrobně všechna data, ale postačí pouze grafy poskytnuté aplikací. K jednotlivým naměřeným hodnotám se dostaneme přes Export dat (Obrázek 4). Data je možné exportovat do Excelu nebo do několika typů formátu CSV. Další možností je Časované měření, při němž je možné buď odsunout start o několik sekund od sepnutí experimentu nebo omezit dobu trvání experimentu. Je tu také možnost Umožnit vzdálený přístup, a tedy sledovat průběh měření v dalším smartphonu.



Obrázek 4: Phyphox – Export naměřených dat

V praktické části představíme několik experimentů, při kterých můžeme využít právě aplikace Phyphox. Při podrobném popisu těchto experimentů se budeme věnovat práci s touto aplikací ještě detailněji. Nepoužívali jsme ale výlučně tuto aplikaci a k několika měřením jsme zvolili jiné aplikace, které pro daný experiment dostačovaly či byly vhodnější.

1. 3. Experimenty se smartphonem

Smartphony se stávají rok od roku výkonější. Jejich funkce jsou stále sofistikovanější a modernější, to se týká jak hardwaru, tak i softwaru. Pro zvýšení atraktivity smartphonů výrobci přidávají další a další funkce, a tedy i různé typy senzorů. Kromě tradičního reproduktoru, mikrofону, fotoaparátu či videokamery to jsou například biometrické senzory, barometry, akcelerometry nebo senzory magnetického pole. Díky tomu se smartphony stávají důležitou pomůckou pro zkoumání různých fyzikálních jevů ve školách (Sobral, 2018). V následujících částech ukážeme některé vybrané experimenty, které můžeme ve školách realizovat. Nejprve ale představíme soubor výukových materiálů vytvořený v rámci sítě STEM učitelů Science on Stage Europe, který popisuje jednoduché experimenty, v kterých hlavní roli hraje právě použití smartphonů.

1. 3. 1. Výukové materiály Science on Stage

Jedna z možností, kde se inspirovat experimenty je brožurka „Smartphones in Science Teaching: iStage 2“, v překladu – telefony v přírodovědeckém vyučování. Tuto publikaci připravilo 20 učitelů z celkem čtrnácti evropských zemí a obsahuje několik experimentů, k nimž je potřeba smartphonu jako měřicího přístroje. Experimenty se zaměřují nejen na fyziku, ale můžeme zde najít i měření, která bychom zařadili do hodiny chemie, biologie či matematiky (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s. 4-6). Jako příklad můžeme uvést například spektrofotometrické měření, experiment, kdy můžeme pomocí zpěvu ptáků rozpoznat o jaký druh jde či měření vzdáleností s pomocí znalostí podobnosti trojúhelníků.

Na základě této publikace se učitelé fyziky mohou jednoduše inspirovat několika pokusy, které jsou zde precizně popsány. Ke každému experimentu je poskytnuta teoretická část, přesný postup měření včetně dalších doporučení, čím tento pokus obohatit či jak jej zatraktivnit. Ke každému měření jsou také navrženy vhodné aplikace, pomocí kterých můžeme měření uskutečnit, a to jak pro systém Android, tak pro systém iOS. To může učitelé velmi ulehčit práci. Především, pokud teprve začíná s využíváním smartphonu ve výuce. Experimenty zde uvedené jsou většinou velmi jednoduché na přípravu i realizaci, a především nejsou náročné na pomůcky.

Jednotlivá měření jsou rozdělena do tří částí, podle toho, kterého smyslu je nejvíc využíváno. Zrak je jedním z našich nejdůležitějších a nejpoužívanějších smyslů a také proto je smartphone obdařen většinou dvěma kamerami. Ty pak můžeme využít k měření vzdáleností či chemického spektrofotometrického měření, které je v běžné školní laboratoři těžko proveditelné. S využitím GPS souřadnic můžeme provádět také různá astronomická měření (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.7-24). Dalším využitým smyslem je sluch. Telefony byly v první řadě používány především k telefonování, a proto má každý smartphone ve své výbavě mikrofon i reproduktor. Můžeme tak provádět různá měření, týkající se zvuku. Právě těmito experimenty jsme se v této práci také inspirovali a podrobný popis měření je uveden v druhé části práce. Poslední část pak patří hmatu. V této části nalezneme experimenty, v kterých nám poradí, jak změřit například zrychlení, magnetické pole nebo jak fyzikálně analyzovat pohyby (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s. 47-68).

Tato brožura může učitelům sloužit k načerpání prvních zkušeností s využitím smartphonů v hodinách fyziky, zejména díky jejímu přehlednému zpracování a velmi jednoduchým experimentům, které ale ne vždy lze provést ve školním prostředí jinak než právě s použitím smartphonu.

1. 3. 2. Experimenty se smartphonem

K realizaci experimentů se smartphonem se však nemusíme inspirovat pouze návody poskytnutými v brožurce iStage či aplikací Phyphox. Experimentů, ke kterým se smartphone využívá je celé množství a týkají se téměř všech částí fyziky. V tomto úseku si představíme namátkou několik dalších experimentů, které můžeme v hodinách fyziky provést a kterým jsme se dále nevěnovali v praktické části.

Senzor zrychlení může být použit například k analýze **volného pádu** či ke studiu **oscilací pružiny** (Pili, 2018). Pro studium **zrychlení** nám smartphone bude sloužit nejen jako detektor pohybu ale hlavně jako laboratorní nástroj, jehož pohyb budeme studovat, přičemž využijeme detektor zrychlení. Smartphone upevníme na vozík, který se pohybuje po rampě, jejíž trajektorii či úhel naklonění můžeme měnit. Na stejném principu můžeme vyrobit ze smartphonu kyvadlo a předmětem našeho studia budou **oscilace tohoto kyvadla**. V tomto případě smartphone zavěsíme na provázek a rozkvíveme jej. V obou případech

budeme studovat závislost zrychlení na čase (Mazzella, 2016). Dalším využitím akcelerometru může být studium **stabilního a nestabilního rotačního pohybu**. Tento experiment bychom kvůli jeho fyzikální interpretaci zařadili spíš do vysokoškolského studia. Spočívá v tom, že telefon necháme padat volným pádem tak, aby se zároveň otáčel kolem některé ze svých os. Během experimentu je na smartphonu zapnuto měření zrychlení. Závislost zrychlení ve všech třech osách na čase nám pak umožňuje studovat tento problém podrobněji (Loth, 2017). Coriolisova síla je setrvačná síla, která působí na tělesa pohybující se v neinerciální vztažné soustavě tím způsobem, že se mění jejich vzdálenost od osy otáčení (Wikipedie, © 2001–2019). Experimentální proměření této síly se zdá ve školních podmínkách takřka nemožné. Pro měření **Coriolisova zrychlení** vytvoříme velkou půlkruhovou dráhu a do jejího středu namontujeme elektrický vrták, který bude s touto dráhou periodicky otáčet. Telefon pak budeme spouštět po této rotující dráze z různých výšek. Pomocí akcelerometru změříme závislost zrychlení na čase, na základě naměřených dat gyroskopem pak dostaneme závislost úhlové rychlosti na čase (Shakur, 2016). **Úhlovou rychlost** si můžeme vyzkoušet změřit také díky senzoru magnetického pole. Experiment probíhá tak, že na elektrický ventilátor (který se otáčí dokola) připevníme magnet. Po sepnutí ventilátoru bude smartphone měřit magnetické pole v určitém místě. To se s otáčivým pohybem magnetu bude periodicky měnit. Výstupem měření bude závislost magnetického pole na čase. Následně už zbývá určit jen periodu otáčení a poté stanovit úhlovou rychlost otáčení magnetu (Pili, 2018). Z oblasti dynamiky můžeme například změřit maximální **koeficient statického tření**. K tomuto experimentu je potřeba pouze chytrého telefonu a rovné podložky. Telefon umístíme na podložku a postupně ji nakláníme. Přestaneme až v momentě, kdy telefon začne po podložce klouzat. Smartphone zároveň měří úhel naklonění, z tohoto úhlu je pak možné dopočítat koeficient tření (Kapucu, 2018). Experimentů, ve kterých využíváme senzory smartphonů ke zlepšení výuky klasické mechaniky je velké množství, pro oblast termodynamiky jich ale tolik nenajdeme. Jeden z možných může být například **studium chlazení sférického tělesa**. Do baňky s kulatým dnem nalijeme horkou vodu a rtuťovým teploměrem budeme měřit teplotu vody. Pro měření využijeme kameru smartphonu, na kterou budeme zaznamenávat pokles teploty na teploměru. Následnou videoanalýzou pohybu (jak klesá rtuťový sloupec na teploměru) můžeme získat závislost teploty vody na čase. Výhoda používání smartphonů spočívá v tomto případě především v urychlení experimentu – pokles teploty natáčíme a poté

analyzujeme, nemusíme manuálně odečítat každých například 30 sekund hodnotu teploty po dobu cca jedné hodiny (Ramos Silva, 2018). Chytré telefony či tablety můžeme také použít k **měření tlaku**. Jeden ze zajímavých experimentů je například měření změny tlaku při nafukování gumového balónku. Pro realizaci tohoto experimentu je potřeba vložit měřící smartphone do balónku. Aplikace by pak měla měřit závislost tlaku na čase (Vandermarlière, 2016).

Jednou ze zajímavých úloh také může být **konstrukce detektoru kovů**. V tomto případě se využívá audio vstupu smartphonu, pomocí něhož můžeme analyzovat elektrické signály. Ty jsou přiváděny přes konektor sluchátek. Tato technika umožňuje zobrazit průběh elektrických signálů podobně jako osciloskop. Cílem experimentu je konstrukce indukčního detektoru kovů, který umožňuje detekci malých kovových předmětů a rozlišit feromagnetické kovy od diamagnetických a paramagnetických kovů. K experimentu jsou potřeba dva smartphony, kdy k oběma je přes audio vstup připojena cívka. První smartphone – emitor- vytváří variabilní magnetické pole poblíž této cívky. Druhý smartphone, tvořen druhou cívkou, má úlohu detekce malých kolísání elektromotorické síly v důsledku proměnného magnetického pole vytvořeného cívkou v emitoru. Oba obvody jsou nezávislé. Když do blízkosti cívek přiložíme kov, vytvoří se v něm vířivé proudy, které vytváří magnetické pole a způsobí kolísání původního magnetického pole, což je zachytitelné smartphonem detektorem. Je nutno však dávat pozor, aby indukované napětí nepřekročilo limit pro vstupní audio smartphonu. Tento experiment tak neslouží pouze k detekci a rozlišení feromagnetických, paramagnetických a diamagnetických kovů, ale může sloužit jako univerzální nástroj v laboratoři fyziky, který s pomocí aplikací Simple Tone Generator a SmartScope Oscilloscope nahrazuje klasické použití osciloskopu a tónového generátoru (Sobral, 2018). Smartphone ale můžeme použít k samotnému měření **magnetického pole**, a to pomocí magnetického senzoru. Jednak můžeme studovat magnetické pole permanentního magnetu, ale také, a to je zajímavější, magnetické pole indukované ve vodiči. K měření můžeme zvolit, jak přímý vodič, tak vodič zatočený do smyčky. Zkoumat můžeme závislost magnetického pole na proudu protékajícího vodičem, na poloměru smyčky či na vzdálenosti vodiče od měřícího zařízení (Septianto, 2016). Využití smartphonů nám často dovoluje provést měření, které by v běžné laboratoři za použití tradičních pomůcek nebylo možné. Jednou z oblastí, kterou je těžké experimentálně proměřit je geofyzika. Konkrétní experiment, který budeme smartphonem simulovat je

magnetické mapování. To je standardní geofyzikální metoda používaná v různých aplikacích od podrobného archeologického průzkumu až po regionální geologické problémy. Smartphone vybavený tříosým magnetometrem se pohybuje po rovném povrchu, pod kterým je v jednom místě zabudovaný magnet vytvářející anomální magnetické pole. Výstupem měření bude závislost magnetického pole ve všech třech osách v závislosti na čase. K podrobnějšímu pochopení tohoto tématu můžeme provést několik různých měření a měnit magnetické pole – tyčový magnet může být položen vertikálně, horizontálně či pod určitým úhlem, k měření také můžeme použít více magnetů (Tronicke, 2018).

Dalším zajímavým experimentem, který modernizuje klasický školní experiment je **měření tíhového zrychlení magnetickým kyvadlem**, kdy je na smartphonu využit senzor magnetického pole. Další pomůckou je pak kyvadlo s malým magnetem nalepeným na spodní straně kyvadla. Tím, jak se kyvadlo s magnetem kýve, se zároveň mění magnetické pole v místě magnetického senzoru. Použitá aplikace nám pak vykreslí závislost magnetického pole na čase. Tíhové zrychlení můžeme určit pomocí měření jedné periody vyrobeného kyvadla (Pili, 2018). Smartphony nabízí také další způsob měření **tíhového zrychlení**, a to **pomocí světelného senzoru**. Princip je totožný jako v předchozím případě, místo senzoru magnetického pole však používáme světelný senzor. Kmitající kyvadlo senzor periodicky překrývá, čímž se v grafickém zobrazení závislosti intenzity světla na čase vytváří křivka podobná vlně. Vrcholy a minima křivky pak odpovídají maximální a minimální intenzitě světla. I v tomto případě tedy můžeme změřit tíhové zrychlení na základě určení jedné periody kyvadla (Pili, 2018).

Smartphone můžeme taktéž využít k měření **radioaktivního záření**. K tomuto experimentu se využívá kamerového senzoru. Čipy, které jsou zde využívány ke snímání, detekují nejen viditelné světlo, ale také β^- a γ záření. Počet naměřených impulzů se stanovuje v pevných minutových časových intervalech a výsledek se zobrazuje současně sloupcovým grafem. To umožňuje provádět několik zajímavých měření z oblasti radioaktivity (např. měření šumu pozadí, závislost na vzdálenosti zářiče od detektoru, zkoumat jaké materiály nejlépe stíní toto radioaktivní záření apod.) (Gröber, 2014).

Také z části optiky můžeme realizovat několik zajímavých experimentů. Jedna z možností je použití smartphonů ke studiu **doplňkových barev**, kdy fotoaparát smartphonu může snímat okolní předměty v doplňkových barvách. Toto téma nabízí spoustu zajímavých aplikací

v hodinách fyziky, matematiky, ale i v odvětví umění. S pomocí fotoaparátu můžeme zkoumat různé funkce doplňkových barev či realizovat další aktivity. Jedna z nabízených je například namalovat obraz běžných předmětů v doplňkových barvách, pomocí fotoaparátu na telefonu si pak můžeme ověřit správnost našeho postupu (Karabey, 2018). Tablety a smartphony také bývají vybaveny senzorem okolního světla, pomocí něhož nastavují jas displeje za účelem optimalizace baterie. Jelikož několik aplikací umožňuje odečítání čidla v reálném čase, můžeme využít tohoto čidla k **určení vzdálenosti žárovky**. V zatemněné místnosti je žárovka s mobilním zařízením umístěna na optické lavici. S tímto zařízením můžeme provést několik měření intenzity osvětlení v závislosti na vzdálenosti. Pomocí kalibrační křivky pak můžeme určit libovolnou vzdálenost žárovky od měřícího zařízení (Klein, 2014).

Pomocí smartphonů je možné provádět různá měření simulující astronomické jevy. Jedním z příkladů je simulace **planetárního tranzitu**. Jako hvězdu použijeme globusovou lampu, kterou následně umístíme do středu nějaké otočné desky. Dále si připravíme různě velké koule, které simulují planety. Je potřeba také připravit nějaký otočný systém, který bude s planetami otáčet kolem hvězdy. Na smartphonu využijeme v tomto případě také světelného senzoru, který bude měřit světlo z hvězdy během tranzitu modelové planety mezi hvězdou a pozorovatelem – smartphonem (Barrera-Garrido, 2015). Na podobném principu stojí také experiment vysvětlující **vznik ročních období na Zemi**. Nastavení experimentu je velmi jednoduché a vyžaduje pouze glóbus, světelný zdroj, pravítko a smartphone se světelným senzorem. Studenti zde sledují vliv zeměpisné šířky na množství přijatého světla. Smartphone postupně posouvají po celém světě (po několika zeměpisných šířkách) a měří světelný jas na zvoleném místě (Durelle, 2017).

Existují také aplikace, které umožňují naprogramovat si svoji vlastní aplikaci, která bude měřit to, co bychom zrovna chtěli. Jedním z příkladů navržené aplikace je kalkulačka provádějící výpočet **časové dilatace** pomocí mobilního GPS zařízení. S ní pak můžeme simulovat třeba známý paradox dvojčat. Jeden telefon zůstane v laboratoři, zatímco s druhým budeme cestovat v autě. Když se cestující telefon vrátí do laboratoře, na vytvořené kalkulačce uvidíme, že je "mladší" než ten telefon, který zůstal po dobu experimentu v laboratoři. Aplikace také umožňuje změnit rychlost světla, to nám dovoluje zkoumat, jak velká by byla dilatace času, kdyby byla rychlost světla o poznání menší (Underwood, 2016).

Nutno podotknout, že experimentů, které můžeme provést se smartphony je velké množství a v této části jsme uvedli jenom některé vybrané, které nás zaujaly. Při podrobnější rešerši však můžeme nalézt další experimenty obsahující různá měření, která jsme v této části neuvedli. Popis dalších experimentů je však nad rámec této práce.

1. 3. 3. Experimenty z oblasti akustiky

V této práci se podrobněji věnujeme studiu akustických jevů s pomocí smartphonu. Telefon byl primárně určen k přenosu hlasu, a tak je každý smartphone vybaven mikrofonom a jedním nebo více reproduktory. Díky tomu můžeme smartphony využít k analýze zvuků a tónů či jako tónového generátoru (Sobral, 2018).

Zvuk je dobrým příkladem pro studium vln. Vlněním se ve výuce věnujeme při zkoumání zvuku, světla, radiového přenosu a vlastností elektromagnetických vln. Vlny také poskytují dobrý matematický model pro studium chování periodických závislostí. Protože smartphony jsou schopné převést zvuk do digitální podoby a poskytnout nám reálná data či grafy, můžeme je využít ke studiu charakteristik zvuku. Smartphone tedy může sloužit jako důležitá pomůcka pro objevování zajímavých vlastností vln a můžeme jím nahradit tradiční osciloskop. V následujících aktivitách budeme studovat vizualizaci vln především v časové a frekvenční oblasti. Můžeme tak určit frekvenci, periodu, vlnovou délku vlnění či naměřit frekvenční spektrum vlny (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.27). Tím se budeme nejčastěji zabývat i v praktické části, kde podrobněji představíme osm různých experimentů právě z oblasti akustiky.

To ovšem nejsou všechny experimenty, které na toto téma existují. Při studiu jsme narazili na několik dalších, které zde stručně představíme. V části 2.3. měříme **rychlost zvuku**. Phyphox však nabízí další způsob měření rychlosti zvuku, a to pomocí akustických stopek, které umí změřit čas mezi dvěma zvukovými podněty. K provedení experimentu je potřeba dvou osob se dvěma smartphony oddělenými určitou vzdáleností. Nejprve tleskne či vydá jiný zvuk první osoba, tím spustí měření na obou telefonech. Druhá osoba pak tlesknutím zastaví měření. Z časového zpoždění naměřeného na obou smartphonech můžeme určit dobu, kterou zvukový signál potřeboval k překročení vzdálenosti. Pak už jen vypočítáme rychlost zvuku ve vzduchu (Stacks, 2019). Dalším způsobem může být měření rychlosti zvuku pomocí trubice z kartonu. Hlavním úkolem tohoto měření je nalézt rezonanční

frekvenci trubice. Smartohone používáme jako tónový generátor. Zvuk, který produkuje se pohybuje od 50 Hz do 3000 Hz rychlostí 1 Hz za sekundu. Zároveň provádíme záznam zvuku pro pozdější analýzu. Z naměřených dat vyvodíme rezonanční frekvence, pomocí kterých můžeme spočítat rychlost zvuku ve vzduchu (Hellesund, 2019). Pro **znázornění vlnění** můžeme využít kameru smartphonu. Do vnitřní části kytary umístíme smartphone se zapnutou kamerou namířenou na struny kytary. Při zahrání na jednu strunu se tato struna rozkmitá, na videu pak můžeme pozorovat kmitání struny, kdy se jednotlivé části struny postupně dostávají do pohybu a následně se vrací na původní místo (Lincoln, 2018). Dalším experimentem může být demonstrace **akustické interference**. Jako dvou zdrojů zvuku použijeme sluchátka připojená na smartphone. Ta by měla být upevněna naproti sobě ve vzdálenosti 0,4 m. Při pohybu sluchátek vzhledem k mikrofonu by měl mikrofon zaznamenat zesílení a zeslabení zvuku, což znázorňuje konstruktivní a destruktivní interference (Allen, 2016). Zajímavým experimentem je také **vizualizace zvukových polí**, což je oblast prostoru, ve kterém se šíří zvukové vlnění. Vizualizaci můžeme provést v jednodušším provedení právě se smartphonem. Byla vyvinuta speciální aplikace Polar Pattern Plotter dostupná na smartphonech se systémem iOS, která kombinuje záznam zvuku, snímání orientace a grafickou analýzu. Ukazuje se, že výsledky, které poskytuje tento experiment, vyvolávají u studentů i vyučujících pozitivní reakce (Hawley, 2016). Jednoduše můžeme také zkonstruovat a následně předvést **Helmholtzův rezonátor**. To je dutina, která, když do ní foukneme, vydává různé tóny. Později byl vyroben univerzální rezonátor, který sestává ze dvou válců, přičemž jeden je uvnitř druhého, jejich vzájemným vysouváním můžeme měnit objem dutiny a při fouknutí vzduchu dovnitř uslyšíme různé tóny (Wikipedia, © 2001–2019). K jednoduché demonstraci tohoto experimentu použijeme láhev od čaje, která se skládá ze dvou válců (jeden s menším průřezem, druhý s větším). Když je tato láhev naplněna vodou na různých úrovních, jsou produkovány různé tóny, tím napodobíme univerzální Helmholtzův rezonátor. Do naplněné láhve s vodou je potřeba foukat ústy, smartphonem pak provádíme zvukovou analýzu a hledáme rezonanční frekvenci láhve. Změnou objemu vody v láhvi je možné zjistit vztah mezi objemem a rezonanční frekvenci (Monteiro, 2018).

Další experimenty představíme detailněji v následující části, kde kromě podrobného postupu přidáme i výsledky našeho měření. V této práci ale neuvádíme všechny možné

akustické experimenty a jistě existují i další, které jsme zde neuvedli. Podrobnější studium dalších experimentů by však již přesahovalo doporučený obsah této práce.

2. Experimentální část

V této části představíme detailně osm experimentů využívajících ke svému provedení senzor hladiny intenzity zvuku či tónový generátor smartphonu. V každém experimentu připomeneme teoretický základ, popíšeme postup a představíme výsledky našeho měření. Na závěr vždy zkonstatujeme, zda je experiment vhodný k použití a zda je jeho provedení jednoduché. Experimenty jsme uspořádali podle toho, v jakém pořadí se jim věnujeme na střední škole (Lepil, 2009, s. 6-7). Každý experiment jsme prováděli pouze na smartphonech či tabletech se systémem Android, všechny aplikace jsou tedy doporučeny pro tento typ smartphonů.

2.1. Rázy

Studentům často dělá problém pochopit různé fyzikální jevy a koncepty, propojit teorii s praxí, analyzovat data, popř. grafy. Jedním z problémových témat je právě princip superpozice, s čímž souvisí tzv. rázy. Pro studenty je jednoduché si představit mechanické rázy, které v praxi demonstrujeme pomocí vázaných oscilátorů. Při přechodu k abstraktnějšímu tématu akustických a elektromagnetických vln je pochopení horší (Osario, 2018). Toto téma je zařazeno na školách do kapitoly Kmitů a vln, v rámci popisu Kmitání jednoduchého oscilátoru (Lepil, 2009, s.6). K demonstraci rázů se používají nejčastěji ladičky, a je tedy kladem důraz na smyslový vjem studentů. To ale nemusí vést studenty k správnému pochopení tohoto jevu. K vizualizaci rázů a k vysvětlení principu superpozice nám můžou pomoci právě smartphony (Osario, 2018). Ty umožní studentům vlastní experimentování a seznámení se s problematikou.

2.1.1. Teoretický popis

Často se setkáváme s případem, kdy prostorem současně postupují dvě a více vln. Jako příklad můžeme uvést hudební koncert, kdy do našeho ucha dopadá zvuk několika hudebních nástrojů nebo jezero, na kterém je voda rozpořívána vlnami postupujícími od mnoha člunů (Halliday a kol., 2013, s.445).

Kmitání, stejně tak jako vlnění, je pohyb. Tak jako skládáme pohyby, je možné skládat i kmity. Tuto vlastnost označujeme jako princip superpozice (Bajer, 2006, s. 246). Vychází z mechaniky a říká, že jestliže popisujeme výslednou polohu tělesa, konajícího současně více pohybů, je tato poloha stejná, jako kdyby těleso konalo tyto pohyby po sobě v libovolném pořadí (Lepil, 2009, s.26). Tohoto principu se využívá také pro popis vlnění. Výchyly překrývajících se vln se algebraicky sčítají a tvoří jednu výslednou vlnu. Při označení výchylek, např. elementu struny y_1 , resp. y_2 , je výsledná výchylka elementu struny určena vztahem

$$y = y_1 + y_2, \quad (1)$$

kde znaménko plus označuje právě algebraický součet (Halliday a kol., 2013, s. 445).

Nejjednodušší případ je, jestliže skládáme dvě vlnění o stejné amplitudě ($y_{m1} = y_{m2} = y_m$), která se šíří se stejnou úhlovou frekvencí ω (Lepil, 2009, s.27). Časový průběh výchylek dvou vln je pak popsán rovnicemi:

$$y_1 = y_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$y_2 = y_m \sin(\omega t) \quad (3)$$

(Halliday a kol, 2013, s.477). Předpokládáme, že fáze kmitavého zdroje jsou nastaveny tak, že do určitého bodu P přicházejí vlny se stejnou fází. Budeme-li hovořit o viditelném elektromagnetickém vlnění, světlo v tomto bodě bude velmi jasné, pokud popisujeme akustické vlny, bude zvuk v tomto místě velmi hlasitý. Naopak budou-li přicházející signály posunuty o 180° (fáze budou opačné), bude signál v bodě P nulový, výsledná amplituda bude mít v tomto bodě své minimum (Feynmann, 2013, s.646).

Speciální případ nastává, máme-li dvě vlny s navzájem blízkými frekvencemi $\omega_1 \approx \omega_2$. Posloucháme-li po sobě dva tóny, jejichž frekvence je blízká, tak je většinou nedokážeme rozlišit. Jestliže ale posloucháme tyto tóny současně, uslyšíme střídavé změny v intenzitě tónu – ta postupně roste a klesá v určitých frekvencích. Tomuto složenému vlnění říkáme rázy neboli záněje (Halliday a kol., 2013, s. 477). Amplituda výchylky výsledného vlnění se periodicky zvětšuje a zmenšuje. Protože platí $\omega = 2\pi f$, výslednou frekvenci můžeme vyjádřit vztahem

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (4)$$

(Encyklopedie fyziky, © 2006-2019). Pro frekvenci, se kterou se budou opakovat rázy (se kterou pozorujeme maxima intenzity), můžeme napsat

$$f_{\text{rázy}} = f_2 - f_1. \quad (5)$$

V praxi se rázy využívají například k ladění hudebních nástrojů (Halliday a kol., 2013, s.478).

2.1.2. Metody měření

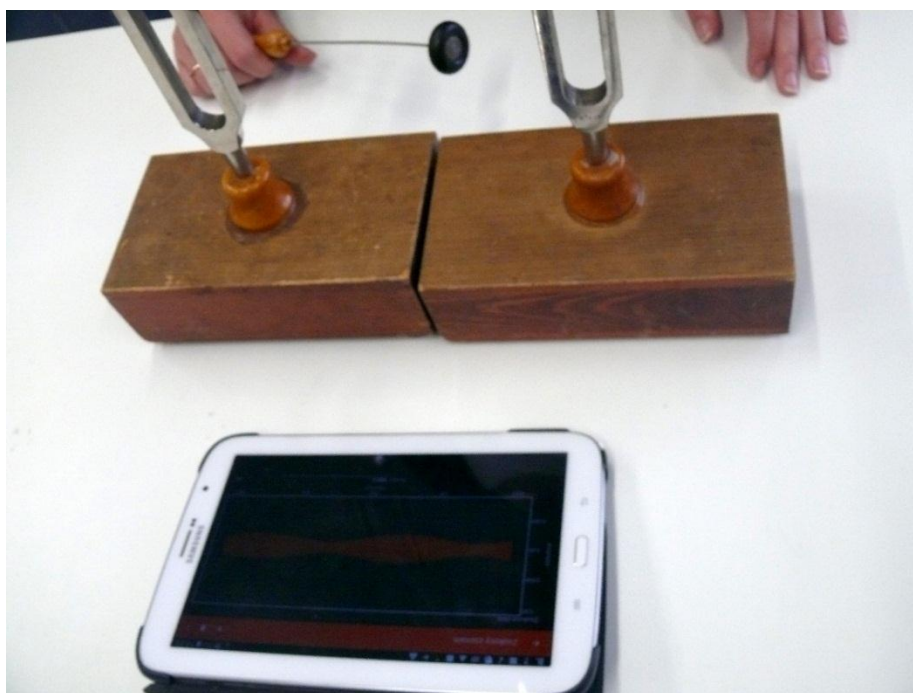
Cílem této části je vysvětlit studentům princip superpozice a rázů pomocí smartphonu. K dispozici je několik experimentů, při kterých můžeme mikrofonem smartphonu nahrát libovolný zvuk. Aplikace může výslednou akustickou vlnu vykreslit, tu pak můžeme okamžitě vizuálně analyzovat. Jedna z možností je charakterizovat zdroj, jeho frekvenci, ale můžeme také zaznamenat akustický průběh rázů. Naměřená data jsme následně schopni exportovat s využitím Excelu a jev dále detailněji popsat.

Měření můžeme provést dvěma způsoby. První z nich je tradiční způsob, kdy využijeme dvou ladiček (Osorio, 2018), druhá možnost je využít tří smartphonů (Vieyra Software, © 2019).

a. Měření pomocí ladiček

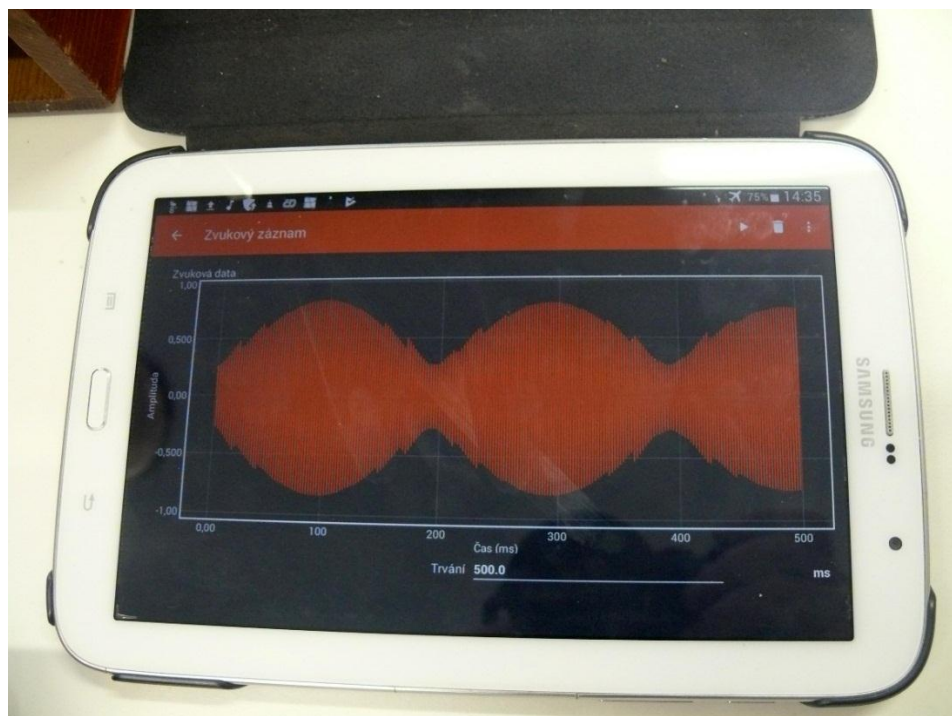
Pomůcky: Dvě ladičky na rezonančních skříňkách, ladící element na ladičce, pryžové kladívko, smartphone, aplikace Phyphox.

Princip tohoto měření spočívá v tom, že pomocí ladícího elementu jsou nastaveny frekvence obou ladiček na velmi blízké, ale ne stejné. Jestliže udeříme zvlášť do jedné a následně do druhé ladičky, můžeme ale nemusíme rozeznat dva různé tóny. Udeříme-li do obou ladiček zároveň, oba tóny dorazí k našemu uchu ve stejnou dobu, dochází k jejich skládání a my slyšíme periodické změny v intenzitě zvuku – rázy (FyzWeb). Vzniklé akustické vlny můžeme detekovat mikrofonem tabletu pomocí aplikace Phyphox.



Obrázek 5 : Měření rázů pomocí ladiček

Pro zaznamenání a analýzu zvuku v aplikaci Phythox v záložce Akustika vybereme experiment Zvukový záznam (Obrázek 6). Dobu trvání zvolíme maximální, a to 500 ms.



Obrázek 6: Zvukový záznam rázů ladiček

Pro export dat postupujeme tak, že klikneme na ikonu v pravém horním rohu, zvolíme Exportuji data, Excel a následně vybereme vhodnou metodu sdílení. Frekvenci rázů můžeme analyzovat přímo v aplikaci Phyphox vizuálně nebo pak přesně v programu Excel. Bylo by také možné naměřit Zvukový záznam každé ladičky zvlášť, v počítači pak přesně určit frekvenci každé z nich. Při měření frekvence jednotlivých akustických vln nebo výsledné akustické vlny postupujeme tak, že nejprve určíme periodu vlnění. Perioda je doba, za kterou proběhne jeden kmit. Frekvence je pak počet kmitů za jednu sekundu. Můžeme ji také popsat vztahem:

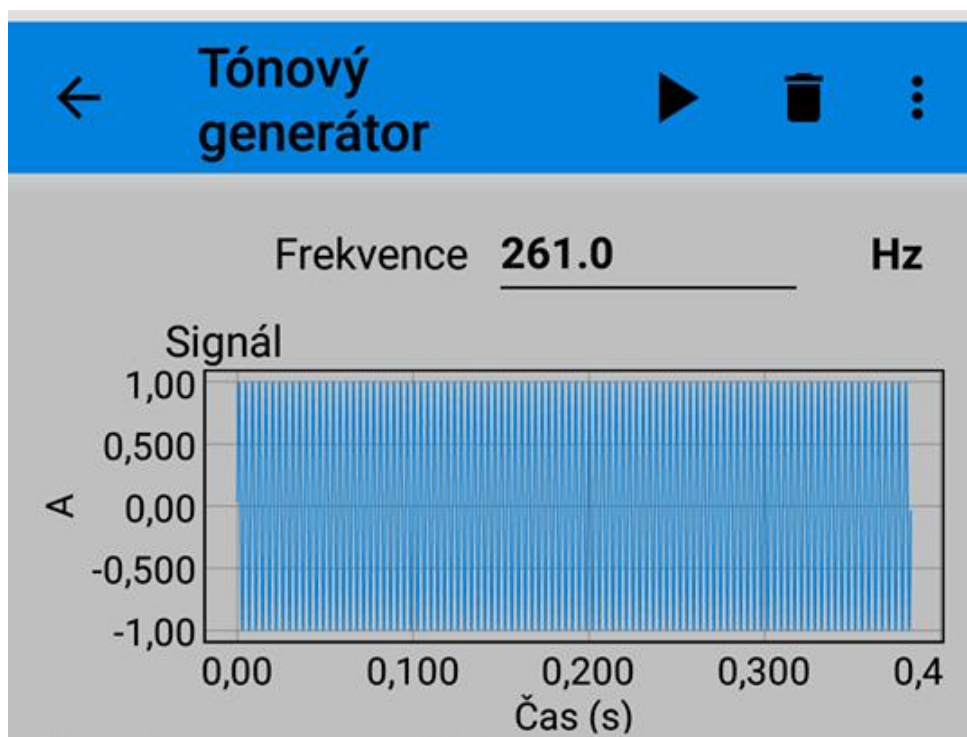
$$f = \frac{1}{T} \quad (6)$$

(Lepil, 2009, s.13). Při měření rázů můžeme určit nejen frekvenci rázů ale také frekvenci vlnění, která by měla být dána vztahem (4).

b. Měření pomocí tří smartphonů

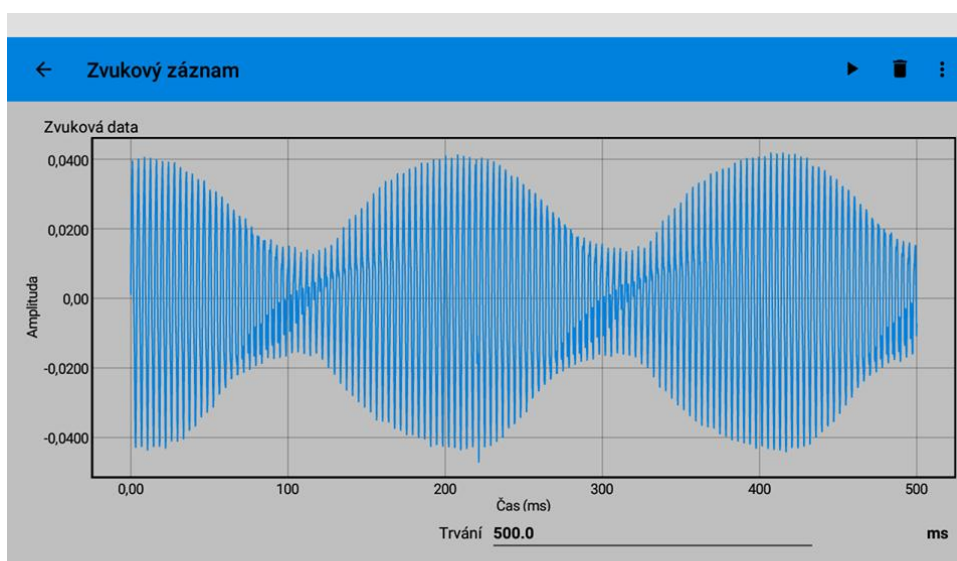
Pomůcky: Tři smartphony, aplikace Phyphox.

V tomto měření používáme dva smartphony jako generátory zvuku a třetí jako jeho analyzátor. Ideální je použít dva stejné smartphony jako generátory tónů, aby jejich mikrofony byly co nejpodobnější (Vieyra Software, © 2019). Není to ale nutnost a pro demonstraci jevu dostačují i dva rozdílné telefony. Pomocí aplikace Phyphox, experimentu Tónový generátor si můžeme navolit takovou frekvenci, jakou aktuálně požadujeme. Použití dvou tónových generátorů nám umožňuje, zvolit si jakoukoliv frekvenci pro experiment. Protože můžeme libovolně měnit frekvenci na obou telefonech, můžeme korigovat a střídat i frekvenci rázů.



Obrázek 7: Phyphox - tónový generátor

Pro analýzu tónů opět použijeme aplikaci Phyphox, experiment Zvukový záznam. Dobu trvání zvolíme na maximální možnou a tedy 500 ms. Už z telefonu můžeme demonstrovat vlnový průběh rázů, orientačně můžeme odhadnout i jejich frekvenci. Přesněji ji můžeme určit pomocí vztahu (5). Graficky můžeme určit periodu rázů a ze vztahu (6) pak vypočítat jejich frekvenci.



Obrázek 8: Phyphox – Zvukový záznam rázů, frekvence jednotlivých vln 261 Hz a 266 Hz

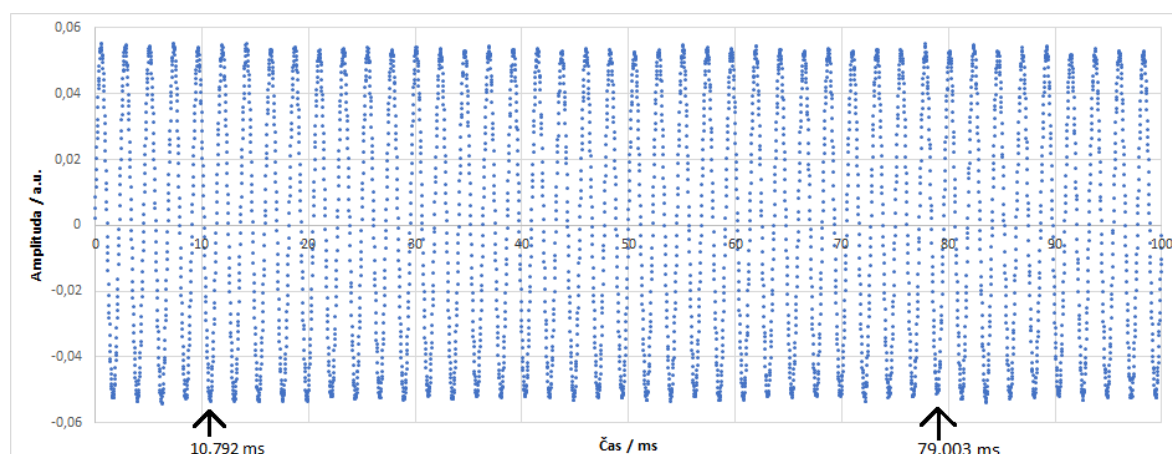
V případě, že bychom chtěli analyzovat záznam přesněji, můžeme měření exportovat do Excelu. Dostaneme se tak k naměřeným datům, z kterých určíme výslednou frekvenci vlnění nebo frekvenci rázů daleko spolehlivěji.

Na závěr můžeme simulovat zvuk s různými frekvencemi rázů a určit, pro které frekvence rázy ještě rozpoznáme a pro které už ne. Většina lidí by měla ještě rozeznat rázy s rozdílem mezi frekvencemi 20 Hz (Vieyra Software, © 2019).

2.1.3. Realizace měření

a. Měření pomocí ladiček

Nejprve jsme naměřili zvukový záznam jedné ladičky. K měření jsme používali tablet Samsung Galaxy Tab A SM-T590. Pomocí tohoto záznamu můžeme určit frekvenci jednoho tónu. Studenti si tak můžou v praxi vyzkoušet hledání a měření periody, i výpočet frekvence z grafického záznamu. Pro větší přesnost výpočtu je vhodné zvolit co největší možný počet period. V tomto případě jsme naměřili dobu trvání celkem třiceti period.



Obrázek 9 : Zvukový záznam jedné ladičky

$$30 T = (79,003 - 10,792) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

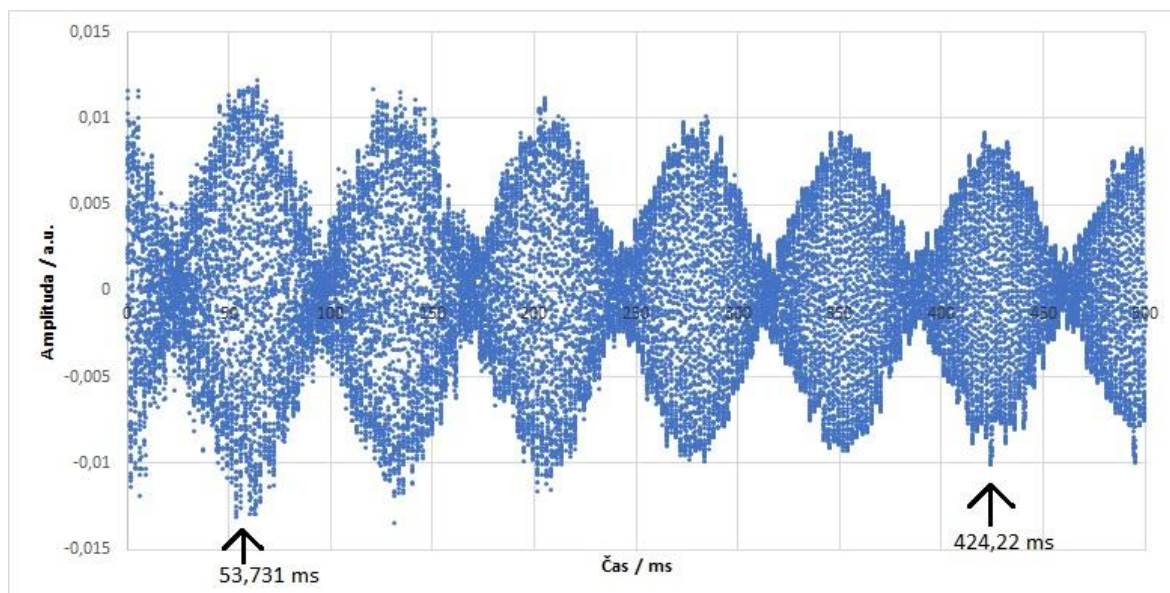
$$30 T = 6,82 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

$$T = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(2,27 \cdot 10^{-3})} = 441 \text{ Hz}$$

$$\delta_r = \frac{|f_{teor} - f_{exp}|}{f_{teor}} \cdot 100 \% = \frac{|440 - 441|}{440} \cdot 100 \% = 0,23 \%$$

Naměřená hodnota frekvence jedné ladičky je 441 Hz což odpovídá teoretické hodnotě, která by měla být rovna 440 Hz. Relativní odchylka měření je 0,23 %.



Obrázek 10: Zvukový záznam dvou ladiček

Následně jsme naměřili Zvukový záznam dvou rozezvučených ladiček. Pro přesnější výpočet frekvence rázů jsme určili dobu pěti period rázů.

$$5T = (424,22 - 53,731) \cdot 10^{-3} \text{s}$$

$$5T = 3,70 \cdot 10^{-1} \text{s}$$

$$T = 7,40 \cdot 10^{-2} \text{s}$$

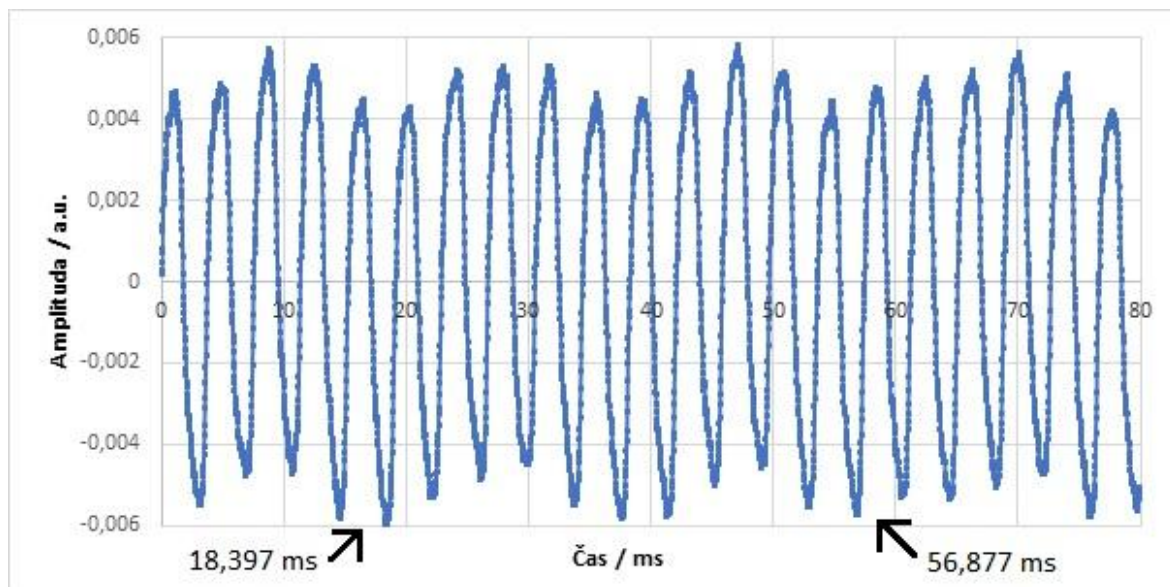
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(7,40 \cdot 10^{-2})} = 13,5 \text{ Hz.}$$

Frekvence rázů dvou ladiček je v tomto případě 13,5 Hz.

b. Měření pomocí tří smartphonů

V tomto měření jsme používali smartphone Lenovo K5 a Huawei Mate 10 jako generátory tónů a tablet Lenovo Yoga Tablet 3 10 jako analyzátor. Jelikož jsme používali dva rozdílné telefony, je i amplituda těchto telefonů odlišná. To můžeme doložit i na obrázcích 11 a 12.

Nejprve jsme naměřili zvukový záznam tónu o frekvenci 261 Hz z jednoho telefonu. V tomto případě dosahuje amplituda tónu k 0,006 u.a.



Obrázek 11: Zvukový záznam tónu o frekvenci 261 Hz z jednoho smartphonu

$$10 T = (56,877 - 18,397) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

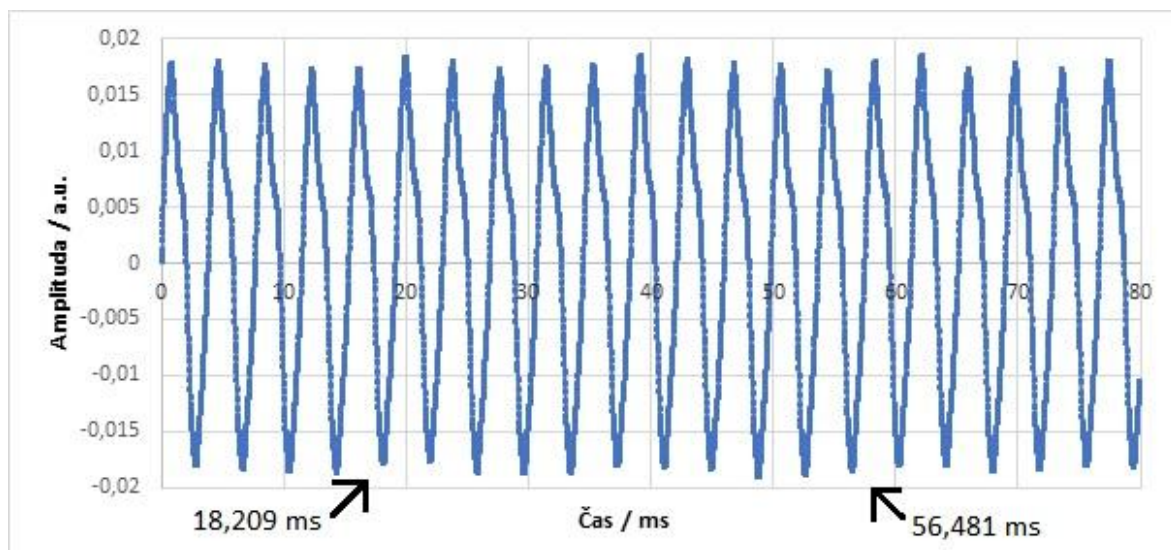
$$10 T = 3,85 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

$$T = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(3,85 \cdot 10^{-3})} = 259,7 \text{ Hz}$$

$$\delta_r = \frac{|f_{teor} - f_{exp}|}{f_{teor}} \cdot 100 \% = \frac{|261 - 259,7|}{261} \cdot 100 \% = 0,50 \%$$

Výpočtem jsme určili frekvenci daného tónu na 259,7 Hz. Požadovaná frekvence, kterou jsme zadali do tónového generátoru, je ale 261 Hz. Relativní odchylka je v tomto případě 0,5 %. Dále jsme provedli to stejné měření, ale s dvěma telefony jako zdroji zvuku o frekvenci 261 Hz. Z obrázku 12 vidíme, že amplituda zaznamenaného tónu je vyšší, dosahuje něco přes 0,015 u.a., ale není dvojnásobná než na obrázku 11. Z toho můžeme usoudit, že amplituda zvuku je u obou telefonů odlišná, což má přímý důsledek při měření zvukového záznamu rázů (viz 2.1.4).



Obrázek 12: Zvukový záznam tónu o frekvenci 261 Hz ze dvou smartphonů

$$10 T = (56,481 - 18,209) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

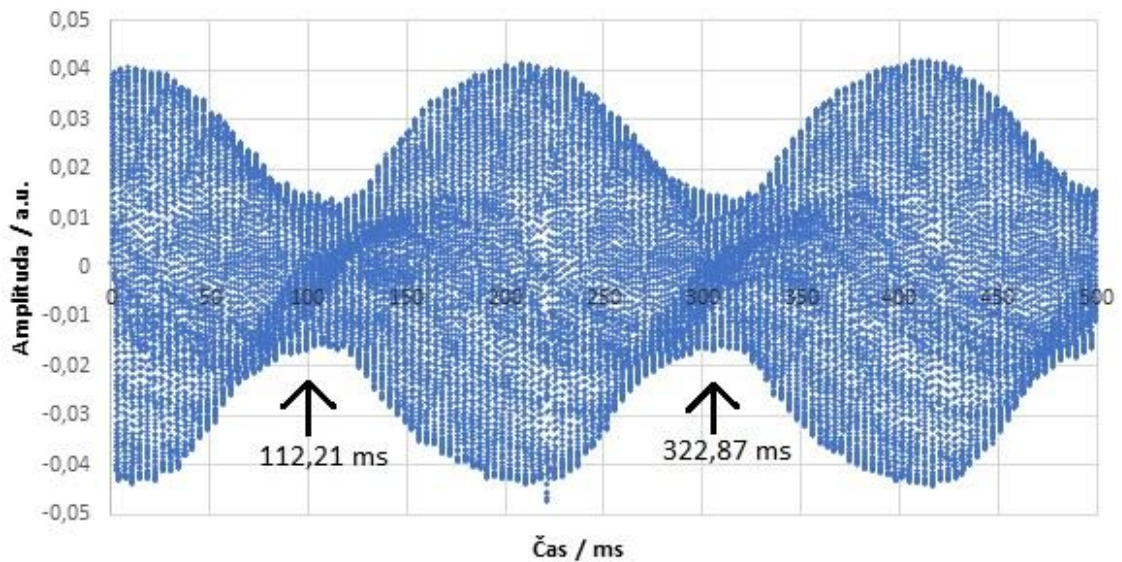
$$10 T = 3,83 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

$$T = 3,83 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(3,83 \cdot 10^{-3})} = 261 \text{ Hz}.$$

V tomto případě jsme opravdu naměřili frekvenci 261 Hz. Můžeme tedy konstatovat, že frekvence na obou grafech (obrázek 11 a 12), je stejná, průběh se mění pouze v amplitudě tónu. To odpovídá principu superpozice, který jsme popsali v části 2.1.1.

V dalších měřeních jsme vždy zanechali frekvenci prvního generátoru na 261 Hz, frekvenci druhého generátoru jsme měnili tak, aby se měnila i frekvence rázů. Nejprve jsme zvolili frekvence 261 Hz a 266 Hz. Na grafu můžeme pozorovat periodické zesilování a zeslabování amplitudy, což odpovídá teorii (2.1.1.). Na Obrázku 13 jsme zvýraznili dobu jedné periody a vypočítali frekvenci rázů.



Obrázek 13: Zvukový záznam tónů o frekvencích 261 Hz a 266 Hz

$$T = (322,87 - 112,21) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

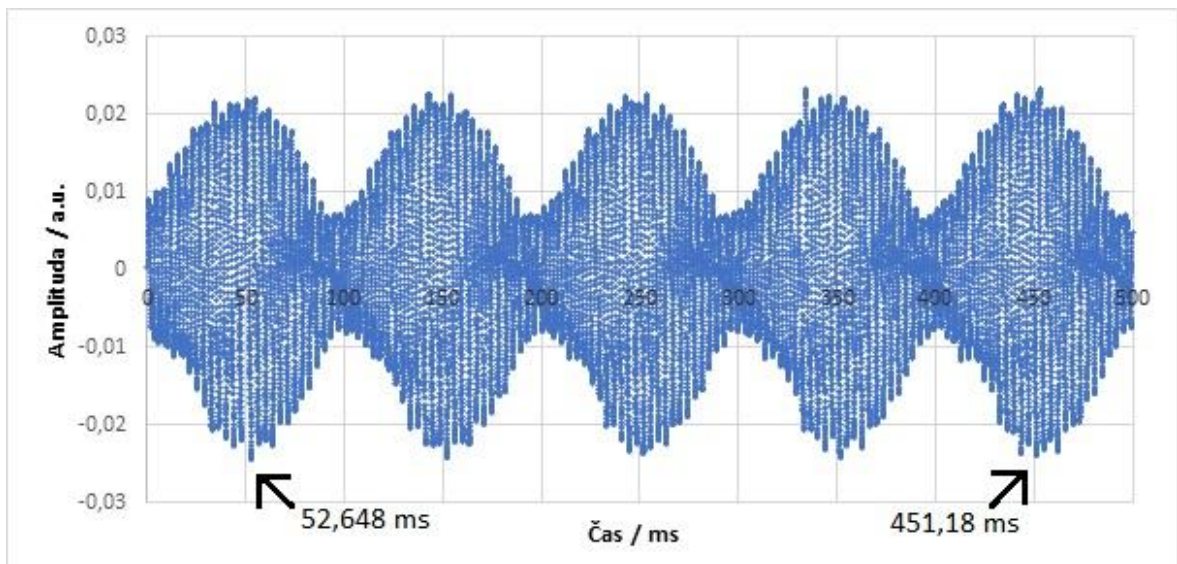
$$T = 2,11 \cdot 10^{-1} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(2,11 \cdot 10^{-1})} = 4,74 \text{ Hz}$$

$$f = f_2 - f_1 = 266 - 261 = 5 \text{ Hz}$$

$$\delta_r = \frac{|f_{teor} - f_{exp}|}{f_{teor}} \cdot 100 \% = \frac{|5 - 4,74|}{5} \cdot 100 \% = 5,2 \%$$

Výpočtem jsme zjistili, že frekvence rázů je 4,7470 Hz, teoretická hodnota je 5 Hz. Vypočtená a teoretická hodnota se zde příliš neliší. Relativní odchylka měření je 5,2 %. Následně jsme měřili frekvenci rázů pro tóny 261 Hz a 271 Hz. Pro přesnější výpočet jsme naměřili dobu 4 period.



Obrázek 14: Zvukový záznam tónů o frekvencích 261 Hz a 271 Hz

$$4T = (451,18 - 52,648) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$4T = 3,99 \cdot 10^{-1} \text{ s}$$

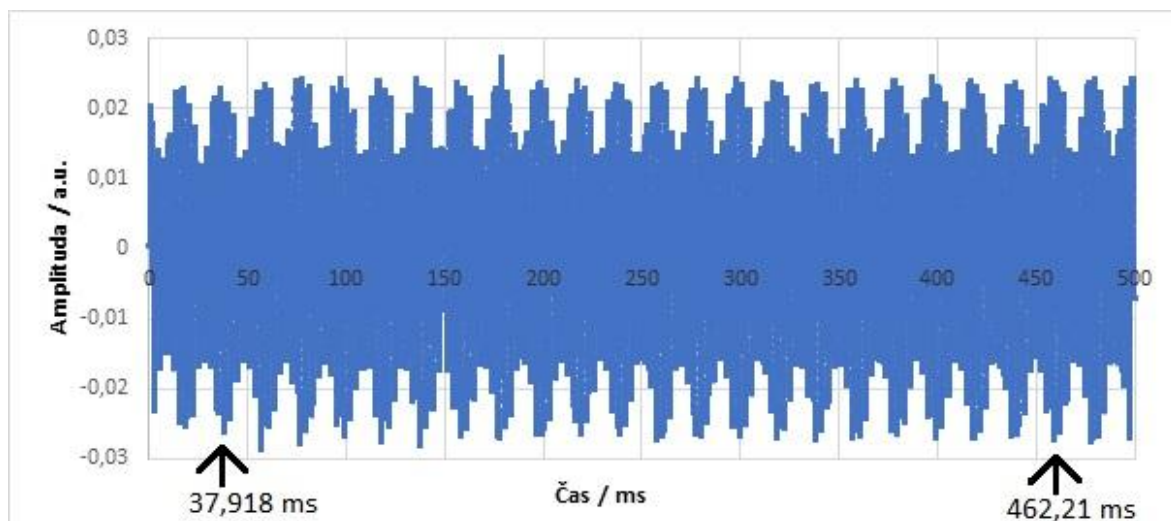
$$T = 9,98 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(9,98 \cdot 10^{-2})} = 10,0 \text{ Hz}$$

$$f = f_2 - f_1 = 271 - 261 = 10 \text{ Hz}.$$

V tomto případě jsme výpočtem určili hodnotu frekvence rázů na 10,0 Hz což souhlasí s teoretickou hodnotou. Můžeme tedy konstatovat, že zde experiment odpovídá teorii.

V posledním měření jsme nastavili frekvenci generátorů na 261 Hz a 311 Hz. Za účelem přesného určení frekvence rázů jsme vycházeli z naměření doby 21 period.



Obrázek 15: Zvukový záznam tónů o frekvencích 261 Hz a 311 Hz

$$21T = (462,21 - 37,918) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$21T = 4,24 \cdot 10^{-1} \text{ s}$$

$$T = 2,02 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(2,02 \cdot 10^{-2})} = 49,5 \text{ Hz}$$

$$f = f_2 - f_1 = 311 - 261 = 50 \text{ Hz}$$

$$\delta_r = \frac{|f_{teor} - f_{exp}|}{f_{teor}} \cdot 100 \% = \frac{|50 - 49,5|}{50} \cdot 100 \% = 1,0 \%$$

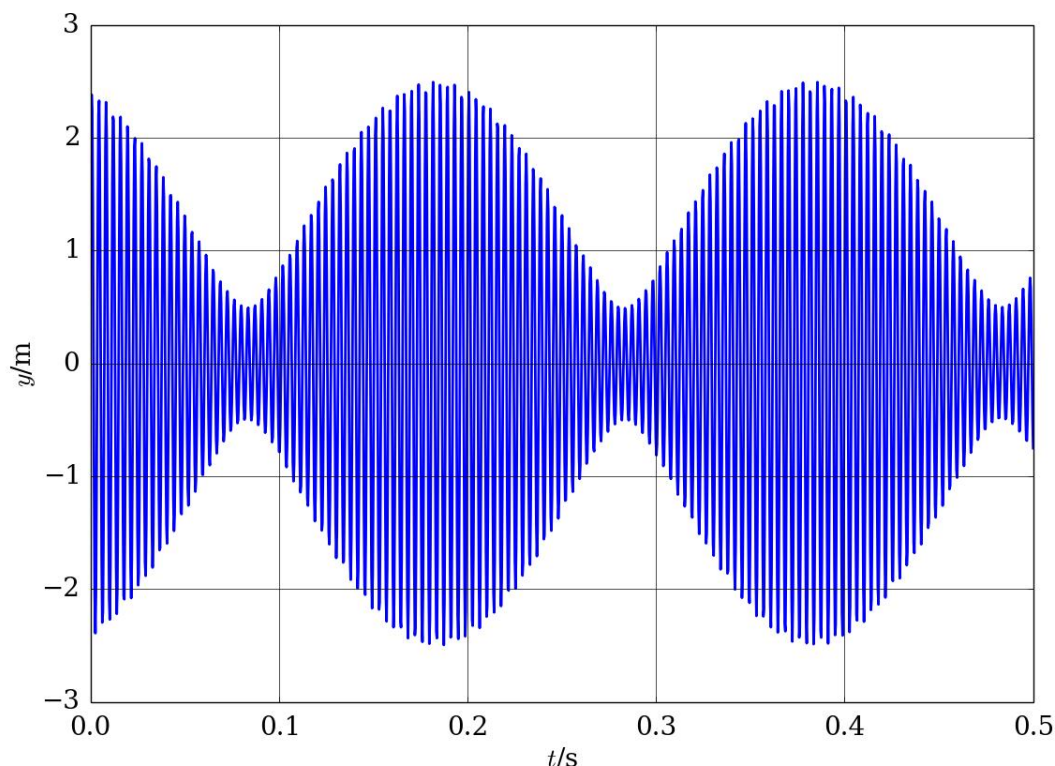
V tomto měření jsme určili hodnotu frekvence rázů na 49,494 Hz, přičemž teoretická hodnota by měla být 50 Hz. Relativní odchylka je tedy 1,0 %. I zde tedy můžeme shledat, že teorie odpovídá praxi a měření je tedy použitelné i ke školní demonstraci rázů a jeho výsledky odpovídají výše zmíněným teoretickým vztahům.

2.1.4. Vyhodnocení

Tento experiment se jeví jako použitelný pro školní praxi. Je velice jednoduchý na realizaci a nenáročný na pomůcky. Výsledky jsou téměř ihned vhodné pro analýzu, a i export dat do počítače není vůbec složitý. Tento experiment může usnadnit studentům porozumění principu superpozice vlnění. Jeho poznatky pak můžou aplikovat nejen v akustice, ale i při následném studiu elektromagnetických vln. Pro žáky může být velmi naučná práce s grafy. Přínosné může být hlavně propojení smyslů (periodické zesilování a zeslabování zvuku)

s grafickým vyjádřením tohoto jevu. Pochopení grafů při studiu vln nemusí být vždy automatické. Experiment může vyučující pojmut demonstračně nebo ho může začlenit do laboratorních cvičení, což ale může být obtížnější pro organizaci. Před realizací tohoto experimentu je ale nutno upozornit na některé komplikace, které můžou nastat.

- Jelikož je maximální vzorkovací frekvence 500 ms, musíme zvolit minimální frekvenci rázů 5 Hz, tak abychom mohli na telefonu odečíst periodu jednoho rázu. Kdybychom totiž zvolili frekvenci nižší – např. 2 Hz, byla by perioda rázů 0,5 s a nemohli bychom pozorovat periodické zesilování a zeslabování amplitudy, ani analyzovat frekvenci rázů.
- Při měření velmi záleží na rychlosti používaného smartphonu nebo tabletu. V našem měření se stávalo, že tablet nereagoval okamžitě. To znamená, že při zaznamenání správného a použitelného průběhu rázů a následného zmáčknutí tlačítka STOP, tablet zareagoval pozdě a uložil až následující měření (následujících 500 ms), které nemělo zpravidla už tak pěkný průběh. To může při delším měření způsobovat značné komplikace a je třeba na to brát ohled především při demonstračním měření.
- Při studiu rázů nás také zaskočilo, že amplituda rázů sice periodicky klesá, ale neklesá až na nulu. To je způsobeno především tím, že používáme dva odlišné smartphony a amplituda jejich zvuku je rozdílná. Tato hypotéza se nám potvrdila při simulaci na počítači, kdy opravdu vnější obálka rázů nikdy neklesá na nulu (viz obrázek 16). Frekvence jednotlivých vlnění je 260 a 265 Hz, fázový posun mezi nimi jsme nastavili na $\pi/6$. Amplituda druhé vlny A_2 je rovna $1,5 \cdot A_1$.



Obrázek 16: Simulace rázů dvou vlnění, jejichž amplituda je různá

Tyto komplikace nám ale nezabraňují konstatovat, že měření je jednoduché, poskytuje výsledky shodné s teorií a mohlo by být použitelné i na školách.

2. 2. Demonstrace akustické analogie řádkovací tunelové mikroskopie

Vynález řádkovací tunelové mikroskopie (STM) hraje obrovskou roli při studiu mikroskopické struktury povrchů a rozvoji nanotechnologií. STM nám umožňuje zobrazovat atomy a molekuly. Správné teoretické pochopení této metody je však pro středoškolského studenta náročné (Euler, 2014). Manfred Euler vyvinul akustický model, který dává do souvislosti kvantovou mechaniku a akustiku. Pomocí této analogie můžeme dostatečně vysvětlit princip řádkovací tunelové mikroskopie na základě středoškolských znalostí akustiky. Experiment, který následně představíme je velice jednoduchý a nenáročný na pomůcky. Použití smartphonů nám dovolí rychlé a jednoduché zobrazování výsledků měření (Thees, 2017).

2. 2. 1. Řádkovací tunelová mikroskopie

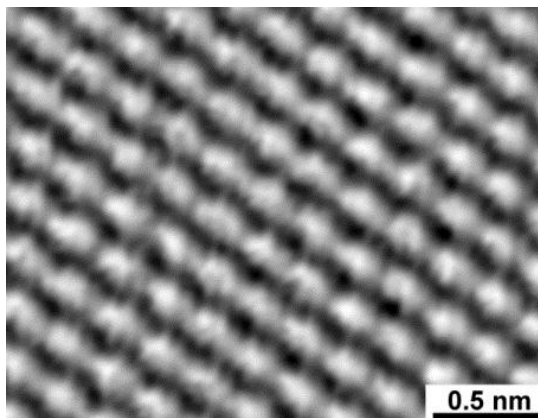
Již několik tisíc let považujeme atomy jako částice, které není možné vidět. S příchodem řádkovací tunelové mikroskopie (STM) bylo možné vytvořit vizualizace atomů nebo molekul a porozumět jejich rozmístění. Z hlediska pochopení principu tohoto mikroskopu, je potřeba nový přístup, který závisí na dostatečných teoretických znalostech studenta. Proces mapování atomu řádkovacím tunelovým mikroskopem se zásadně liší od vizuálních mechanismů a konvenčních technik optického zvětšení. Hlavním důvodem je velký rozdíl mezi klasickými intuitivními makroskopickými modely hmoty a kvantovým chováním hmoty na nano-úrovni (Euler, 2014).

STM vychází z principu kvantového tunelování. To je kvantový jev porušující principy klasické fyziky, kdy částice prochází potenciálovou bariérou, která je vyšší než energie částice (Wikipedie, © 2001–2019). Když se vodivý hrot mikroskopu přiblíží velmi blízko k měřené částici, rozdíl napětí mezi těmito dvěma objekty umožní elektronům tunelový přechod z materiálu do hrotu sondy (Wikipedia, © 2001-2019). Mezi dvěma vodivými objekty – hrotem ostřeným na velikost atomu a povrchem vzorku, vzniká malý elektrický proud, přičemž se hrot s povrchem vzorku nedotknou. Tento malý elektrický proud se vysvětluje právě již zmíněným tunelovým jevem. Měřením elektrického proudu (resp. počtu elektronů) v závislosti na rozdílu napětí a pozici hrotu můžeme získat mnoho informací týkajících se povrchu vzorku (topografie vzorku) a chemické struktury, přesněji elektronové hustoty vzorku (Thees, 2017).

Měření můžeme provést dvěma způsoby. V režimu konstantního proudu elektronika mění výšku hrotu tak, aby procházející proud mezi vzorkem a hrotem byl konstantní. V režimu konstantní výšky se naopak udržuje stále stejná výška a my zaznamenáváme změnu proudu, což může být poté vztaženo k hustotě náboje. Výhodou druhé metody je především její rychlost (Wikipedie, © 2001-2019).

Pokud se povrch skládá pouze z jednoho typu atomů, můžeme zjistit skutečné polohy těchto částic. Atomy jiného typu ale nemusí být, vzhledem k jejich rozdílné elektronové hustotě detekovány – aby u nic proběhl tunelový jev, museli bychom modifikovat napětí mezi vzorkem a hrotem, pro které k tunelovému jevu dochází (Thees, 2017). Je důležité také zmínit, že výstupní obraz (viz obrázek 17) částice nezobrazuje. Z takového obrazu

můžeme vyčíst pouze data, která odrážejí variace tunelového proudu v závislosti na hustotě elektronových stavů (Euler, 2014).



Obrázek 17: Zobrazení povrchu grafitu pomocí řádkovacího tunelového mikroskopu (převzato: Scanning tunneling microscope, wikipedia, © 2001-2019).

2. 2. 2. Teoretický popis experimentu

Existuje několik výukových modelů, které demonstrují princip tohoto mikroskopu. Používá se například mechanického skenování makroskopických struktur pomocí kuliček nebo míčků stolního tenisu, které reprezentují atomy. Dalším přiblížením může být princip Braillova písma, kdy se atomy vzorku podobají tečkám Braillových písmen. Tyto modely však zanedbávají kvantovou interakci mezi hrotem a atomy na povrchu vzorku (Euler, 2014).

Manfred Euler vyvinul akustický model, který umožňuje reprezentovat základní měřicí principy. Ten je založen na analogii mezi kvantovou mechanikou a akustikou, kdy namísto skenování pomocí tunelového jevu využíváme akustické rezonance. My pak neměříme proud elektronů ale zesílení či zeslabení amplitudy zvuku (Thees, 2017). Rezonance spočívá v tom, že můžeme malou, periodicky působící silou v oscilátoru vybudit kmitání o značné amplitudě (Lepil, 2009, s. 45). Jako rezonátory v tomto experimentu použijeme plastové lahvičky od jogurtových nápojů. Ty budou reprezentovat atomy na povrchu vzorku (Thees, 2017). Jestliže najdeme frekvenci, při které dochází v lahvičkách k rezonanci, dojde k zesílení amplitudy nucených kmitů (Lepil, 2009, s.45). V tomto případě dojde k zesílení amplitudy akustického vlnění.

2.2.3. Metody měření

Pomůcky: několik lahviček od jogurtových nápojů (my jsme použili 4), dva smartphony s aplikací Phyphox, knihy (nejsou nutné), stříkačka (nebo odměrný válec), voda, sluchátka, mikrofon, lepící páska.

K měření jsme použili tablet Lenovo Yoga Tablet 3 10 a telefon Lenovo K5, kdy tablet sloužil jako zdroj zvuku, telefon jako analyzátor. V prvním případě, jsme v aplikaci Phyphox použili experiment Tónový generátor, který nám umožňuje zvolit si frekvenci vhodnou k měření (viz 2. 1. 2). K analýze zvuku jsme zvolili experiment Amplituda zvuku. Tento experiment měří amplitudu zvuku v závislosti na čase (Phyphox, 2017). Naměřené výsledky si pak můžeme uložit vyfocení obrazovky (pro tento experiment je to dostačující) nebo si můžeme data extrahovat do excelu a dále s nimi pracovat. Postup ukládání dat je stejný jako při měření předchozích experimentů.

Pro měření jsme zvolili režim konstantní výšky, při kterém budeme používat stejnou rezonanční frekvenci a skenovat budeme ve stejné výšce (Thees, 2017). Experiment probíhá tak, že umístíme všechny lahvičky od jogurtu do jedné řady, zdroj zvuku a analyzátor přitiskneme co nejbližší k sobě a pomalým tempem skenujeme jednu lahvičku za druhou. Během pohybu, by tablet s telefonem měli zůstat stále ve stejné výšce, k tomu si můžeme pomoci například dostatečně vysokým sloupcem knih, o který se můžeme opřít (viz obrázek 18). Na obrázku 18 je zdroj zvuku a analyzátor opačně, než je v textu popsáno. Z důvodu praktičnosti jsme ale použili tablet jako zdroj zvuku a telefon jako analyzátor.



Obrázek 18: Demonstrace principu tunelového mikroskopu

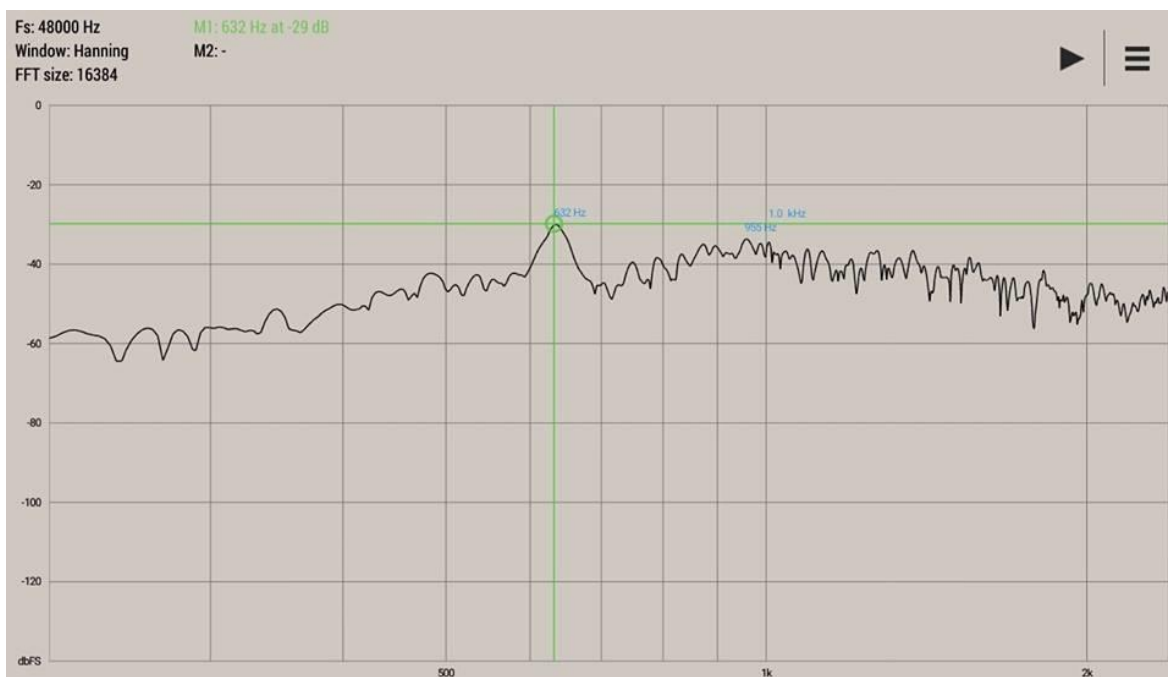
Než začneme samotné měření, je potřeba najít rezonanční frekvenci lahvičky. K tomu jsme využili vlastností bílého šumu (Thees, 2017). Je to signál s rovnoměrnou spektrální hustotou. To znamená, že signál má stejnou amplitudu pro všechny frekvence. Nazýváme jej bílý podle bílého světla, které obsahuje všechny vlnové délky světla. Bílý šum obsahuje všechny frekvence (Wikipedie, © 2001-2019). Na telefonu jsme tedy pustili tento bílý šum a reproduktor namířili do jedné z lahviček. Tablet jsme použili jako analyzátor zvuku, přičemž jsme na něm spustili aplikaci Advanced Spectrum Analyzer. Tato aplikace ukazuje závislost amplitudy zvuku na jednotlivých frekvencích. Při namíření mikrofону tabletu a reproduktoru s bílým šumem do lahvičky, zesílí se právě rezonanční frekvence lahvičky (viz obrázek 18). Tu pak identifikujeme pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer, kdy nejvyšší pík bude náležet právě této frekvenci. Pomocí kurzoru můžeme najet na vrchol píku a určit frekvenci přesněji, než se zobrazuje na obrazovce. Aplikaci můžeme stopnout a výsledky si zaznamenat vyfocením obrazovky (i přímo v aplikaci je možné použít tlačítko „Screenshot“).

Poté co nalezneme rezonanční frekvenci, můžeme přejít k samotnému experimentu, který je popsán výše. Při realizaci je potřeba umístit reproduktor tabletu a mikrofon co neblíže k sobě. Přejedeme-li těmito přístroji nad lahvičkou, bude se amplituda zvuku zvyšovat, protože lahvička bude v tomto případě rezonovat. Poté co najedeme do prostoru mezi lahvičkami, amplituda zvuku klesne.

Tento experiment pak můžeme modifikovat nejrůznějšími způsoby. Například můžeme do lahviček libovolně nalívat vodu. Tím vyrobíme dva rozdílné typy akustických rezonátorů (Thees, 2017). Tyto lahvičky pak nebudou citlivé na rezonanční frekvenci prázdných lahviček. Takto můžeme demonstrovat rozdílné elektronové hustoty různých atomů (viz kapitola 2.2.1.).

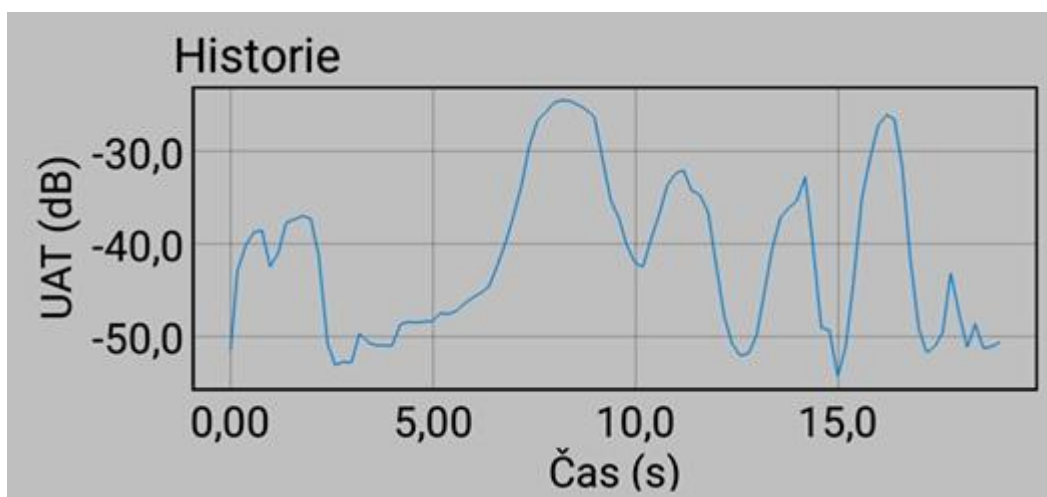
2. 2. 4. Realizace měření

Na začátku jsme hledali rezonanční frekvenci pro prázdné lahvičky od jogurtových nápojů. Výsledek měření pomocí bílého šumu a aplikace Advanced Spectrum Analyzer je na obrázku 19. Graf zobrazuje závislost amplitudy zvuku na jeho frekvenci.



Obrázek 19: Hledání rezonanční frekvence pro prázdné lahvičky

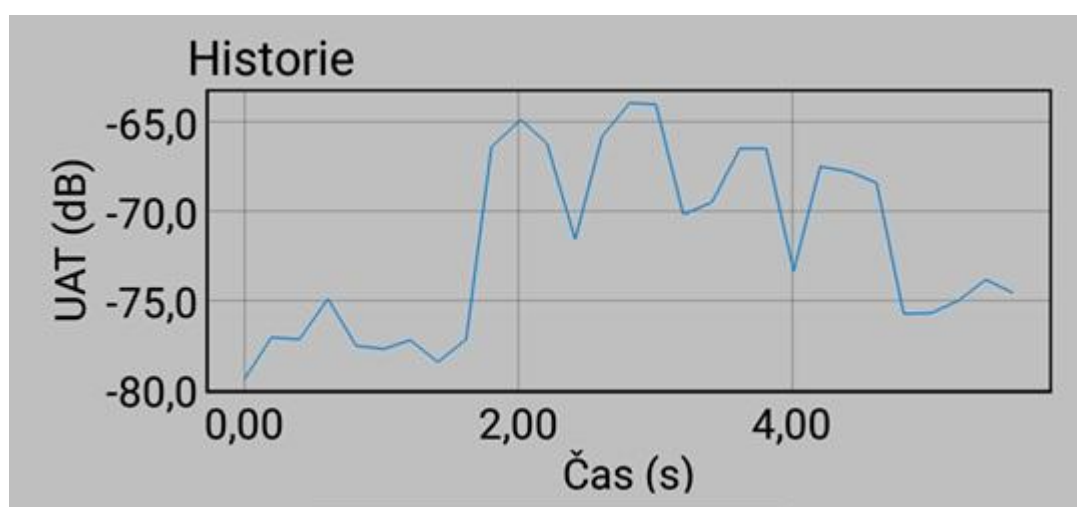
Můžeme vidět, že nejvyšší pík nalezneme pro frekvenci 632 Hz. Toto by tedy měla být rezonanční frekvence jogurtových lahviček a tuto frekvenci by lahvičky měly zesilovat. Provedli jsme tedy scan čtyř prázdných lahviček, přičemž výše popsanou analogií by tyto lahvičky měly prezentovat čtyři totožné atomy. Na obrázku 20 vidíme závislost amplitudy zvuku na čase.



Obrázek 20: Scanování čtyř prázdných lahviček pomocí telefonu a tabletu

Na obrázku 20 můžeme vidět čtyři velké nárůsty amplitudy. K zesílení amplitudy zvuku dochází vždy, nacházíme-li se s telefonem a tabletem nad jednou z lahviček. I na základě

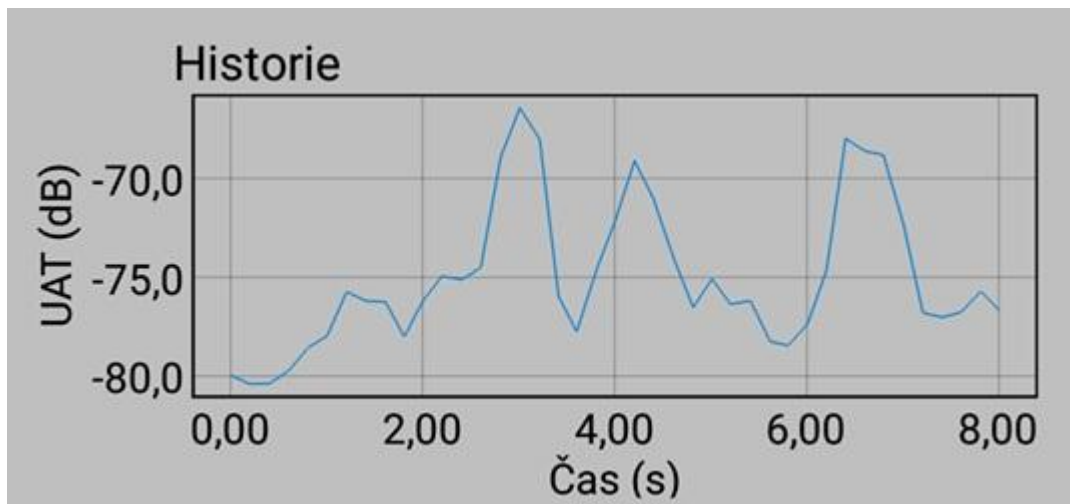
tohoto obrázku bychom mohli odvodit, že pracujeme se čtyřmi totožnými lahvičkami – v řádkovací tunelové mikroskopii by to znamenalo se čtyřmi stejnými atomy. Výsledný obrázek tedy přímo neukazuje tvar lahviček, zaznamenává data, které nám říkají, ve kterých místech se lahvičky nacházejí a jaký je jejich charakter (jestli jsou stejné). Jelikož je práce s tabletem a telefonem po mechanické stránce složitá, také je poměrně komplikované umístit reproduktor tabletu a mikrofon telefonu do těsné blízkosti, použili jsme pro další měření sluchátko a mikrofon. Naším cílem tedy bylo, aby zdroj zvuku i jeho analyzátor byly co nejvíce v jednom bodě, tak jako je to u řádkovací mikroskopie. Výsledek můžeme vidět na obrázku 21. K měření jsme také používali rezonanční frekvenci prázdné lahvičky 632 Hz.



Obrázek 21: Scanování čtyř prázdných lahviček pomocí mikrofonu a sluchátek

Na tomto obrázku můžeme vidět, stejně jako na předešlém, čtyři píky odpovídající čtyřem lahvičkám. Výsledky jsou tedy srovnatelné. Pro všechna další měření jsme k měření využívali mikrofonu a sluchátka.

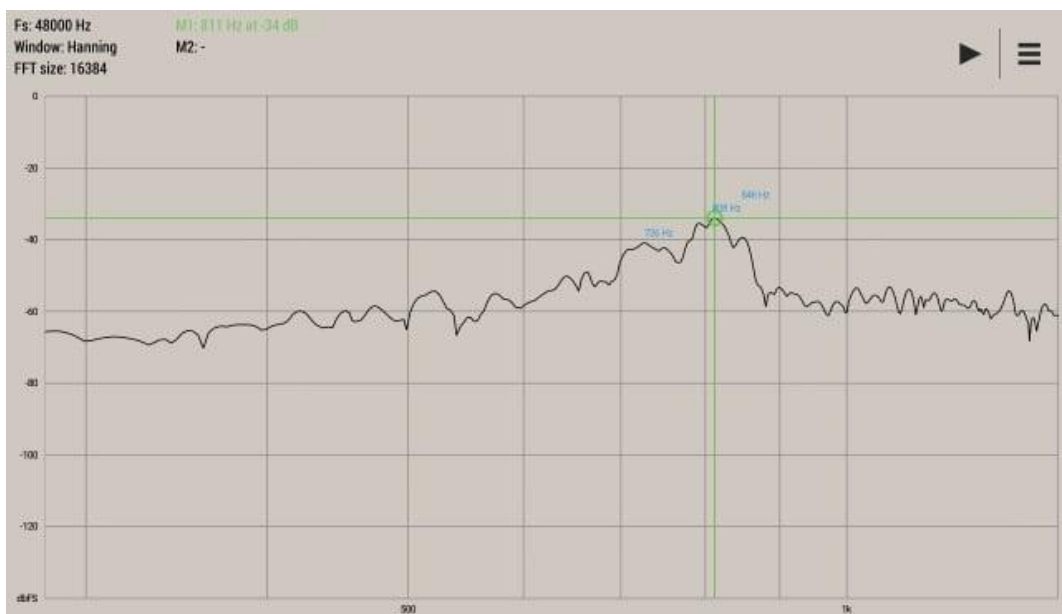
V následujícím experimentu jsme do třetí lahvičky nalili vodu. Tím jsme simulovali rozdílnou elektronovou hustotu tohoto „atomu“.



Obrázek 22: Scanování čtyř lahviček, přičemž ve třetí lahvičce je voda

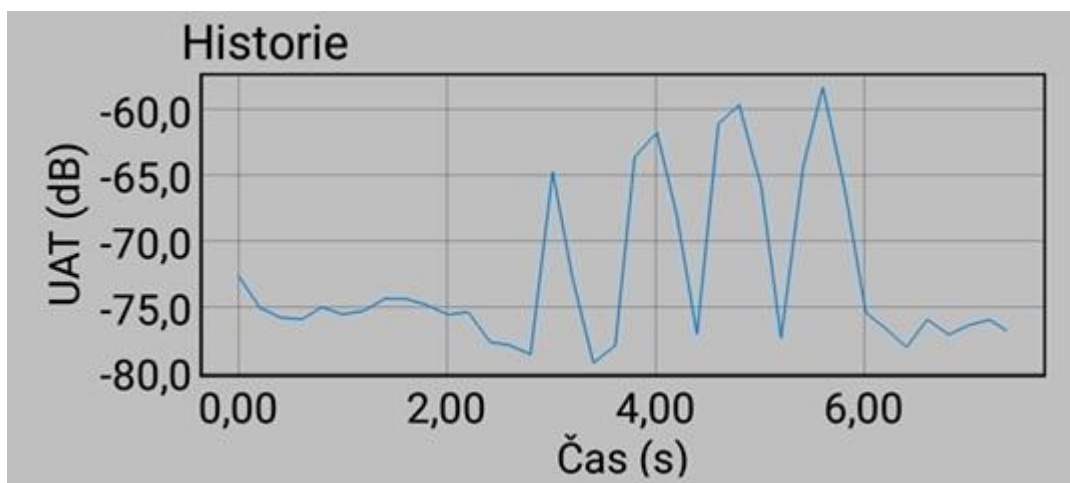
Jestliže je v lahvičce voda, její rezonanční frekvence se změní. Při použití rezonanční frekvence pro prázdnou lahvičku 632 Hz nedojde k zesílení zvuku a přítomnost této lahvičky se na výsledném grafu nebude zobrazovat. To můžeme vidět na obrázku 22, kdy vidíme dva vysoké píky, pauzu a poté další pík, který patří čtvrté – prázdné lahvičce. Stejný výsledek bychom dostali, kdybychom měřili na řádkovacím tunelovém mikroskopu tři atomy stejného prvku, přičemž mezi druhým a třetím by musel být atom jiného prvku.

V následujícím měření jsme hledali rezonanční frekvenci pro lahvičku naplněnou 40 ml vody. Rezonanční frekvenci jsme v tomto případě určili na 811 Hz. Výsledek měření je na obrázku 23. Pro tuto frekvenci by mělo dojít k zesílení amplitudy v lahvičkách se 40 ml vody.



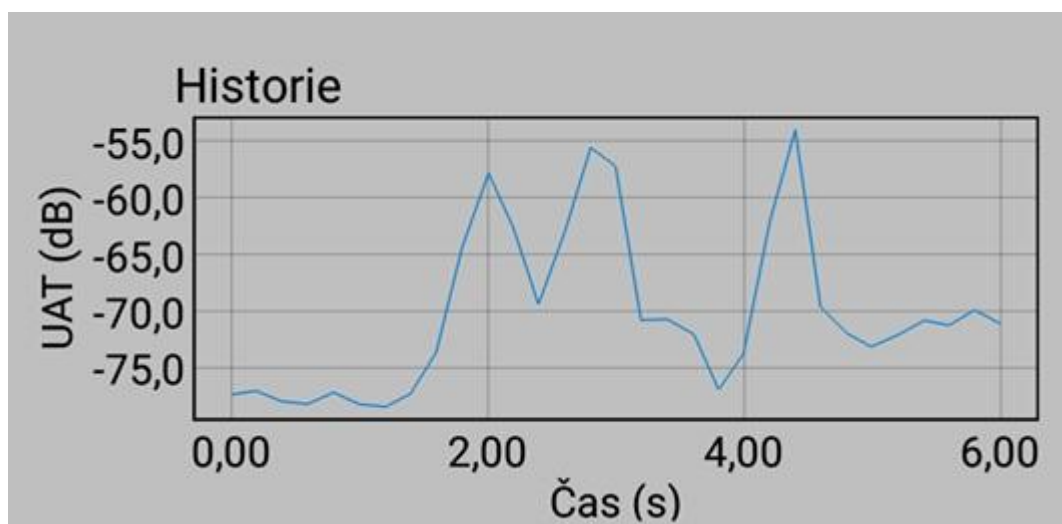
Obrázek 23: Hledání rezonanční frekvence pro lahvičku se 40 ml vody

Poté, co jsme našli rezonanční frekvenci pro lahvičky s 40 ml vody, jsme všechny čtyři lahvičky naplnily a provedly jejich scanování (obrázek 24).



Obrázek 24: Scanování čtyř lahviček naplněných 40 ml vody

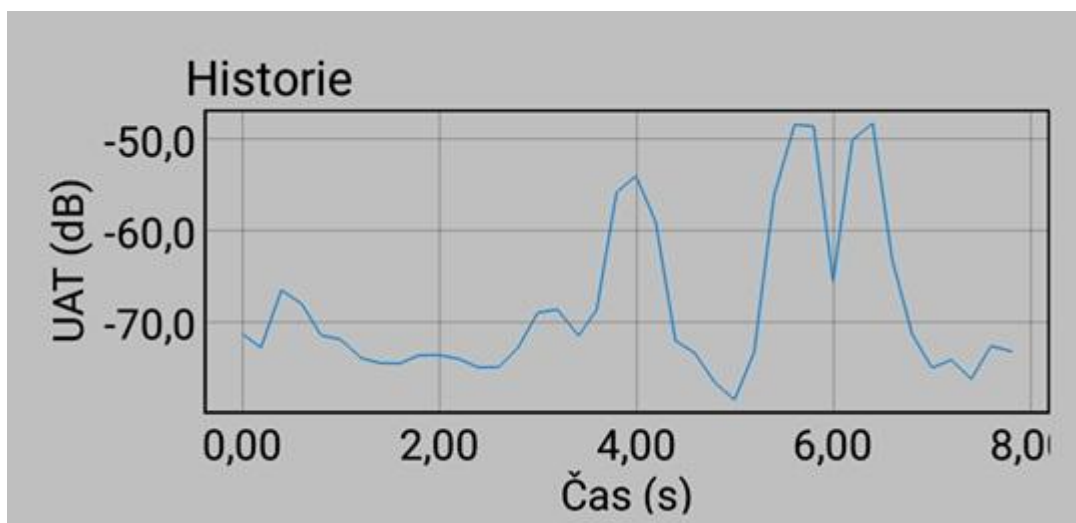
I zde můžeme vidět čtyři velké píky, korespondující čtyřem stejně naplněným lahvičkám, v analogii s STM čtyřem stejným typům atomů. Pro další experiment jsme třetí lahvičku vyliili, byla teď prázdná. Na obrázku 25 můžeme vidět, že na rezonanční frekvenci 811 Hz prázdná lahvička nereaguje, nezesiluje amplitudu zvuku.



Obrázek 25: Scanování lahviček naplněných vodou, třetí lahvička je prázdná

Vidíme, že se mezi druhým a třetím píkem nachází volné místo, na tomto místě se nacházela prázdná lahvička. Pomocí této rezonanční frekvence tedy nemůžeme dokázat její přítomnost.

Pro další experiment jsme všechny čtyři lahvičky naplnili 40 ml vody, do druhé jsme ovšem přidali ještě dalších 40 ml – obsahovala tedy celkem 80 ml vody. Tím jsme vyrobili další typ rezonátoru. Ani tento by neměl reagovat na rezonanční frekvenci 811 Hz, která platí pro lahvičky s 40 ml vody. Výsledek měření je na obrázku 26.



Obrázek 26: Scanování lahviček naplněných 40 ml vody, druhá lahvička je naplněna 80 ml vody

Na obrázku můžeme pozorovat jeden velký pík, poté amplituda zvuku dokonce poklesne a následně další dva píky, které korespondují vzrůstající amplitudě. To znamená, že druhá lahvička, ve které bylo 80 ml vody, nerezonuje při frekvenci 811 Hz a nezobrazí se tedy v grafu. Lahvička s 80 ml vody tedy opět představuje jiný typ atomu (atom jiného prvku) než lahvičky s 40 ml vody.

2. 2. 5. Vyhodnocení

Představili jsme velmi jednoduché měření, které může sloužit k objasnění základních vlastností a principu měření řádkovacího tunelového mikroskopu. Pomůcky, které jsou k provedení experimentu potřeba jsou dobře dostupné a tím dovolují realizovat experiment i ve školních podmínkách. Použití mobilních telefonů poskytuje velmi rychlé a jednoduché obdržení dat a následné zpracování výsledků (Thees, 2017). I samotná realizace

experimentu je velmi jednoduchá. Učitelům bychom doporučili si experiment předem připravit a předem najít rezonanční frekvenci měřených lahviček. Tato část může být obtížnější a pro výuku by bylo lepší alespoň orientačně vědět, jaká by tato frekvence měla být. Je vhodné si experiment také předem vyzkoušet, aby experimentátor věděl, jak správně natočit do lahvičky mikrofon a reproduktor. Samotná realizace je pak ale velmi jednoduchá a především rychlá. Zpracování výsledků je možné už z dat zobrazovaných v telefonu a je tedy okamžité. V obou případech, ale především při měření se sluchátkem a mikrofonem, je potřeba absolutního klidu, i sebemenší hluk může negativně ovlivnit experiment. Zobrazení měření a správná interpretace výsledků může vést k správnému pochopení principu řádkovacího tunelového mikroskopu. Korektní vysvětlení analogie mezi akustikou a kvantovou mechanikou ponouká studenty k lepšímu porozumění rozdílům mezi kvantovou a klasickou mechanikou. Během interpretace experimentu je potřeba se zaměřit především k objasnění tunelového jevu, zobrazení atomů a povrchu vzorku na atomární úrovni (Thees, 2017).

2. 3. Rychlost zvuku ve vzduchu

Měření rychlosti zvuku ve vzduchu je tradiční experiment, který se používá na středních školách. V klasickém provedení používáme Kundtovu trubici a ladičky, jež jsou využity jako zdroje zvuku. V tomto textu představíme upravenou verzi tohoto experimentu, kdy jako zdroj zvuku použijeme aplikaci ve smartphonu. Tímto způsobem si můžeme přesně nastavit měřící frekvenci a podle potřeby ji měnit. Kundtovu trubici také můžeme nahradit skleněným válcem s vodou a plastovou trubicí, kterou budeme postupně zasouvat do vody. Tímto způsobem můžeme kmitny zvukových vln lépe zaznamenat. Tento experiment je také rychlejší a jednodušší k realizaci (Yavuz, 2015).

2. 3. 1. Teoretický popis

Akustické neboli zvukové vlny patří mezi mechanické vlny o malé amplitudě. Mechanické vlnění potřebuje ke svému šíření pružné prostředí. Ve vakuu by k šíření mechanických vln nedocházelo. V plynech a kapalinách se šíří jako podélné akustické vlny. Šíření si můžeme představit jako periodické stlačování a rozpínání vzduchu. To můžeme popsat například

časovou změnou tlaku $p(t)$. Akustický tlak však představuje pouze velmi malou poruchu atmosférického tlaku (Bajer, 2006, s. 359). Nejdůležitější charakteristikou látkového prostředí z hlediska šíření zvuku je rychlost zvuku v tomto prostředí (Lepil, 2009, s. 82). Je známo, že rychlost zvuku nezávisí na jeho intenzitě ani na jeho frekvenci. Důležitými veličinami ovlivňujícími rychlost zvuku jsou například tlak a teplota prostředí (Yavuz, 2015). Při teplotě 0 °C je rychlost zvuku ve vzduchu 331,82 m·s⁻¹. Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu je dána vztahem

$$v = (331,82 + 0,61t), \quad (7)$$

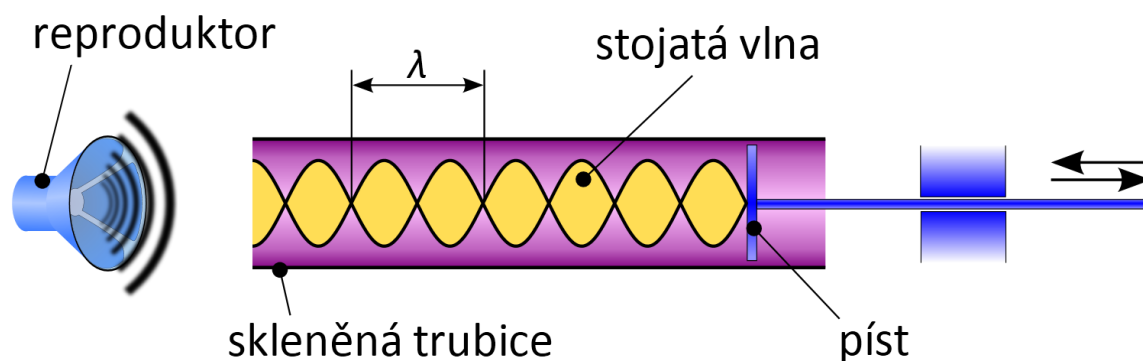
kde t je teplota v stupních Celsia (Lepil, 2009, s. 82-83). Závislost rychlosti zvuku na teplotě udává také tabulka 1.

Tabulka 1: Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu na teplotě (Mikulčák a kol., 1995, s. 159).

t [°C]	v [m·s ⁻¹]
-20	319
-10	325
0	331
10	337
20	343
30	349
40	355
50	360
100	387
200	436
300	480
400	520
500	557

O první měření rychlosti zvuku se pokusili již v 17. století. Toto měření bylo založeno na poznatku, že světlo se šíří mnohem větší rychlostí než zvuk. Pro experiment byla zrealizována exploze ve známé vzdálenosti od pozorovatele, ten měřil zpoždění mezi

světleným zábleskem a zvukovým vjemem. Na základě těchto dat pak mohl určit rychlost šíření zvuku ve vzduchu (Yavuz, 2015). Dnes ji můžeme určit mnohem přesněji i v obyčejné školní laboratoři. Nejznámějším experimentem je měření rychlosti zvuku založené na rezonanci např. vzduchového sloupce (Lepil, 2009, s. 83). Klasickým příkladem může být měření s pomocí Kundtovy trubice. Zvukovou vlnu v trubici o známé frekvenci f vytvoříme pomocí ladičky nebo elektrického generátoru (Bajer, 2006, s. 363). Zdroj zvuku umístíme co nejblíže k ústí trubice (Lepil, 2009, s.121).



Obrázek 27: Schéma experimentu k měření rychlosti zvuku pomocí Kundtovy trubice, upraveno podle: https://de.wikipedia.org/wiki/Kundtsches_Staubrohr#/media/File:Kundt%27s_tube_DE.svg

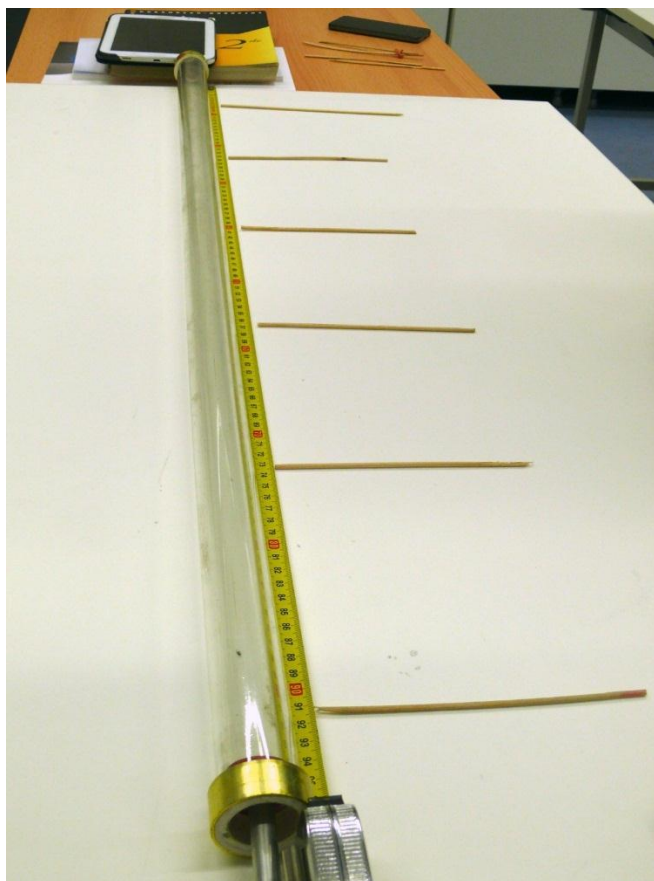
2. 3. 2. Metody měření

K změřením rychlosti zvuku ve vzduchu na základě rezonance můžeme použít několik modifikací jednoho a toho stejného experimentu. První možností je klasické měření za použití Kundtovy trubice. Jako zdroj zvuku můžeme použít smartphone. Pomocí aplikací na telefonu si můžeme navolit téměř jakoukoliv frekvenci, jsme ovšem omezeni frekvenčním profilem reproduktorů, který je přizpůsoben typickým frekvencím v rozsahu lidské řeči. Provedeme tedy několik měření s různými frekvencemi, přičemž nebudeme používat příliš nízké ani vysoké frekvence. Při hledání nejvyšší amplitudy zvuku (největšího zesílení) se nemusíme řídit pouze naším sluchem, a tedy subjektivním vjemem, ale pomocí dalšího smartphonu můžeme toto zesílení měřit. Druhý experiment je za použití plastové trubice a vysokého válce s vodou. Jestliže bychom neměli ve školní laboratoři k dispozici Kundtovu trubici ani vysoký válec, můžeme použít plastový barelu.

a. Měření pomocí Kundtovy trubice

Pomůcky: Dva smartphony s aplikací Phyphox a Frequency Sound Generator, Kundtova trubice, špejle, posuvné měřítko.

K měření jsme použili tablet Samsung Galaxy Tab A SM-T590 s aplikací Frequency Sound Generator. Tento tablet funguje jako zdroj zvuku a je umístěn k volnému konci trubice. Dále jsme použili tablet Lenovo Yoga Tablet 3 10 s aplikací Phyphox, ten zaznamenával zesílení zvuku. V této aplikaci jsme zvolili experiment Amplituda zvuku, program pak vykresluje zesilování a zeslabování intenzity zvuku v závislosti na čase. Pro měření je potřeba mít speciální pomůcku – tzv. Kundtovu trubici, to je skleněná trubice dlouhá přibližně jeden metr a obsahující jeden až dva pohyblivé píсты (Wikipedie, © 2011–2019). Na začátku měření umístíme podél trubice posuvné měřidlo. Při měření pohybujeme pístem směrem od otevřeného konce trubice a hledáme takovou polohu, při které dojde k zesílení zvuku. Změříme vzdálenost l_1 od otevřeného konce trubice až k pístu. Tuto polohu pístu znázorníme tím, že do této vzdálenosti umístíme kus špejle (viz obrázek 28). Pokračujeme s posouváním pístu a opět měříme každou vzdálenost, ve které dojde k zesílení zvuku, v těchto místech můžeme najít kmitny vlnění (viz obrázek 27). Do těchto poloh vždy umístíme špejle tak, abychom na konci experimentu mohli správně odečíst příslušné vzdálenosti a nepřerušovali experiment odečítáním a zapisováním.



Obrázek 28: Měření rychlosti zvuku pomocí Kundtovy trubice

Na základě takto naměřených dat můžeme určit vlnovou délku

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Rychlost zvuku pak určíme pomocí známého vztahu

$$v = \lambda f, \quad (9)$$

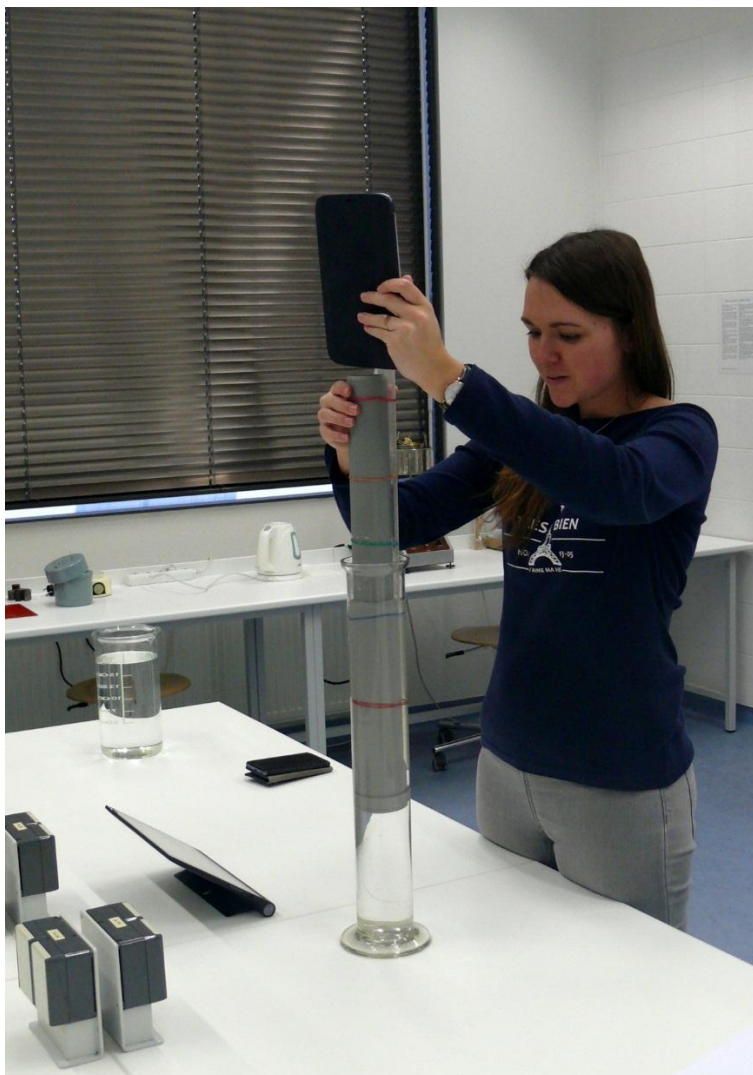
kde f je frekvence vlnění (Lepil, 2009, s. 83 a 120–121).

b. Měření pomocí plastové trubice a skleněného válce s vodou

Pomůcky: Dva smartphony s aplikací phyphox, velký skleněný válec, plastová trubice, voda, dlouhé pravítko, gumičky.

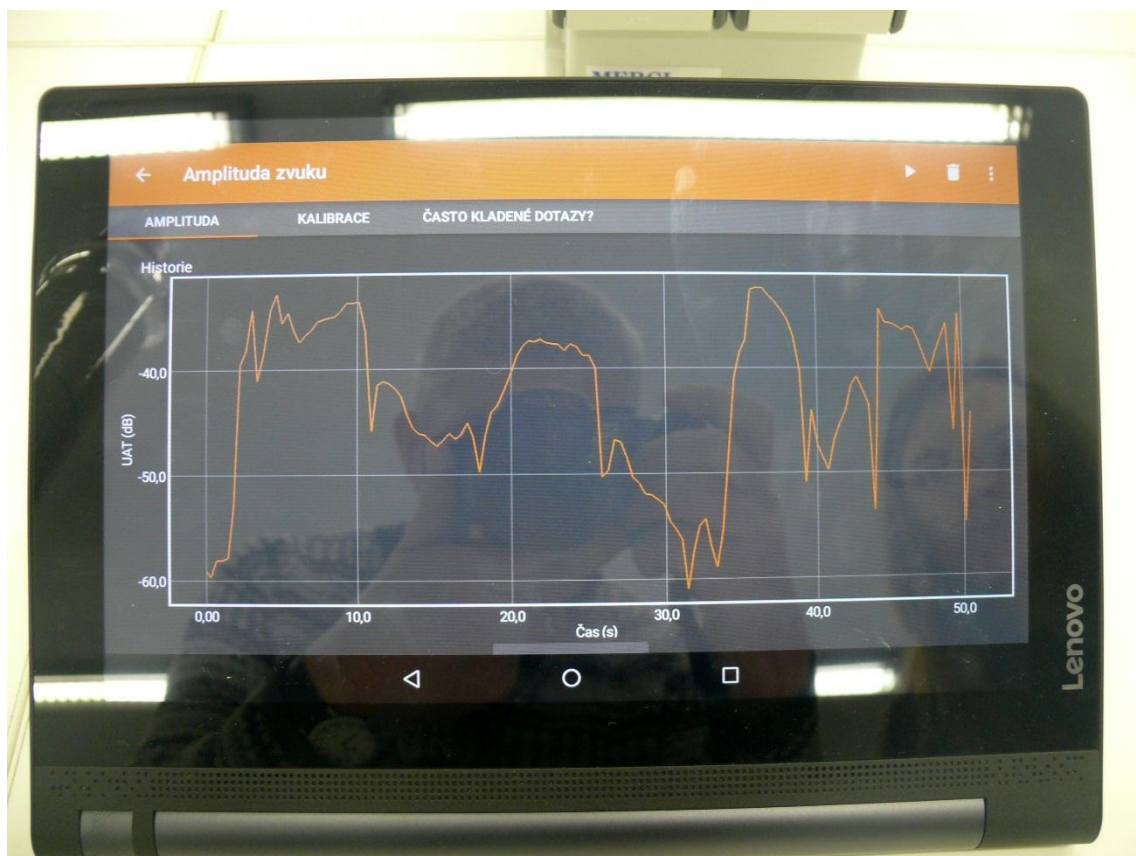
Tento experiment můžeme vyzkoušet, nemáme-li k dispozici Kundtovu trubici s posuvným pístem. V tomto případě použijeme plastovou trubici s oběma konci otevřenými. Do skleněného válce nalijeme vodu. Jeden konec plastové trubice bude ponořen do vody, k druhému volnému konci bude přiložen zvukový generátor – v tomto případě smartphone s aplikací Phyphox – experimentem Tónový generátor, který umožňuje zvolit libovolnou

frekvenci. Při postupném vsunování a vysunování plastové trubice do vody se mění délka vzduchového sloupce, a tedy i intenzita zvukového signálu (Yavuz, 2015).



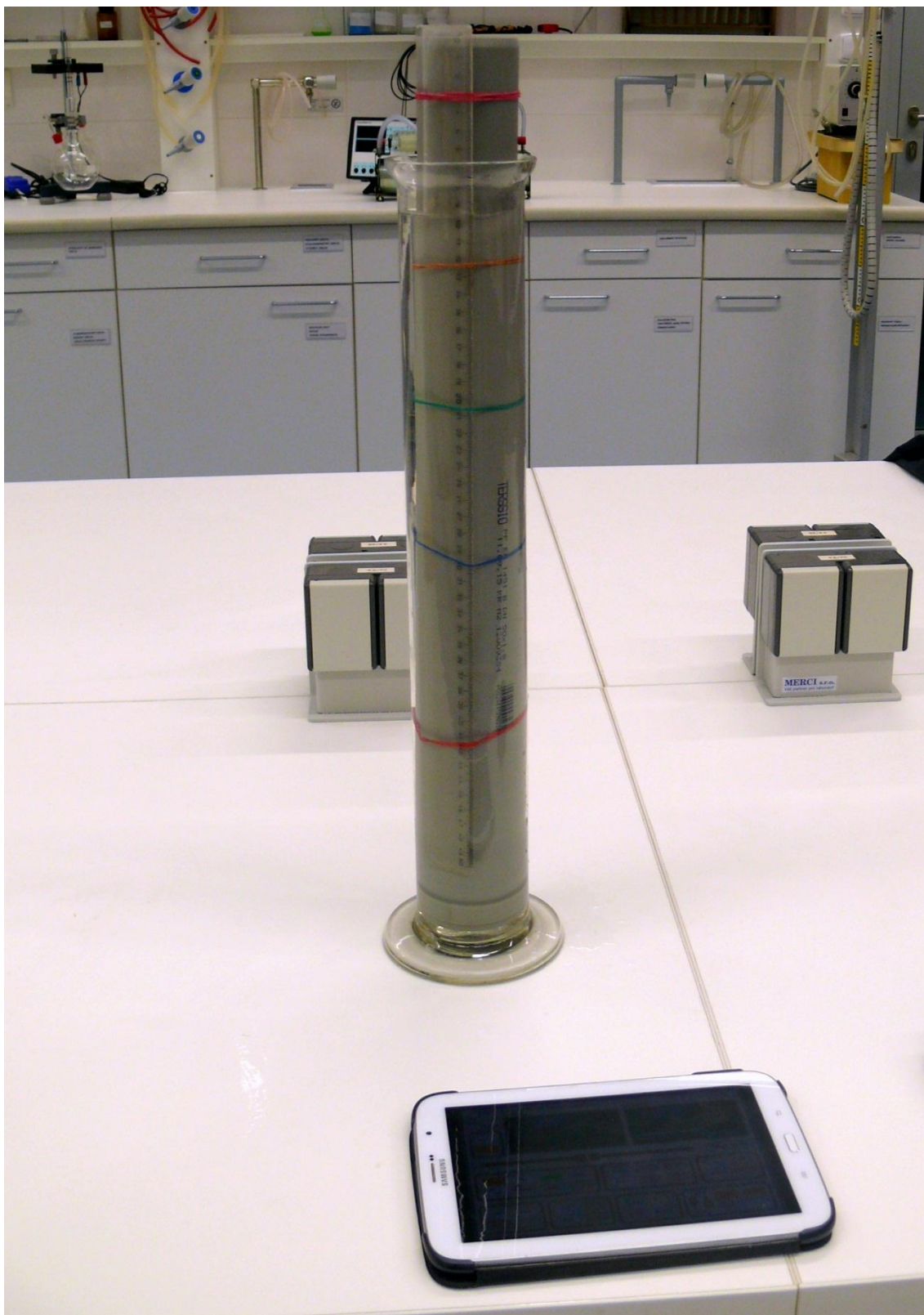
Obrázek 29: Měření rychlosti zvuku s pomocí plastové trubice a skleněného válce naplněného vodou

Abychom nehledali místa zesílení zvuku pouze pomocí našeho zdání, můžeme použít druhý smartphone (s aplikací Phyphox a experimentem Amplituda zvuku) na kterém si můžeme ověřit správné zvolení místa, ve kterém se zvuk zesiluje.



Obrázek 30: Měření rychlosti zvuku pomocí aplikace Phyphox

Komplikací v tomto měření může být, jak přesně odečíst velikosti zvukového sloupce, při kterých docházelo k zesílení zvuku. My jsme si pomohli s delším pravítkem, které jsme pomocí gumiček připevnili na plastovou trubici. Počátek pravítka – 0 cm, jsme upevnili k ústí plastové trubice. Pro tento experiment je tedy potřeba zvolit takovou skleněnou nádobu, která bude dostatečně široká a vleze se do ní trubice i s pravítkem, přičemž je nežádoucí, aby se pravítko během experimentu různě posunovalo. Jednotlivé vzdálenosti, pro které nastává k zesílení zvuku jsme pak zapisovali během experimentu.



Obrázek 31: Měření rychlosti zvuku pomocí plastové trubice a skleněného válce s vodou

Výsledná rychlost zvuku se vypočítá na základě výpočtu vzdálenosti Δl , pomocí vztahů (8) a (9), stejně jako v prvním případě.

c. Měření pomocí plastové trubice a 5 l barelu s vodou

Pomůcky: Dva smartphony s aplikací Phyphox, 5 l plastový barel, plastová trubice, černá fixa, posuvné měřítko.

Nemáme-li k dispozici velký skleněný válec, můžeme jej vyměnit za větší plastový barel (například od destilované vody). Princip měření pak zůstává stejný jako v předchozím případě. Hrdlo barelu je ale příliš úzké, abychom do něj mohli vsunovat trubici i s pravítkem. Jednotlivé pozice, ve kterých docházelo k zesílení zvuku jsme, proto zaznamenávali černým fixem a následně metrem pak určili velikost vzduchového sloupce.



Obrázek 32: Měření rychlosti zvuku ve vzduchu pomocí plastové trubice a barelu

2. 3. 3. Realizace měření

Provedli jsme několik měření všemi třemi způsoby. To znamená jak pomocí Kundtovy trubice, tak pomocí plastové trubice a skleněného válce či plastového barelu. Při všech měření jsme považovali jako správnou hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu $343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

a. Měření pomocí Kundtovy trubice:

Při měření rychlosti zvuku Kundtovou trubicí jsme použili frekvence 800 Hz a 1000 Hz, přičemž jsme hledali, v jaké poloze pístu uslyšíme zesílení. Tyto místa jsme označili jako l_1 , l_2 , apod. Pomocí nich jsme pak na základě vztahů (8) a (9) určili vlnovou délku vlnění a tedy i rychlost vlnění.

Tabulka 2: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 800 Hz

	l / m	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
l_1	0,1	0,2	0,4	320	328
l_2	0,3	0,195	0,39	312	
l_3	0,495	0,22	0,44	352	
l_4	0,715				

Naměřená průměrná rychlost zvuku je v tomto případě $328 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Absolutní odchylka je tedy:

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 328| = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{15}{343} \cdot 100 \% = 4,37 \%$$

Jako správnou hodnotu rychlosti šíření zvuku ve vzduchu považujeme $343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Relativní odchylka δ_r tohoto měření je 4,37 %. Ve výpočtu relativní odchylky pracujeme s rychlostí zvuku při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (viz tabulka 1).

Tabulka 3: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 1000 Hz

	l / m	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1. měření					
l_1	0,075	0,16	0,32	320	332,5
l_2	0,235	0,16	0,32	320	
l_3	0,395	0,175	0,35	350	
l_4	0,57	0,17	0,34	340	
l_5	0,74				
2. měření					
l_1	0,07	0,165	0,33	330	336
l_2	0,235	0,17	0,34	340	
l_3	0,405	0,165	0,33	330	
l_4	0,57	0,165	0,33	330	
l_5	0,735	0,175	0,35	350	
l_6	0,91				
3. měření					
l_1	0,07	0,165	0,33	330	336
l_2	0,235	0,165	0,33	330	
l_3	0,4	0,18	0,36	360	
l_4	0,58	0,17	0,34	340	
l_5	0,75	0,16	0,32	320	
l_6	0,91				

Pro další měření jsme zvolili frekvenci 1000 Hz, toto měření jsme provedli třikrát tak, abychom mohli porovnat jednotlivé naměřené hodnoty. Průměrnou hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu na:

$$\bar{v} = 335 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Absolutní odchylka měření je v tomto případě:

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 335| = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Relativní odchylka měření je tedy:

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{8}{343} \cdot 100 \% = 2,33 \%$$

b. Měření pomocí plastové trubice a skleněného válce s vodou:

Následně jsme vyměnili měřicí aparaturu a vyzkoušeli měření pomocí plastové trubice, kterou jsme postupně nořili do skleněného válce naplněného vodou. Měření jsme provedli pro čtyři různé frekvence – 1360 Hz, 1700 Hz, 2100 Hz a 3400 Hz. Pro každé měření jsme vždy uvedli absolutní a relativní chybu měření, přičemž jako správnou rychlost šíření zvuku ve vzduchu považujeme $343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledky měření při frekvenci 1360 Hz jsou v tabulce 4.

Tabulka 4: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 1360 Hz

	l / m	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
l_1	31	0,11	0,22	299,2	326,4
l_2	42	0,115	0,23	312,8	
l_3	53,5	0,135	0,27	367,2	
l_4	67				

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 326| = 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{17}{343} \cdot 100 \% = 4,96 \%$$

Při měření s frekvencí 1360 Hz jsme určili rychlost zvuku na $326 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Absolutní odchylka měření je $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, relativní pak 4,96 %.

Tabulka 5: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 1700 Hz

	l / m	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1. měření					
l_1	29,5	0,1	0,2	340	340
l_2	39,5	0,1	0,2	340	
l_3	49,5				
2. měření					
l_1	13,5	0,1	0,2	340	340
l_2	23,5	0,1	0,2	340	
l_3	33,5	0,1	0,2	340	
l_4	43,5				

Měření s frekvencí 1700 Hz jsme provedli celkem dvakrát. V obou případech nám vyšla rychlost zvuku $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což se shoduje s naší teoretickou hodnotou.

Tabulka 6: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 2100 Hz

	l / m	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
l_1	43	0,08	0,16	336	336
l_2	35	0,08	0,16	336	
l_3	27				

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 336| = 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{7}{343} \cdot 100 \% = 2,04 \%$$

Při frekvenci 2100 Hz jsme naměřili rychlost zvuku $336 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jestliže považujeme $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz tabulka 1) za správnou hodnotu, absolutní odchylka měření je $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Relativní chyba měření vychází pak na 2,04 %.

Tabulka 7: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 3400 Hz

	l / m	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
l_1	46,5	0,055	0,11	374	348,5
l_2	41	0,055	0,11	374	
l_3	35,5	0,045	0,09	306	
l_4	31	0,05	0,1	340	
l_5	26				

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 349| = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{6}{343} \cdot 100 \% = 1,75 \%$$

V posledním měření rychlosti zvuku pomocí plastové trubice a skleněného válce jsme k experimentu zvolili frekvenci 3400 Hz. V tomto případě nám rychlost zvuku vyšla $349 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Je to jediný případ, kdy nám rychlost zvuku vyšla vyšší, než námi uvažovaná správná rychlost $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro toto měření je absolutní odchylka $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, relativní pak 1,75 %.

c. Měření pomocí plastové trubice a barelu s vodou:

Pro další měření jsme vyměnili skleněný válec za plastový barel. Pro měření jsme zvolili frekvenci 1700 Hz a 2100 Hz, které se jeví podle předchozího měření (viz tabulka 5 a 6) jako nejvhodnější k měření rychlosti zvuku.

Tabulka 8: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 1700 Hz

	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Δl_1	0,09	0,18	306	323
Δl_2	0,1	0,2	340	

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 323| = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{20}{343} \cdot 100 \% = 5,83 \%$$

V prvním měření nám vyšla rychlost zvuku $323 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Absolutní odchylka je tedy $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, relativní odchylka je pak $5,83 \%$. Chyba měření se jeví jako poměrně vysoká, měření tedy bylo zatíženo chybou. V tabulce 8 můžeme vidět, že vzdálenost Δl_2 byla pravděpodobně naměřena správně, rychlost zvuku v tomto případě vyšla $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Naopak vzdálenost Δl_1 je malá, proto byla pravděpodobně určena chybně.

Tabulka 9: Měření rychlosti zvuku při frekvenci 2100 Hz

	$\Delta l = \frac{\lambda}{2} / \text{m}$	λ / m	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Δl_1	0,075	0,15	315	294
Δl_2	0,06	0,12	252	
Δl_3	0,075	0,15	315	

$$\Delta v = |\bar{v} - v_i| = |343 - 294| = 49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta_r = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \% = \frac{49}{343} \cdot 100 \% = 14,3 \%$$

Při měřící frekvenci 2100 Hz jsme určili rychlost zvuku na $294 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato hodnota neodpovídá teoretické hodnotě $343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, absolutní odchylka je v tomto případě $49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, relativní odchylka dokonce $14,3 \%$. Je nutno konstatovat, že i toto měření bylo zatíženo chybou. Při podrobném studiu výsledků v tabulce zjistíme, že ani jedna naměřená vzdálenost kmiten nebyla přesně určena. Největší odchylka ale připadá na vzdálenost Δl_2 , pro kterou rychlost šíření zvuku vychází na $252 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2. 3. 4. Vyhodnocení

Měření rychlosti zvuku se jeví jako velmi jednoduché na realizaci, také příprava experimentu je poměrně rychlá. Výsledky se shodují s teoretickými hodnotami, relativní odchylky výsledků nepřesahují 5% . Také výsledky získané druhým způsobem (pomocí plastové trubice a skleněného válce) poskytují věrohodné výsledky, korespondující s teorií. Příprava tohoto experimentu je ale už složitější než v prvním případě, stále ne ale komplikovaná. Výhodou druhé metody je použití jednoduchých a běžně dostupných pomůcek. Kundtovu trubici nemusíme vždy nalézt ve fyzikálním kabinetu. Nejjednodušším

experimentem z hlediska dostupnosti pomůcek je využití plastového barelu a plastové trubice. Podle našeho měření (viz kapitola 2.2.3.) nejsou ale výsledky natolik přesné jako v předchozích případech a je potřeba eliminovat všechny možné chyby. Jedna z potenciálních chyb by mohla souviset s problémem určení polohy kmitny sluchem, v případě větší spolupráce se smartphonem, by měření mělo být objektivnější.

Pro realizaci experimentu je potřeba tichého prostředí, abychom mohli přesně zaznamenat jednotlivé pozice kmiten vlnění a pak přesně určit vlnovou délku daného vlnění. Každopádně bychom mohli tento experiment doporučit všem vyučujícím. Lze jej použít nejen k určení rychlosti zvuku ve vzduchu, ale také k praktickému procvičení a porozumění pojmu vlnové délky, frekvence apod. nebo k aplikaci vztahu pojícího vlnovou délku, frekvenci vlnění a rychlost jeho šíření. Použití smatphonu pak představuje jakousi modernizaci a zatraktivnění klasického experimentu.

2. 4. Vlastnosti zvuku

Mladí lidé se často zajímají o hudbu. Někteří hudbu jen poslouchají, jiní umí hrát na různé hudební nástroje. Právě z tohoto důvodu je vhodné využít hudbu ke studiu chování vlnění. Tato aktivita se konkrétně zaměřuje na studium frekvenčních spekter různých hudebních nástrojů. Pomocí pojmů výška tónu, vyšší harmonické frekvence či barva tónu můžeme charakterizovat většinu hudebních nástrojů (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s. 27).

2. 4. 1. Teoretický popis

Vlastním sluchem můžeme jednoduše rozeznat tón zahraný na kytaru či na trumpetu. Snadno rozpoznáme také vysoký či nízký tón. Obě tyto vlastnosti můžeme objektivně vyjádřit pomocí fyzikálních veličin (Lepil, 2009, s. 84-85). Frekvenci harmonické vlny odpovídá výška tónu. Vyšší frekvence patří tónům vysokým, nižší frekvence pak představují hluboké tóny. Harmonické vlně obsahující jedinou frekvenci nazýváme čistý tón. Zvuk vydávaný hudebním nástrojem není nikdy čistý tón, ale je složený (Bajer, 2006, s.395). V tomto případě tón s nejnižší frekvencí představuje základní tón. Další složky tónu, zahrnující další frekvence, nazýváme vyšší harmonické tóny. Ty jsou vždy celistvými

násobky frekvence základních tónů. Jestliže označíme frekvenci základního tónu f_1 a frekvenci druhé vyšší harmonické f_2 , bude frekvence f_2 dvojnásobkem frekvence základního tónu f_1 . To můžeme zapsat také jako $f_2 = 2f_1$. Pro frekvenci f_3 třetí vyšší harmonické pak platí, že její hodnota je trojnásobkem f_1 , tedy $f_3 = 3f_1$. Obecně tedy můžeme zapsat frekvenci n -té vyšší harmonické jako

$$f_n = nf_1 \quad (10)$$

(Giordano, 2010, s. 14-17). Amplituda vyšších harmonických je vždy nižší než amplituda základního tónu. (Lepil, 2009, s.85). Obsah vyšších harmonických vytváří barvu tónu. U různých hudebních nástrojů mají vyšší harmonické různou intenzitu. To pak způsobuje různé zabarvení jednoho a toho samého tónu zahráném různými nástroji (Halliday a kol., 2013, s. 477). Všechny tóny daného zvuku vytvářejí dohromady tzv. frekvenční spektrum (Bajer, 2006, s. 396).

2. 4. 2. Metody měření

Jednou z metod, jak zaznamenat frekvenční spektrum daného tónu a určit tedy jeho výšku a vyšší harmonické frekvence je využití jakéhokoliv hudebního nástroje a počítačového programu Audacity. Tomu jsme se věnovali i v mé bakalářské práci s názvem „Fyzika klavíru“, ze které budeme jednotlivá data týkající se tohoto měření čerpat. V této práci se ale pokusíme nahradit počítač smartphonem. Využití smartphonu nám jednak dovolí okamžité vyhodnocení výsledků, ale také je mnohem méně náročné na přípravu experimentu a jeho realizaci. Vyučující tak bude moct provést měření takřka bez předešlé přípravy. K měření se nám nejvíce osvědčila volně stažitelná aplikace Advanced Spectrum Analyzer. Tato aplikace zaznamenává intenzitu tónu jednotlivých frekvencí. Pomocí roztažení prstů je možné přiblížit graf na jakoukoliv frekvenci a studovat tak tuto část spektra detailněji. Dvojím kliknutím na obrazovku můžeme také zapnout dva kurzory (fialový a zelený). Díky nim pak můžeme najet přímo na jakýkoliv zaznamenaný pík a určit tak přesně jeho frekvenci. K měření je vhodné používat tlačítko Stop a Play, pomocí kterých můžeme měření pozastavit pro analýzu dat a pak jej zase spustit. Výsledky si můžeme uložit vyfocením obrazovky. My jsme k měření použili tablet Lenovo Yoga Tablet 3 10. Ke studiu frekvenčních spekter je možné analyzovat tóny zahráné na různých hudebních nástrojích.

To může sloužit k objasnění důležitých pojmů jako je výška tónu, vyšší harmonické frekvence či barva tónu. Je možné si také ověřit, jak vypočítat frekvence vyšších harmonických.

Jelikož ne vždy máme k dispozici hudební nástroje, a ne každý s nimi umí pracovat, můžeme je simulovat pomocí volně stažitelných aplikací. V části 2.4.3.c srovnáme frekvenční spektra různých tónů zahranych na hudební nástroj a zahranych s pomocí aplikace. Pro simulaci klavíru jsme použili aplikaci Perfect Piano. Po zapnutí aplikace je potřeba zvolit možnost „Keyboard“, tak se dostaneme ke klavíru. V aplikaci je na výběr z různých klavírů či elektrických keyboardů. Abychom slyšeli skutečný zvuk klavíru, je potřeba v pravém horním rohu kliknout na ikonu klavíru a následně zvolit možnost „Acoustic“. Aplikace nám dovoluje zahrát jakýkoliv tón z klaviatury.

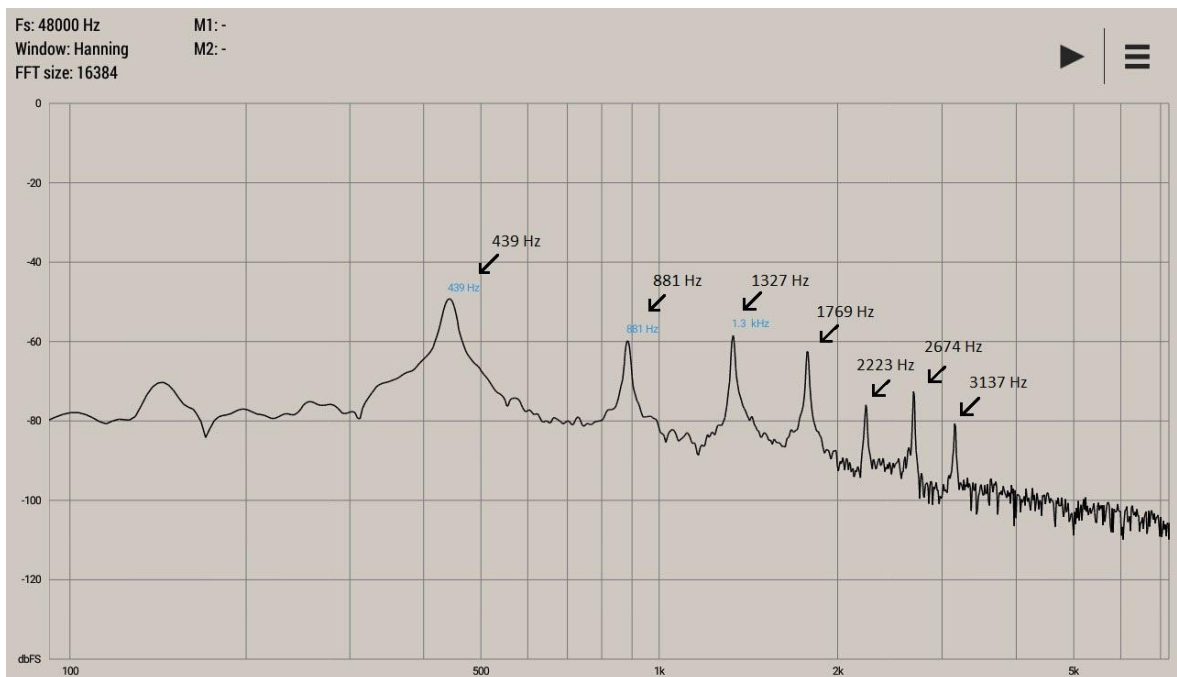
2. 4. 3. Realizace měření

V následujícím měření nejprve porovnáme spektra různých tónů klavíru, zaznamenaných pomocí počítačového programu Audacity a aplikace na smartphonu. Zjistíme tak, jestli jsou aplikace smartphonu pro toto měření dostačující. Dále porovnáme frekvenční spektra různých hudebních nástrojů, konkrétně ladičky, klavíru flétny a kytary. Protože na některých školách nemusí být k dispozici hudební nástroje, vyzkoušíme je simulovat pomocí aplikací na smartphonu. Můžeme tak srovnat, jestli frekvenční spektra budou v tomto případě shodné s těmi zaznamenanými pomocí skutečných hudebních nástrojů.

a. Srovnání měření pomocí smartphonu a pomocí počítačového programu Audacity

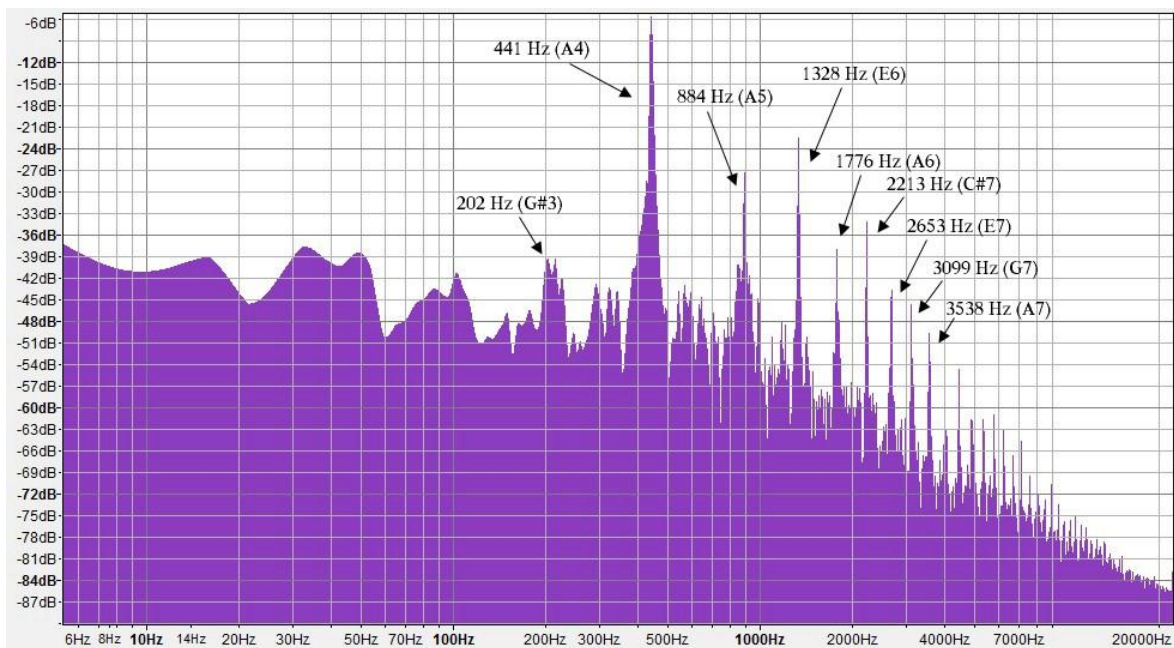
V tomto měření srovnáme frekvenční spektra vybraných tónů zahranych na klavíru. Analyzovat budeme tóny A4, C4 a C5.

Nejprve se budeme zabývat tónem A4. Jeho základní frekvence je 440 Hz (Lepil, 2009, s.86). Frekvenční spektrum je na obrázku 33. Všechna spektra zaznamenaná aplikací Advanced Spectrum Analyzer jsou v textu barevně invertována.



Obrázek 33: Frekvenční spektrum tónu A4 zahráného na klavíru, zaznamenaném aplikací Advanced Spectrum Analyzer

Pro základní tón jsme naměřili frekvenci 439 Hz, patří mu první a nejvyšší pík na obrázku 33. Druhá vyšší harmonická frekvence by měla mít frekvenci 880 Hz, my jsme naměřili 881 Hz a na obrázku je zobrazena druhým píkem. Třetí harmonickou frekvenci bychom mohli spočítat jako třikrát základní frekvenci (Giordano, 2010, s. 14) a tedy 1320 Hz, my jsme její hodnotu určili na 1327 Hz. Čtvrtá harmonická má teoretickou hodnotu frekvence 1760 Hz, my jsme naměřili 1769 Hz. Pátá, šestá a sedmá harmonická by měly mít následující frekvence – 2200 Hz, 2640 Hz a 3080 Hz. Zde jsou již odchylky mezi teorií a naměřenými hodnotami větší. My jsme hodnoty vyšších harmonických frekvencí určili na 2223 Hz, 2674 Hz a 3137 Hz. Můžeme ale konstatovat, že měření odpovídá teorii. Případné odchylky navíc nemusí být způsobeny měřicí aplikací, ale špatně naladěným klavírem. Výsledky měření programem Audacity jsou zobrazeny na obrázku 34.



Obrázek 34: Frekvenční spektrum tónu A4 zazmenaného programem Audacity, převzato: Vogelová, 2017

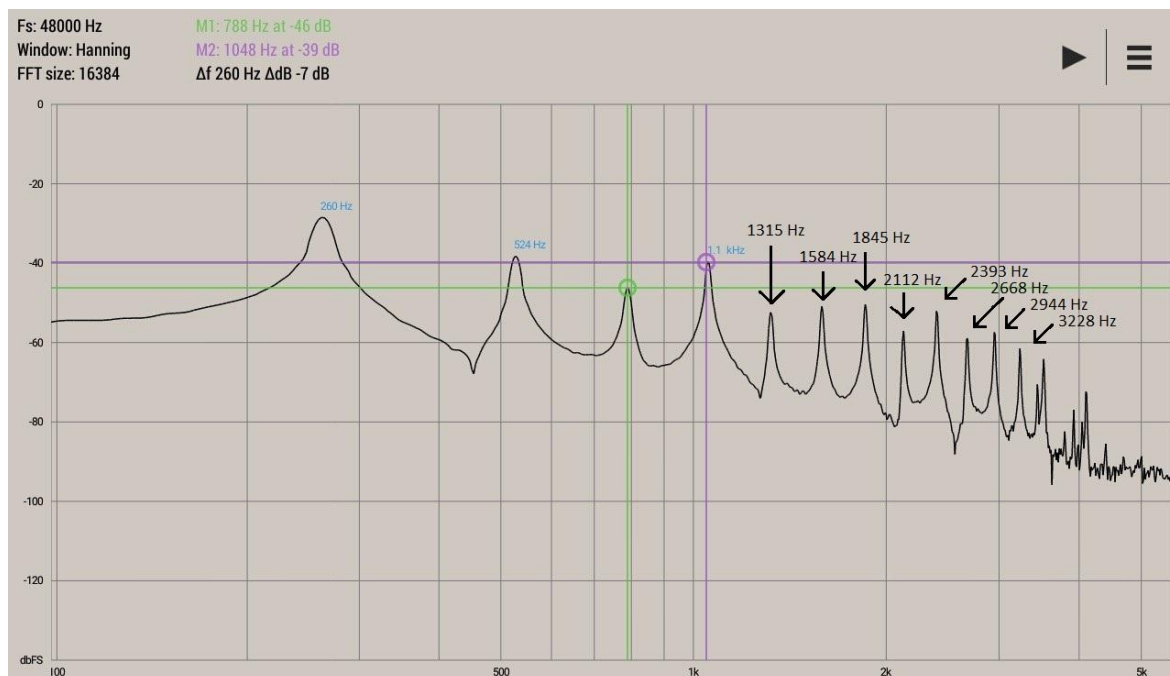
I na tomto obrázku odpovídá nejvyšší pík základnímu tónu. Každý následující vysoký pík odpovídá dalším vyšším harmonickým frekvencím. Výsledky měření jsou přehledně shrnuty v tabulce 10.

Tabulka 10: Srovnání naměřených frekvencí pro tón A4

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Frekvence / Hz	Teoretická	440	880	1320	1760	2200	2640	3080
	Smartphone	439	881	1327	1769	2223	2674	3137
	Audacity	441	884	1328	1776	2213	2653	3099
Relativní odchylka / %	Smartphone	0,227	0,114	0,530	0,511	1,05	1,29	1,85
	Audacity	0,227	0,455	0,606	0,909	0,591	0,492	0,617

Můžeme vidět, že především pro vyšší harmonické frekvence naměřené smartphonem, konkrétně pro pátou, šestou a sedmou jsou relativní odchylky větší než v případě měření s programem Audacity. Na druhou stranu pro nižší harmonické frekvence se hodnoty naměřené tabletem spíše blíží teoretickým hodnotám než ty, které jsou naměřené

programem Audacity. V každém případě ale můžeme konstatovat, že měření s pomocí telefonu poskytuje spolehlivé výsledky a dostatečně nahrazuje program Audacity. Srovnání můžeme provést ještě pro naměřená frekvenční spektra dalších tónů. Spektrum tónu C4 zahráném na klavíru je na obrázku 35.



Obrázek 35: Frekvenční spektrum tónu C4 zahráného na klavíru, zaznamenaném aplikací Advanced Spectrum Analyzer

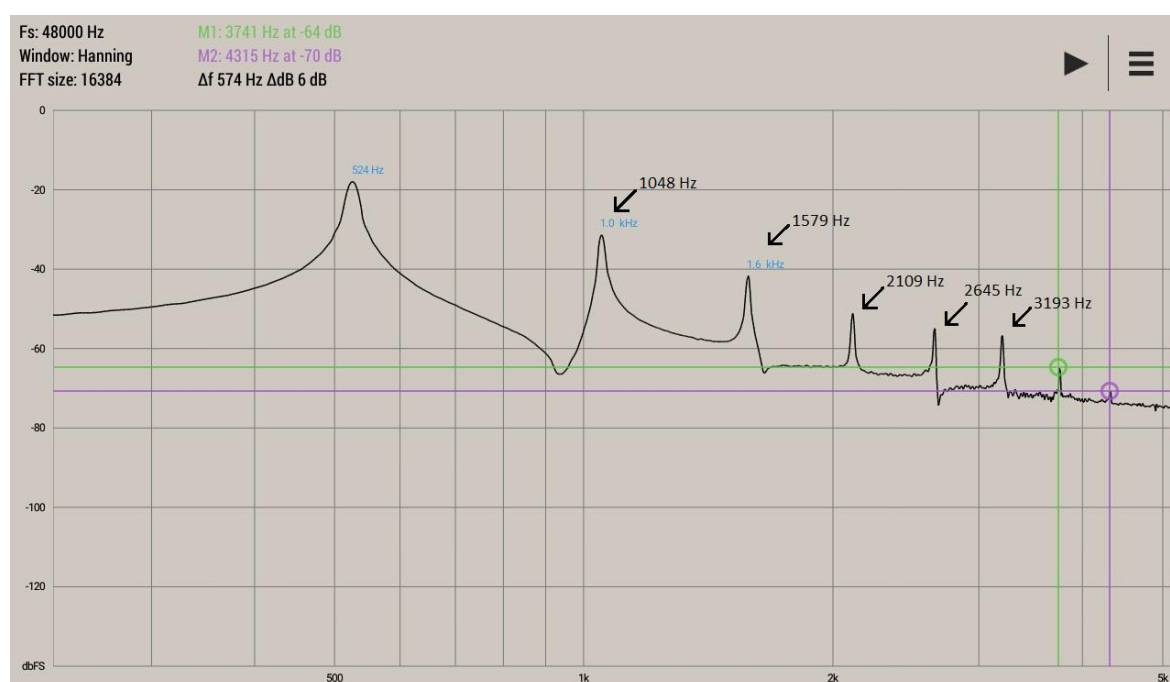
Teoretické hodnoty a naměřená data programem Audacity pro tón C4 jsou uvedena v tabulce 11:

Tabulka 11: Srovnání naměřených frekvencí pro tón C4

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
Frekvence / Hz	Teorie	262	523	785	1046	1308	1570	1831	2093	2354	2616	2878
	Smartphone	260	524	788	1048	1315	1584	1845	2112	2393	2668	2944
	Audacity	262	525	789	1053							
Relativní odchylka / %	Smartphone	0,763	0,191	0,382	0,191	0,535	0,892	0,765	0,908	1,66	1,99	2,29
	Audacity	0	0,382	0,510	0,669							

Na první pohled můžeme zjistit, že pomocí smartphonu se nám povedlo naměřit mnohem více vyšších harmonických frekvencí než při měření s programem Audacity. Při srovnání dostupných výsledků také můžeme konstatovat, že hodnoty poskytnuté aplikací Advanced Sepctrum Analyzer jsou přesnější a lépe se shodují s teoretickými hodnotami (Wikipedia, © 2001-2019). Jediným opačným případem je určení základní frekvenci, kdy se nám ji ani v tomto ani v předešlém případě (Tabulka 10) nepodařilo určit přesně. Počet zaznamenaných vyšších harmonických frekvencí je obrovský a může dobře posloužit k osvětlení výpočtu teoretických vyšších harmonických frekvencí.

Dále jsme také naměřili frekvenční spektrum tónu C5 (obrázek 36).



Obrázek 36: Frekvenční spektrum tónu C5 zahráného na klavíru, zaznamenaném aplikací Advanced Spectrum Analyzer

I na tomto obrázku můžeme vidět, že nejvyšší pík patří základnímu tónu. Pomocí aplikace se nám podařilo zaznamenat ještě dalších 7 píků, které patří vyšším harmonickým frekvencím. Můžeme pozorovat, že amplituda píků postupně klesá tak, jak rostou frekvence vyšších harmonických. Srovnání naměřených dat aplikací Advanced Spectrum Analyzer, programem Audacity a teoretickými hodnotami je v tabulce 12:

Tabulka 12: Srovnání naměřených frekvencí pro tón C5

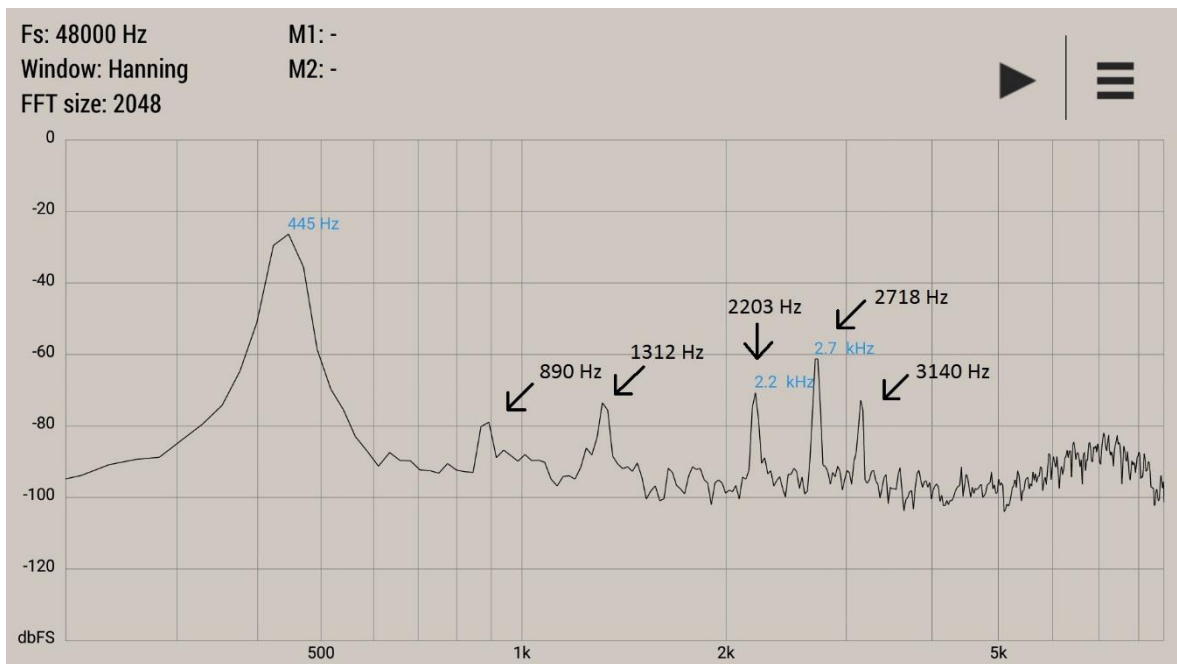
Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Frekvence / Hz	Teorie	523	1046	1570	2093	2616	3139	3662	4185
	Smartphone	524	1048	1579	2109	2645	3193	3741	4315
	Audacity	525	1051	1581	2114				
Relativní odchylka / %	Smartphone	0,191	0,191	0,573	0,764	1,11	1,72	2,16	3,11
	Audacity	0,382	0,478	0,701	1,00				

Stejně jako v předešlém měření se nám podařilo pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer určit větší počet harmonických frekvencí než s pomocí počítačového programu Audacity. Také hodnoty, které jsou naměřené tabletem, se více blíží teoretickým hodnotám než v případě měření s programem Audacity (Wikipedia, © 2001-2019). Pro několik prvních vyšších harmonických nejsou odchylky mezi naměřenými a teoretickými hodnotami příliš velké, přičemž relativní odchylky nepřesahují jedno procento. Čím jsou ale frekvence vyšších harmonických větší, tím se nepřesnosti také zvětšují. Odchylky měření mohou být způsobeny nejen špatným naladěním klavíru ale také nepřesným určením frekvencí. Ve všech třech měření se nám však nepodařilo naměřit přesnou hodnotu základního tónu. Naměřená frekvence se vždy liší o 1 Hz od té teoretické. V každém případě ale můžeme konstatovat, že smartphone se jeví jako vhodný měřicí prostředek k zaznamenání a analýze frekvenčních spekter běžných tónů.

b. Srovnání měření různých hudebních nástrojů

Abychom mohli porovnat amplitudu píků vyšších harmonických zahranych na různých nástrojích a vysvětlit tak, proč slyšíme každý tón jinak i když jeho základní tón má stejnou frekvenci. Porovnáme tedy frekvenční spektra tónů zahranych na klavíru, ladičce, flétně a na kytáře.

Pomocí ladičky můžeme zahrát tón A4 o základní frekvenci 440 Hz. Obrázek 37 ukazuje frekvenční spektrum ladičky.



Obrázek 37: Frekvenční spektrum tónu A4 zahráného na ladičce

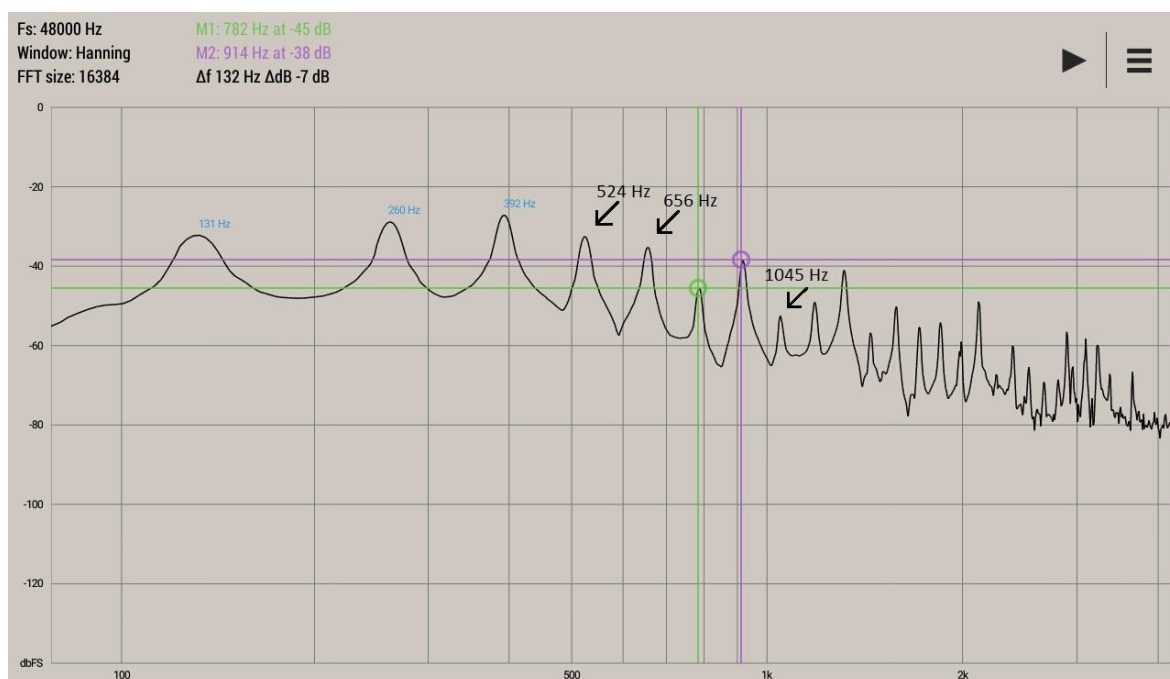
Zahrajeme-li tón A4 na klavíru (obrázek 33), můžeme vidět, že základní tón má nejvyšší amplitudu. Amplituda vyšších harmonických frekvencí pak klesá s pořadím vyšších harmonických frekvencí. Na obrázku 37, kde je znázorněno frekvenční spektrum stejného tónu zahráném na ladičce, patří jasně největší pík základnímu tónu. Ten převyšuje všechny ostatní píky minimálně o 25 dB. Píky druhé a třetí vyšší harmonické mají velmi malou amplitudu a téměř zanikaly v okolním šumu. Pík čtvrté vyšší harmonické dokonce ve frekvenčním spektru ani nemůžeme rozeznat. Druhou nejvyšší amplitudu má pík šesté vyšší harmonické, i tak je ale jeho amplituda mnohem nižší ve srovnání s píkem základního tónu. Naměřené frekvence vyšších harmonických jsou uvedeny v tabulce 13:

Tabulka 13: Srovnání naměřených frekvencí pro tón A4

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Frekvence / Hz	Teoretická	440	880	1320	1760	2200	2640	3080
	Klavír	439	881	1327	1769	2223	2674	3137
	Ladička	445	890	1312		2203	2718	3140
Relativní odchylka ladičky / %		1,14	1,14	0,606		0,136	2,95	1,95

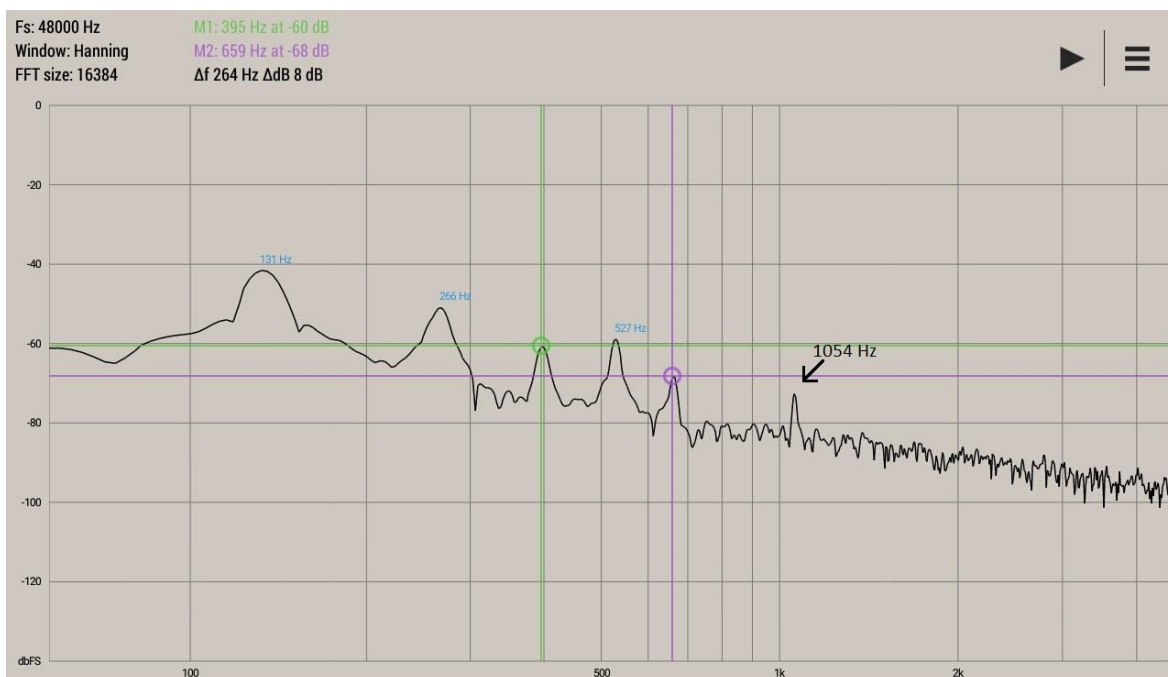
Pro naměřené frekvence tónu A4 zahraném na ladičce pozorujeme nějaké odchylky vzhledem k teoretickým hodnotám, které jsou uvedeny v posledním řádku tabulky 13. Stále však hodnoty frekvencí odpovídají danému tónu.

Jako další hudební nástroj, jehož barvu budeme zkoumat, jsme zvolili kytaru. Zde jsme naměřili frekvenční spektrum tónů A3 a C3. Na obrázku 38 můžeme pozorovat naměřené frekvenční spektrum tónu C3 zahraném na klavíru. Z obrázku můžeme vidět, že se nám podařilo zaznamenat opravdu velké množství vyšších harmonických.



Obrázek 38: Frekvenční spektrum tónu C3 zahraného na klavíru

Na obrázku 39 pak vidíme frekvenční spektrum tónu C3 zahraném na kytáře. Při hraní na kytaru je potřeba si dávat pozor, jaký tón hrajeme. Noty na kytáře se zpravidla zapisují o oktávu výše, než doopravdy znějí. To znamená, že podle not zahrajeme například tón C4, ve skutečnosti se ale jedná o tón C3 (RoseGuitar).



Obrázek 39: Frekvenční spektrum tónu C3 zahráného na kytarě

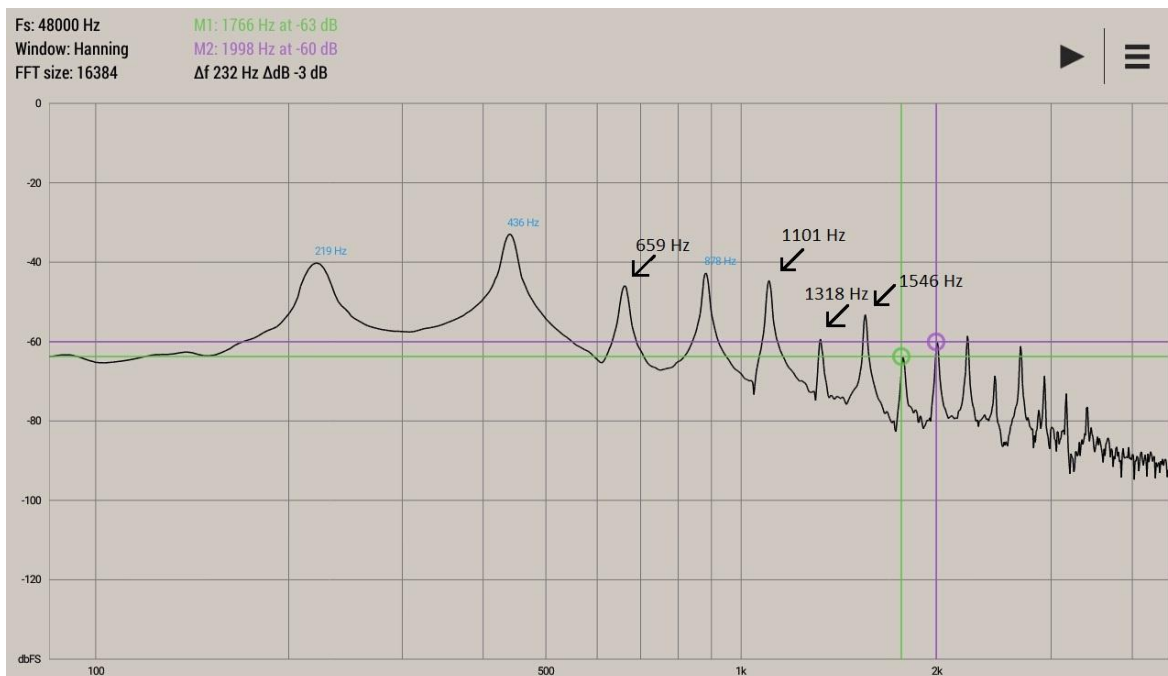
V tomto případě se nám podařilo zaznamenat či rozeznat mnohem menší počet vyšších harmonických než v případě klavíru. Nejzajímavějším poznatkem je jistě nepřítomnost šesté a sedmé vyšší harmonické, které mají amplitudu tak nízkou, že zanikají v okolním šumu. Osmá vyšší harmonická má však již vyšší amplitudu a pík s touto frekvencí můžeme na obrázku 39 zaznamenat. Nepřítomnost některých vyšších harmonických může mít jistě za důsledek rozdílnou barvu tónu. Naměřené hodnoty frekvencí pro jednotlivé vyšší harmonické jsme zaznamenali v tabulce 14.

Tabulka 14: Srovnání naměřených frekvencí pro tón C3

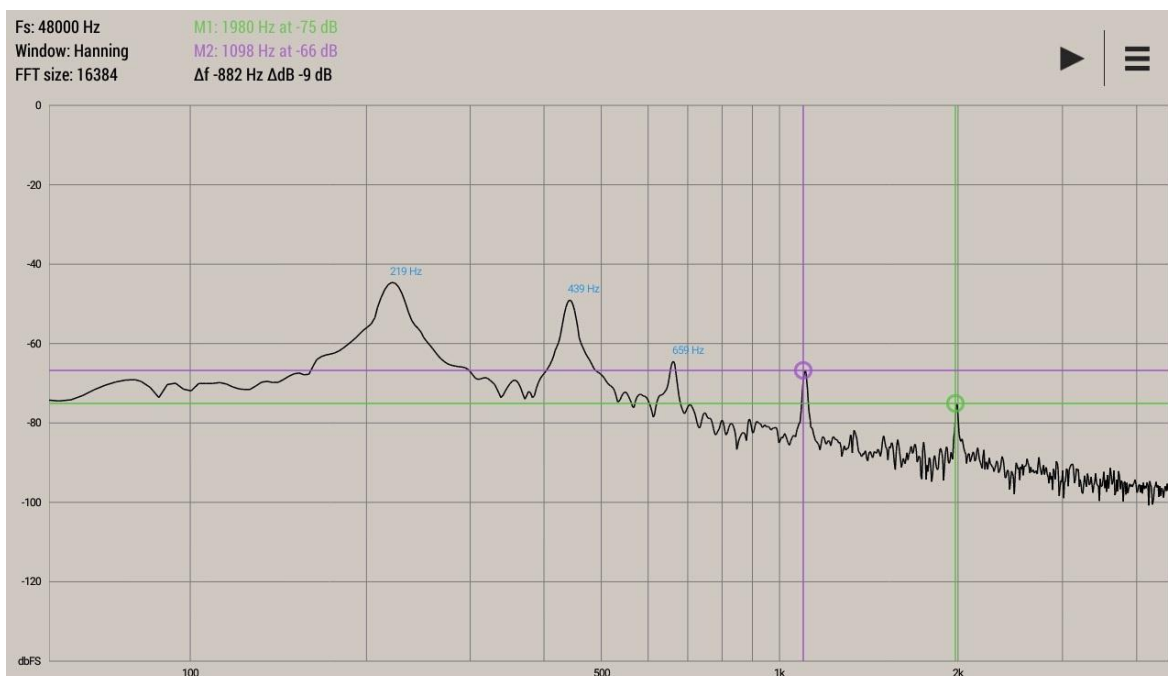
Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Frekvence / Hz	Teoretická	131	262	393	524	655	786	917	1048
	Klavír	131	260	392	524	656	782	914	1045
	Kytara	131	266	395	527	659			1054
Relativní odchylka kytary / %		0	1,53	0,509	0,573	0,611			0,573

Z této tabulky je zřejmé, že měření bylo poměrně přesné a naměřené hodnoty odpovídají těm teoretickým (Wikipedia, © 2001-2019). Relativní odchylky měření nepřesahují 2 %.

Další z naměřených tónů na klavíru i kytáře je tón A3. Frekvenční spektrum tohoto tónu zahráném na klavíru můžeme vidět na obrázku 40, frekvenční spektrum kytary pak na obrázku 41.



Obrázek 40: Frekvenční spektrum tónu A3 zahráného na klavíru



Obrázek 41: Frekvenční spektrum tónu A3 zahráného na kytáře

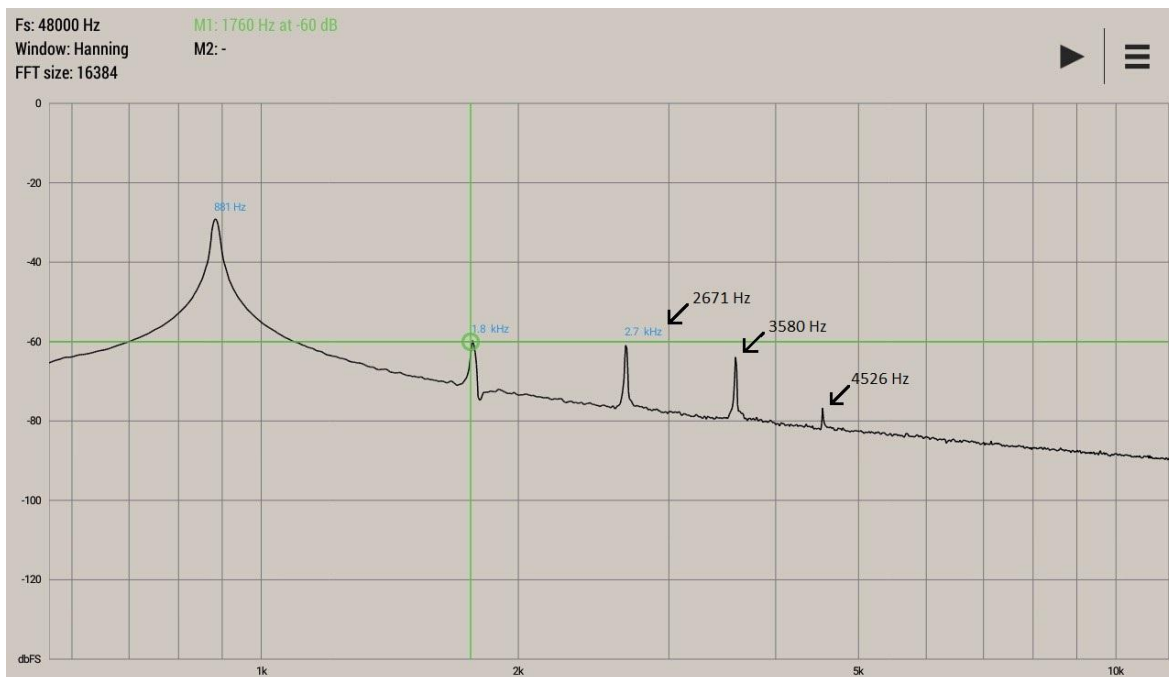
Stejně jako v předešlém měření i v tomto případě jsme při proměření klavíru zaznamenali velký počet vyšších harmonických frekvencí, přičemž píky prvních asi 12 vyšších harmonických jsou poměrně ostré a dobře rozpoznatelné od okolního šumu. Na obrázku 41, který znázorňuje frekvenční spektrum kytary, nepozorujeme tolik vyšších harmonických. Píky první a druhé vyšší harmonické jsou velmi výrazné. Dále můžeme rozlišit ještě píky třetí, páté a deváté vyšší harmonické, ostatní jsou velmi slabé a ztrácí se v šumu. Absenci některých vyšších harmonických jsme zaznamenali i na obrázku 39, to může mít vliv na výslednou barvu tónu. U klavíru absenci vyšších harmonických nepozorujeme.

Tabulka 15: Srovnání naměřených frekvencí pro tón C3

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Frekvence / Hz	Teoretická	220	440	660	880	1100	1320	1540	1760	1980
	Klavír	219	436	659	878	1101	1318	1546	1766	1998
	Kytara	219	439	659		1098				1980
Relativní odchylka kytary / %		0,455	0,227	0,152		0,182				0

Naměřené hodnoty frekvencí jsou zaznamenány v tabulce 15. Naměřená data se velmi dobře shodují s teorií a relativní odchylky nejsou větší než 0,5 %. Můžeme konstatovat, že výsledky měření jsou poměrně přesné. Jedná se tedy skutečně o tón C3.

Pro analýzu frekvenčních spekter zahranych na flétně jsme naměřili tóny A5 a C5. K porovnání výsledků s naměřenými daty na klavíru, uvádíme i frekvenční spektrum tónu A5 zahrane na klavíru (obrázek 42).



Obrázek 42: Frekvenční spektrum tónu A5 zahráného na klavíru

Na obrázku 43 pak můžeme pozorovat frekvenční spektrum tónu A5 zahráném na flétně. Na flétně se nám podařilo zaznamenat podstatně větší počet vyšších harmonických.



Obrázek 43: Frekvenční spektrum tónu A5 zahráného na flétně

Můžeme pozorovat, že nejvyšší pík také patří základnímu tónu, pík druhé harmonické frekvence má však nižší amplitudu než pík třetí harmonické frekvence. Pík čtvrté vyšší

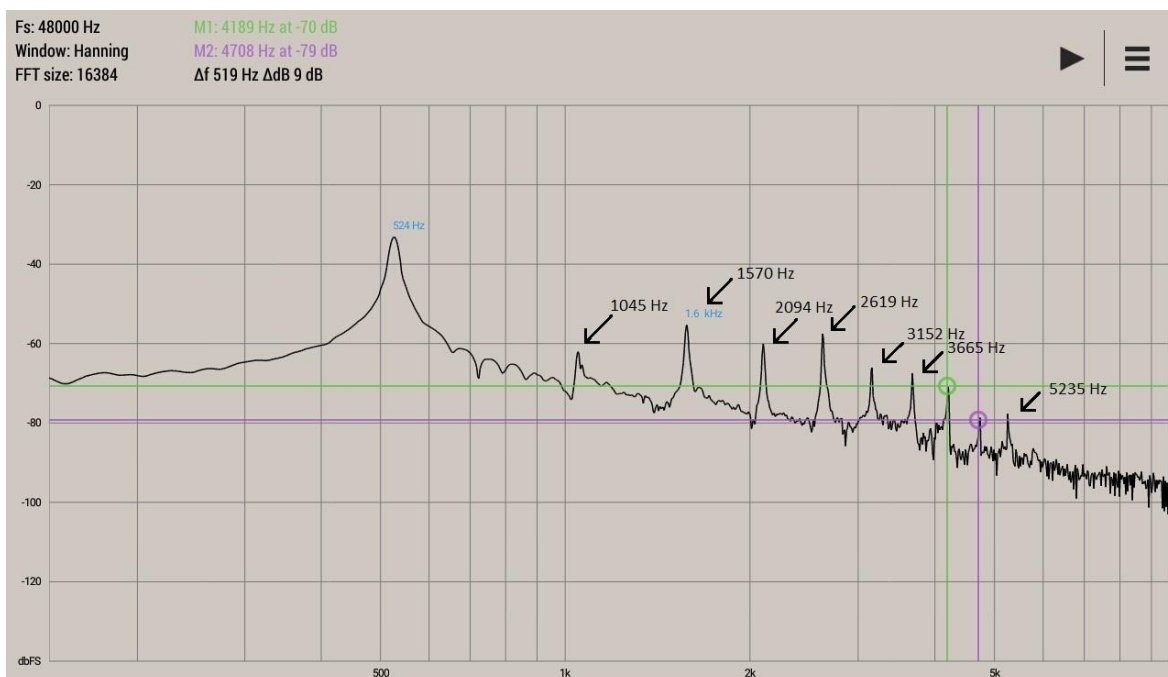
harmonické frekvence má pak také nižší amplitudu než ten páté harmonické frekvence. Vidíme tedy rozdíl s frekvenčním spektrem klavíru. Právě relativní amplituda vyšších harmonických frekvencí může způsobovat rozdílnou barvu tónů, a tedy i rozdílný sluchový vjem (viz část 2. 4. 1). Porovnání naměřených hodnot vyšších harmonických frekvencí tónu A5 na klavíru a flétně je v tabulce 16:

Tabulka 16: Srovnání naměřených frekvencí pro tón A5

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Frekvence / Hz	Teorie	880	1760	2640	3520	4400	5280	6160	7040	7920
	Klavír	881	1760	2671	3580	4526				
	Flétna	867	1746	2616	3483	4365	5220	6108	6975	7848
Relativní odchylka / %	Klavír	0,114	0	1,17	1,70	2,86				
	Flétna	1,48	0,795	0,909	1,05	0,795	1,14	0,844	0,923	0,909

Naměřená data prvních dvou vyšších harmonických frekvencí flétny se víc odlišují od teoretických hodnot než ty naměřené na klavíru. Mohlo by to být způsobeno tím, že jsme tento tón nesprávně zahráli na flétně. Vyšší harmonické frekvence už jsou ale přesné, relativní odchylky nepřesahují 1,5 %.

Dále jsme ještě porovnali frekvenční spektrum tónu C5 zahráném na klavíru a na flétně. Frekvenční spektrum klavíru je zobrazeno na obrázku 36. I zde můžeme vidět, že amplituda vyšších harmonických frekvencí klesá s jejich pořadím (nejvyšší amplitudu má základní tón, druhou nejvyšší druhá harmonická frekvence, třetí nejvyšší amplitudu má třetí harmonická frekvence atd.). Frekvenční spektrum tónu C5 zahráném na flétně je na obrázku 44.



Obrázek 44: Frekvenční spektrum tónu C5 zahráného na flétně

I zde patří nejvyšší pík základnímu tónu. Stejně jako v případě tónu A5, je amplituda druhé vyšší harmonické frekvence nižší než amplituda třetí vyšší harmonické a amplituda čtvrté vyšší harmonické pak menší než té páté. V porovnání s frekvenčním spektrem klavíru můžeme tedy udělat stejné závěry. Ve frekvenčním spektru klavíru amplitudy vyšších harmonických frekvencí postupně klesají s pořadím vyšších harmonických. Pro flétnu ale tuto vlastnost nepozorujeme, když amplitudy druhé a čtvrté vyšší harmonické jsou menší než těch následujících. Proto je barva tónů na obou hudebních nástrojích rozdílná, a proto slyšíme každý hudební nástroj jinak. Srovnání naměřených frekvencí tónu C5 zahráných na klavíru nebo flétně, včetně teoretických hodnot je v tabulce 17.

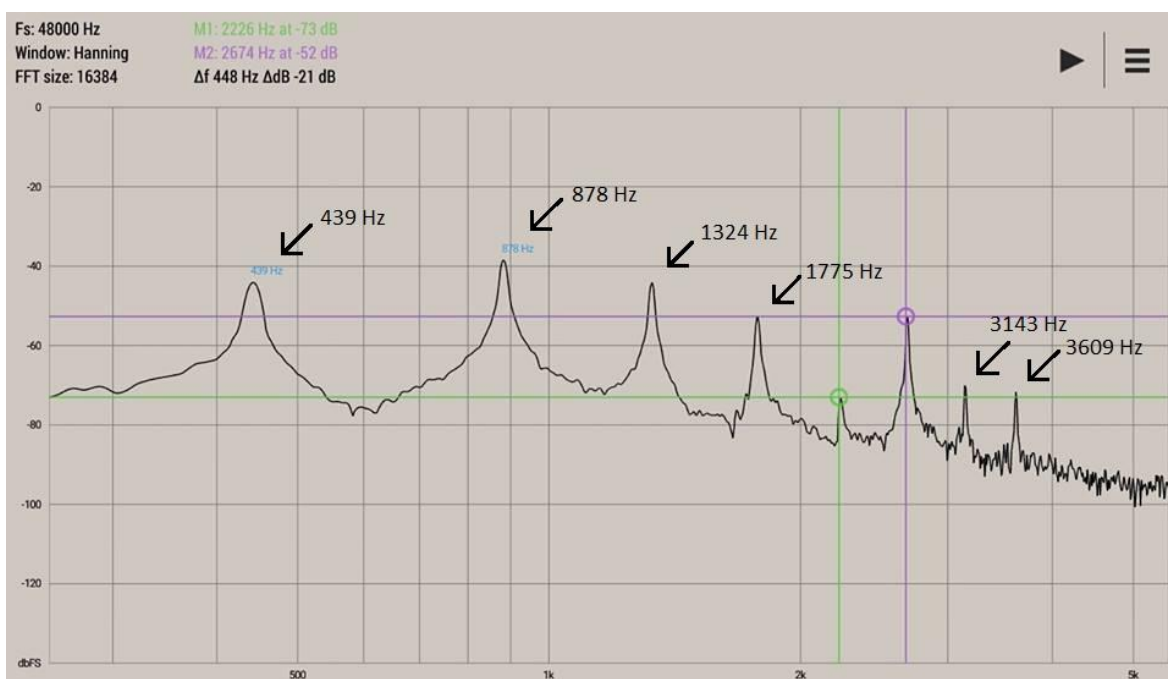
Tabulka 17: Srovnání naměřených frekvencí pro tón C5

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Frekvence / Hz	Teorie	523	1046	1570	2093	2616	3139	3662	4185
	Klavír	524	1048	1579	2109	2645	3193	3741	4315
	Flétna	524	1045	1570	2094	2619	3152	3665	4189
Relativní odchylka flétny / %		0,191	0,0956	0	0,0478	0,115	0,414	0,0819	0,0956

Frekvence základního tónu C5 i vyšších harmonických frekvencí velmi dobře odpovídá teoretickým hodnotám. Frekvence vyšších harmonických jsou tedy pro všechny hudební nástroje stejné, liší se pouze jejich intenzita.

c. Srovnání měření různých hudebních nástrojů a mobilních aplikací

V tomto případě jsme použili dva smartphony – jeden jako zdroj zvuku, druhý jako detektor. Nejprve jsme pomocí aplikace Perfect Piano zahráli tón A4. Zaznamenané frekvenční spektrum můžeme vidět na obrázku 45.



Obrázek 45: Frekvenční spektrum tónu A4 zahráného pomocí aplikace simulující klavír

Základní tón má frekvenci 439 Hz, což odpovídá teoretické hodnotě 440 Hz i té zahráné na klavíru. Lze ale pozorovat, že pík o frekvenci 439 rozhodně není tím největším píkem ve frekvenčním spektru. Při porovnání s frekvenčním spektrem na obrázku 33 můžeme říct, že amplitudy vyšších harmonických jsou rozdílné. Zatímco ve frekvenčním spektru klavíru je největší pík základního tónu a každý další pík je menší než ten předchozí. Ve spektru zaznamenaném aplikací má nejvyšší pík frekvenci 878 Hz a patří tedy druhé harmonické frekvenci. Za povšimnutí také stojí pík páté harmonické frekvence (na obrázku zvýrazněna zeleným kurzorem), kdy jeho amplituda je o poznání menší než amplituda okolních dvou vyšších harmonických frekvencí. Rozdílné amplitudy vyšších harmonických frekvencí

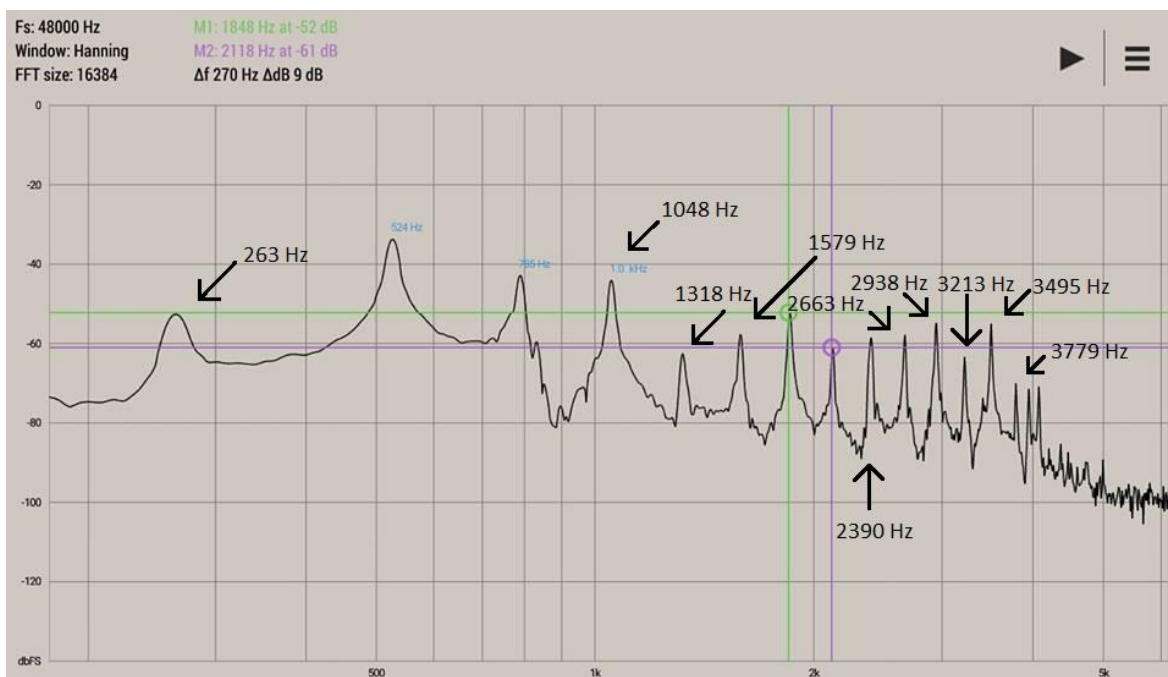
způsobují právě rozdílnou barvu tónu, a tedy rozdílný sluchový vjem. Srovnání naměřených frekvencí vyšších harmonických pro klavír a pro aplikaci simulující klavír jsou shrnuty v tabulce 18.

Tabulka 18: Srovnání naměřených frekvencí pro tón A4

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Frekvence / Hz	Teoretická	440	880	1320	1760	2200	2640	3080
	Klavír	439	881	1327	1769	2223	2674	3137
	Aplikace	439	878	1324	1775	2226	2674	3143
Relativní odchylka / %	Klavír	0,227	0,113	0,530	0,511	1,05	1,29	1,85
	Aplikace	0,227	0,227	0,303	0,852	1,18	1,29	2,05

Co se týče hodnot frekvencí, můžeme konstatovat, že jsou velmi podobné těm teoretickým či zahráným na klavíru. Pro vyšší harmonické frekvence jsou relativní odchylky mezi teoretickými frekvencemi a těmi zahránými pomocí aplikace větší než pro ty zahrané na klavír. Rozdíly ale nejsou markantní.

Dále jsme také zaznamenali frekvenční spektrum tónu C4 zahráném pomocí telefonní aplikace. Výsledné spektrum je na obrázku 46.



Obrázek 46: Frekvenční spektrum tónu C4 zahaného pomocí aplikace simulující klavír

I na tomto obrázku můžeme vidět, že největší pík nepatří základnímu tónu tak, jako to bylo na frekvenčním spektru zahaném na klavíru (viz obrázek 35). Největší pík zde ale patří druhé harmonické frekvenci. Také pík páté vyšší harmonické frekvence je relativně malý. To může způsobit rozdílný sluchový vjem při zahrání tohoto tónu na klavíru nebo pomocí aplikace. Nutno podotknout, že stejné závěry jsme uskutečnili i u předešlého měření. Hodnoty vyšších harmonických frekvencí jsou porovnány v tabulce 19.

Tabulka 19: Srovnání naměřených frekvencí pro tón C4

Vyšší harmonické		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Frekvence / Hz	Teorie	262	523	785	1046	1308	1570	1831	2093	2354
	Klavír	260	524	788	1048	1315	1584	1845	2112	2393
	Aplikace	263	524	785	1048	1318	1579	1848	2118	2390
Relativní odchylka / %	Klavír	0,763	0,191	0,382	0,191	0,535	0,892	0,765	0,908	1,66
	Aplikace	0,382	0,191	0	0,191	0,765	0,573	0,928	1,19	1,53

Teoretická frekvence základního tónu je 262 Hz. Ani pomocí aplikace ani s pomocí klavíru se nám ale nepodařilo určit tuto hodnotu v souladu s teorií. Další naměřené hodnoty

pomocí aplikace jsou však srovnatelné s těmi naměřenými na klavíru. Relativní odchylky jsou jen velmi malé a nepřesahují 2 %. Důvodem případných nejistot při použití aplikace může být také kvalita reproduktoru telefonu, který hraje roli tónového generátoru nebo další parametry tohoto reproduktoru. Naměřené frekvence také odpovídají teoretickým hodnotám. Můžeme tedy konstatovat, že amplituda píků tónu zahraném pomocí aplikace může být jiná než pro tón zahraný na skutečném klavíru, hodnoty frekvencí vyšších harmonických jsou ale srovnatelné.

2. 4. 4. Vyhodnocení

Měření frekvenčních spekter různých hudebních nástrojů je velmi jednoduché. Výhodami tohoto experimentu je především velice rychlá analýza výsledků. Každý student může provést toto měření na svém smartphonu a výsledky měření dostane v rámci několika minut. Nejdříve jsme studovali, zda aplikace Advanced Spectrum Analyser poskytuje věrohodné výsledky. Naměřené hodnoty jsme porovnali s těmi naměřenými na programu Audacity. Výsledky jsou v obou případech shodné s teorií. Relativní odchylky se většinou pohybují kolem jednoho procenta, v žádném z případů ale nepřesahují 3,5 %. Pomocí telefonu se nám však podařilo určit ještě více vyšších harmonických frekvencí než na počítači. Tento experiment může sloužit k objasnění základních akustických pojmů jako je základní tón, vyšší harmonické frekvence či barva tónu. K prvním dvěma postačí provést experiment na jednom hudebním nástroji. K vysvětlení barvy tónu a toho, proč každý hudební nástroj zní jinak i když hraje stejný tón, ale musíme použít nástrojů víc. Pro příklad jsme využili klavíru, ladičky, flétny a kytary. V případě klavíru je vždy nejvyšší pík základní frekvence, každý další má pak nižší a nižší amplitudu. U ladičky měl základní tón mnohem větší amplitudu než ostatní harmonické frekvence. Druhá, třetí a čtvrtá harmonická frekvence byly dokonce srovnatelné s šumem. U flétny byla vždy amplituda třetí vyšší harmonické frekvence vyšší než ta druhé harmonické frekvence. V případě kytary měly některé harmonické frekvence amplitudu srovnatelnou se šumem, nemohli jsme je tedy identifikovat a určit jejich frekvenci. Můžeme tedy říct, že tyto čtyři hudební nástroje postačí k demonstraci rozdílných intenzit vyšších harmonických frekvencí, a tedy vysvětluje barvu tónu. Jelikož každá škola nemusí mít ve své hudebně klavír, pokusili jsme se srovnat měření na klavíru s aplikací simulující klavír. Aplikace Pefect Piano poskytuje sice správné

hodnoty vyšších harmonických frekvencí, amplitudy jejich píků se ale liší od těch skutečných. Především základní tón nemá nejvyšší pík, amplituda vyšších harmonických frekvencí pak postupně neklesá. Tuto aplikaci tedy můžeme použít pouze v případě, že na ní chceme demonstrovat hodnoty vyšších harmonických frekvencí. Relativní odchylky měření jsou velmi malé a nepřesahují 3 %. Skutečný klavír ale aplikace nenahrazuje. Vhodnou aplikaci pro simulaci flétny jsme nenašli. Dostupné aplikace většinou poskytují úplně jiné tóny, než které dokáže zahrát skutečná flétna.

2. 5. Hlasitost a intenzita zvuku

Zvukové znečištění je v dnešní době velkým problémem a má velký dopad na zdraví všech. Dnes již nemůžeme v běžných podmínkách slyšet dokonalé ticho. Pokud žijeme ve městě, hluku především z dopravy nás doprovází během celého dne. Trvalé vystavení hlasitému zvuku však může náš sluch nevratně poškodit. Mladí lidé tomu často nevěnují pozornost a nevyhýbají se hudebním koncertům, zábavným parkům či večírkům, kde může hluk dosáhnout nebezpečných úrovní (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s. 33). Z těchto důvodů je vhodné se této problematice detailněji věnovat v hodinách fyziky a upozornit studenty na nebezpečí s tím související.

2. 5. 1. Teoretický popis

Kromě vlnové délky, frekvence a rychlosti zvuku existuje ještě další vlastnost, a to intenzita zvuku. Intenzita zvuku I je definována jako střední hodnota energie vln, která projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření, platí pro ni tedy:

$$I = \frac{P}{S}, \quad (11)$$

kde P je střední hodnota výkonu zvukové vlny dopadající na plochu S (Halliday a kol., 2013, s. 472). Zvukovou vlnu si můžeme představit jako periodické stlačování a rozpínání prostředí (např. vzduchu). To způsobuje periodické změny atmosférického tlaku, které uchem vnímáme jako zvuk nějaké hlasitosti. Čím jsou tyto změny větší, tím je zvuk hlasitější (Lepil, 2009, s. 87). Nejtišší zvuk, které lidské ucho ještě uslyší, má intenzitu $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ a nazýváme jej prahem slyšení. Lidské ucho však registruje zvuky v obrovském rozmezí intenzit, proto zavádíme veličinu označovanou jako hladina akustické intenzity L_a . Ta je

mírou hlasitosti, což je čistě náš subjektivní vjem. Hladinu akustické intenzity definujeme jako

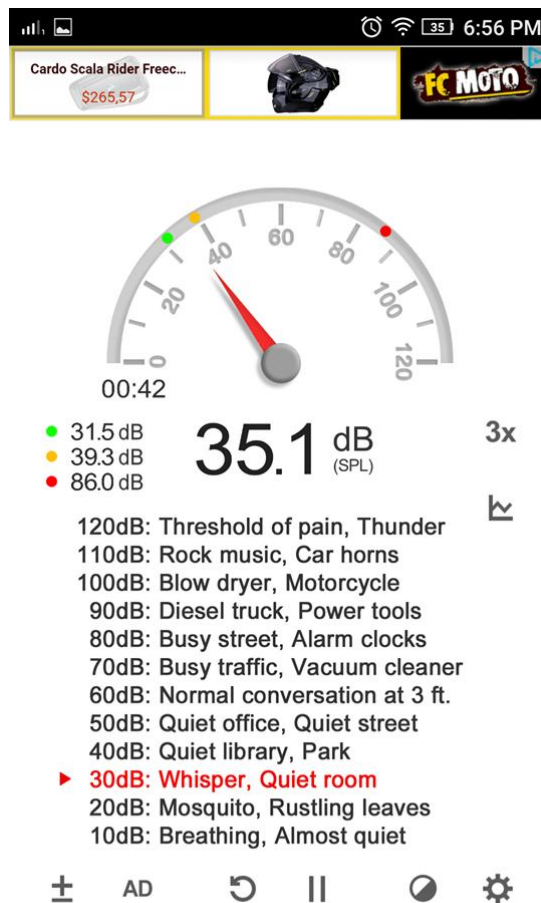
$$L_a = 10 \log \frac{I_a}{I_0}. \quad (12)$$

I_a zde značí velikost intenzity daného zvuku, I_0 pak intenzitu prahu slyšení. Hladina intenzity zvuku je udávána v decibelech. 1 decibel je přibližně nejmenší rozdíl hladiny hlasitosti, který je lidské ucho ještě schopno rozlišit. Hladina akustické intenzity o hodnotě 140 dB představuje práh bolesti (Bajer, 2006, s. 387-389). Zvuky o takto velkém akustickém výkonu mohou v uchu vyvolat bolestivý pocit (Lepil, 2009, s.88).

Trvalé zvukové znečištění, které je dnes už téměř všudypřítomné, škodí sluchovému orgánu, a to hlavně při vyšších intenzitách zvuku. Může tak dojít nejen k poruše sluchu, nadměrný hluk také působí na celou nervovou soustavu a má negativní vliv na fyzický výkon i psychický stav člověka (Lepil, 2009, s.89). Mladí lidé často vystavují svůj sluch nadměrným hladinám intenzity zvuku, a to při poslouchání hlasité hudby ve sluchátkách, v zábavných parcích či na diskotékách (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s. 33). Překročení prahu bolesti však může mechanicky poškodit naše uši, v konečném důsledku může dojít například k prasknutí bubínku ucha.

2. 5. 2. Metody měření

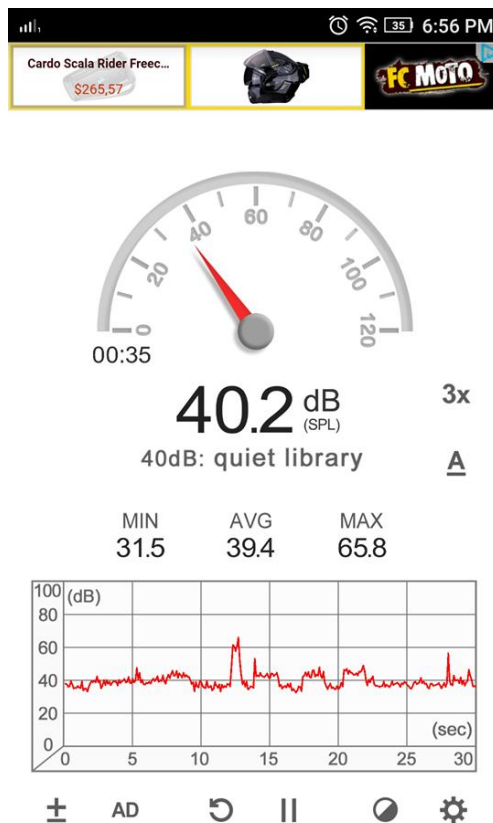
K měření hladiny intenzity zvuku jsme použili aplikaci Sound Meter. Tato aplikace na kompasu ukazuje momentální hladinu intenzity zvuku, konkrétní hodnota je pak ještě napsána pod kompasem velkým písmem (viz obrázek 47).



Obrázek 47: Aplikace Sound meter – hladiny intenzity zvuku

Napravo od hladiny intenzity zvuku je značka „3x“, tou můžeme ovlivnit frekvenci měření. Odečet hladiny intenzity zvuku může probíhat každé 2 s, každou sekundu nebo každé 0,4 s. Pod tímto tlačítkem vidíme ikonu malého grafu. Pomocí této ikony můžeme přepínat dolní část obrazovky. První z možností vidíme na obrázku 47, druhou pak na obrázku 48. Nalevo od velkého čísla ukazující hladinu intenzity zvuku jsou zapsány tři hodnoty – zeleně je to minimální naměřená hladina intenzity zvuku, žlutě průměrná hladina intenzity zvuku a červeně pak maximální naměřená hladina intenzity zvuku. Ve spodní části obrázku 48 můžeme pozorovat tabulku, která říká, s jakou hladinou intenzity zvuku koresponduje, jaká situace. Například hladina intenzity zvuku 10 dB odpovídá lidskému dechu nebo úplně tichému prostředí, 30 dB koresponduje šepotu nebo tiché místnosti. Normální konverzace by měla mít 60 dB, nákladní auto s naftovým motorem pak 90 dB. Hlasité rockové hudbě i klaksonu na autě odpovídá hladina intenzity zvuku o hodnotě 110 dB. 120 dB patří už prahu bolesti nebo hlasitému hřmění.

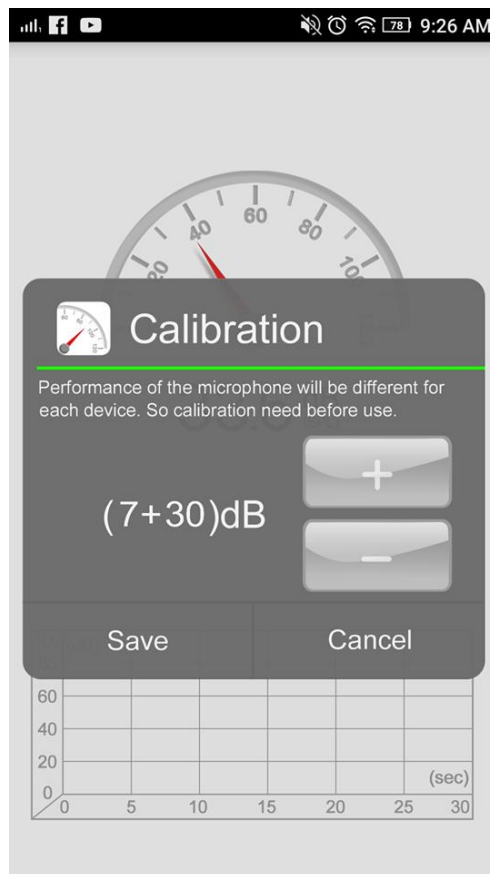
Na obrázku 48 můžeme vidět druhou variantu obrazovky. Horní polovina obrazovky zůstává stejná a zobrazuje aktuální hodnotu hladiny intenzity zvuku. Pod číslem indikujícím tuto informaci můžeme vidět nápis. Ten nám říká, k jaké situaci odpovídá tato hladina intenzity zvuku.



Obrázek 48: Aplikace Sound meter – závislost hladiny intenzity zvuku na čase

Dále zde opět vidíme minimální, průměrnou („AVG“) a maximální naměřenou hodnotu hladiny intenzity zvuku. Ve spodní části obrazovky můžeme pozorovat graf, který ukazuje závislost hladiny intenzity zvuku v závislosti na čase. Konkrétní naměřená data ale nelze nijak získat a maximální délka měření je 30 s. Uložení dat je tedy možné pouze vyfocení obrazovky.

Před začátkem měření je nutné provést na každém smartphonu nejprve kalibraci. V této aplikaci je možné ke kalibraci přejít tlačítkem „±“, které je v levém dolním rohu obrazovky. První možností, jak provést kalibraci je změřit zvuk o známé hladině intenzity zvuku. V aplikaci pak navolíme, kolik decibelů je potřeba přidat či ubrat od naměřené hodnoty smartphonem tak, aby byla výsledná hodnota správná (viz obrázek 49).



Obrázek 49: Aplikace Sound meter – kalibrace měření

Druhou možností kalibrace – a tu jsme zvolili i v našem měření, je pomocí růžového šumu. Ke kalibraci je potřeba počítače a dvou klasických reproduktorů, hlasitost zvuku na počítači i na reproduktoru by měla být nastavena na maximum. Na počítači pak spustí tzv. růžový šum. My jsme zvolili video s názvem „pure pink noise“ - <https://www.youtube.com/watch?v=WJ9Go1PnAVA>. Měřící systém umístíme do vzdálenosti 1 m od reproduktorů. Naměřená hladina intenzity zvuku by měla mít 86 dB (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.35). Pak už jen stačí nastavit kalibraci tak, aby naměřená hodnota aplikací odpovídala právě 86 dB. Abychom tento fakt ověřili, proměřili jsme tento experiment pomocí dalších, již nakalibrovaných hlukoměrů (obrázek 50).



Obrázek 50: Měření hladiny intenzity zvuku růžového šumu několika hlukoměry

Na tomto obrázku vidíme měření hladiny intenzity zvuku růžového šumu pomocí smartphonu (úplně nalevo), multimetru, klasického hlukoměru a hlukoměru poskytovaném systémem Vernier (úplně vpravo). Na nakalibrovaném smartphonu jsme naměřili 85,9 dB, na multimetru 84,3 dB na klasickém hlukoměru 86 dB, hlukoměr Vernier pak naměřil hladinu intenzity zvuku na 84,2 dB. Musíme ale podotknout, že během měření se na všech měřících zařízeních objevovaly hodnoty hladiny intenzity zvuku mezi 84 a 86 dB. Naše metoda kalibrace je tedy správná a můžeme ji využít.

Po vypnutí aplikace se ovšem kalibrace může ztratit, je tedy potřeba si zapsat či si zapamatovat, jak jsme daný smartphone nakalibrovali (kolik dB bylo potřeba přidat či ubrat od naměřené hodnoty). Na našem smartphonu Lenovo K5 jsme museli k naměřené hodnotě přidat 30 dB (viz obrázek 49). Důležitý je také fakt, že tuto kalibraci musíme provést pro každý smartphone zvlášť. To znamená, že jestliže bychom na libovolný smartphone přidali 30 dB, nedostali bychom správné výsledky. Tato hodnota odpovídá pouze použitému smartphonu. Měření jsme provedli také na tabletu Samsung Galaxy Tab A SM-T590, abychom dostali hodnoty 86 dB, bylo potřeba zde přidat 13 dB. Protože má

každý smartphone jiný mikrofon a jiné nastavení, je také naměřená hladiny intenzity zvuku jiná a kalibraci tedy musíme provádět zvlášť pro každý smartphone.

2. 5. 3. Realizace měření

V tomto experimentu jsme měřili hladiny intenzity zvuku v různých prostředích a srovnali je s hodnotami poskytnutými v aplikaci či s hodnotami, které jsou dány hygienickými předpisy a měly by být tedy dodrženy. Naměřené hodnoty jsme zaznamenali do tabulky 20. Měření jsme vždy provedli po dobu 30 s, do tabulky jsme pak zaznamenali průměrnou hodnotu hladiny intenzity zvuku.

Tabulka 20: Měření hladiny intenzity zvuku v různých prostředích

Měření	Hladina intenzity zvuku / dB
Dálnice	98 dB
Hlavní nádraží	76 dB
Doma v noci	30 dB
Doma ve dne – klid	41 dB
Doma ve dne – práce na silnici	53 dB
Školní pozemek	65 dB
Školní třída	40 dB
Školní jídelna	83 dB
Školní chodba o přestávce	81 dB

Limity pro hluk jsou stanoveny v nařízení vlády 272/2011 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Toto nařízení upřesňuje hygienické limity hluku jak pro venkovní, tak pro vnitřní prostory staveb. V obytných místnostech by mezi 6. a 22. hodinou měla být maximální hladina intenzity zvuku 50 dB, v noci (mezi 22. a 6. hodinou) pak 40 dB (tzb-info, © 2001-2019). My jsme měření provedli na vesnici Haňovice, kde není velký okolní hluk z dopravy, v blízkém okolí není dálnice ani žádná větší silnice. V běžném klidu naší vesnice byla hladina intenzity zvuku v našem domě 41 dB. Jelikož v této době probíhali práce na silnici poblíž našeho domu, mohli jsme také naměřit hluk ze stavby. V tomto případě byla hladina intenzity zvuku 53 dB. V noci jsme naměřili 30 dB. Můžeme tedy

konstatovat, že stavba by splňovala hygienické limity pro chráněný vnitřní prostor s využitím k bydlení. Nutno ale podotknout, že už jedno projíždějící auto výrazně zvýší hladinu intenzity zvuku (až o 10 dB). Limit pro venkovní prostor je pak 50 dB. V blízkosti silnice III. třídy a místních komunikací se tento limit zvyšuje na 65 dB. Měření jsme provedli na pozemku Slovanského gymnázia v Olomouci na Pasteurově ulici – tedy v blízkosti komunikace. Hluk z dopravy je zde dominující. Zde jsme naměřili 55 dB. Limit pro přednáškové sítě, učebny a pobytové místnosti škol je 55 dB. V této škole jsme naměřili hladinu intenzity zvuku 40 dB. Nutno ale podotknout, že hlasitost z dopravy či ze školního hřiště se bude měnit v závislosti na tom, jakou třídu k měření zvolíme (tzb-info, © 2001-2019). Ve školních jídelnách se v době oběda vystřídá většina studentů. Jídelna však není akusticky přizpůsobena takovému množství lidí. Zvuky se zde třišťí, práce s nádobím je hlučná, komunikace mezi studenty je pak nesrozumitelná a studenti tak musí přidat na hlase. Limity pro hlasitost ve školních jídelnách však nejsou stanoveny. Přitom doba oběda je pro žáky i učitele důležitou částí dne, je příležitostí k odpočinku, rozptýlení i konverzaci mezi spolužáky či kolegy. My jsme naměřili ve školní jídelně hlasitost intenzity zvuku 83 dB. Ale v případě, že paní kuchařky manipulovaly s nádobím dosahovala hlasitost zvuku až 93 dB. I školní chodby jsou zdrojem hluku, a to hlavně o přestávkách. Ty jsou příležitostí k relaxaci, volnému pohybu či komunikaci mezi žáky. Nadměrný hluk snižuje tento relaxační a společenský význam. My jsme na školní chodbě během přestávky naměřili 81 dB (BOZP info, © 2002-2019).

2. 5. 4. Vyhodnocení

Měření hlasitosti zvuku je opravdu jednoduché. Navíc jej můžeme provést jak s žáky střední, tak se žáky ze základní školy. Jediným problémem může být kalibrace smartphonů. Tu je potřeba provést pro každý smartphone speciálně tak, jak jsme jej popsali v části 2. 5. 2. Variací měření hlasitosti zvuku je velmi mnoho. Můžeme měřit zvukovou mapu města nebo můžeme zaznamenat hlasitost zvuku na určitém místě v průběhu dne. Další možností může být určení hlasitosti zvuku na různých místech školy. K měření z části 2. 5. 3. můžeme přidat měření hlasitosti zvuku v každé ze tříd, na školním hřišti, v tělocvičně, ve studovně či v knihovně. Zajímavé je také změřit hladinu intenzity zvuku u každého studenta doma – jak ve dne, tak v noci. Jestliže by provedlo toto měření více žáků ze třídy, můžeme

dostat více dat a provést tak komplexnější studium tohoto problému. Na základě měření hladiny intenzity zvuku také můžeme studentům vysvětlit proč a jak si chránit sluch.

2. 6. Audiometrické měření

Reproduktory vestavěné ve smartphonu umožňují provádět sluchové testy jako například audiometrické měření, které nám běžně můžou provést v ordinaci ORL. Studenti si pomocí sluchátek a smartphonu mohou měřit úroveň sluchového prahu v závislosti na frekvenci zvuku. Mohou si tak prověřit zdraví jejich sluchu, vyhodnotit naměřená data pro pravé a levé ucho zvlášť či porovnat své výsledky s ostatními spolužáky či členy rodiny. Tento experiment navíc umožňuje propojit fyzikální teorii s biologickými znalostmi o sluchu (Thoms, 2018).

2. 6. 1. Teoretický popis

V části 2. 5. 1. jsme popsali co je to intenzita zvuku a řekli jsme, že tzv. hlasitost je subjektivní vjem a závisí na citlivosti našeho ucha. Lidské ucho je nejcitlivější na zvuky v intervalu 700 Hz až 6 kHz, hlavně proto, že frekvence z tohoto intervalu jsou nejčastěji používány během běžné konverzace. Zvuky o nižší nebo naopak vyšší frekvenci vnímáme méně (Lepil, 2009, s. 87). I ty s frekvencí v intervalu mezi 700 Hz a 6 kHz ale neslyšíme stejně. Závislost hladiny intenzity zvuku, který už slyšíme na frekvenci nazýváme audiogram. Pro normálního člověka představuje tato závislost něco jako vlnovku. Pro klinické použití je tato zakřivená stupnice normalizována tak, že se stává přímkou při 0 dB pro všechny frekvence. Tato normalizovaná stupnice se vyznačuje jako dB HL. Pro normální sluch představuje tedy závislost hladiny intenzity zvuku na frekvenci přímkou v horní části audiogramu (viz obrázky 53, 54). 0 dB pak představuje hodnotu, který mladý a zdravý jedinec ještě může slyšet. Čím nižší tato křivka je, tím vyšší je ztráta sluchu. Měření probíhá ve zvukotěsné místnosti, nesmí ho ovlivňovat okolní ruch. Posluchač indikuje zvuky, které je schopen vnímat. Je potřeba určit nejnižší úroveň (práh slyšení) pro každou frekvenci. Výsledky testu jsou pak vyneseny do audiogramu. Zvuky v audiometru (přístroj pro měření sluchu) jsou tedy čisté tóny různých frekvencí (Thoms, 2018).

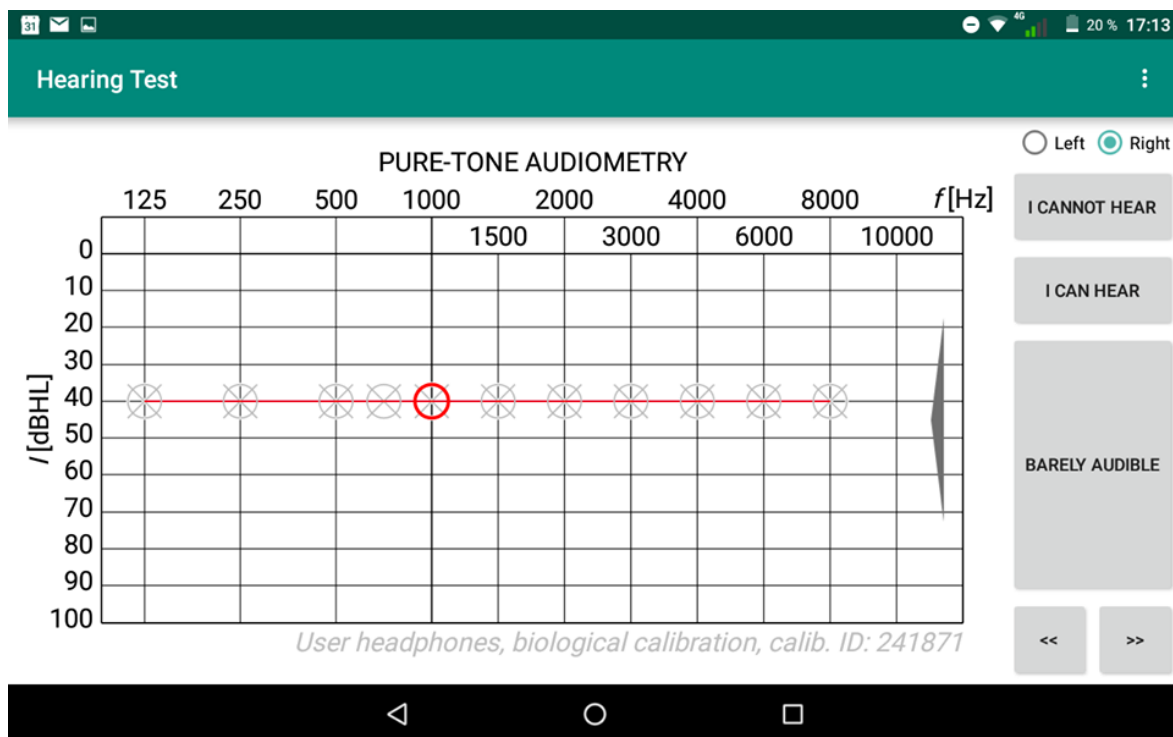
Mladý a zdravý pacient by měl slyšet tiché zvuky až k 20 dB. Mírná ztráta sluchu je mezi 25 dB a 39 dB. Tito pacienti pak mají často potíže se sledováním řeči v hlučných situacích. Lidé trpící mírnou ztrátou sluchu mají potíže s řečí a tichými zvuky. Střední ztráta sluchu je mezi 40 a 69 dB. Lidé se střední ztrátou sluchu mají potíže s řečí bez naslouchadla. Těžká ztráta sluchu je pak mezi 70 dB a 89 dB. Tito pacienti potřebují buď výkonná sluchadla nebo implantát. Úplná ztráta sluchu je vyšší než 90 dB. Lidé s touto ztrátou sluchu musí spoléhat na odezírání ze rtů nebo znakovou řeč. V životě jim také může pomoci implantát (Cochlear, © 2019).

2. 6. 2. Metody měření

Rychlé měření sluchu můžeme provést i doma či ve škole pomocí smartphonů. Aplikace Hearing test dokáže produkovat tóny různých frekvencí a různé intenzity a následně vykreslit audiogram.

Po sepnutí, aplikace nabízí provést nový test nebo se vrátit k těm již provedeným a uloženým. V případě, že máme originální sluchátka dodané se smartphonem, není nutné provést kalibraci sluchátek. V našem měření ale budeme předpokládat, že originální sluchátka už nemáme a použijeme jiná sluchátka. V tomto případě je tedy potřeba kalibraci provést. Tu musí vykonat osoba se zdravým a normálním sluchem ve věku mezi 18 a 35 lety. Její úlohou je stisknout příslušné tlačítko vždy, když zvuk uslyší. Během experimentu drží toto tlačítko tak dlouho, dokud zvuk slyší, jakmile je tento zvuk ale už příliš tichý a neslyší jej, tlačítko uvolní. Kalibrace trvá přibližně 7 minut.

Aplikace si kalibraci zapamatuje a každé další měření se stejnými sluchátky už můžeme provést bez nové kalibrace. Samotné měření spočívá v nalezení nejtiššího tónu, který ještě slyšíme. S aplikací můžeme postupně naměřit frekvence od 125 Hz do 18 000 Hz. Ještě před sepnutím experimentu můžeme v pravém horním rohu nalézt nastavení. Zde si můžeme navolit pro jaké frekvence chceme měření provést. Pro náš experiment jsme zvolili všechny nabízené.



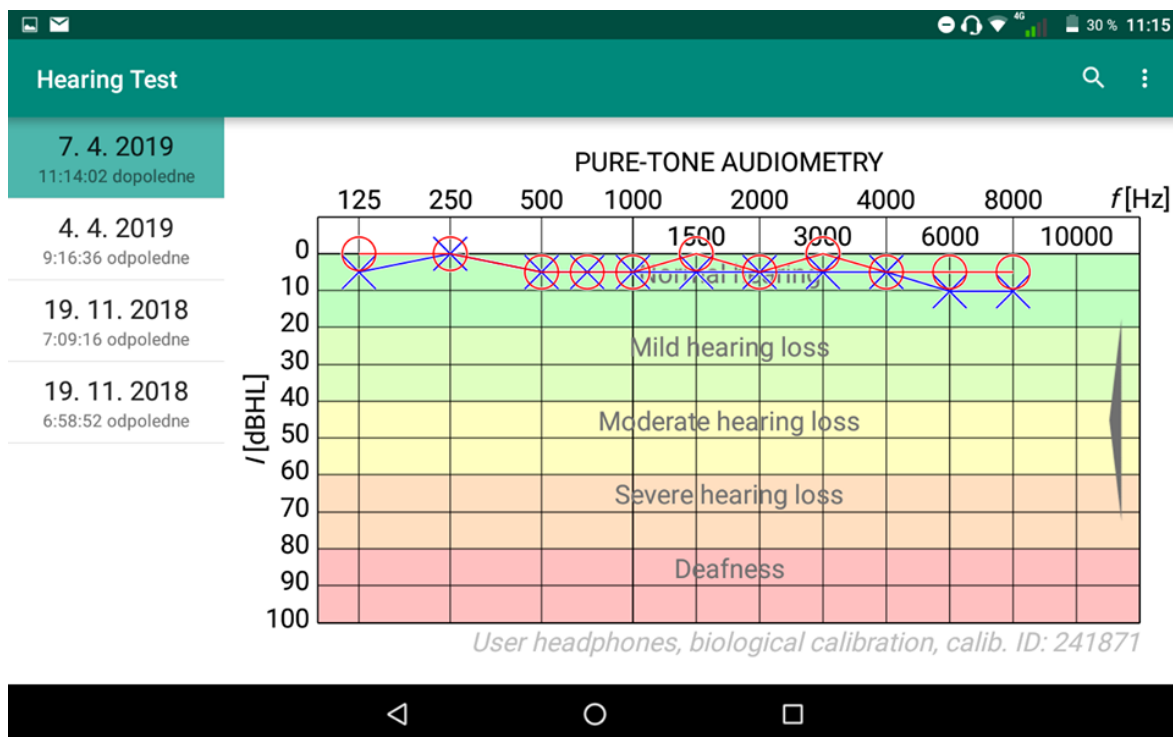
Obrázek 51: Měření audiogramu s aplikací Hearing test

Samotné měření probíhá nejprve pro pravé ucho, poté pro levé. Jestliže daný zvuk slyšíme, zvolíme tlačítko "I can hear", pokud už jej neslyšíme, stiskneme "I cannot hear", přičemž hledáme nejtíší slyšitelný zvuk. Mezi frekvencemi se pohybujeme šipkami. Pro ukončení experimentu, naměření všech frekvencí se experiment začne sám ukládat, pokud ne, stiskneme tlačítko "Barely audible" (viz Obrázek 51). Data naměřená pravým uchem jsou vždy zobrazena červeným kolečkem, pro levé ucho představují naměřená data modrý křížek. Naměřené audiogramy zobrazují vždy závislost hladiny intenzity zvuku na frekvenci. V nastavení v pravém horním rohu si můžeme zvolit různé interpretace naměřeného audiogramu – těm se budeme podrobně věnovat v následující části.

2. 6. 3. Realizace měření

Provedli jsme celkem měření na třech osobách ve věku – 22, 50 a 73 let.

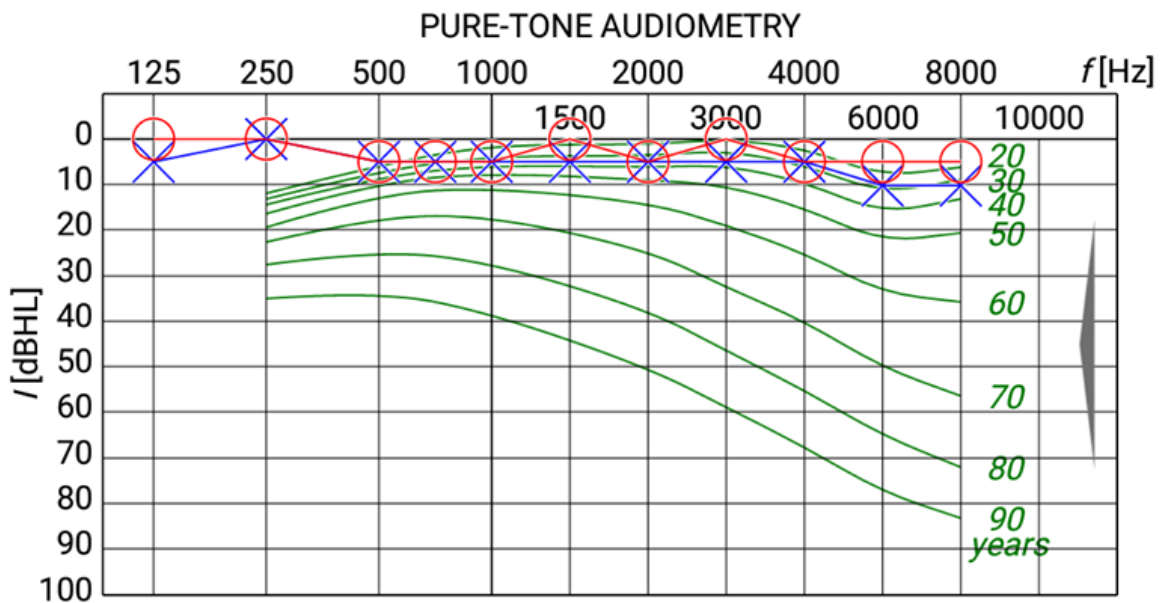
Nejprve na obrázcích 52, 53, 54, 55 a 56 představíme audiogramy ženy ve věku 22 let, zde předpokládáme normální sluch. První nabízená interpretace grafu se nazývá „Degrees of hearing loss“ a popisuje, jak moc je sluch poškozen.



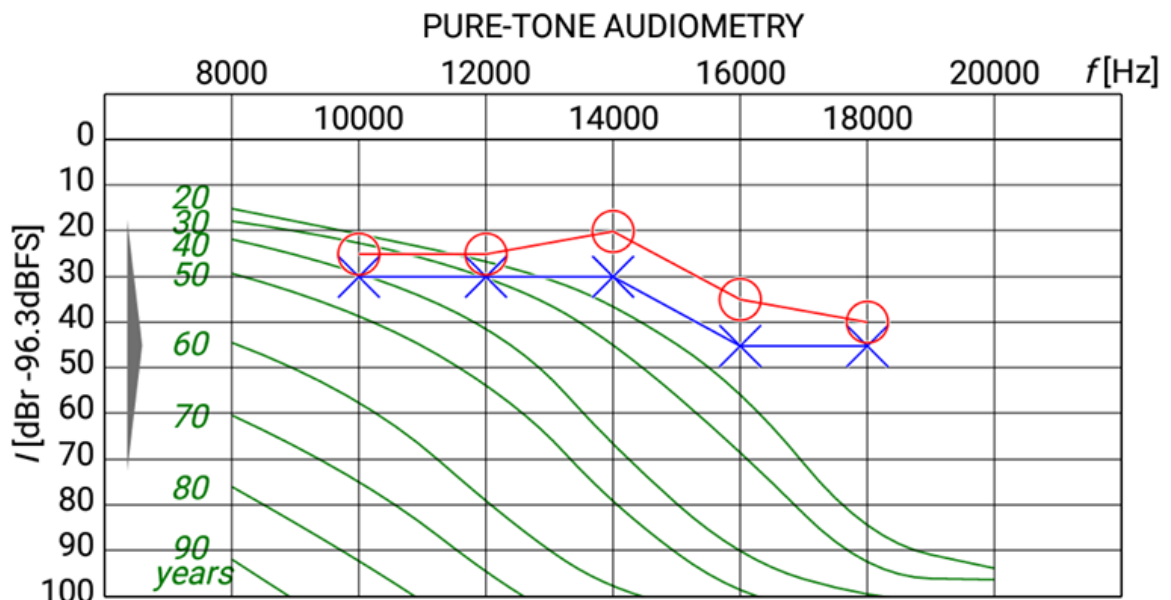
Obrázek 52: Audiogram interpretace ukazující poškození sluchu – 22 let

Na obrázku 52 můžeme vidět, že tato žena má normální sluch – oblast normálního nepoškozeného sluchu je zobrazena tmavě zelenou barvou, středně zelená oblast pak znázorňuje velmi slabou ztrátu sluchu. Do žluté oblasti spadají měření osoby s mírnou ztrátou sluchu. Oranžová oblast pak koresponduje se střední ztrátou sluchu. Červeně je zde zvýrazněna oblast pro úplnou ztrátu sluchu.

V pravém horním rohu aplikace je znak tří teček, po jeho stisknutí zvolíme možnost „Interpretation“. Následně se objeví tabulka, která nabízí další možné interpretace grafu. Další z možností může být graf s označením „Age norms“ – tento graf srovnává naměřená data s normami pro daný věk (viz obrázek 53 a 54).



Obrázek 53: Audiogram interpretace ukazující věkové normy, nižší frekvence - 22 let

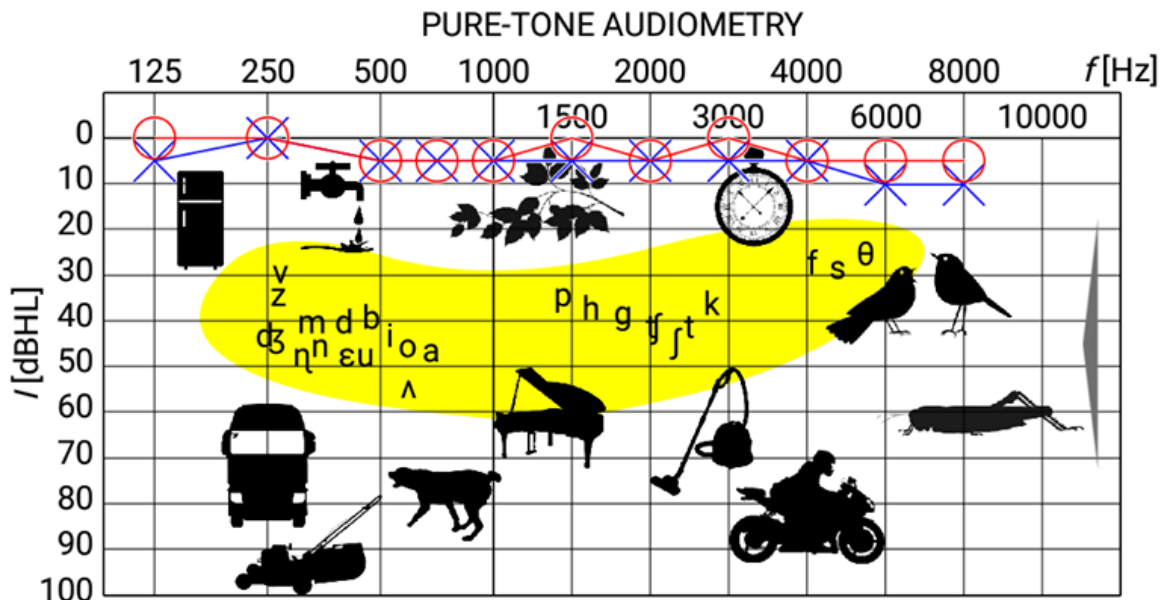


Obrázek 54: Audiogram interpretace ukazující věkové normy, vyšší frekvence - 22 let

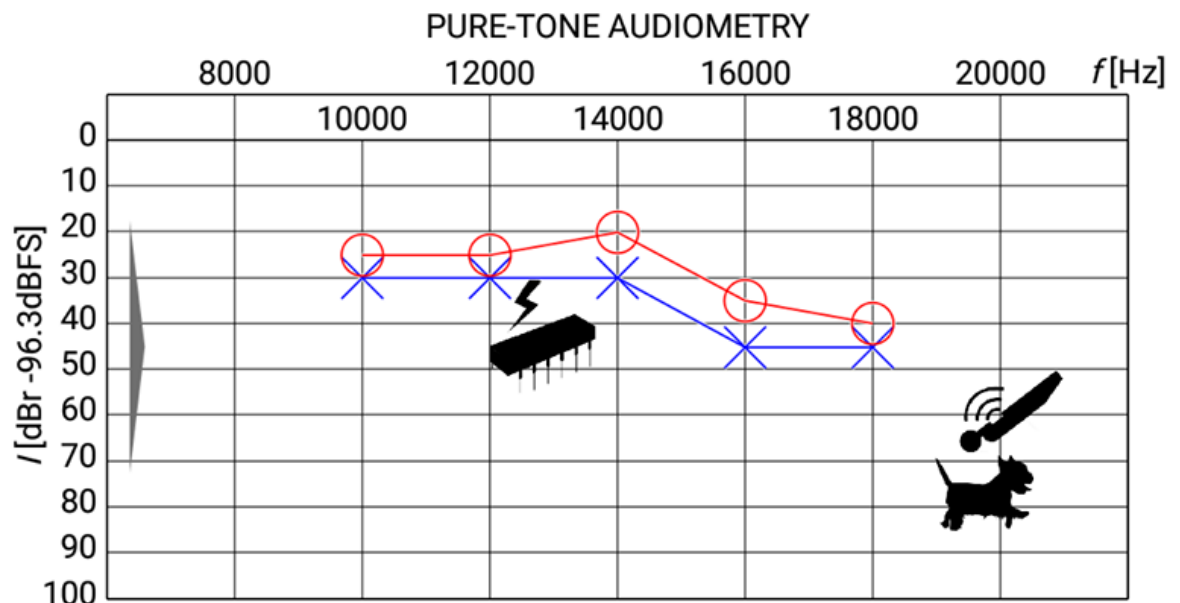
Zelené křivky zde představují normy pro určitý věk. Na těchto grafech můžeme vidět, že osoba, na které bylo měření provedeno, by měla mít mezi dvaceti a třiceti roky. To odpovídá i realitě – tato žena má 22 let. Na obrázku 53 můžeme vidět, že se sluch asi do čtyřiceti let jasně nezhoršuje, křivka výrazněji klesá až po padesátém roku. Na obrázku 54 vidíme, že se měření vymyká všem křivkám a vychází dokonce lépe, než udává norma. Hodnoty nad 15 000 Hz už jsou ale příliš vysoké a reproduktory smartphonu již nejsou stavěné pro takto

vysoké frekvence. Zahraný tón reproduktorem proto může být zkreslený a ve skutečnosti nemusí mít příslušnou frekvenci. Na obrázku 54 také můžeme vidět, že lidé vyššího věku již neslyší zvuky s vysokou frekvencí.

Poslední z možných interpretací grafu se nazývá „Speech banana“ a ukazuje, jaké zvuky mají danou frekvenci a danou hladinu intenzity zvuku (viz obrázky 55 a 56).

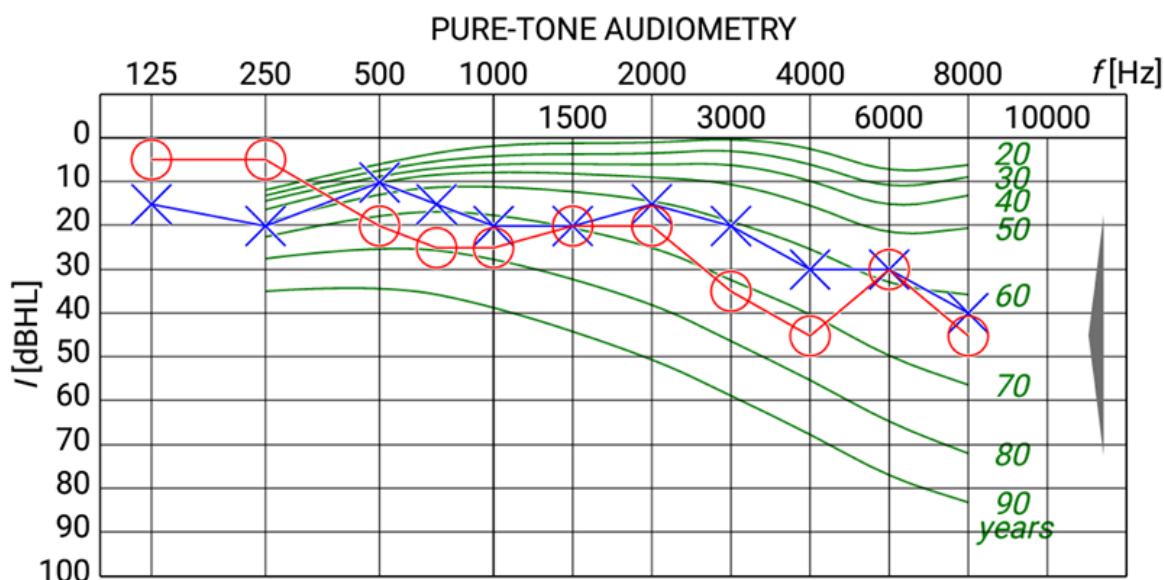


Obrázek 55: Audiogram interpretace "Speech banana" - nižší frekvence



Obrázek 56: Audiogram interpretace "Speech banana" - vyšší frekvence

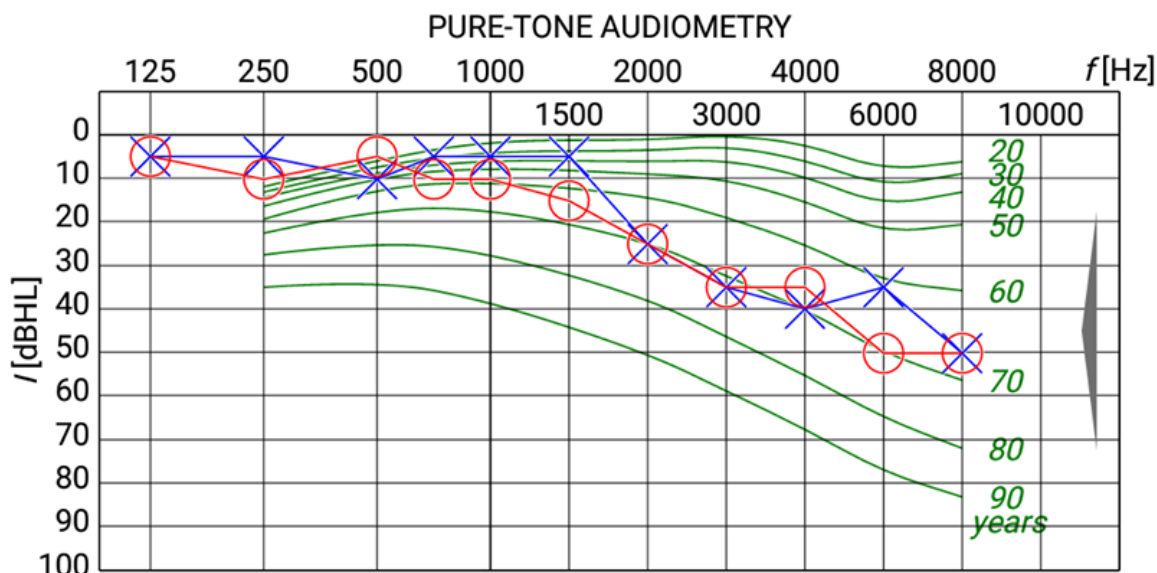
Z těchto obrázků můžeme vidět, že zvuk ledničky má frekvenci mezi 125 a 250 Hz a hladina intenzity tohoto zvuku je přibližně 20 dBHL. Dalším příkladem může být například zvuk vysavače, který by měl mít frekvenci 3000 Hz a hladina intenzity zvuku je v tomto případě 70 dBHL. Z dalších vyobrazených zvuků můžeme jmenovat například zvuk autobusu, sekačky, kapajícího kohoutku, štěkajícího psa, klavíru, motorky, šumícího listí či zpěvu ptáků. Na obrázku 56 vidíme, že ultrazvuková píšťalka, kterou můžeme volat psy má kolem 20 000 Hz a našim uchem ji tedy neuslyšíme. Na obrázku 55 vidíme žlutě vyznačené oblasti, ve kterých jsou zapsána různá písmena. Používáme-li často písmena v, z, m nebo například n, bude naše řeč mít poměrně nízkou frekvenci – mezi 250 a 500 Hz. Naopak zvuky při vyslovení souhlásek s či f budou mít vysokou frekvenci a to kolem 4000 nebo 5000 Hz. Další měření jsme provedli na osobě ve věku 50 let.



Obrázek 57: Audiogram interpretace ukazující věkové normy - 50 let

Měření bylo provedeno na muži, ve věku 50 let. Podle obrázku 57 ale má tento muž horší sluch, než je na jeho věk obvyklé. Podle věkové normy má už sluch šedesátníka. Přičemž na levé ucho slyší lépe (modré křížky) než na pravé (červená kolečka). U měřené osoby ještě nedošlo k výraznější ztrátě sluchu, ale může mít potíže s komunikací v hlučnějším prostředí. Zvuky o frekvencích 10 000 Hz a 12 000 Hz už tento muž slyšel velmi špatně, od 14 000 Hz už zvuk neslyšel vůbec.

Poslední měření jsme provedli na ženě ve věku 73 let, naměřený audiogram je na obrázku 58.



Obrázek 58: Audiogram interpretace ukazující věkové normy – 73 let

Z obrázku 58 můžeme vidět, že naměřená data téměř kopírují křivku pro 70 let. I když tato osoba již trpí mírnou ztrátou sluchu a sama uvedla, že jí dělá problém komunikace v rušnějším prostředí, je její sluch pro její věk úplně normální. Podle audiogramu můžeme vidět, že se zvyšujícím se věkem se sluch zhoršuje. Zvuky nad 12 000 Hz už neslyšela vůbec. Nutno ale podotknout, že zvuky do 1500 Hz slyší velmi dobře, srovnatelně s osobami do 50 let. Tyto zvuky korespondují s běžnou řečí. Závěrem tedy můžeme konstatovat, že sluch této osoby je na její věk velice dobrý.

2. 6. 4. Vyhodnocení

Audiometrické vyšetření sluchu pomocí smartphonu je velice jednoduchý experiment. Mezi výhody tohoto experimentu bychom zařadili především nekomplikovanost jeho provedení a také poměrně intuitivní vyhodnocení, kterého můžeme dosáhnout díky poskytnutým grafům. Na tomto experimentu oceňujeme především jeho propojenost s praxí, kdy si studenti mají možnost vyzkoušet experiment, který se reálně provádí v ordinaci ORL při vyšetření sluchu. Navíc pomocí tohoto experimentu rozvíjíme mezipředmětové vztahy mezi biologií a fyzikou.

Studenti si mohou na svých vlastních zařízeních vyzkoušet svůj sluch, vyhodnotit, zda je v pořádku a v souladu s normami či porovnat naměřené výsledky se spolužáky. Na rozdíl od běžné audiometrie, která používá standardizovaná a předem kalibrovaná sluchátka, žáci

v tomto případě využívají svoje komerční sluchátka. Reprodukční komerčních sluchátek může mít různé parametry, a to může způsobovat nejistoty v našem měření. Kromě toho výrazné odchylky může také způsobit hluk ve třídě. Audiometrické měření se provádí v odhlučněné ordinaci, v níž je úplné ticho. Při realizaci tohoto experimentu ve třídě ale úplné ticho nikde nebude, to může mít vliv na určení prahových hodnot. Tento test by tedy neměl být použit pro lékařské vyšetření a nemůže sloužit ke stanovení diagnózy. Nicméně se studenti díky němu mohou dozvědět jaký je stavu jejich sluchu a mohou tak být upozorněni na možné problémy. Díky měření frekvenční odezvy našeho sluchu můžeme navíc zvýšit povědomí studentů o křehkosti lidského sluchu a seznámit studenty s preventivními opatřeními pro jeho udržení – např. jim můžeme doporučit vyhýbat se hlasité hudbě apod. (Thoms, 2018).

2. 7. Sonar

Sonar je příkladem aplikace znalostí šíření akustických vln. V praxi se využívá velmi často a jeho fungování je v principu velice jednoduché a pochopitelné i pro studenty střední školy. Bylo by škoda nevyužít tohoto přístroje k propojení studia fyziky a běžného života. Princip sonaru lze demonstrovat pomocí osciloskopu, vysokofrekvenčního zdroje zvuku, vysílače a přijímače. Tyto pomůcky ale nemusí být vždy přítomné na středních školách, zároveň se práce s osciloskopem zdá studentům mnohdy obtížná a s výsledky pak neumí správně pracovat. Pro demonstraci principu Sonaru můžeme také využít aplikace ve smartphonu. V tomto případě je pak měření mnohem jednodušší a rychlejší nejen na přípravu ale i realizaci.

2. 7. 1. Teoretický popis

Sonar je zařízení využívající odrazu ultrazvuku, tzv. echolokace. Ultrazvuk je akustická vlna o frekvencích vyšších než 20 kHz. Využívají se tedy takové frekvence, které lidské tělo již neslyší. Sonar se používá ke zjištění profilu mořského dna a hloubky moře, může také hledat hejna ryb pod hladinou (Bajer, 2006, s. 416–417). Echolokaci používají také někteří savci pro orientaci v prostoru, vyhledávání potravy nebo komunikaci s okolím. Za tímto účelem využívají kytovci a letouni (nejznámější je echolokace u netopýrů) svého vlastního

tělesného sonaru. Princip echolokace je takový, že se vyslaný ultrazvuk odrazí od předmětu a putuje zpět do místa vysílání, kde je zachycen (Wikipedia, © 2001-2019). Na základě časového zpoždění Δt , které uplyne mezi vysláním signálu v čase t_1 a jeho zachycením v čase t_2 a rychlosti šíření ultrazvuků ve vodě v , můžeme vypočítat vzdálenost l , kterou ultrazvuk urazil. Tím můžeme zjistit hloubku moře nebo zkoumat profil mořského dna. Vzdálenost l tedy určíme vztahem:

$$l = \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) = \frac{1}{2}v\Delta t \quad (13)$$

(Encyklopedie fyziky, © 2006-2019).

2. 7. 2. Metody měření

K demonstraci principu sonaru můžeme také použít aplikací ve smartphonu. Pomocí něj můžeme určit vzdálenost daného předmětu. Experiment „sonar“ aplikace Phythox vysílá krátký zvuk z reproduktoru a pomocí mikrofону zaznamenává echa. Následně pak vykresluje graf, který ukazuje závislost amplitudy ozvěny na vzdálenosti, popřípadě také závislost amplitudy ozvěny na časovém zpoždění.

Pomůcky: materiál na tvorbu dutiny (například polystyren, tvrzený molitan), kovový ták, tablet s aplikací Phythox, metr nebo pásmo pro ověření výsledků.



Obrázek 59: Pomůcky pro demonstraci principu sonaru

Pro správnou interpretaci grafu je potřeba ochránit telefon před nežádoucími ozvěnami. Jestliže vyšleme zvuk z reproduktoru, dojde k odrazu zvuku nejen na překážce, ale také k odrazu od dalších předmětů (například stěny, stropu, podlahy a všech okolních objektů). Abychom předešli tomuto zkreslení výsledků je potřeba vytvořit něco jako dutinu, do kterého umístíme telefon a pouze jedna strana dutiny zůstane otevřená pro vzniklá echa. Dutinu můžeme vytvořit z oblečení, polštářů nebo třeba polystyrenů (viz obrázek 58). Je nutné zvolit takový materiál, ze kterého se bude zvuk odrážet co nejméně. Naopak jako překážku je nutné použít silný reflektor (materiál, ze kterého se bude všechen zvukový signál odrážet) (Phyphox, 2017). Vhodný je například kovový táč.

Pro provedení experimentu umístíme kovový táč do určité vzdálenosti od telefonu. Tuto vzdálenost můžeme změřit pásmem, abychom si mohli výsledek určený aplikací ověřit. V aplikaci Phyphox zvolíme experiment Sonar. Pro správný výpočet je potřeba uvést rychlost zvuku. Před spuštěním můžeme zvolit zpožděný start tak, abychom telefon stihli umístit do dutiny před začátkem měření. V pravém horní rohu klikneme na ikonu tří teček a vybereme Časované měření (viz obrázek 3). Dále můžeme navolit zpoždění startu i dobu trvání experimentu. Experiment následně spustíme tlačítkem Play. Vzdálenost telefonu od překážky můžeme určit přímo z aplikace, v tomto případě čteme výsledek ze záložky Echolokace. Při horizontálním přejetím obrazovky se můžeme dostat k záložce Měření času. V této záložce dostaneme graf závislosti amplitudy ozvěny na časovém zpoždění Δt , pomocí vztahu (13) pak můžeme sami vypočítat vzdálenost překážky. Výsledky odečítáme vždy z druhého grafu, kdy jsou data znormována na kulovou plochu. Největší pík by měl patřit zvuku odraženému od překážky. Další variací tohoto pokusu je měření rychlosti zvuku. Sama aplikace nabízí tento výpočet při horizontálním posunutí doprava, můžeme nalézt záložku Rychlost zvuku. Při zadání známé vzdálenosti překážky od tabletu dostaneme graf závislosti amplitudy ozvěny na rychlosti zvuku. Ke stejnému výsledku ale můžeme také dojít výpočtem. Zjistíme-li pomocí aplikace časové zpoždění Δt , můžeme pomocí vztahu (13) vypočítat rychlost zvuku v námi měřeném prostředí.

Výsledky měření můžeme orientačně odečíst přímo v aplikaci Phyphox nebo můžeme naměřená data exportovat do Excelu a výsledek tak určit přesně. Při měření je potřeba tiché prostředí, a i komunikace mezi lidmi může ovlivnit experiment (Phyphox, 2017).



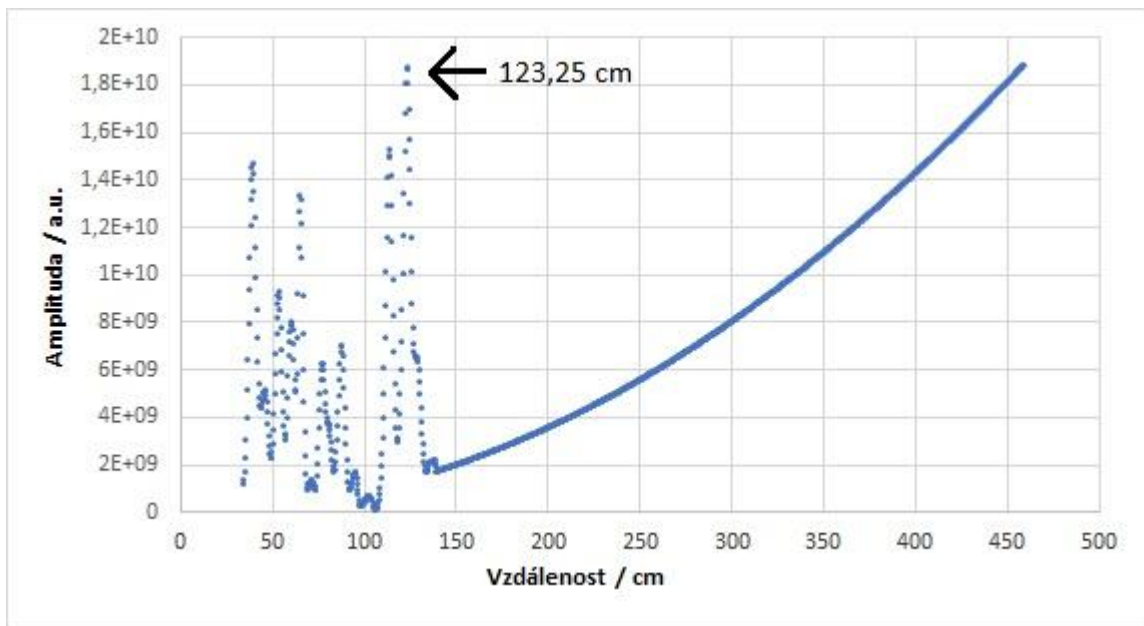
Obrázek 60: Provedení experimentu pro demonstraci principu sonaru

Aplikace nepoužívá k měření ultrazvuk (vysokofrekvenční zvuk) ani jednoduchý zvukový signál. Při spuštění experimentu můžeme slyšet takzvané cvrlikání. Je to sinusová funkce s rychle se měnící frekvencí. Každý signál trvá 5 ms a frekvence v jednom signálu se zvyšuje z 1 kHz na 4 kHz. Signál se opakuje vždy pětkrát v intervalu asi 30 ms (Phyphox, 2017).

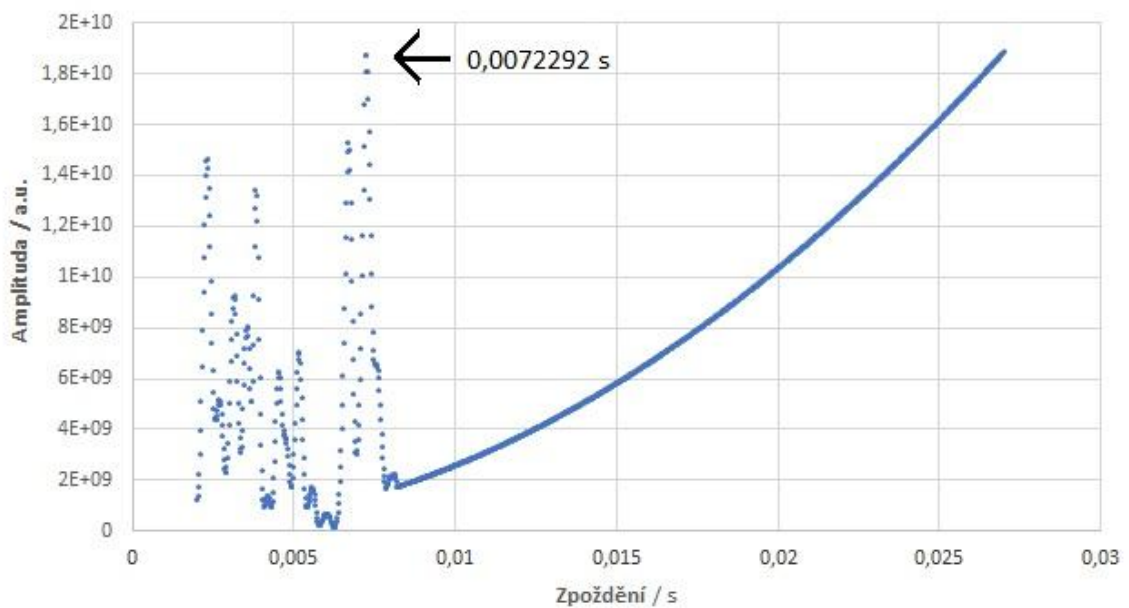
2. 7. 3. Realizace měření

Pro měření jsme použili tablet Samsung Galaxy Tab A SM-T590. Jako materiál na odstranění nežádoucí odražených zvukových vln se nám nejlépe osvědčila krabice obalená kousky molitanu (viz obrázky 61 a 62). Rychlost zvuku jsme nastavili vždy na $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako vzdálenosti překážky od telefonu jsme volili postupně 1,25 m, 1,5 m a 1,8.

Pro vzdálenost 1,25 m jsme dostali následující závislosti:



Obrázek 61: Závislost amplitudy ozvěny na vzdálenosti překážky



Obrázek 62: Závislost amplitudy ozvěny na časovém zpoždění

Pásmem jsme naměřili vzdálenost překážky (kovového tácu) od tabletu 1,25 m. Pomocí aplikace Phypox byla vzdálenost určena na 1,2325 m. Časové zpoždění (doba mezi vysláním zvukového signálu a přijetím tohoto signálu) bylo naměřeno 0,0072292 s. Výpočtem ze vztahu (13) tedy dostáváme vzdálenost:

$$l = \frac{1}{2} v \Delta t = \frac{1}{2} \cdot 340 \cdot 0,0072292 = 1,23 \text{ m.}$$

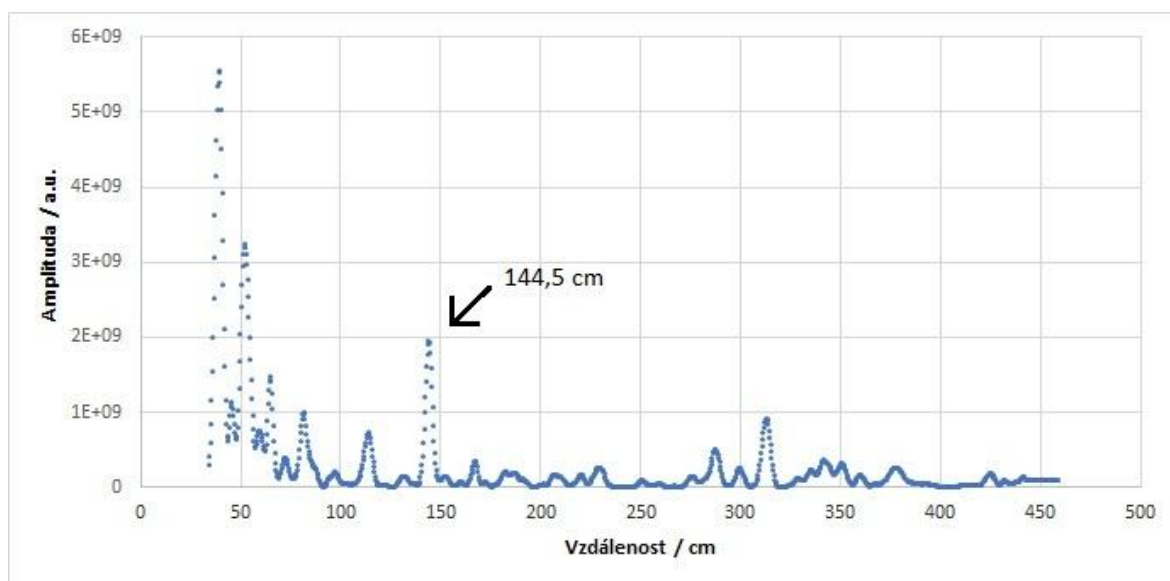
V obou případech jsme zadali rychlost zvuku $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Právě tato hodnota může být zdrojem nepřesnosti, protože rychlost $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ odpovídá teplotě $15 \text{ }^\circ\text{C}$ okolního prostředí (viz tabulka 1). Na základě časového zpoždění jsme pomocí vztahu (13) vypočítali rychlost zvuku

$$v = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 1,25}{0,0072292} = 346 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

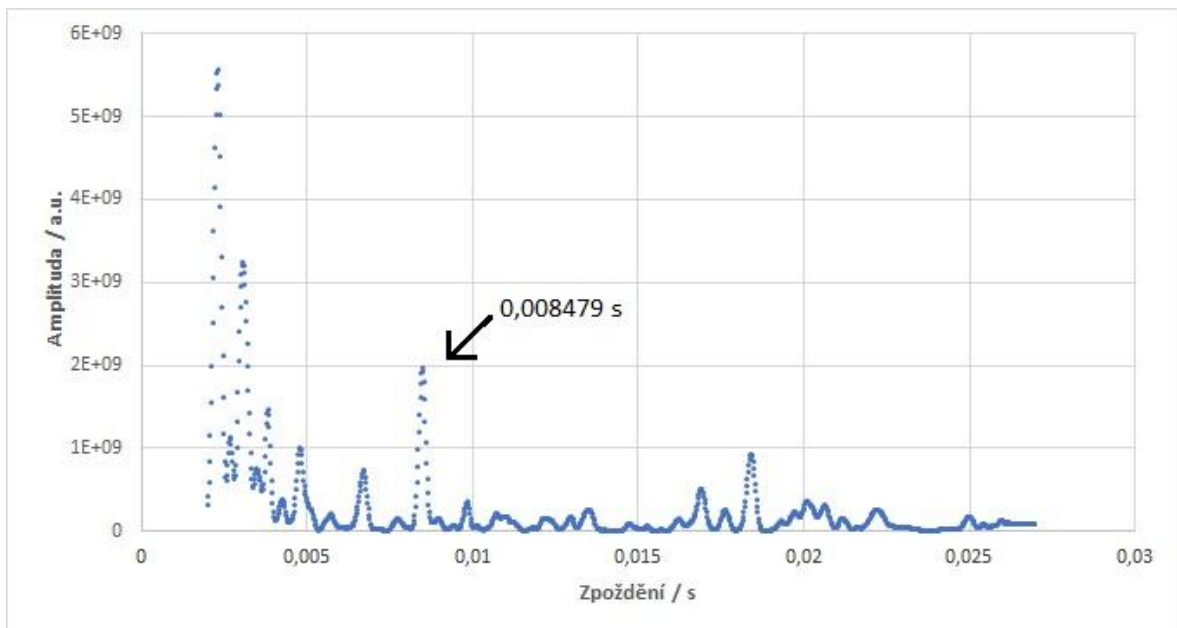
Ta vychází o něco větší a podle tabulky 1 by odpovídala teplotě okolí $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na obrázcích 61 a 62 vidíme ještě několik dalších píků, které odpovídají vzdálenosti menší než $1,25 \text{ m}$ (respektive časovému zpoždění menšímu než $0,00723 \text{ s}$. Z obrázku 61 můžeme odečíst, že tyto píky odpovídají vzdálenostem 40 a 65 cm . Ty mohou být způsobeny odrazem zvuku z okolních předmětů (stůl, stěny dutiny, osoba v blízkosti smartphonu apod.).

Následně jsme měřili závislost amplitudy ozvěny na vzdálenosti a časovém zpoždění pro překážku vzdálenou $1,50 \text{ m}$.



Obrázek 63: Závislost amplitudy ozvěny na vzdálenosti



Obrázek 64: Závislost amplitudy ozvěny na časovém zpoždění

Podle závislosti na obrázku 63, je vzdálenost překážky od měřícího zařízení 1,445 m. Časové zpoždění je v tomto případě 0,008479 s. Podle výpočtu tedy zde vychází vzdálenost překážky:

$$l = \frac{1}{2} v \Delta t = \frac{1}{2} \cdot 340 \cdot 0,008479 = 1,44 \text{ m.}$$

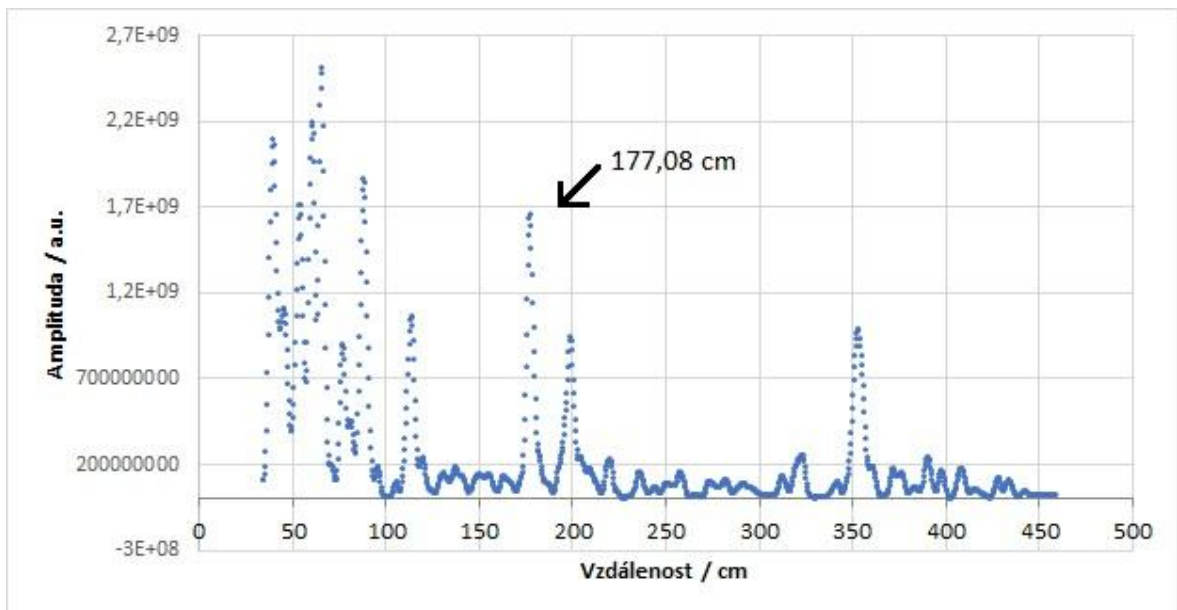
Výsledky jsou dány opět pro rychlost zvuku $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z časového zpoždění můžeme vypočítat, jaká by měla být rychlost zvuku, je-li překážka od tabletu vzdálena 1,50:

$$v = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 1,50}{0,008479} = 354 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

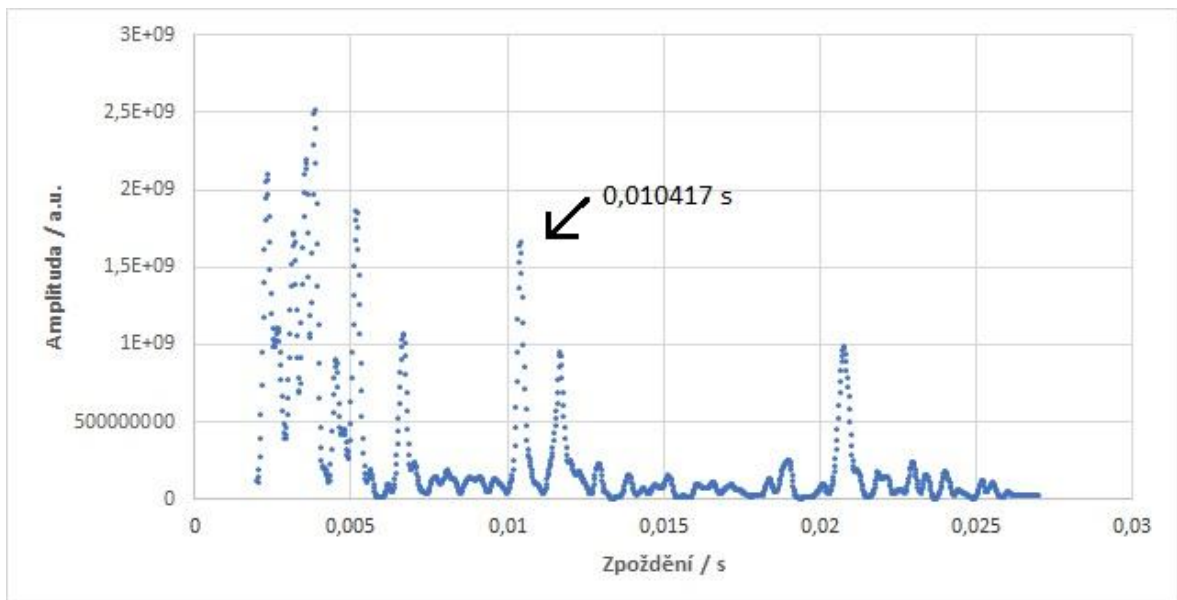
Tato rychlost zvuku by odpovídala teplotě $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (viz tabulka 1). To znamená, že výsledek byl zcela jistě ovlivněn nějakou nepřesností. Orientačně jej ale můžeme považovat za správný.

Na obrázku 63 si můžeme všimnout, že pík pro 144 cm není ten největší. I zde můžeme pozorovat ozvěny zvuků, které vznikly odražením od nějaké překážky ve vzdálenosti 39 a 51 cm.

Poslední měření jsme provedli při umístění překážky ve vzdálenosti 1,80 m od měřícího zařízení. Na obrázku 65 můžeme vidět závislost amplitudy ozvěny na vzdálenosti překážky, na obrázku 66 pak závislost amplitudy ozvěny na časovém zpoždění.



Obrázek 65: Závislost amplitudy ozvěny na vzdálenosti



Obrázek 66: Závislost amplitudy ozvěny na časovém zpoždění

V tomto měření jsme určili vzdálenost překážky 1,77 m. Časové zpoždění je 0,010417 s. Pomocí výpočtu je potom vzdálenost překážky dána jako:

$$l = \frac{1}{2} v \Delta t = \frac{1}{2} \cdot 340 \cdot 0,010417 = 1,77 \text{ m.}$$

I zde jsme počítali s rychlostí zvuku $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při výpočtu rychlosti zvuku na základě časového zpoždění dojdeme k výsledku:

$$v = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 1,80}{0,010417} = 346 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Rychlost $346 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, jsme našli i v prvním měření. Z toho můžeme vyvodit, že námi zadána rychlost zvuku $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, může být chybná a je tedy zdrojem nejistot. Důvodem by mohla být větší teplota v místnosti, rychlosti $346 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ odpovídá dle tabulky 1 přibližně teplota $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

I v tomto měření můžeme pozorovat píky s větší amplitudou i pro jiné vzdálenosti, než je vzdálenost námi hledaná. V tomto případě je nalézáme pro vzdálenosti překážek 40 cm, 65 cm a 88 cm. Zejména vzdálenost překážky 40 cm pozorujeme i v předešlých měřeních. Je tedy jisté způsobena odrazem akustické vlny od okolních předmětů (stůl, podlaha, dutina, stěna, židle, osoby apod.). Pro další měření by bylo vhodné tyto předměty identifikovat a pokusit se tento rušivý element odstranit.

2. 7. 4. Vyhodnocení

Toto měření se zdá vhodné k demonstraci principu sonaru i k orientačnímu určení vzdálenosti překážky od měřícího zařízení. Jestliže chceme tento experiment využít pouze k demonstraci, nemusíme si vytvořit dutinu eliminující odrazy z okolního prostředí. V tomto případě je experiment velmi nenáročný na pomůcky. V obou případech je také velmi jednoduchý a na realizaci a pro studenty jednoduchý k pochopení a interpretaci výsledků. Většina problémů s tímto měřením spojena byla již popsána v části 2. 7. 2. K znemožnění těchto komplikací můžeme předejít pomocí těchto rad:

- K realizaci experimentu je potřeba tiché prostředí. Okolní hluk i komunikace osob může zabránit správným výsledkům.
- Řadu špatných výsledků mohou způsobit odrazy akustických vln od okolních předmětů. Jestliže bychom chtěli předejít těmto vlivům, můžeme si vytvořit "dutinu", do kterého umístíme měřící zařízení a které nebude zvuky odrážet. Jestliže bychom tento vliv ještě více eliminovat, můžeme použít bodový zdroj zvuku (reproduktor) a bodový přijímač (mikrofon) tak, abychom zaznamenali zvuk přicházející pouze z daného směru, ve kterém leží překážka (Phyphox, 2017).
- Dalším zdrojem nepřesností může být zadání špatné rychlosti zvuku. Před začátkem experimentu je vhodné změřit teplotu v místnosti a pomocí tabulky 1 určit rychlost šíření zvuku při dané teplotě.

2. 7. 5. Aplikace ve škole

Tento experiment jsme vyzkoušeli taky se studenty ve třídě 5. AF na Slovanském gymnáziu v rámci studia mechanického vlnění a určování rychlosti zvuku s pomocí osciloskopu. V rámci laboratorních prací jsme si ukázali také jak funguje sonar, a to pomocí osciloskopu, generátoru vysokofrekvenčního akustického vlnění, přijímače, vysílače a odrazné destičky. Skupinka, která měla práci nejrychleji hotovou, si stáhla aplikaci Phyphox a vyzkoušela si, jak pracuje sonar s touto aplikací. Experiment probíhal pouze demonstračně. Studenti si vyzkoušeli, jestli telefon s aplikací měří správně a naučili se správně odečítat z grafů.



Obrázek 67: Použití aplikace Phyphox experimentu Sonar studenty Slovanského gymnázia



Obrázek 68: Použití aplikace Phyphox experimentu Sonar studenty Slovanského gymnázia

Studenti ocenili jednoduchost měření v porovnání s měřením s osciloskopem. Porozumění experimentu i odečítání výsledků pro ně bylo mnohem snadnější právě v měření s pomocí

Smartphonu. Toto měření se jim také zdá mnohem bližší praxi a aplikaci v běžném životě. Telefon mají stále po ruce a k měření není potřeba tolik odborných znalostí jako pro stejné měření pomocí osciloskopu.

2. 8. Dopplerův jev

V této části představíme dva jednoduché experimenty, pomocí kterých můžeme žákům přiblížit využití Dopplerova jevu. V prvním případě využijeme klasického experimentu, který se využívá především na vysokých školách. Pomocí Dopplerova jevu zde určíme rychlost otáčení kruhové desky, kdy naměřené výsledky budou poměrně spolehlivě kopírovat ty teoretické (Klein, 2014). V druhém případě pak s využitím videa určíme rychlost projíždějícího auta. V obou měření bude hrát hlavní roli použití smartphonů, pomocí kterých budeme provádět měření a analyzovat výsledky.

2. 8. 1. Teoretický popis

Všichni známe příklad, kdy kolem nás projíždí houkající hasičské auto. Zatímco při přibližování uslyšíme vyšší frekvenci sirény (její tón je vyšší) naopak při vzdalování frekvence sirény klesá (tón je nižší). Takové změny frekvence v závislosti na pohybu popisuje Dopplerův jev (Halliday a kol., 2013, s. 479). Ten nám říká, že pohybuje-li se zdroj nebo přijímač zvuku vůči sobě, dochází ke změně vnímané výšky, resp. frekvence tónu oproti stavu, kdy byli oba v klidu. To lze jednoduše vysvětlit pomocí pohybu zdroje. Když se pohybuje, posouvá se střed sférických akustických vln, které zdroj vyzařuje. Před pohybujícím zdrojem se budou vlnoplochy zhušťovat naopak za ním se budou zředňovat (Bajer, 2006, s. 420–421). Při přibližování zdroje tedy dospěje k pozorovateli za jednotku času větší počet vlnoploch a jejich frekvence tedy bude vyšší (Lepil, 2009, s. 92-93). Frekvenci f_1 registrovanou příjemcem můžeme vyjádřit jako

$$f_1 = f_0 \frac{v_{\text{zvuk}}}{v_{\text{zvuk}} - u}, \quad (14)$$

kde f_0 je frekvence zdroje (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.44), u rychlost pohybujícího se zdroje a v_{zvuk} rychlost zvuku ve vzduchu. Přijímač, od kterého se

bude zdroj vzdalovat, zachytí méně zvukových vln a zaznamená tedy nižší frekvenci f_2 (Lepil, 2009, s. 93). Tuto frekvenci můžeme pak vyjádřit jako

$$f_2 = f_0 \frac{v_{\text{zvuk}}}{v_{\text{zvuk}} + u} \quad (15)$$

(iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.44). Dopplerův jev se projevuje nejen u akustických vln, ale také u elektromagnetických vln včetně mikrovln nebo radiových vln (Halliday a kol., 2013, s. 479). Je na něm založeno například měření rychlosti automobilů pomocí radaru, v astronomii pak pomáhá určit rychlost vesmírných objektů na základě vlnových délek záření, které vyzařují (Lepil, 2009, s. 96).

2. 8. 2. Metody měření

K měření Dopplerova jevu pomocí smartphonů se může využít několika různých modifikací jednoho experimentu. My zde představíme dva experimenty, které se nám nejvíc osvědčili.

a. Zdroj zvuku je na otáčející se desce

V tomto případě uvažujeme otáčející se zdroj zvuku. Telefon bude umístěn na okraji otáčející se desky. Bude se tedy k přijímači, který je v klidu, periodicky přibližovat a vzdalovat (Klein, 2014).

Pomůcky: Dva smartphony, otáčivý disk, provázek, lepící páska

Jako zdroj zvuku jsme používali tablet Samsung Galaxy Tab A SM-T590. Ten je potřeba důkladně připevnit k otáčivému disku pomocí provázku nebo lepící pásky tak, aby po zapnutí generátoru a roztočení disku nedošlo k jeho uvolnění a následnému poničení. Schéma měřícího zařízení je na obrázku 69. Přijímač umístíme do blízkosti a přibližně do stejné výšky jako je zdroj zvuku.



Obrázek 69: Zdroj zvuku na otáčivém disku

Pro generaci zvuku jsme používali aplikaci Function Generator, která umožňuje nejen zvolit libovolnou frekvenci zvuku, ale díky ní můžeme také ovládat jednotlivé reproduktory umístěné na tabletu. Pro správné vyhotovení experimentu je vhodné, aby byl zapnut pouze jeden reproduktor, pouze tak můžeme správně určit jeho vzdálenost od osy otáčení a určit

rychlost otáčení disku (viz vztah 14). Schéma nastavení aplikace a připevnění tabletu je na obrázku 70.



Obrázek 70: Zdroj zvuku – aplikace Function Generator

Pro příjem zvuku jsme použili tablet Lenovo Yoga Tablet 3 10 a tablet Samsung Galaxy Tab A SM-T590. Na prvním tabletu jsme měřili frekvenci zdroje pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer, tato aplikace zobrazuje závislost amplitudy zvuku na frekvenci. Naším cílem bylo najít frekvence s největším píkem. První pík by měl mít frekvenci nižší, než je frekvence zdroje v klidu (ta platí pro vzdalování zdroje), druhý pak frekvenci vyšší (patřící k přibližujícímu zdroji). Tato aplikace umožňuje pozastavit experiment a kurzorem najet na nejvyšší frekvenci a určit tak přesně její hodnotu (obrázek 71). Na druhém tabletu jsme k měření frekvencí přibližujícího a vzdalujícího zdroje použili aplikaci Phyphox, konkrétně experiment Zvukové spektrum. Tento experiment zobrazuje frekvenční spektrum a také napíše konkrétní hodnotu frekvence s maximální amplitudou. Experiment zaznamenává zvuk a provádí spektrální analýzu pomocí Fourierovy transformaci (Phyphox, 2017). Je vhodné aplikaci sledovat po dobu několika sekund a určit tak, jaké maximální frekvence se zobrazují. Tak můžeme určit frekvenci přibližujícího i vzdalujícího se zdroje. K měření je

vhodné zvolit co největší frekvence hned z několika důvodů. Při použití vyšších frekvencí (několika kHz) nedojde k rušení signálu okolními zvuky, například lidským hlasem. Důležitější je ale fakt, že pro vyšší frekvence bude Dopplerův jev zjevnější – rozdíl frekvencí v klidu a k pohybu bude větší. To nám pak umožní jednodušší a přesnější interpretaci výsledků (Klein, 2014).

Cílem tohoto experimentu bude určit rychlost otáčení kotouče. Určíme ji na základě Dopplerova jevu a naměřených frekvencí pomocí vztahu:

$$u = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_1}\right) = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(\frac{f_0}{f_2} - 1\right), \quad (16)$$

kde u je rychlost otáčení desky, f_0 je frekvence zvuku vysílaná zdrojem, f_1 maximální zaznamenaná frekvence a f_2 minimální frekvence. Vypočtenou hodnotu můžeme ověřit výpočtem rychlosti vycházejícího z počtu otáček n , obvodu opsané kružnice a času t , za který zdroj vykoná n otáček. Rychlost u pak určíme jako

$$u = \frac{2\pi r n}{t}, \quad (17)$$

kde r je vzdálenost reproduktoru od středu disku (Klein, 2014).

b. Zdrojem zvuku je auto ve videu

Další možností, jak určit rychlost pohybujícího se zdroje s využitím Dopplerova efektu je měření rychlosti auta. Pro jednodušší provedení experimentu je dobré si projíždějící auto natočit na video, které pak můžeme analyzovat v laboratoři nebo ve třídě. Auto by se mělo nejdříve konstantní rychlostí přibližovat k mikrofonu a následně se od něj i vzdalovat konstantní rychlostí. Abychom mohli s jistotou určit rychlost auta, je žádoucí, aby měl během cesty zapnutý klakson (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.43). V případě, že nechceme natáčet video přímo v terénu, můžeme využít volně dostupných, již připravených videí na internetu. My jsme k měření využili následujícího videa: <https://www.youtube.com/watch?v=zF1g1vQvKzU>. V přiloženém videu můžeme nejprve slyšet klakson, když je auto v klidu. Následně auto projíždí kolem pozorovatele rychlostí 70 km/h, 50 km/h a 30 km/h. K provedení experimentu pomocí videa nám pak stačí pouze dva smartphony – jeden video pouští a druhý jej analyzuje. K analýze se nám nejlépe osvědčila aplikace Spectroid. Tato aplikace ukazuje závislost amplitudy na frekvenci zvuku. Roztažením prstů si můžeme přiblížit jakoukoliv část spektra, která nás zajímá a změnu amplitudy tak sledovat detailněji. Tlačítkem stop můžeme měření pozastavit a pomocí

kurzoru určit frekvenci jakéhokoliv píku. Vhodné je také využívat červené hranice, která nám ukazuje nejvyšší dosaženou amplitudu pro danou frekvenci v průběhu měření. Právě s pomocí této čáry můžeme přesněji určit frekvenci klaksonu přijíždějícího nebo vzdalujícího se auta. Vyfocením obrazovky si můžeme měření uložit. Rychlost vozidla pak můžeme vypočítat pomocí vztahu:

$$u = v_{\text{zvuk}} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}, \quad (18)$$

Kde u je rychlost zdroje – tedy rychlost auta, f_1 je frekvence přijíždějícího auta (vyšší frekvence) a f_2 vzdalujícího se auta (nižší naměřená frekvence) (iStage 2 Smartphones in Science Teaching, 2014, s.44).

2. 8. 3. Realizace měření

a. Zdroj zvuku je na otáčející desce

Ještě před začátkem měření jsme změřili teplotu v místnosti, abychom mohli přesně určit rychlost zvuku ve vzduchu a eliminovat tak případné chyby. Během měření bylo v laboratoři 24,3 °C. Pomocí vztahu (7) můžeme tedy určit rychlost zvuku:

$$v_{\text{zvuk}} = (331,82 + 0,61t) = (331,82 + 0,61 \cdot 24,3) = 346,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Pro teplotu 24,3 °C vychází rychlosti zvuku ve vzduchu 346,6 m·s⁻¹. V následujících výpočtech budeme tedy kalkulovat s touto hodnotou.

Následně jsme vypočítali rychlosti otáčení kotouče. Provedli jsme dvě měření. Nejdříve jsme zjistili, že 100 otočení trvá 47,59 s. V druhém měření jsme počítali 50 otočení, které zabralo 22,67 s. Výpočet rychlosti otáčení jsme museli provést pro dvě různé vzdálenosti reproduktoru od středu otáčení. V prvním měření jsme používali reproduktor vzdálený 12,0 cm od středu. Rychlost otáčení kola je v tomto případě:

$$u_{11} = \frac{2\pi rn}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,120 \cdot 100}{47,59} = 1,58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{12} = \frac{2\pi rn}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,120 \cdot 50}{22,67} = 1,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Průměrná rychlost otáčení tedy vychází:

$$u_1 = 1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Pro další měření jsme vyměnili reproduktory na tabletu a začali jsme využívat ten vzdálenější. Distance od tohoto reproduktoru ke středu disku je 15,5 cm. Rychlost otáčení tohoto reproduktoru tedy je:

$$u_{21} = \frac{2\pi r n}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,155 \cdot 100}{47,59} = 2,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{22} = \frac{2\pi r n}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,155 \cdot 50}{22,67} = 2,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Průměrná rychlost otáčení má tedy hodnotu:

$$u_2 = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Měření jsme začali se zapnutým prvním reproduktorem, tj. reproduktor vzdálený 12,0 cm od středu disku. Jako základní frekvenci zdroje jsme použili 3000 Hz. Pro tuto frekvenci se nám podařilo změřit pouze vyšší frekvenci, to znamená frekvenci přibližujícího se zdroje (obrázek 71). Všechny následující výsledky měření jsou barevně invertovány.



Obrázek 71: Měření frekvence aplikací Advanced Spectrum Analyzer, zapnutý je první reproduktor

Změřili jsme, že frekvence přibližujícího se zdroje je 3014 Hz. Pomocí vztahu (16) tedy můžeme vypočítat rychlost otáčení disku:

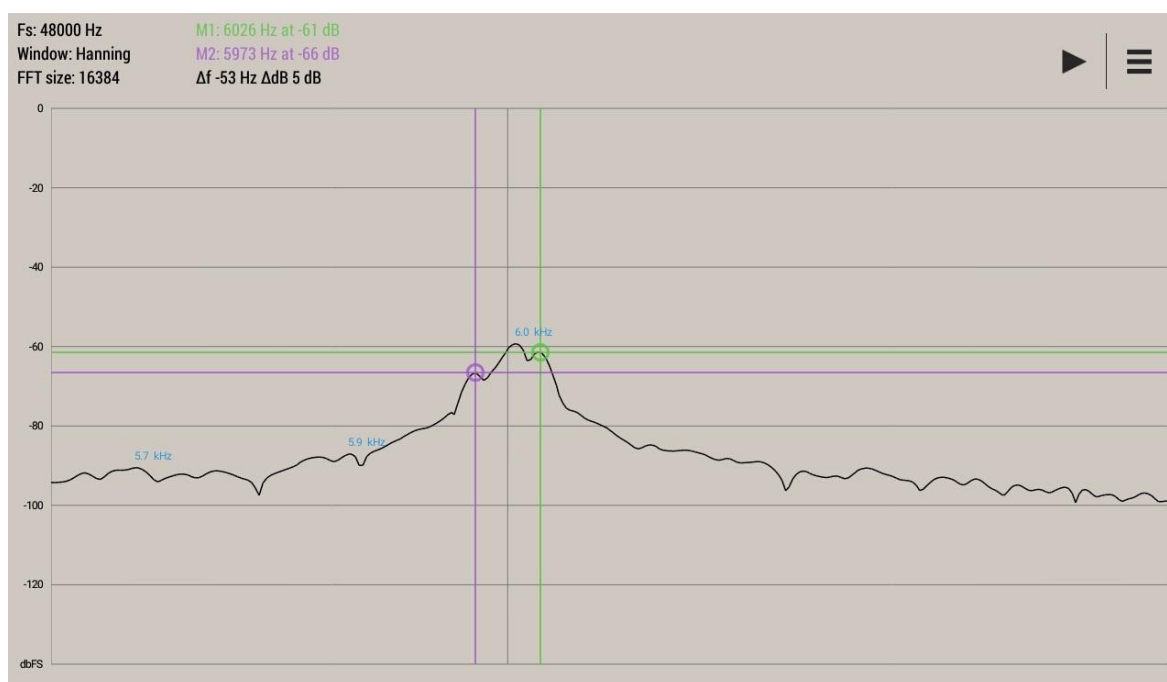
$$u_{3000} = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_1}\right) = 346,6 \cdot \left(1 - \frac{3000}{3014}\right) = 1,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Teoretická rychlost, vypočítaná pomocí počtu otáčení za určitou dobu nám vyšla $1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Naše měření je tedy velmi přesné a relativní chyba měření je v tomto případě:

$$\delta_r = \frac{|u_{3000} - u_1|}{u_1} \cdot 100 \% = \frac{0,02}{1,62} \cdot 100 \% = 1,2 \ \%.$$

Můžeme tedy konstatovat, že využití Dopplerova jevu k určení rychlosti otáčení kotouče je velmi vhodná metoda.

V dalším měření jsme používali stále reproduktor vzdálený 12,0 cm od středu disku. Frekvence zdroje ale byla v tomto případě 6000 Hz. Na obrázku 72 můžeme vidět zaznamenaná data závislosti amplitudy na frekvenci pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer.



Obrázek 72: Měření frekvence aplikací Advanced Spectrum Analyzer, zapnutý je první reproduktor

Touto metodou jsme určili frekvenci přibližujícího zdroje na 6026 Hz, frekvenci vzdalujícího se zdroje pak na 5973 Hz. Na základě vztahu (16) tedy můžeme vypočítat rychlost otáčení kotouče.

$$u_{11}' = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_1}\right) = 346,6 \cdot \left(1 - \frac{6000}{6026}\right) = 1,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{12}' = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(\frac{f_0}{f_2} - 1\right) = 346,6 \cdot \left(\frac{6000}{5973} - 1\right) = 1,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

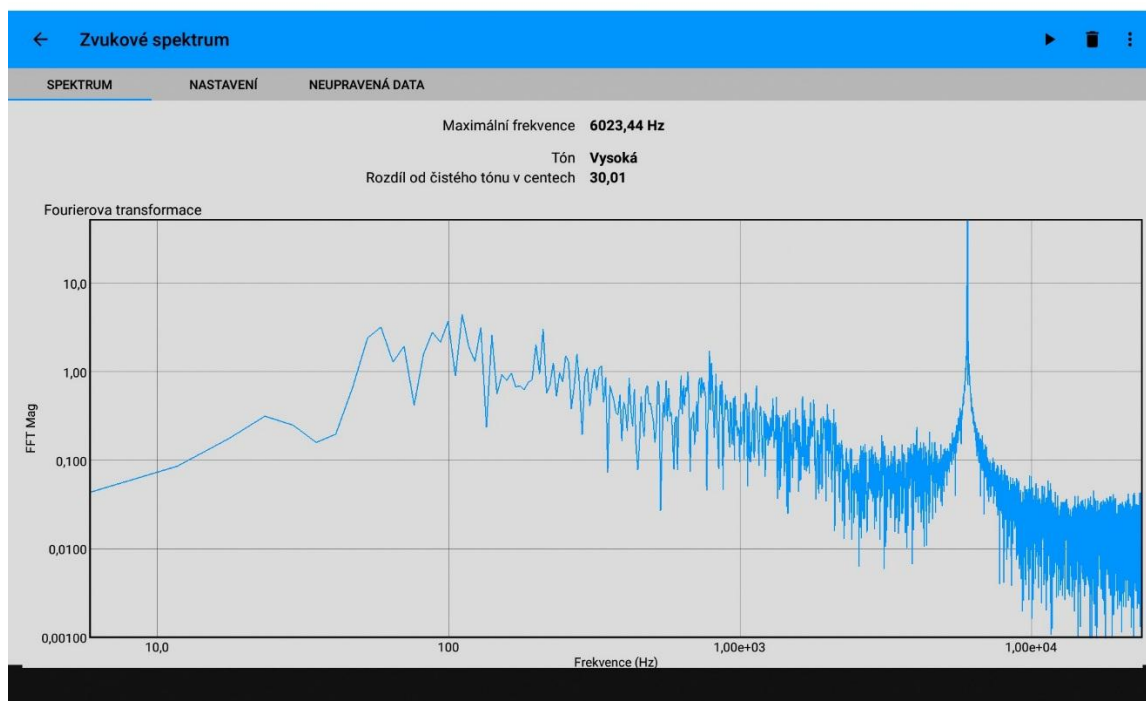
Průměrná hodnota rychlosti otáčení disku tedy je:

$$u_1' = 1,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Druhou metodou jsme ale vypočítali pro rychlost otáčení disku na $1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Případné nejistoty můžou být způsobeny jednak špatným určením frekvence, ale také nerovnoměrným pohybem disku či kolísáním základní frekvence zdroje. Relativní chybu měření tedy můžeme určit jako:

$$\delta_r = \frac{|u_1' - u_1|}{u_1} \cdot 100 \% = \frac{0,08}{1,62} \cdot 100 \% = 4,9 \%.$$

Stejně měření jsme provedli i s aplikací Phyphox. Frekvence zaznamenaná tabletem s aplikací Phyphox je znázorněna na obrázku 73.



Obrázek 73: Měření frekvence pomocí Phyphoxu, zapnutý je první reproduktor

Vidíme, že nejvyšší pík platí pro frekvenci 6023,44 Hz, to je frekvence zaznamenaná v případě, že se zdroj zvuku přibližuje. Pro vzdalující se zdroj jsme pomocí aplikace Phyphox naměřili frekvenci 5976 Hz. Tu jsme zaznamenali v aplikaci Phyphox, bohužel se nám ale nepodařilo ji vyfotit. I zde jsme vypočítali rychlost otáčení disku.

$$u_{11}'' = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_1}\right) = 346,6 \cdot \left(1 - \frac{6000}{6023}\right) = 1,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{12}'' = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(\frac{f_0}{f_2} - 1 \right) = 346,6 \cdot \left(\frac{6000}{5976} - 1 \right) = 1,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Průměrná hodnota rychlosti otáčejícího disku je v tomto případě:

$$u_1'' = 1,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Pomocí počtu otáčení kotouče jsme určili skutečnou hodnotu rychlosti otáčení disku na $1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Relativní chyba měření je tedy:

$$\delta_r = \frac{|u_1'' - u_1|}{u_1} \cdot 100 \% = \frac{0,26}{1,62} \cdot 100 \% = 16 \ %.$$

Z výpočtů relativních chyb můžeme zjistit, že určení frekvencí pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer je přesnější. Pro oba případy ale můžeme konstatovat, že s využitím Dopplerova jevu můžeme orientačně určit rychlost otáčení disku.

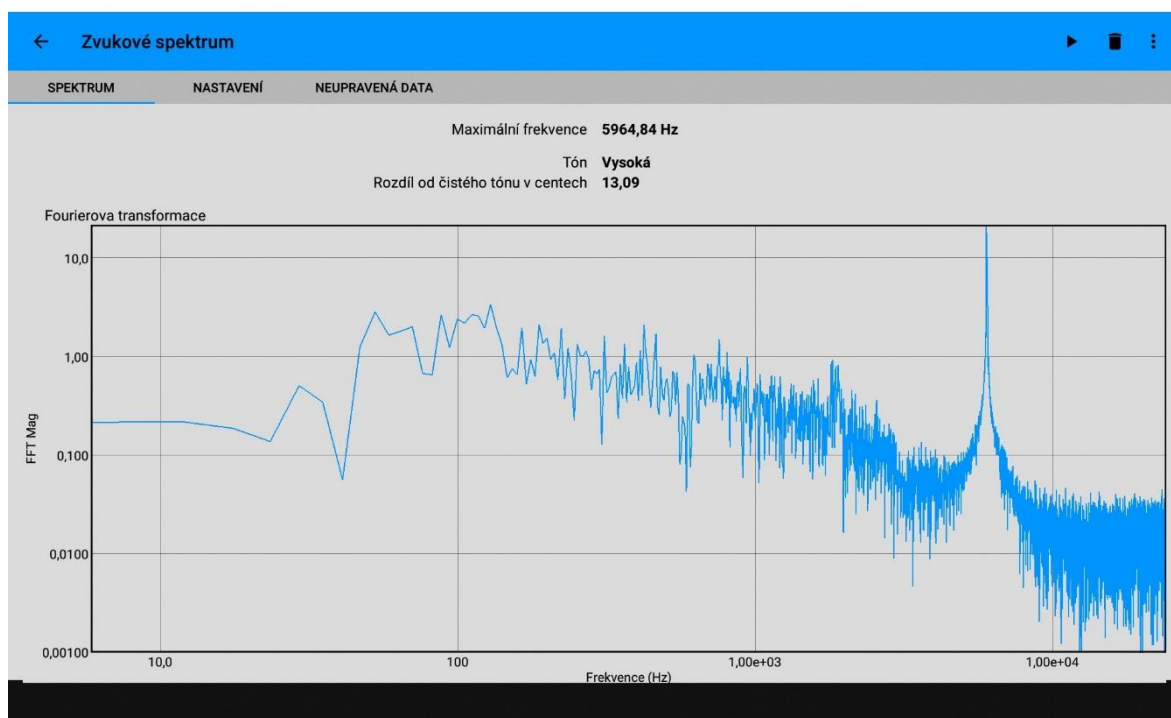
Pro další měření jsme použili frekvenci zdroje opět 6000 Hz, zapnuli jsme ale druhý reproduktor. Tento reproduktor je vzdálený 15,5 cm od středu otáčení disku. K měření frekvencí přibližujícího se a vzdalujícího se zdroje jsme využili opět dvou aplikací – Advanced Spectrum Analyzer (výsledek měření je na obrázku 74) a aplikaci Phypbox (obrázky 75 a 76).



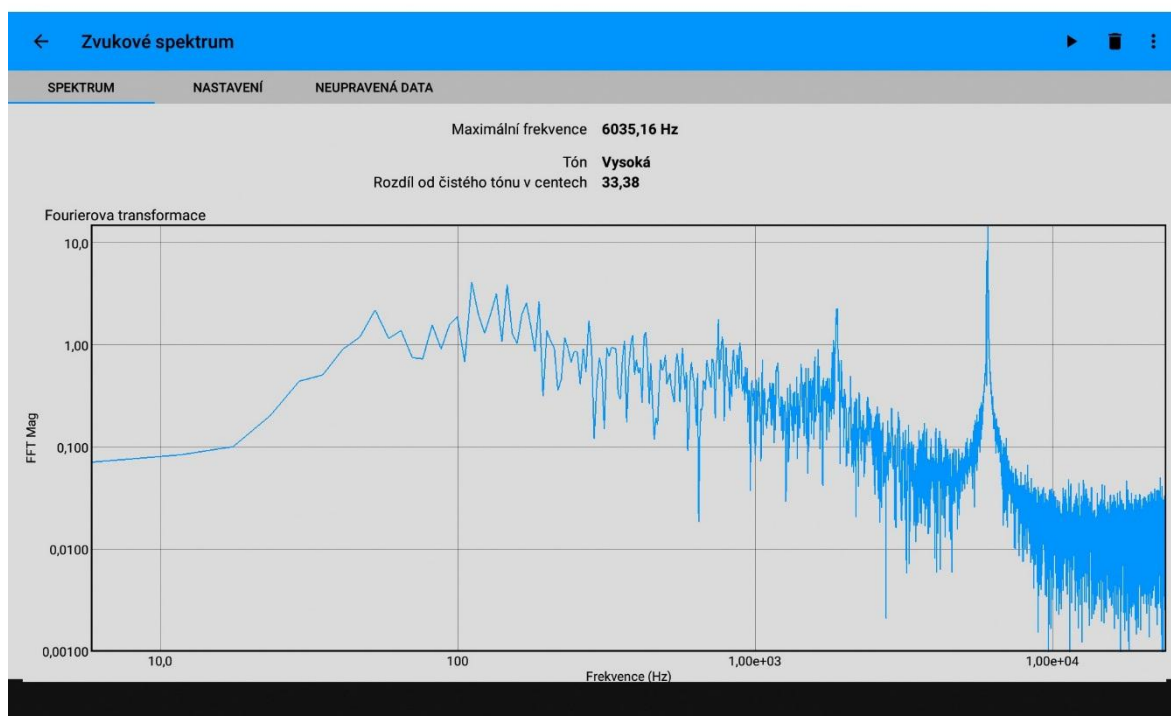
Obrázek 74: Měření frekvence aplikací Advanced Spectrum Analyzer, zapnutý je druhý reproduktor

Pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer jsme určili vyšší frekvenci (tj. frekvenci zaznamenanou, když se zdroj zvuku přibližoval) na 6035 Hz. Na obrázku 74 je tato frekvence

zobrazena fialovým kurzorem. Zaznamenaná frekvence vzdalujícího se zdroje je 5967 Hz a na obrázku je znázorněna zeleným kurzorem.



Obrázek 75: Měření frekvence pomocí Phyphoxu, zapnutý je druhý reproduktor



Obrázek 76: Měření frekvence pomocí Phyphoxu, zapnutý je druhý reproduktor

Na obrázku 75, zaznamenaném aplikací Phypbox, má největší pík frekvenci 5967 Hz. To je frekvence zaznamenaná přijímačem, když se zdroj od něho vzdaloval. Z obrázku 76 můžeme vyčíst, že největší amplitudu má pík o frekvenci 6035 Hz. Vidíme tedy, že zaznamenané frekvence aplikací Phypbox korespondují s těmi určenými pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer. Obě aplikace jsou tedy vhodné k tomuto měření, poněvadž poskytují stejné výsledky. Na základě těchto hodnot a s využitím znalostí o Dopplerově jevu můžeme vypočítat rychlost otáčení disku:

$$u_{21}' = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_1}\right) = 346,6 \cdot \left(1 - \frac{6000}{6035}\right) = 2,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{22}' = v_{\text{zvuk}} \cdot \left(\frac{f_0}{f_2} - 1\right) = 346,6 \cdot \left(\frac{6000}{5965} - 1\right) = 2,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Průměrná rychlost otáčení disku je tedy:

$$u_2' = 2,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

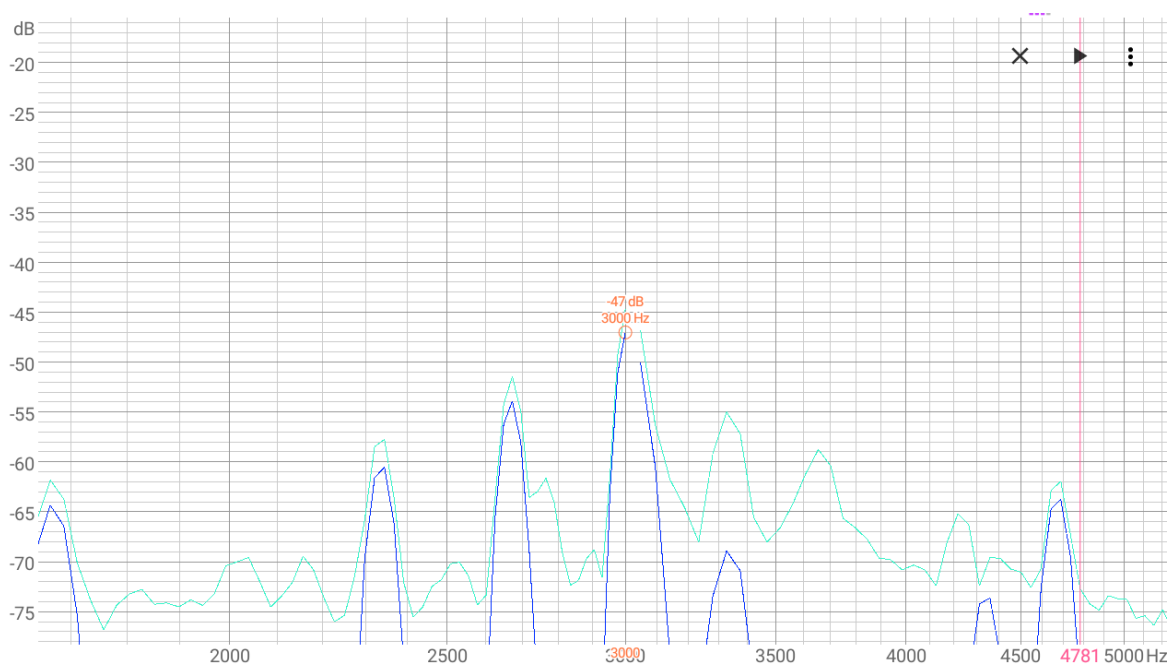
Rychlost otáčení disku jsme také vypočítali pomocí 100 (resp. 50) otáčení za změřenou dobu t . V tomto případě jsme dostali rychlost otáčení disku $2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Relativní chyba měření je tedy:

$$\delta_r = \frac{|u_2' - u_2|}{u_2} \cdot 100 \% = \frac{0,08}{2,1} \cdot 100 \% = 3,8 \%$$

Můžeme tedy konstatovat, že měření s využitím Dopplerova jevu a volně stažitelných aplikací poskytuje spolehlivé výsledky.

b. Zdrojem zvuku je auto ve videu

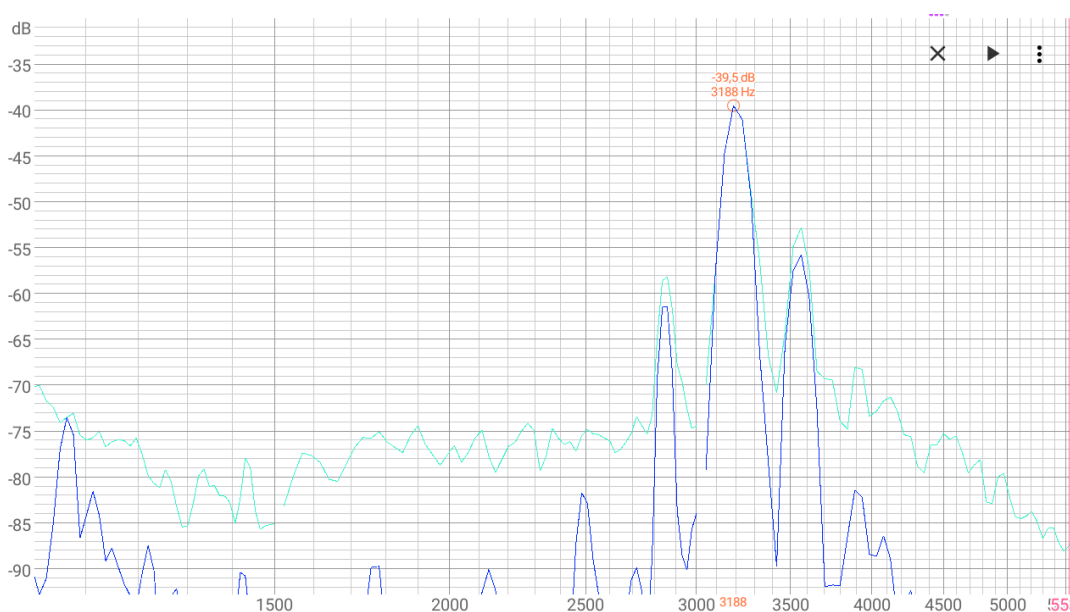
V tomto experimentu jsme si vyzkoušeli změřit rychlost jedoucího auta pomocí Dopplerova jevu. Na videu se vždy zobrazuje, jakou rychlostí auto zrovna jede, můžeme si tedy námi určené výpočty ověřit s tímto údajem. K měření jsme používali aplikaci Spectroid. Všechny obrázky, které uveřejníme v následující části jsou barevně invertovány. Nejprve jsme změřili frekvenci klaksonu stojícího auta (obrázek 77).



Obrázek 77: Frekvence klaksonu stojícího auta

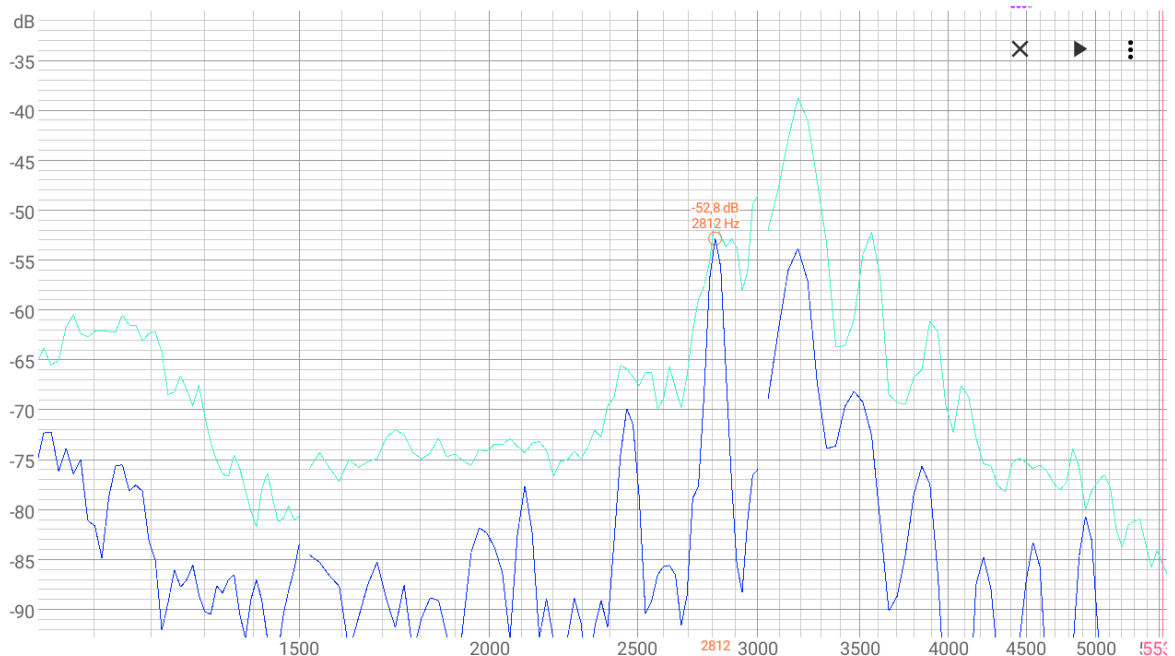
Frekvence stojícího auta patří nejvyššímu zobrazenému píku a její hodnota je tedy 3000 Hz. Ostatní píky nejspíš korespondují okolním zvukům. V dalších experimentech si budeme všimnout, jak se frekvence kolem 3000 Hz změní, když se k nám auto přibližuje nebo se od nás vzdaluje konstantní rychlostí.

První měření jsme provedli pro rychlost auta 70 km/h. Frekvence klaksonu přibližujícího se auta je na obrázku 78.



Obrázek 78: Frekvence klaksonu přibližujícího se auta rychlosti 70 km/h

V tomto případě jsme naměřili frekvenci klaksonu 3188 Hz. Přibližuje-li se k nám auto, zaznameneáme tedy frekvenci vyšší, než je frekvence zdroje. Frekvence klaksonu vzdalujícího se auta můžeme zjistit pomocí obrázku 79.



Obrázek 79: Frekvence klaksonu vzdalujícího se auta rychlosti 70 km/h

Na základě tohoto měření jsme zjistili, že frekvence klaksonu vzdalujícího se auta je 2812 Hz. Frekvence je tedy nižší než frekvence klaksonu v klidu, což odpovídá s teorií popsanou v části 2.8.1. Pomocí naměřených dat můžeme vypočítat rychlost auta:

$$u' = v_{\text{zvuk}} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} = 340 \cdot \frac{3188 - 2812}{3188 + 2812} = 21,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 76,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

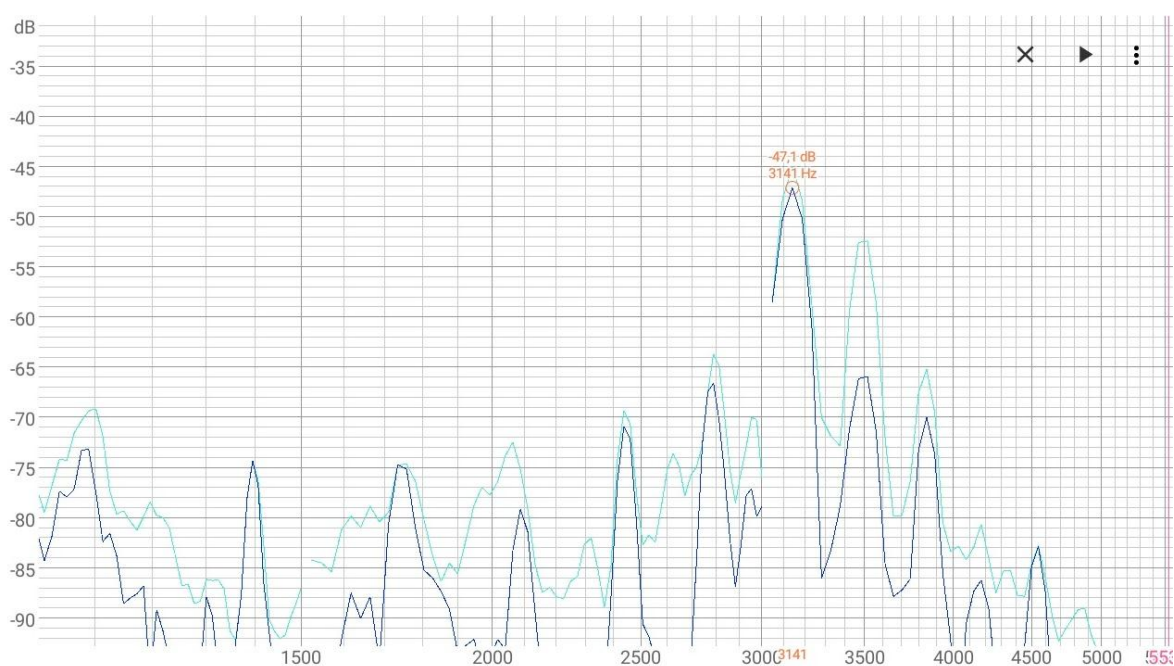
Na základě znalostí Dopplerova jevu jsme určili, že rychlost projíždějícího auta je $76,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Skutečná rychlost je ale podle videa $u = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Relativní chyba měření tedy je:

$$\delta_r = \frac{|u - u'|}{u} \cdot 100 \% = \frac{6,7}{70} \cdot 100 \% = 9,6 \%.$$

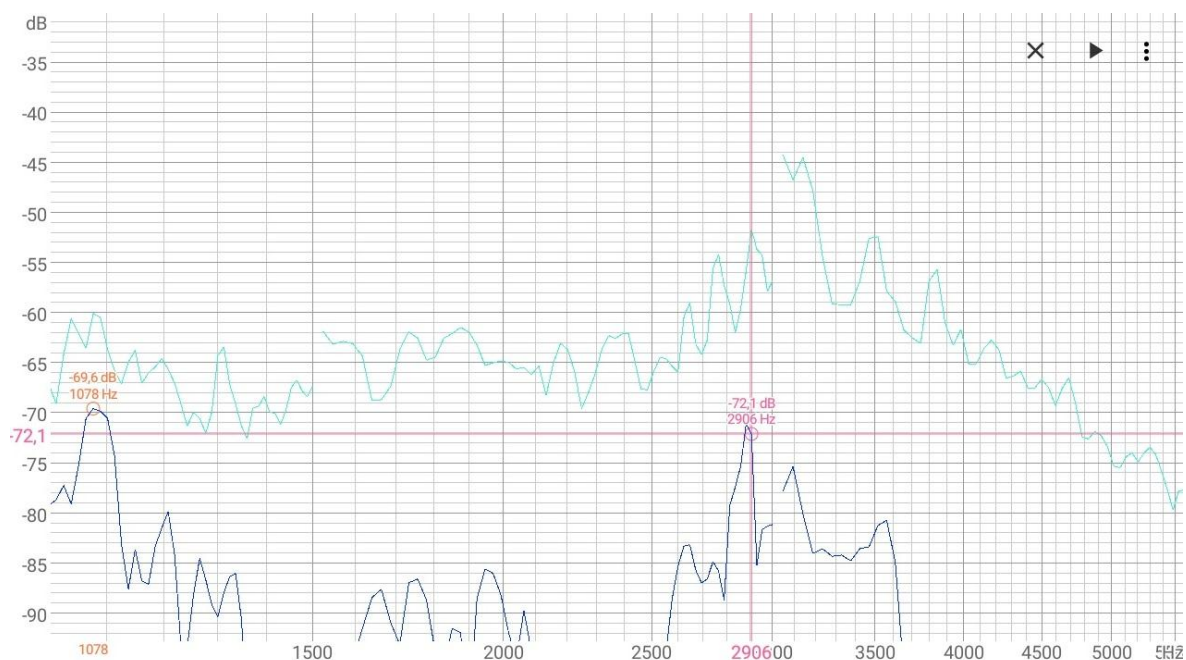
Nutno podotknout, že měření rychlosti pomocí Dopplerova jevu je pouze orientační. Experiment může ovlivnit hned několik faktorů. Jeden z nich může být nesprávné určení rychlosti zvuku ve vzduchu. Ve výpočtech počítáme s hodnotou $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ve videu ale není zapsána teplota prostředí při měření a pro nás je tedy nemožné určit správnou rychlost

zvuku. Dalším faktorem může být proměnlivá rychlost auta. V experimentu počítáme s tím, že auto jede stále stejnou rychlostí. Na základě videa je pro nás ale nemožné zjistit, zda ke kolísání rychlosti nedošlo a zda se auto po celou dobu experimentu pohybovalo konstantní rychlostí. Ovlivnit měření také může frekvence klaksonu, která nemusí být po celou dobu měření přesně 3000 Hz. Vzhledem k těmto nejistotám tedy můžeme považovat náš výsledek za relativně přesný.

Další měření jsme provedli pro rychlost auta $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Na obrázku 80 můžeme vidět, jakou frekvenci klaksonu zaznamenal přijímač, když se k němu zdroj zvuku přibližoval, na obrázku 81 pak když se zdroj vzdaloval.



Obrázek 80: Frekvence klaksonu přibližujícího se auta rychlosti 50 km/h



Obrázek 81: Frekvence klaksonu vzdalujícího se auta rychlosti 50 km/h

Nejvyšší pík na obrázku 80 patří frekvenci 3141 Hz, to je frekvence přibližujícího zdroje. Na obrázku 81 pak vidíme, že frekvence klaksonu vzdalujícího se auta je 2906 Hz. Tmavě modrá hranice ukazuje aktuální spektrum, to je měřené v momentě, když jsme měření pozastavili. Světle modrá hranice ukazuje pak zpětně, kam až dostoupala amplituda příslušné frekvence během měření. K správnému určení nejvyššího píku je tedy vhodné využívat i této informace. Na základě takto naměřených dat můžeme pomocí vztahu 18 opět určit rychlost projíždějícího auta

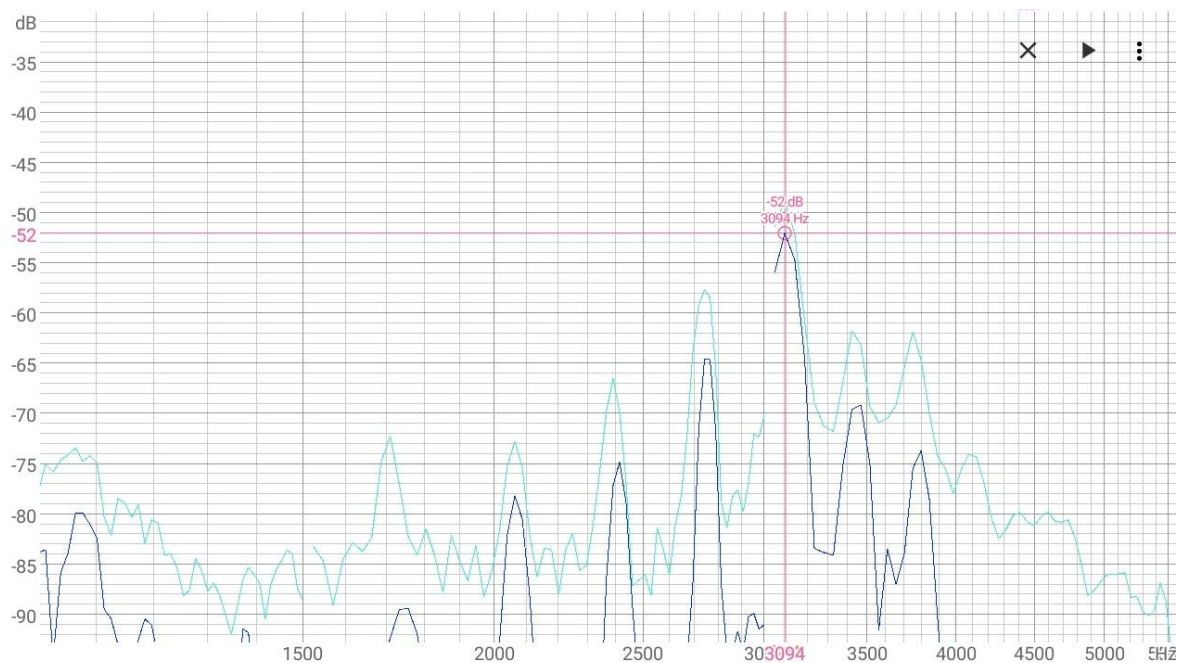
$$u' = v_{\text{zvuk}} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} = 340 \cdot \frac{3141 - 2906}{3141 + 2906} = 13,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 47,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Výpočtem jsme tedy určili rychlost auta na 47,6 km·h⁻¹. Dle videa je ale rychlost auta 50 km·h⁻¹. Relativní chyba měření tedy je:

$$\delta_r = \frac{|u - u'|}{u} \cdot 100 \% = \frac{2,4}{50} \cdot 100 \% = 4,8 \% .$$

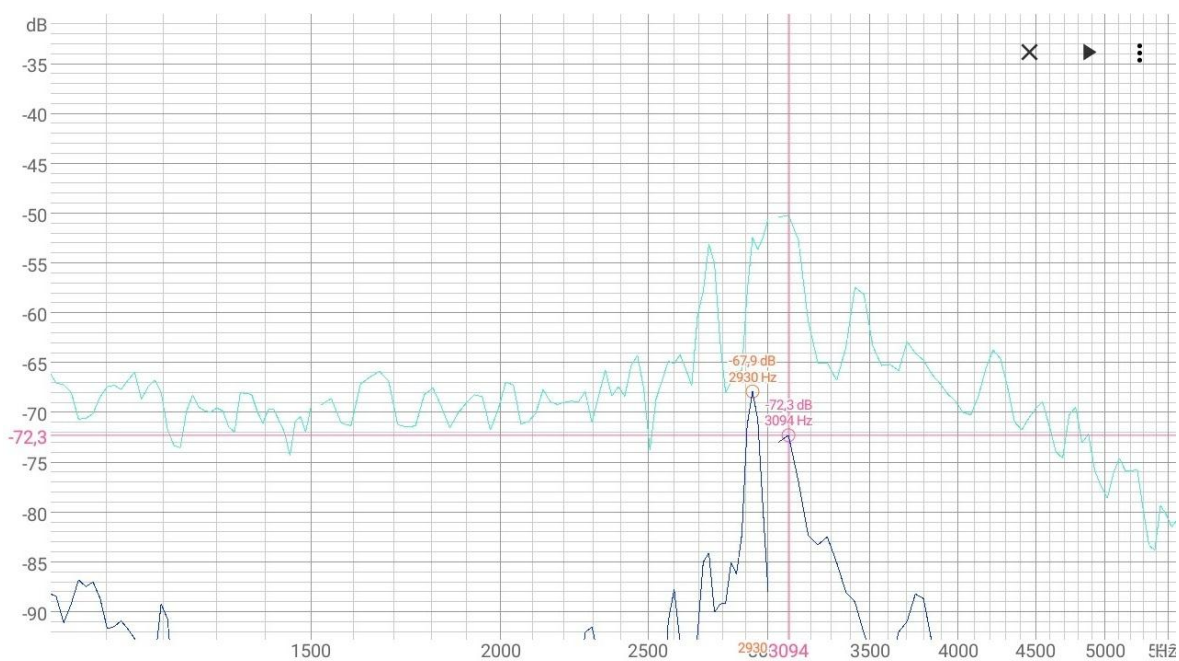
Jelikož nám v prvním případě vyšla rychlost auta větší než ve skutečnosti, kdežto v tomto případě rychlost nižší než ve skutečnosti, nebude rychlost zvuku tím parametrem, který nejvíce ovlivňuje vypočtený výsledek. Hlavním zdrojem nepřesností tak může být kolísání rychlosti auta.

V poslední případě jsme měřili frekvence klaksonu, jestliže se k nám zdroj zvuku přibližuje a vzdaluje rychlostí $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.



Obrázek 82: Frekvence klaksonu přibližujícího se auta rychlosti 30 km/h

Dle obrázku 82 je frekvence klaksonu, který se k nám přibližuje konstantní rychlostí 3094 Hz. Na obrázku 83 pak vidíme frekvenci klaksonu, který se od nás vzdaluje.



Obrázek 83: Frekvence klaksonu vzdalujícího se auta rychlosti 30 km/h

Frekvence vzdalujícího se klaksonu je 2930 Hz. Na základě znalosti Dopplerova jevu vypočítáme rychlost projíždějícího auta:

$$u' = v_{\text{zvuk}} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} = 340 \cdot \frac{3094 - 2930}{3094 + 2930} = 9,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 33,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

V tomto případě je rychlost auta 33,3 km·h⁻¹. Skutečná rychlost auta by ale měla být 30 km·h⁻¹. Relativní chyba měření tedy je:

$$\delta_r = \frac{|u - u'|}{u} \cdot 100 \% = \frac{3,3}{30} \cdot 100 \% = 11 \% .$$

Odchytky měření můžou být způsobeny z různých důvodů, které byly konstatovány již výše. Kromě nepřesného určení frekvence ale může být hlavním důvodem nedodržení konstantní rychlosti auta.

2. 8. 4. Vyhodnocení

V první části jsme měřili rychlost otáčení kotouče pomocí dvou různých telefonních aplikací. Můžeme konstatovat, že měření poskytlo věrohodné výsledky a můžeme tak tedy spolehlivě demonstrovat Dopplerův jev. Výhodou je, že je potřeba využít vyšších frekvencí (několika kHz) a měření tedy neruší běžný hovor ani okolní hluk. Proto by se dalo toto měření využít v rámci laboratorních prací na středních školách. Měření neobsahuje pouze demonstraci Dopplerova jevu, to znamená že uslyšíme periodické změny výšky tónu, ale také zakomponování fyzikálního měření a využití naučených vztahů jak z mechaniky, tak z akustiky. Jedinou komplikací při využití tohoto experimentu je dostupnost pomůcek, kdy takovýto otáčivý disk nemusí být přítomen ve školní sbírce fyzikálních pomůcek. V takovém případě by si ho vyučující musel sám obstarat nebo se uchýlit k měření s pomocí videa.

I tento způsob měření je velice jednoduchý, rychlý a poskytuje spolehlivé výsledky. Také tohoto experimentu by šlo velice jednoduše využít i na středních školách. Výhodou je, že každý žák může provést měření na svém vlastním smartphonu a video si může pouštět několikrát za sebou, dokud nedostane výsledky. Nevýhodou tohoto experimentu ovšem je to, že se zde vytrácí experimentování a studenti pouze "vyhodnocují" data poskytnutá videem. V obou případech měření nemusí sloužit pouze k určení rychlosti pohybu, ale také k dalšímu způsobu výpočtu rychlosti zvuku ve vzduchu.

Závěr

V této práci jsme podrobně popsali 8 akustických experimentů, které můžeme zrealizovat pomocí smartphonu. K těmto měřením jsme na smartphonu využili hlavně senzoru hladiny intenzity zvuku a tónového generátoru.

Nejprve jsme se věnovali studiu rázů, kdy s pomocí smartphonů můžeme jednak zobrazit průběh rázů a využít jej k lepšímu osvojení tohoto tématu, nebo pomocí dalších telefonů různě měnit frekvenci tónů, a tedy i rázů. Dále jsme představili experiment, který vysvětluje princip řádkovacího tunelového mikroskopu na základě akustických znalostí. Analogii mezi tímto mikroskopem a akustickým měřením jsme vysvětlili nejen teoreticky, ale také pomocí jednoduchého a rychlého experimentu, který můžeme různě modifikovat. V dalším měření jsme zmodernizovali klasické měření rychlosti zvuku s Kundtovou trubicí. V této novější verzi jsme k analýze zvuku použili smartphone a místo Kundtovy trubice běžně dostupné pomůcky. Popsali jsme také experiment, díky kterému lze vcelku názorně představit vlastnosti zvuku, a to konkrétně výšku tónu, vyšší harmonické frekvence či barvu tónu. Měření jsme provedli na několika hudebních nástrojích i s pomocí aplikace simulující klavír. S pomocí smartphonu můžeme také měřit hlasitost zvuku v různých prostředích či provést přibližné audiometrické měření, ve kterém lze určit kvalitu sluchu. Následně jsme smartphone použili jako sonar a měřili díky němu vzdálenost předmětů v místnosti. Posledním experimentem je Dopplerův jev, kdy jsme smartphone využili k měření rychlosti projíždějícího auta (na filmovém záznamu) či k rychlosti otáčení desky.

Tato práce může sloužit jako inspirace pro všechny učitele fyziky, kteří by chtěli vyučovat akustiku moderněji a zajímavěji nebo pouze obnovit experimenty, které k tomuto tématu předvádějí. Využití smartphonů může přispět ke zvýšení motivace a zájmu studentů. Všechna měření, které jsme zde popsali, nevyžadují teoretické znalosti nad rámec učiva na středních školách (konkrétně gymnázií). Zároveň jsou všechna měření velice jednoduchá pro realizaci i interpretaci naměřených dat, a tak pro studenty nenáročná. Naším cílem bylo, aby experimenty bylo možné realizovat pouze s běžně dostupnými pomůckami.

Toto téma fyzikálních experimentů proveditelných se smartphonem není touto prací zdaleka vyčerpané. Při rešerši jsme narazili na velké množství dalších experimentů nejen

z části akustiky, ale i z dalších kapitol fyziky. Bylo by proto užitečné vypracovat podobné práce, které by se zabývaly experimenty z oblasti mechaniky, magnetismu či optiky.

Seznam použitých pramenů

- [1] ALLEN, Joshua. Inexpensive Audio Activities: Earbud-based Sound Experiments. *The Physics Teacher*[online]. 2016, **54**(500) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1119/1.4965276. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4965276>
- [2] BAJER, Jiří. *Mechanika*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2006. ISBN 80-244-1293-4.
- [3] BARRERA-GARRIDO, Azael. Analyzing planetary transits with a smartphone. *The Physics Teacher* [online]. 2015, **53**(3) [cit. 2019-04-11]. DOI: 10.1119/1.4908091. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4908091>
- [4] Bílý šum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/B%C3%ADI%C3%BD_%C5%A1um
- [5] Coriolisova síla. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Coriolisova_s%C3%ADla
- [6] DURELLE, Jeremy. A smartphone-based introductory astronomy experiment: Seasons investigation. *The Physics Teacher* [online]. 2017, **55**(2) [cit. 2019-04-11]. DOI: 10.1119/1.4974132. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4974132>
- [7] Echolokace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Echolokace>
- [8] Experiment : Sonar. In: *Phyphox* [online]. RWTH Aachen University: 2nd Institute of Physics, 2016 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: https://phyphox.org/wiki/index.php?title=Experiment:_Sonar
- [9] Euler, Manfred. (2014). Getting in touch with the nanoworld: Hands-on experiments and models to visualize nanoscale structures. 10.13140/2.1.1728.2881.
- [10] Experiment: Audio Amplitude. In: *Phyphox* [online]. Aachen, 2017 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://phyphox.org/wiki/index.php?title=Experiment:_Audio_Amplitude

- [11] Experiment: Audio Spectrum. In: *Phyphox* [online]. Aachen, 2017 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://phyphox.org/wiki/index.php?title=Experiment:_Audio_Spectrum
- [12] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady*. 2. vydání. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1642-9.
- [13] GIORDANO, Nicholas J. *Physics of the piano*. Oxford: Oxford University Press, 2010. ISBN 978-0-19-954602-2.
- [14] GRÖBER, Sebastian. Using smartphones and tablet PCs for β -spectroscopy in an educational experimental setup. *European Journal of Physics* [online]. 2014, **35**(6) [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/35/6/065001/meta>
- [15] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [16] HAWLEY, Scott H. Visualizing Sound Directivity via Smartphone Sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2016, **140**(4) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1121/1.4969250. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/310756836_Visualizing_Sound_Directivity_via_Smartphone_Sensors
- [17] HELLESUND, Simen. Measuring the speed of sound in air using a smartphone and a cardboard tube. *Physics Education* [online]. 2019, **54**(3) [cit. 2019-04-13].
- [18] Helmholtz resonance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance
- [19] Hluk ve školách – Česká republika. In: *BOZP info* [online]. Praha, 2006 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/hluk-ve-skolach-ceska-republika>
- [20] HOCHBERG, Katrin. Using Smartphones as Experimental Tools—Effects on Interest, Curiosity, and Learning in Physics Education. *Journal of Science Education and Technology* [online]. 2018, **27**(5), 385-403 [cit. 2019-04-02].

Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10956-018-9731-7>

- [21] CHROUST, Martin. Smartphony mají 19 smyslů. Znáte je všechny?. In: *Mobilmania.cz* [online]. Czech News Center, 2015 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.mobilmania.cz/clanky/smartphony-maji-19-smyslu-znate-je-vsechny/sc-3-a-1329584/default.aspx#articleStart>
- [22] KAPUCU, Serkan. A simple experiment to measure the maximum coefficient of static friction with a smartphone. *Physics Education* [online]. 2018, **53**(5) [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aad0da/meta>
- [23] KARABEY, Burak. Discovering complementary colors from the perspective of steam education. *Physics Education* [online]. 2018, **53**(035001) [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa97bf>
- [24] KILIÁN, Karel. Co umí senzory chytrých telefonů? Experimentujte s aplikací phyphox. In: *Svět androida* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.svetandroida.cz/co-umi-senzory-chytrych-telefonu-aplikace-phyphox/>
- [25] Klein, Pascal & Hirth, Michael & Gröber, S & Kuhn, Jochen & Müller, Andreas. (2014). Classical experiments revisited: Smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics. *Physics Education*. 49. 412. 10.1088/0031-9120/49/4/412.
- [26] Kundtova trubice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kundtova_trubice
- [27] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2009. ISBN 978-80-7196-387-5.
- [28] Lessons. In: *Physics Toolbox Apps by Vieyra Software* [online]. 2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.vieyrasoftware.net/browse-lessons>
- [29] LINCOLN, James. Five smartphone experiments that don't need apps. *The Physics Teacher* [online]. 2018, **56**(652) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1119/1.5080595. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.5080595>

- [30] LOTH, Matthew. Stable and Unstable Rotational Dynamics of a Smartphone. *The Physics Teacher* [online]. 2017, **55**(7) [cit. 2019-04-09]. DOI: 10.1119/1.5003747. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.5003747>
- [31] MAZZELLA, Alessandra. An investigation into the effectiveness of smartphone experiments on students' conceptual knowledge about acceleration. *Physics Education* [online]. **51**(5) [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/51/5/055010/meta>
- [32] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1995. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 80-85849-84-4.
- [33] Measuring the speed of sound in air using smartphone applications. In: *IOP science* [online]. Nigde, Turkey, 2015, 23 April 2015 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/50/3/281/pdf>
- [34] MONTEIRO, Martín. A bottle of tea as a universal Helmholtz resonator. *The Physics Teacher* [online]. 2018, **56**(9) [cit. 2019-04-11]. DOI: 10.1119/1.5080589. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.5080589>
- [35] Nařízení č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-272-2011-sb-o-ochrane-zdravi-pred-nepriznivymi-ucinky-hluku-a-vibraci>
- [36] NAYAK, Jogendra Kumar. Relationship among smartphone usage, addiction, academic performance and the moderating role of gender: A study of higher education students in India. *Computers & Education* [online]. 2018, **123**, 164-173 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326744904_Relationship_among_smartphone_usage_addiction_academic_performance_and_the_moderating_role_of_gender_A_study_of_higher_education_students_in_India
- [37] Novak, G., Gavrin, A., Christian, W., & Patterson, E. (1999). *Just-In-Time Teaching: Blending Active Learning with Web Technology*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley
- [38] OSORIO. Measuring and characterizing beat phenomena with a smartphone. *European Journal of Physics* [online]. 2018, **39**(2) [cit. 2019-02-

- 17]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/aa9034/meta>
- [39] Piano key frequencies. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies
- [40] PILI, Unofre. A simple pendulum-based measurement of g with a smartphone light sensor. *Physics Education* [online]. 2018, **53**(4) [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aaab9c/meta>
- [41] PILI, Unofre. Measuring average angular velocity with a smartphone magnetic field sensor. *The physics teacher* [online]. 2018, **56**(114) [cit. 2019-04-09]. DOI: 10.1119/1.5021442. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.5021442>
- [42] PILI, Unofre. Measurement of g using a magnetic pendulum and a smartphone magnetometer. *The Physics Teacher* [online]. 2018, **56**(258) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1119/1.5028247. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/pdf/10.1119/1.5028247?class=pdf>
- [43] RAMOS SILVA, Manuela. Studying cooling curves with a smartphone. *The Physics Teacher* [online]. 2018, **56**(1) [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1119/1.5018696. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.5018696>
- [44] Rázy. In: *FyzWeb* [online]. Praha [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/RAZY/POPIS.HTM>
- [45] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Použití ultrazvuku In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2019 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/212-pouziti-ultrazvuku>
- [46] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. ***Rázy. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/181-razy>
- [47] SEPTIANTO, R. D. Utilisation of the magnetic sensor in a smartphone for facile magnetostatics experiment: magnetic field due to electrical current in straight and loop wires. *Physics Education*[online]. 2016, **52**(1) [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/52/1/015015/meta>

- [48] Schematische Darstellung des Kundtschen Rohres mit Schallschnelle-Verteilung. Das Korkmehl sammelt sich an den Knotenpunkten der stehenden Welle. In: *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019, 19 August 2008 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Kundtsches_Staubrohr#/media/File:Kundt%27s_tube_DE.svg
- [49] Strategie digitálního vzdělávání do roku 2020. In: *Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy* [online]. Praha: MŠMT, 2014 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: http://www.vzdelavani2020.cz/images_obsah/dokumenty/strategie/digistrategie.pdf
- [50] Strategie digitálního vzdělávání do roku 2020. In: *Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy* [online]. Praha, 2013 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.msmt.cz/ministerstvo/strategie-digitalniho-vzdelavani-do-roku-2020>
- [51] Tunelový jev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98%C3%A1dkovac%C3%AD_tunelov%C3%BD_mikroskop
- [52] Scanning tunneling microscope. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope
- [53] SHAKUR, Asif. Measurement of Coriolis Acceleration with a Smartphone. *The Physics Teacher* [online]. 2016, **54**(5) [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1119/1.4947157. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4947157>
- [54] SOBRAL, Sobral. Development of a metal detector for smartphones and its use in the teaching laboratory. *Physics Education* [online]. 2018, **53**(4) [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aabb08/meta>
- [55] Smartphones in Science Teaching iStage 2. In: *Science on stage* [online]. Berlin, 2014 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://www.science-on-stage.eu/images/download/iStage_2_Smartphones_in_Science_Teaching.pdf

- [56] Sound : Beats. *Physics Toolbox Apps* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: https://docs.google.com/document/d/16UJjThoOEFV7IXfE3hpRJDIGR45oSfS_Vt4ubwS7wmR0/edit
- [57] STAACKS, S. Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education* [online]. 2018, **53**(4) [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e/meta>
- [58] STAACKS, Sebastian. Simple Time-of-Flight Measurement of the Speed of Sound Using Smartphones. *The Physics Teacher* [online]. 2019, **57**(112) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1119/1.5088474. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/author/Staacks%2C+Sebastian>
- [59] Thees, Michael & Hochberg, Katrin & Kuhn, Jochen & Aeschlimann, Martin. (2017). Adaptation of acoustic model experiments of STM via smartphones and tablets. *The Physics Teacher*. 55. 436-437. 10.1119/1.5003749.
- [60] TRONICKE, Jens. Classroom-sized geophysical experiments: magnetic surveying using modern smartphone devices. *European Journal of Physics* [online]. 2018, **39**(3) [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/aaad5b/meta>
- [61] Tunelový jev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tunelov%C3%BD_jev
- [62] UNDERWOOD, Bret. Moving Phones Tick Slower: Creating an Android App to Demonstrate Time Dilation. *The Physics Teacher* [online]. 2016, **54**(5) [cit. 2019-04-11]. DOI: 10.1119/1.4947154. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4947154>
- [63] VANDERMARLIÈRE, Julien. On the inflation of a rubber ballooon. *The Physics Teacher* [online]. 2016, **54**(566) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1119/1.4967901. Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.4967901?journalCode=pte>
- [64] VOGELOVÁ, Olga. *Fyzika klavíru*. Olomouc, 2017. Bakalářská práce. Univerzita Palackého Olomouc. Vedoucí práce Mgr. Lukáš Richterek, Ph.D.
- [65] What do we mean by BYOD?. In: *Future Classroom Lab* [online]. Brussel, 2019 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://fcl.eun.org/cs/byod-meaning>

- [66] Základní tónová řada, půltón, celý tón. In: *ROSeGUITAR* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://roseguitar.wz.cz/tonrada.html>