

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

Demonstrační pokusy ve výuce vlnění

Bakalářská práce

Autor: Anežka Hovorková
Studijní program: B1701/Fyzika
Studijní obor: 7507R/Bc. Učitelství – všeobecný základ
7504R006/Fyzika se zaměřením na vzdělávání
7504R015/Matematika se zaměřením
na vzdělávání
Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

Zadání bakalářské práce

Autor: Anežka Hovorková

Studijní program: B1701/Fyzika

Studijní obor: 7507R/Bc. Učitelství – všeobecný základ
7504R006/Fyzika se zaměřením na vzdělávání
7504R015/Matematika se zaměřením
na vzdělávání

Název práce: Demonstrační pokusy ve výuce vlnění

Název práce v AJ: Lecture demonstration for wave physics
teaching

Cíl a metody práce: Cílem bakalářské práce je vytvořit názornou
pomůcku do výuky vlnění.

Garantující pracoviště: katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph. D.

Oponent práce: RNDr. Filip Studnička, Ph. D.

Datum zadání práce: 15. 5. 2019

Datum odevzdání práce: 10. 8. 2020

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Janu Šlégrovi za připomínky a mému tatínkovi za propůjčení dílny a pomoci při konstrukci praktické pomůcky.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, ze kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne

.....

podpis

Anotace

HOVORKOVÁ, A. *Demonstrační pokusy ve výuce vlnění*. Hradec Králové, 2019/2020. Seminární práce na Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové. Vedoucí práce doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D. 41 s.

Mechanické vlnění je důležitou součástí výuky fyziky. Bakalářská práce popisuje konstrukci zařízení pro demonstrační experimenty z oblasti mechanického vlnění a návody k těmto experimentům, včetně teoretických východisek.

Klíčová slova

Vlnění, kmitání, demonstrační experimenty

Annotation

HOVORKOVÁ, A. *Lecture demonstration for wave physics teaching*. Hradec Králové, 2019/2020. Bachelor Thesis at Faculty of Science of Hradec Králové. Thesis supervisor doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D. 41 p.

Mechanical waves are important for physics teaching. The Bachelor thesis describes constructional equipment for demonstration experiments in the field of mechanical waves and gives instructions for experiments, include theoretical background.

Key words

Wave, physics teaching, experiments.

Obsah

Úvod	8
1 Kmitání	9
2 Vlnění.....	10
2.1 Mechanické vlnění	10
2.2 Rovnice postupné vlny.....	12
2.3 Skládání vlnění	13
2.4 Rovnice vlny pro jednorozměrné kontinuum	16
2.4.1 Vytvoření vlnové rovnice	16
2.4.2 Ověření vlnové rovnice	17
2.5 Odraz vlnění	17
2.5.1 Interference vlnění po odrazu na volném konci.....	18
2.5.2 Interference vlnění po odrazu na pevném konci.....	18
2.6 Stojaté vlnění.....	19
2.7 Šíření vln podélných i stojatých.....	20
2.7.1 Postupné příčné vlnění na struně	20
2.7.2 Stojaté příčné vlnění na struně	20
3 Pokusy ve výuce fyziky	23
3.1 Obecné cíle výuky fyziky	23
3.2 Výukové metody	23
3.3 Fyzikální experiment	24
3.4 Učební pomůcky	25
4 Vlnostroj.....	27
4.1 Historie	27
4.2 Sestrojení vlnostroje	27
4.3 Didaktické pokusy s vlnostrojem.....	28
4.4 Výpočty.....	28
Závěr.....	32
Zdroje.....	33
Přílohy	35
Příloha A: Článek pro časopis MFI.....	35
Příloha B: Díl (1).....	39

Příloha C: Díl (2).....	40
Příloha D: Příčná tyč	41

„Řekni mi a já zapomenu, ukaž mi a já si zapamatuji,
nech mě to dělat a já pochopím.“
Čínské přísloví.

Úvod

Demonstračních pokusů ve fyzice v kapitole vlnění je mnoho, já v této práci je popsána konstrukce vlnostroje, který názorně ukazuje vlastnosti vlnění: amplituda, chování odražené vlny a při správném použití i skládání odražených vln a interpretace stojatého vlnění. Původní účel bakalářské práce je jasný – objasnit rozdíl mezi kmitáním a vlněním a názorně ukázat šíření vln. Takové znalosti vlnění lze využít při další výuce akustiky, optiky, elektřiny apod.

V první části se okrajově zmiňuji o kmitání, pouze proto, že se některé informace hodí i při výuce vlnění a ve školách se toto téma probírá v souvislostech. Většina mé teoretické práce je o samotném vlnění a jeho vlastnostech. Zmiňuji zde především mechanické vlnění, které je v této práci prioritní. Je vysvětlen rozdíl mezi příčným a podélným vlněním, odvozuji obecnou rovnici postupného vlnění a začínám vysvětlovat principy skládání dvou vlnění. Dále vytvořím vlnovou rovnici pro jednorozměrné kontinuum, které je obecně nejjednodušší. Po ověření této odvozené rovnice se dostávám ke skládání vlnění po odrazu na volném a pevném konci. Zde použijeme již vysvětlené skládání (superpozici) dvou vlnění. Při určitých podmínkách složením dvou vln vzniká stojaté vlnění, kterým se zabývám na konci teoretické části. Jako dodatek k teorii jsem vybrala šíření podélných i stojatých vln, kde jsem pro ukázkou zmínila postupné i stojaté příčné vlnění na struně. Toto téma už trochu zasahuje do akustiky pro ukázkou užitečnosti znalosti vlastností vlnění.

Vzhledem k tomu, že hlavním úkolem bylo vytvořit didaktickou pomůcku, v další kapitole se věnuji pokusům ve výuce fyziky. Obecně se zmiňuji o cílech výuky fyziky, jednotlivých metodách používaných ve výuce fyziky a popisuji aspekty samotného fyzikálního experimentu. Na závěr této pedagogické kapitoly zmiňuji další učební pomůcky využívané ve výuce.

V praktické části začínám informacemi o autorovi prvního vlnostroje, podle kterého jsem se snažila svoji pomůcku vytvořit. Pomůcka není úplně identická, protože jsem kvůli svým možnostem musela poupravit konstrukci, kterou popisují v následující kapitole. Zmiňuji zde i pokusy, které se dají provést s mou vytvořeným vlnostrojem, nebo s po domácku vytvořenou jednodušší pomůckou, která má stejné vlastnosti a názornost je zde zachována. Dále je zde odvození rychlosti šíření vlnění přímo ze zpomaleného videa vytvořeného pomocí kamery univerzity a pomocí teoretických výpočtů. Díky uspokojivým výsledkům při odvozování rychlosti může být vlnostroj zapojen i do výuky fyzikálních praktik na univerzitě.

V příloze A naleznete článek, který jsme spolu s doc. Janem Šlégrem vytvořili pro časopis MFI s názvem *Shiveův vlnostroj – znovuobjevený klenot výuky vlnění*.

1 Kmitání

Fyzika se řadí mezi přírodní vědy, a tak není výjimkou, že i mechanické kmity snadno najdeme v přírodě. Svoji roli hrají i v technické praxi, ve které jsou velmi důležité. Kmitání patří mezi základní typy pohybu. Pro tento termín máme mnoho názvu, můžeme jej označit jako *kmitavý pohyb*, *mechanické kmitání* nebo *oscilace*. Z posledního uvedeného vyplynul název pro kmitající těleso, tedy *oscilátor*. [1][2]

Pro kmitání je typické, že se těleso (hmotný bod) stále pohybuje v okolí jednoho bodu, který označujeme jako rovnovážnou (stabilní) polohu tělesa. V této rovnovážné poloze je součet všech působících sil rovný nule, což je známý fakt ze základů dynamiky. [3] Pokud se tedy těleso nachází v rovnovážné poloze, nekmitá. Po vychýlení z rovnovážné polohy se pohybuje v pravidelných intervalech okolo této polohy. Rovnovážná poloha je nutná podmínka k tomu, abychom mohli těleso v jejím okolí označit jako oscilátor.

Těleso, které kmitá okolo rovnovážné polohy, se pravidelně vychyluje a tuto výchylku můžeme popsat délkou, úhlem nebo např. u oscilačních obvodů elektrickým nábojem, proudem či napětím. [1] Pokud těleso prochází rovnovážnou polohou, mluvíme o periodickém kmitavém pohybu. [2] Takové kmitání oscilátoru, tedy děj, co nastane po vychýlení z rovnovážné polohy, popisuje diferenciální pohybová rovnice (popř. soustava diferenciálních rovnic při složitějších oscilátorech). Podle typu diferenciální rovnice pak kmitání dělíme na tři kategorie – prvním případem je lineární kmitání, které je popsáno lineární diferenciální rovnicí, v případě druhém je to nelineární kmitání, jež je popsáno nelineární diferenciální rovnicí, která má matematicky velice složité řešení a je velice obtížné k těmto řešením dojít, poslední případ je samobuzené kmitání – zvláštní případ nelineárního kmitání, oscilátor nuceně kmitá i bez působení vnější periodické síly. [1]

Podle dalších vlastností můžeme kmitání dělit na tlumené nebo nucené neboli buzené, můžeme vytvářet soustavy více kmitajících těles nebo se zajímat o stavy rezonance. Porovnáním všech zmíněných typů oscilátoru zjistíme, že pohybové rovnice jsou si podobné. Lze je tedy všechny zobecnit a pohybovou rovnicí oscilátoru obecně zapsat jako

$$\ddot{\psi} + \omega_0^2 \psi = 0,$$

kde ψ je veličina popisující vychýlení soustavy z rovnovážné polohy jakýmkoliv způsobem. Konstanta ω_0^2 je různá pro jednotlivé typy oscilátorů. [1][3]

2 Vlnění

2.1 Mechanické vlnění

Podle učebnice pro gymnázia se dozvídáme, že vlnění je pro nás podstatné a ve spoustě forem se s ním setkáváme v běžném životě. Ať se bavíme o zvuku, světle nebo jakémkoliv druhu vysílání, platí pro vlnění řada zákonitostí. Základním rozdílem mezi vlněním a kmitáním je ten, že vlnění se šíří v pružném prostředí, přenáší kmitání, kmitání je pohyb na jednom místě okolo jedné rovnovážné polohy. To ovšem neznamená přenos látky z místa na místo, vlněním se pouze přenáší energie pomocí vazeb na jiné částice. [2] [4]

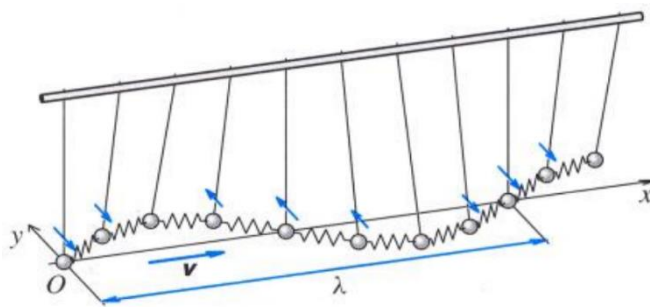
Samozřejmě závisí také na prostředí. To můžeme rozdělit na homogenní a nehomogenní, izotropní a anizotropní, vodivá a nevodivá. Homogenní prostředí má vlastnosti v každém místě prostředí stejné, naopak v nehomogenním prostředí záleží na souřadnicích. Izotropní látky mají vlastnosti stejné nezávisle na směru šíření vlnění, v anizotropních látkách závisí vlastnosti vlny na směru šíření vlnění. Látky vodivé a nevodivé jsou obvykle rozděleny v učebnicích o elektřině a magnetismu, kde se mluví o dielektrikách a vodičích. [5]

Pokud v určitém místě vznikne rozruch, kmitavý pohyb částice u zdroje se přenesse díky existenci vazebných sil mezi částicemi na další částici a tím vzniká vlnění. [1] [4] O vlnění můžeme mluvit ve třech variantách. První varianta je jednorozměrné kontinuum, kdy se jedná o těleso s jediným důležitým rozměrem – směrem šíření vlnění (např. tyč). Ve druhé variantě jde o dvojrozměrné kontinuum. Zde jde o dva rozměry, které jsou důležitější než třetí rozměr (např. deska, hladina). V posledním případě jde o trojrozměrné kontinuum. V takovém případě se jedná o šíření vlnění v pružném tělese. [1]

Směr šíření kmitání částic může vlnění rozdělit na příčné a podélné vlnění nebo na postupové a stojaté vlnění.

- Příčné vlnění – Směr kmitání je *kolmý* ke směru šíření vlnění.

Pro příklad si můžeme představit řadu částic. První v řadě necháme vykonávat kmitavý pohyb ve směru osy y . Ten se díky vazbám na ostatní částice přenesse dál a tím se začne šířit vlna ve směru osy x . První kyvadlo vykonalo jeden kmit za dobu, které říkáme perioda kmitání T . Za stejnou dobu se vlna rozšířila rychlostí



1 Příčné vlnění. Převzato z [6].

v do vzdálenosti, kterou nazýváme vlnová délka λ . Odvozený vztah pro příčné kmitání tedy vypadá takto

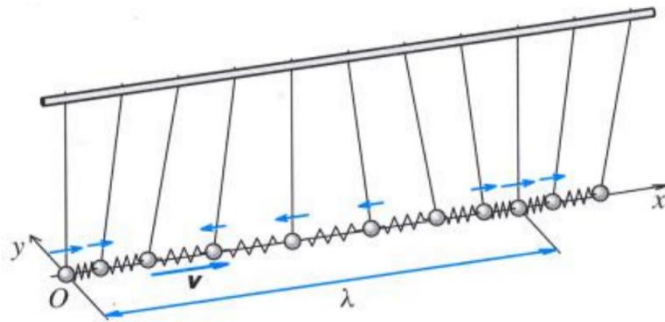
$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

Vlnová délka se dá také definovat jako vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází. [2]

- Podélné vlnění – Směr kmitání je *stejný* jako směr šíření vlnění.

Stejně jako u příčného kmitání si můžeme představit řadu částic spojených pružnými vazbami. Tentokrát ale první částice začne kmitat ve směru osy x . Znovu se bude energie předávat a vlna se šířit ve směru osy x . Veličiny jsou zde stejné, rychlost šíření v závisí na vlastnostech pružného prostředí. Částice se zhušťují a zředí se podobně jako se v předchozím případě částice vychylovaly. [2]

- Postupové vlnění – Jde o jakékoliv vlnění, které přenáší energii v každém



2 Podélné vlnění. Převzato z [6].

bodě prostoru stále v jednom směru.

- Stojaté vlnění – Toto vlnění nepřenáší energii, pouze se periodicky mění potenciální energie pružnosti v kinetickou energii hmotných bodů. [2]

Takové vlnění vzniká například při odražení vlny. Při zachování představy řady částic necháme první částici trvale harmonicky kmitat. Vlna se přenáší na konec řetízku částic a na konci se odráží. Tím nastane interference dvou stejných vlnění – přímého a odraženého (druhý konec je pevně uchycen, aby se vlna vracela se stejnou fází a došlo tak ke skládání stejného vlnění – viz další kapitoly). Obě vlnění mají stejnou rychlost, ale postupují opačným směrem. Některé částice zůstanou trvale v klidu, těm říkáme uzly. Jiné částice kmitají okolo rovnovážné polohy s různou amplitudou. Těm, co mají největší amplitudu, říkáme kmitny. [1] [2]

Na vlnění se dá samozřejmě dívat i z dalších pohledů. Zde je pár základních pojmů podle Vybírala:

- Nepolarizované vlnění je příčné vlnění, které má amplitudu ve všech směrech kolmých na směr šíření stejnou
- Lineárně polarizované vlnění je příčné vlnění, jehož částice prostředí kmitají pouze v jednom směru kolmém na směr šíření.
- Kruhové polarizované vlnění je polarizované vlnění, jehož amplituda s postupující vlnou opisuje kruh. (lineárně polarizovaná vlna v anizotropním prostředí)

- Harmonická vlna (vlnění) má veličinu, která vlnu popisuje, mění se podle funkce sinus nebo kosinus.
- Tlumené vlnění je vlnění, u kterého dochází k postupnému zmenšování amplitudy.
- Vlnoplocha je taková plocha, na níž má uvažovaná vlna ve všech bodech v každém okamžiku stejnou fázi.
- Rovinná vlna má své vlnoplochy jako vzájemně rovnoběžné rovinné plochy.
- Kulová vlna má své vlnoplochy jako soustředěné kulové plochy.

[1]

2.2 Rovnice postupné vlny

Rovnice vlny nám říká, jak vypočítat velikost okamžité výchylky, která závisí na čase a vzdálenosti kmitajícího bodu od zdroje. Taková rovnice platí pro příčné i podélné harmonické vlnění v homogenním prostředí, podle toho, jakým směrem má výchylku kmitání první částice.

Uvažujeme jednorozměrné kontinuum, tedy si představíme řadu částic vzájemně svázaných pružnou vazbou bez tlumení v řadě za sebou. První částice v bodě 0 koná harmonické netlumené kmity. Částice kmitající v počátku má v čase t výchylku

$$y_0 = y_m \sin \omega t.$$

[1]

Do bodu X , který je vzdálený o x od počátku 0, dorazí rozruch vyvolaný první částicí za dobu $\Delta t = x/v$. Kmity budou tedy „opožděny“ o Δt a pro výchylku bude platit

$$y = y_m \sin \omega(t - \Delta t) = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right),$$

[1] [2] [4]

protože platí

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \text{a} \quad vT = \frac{v}{f} = \lambda.$$

[1] [5]

Vlnová délka λ je vzdálenost, na kterou se vlnění rozšíří za dobu jedné periody T . Veličinu $2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ nazýváme fáze vlnění. Při vlně postupující záporným směrem vzhledem k ose x by bylo znaménko uvnitř závorek kladné, protože by výchylka částice „přebíhala“ stejně velkou výchylkou první částice v počátku o dobu Δt . [1] [2]

Další otázkou pro nás je, jakou rychlostí se šíří vlnoplochy daným prostorem. Příslušnou rychlost označíme jako fázovou rychlost v_f a zajímá nás, za jakých podmínek pro x, t bude fáze při šíření konstantní.

$$\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \text{konst.} \quad \text{a} \quad 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = \text{konst.}$$

Derivací podle času t dostaneme

$$\omega \left(1 - \frac{dx}{dt} \frac{1}{v} \right) = 0, \quad 2\pi \left(\frac{1}{T} - \frac{dx}{dt} \frac{1}{\lambda} \right) = 0$$

a z toho fázová rychlost

$$v_f = \frac{dx}{dt} = v = \frac{\lambda}{T}$$

Fázová rychlost v_f je tedy identická s rychlostí v , kterou jsme na začátku kapitoly označili jako rychlost šíření rozruchu.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2\pi}{T} = \frac{\omega}{k}$$

kde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ je úhlový vlnčet nebo úhlové vlnové číslo, které můžeme vynásobit jednotkovým vektorem \mathbf{n} ve směru orientované normály k vlnoploše v daném místě, a dostaneme tím vektor šíření $\mathbf{k} = k\mathbf{n} = \frac{2\pi}{\lambda}\mathbf{n}$. Díky úhlovému vlnčtu k pak můžeme vyjádřit fázi harmonické vlny ve tvaru

$$\omega t - \frac{\omega}{v} x = \omega t - kx$$

a rovnici postupné harmonické vlny ve tvaru

$$y = y_m \sin(\omega t - kx)$$

Tento vztah můžeme převést i do komplexního tvaru a po zobecnění (nahrazení výchylky $y = y(x, t)$ vlnovou funkcí $\psi = \psi(x, t)$) dostaneme tvar využívaný především v kvantové (vlnové) mechanice:

$$\psi = \psi_m e^{i(\omega t - kx)}$$

[1]

2.3 Skládání vlnění

Ke složení (interferování) dvou nebo více vlnění je potřeba využít principu superpozice vln: „*Je-li reakce prostředí na šířící vlnový rozruch lineární, je výsledné vlnění popsáno vlnovou funkcí $\psi(x, t)$, která je rovna součtu vlnových funkcí jednotlivých vln stejné fyzikální povahy.*“ [Vybíral, s. 157]

$$\psi(x, t) = \sum_{i=1}^n \psi_i(x, t)$$

[1] [4]

Jednotlivá vlnění se šíří nezávisle na ostatních vlnách stejné fyzikální povahy.

Výsledkem složení dvou vln je opět rovnice vlnění. Pro zjednodušení můžeme uvažovat dvě vlnění o stejné vlnové délce λ a stejné amplitudě výchylky y_m , která se šíří stejnou rychlostí v stejným směrem v jednorozměrném kontinuu. Uvažujme,

že zdroje vlnění mají různou polohu, ale kmitají se stejnou počáteční fází. Potom můžeme jednotlivá vlnění zapsat

$$y_1 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right)$$

$$y_2 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right).$$

Výsledek určíme pomocí fázového rozdílu vlnění $\Delta\varphi$, který určíme jako rozdíl fází obou vlnění v určitém okamžiku.

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d$$

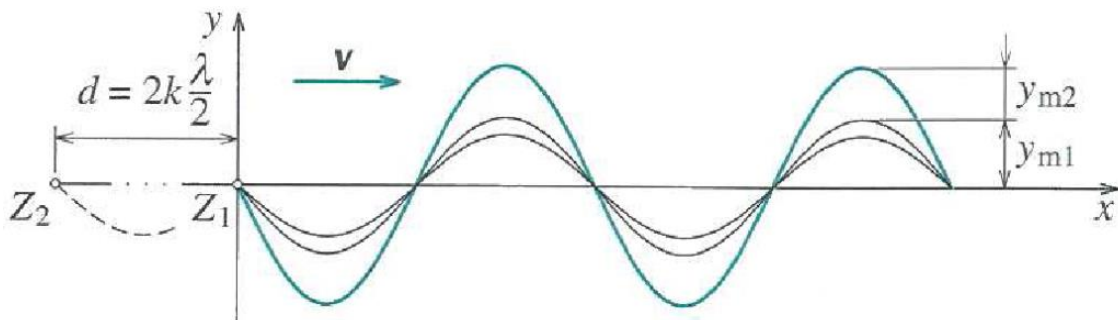
[1] [2] [4]

Při grafickém řešení skládání vln se sčítají okamžité výchylky v jednotlivých bodech vlnění. Jsou-li složky skládání vln harmonické, bude mít výsledná vlna taktéž harmonický průběh. Zvláštní případy interference nastávají při celistvém počtu půlvln interferujících vlnění. [2] [7]

- Sudý počet půlvln:

$$d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda \text{ kde } k = 0, 1, 2, \dots$$

Interferující vlnění se setkávají v každém bodě se stejnou fází a tím vzniká vlnění s výslednou amplitudou výchylky, která je rovna součtu amplitud složek $y_m = y_{m1} + y_{m2}$. Tím vzniká interferenční maximum.

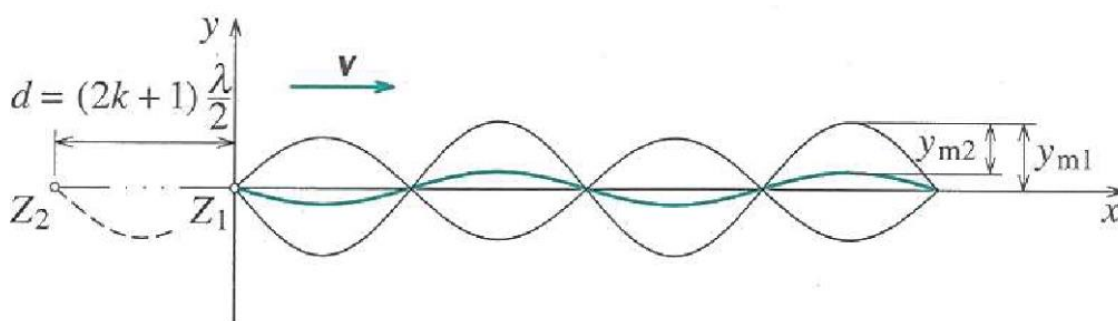


3 Interferenční maximum. Převzato z [8].

- Lichý počet půlvln:

$$d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ kde } k = 0, 1, 2, \dots$$

Interferující vlnění se setkávají s opačnou fází a tím vzniká vlnění s výslednou amplitudou výchylky rovnou absolutní hodnotě rozdílu amplitud složek $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$. Tím vzniká interferenční minimum. [2]



4 Interferenční minimum. Převzato z [8].

„Interferenci dvou stejných vlnění vzniká výsledné vlnění, jehož amplituda je největší v místech, v nichž se vlnění setkávají se stejnou fází, a nejmenší (nulová) je v místech, v nichž se vlnění setkávají s opačnou fází.“ [Lepil, s. 59]

Jako další příklad si představíme dvě shodně lineárně polarizované harmonické vlny ψ_1, ψ_2 , které se současně šíří stejným směrem jednorozměrným kontinuem, mají stejnou amplitudu ψ_m , ale nemají stejnou úhlovou frekvenci $\omega_1 < \omega_2$, a úhlové vlnočty $k_1 < k_2$. Výsledná vlna se pak zapíše

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_1 + \psi_2 = \psi_m [\sin(\omega_1 t - k_1 x) + \sin(\omega_2 t - k_2 x)] = \\ &= 2\psi_m \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_2 - k_1}{2} x\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right). \end{aligned}$$

Pro málo odlišné parametry úhlové frekvence $\omega_1 = \omega - \Delta\omega$, $\omega_2 = \omega + \Delta\omega$ a úhlové vlnočty $k_1 = k - \Delta k$, $k_2 = k + \Delta k$, kde $\Delta\omega, \Delta k$ jsou relativně malé odchylky od středních hodnot, můžeme zapsat

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} = \Delta\omega, \quad \frac{k_2 - k_1}{2} = \Delta k, \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega, \quad \frac{k_1 + k_2}{2} = k.$$

Tím pádem předešlý zápis vlny přejde do tvaru

$$\psi = \Psi \sin(\omega t - kx)$$

$$\Psi = 2\psi_m \cos(\Delta\omega \cdot t - \Delta k \cdot x).$$

Veličina $\Psi = \Psi(x, t)$ je proměnná amplituda vlny vzniklé složením dvou vln o blízkých hodnotách ω, k . Taková amplituda rozdělí výsledné vlnění do jednotlivých prostorových skupin neboli vlnových klubek (vlnových balíčků), někdy také označovaných jako grupy vln. [1]

Vlnění v prostoru se můžou šířit různými směry, tzn. že kmitání částic prostoru se děje různými směry. V takovém případě musíme skládat vlnění vektorově. [9] Princip superpozice jde aplikovat i na šíření světla v prostředí. Takové vlnění se dá popsat Maxwellovými rovnicemi s příslušnými materiálovými vztahy. To znamená, že pokud jsou elektrická pole \vec{E}_1, \vec{E}_2 řešením Maxwellových rovnic pro dané prostředí, je řešením také $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Tento princip platí i pro více svazků,

můžeme tedy zapsat

$$\vec{E} = \sum_k \vec{E}_k.$$

Princip superpozice neplatí obecně při šíření optických vln, prostředí musí být lineární. [5] [7] [9]

2.4 Rovnice vlny pro jednorozměrné kontinuum

2.4.1 Vytvoření vlnové rovnice

Kromě kinematiky vlnění nás zajímá i dynamika vlny, tj. u mechanického vlnění nás zajímají souvislosti vlnivého pohybu se silami, jimiž se vlnění přenáší prostředím. Základním vzorcem k sestavení pohybové rovnice pro mechanické vlnění je Newtonův zákon $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$, kde m je hmotnost určitého bodu (elementu, částice) vlnícího se prostředí. Nejprve je potřeba znát vztahy pro zrychlení kmitajících bodů. Pro neharmonický tvar vlny je šíření vlny v obou směrech popsáno superpozicí takto

$$y = y_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + y_2\left(t + \frac{x}{v}\right).$$

Okamžitá výchylka bodu při šíření vlnění jednorozměrným kontinuem je funkcí dvou nezávislých proměnných a píšeme $y = y(x, t)$. Tento tvar přepíšeme do podoby

$$u = u_1(\xi_1) + u_2(\xi_2), \text{ kde } \xi_1 = t - \frac{x}{v}, \quad \xi_2 = t + \frac{x}{v}$$

jsou složené argumenty funkcí blíže neurčeného tvaru. Zrychlení dostaneme dvojitou derivací

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial \xi_1}{\partial t} + \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial t} = \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial u}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} \right) = \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi_1^2} \frac{\partial \xi_1}{\partial t} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi_2^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi_2^2}. \end{aligned}$$

Na pravé straně nahradíme výrazem, který dostaneme druhou derivací u podle x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial \xi_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} - \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{1}{v} \left(\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} - \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} \right) \right] = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi_1^2} \frac{\partial \xi_1}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi_2^2} \frac{\partial \xi_2}{\partial x} \right) = \\ &= \frac{1}{v^2} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi_2^2} \right). \end{aligned}$$

Po dosazením druhé derivace u podle t získáme

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

což je vlnová rovnice pro jednorozměrné kontinuum.

Stejně, jako jsme na konci kapitoly 2.2 zobecňovali rovnici postupné harmonické vlny, můžeme stejným způsobem zobecnit i tuto rovnici. Nahrazením funkce $u = u(x, t)$ za vlnovou funkci $\psi = \psi(x, t)$, která může vyjadřovat různé veličiny popisující jev šíření (výhybku, úhlovou výhybku, mechanické napětí, tlak v tekutině, elektrický proud, elektrické napětí, složky intenzit nebo indukci elektromagnetického pole), dostaneme vlnovou rovnici ve tvaru

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0.$$

Taková vlnová rovnice platí pro jakoukoliv netlumenou vlnu v jednorozměrném kontinuu, platí i pro jednoduchou nebo složenou vlnu, tedy může platit i pro vlnu stojatou. [1]

2.4.2 Ověření vlnové rovnice

Ověřujeme platnost vlnové rovnice pro harmonickou vlnu zapsanou

$$u = u_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right).$$

Potřebné derivace pro výhybku u :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \omega u_m \cos \omega \left(1 - \frac{x}{v} \right), & \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= -\omega^2 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = -\omega^2 u \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{\omega}{v} u_m \cos \omega \left(1 - \frac{x}{v} \right), & \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= -\frac{\omega^2}{v^2} \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = -\frac{\omega^2}{v^2} u. \end{aligned}$$

Porovnáním druhých derivací zjistíme, že platí

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Pokud uvážíme, že koeficient na pravé straně vztahu je druhá mocnina úhlového vlnočtu $k = \omega/v$, dostane vztah tvar

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k^2 u = 0 \quad \text{resp.} \quad \boxed{\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k^2 \psi = 0}.$$

Tato diferenciální rovnice se označuje jako *Helmholtzova rovnice*. [1]

2.5 Odraz vlnění

I v této kapitole si zachováme představu řady částic za sebou. Tentokrát ale kontinuum prostorově omezíme. Pokud na jednom konci s částicí kmitneme, vlna postupuje směrem k druhému konci a tam se odrazí. Pokud je druhý konec volný,

odražená vlna se vrací zpět se stejnou fází, pokud jej upevníme, fáze odraženého vlnění je opačná. [1] [2] [4] [7] Uvažujeme-li harmonickou postupnou vlnu, opět se na konci odrazí, postupuje zpět a skládá se (interferuje) s postupnou vlnou.

2.5.1 Interference vlnění po odrazu na volném konci

Uvažujeme šíření vlny, která se na konci odráží se stejnou fází a má předpis

$$\psi_1 = \psi_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = \psi_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right).$$

Předpokládáme, že odražená vlna má stejnou amplitudu ψ_m jako původní vlna a že postupuje v opačném směru než vlna ψ_2 .

$$\psi_2 = \psi_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$$

Podle principu superpozice sečteme postupnou a odraženou vlnu. Tím vznikne interference obou vlnění a výsledná vlna se spočítá jako

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = \psi_m \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right] = 2\psi_m \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot \sin \omega t$$

$$\boxed{\psi = \psi_v \sin \omega t} \quad \text{kde } \psi_v = 2\psi_m \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$

je amplituda vlnění při odrazu na volném konci. [1]

2.5.2 Interference vlnění po odrazu na pevném konci

Po odrazu na pevném konci se změní fáze vlny o π a tím se v rovnici vlny změní znaménko, takže platí

$$\psi_3 = -\psi_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} \right).$$

Výsledné vlnění získáme superpozicí vln ψ_1 a ψ_3 :

$$\begin{aligned} \psi = \psi_1 + \psi_3 &= \psi_m \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) - \sin \left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right] \\ &= -2\psi_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot \cos \omega t \end{aligned}$$

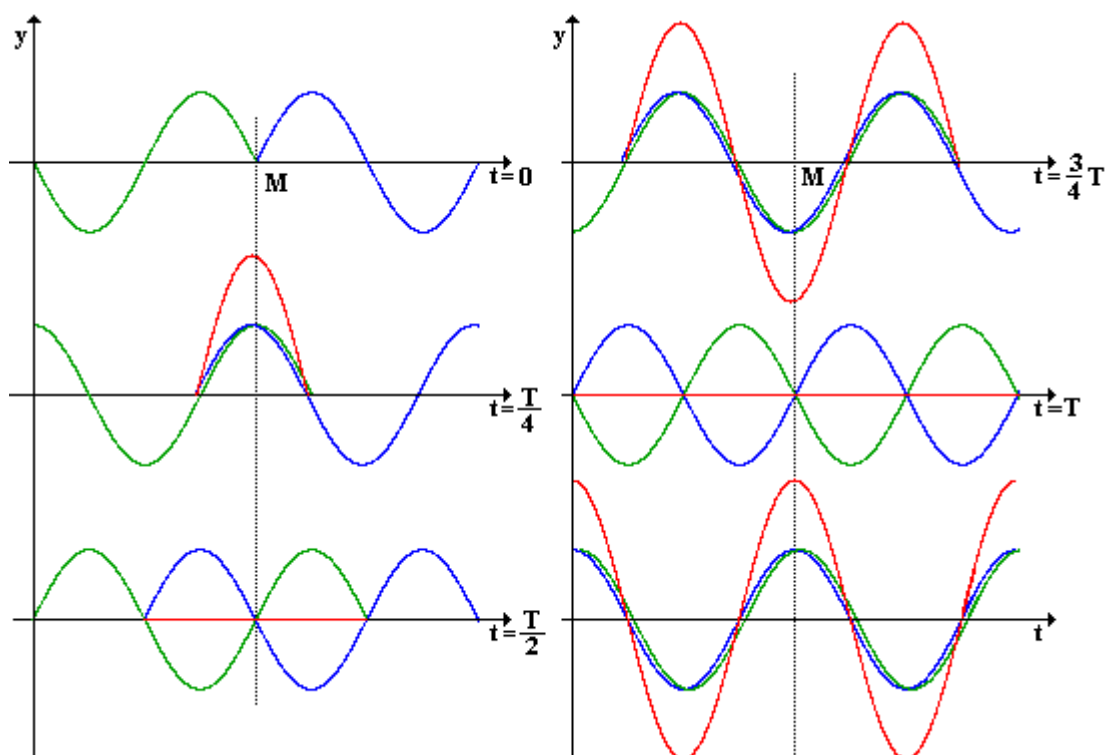
$$\boxed{\psi = -\psi_p \cos \omega t} \quad \text{kde } \psi_p = 2\psi_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$$

je amplituda vlnění při odrazu na pevném konci. [1]

2.6 Stojaté vlnění

Stojaté vlnění v jednorozměrném kontinuu je tedy popsáno vzorci v rámečkách. Kromě předešlého odvození se můžeme na vznik stojatého vlnění dívat pomocí grafické superpozice. Tedy znovu máme dvě stejná vlnění postupující opačným směrem proti sobě. Superpozici začneme v čase $t = 0$, kdy se obě vlnění setkají v bodě M . Na konci vidíme, že v tomto bodě je amplituda výsledného vlnění největší, stejně jako v dalších celých násobcích délky půlvlny. Takovým místům říkáme kmitna. Naopak body, ve kterých je amplituda výsledného vlnění nejmenší (nulová), nazveme uzly. Stejně, jako kmitny, jsou uzly od sebe vzdáleny o $\lambda/2$. Poloha kmiten a uzlů se nemění, proto stojaté vlnění. [1] [2] Matematicky to lze poznat podle toho, že výrazy výsledné amplitudové funkce v kapitole 2.5.1 a 2.5.2 závisí pouze na poloze souřadnice x a udávají rozložení amplitud harmonických kmitů podél uvažovaného kontinua, nikoliv na čase t . [1]

Podle všeho vznikají mezi stojatým a postupným vlněním zásadní rozdíly. Při postupném vlnění kmitají všechny body se stejnou amplitudou výchylky, ale s různou fází, která závisí na čase. Každý další bod vlny dosahuje stejné výchylky



5 Stojaté vlnění. Převzato z [10].

jako předchozí bod, ale se zpožděním. Této rychlosti šíření říkáme fázová rychlost, o které jsem se zmiňovala již výše. Postupným vlněním se také přenáší energie. Při stojatém vlnění kmitají všechny body mezi dvěma uzly se stejnou fází, za to s jinou amplitudou výchylky. Tato amplituda závisí na poloze bodu, jak již bylo zmíněno výše. Na rozdíl od postupného vlnění, stojaté vlnění energii nepřenáší,

pouze se periodicky mění potenciální energie pružnosti v kinetickou energii jednotlivých bodů. [2]

Stojaté vlnění opět může být příčné nebo podélné. U podélného vlnění dochází k největšímu zhuštění (popř. zředění) kmitajících částic v kmitnách a částice v uzlech nekmitají. [2] Je zřejmé, že se stojatým vlněním se opět setkáváme v praxi, proto se v dalších kapitolách zabývám praktickými ukázkami a objasněním fungování stojatého vlnění v praxi.

2.7 Šíření vln podélných i stojatých

2.7.1 Postupné příčné vlnění na struně

Uvažujeme tenkou, dokonale ohebnou homogenní strunu. Tuto strunu s délkovou hustotou hmotnosti $\mu = \rho S = konst.$ napínáme silou F . Struna je deformovatelná, takže po udělení příčného impulsu se její elementy příčně vychýlí. Při malých výchylkách můžeme uvažovat, že v určitý okamžik t platí

$$dl \approx dx, \quad \sin \alpha \approx \alpha \approx \frac{du}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} dx.$$

Tento malý element dl má hmotnost $dm = \rho S dx = \mu dx$. Zároveň na něj ve směru příčné výchylky působí síla

$$dF_u = F'_u - F_u = F(\alpha + d\alpha) - F\alpha = Fd\alpha = F \frac{\partial \alpha}{\partial x} dx = F \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx,$$

která přiděluje elementu zrychlení

$$a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{dF_u}{dm} = \frac{F}{\mu} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Z toho můžeme napsat pohybovou rovnici struny

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\mu}{F} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

a z toho fázová rychlost bude

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

[1]

2.7.2 Stojaté příčné vlnění na struně

V tomto případě máme u struny oba konce vždy pevné. To znamená, že oba konce musí vytvářet uzly u stojatého vlnění. Délka struny představuje polovinu vlnové délky stojatého vlnění, pokud nebudeme uvažovat už jiné uzly, tzn.

$$l = \frac{\lambda}{2}.$$

Chvění struny může ale vznikat i s dalšími uzly, např. pro celou vlnu by bylo $l = \lambda$. Z toho můžeme vyvodit obecně vzorec, za předpokladu, že rychlost vlnění se nezměnila

$$l = k \frac{\lambda}{2}.$$

[2] [7]

K tomuto vzorci se dá také dojít přes skládání vln, které jdou proti sobě. Vlnění vzniklé na struně se odráží od obou konců s opačnou fází, protože jsou pevné. To znamená, že použijeme amplitudovou funkci pro odraz na pevném konci

$$\psi_p = 2\psi_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$$

a považujeme ji za maximální výchylku. Pro lepší představu si umístíme počátek soustavy do levého konce struny a tím pro pravý konec získáme okrajovou podmínku

$$(u_p)_{x=l} = 2u_m \sin \frac{2\pi l}{\lambda} = 0.$$

To platí, pokud

$$\frac{2\pi l}{\lambda} = k\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

tedy pro

$$\lambda = \frac{2l}{k}.$$

Pro výpočet příslušných frekvencí použijeme vzorec fázové rychlosti

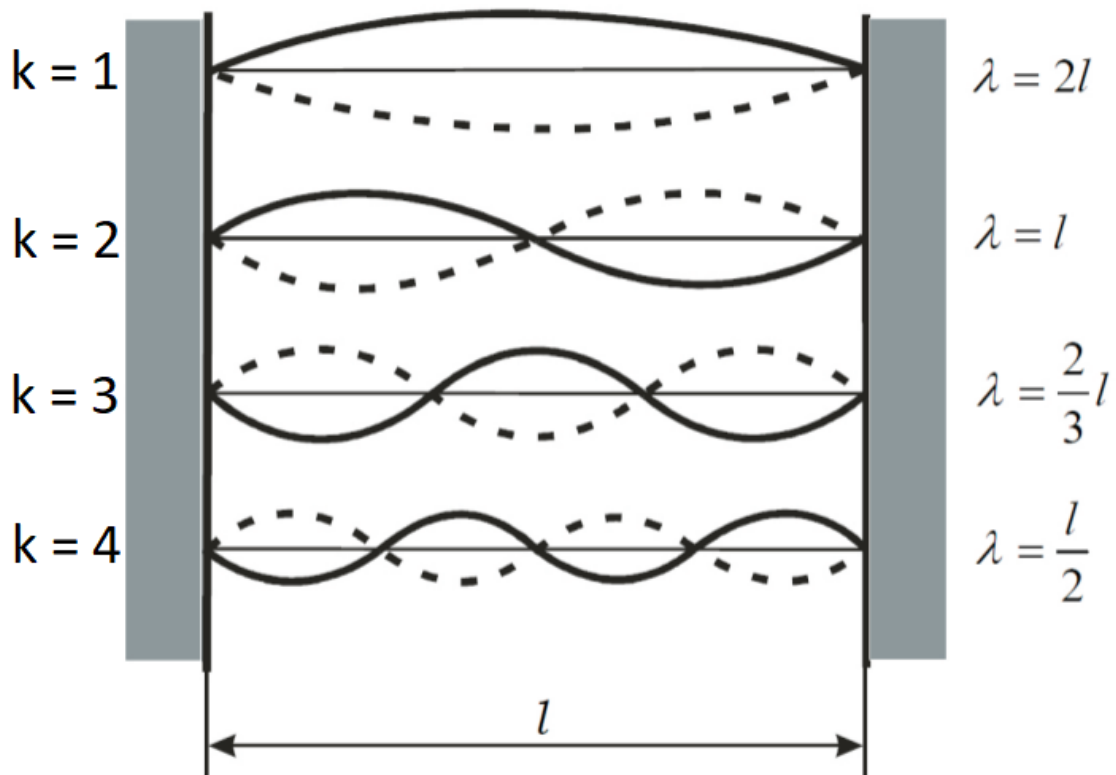
$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

a bude platit

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

V pružných tělesech vzniká chvění jen s určitými frekvencemi. Výšku tónu struny můžeme ale ovlivnit. Závisí nám totiž na třech faktorech:

- délka struny l - čím kratší strunu máme, tím vydá vyšší tón
- síla F , kterou napínáme - při ladění nástrojů musí mít určitou nejmenší velikost
- délková hustota μ - při větší hmotnosti struny se sníží výška tónu (opřede se ocelové jádro tenkým drátkem, aby se nesnížila ohebnost struny). [1]



6 Vlnění na struně. Dostupné z [11]. Upraveno.

Tyto tři faktory ovlivňují velikost základní frekvence. Její násobky pak dokážeme na struně (popř. jiných pružných tělesech jako vlákno, tyč...) rozkmitat. [2] U strunných nástrojů lze vyvolat vyšší tóny speciálního zabarvení, tzv. flažoletové tóny. Dosáhneme toho tak, že přidržíme rozehvělou strunu v polovině (třetině, čtvrtině atd.), tedy získáme $k > 1$. Tím utlumíme všechny tóny, které v tomto místě nemají uzel. [1] [7]

3 Pokusy ve výuce fyziky

3.1 Obecné cíle výuky fyziky

„Cílem výuky fyziky jsou výsledné, relativně stálé změny v osobnosti žáka, ke kterým má výuka fyziky v daném typu škol směřovat. Jde o změny ve vědomí, chování a postojích žáka projevující se osvojením nových fyzikálních poznatků a dovedností a rozvojem žádoucích rysů osobnosti žáka.“ [12, str. 16]

Pro výuku fyziky je důležité pomocí klíčových kompetencí rozvíjení zaměřit na zkoumání přírodních jevů, jejich souvislostí, pozorování, umění klást správné otázky, způsobu uvažování apod., protože fyzika spadá do vzdělávací oblasti Člověk a příroda. K těmto schopnostem by žáci měli umět využívat adekvátní matematické či grafické prostředky. Podrobnější rozbor cílů se dá najít v příslušných Rámcových vzdělávacích programech, proto se jimi ve své práci nebudu podrobněji zabírat. [13]

Pojem klíčové kompetence představuje souhrn vědomostí, dovedností, schopností, postojů a hodnot, které jsou důležité pro osobní rozvoj každého jednotlivce ve společnosti a pro uplatnění takového člena ve společnosti. Tedy úkolem vzdělávání je vybavit žáky souborem klíčových kompetencí, která je pro žáky adekvátní a připravit je na další vzdělávání i na uplatnění se ve společnosti. Mezi klíčové kompetence základního vzdělání se považují *kompetence k učení, kompetence k řešení problémů, kompetence komunikativní, kompetence sociální a personální, kompetence pracovní*, které se na středních školách dále rozšiřují, ale hlavní základ zůstává. [13]

3.2 Výukové metody

Každý učitel si své metody vybírá podle svého vyučovacího stylu, podle aktuálního tématu i podle třídního kolektivu, kterému je látka předávána. Nejčastěji se využívá kombinace různých metod, podle podmínek.

Metody ústního výkladu patří mezi slovní metody, kde vystupuje vždy jeden přednášející, kterým může být učitel nebo žák. Patří sem především vysvětlování a vyprávění. Tato metoda se používá především pro vysvětlení nových pojmů, upozorňování na souvislosti či při opravě špatně pochopených informací. Metoda ústního výkladu může být doprovázená prezentací či tvorbou důležitých bodů. K tomu učitel nemusí využívat pouze tabuli, jsou zde i modernější varianty, např. tablety. [13]

Písemné metody patří také do metod slovních. Především se využívají pro vytváření různých přehledů vyučované látky, při plnění písemných řešení příkladů nebo při zpracovávání domácích úkolů. [13]

Metody předvádění zapojují smysly žáků. Dále se dají dělit na metody přímé, kdy žák pozoruje konkrétní pokusy, předměty apod., a na metody nepřímé, kdy se zkušenost zprostředkovává pomocí obrázků, modelů apod. [13] [14] U těchto

metod je pro žáka vhodnější přímá metoda, protože si žák látku lépe osvojí a uchopí realitu. U nepřímých metod může někdy dojít k desinterpretaci reality pomocí špatného uchopení ze strany žáka. Nepřímé metody se využívají v případě, že není reálná zkušenost možná a v takové situaci by měl učitel dbát na to, aby pomůcka byla dobře okomentovaná a ze strany žáka správně pochopená. [13]

Metody práce s textem jsou velmi důležité pro samostatné získávání informací. V dnešní době při těchto metodách získávají žáci informace z učebnic, pracovních sešitů a z internetu. Zvláště u internetu je důležité učit žáky rozpoznat bezchybné, správné, přesné, a především aktuální informace. [13]

Metody experimentální a pracovní aktivují žáky, protože atraktivita experimentu rozvíjí mimořádně zájem žáků, jejich tvořivé schopnosti a dovednosti. Učí se manipulaci s přístroji, vytrvalosti a pečlivosti, sami zpracovávají informace. [13]

Metody cvičení a opakování nebývají často tak atraktivní, proto se využívají moderní technologie pro zpestření.

Metody her také získávají zájem o zjišťování informací. [13]

3.3 Fyzikální experiment

K základní činnosti fyziků patří pozorování fyzikálních jevů, experimentování a rozbor získaných informací. Následným zpracováváním získaných informací se snaží najít souvislosti a formulovat je v podobě fyzikálních zákonů. Svět kolem nás je však ovlivněn mnoha vzájemně provázanými fyzikálními ději, které není tak snadné podrobně popsat. Kvůli tomu se zavádí tzv. fyzikální experiment (pokus) jako vědecká poznávací metoda, která záměrně navozuje děje se stanovenými podmínkami tak, aby bylo možné experiment za stejných podmínek zopakovat kdykoliv později. [13] [14]

Mezi didaktické funkce experiment můžeme zařadit hned několik. Heuristická funkce, také objevitelská, patří především mezi vědecké funkce pokusů. Stejně tak verifikační funkce, jinak ověřovací, která slouží k dokázání deduktivně odvozeného vztahu či k ověření výsledku úlohy. Motivující funkce slouží k upoutání pozornosti na předmět zkoumání, získání zájmu o nové téma a názorné připomenutí zkušenosti z každodenního života. Většinou se jedná o pokusy s jednoduchými pomůckami. Ilustrační funkce je důležitá pro představu, jak daný jev nebo děj vypadá. Sem patří i vznik stojatého vlnění na vlnostroji. Aplikační funkce slouží k aplikaci teoretických poznatků a historická funkce zdůrazňuje hodnoty těchto pokusů (např. objev zákona na základě předváděného pokusu). Frontální pokusy, laboratorní práce, opakování pokusu, obměna pokusu nebo domácí pokusy slouží jako opakující a prohlubující učivo, které upevňuje znalosti. [14]

Fyzikální experimenty můžeme ve školské fyzice rozlišovat podle různých kritérií. Experimenty rozdělené podle *zaměření* jsou demonstrační pokusy a žákovské pokusy – individuální nebo frontální. Laboratorní úlohy bývají nejnáročnější a bývají kvantitativní. Experimenty rozdělené podle *provedení* jsou reálné pokusy (pravé), které by měly ve výuce převažovat, a pokusy modelové, které

jsou taktéž důležitou součástí výuky. Při modelových experimentech se nahrazuje originál nějakým modelem. Mezi tyto modely patří modifikační modely (kalorimetr, model motoru, zviditelnění trajektorie, transformátor ...), u kterých se zachovává podstata pokusu, transformační modely (vzduchový polštář, rozdělení částic podle rychlostí, model plic ...), které mají odlišnou podstatu od skutečného děje, a simulační modely (interference vlnění, pohyb částic v elektrickém obvodu), které se používají pro analýzu komplexních systémů nesplňujících předpoklady systémů řešitelných analyticky. [13] [14] Experimenty rozdělené podle *logické povahy* jsou kvalitativní a kvantitativní pokusy, kterými zjišťujeme charakteristiky objektů a jevů, následně se pak snažíme zákonitosti mezi nimi formulovat do fyzikálních zákonů. Taková experimentální činnost se nazývá měření. Podle *didaktické funkce* dělíme experimenty na heuristické, motivační, ověřovací, ilustrační, uvádějící fyzikální problém, aplikační, historické a kontrolní – diagnostické. Stejný pokus může mít různé funkce, podle interpretace a zařazení, které si zvolí sám učitel. [13]

Pro povedený experiment je důležitá precizní příprava, správné načasování a samotné provedení. Nejpodstatnější částí je konečné vyhodnocení pokusu. První fází je jasné stanovení cíle experimentu. Primárním obecným cílem je porozumění fyzikální stránce experimentu a porozumění aplikaci těchto poznatků v praxi. Také se cílí na rozvoj logického myšlení a tvůrčí schopnosti, na upevňování zájmu o fyzikální problematiku. Dílčí cíle plynou přímo z konkrétních pokusů a daného obsahu učiva. [13] [14]

Během provedení pokusu by učitel měl dbát na aktivitu žáků. Před samotnou demonstrací experimentu zpravidla probíhá kontrola předpokladů, při kterých má pokus proběhnout. Správně připravený pokus by měl být jednoduchý, názorný, přesvědčivý a pochopitelný. Důležitá je také opakovatelnost experimentu a motivace žáka bádát nad příčinami a okolnostmi děje. Přípravenost učitele se týká především eliminace rizika, že se experiment nevydaří podle předpokladů, a zajištění dobré viditelnosti ze všech míst ve třídě. Samozřejmě během experimentování dbáme na bezpečnost práce. [13] [14]

Jak již jsem zmínila, zhodnocení výsledků by mělo následovat při dokončení každého experimentu. Kvalitativní i kvantitativní zhodnocení můžeme zpracovávat a dál z nich vyvozovat fyzikální zákony. [13] [14]

3.4 Učební pomůcky

Jde o didaktické prostředky, které jsou nosiči didaktických informací o předmětech a jevech ve světě kolem nás a tvoří obsah výuky. Učební pomůcky jsou přímým materiálem, který žákům předkládá skutečnost. Didaktickou technikou pak nazveme nezbytné předměty, zařízení, které umožňují didaktické využití pomůcek, a pomocné prostředky pro experimentální výuku.

Samotné učební pomůcky dělíme podle vnější formy.

- Předmětové učební pomůcky
 - přirozené objekty (přírodniny, didakticky upravené vzorky...)
 - modely objektů (geometricky podobní modely, funkční modely, simulační modely ...)
 - pomůcky pro demonstraci jevů, které jsou dostupné, resp. nedostupné přímému smyslovému vnímání (soupravy pro elektřinu, pomůcky pro modelový pokus ...)
 - pomůcky pro sledování veličin a jejich funkčních závislostí (měřicí přístroje)
- Obrazové učební pomůcky
 - obrazy pro přímá pozorování a symbolická zobrazení (mapy, plakáty ...)
 - obrazy pro statickou projekci (diaprojekce, zpětná projekce ...)
 - dynamická projekce (film, televize, dataprojektor, video ...)
- Zvukové učební pomůcky
 - hudební nástroje
 - záznam hudby (gramofonový, magnetofonový, CD ...)
- Písemné učební pomůcky
 - učebnice, odborná literatura, časopisy, učební texty, pracovní návody ...
- Dotykové učební pomůcky
 - reliéfové obrazy, slepecké písmo ...

[13]

Vhodná učební pomůcka se volí podle mnoha faktorů, především podle finančních možností školy. Pomůcky k danému tématu a cíli výuky musíme přizpůsobit kolektivu, věku, psychickému vývoji, zkušenostem a dovednostem žáků, zkušenostem a dovednostem učitele a podmínkám realizace (např. zatemnění, časová náročnost, promítací plátno). Díky učebním pomůckám se žákům zprostředkovává tzv. princip názornosti, který sjednocuje konkrétní s abstraktním a empirické s teoretickým. Zároveň se podporuje vztah žáka k učení, vytváří motivaci a stimulaci, touhu řešit úkol a podporují žákovu tvořivost a badatelskou stránku. Pomůcky jsou významným zdrojem informací, protože zprostředkovávají učivo názorně a vedou je k chápání podstaty jevu, jsou prostředkem systematizace při spojování osvojených poznatků s těmi novými, pomáhají uspořádat učivo do logických struktur. Obecně přibližují žáky poznatkům ze světa, ve kterém žijeme.

[13]

4 Vlnostroj

4.1 Historie

Původ prvního mechanického vlnostroje se datuje do 50. let 20. století a jeho tvůrce se jmenoval John Northrup Shive. Jde o amerického fyzika a vynálezce fototranzistoru, který žil v letech 1913–1984. Byl vynikajícím učitelem, proto se, mimo jiné, v Bellových laboratořích staral o další vzdělávání zdejších inženýrů. Pro snazší pochopení existence vlnění sestrojil mechanický vlnostroj, na kterém lze demonstrovat základní vlastnosti, jako odraz vlnění nebo vznik stojatého vlnění. Takové poznatky lze pak přenést i na vlnění elektromagnetické. Pro lepší představu je vhodné video *Similarities of Wave Behavior* [15], kde sám Shive popisuje různé pokusy a vysvětluje souvislosti s vlněním elektromagnetickým. Z videa je poznat hrubá konstrukce vlnostroje i experimenty, které na něm lze provádět. Původně je tedy vlnostroj sestrojen z drátu, na který jsou ve stejných rozestupech kolmo přiletovány tyčinky. Zkroucení drátu při vychýlení jedné kolmé tyčinky způsobí, že se torzní vlnou šíří vychýlení na další kolmé tyčinky.

Rychlost vlnění lze odvodit tak, že platí

$$v = \sqrt{\frac{k_T}{I}},$$

kde k_T je torzní tuhost drátu a I moment setrvačnosti použitých tyčinek. Vzorec odpovídá předchozím kapitolám, kde jsme se přesvědčili, že v čitateli se často vyskytuje veličina charakterizující „stav napjatosti“ prostředí (u tyče Youngův modul, u struny síla, u rychlosti zvuku jde o tlak apod.) a ve jmenovateli veličina vyjadřující setrvačnost daného prostředí (u tyče hustota, u struny délková hustota, u plynu znovu hustota apod.). Ve skutečnosti jde ale o složitější vzorce, protože v tíhovém poli Země dochází k disperzi vlnění [16].

4.2 Sestrojení vlnostroje

Podle videa, o kterém mluvím výše, jsem se snažila sestrojít podobný model. Protože jsem si nebyla jistá, zda by přesně stejná konstrukce šla sestrojít pohodlně v prostředí domácí dílny, zvolila jsem obdobnou variantu. Začala jsem dřevěnou konstrukcí z voděodolné překližky, ve které jsou vybroušené mezery pro pohyb jednotlivých tyček. Ve středu této konstrukce je položený obyčejný ocelový svářečský drát o průměru 1.65 mm, na který se navlékly tyčky do mezer. Protože tento drát má velkou torzní tuhost, nebylo možné přenést vzruch z jedné tyčky na další (vlna by se nešířila), proto jsem ho ponechala pouze jako nosný drát, i když přidává jisté tření a zpomaluje tak šíření vlny. Příčné tyčky jsou vyrobené z tyčinky (díl (1) v příloze B) a přidaných dvou bubínků po stranách (díl (2) v příloze C). Dohromady tvoří tedy příčnou tyč (příčná tyč v příloze D), kde každá část je z mosazi. Na každou příčnou tyč jsem nechala přidělat mosaznou destičku se třemi dírkami, (kde prostřední dírka byla o pár milimetrů výše, než zbylé dvě) tak, aby

vznikl rovnoramenný trojúhelník. Touto prostřední dírkou jsem navlékla svařené příčné tyče na dřevěnou konstrukci. Po navlečení bylo nutné zajistit přenos výchylky jedné příčné tyče k další tyči. Zkoušela jsem různé materiály, ale nejvýhodněji vyšla šňůra na prádlo s ocelovým lankem uvnitř. Tato šňůra tedy vede zbylými dvěma dírkami po obou stranách konstrukce, aby se kmit jedné tyče přenesl na zbývající tyče. Abych docílila co nejlepšího přenosu, musela být prádelní šňůra dostatečně napnutá

a zároveň nepřimykala krajní tyče ke kraji dřevěného výřezu. Konce jsme tedy zajistili svorkovnicemi a aby pohyb vlnění byl hladký, použili jsme před první tyč na každém konci ložisko ze stopkové frézy.

4.3 Didaktické pokusy s vlnostrojem

Prvně bych chtěla zmínit, že následující pokusy lze provádět i s jednoduše vyrobeným vlnostrojem, například podle videa National STEM Centre s názvem Wave Machine Demonstration [17]. Vlastnosti vlnění jsou zde názorně ukázány. Předně jde o spojení jednotlivých příčných tyček, aby se rozruch vytvořený jednou příčnou tyčkou přenesl na další. V případě mnou vytvořeným vlnostrojem je to zajištěno pomocí šňůry na prádlo s ocelovým lankem ve svém středu, ve videu je použita lepicí páska. Vychýlením jedné příčné tyčky (špejle s želé bonbonem) se spoj natočí a tím vychýlí další tyčky, dochází k přenosu energie a vzniká vlnění. Jak v praktické části popisuji, vlnění nepřenáší hmotu, tedy tyčky zůstávají na svém původním místě a přenáší se pouze energie. Samozřejmě se dá ovlivnit i velikost amplitudy, podle toho, jak moc se vychýlí první tyčka. Pokud vychýlíme první tyčku rychleji, změní se nám frekvence vlnění, ale rychlost zůstane stejná. Rychlost šíření vlnění ale nejde ovlivnit, je dána parametry, které se dají změnit pouze výrobou jiného vlnostroje nebo změnou materiálu. Pokud bychom oddělali závažíčka na koncích příčných tyček, vlnění by mělo větší rychlost, protože rychlost šíření vlny po vlnostroji závisí na momentu, ve kterém vystupuje hmotnost jako přímá závislost.

Pozorujeme-li chování vlny po odrazení na druhém konci, lze pozorovat dvě varianty. Pokud se jedná o konec neupevněný (volný), odražená vlna bude mít stejnou fázi jako původní vlna. Pokud ale poslední příčnou tyčku uchytneme pevně, odražená vlna bude mít opačnou fázi.

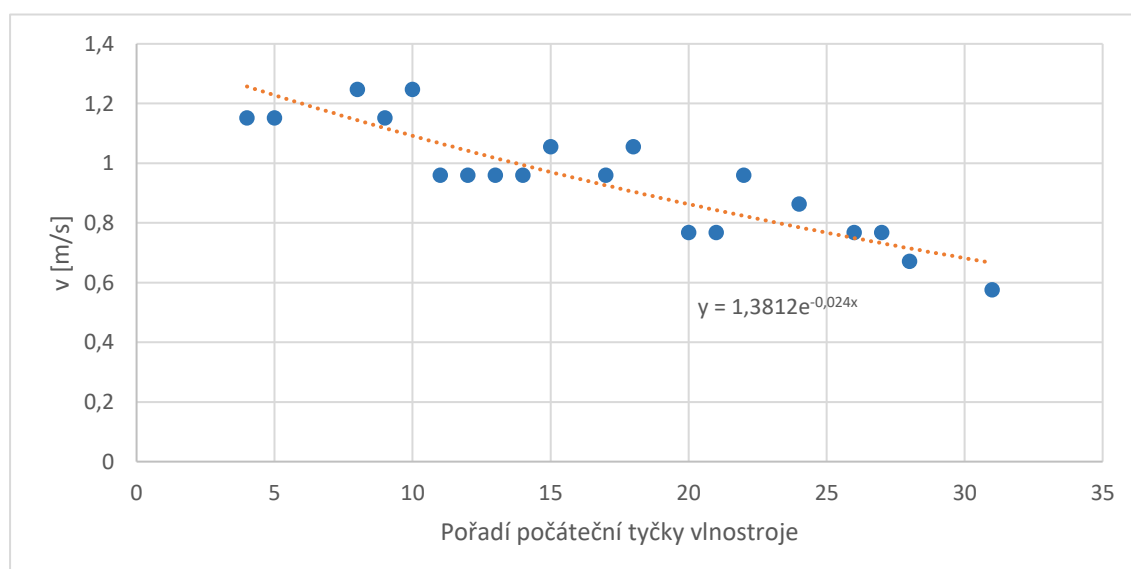
4.4 Výpočty

Při pokusech jsme se s doc. Janem Šlégrem snažili odvodit rychlost šíření vlnění. V příloze najdete video [18], ze kterého probíhalo praktické měření. Měřila jsem dvacetkrát vzdálenost mezi nejvyšší amplitudou v různých místech videa. Podle následující tabulky a grafu je jasné, že se rychlost šíření vlnění bude zpomalovat, čím déle bude vlnění probíhat. Konkrétně nejvyšší hodnoty rychlosti šíření vlnění na začátku vlnostroje byly naměřeny a vypočteny na $1,248 \text{ ms}^{-1}$, nejmenší pak ke konci na $0,576 \text{ ms}^{-1}$. V grafu jsou hodnoty proloženy exponenciální funkcí, podle

kteře je vidět průběh zpomalování rychlosti šíření vlny. Je zde vypočtená i chyba měření, která se mi, vzhledem k podmínkám měření, nezdá tak veliká.

Tabulka 1: měření rychlosti z videa.

pořadí	s [m]	v [m/s]	Δ	Δ^2
4	0,144	1,152	0,2016	0,040643
5	0,144	1,152	0,2016	0,040643
8	0,156	1,248	0,2976	0,088566
9	0,144	1,152	0,2016	0,040643
10	0,156	1,248	0,2976	0,088566
11	0,12	0,96	0,0096	9,22E-05
12	0,12	0,96	0,0096	9,22E-05
13	0,12	0,96	0,0096	9,22E-05
14	0,12	0,96	0,0096	9,22E-05
15	0,132	1,056	0,1056	0,011151
17	0,12	0,96	0,0096	9,22E-05
18	0,132	1,056	0,1056	0,011151
20	0,096	0,768	-0,1824	0,03327
21	0,096	0,768	-0,1824	0,03327
22	0,12	0,96	0,0096	9,22E-05
24	0,108	0,864	-0,0864	0,007465
26	0,096	0,768	-0,1824	0,03327
27	0,096	0,768	-0,1824	0,03327
28	0,084	0,672	-0,2784	0,077507
31	0,072	0,576	-0,3744	0,140175
		$\Delta v = 0,9504$		$\sum \Delta^2 = 0,680141$



Graf 1: Rychlost šíření vlnění na struně odvozené z videa.



7 Měření torzní tuhosti doc. Šlégrem.

Výpočty doc. Šlégra vychází z toho, že k výpočtu teoretické rychlosti vlnění potřebujeme moment setrvačnosti a torzní tuhost. Torzní tuhost je změřená podle obrázku, ze kterého se určí úhel a síla ukázaná na siloměru. Ze známého ramene síly se dá vypočítat moment, protože platí $M = -k_t \varphi$, směrnici grafu je torzní tuhost. Moment setrvačnosti je vypočtena, jako moment setrvačnosti tenké tyčky

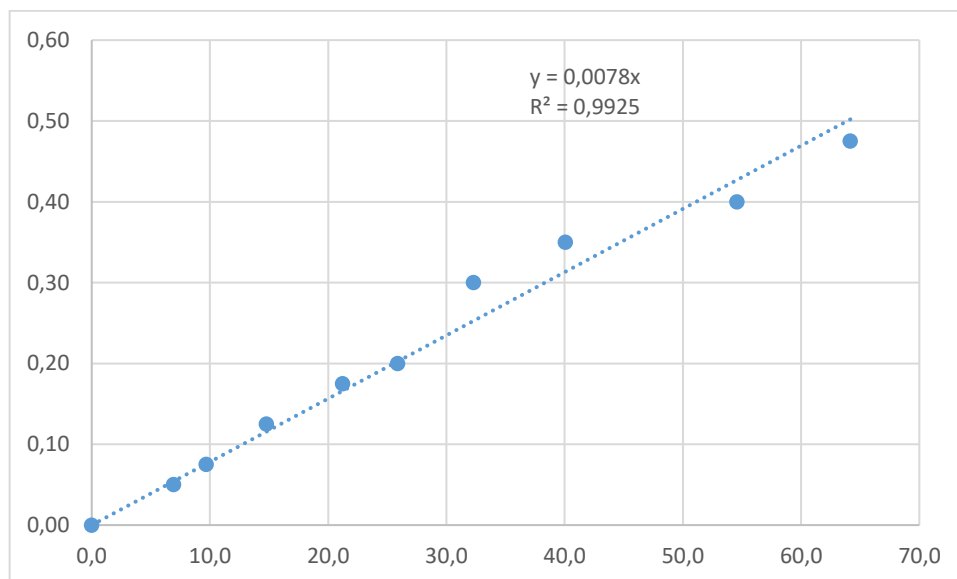
$$J_{tt} = \frac{1}{12} ml^2$$

s přidanými dvěma hmotnými body na konci

$$J_{HmB} = 2mr^2.$$

Tabulka 2: Výpočet teoretické rychlosti šíření vlnění.

úhel	síla	moment	k_t	$\Delta^2 k_t$
0	0	0		
6,9	0,2	0,05	0,0072	8,11E-07
9,7	0,3	0,08	0,0082	1,01E-08
15	0,5	0,13	0,0087	2,70E-07
21	0,7	0,18	0,0086	1,80E-07
26	0,8	0,20	0,0077	2,07E-07
32	1,2	0,30	0,0094	1,51E-06
40	1,4	0,35	0,0088	3,64E-07
55	1,6	0,40	0,0073	7,64E-07
64	1,9	0,48	0,0075	4,18E-07



Graf 2: Závislost úhlu vychýlení na momentu setrvačnosti.

Teoretické odvození rychlosti šíření vlnění tedy vyšlo $v = 1,223985 \text{ ms}^{-1}$, protože předešlé výsledky vyšly podle tabulky 3.

Tabulka 3: Mezivýsledky teoretického výpočtu.

	tyčka	dva hm. body
tyčka m [g]	44,99083	29,5184
I [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0,001134	0,004304

torzní tuhost [Nmrad^{-1}]	0,0078
moment setrvačnosti [kgm^2]	0,005438

Výpočet chyby tedy probíhal podle tabulky 4.

Tabulka 4: Výpočty odchylek a výsledné chyby.

odchylka k_t	3,08 %
odchylka momentu setrvačnosti	6,67 %
celková odchylka	4,87 %
absolutní odchylka rychlosti	0,0596 48

Podle těchto výsledků dojdeme tedy k rychlosti $v = (1,22 \pm 0,06) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což je vzhledem k množství možných chyb očekávaný výsledek. Při srovnání s druhým výpočtem rychlosti, kde jsem vzala největší hodnotu (na začátku poslané vlny, později docházelo ke zpomalování třením) porovnáváme tyto dvě hodnoty $v = (1,248 \pm 0,7) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $v = (1,22 \pm 0,06) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Odchylka u prvního měření je značně větší kvůli zpomalování vlnění během měření, samotná rychlost odpovídá vcelku uspokojivě.

Závěr

Na začátku bakalářské práce se věnuji kmitání pouze okrajově, protože zdrojů k nastudování je mnoho a kmitání není přímým předmětem mé bakalářské práce. Za zmínku ale stálo, protože se od kmitavého pohybu odvozují vlastnosti vlnění a bylo pro mě důležité zmínit rozdíl mezi kmitáním a vlněním.

Vlnění je samotným tělem mojí bakalářské práce. Vyskytuje se ve světě kolem nás a myslím si, že původní záměr Shiveho přiblížit vlastnosti vlnění lidem, kteří se nezabývají fyzikou, byl skvělou myšlenkou. Vlastnosti vlnění se totiž dají převzít ať se jedná o elektromagnetické, zvukové či světelné vlnění. Na podrobnější popis akustických, světelných či dalších jevů týkajících se vlnění mi bohužel zde nezbyl prostor.

Pedagogickou část jsem považovala za důležitou, protože samotná praktická část, sestavení vlastního vlnostroje, se bude v budoucnu používat jako didaktická pomůcka, na které se objasní některé vlastnosti vlnění žákům. V této části objasňuji obecné cíle při výuce, metody výuky a samotný fyzikální experiment spolu s dalšími možnými učebními pomůckami.

Konstrukce samotného vlnostroje byla náročná, protože nešlo sestavit identický vlnostroj bez znalostí materiálů. I tak jsme s některými vytipovanými materiály experimentovali, aby výsledek nejvíce vyhovoval. Variant bylo mnoho, ale nejvíce viditelné šíření vlny bylo ve výsledku, který máte k dispozici. Práce v dílně pro mě byla jistě přínosná, i když byla v některých momentech velice únavná. Zkušenosti při praktické části i následných výpočtů určitě využiji ve svém budoucím studiu.

Kapitola kmitání a vlnění mi je z celé fyziky nejbližší, proto jsem se rozhodla pro toto téma. Experiment mi přišel názorný a pomůcka praktická. Vzhledem k málo zdrojům o vlnostroji jsem se musela ve spoustě věcí inspirovat i jednoduššími modely vlnostroje (např. vlnostroj sestavený z lepící pásky, špejlí a žužu bonbonů), které ale pracovaly na podobném principu, jako mnou vyrobený vlnostroj. Pokusy popsané i pro jednodušší vlnostroj jsou určitě názorné a pomohou komukoliv lépe pochopit vlastnosti vlnění.

Snažila jsem se práci sepsat pochopitelně a při sestavování vlastního vlnostroje jsem si zkusila praktickou práci v dílně i na fyzikálním poli. Doufám, že účel vlnostroje bude využit a neskončí v zapomnění, jako se to málem stalo původnímu vlnostroji vyrobeného Shivem.

Zdroje

[1] VYBÍRAL, Bohumil. *Kmitání a vlnění*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2014. ISBN 978-80-7435-379-6.

[2] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. Praha: Prometheus, 1994. Učebnice pro střední školy. ISBN 80-901619-6-0.

[3] MAIN, Iain G. *Kmitání a vlnění ve fyzice: celostátní vysokoškolská příručka pro stud. matematicko-fyzikálních a přírodovědeckých fakult, skupiny stud. oborů matematicko-fyzikální vědy*. Praha: Academia, 1990. ISBN 80-200-0272-3.

[4] VESECKÁ, Jaroslava. *Kmitání, vlnění a akustika: fyzika pro zahraniční studenty*. 2., nezměn. vyd. Praha: Karolinum, 2011. ISBN 978-80-246-1934-7.

[5] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.

[6] Příčné vlnění. In: *FyzWeb* [online]. ČR [cit. 2020-04-13].

Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/wave/index.html

[7] ESPINOZA, Fernando. *Wave Motion as Inquiry: The Physics and Applications of Light and Sound*. New York: Springer Science+Business Media, 2016. ISBN 978-3-319-45756-7.

[8] KOHOUTEK, Martin. *Fyzika na medicínu: Mechanické vlnění*. [online]. [cit. 2020-04-15].

Dostupné z: <http://www.samouk.cz/moodle/mod/presenter/view.php>

[9] PODOBSKÝ, Jaroslav. *Procházky akustikou: I. část: Kmitání, vlnění, zvukové jevy, akustické útvary*. 13. Národních mučedníků 215, 500 08 Hradec Králové 8: GAUDEAMUS v Hradci Králové, 1999. ISBN 80-86148-28-9.

[10] ČERNÝ, Miroslav. *Mechanické vlnění: stojaté vlnění na struně*. [online]. [cit. 2020-04-15].

Dostupné z: <https://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/labiny/struna.pdf>

[11] REICHL, Jaroslav. *Odraz vlnění v řadě bodů, stojaté vlnění*. [online]. [cit. 2020-04-15].

Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni>

[12] SVOBODA, E., KOLÁŘOVÁ, R.: *Didaktika fyziky základní a střední školy*. Vybrané kapitoly. Učební text UK v Praze. Nakladatelství Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1181-3

[13] ČESÁKOVÁ, Jana. *Moderní přístupy k výuce fyziky* [online]. Univerzita Hradec Králové, 2015 [cit. 2020-08-10].

Dostupné z:

<https://digifolio.rvp.cz/artefact/file/download.php?file=73565&view=11605>

[14] SVOBODA, Emanuel. *Didaktika fyziky: Didaktické funkce experimentů* [online]. 23 [cit. 2020-08-10].

Dostupné z: https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/didaktika/DF_POKUSY.pdf

[15] AT&T Archives: *Similarities of Wave Behavior* (Bonus Edition) [on-line]. [cit. 2020-05-17]

Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DovunOxlY1k>

[16] Skeldon, K. D., Milne, J. E., I. Grant, A. I., Palmer, D. A. *Making waves: A classroom torsional wave machine (Part I)*. *The Physics Teacher*, roč. 36 (1998), 392; <https://doi.org/10.1119/1.879894>

[17] *Wave Machine Demonstration*. National STEM Center [online]. [cit. 2020-08-10].

Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=VE520z_ugcU

[18] *Vlnostroj - Slow Motion* [online]. [cit. 2020-08-08]

Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4RFdRpggbs8&feature=youtu.be>

Přílohy

Příloha A: Článek pro časopis MFI

Shiveův vlnostroj – znovuobjevený klenot výuky vlnění

Anežka Hovorková, Jan Šlégr

Abstrakt: V článku je popsáno několik možností konstrukce Shiveova vlnostroje – jednoduchého zařízení, které umožňuje demonstrovat odraz na pevném a volném konci, stojaté vlnění i odraz vlnění na rozhraní dvou prostředí. Přestože toto zařízení bylo poprvé sestrojeno již v 50. letech 20. století, znovu se v různých obměnách (a pod různými názvy) začalo objevovat na internetu až počátkem století jedenadvacátého.

Úvod

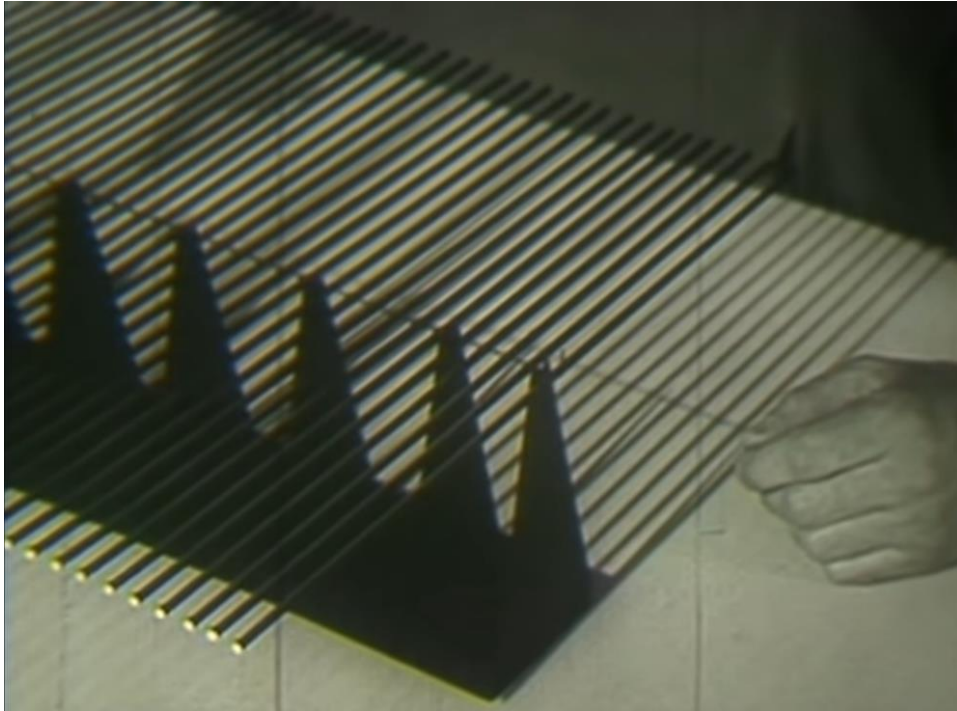
Výuka vlnění (stejně jako například výuka kmitání) umožňuje zařazovat do výuky velmi divácky vděčné pokusy, které pomáhají žákům zvládnout pro ně často náročnou látku. Na mnoha školách lze ve sbírkách najít kupříkladu Machův vlnostroj, který však ve skutečnosti není vlnostrojem, ale soustavou izolovaných kyvadel, která pouze vytvářejí iluzi šíření postupné vlny. S Machovým vlnostrojem tedy není možné demonstrovat kupříkladu stojaté vlnění. To je možné vyřešit např. použitím prádelní šňůry na jednom konci připevněné k laboratornímu stojanu a na druhé straně rozkmitávané reproduktorem [1]. Celek lze buď osvětlit stroboskopem nebo pořídit záznam rychlokamerou v mobilním telefonu (v dnešní době až 240 snímků za sekundu).

Další vlastnosti vlnění (např. odraz na pevném a volném konci) lze demonstrovat např. dlouhou pružinou, ale bylo by vhodné mít jeden přístroj, který umožňuje demonstrovat širší škálu jevů.

Shiveův vlnostroj

John Northrup Shive (22. 2. 1913 – 1. 7. 1984) byl americký fyzik a vynálezce fototranzistoru. V Bellových laboratořích mimo jiné prokázal, že díry se mohou šířit celým objemem polovodiče a nikoli jen po jeho povrchu, jak se v té době předpokládalo. Byl rovněž vynikajícím učitelem a v pozdějších letech měl v Bellových laboratořích na starosti další vzdělávání tamních inženýrů. Aby jim usnadnil pochopení na první pohled abstraktních pojmů jako je impedanční přizpůsobení vedení a antén, sestrojil mechanický vlnostroj, kterým demonstroval základní vlastnosti, které jsou stejné jak pro vlnění elektromagnetické, tak pro mechanické, jako je např. odraz vlnění na rozhraní dvou prostředí, která se liší rychlostí šíření vln, nebo vznik stojatého vlnění. Z této doby rovněž pochází vynikající video *Similarities of Wave Behavior* [2] (Podobnosti v chování vlnění). Z videa je patrná nejen konstrukce vlnostroje a experimenty, které s ním lze provádět, ale i Shiveova velká erudice v předávání poznatků.

Původní Shiveův vlnostroj je tvořen drátem, na který jsou ve stejných rozestupech kolmo přiletovány tyčinky (viz obr. 1, převzatý z videa [2]). Pokud je některé z ramen vychýleno z rovnovážné polohy, zkroucení drátu se šíří jako torzní vlna a způsobuje pohyb dalších ramen vlnostroje.



Obr. 1: Originální konstrukce Shiveova vlnostroje [2]

Pro rychlost vlnění lze v prvním přiblížení odvodit poměrně logický vzorec

$$v = \sqrt{\frac{k_T}{I}},$$

kde k_T je torzní tuhost drátu a I moment setrvačnosti použitých tyčinek. To je v souladu s mnoha dalšími vzorci pro rychlost vlnění, kde v čitateli často vystupuje veličina charakterizující „stav napjatosti“ prostředí (Youngův modul u tyče, síla u struny, tlak u rychlosti zvuku) a ve jmenovateli veličina vyjadřující setrvačnost daného prostředí (hustota u tyče, délková hustota u struny a hustota u plynu). Ve skutečnosti je situace složitější, protože v tíhovém poli Země dochází k disperzi vlnění [4]. Rychlost vlnění je ovlivněna i délkou pružného prostředí, což jsme v naší realizaci vyřešili tím, že jsme pro zjednodušení výpočtů vyrobili vlnostroj s délkou jednoho metru.

Praktické konstrukce vlnostroje

Pokud není k dispozici vhodný drát nebo někdo, kdo si troufne pájet, lze stejných výsledků dosáhnout pomocí dvojice rovnoběžných ocelových kablíků, které procházejí otvory v hliníkových tyčkách (ty jsou na správných místech drženy vnitřky z kabelových svorek, tzv. čokolád). Tato konstrukce je popsána v [4]. Fantazii se meze nekladou, pokud je zapotřebí snížit rychlost vlnění, stačí zvětšit moment setrvačnosti např. přidáním závaží na konce tyček (viz obr. 2).

Poznamenejme ještě, že pokud chceme ukázat pouze postupné a stojaté vlnění, lze vlnostroj sestavit mnohem jednodušším způsobem pouze z lepicí pásky, špejlí a gumových medvídků [5]. V takovém případě ale nelze ukazovat odraz vlnění na volném konci.



Obr. 2: Vlna šířící se směrem k volnému konci po zhotoveném vlnostroji.
Rychlost vlnění byla změřena pomocí rychlokamery jako $v \cong 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Demonstrační experimenty

První experiment využít k upevnění poznatků o tom, jak se chová vlnění na pevném a na volném konci. Pokud po vlnostroji vyšleme jednu vlnu, je dobře vidět, jak se odrazí na volném konci se stejnou fází (tedy vlna, která měla kladnou amplitudu, se s kladnou amplitudou také vrací). Pokud poslední tyčinku vlnostroje fixujeme laboratorní stojanem, při odrazu na pevném konci se fáze vlnění mění na opačnou (vlna s kladnou amplitudou se vrací s amplitudou zápornou).

Pokud podobně jako Shive použijeme jednoduchý motorek (v našem případě bylo použito servo, díky čemuž bylo možné velmi jednoduše měnit frekvenci, se kterou byla rozkmitávána krajní tyčka), lze ukázat vznik stojatého vlnění a chování kmiten a uzlů. Výklad je vhodné doplnit vynikajícím appletem Walter Fendta [6].

Pokud jsou k dispozici dva vlnostroje s různou délkou tyček (a tedy různou rychlostí vlnění), lze jejich spojením demonstrovat děje při dopadu vlnění na rozhraní dvou prostředí: Pokud vlna dopadá na rozhraní dvou prostředí, která se liší rychlostí šíření, dochází jednak k odrazu a jednak k průchodu vlnění do druhého prostředí. I v optice nedochází obvykle pouze k lomu, ale lom je doprovázen i odrazem části světla do původního prostředí (ve výloze obchodu vidíme slabý obraz, i když se díváme do obchodu).

Závěr

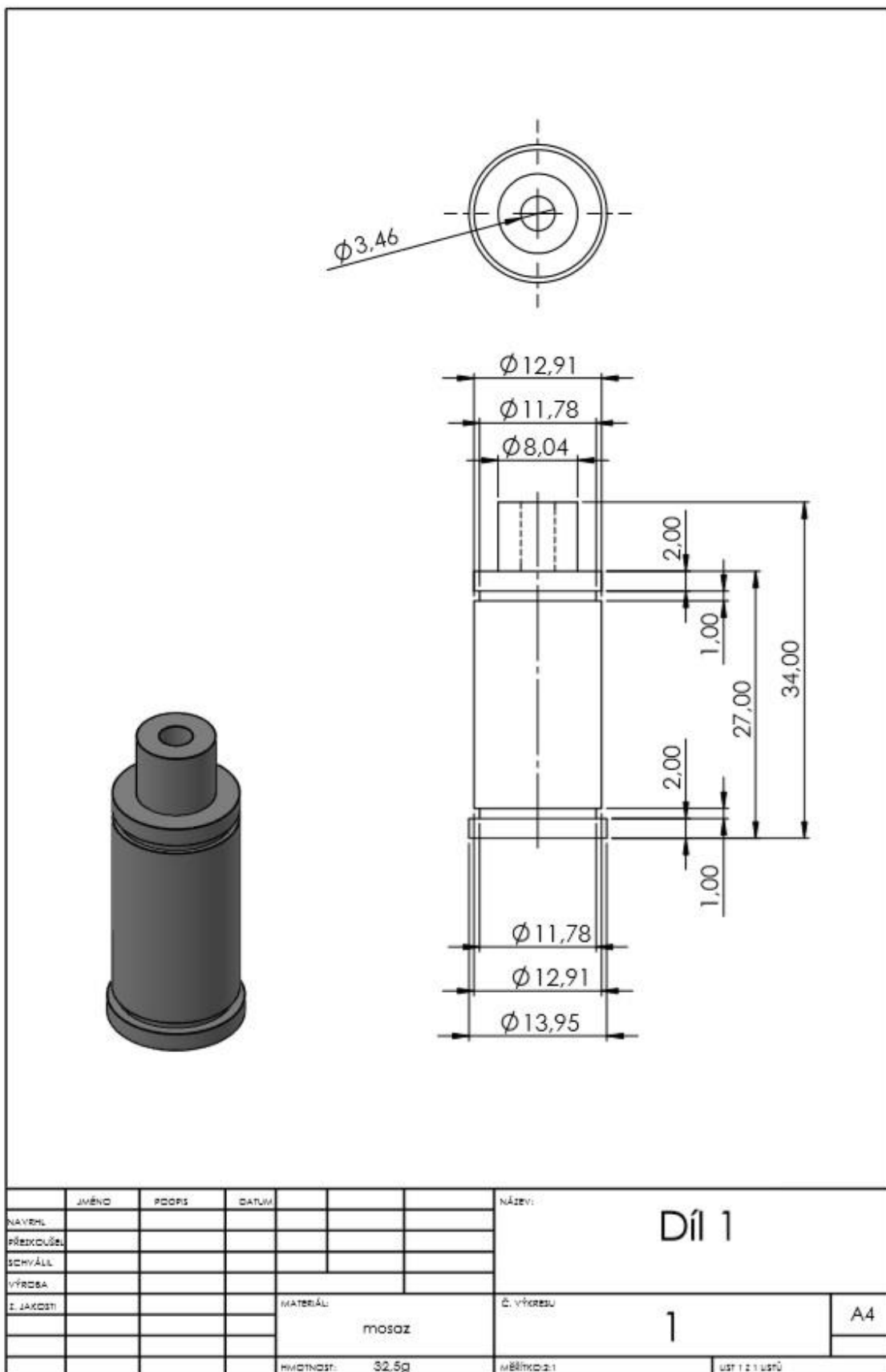
Popsané zařízení lze zhotovit mnoha způsoby a při jeho konstrukci se experimentátor může dostatečně vyřádit. Vlnostroj ilustruje důležité jevy v oblasti šíření vln a lze jej použít i ve výuce optiky i k popisu šíření elektromagnetických vln na vedení.

Na vysokých školách se vlnostroj může stát součástí laboratorních úloh. Torzní tuhost drátu lze měřit pomocí siloměru tahátním za konec kolmého ramene pro různé úhly pootočení, moment setrvačnosti ramen lze vypočítat z jejich rozměrů. Rychlost vlnění lze změřit pomocí rychlokamery.

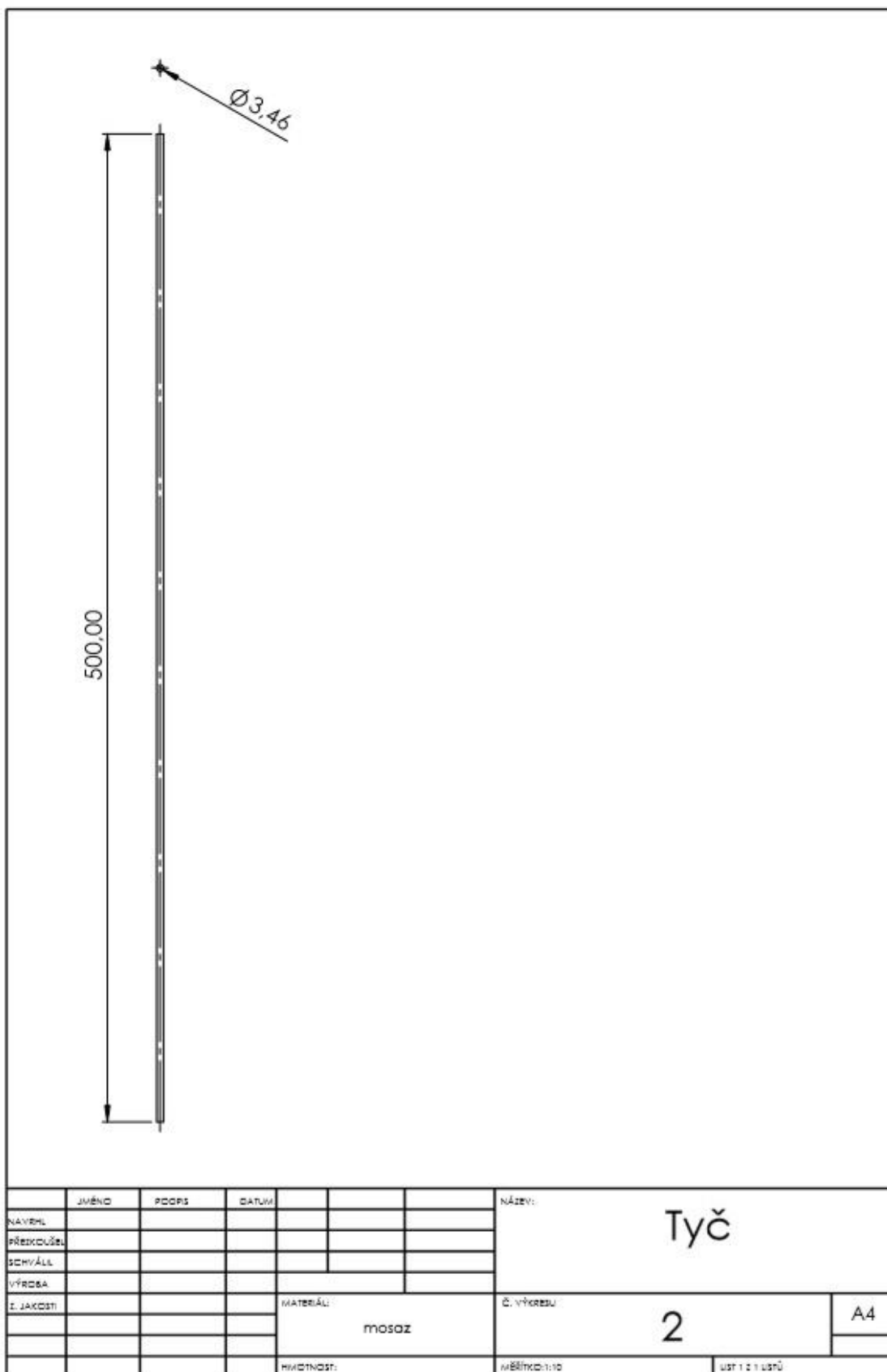
Literatura

- [1] Břízová, L., Křížová, M., Šlégr, J. Jednoduché pomůcky pro výuku vlnění. Matematika-fyzika-informatika, roč. 26 (2017), č. 3, s. 215–219.
- [2] AT&T Archives: Similiarities of Wave Behavior (Bonus Edition) (on-line). Citováno dne 17. 7. 2020
Dostpuné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DovunOxIY1k>
- [3] Burgel, B. A. Dispersion, Reflection, and Eigenfrequencies on the Wave Machine. American Journal of Physics, roč. 35 (1967), 913.
<https://doi.org/10.1119/1.1973631>
- [4] Skeldon, K. D., Milne, J. E., I. Grant, A. I., Palmer, D. A. Making waves: A classroom torsional wave machine (Part I). The Physics Teacher, roč. 36 (1998), 392; <https://doi.org/10.1119/1.879894>
- [5] Wave Machine Demonstration (on-line). Citováno dne 17. 7. 2020.
Dostupné z https://www.youtube.com/watch?v=VE520z_ugcU
- [6] Stojaté vlnění (Vysvětlení složením s odraženou vlnou) (on-line). Citováno dne 17. 7. 2020.
Dostupné z https://www.walter-fendt.de/html5/phcz/standingwavereflection_cz.htm

Příloha B: Díl (1)



Příloha C: Díl (2)



Příloha D: Příčná tyč

