



Středoškolská technika 2023

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Rubensova trubice

Anna Bohuňková

Gymnázium Botičská

Botičská 1, Praha 2

Anotace

Cílem mé práce bylo sestavení Rubensovy trubice a následný výpočet rychlosti šíření zvuku v Rubensově trubici. Naměřené hodnoty jsem zpracovala v tabulkovém editoru a porovnávala je s dostupnými hodnotami na internetu. Práce je doplněna fotografiemi z konstruování i měření. Popisuji zde přený postup konstruování trubice, která může posloužit jako výuková pomůcka k demonstrování stojatého vlnění.

Obsah

Úvod	6
Přehled literatury	7
Zvuk	7
Vlastnosti zvuku	7
Mechanické vlnění	8
Vlnová délka	8
Interference vlnění.....	10
Stojaté vlnění	11
Historie pokusu	12
Metodika	13
Pomůcky	13
Postup práce.....	14
Sestavování Rubensovy trubice	14
Postup měření.....	15
Zpracování výsledků	15
Výsledky a diskuse.....	16
Konstruování	16
Měření.....	16
Výpočet rychlosti šíření zvuku.....	17
Závěr	19
Seznam literatury	20

Úvod

Rubensova trubice je velmi efektní pokus, díky kterému můžeme zvuk nejenom slyšet, ale také vidět. Znázorňuje nám akustickou vlnu stojatého vlnění a z těchto důvodů by mohla posloužit jako školní pomůcka. Pokus mě na internetu zaujal, a protože mám ráda kreativní činnosti, chtěla bych si vyzkoušet, jak náročné sestavení Rubensovy trubice je. Následně bych v ní ráda spočítala rychlost šíření zvuku. Práce pro mě bude výzvou, protože mám respekt z ohnivých pokusů.

Přehled literatury

Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí, které je člověk schopný vnímat sluchem. Frekvenční rozsah je 20 až 20 000 kmitů za sekundu. Frekvence nižší než 20 Hz nazýváme infrazvuk a frekvence nad 20 000 Hz se nazývají ultrazvuk. Zvuk se nešíří pouze ve vaku, v plynech, kapalinách i pevných látkách se zvuk šíří. Místa, ve kterých vzniká stojaté vlnění neboli chvění, které se přenáší do okolního prostředí nazýváme **zdroje zvuků**. Zdroji zvuku mohou být např. blány, struny a tyče.

Podle průběhu zvuku v čase dělíme zvuky na hudební zvuky neboli tóny a nehudební zvuky neboli hluky. Tóny mají periodický průběh, zatímco hluky mají průběh neperiodický. (1) (2)

Vlastnosti zvuku

Barva

Barva zvuku je určena počtem vyšších harmonických tónů, což jsou tóny, které zní společně s tónem základním. Podle počtu a intenzity harmonických tónů vzniká výsledná barva. Díky barvě zvuku jsme schopni sluchem rozeznat různé hudební nástroje i hlasy lidí. První harmonický tón má dvakrát vyšší frekvenci než základní harmonický tón. (2) (1)

Výška

Výška zvuku je dána jeho frekvencí. Čím vyšší frekvence, tím vyšší výška tónu. Absolutní výška tónu lze sluchem určit velmi obtížně, proto je pro subjektivní hodnocení zvuků důležitější relativní výška tónu. Ta se udává podílem frekvence daného tónu k určité frekvenci základní tzv. referenčního tónu. V hudbě je referenčním tónem komorní a^1 , jehož frekvence je 440 Hz v technické praxi se používá referenční kmitočet 1 kHz. (1) (2)

Hlasitost a intenzita zvuku

Hlasitost zvuku je daná amplitudou. Zvuková vlna, která se šíří různými prostředími, periodicky stlačuje a rozpíná dané prostředí a dochází tak ke změně atmosférického tlaku, díky čemuž jsme schopni rozeznat hlasitost tónů. Veličina, která vyjadřuje, jak silně působí zvuk na sluch, nazýváme **hlasitost zvuku**. Jednotkou je Ph (fón), ale jedná se subjektivní veličinu a z tohoto důvodu byla zavedena veličina **intenzita zvuku** I . Je definována vztahem $I = \frac{P}{S}$, kde P je výkon zvukového vlnění a S je plocha, kterou se vlnění (kolmo) šíří. Jednotkou intenzity zvuku je $W \cdot m^{-2}$. Intenzita zvuku $10^{-12} W \cdot m^{-2}$ je nejnižší možná slyšitelná intenzita

a nazýváme ji práh slyšení. Naopak hodnoty nad $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ mohou v uchu vyvolat bolesti, proto tuto intenzitu nazýváme práh bolesti. Protože je poměr prahu bolesti a prahu slyšení velký, vyjadřuje se tento poměr v logaritmické stupnici. Zavádíme proto novou veličinu **hladina intenzity zvuku** L (dB), proto kterou platí vztah $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$, kde I je intenzita zvuku a I_0 je intenzita prahu slyšení. V této stupnici odpovídá prahu slyšení 0 dB a prahu bolesti 120 dB. (3) (1) (4)

Mechanické vlnění

Mechanické vlnění je děj, při kterém se kmitavý pohyb šíří pružným lákovým prostředím. Aby v prostředí mohlo docházet k mechanickému vlnění, musí být tvořené velkým množstvím částic, mezi kterými existuje vazba. Při mechanickém vlnění se přenáší pouze energie, ale částice se v prostoru nepřemisťují, kmitají jen kolem rovnovážných poloh. Výjimkou je stojaté vlnění. (4) (5)

Hmotný objekt či element prostředí, ze kterého se vlnění šíří nazýváme **zdroj vlnění**. Přenosem kmitáním mezi částicemi se vytváří vlna. Základní veličiny, které charakterizují vlnění jsou frekvence, perioda a amplituda. (2)

Frekvence

Frekvence f [Hz], též kmitočet je fyzikální veličina, která udává počet kmitů/opakování za jednotku času.

Perioda

Perioda T [s] je fyzikální veličina vyjadřující dobu jednoho opakování vlny/kmitu. Po uplynutí periody se průběh kmitání opakuje. Mezi frekvencí a periodou platí následující vztah: $f = \frac{1}{T}$

Amplituda

Amplituda y [m] je maximální výchylka od rovnovážné polohy.

Vlnová délka

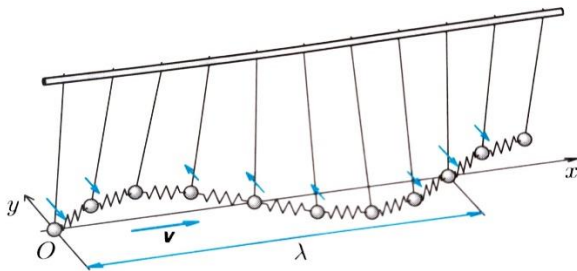
Vlnová délka λ [m] je nejmenší vzdálenost mezi dvěma body, u kterých je ve stejném časovém okamžiku stejný akustický stav neboli nejmenší vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za dobu jedné periody. Pro vlnovou délku platí vztah: $\lambda = v * T$, kde v je rychlost šíření vlnění a T perioda.

Setkat se můžeme také s vyjádřením $\lambda = \frac{c}{f}$, kde c je rychlost šíření zvuku, které se liší v závislosti na prostředí. Ve vzduchu se zvuk šíří rychlostí zhruba 340 m/s, ve vodě je rychlost

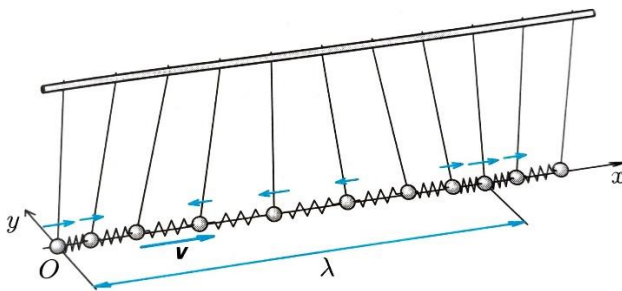
výrazně vyšší, tj. asi 1440 m/s. Ze vzorce vyplývá, že čím vyšší frekvence, tím menší vlnová délka. (2) (1)

Vlnění dělíme do několika skupin. Podle orientace výchylky ke směru šíření rozlišujeme dva typy vlnění, a to vlnění podélné a vlnění příčné.

Podélné vlnění je charakteristické tím, že částice kmitají ve směru šíření vlnění. Vzniká ve všech typech skupenství. Postupným podélným vlněním se v pružných látkách šíří třeba zvuk. U **příčného vlnění** kmitají částice kolmo ke směru šíření. Tělesa jsou pružná a pevná např. tyče, vlákna a vodní hladina. (2) (6)



Obrázek 1 příčné vlnění (6)



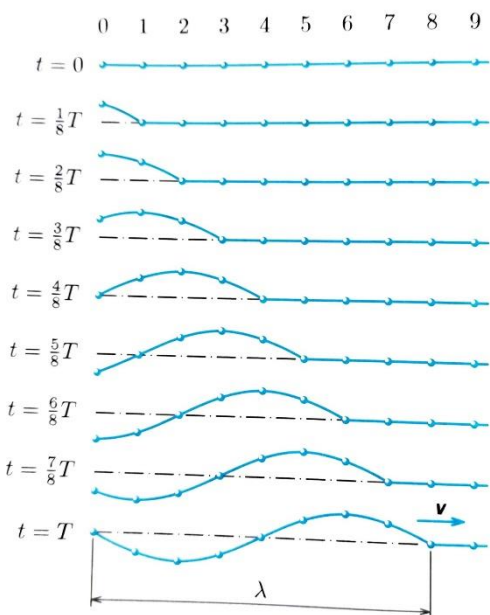
Obrázek 2 podélné vlnění (6)

Dále rozlišujeme vlnění podle typu šíření na vlnění postupné a stojaté.

Postupné vlnění

U postupného vlnění se kmitání částic postupně přenáší do vzdálenějších bodů od zdroje. Protože se výchylka v čase mění, zavádíme rovnici postupné vlny pro výpočet okamžité výchylky y daného bodu v prostředí v čase t a vzdálenosti x od zdroje vlnění:

$$y = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \text{ kde } y_m \text{ je amplituda, } T \text{ perioda a } \lambda \text{ je vlnová délka. (2) (5)}$$

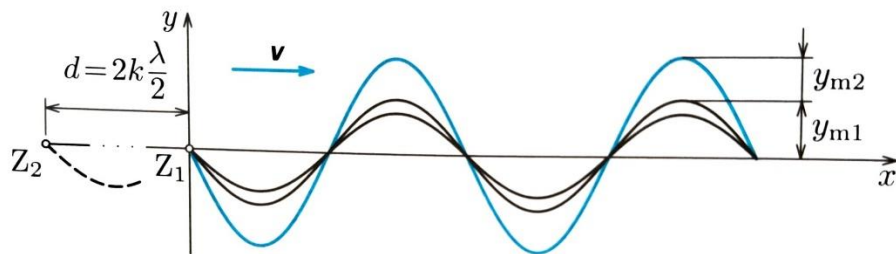


Obrázek 3 vznik postupného vlnění v řadě bodů (6)

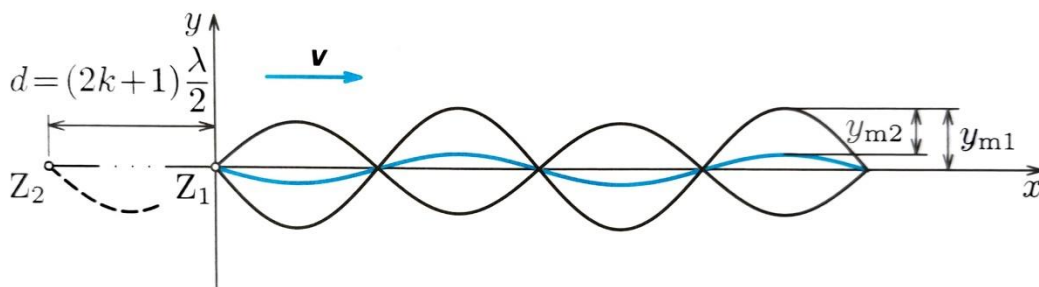
Interference vlnění

Pokud se prostředím šíří dvě či více mechanických vln, dochází k interferenci neboli superpozici či česky skládání vln. Ta se díky principu superpozice mohou zesilovat, zeslabovat nebo úplně rušit. Výsledná amplituda dvou harmonických vlnění závisí na dráhovém rozdílu d . Dráhový rozdíl je vzdálenost dvou bodů, ve kterých mají vlnění stejnou fázi. Veličina přímo úměrná dráhovému rozdílu se nazývá fázový rozdíl $\Delta\phi$.

Pokud je dráhový rozdíl roven celému počtu půlvln, nastává jeden z následujících dvou případů/jevů/situací. **Interferenční maximum** nastává v případě, že dráhový rozdíl je roven sudému násobku půl vln $d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda$. Když je dráhový rozdíl roven lichému násobku půl vln nastává **interferenční minimum** $d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0, 1, 2, \dots$ (2) (5) (7) (8)



Obrázek 4 vznik interferenčního maxima (6)



Obrázek 5 vznik interferenčního minima (6)

Stojaté vlnění

Stojaté vlnění (neboli chvění) vzniká interferencí dvou vln (nejčastěji vlny přímé a vlny odražené), které mají stejnou frekvenci a jsou k sobě opačné. Pokud jsou amplitudy vln různé, hovoříme o **částečném stojatém vlnění**. V případě, že jsou amplitudy vln stejné, nastane tzv. **úplné stojaté vlnění**. (1)

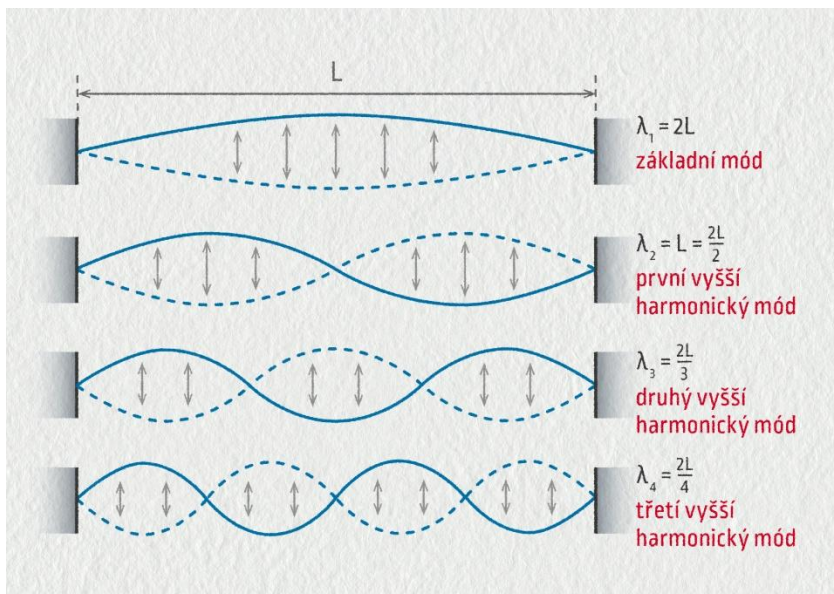
U stojatého vlnění vznikají místa s největší amplitudou tzv. **kmitny** a místa, která zůstávají ve všech fázích periody v klidu nazýváme **uzly**. Kmitny a uzly jsou od sebe vzdálené $\frac{1}{2}\lambda$ a kmitna je od uzlu vzdálená $\frac{1}{4}\lambda$.

Se stojatým vlněním se můžeme setkat např. u hudebních nástrojů. Příčné stojaté vlnění je typické pro strunné nástroje a v dechových nástrojích vzniká podélné stojaté vlnění, které označujeme jako chvění. (6)

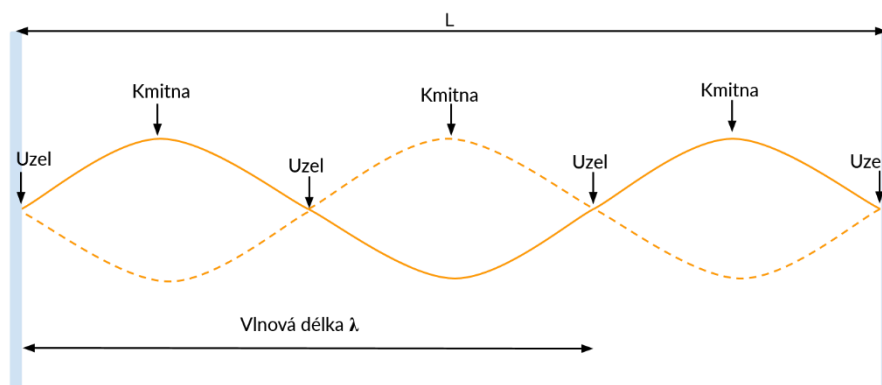
U stojatého vlnění se energie nepřenáší, ale pouze přeměňuje z kinetické na potenciální a obráceně.

Nejčastěji se s tímto typem vlnění setkáváme u těles, kterými vlnění postupuje a na jejíž koncích se následně odráží. Ve způsobu odrazu mohou nastat dvě možnosti. Aby se vlna odrazila s opačnou fází, musí se odrazit od pevného konce. Ten se nemá jak rozkmitat, a proto vzniká síla, která způsobí výchylku vlákna v opačném směru. Na volném konci nastává odraz se stejnou fází a na konci struny vzniká kmitna. (5) (1) (2) (8) (9)

Pokud v tělese postupuje vlnění a na jeho konci se odráží, tak se odražené vlnění začne skládat s vlněním postupným a vzniká chvění. Pokud bude splněna podmínka $l = k\frac{\lambda}{2}$, kde l je délka a $k = 1, 2, 3, \dots$ mohou následně vznikat další stojaté vlny. Frekvence kde k je větší než 1 nazýváme vyšší harmonické. (6)



Obrázek 6 vyšší harmonické (10)



Obrázek 7 stojaté vlnění (11)

Na obrázku 7 je písmenem L značena základní harmonická vlna stojatého vlnění. Plná čára je vlna hlavní a přerušovaná značí odraženou vlnu.

Historie pokusu

Heinrich Rubens byl německý fyzik, který v roce 1905 sestavil plamenovou trubici a navázal tak na svého učitele Augusta Kundta, který v roce 1866 sestavil přístroj na měření rychlosti zvuku v plynech. Kundtova trubice byla skleněná, zhruba 1 metr dlouhá a na obou koncích měla píсты. Pohyblivý píst byl určen k ladění a na druhé straně byla rezonanční tyč s pístem. Uvnitř byla trubice vyplněna granulárním materiálem (drť z korků či výtrusy plavuně).

Rubensova trubice byla dlouhá čtyři metry, s počtem asi 100 otvorů o průměru 2 mm, které byly vyvrtané po celé délce. Z jedné strany byl přiváděn do trubice plyn a z druhého konce zvuk. (3) (12)

Metodika

Cílem mé práce bylo sestavení Rubensovy trubice, na které jsem demonstrovala akustický tlak stojatého vlnění, a ověření její funkčnosti pomocí naměřených hodnot, které jsem porovnávala s dostupnými hodnotami.

V této kapitole popíšu pomůcky, které jsem k sestavení Rubensovy trubice použila důvodu a postup práce, podle kterého jsem trubici sestavovala. Popíšu zde i postup měření.

Výstupem mé práce bude především samotné sestavení Rubensovy trubice, které bude doloženo její fotodokumentací a tabulka naměřených hodnot.

Pomůcky

1. Ocelová trubka pozinkovaná – rozměry: průměr 6 cm, délka 2 metry
2. Reproduktor JBL Flip Essential
3. Frequency Generator – aplikace na frekvence
4. Propanbutanová lahev – 2 kg
5. Regulátor na plynovou bombu
6. Hadice na plyn
7. Stahovací spona
8. Tmelovací pistole s tmelem – kamnářský tmel Soudal 280 ml
9. Lepicí páska – papírová + průhledná
10. Důlčík
11. Svěrák
12. Vrták o průměru 1,5 mm
13. Posuvné měřítko
14. Kladivo
15. Dřevěná deska – tloušťka přibližně 2 cm
16. Vrtačka
17. Pilník
18. Pásová pila
19. Balonek
20. Metr, pravítko
21. Tužka

Postup práce

Sestavování Rubensovy trubice

Na ocelovou trubku o délce 2 metry a průměru 6 cm jsem nalepila papírovou lepicí pásku a dočasně ji upevnila do svěraku. Průměr trubky jsem zvolila podle průměru reproduktoru. Na lepicí pásce jsem vyznačila tužkou body vzdálené 1,5 cm. Od každého okraje jsem nechala zhruba 20 cm trubky bez děr z důvodu bezpečnosti reproduktoru a propanbutanové lahve. Důlčíkem jsem do všech vyznačených bodů udělala důlek, protože se mi s vrtačkou následně lépe pracovalo. Do těchto děr jsem vsadila vrták a vyvrtala otvory o průměru 1,5 mm. Lepicí pásku jsem odlepila. Do dřevěného prkna, tlustého přibližně 2 cm, jsem pomocí kulatého pilovitého nástavce vyvrtala kolečko o průměru 5 cm. Do středu dřevěného kolečka jsem vyvrtala vrtákem díru, kterou jsem následně ještě lehce zbrousila, protože největší vrták neodpovídal průměru hadice a hadici by nebylo možné otvorem protáhnout. Musela jsem z tohoto důvodu lehce zbrousit i hadici, kterou jsme poté do vyvrtaného středu vložila. Využila jsem lehkého zaoblení trubice na jednom konci a kus dřeva jsem pomocí železné tyče prostrčila přes druhý konec až do úplného konce trubice. Tento konec jsem ještě zajistila tmelem, abych zamezila úniku vzduchu. Na propanbutanovou lahev jsem připevnila kohout. Druhý konec trubice jsem nejprve oblepila lepicí páskou, protože jsem nevěděla, jak moc může být trubice po zapálení horká a nerada bych balonek nějak poničila. Na konec trubice jsem natáhla gumový balonek, abych zabránila přístupu vzduchu a upevnili ho lepicí páskou k trubici. Snažila jsem se blánu hodně natáhnout, aby vedla zvukové vlny co nejlépe. Ještě před natažením balonku jsem konec pilníkem lehce zbrousila, protože byl poměrně ostrý. Reproduktor jsem vložila přímo za blánu. Trubici jsem umístila na místo bez průvanu. Povolila jsem kohout u trubice, vedoucí z propanbutanové lahve, a pustila do ní Rubensovy trubice plyn. Pomocí sirek jsem unikající plyn zapálila a z druhé strany trubice jsem z reproduktoru pustila zvuk.



Obrázek 8 vrtání otvorů



Obrázek 9 druhý konec s balonkem

Postup měření

Do Rubensovy trubice jsem přes reproduktor pouštěla jednotlivé frekvence. Používala jsem aplikaci Frequency Generator. Podle frekvence tónu se mi měnila vlnová délka. Vzdálenost minim jsem změřila metrem, ale tato vzdálenost odpovídá polovině vlnové délky, proto jsem musela naměřené hodnoty dvakrát vynásobit.

Zpracování výsledků

Díky frekvenci a jí naměřené vlnové délce jsem si pomocí vzorce $\lambda = \frac{c}{f}$ dopočetla rychlost šíření zvuku. Vypočítanou průměrnou hodnotu jsem následně porovнала s dostupnými hodnotami na internetu.

Výsledky a diskuse

Konstruování

Protože jsem chtěla, aby byly vlnové délky dobře vidět, zvolila jsem 2metrovou trubici. Tento rozměr se mi vyplatil, protože některé frekvence měli velkou vlnovou délku a na menším rozměru by nebyla vidět. Průměr trubice byl zvolen podle průměru reproduktoru, který bych do trubice zatmelila v případě, že by Rubensova trubice nebyla funkční s pružnou membránou.

Konec s balonkem mi několikrát prasknul. Bylo to způsobeno pravděpodobně stářím balonku a také ostrotí hrany. Balonek se protrhl v místě hrany, a tak jsem ji dodatečně lehce zbrousila pilníkem.

Protože jsem pracovala s hořlavým plynem a ohněm, dbala jsem po celou dobu na bezpečnost. Rubensovu trubici jsem proto zapalovala poprvé venku a nasadila jsem so ochranný štít. Bylo téměř bezvětří, ale plameny nehořely po celé délce trubice. Všimla jsem si, že netěsní hadice u bomby a část plynu proto uniká. Snažila jsem se hadici utáhnout provázkem, ale ke zlepšení nedošlo. Když se plamínky neobjevily po celé délce trubice ani ve vnitřních prostorách, bombu jsem se rozhodla vyměnit. Původní bomba byla malá (objem 410 ml, 220 g) a tím pádem nebylo pravděpodobně možné pustit do trubice dostatečné množství plynu, které by se rozhořelo rovnoměrně po celé délce trubice. Zároveň původní bomba obsahovala směs butan propanu (70% butan a 30% propan), což způsobilo usazování části plynu na dně trubice, protože butan se oproti propanu usazuje více a je také stabilnější.

Po výměně butan propanové bomby za směs propan butanu a zvětšení velikosti se plamínky objevily nad všemi vyvrtanými otvory, avšak bylo i tak znatelné, že síla plamene se vzdáleností od konce s plynem postupně slábne. Abych zamezila jakémukoliv úniku plynu mimo trubici, použila jsem na hadici stahovací sponu.

Měření

Potupně jsem do trubice pouštěla jednotlivé frekvence a měřila jim odpovídající vlnové délky. Původně jsem si vybrala několik různých hodnot napříč celým slyšitelným „pásmem“, ale když jsem je zkusila pustit přes reproduktor do trubice, tak se při některých frekvencích plamínky nad Rubensovou trubicí nijak nezměnily. Začala jsem od nejmenší viditelné frekvence a postupně jsem frekvenci zvyšovala. Nakonec jsem se dostala k viditelnému rozpětí 92–650 Hz. Očekávala jsem, že spodní hranice bude kolem 100 Hz, ale horní hranici jsme očekávala mnohem vyšší. Osobně se domnívám, že ačkoliv jsem zvolila poměrně kvalitní reproduktor, nemusel vyšší frekvence moc dobře vydat. Pravděpodobně byl také špatný signál v přenosu přes pružnou membránu. Ta se dostatečně nerozvibrovala a tím

pádem nemohlo dojít k vychýlení plamene. Každá trubice má omezené frekvence, na kterých rezonuje v závislosti na délce trubice, šířce, počtu i velikosti vyvrtaných otvorů.

Výpočet rychlosti šíření zvuku

Vlnovou délku jsem při dané frekvenci měřila opakovaně a vypočítala průměrnou vzdálenost. Hodnoty jsme měřila metrem, a protože se trubice postupně zahřívá, nemohla jsem metr přikládat úplně těsně na trubici a docházelo k odchylkám. Ty mohly být také způsobeny špatným určením největší amplitudy. U některých frekvencí nešel dobře najít nejvyšší plamínek. Pár otvorů jsem musela dodatečně propichovat, protože plamínek otvorem špatně prostupoval, na příklad nebyl tak tak vysoký nebo byl trochu křivý. Otvory jsou od sebe vzdáleny 1,5 cm, takže odchylka mohla být i 4 cm.

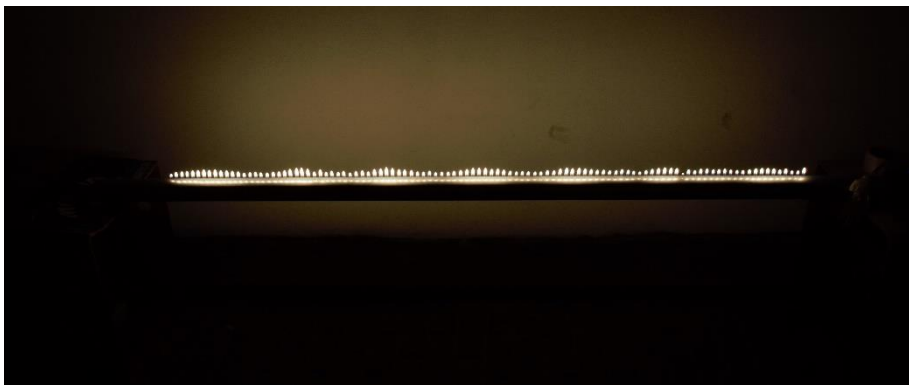
Průměrná rychlost šíření zvuku v Rubensově trubici mi vyšla 428,38 m/s. Průměrná rychlost šíření zvuku v propanu je 258 m/s a v butanu 194 m/s (14) (15). Přesnou rychlost šíření ve směsi propan butanu se mi nepodařilo zjistit, ale osobně bych očekávala hodnotu mezi. Ta by vyšla při poloviční vlnové délce.

Podle jednoho zdroje závisí rychlost šíření zvuku na tlaku v trubici. Ten však bez senzoru nejsem schopná nijak zjistit. (16)

Další možná příčina je vznik vyšších harmonických tóny, kvůli kterým není možné jednoznačně určit hlavní vlnu stojatého vlnění.

Nejpravděpodobnější důvod takto vysoké rychlosti šíření zvuku je teplota. Uvedené rychlosti šíření zvuku v propanu a butanu jsou při normálních podmínkách (20 °C, 101,325 kPa) (17). Trubice se ale od ohně poměrně snadno a hodně zahřeje, takže se o ni lze snadno popálit. Z toho důvodu dochází k ohřátí plynu a rychlost šíření zvuku proto stoupá. Zaujala mě především část ze *Souhrnného sborníku Veletrhu nápadů učitelů fyziky*, která byla zaměřena hlavně na Kundtovu a Rubensovu trubici. Autor v něm mimo jiné zobrazoval uzly a kmitny pomocí žhaveného drátu. Při frekvenci 520 Hz mu vyšla vlnová délka 72 cm, což je velice podobný výsledek tomu mému. Při tomto pokusu nebyla použita směs propan butanu, ale pouze vzduch, který se při normálních podmínkách šíří rychlostí 340 m/s. Při teplotě 100 °C se rychlost zvuku zvýší na 421 m/s. (13)

I přesto, že jsem se snažila zabránit jakémukoliv přístupu vzduchu, nelze mu při domácí výrobě Rubensovy trubice pravděpodobně zcela zabránit. Případný vzduch uvnitř by rychlost zvuku zvyšoval.



Obrázek 10 stojatá vlna I



Obrázek 11 stojatá vlna II

Tabulka 1 naměřené hodnoty

počet měření	frekvence (Hz)	vlnová délka (cm)	rychlost šíření (m/s)
1	92	388	356,96
2	100	336	336,00
3	182	268	487,76
4	200	252	504,00
5	300	220	660,00
6	400	96	384,00
7	440	104	457,60
8	500	76	380,00
9	600	60	360,00
10	650	55	357,50
			428,38

Závěr

Rubensovu trubici se mi podařilo sestavit. Během konstruování a měření se vyskytlo několik problémů, které občas nebylo tak snadné vyřešit. Také mě překvapil fakt, že se Rubensova trubice dá vyrobit bez sváření.

Použité pomůcky jsou snadno sehnatelné a provedení může být velmi různorodé. Konstruování a celkové shánění použitých součástí mě obohatilo v kutilských dovednostech. Stojaté vlnění bylo viditelné pouze na frekvencích 92 až 650 Hz. Pouze na těchto frekvencích trubice rezonovala.

Ačkoliv jsem výslednou rychlost šíření zvuku v trubici očekávala nižší, při bližším zkoumání jsem našla mnoho důvodů a argumentů, které správnost mého výsledku potvrzují. Rychlost šíření zvuku závisí nejenom na směsi plynu uvnitř trubice.

Seznam literatury

1. NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
2. *Odmaturuj z fyziky. Druhé*. Brno: DIDAKTIS, 2006. ISBN 80-7358-058-6.
3. Vlastnosti zvuku. In: WikiSkripta [online]. Praha: 1. lékařské fakulta a Univerzita Karlova, 2008 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Vlastnosti_zvuku.
4. <https://www.ecophon.com/cz/about-ecophon/acoustic-knowledge/basic-acoustics/sound-pressure-level/>, Hladina akustického tlaku: akustický tlak. In: Ecophon [online]. Praha: Hyllinge [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: .
5. KRÁLOVÁ, Magda. Vlnění. In: Techmania: science center [online]. Plzeň: Techmania science center, 2007 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/vlneni>.
6. SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky. Dotisk 5. přepracovaného vydání*. Praha: Prometheus, 2016. ISBN 978-80-7196-438-4.
7. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Vznik a druhy vlnění. In: Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/165-vznik-a-druhy-vlneni>.
8. KRÁLOVÁ, Magda. Interference vlnění. In: Techmania: science center [online]. Plzeň: Techmania science center, 2007 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/vlneni/interference-vlneni>.
9. KRÁLOVÁ, Magda. Stojaté vlnění. In: Techmania: science center [online]. Plzeň: Techmania science center, 2007 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/vlneni/stojate-vlneni>.
10. Čtyři nejnižší vibrační módy struny. In: E-manuel [online]. Brno: Masarykova univerzita Brno, 2022 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://e-manuel.cz/kapitoly/mechanicke-vlneni/vyklad/hudebni-nastroje/>.
11. Obrázek 4: třetí harmonická. In: Khan Academy [online]. USA: Google, 2006 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-vlneni-a-zvuk/x34b3f391df7f0014:mechanicke-vlneni/x34b3f391df7f0014:interference-vlneni/a/standing-waves-rev>.
12. KUNZ Vladimír a Michael LONDESBOROUGH. *Rubensova trubice*. In: *IVysílání* [online]. Praha: Česká televize, 2011 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: .

<https://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/211563241900010/0/80683-rubensova-trubice/>.

13. KONEČNÝ, Pavel. Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2007 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/12-02-Konecny.html/>.
14. Speed of Sound in Various Gases. In: Mtu [online]. Michigan: BH Suits, 1998 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://pages.mtu.edu/~suits/SpeedofSoundOther.html>.
15. VELOCITY OF SOUND. In: Thermopedia [online]. Begell House, 2011, 2. 2. 2011 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/1240/>.
16. REICHL, JAROSLAV a JAKUB DVOŘÁK. Veletrh nápadů učitelů fyziky 23: Rubensova trubice [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2018 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: http://home.pf.jcu.cz/~vnufcb/CD/pdf/VNUF23_28.pdf.
17. Standardní podmínky plynu. In: WikiSkripta [online]. Praha: 1. lékařská fakulta a Univerzita Karlova, 2008 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Standardn%C3%AD_podm%C3%ADnky.