STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST 2014/2015

Obor SOČ: č. 12 - Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

Audionahrávky hry na violoncello jako pomůcka ve výuce akustiky na středních školách

Autor: Anna Korytářová

Škola: Wichterlovo gymnázium

Čs. exilu 669

Ostrava – Poruba 708 00

Kraj: Moravskoslezský

Konzultant: Jan Škrdlík

Frýdek-Místek, 2015

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

Ve Frýdku-Místku dne ……

Podpis: ……

Děkuji svému konzultantu Janu Škrdlíkovi za podnětné rady zejména v začátcích práce. Dále bych chtěla vyjádřit své díky Ing. Michalu Smolánovi, majiteli Asi studia, v němž vznikly nahrávky nezbytné pro tuto práci. Děkuji rovněž Mgr. Janě Gajduškové, která mi umožnila provést v hodině hudební výchovy anketu, a také studentům tříd 5. A, 1. C a 1. D Wichterlova gymnázia, kteří hodiny hudební výchovy navštěvují a stali se respondenty v této anketě.

Anotace

Cílem této práce je to, aby měli studenti středních škol k dispozici přehledně zpracovaný výukový materiál vztahující se k učivu akustiky, proto je učivo shrnuto takovou formou, aby se dalo co nejsnadněji pochopit, a směřuje k aplikaci poznatků z akustiky v praxi u hudebních nástrojů, které mohou dotyční dobře znát. Právě na konkrétním příkladu si studenti probírané jevy zapamatují nejlépe, tudíž byly jako součást práce vytvořeny audionahrávky konkrétních jevů předvedených na violoncellu. V práci jsou také patřičně okomentovány a je vysvětlena jejich fyzikální podstata.

Klíčová slova

akustika; kmitání; violoncello; vlnění; zvuk

Obsah

1 Úvod 6
2 Postup práce 7
3 Výstupy práce 9
4 Závěr 11

1 *Úvod*

Akustika bývá ve školní výuce obvykle zařazena do učiva pojednávajícího o mechanickém kmitání a vlnění. Studenti by se s touto látkou měli setkat v hodinách fyziky na střední škole. Fyzika se však mezi nimi obvykle netěší velké oblibě, většinou proto, že učivu většina pořádně nerozumí. A to může souviset s tím, že jim je někdy podáváno nepříliš záživnou, pasivní formou. Zrovna fyzika je předmětem, v němž jsou mnohdy názorné ukázky klíčem k pochopení a řeknou více nežli nepříliš atraktivní učebnicové definice.

Můžeme prohlásit, že zvuk obecně úzce souvisí s matematikou, což ale může některé také odradit. Probírání akustiky se však rozhodně nemusí stát nudným učivem. Pokud je pojato zajímavější formou než prostým předčítáním z učebnice, nepochybně akustika nebude tak nudnou, jak se na první pohled může zdát. Stačí studentům toto odvětví tolik obávané fyziky přiblížit pomocí něčeho, s čím se mohou poměrně často setkat nebo co dokonce důvěrně znají, tedy hudebním nástrojem.

Autorce připadá ideální využít k tomuto účelu violoncello. Zejména proto, že se jedná o smyčcový strunný nástroj, který se k pedagogickým účelům svými vlastnostmi (rozsahem či různorodostí tónů) dobře hodí a zároveň by veřejnosti nemělo být úplně cizí. Struny a tělo nástroje jsou vhodným objektem pro pozorování kmitání a vlnění. Díky smyčci je možno demonstrovat, jaký dopad mají různé druhy smyků na barvu či hlasitost daného tónu a jak se zvukově liší použití smyčce od brnkání neboli pizzicata. Herní vlastnosti cella zkrátka poskytují celou řadu možností. Autorka navíc hru na violoncello ovládá, o to zasvěceněji se tedy k tématu může vyjádřit.

Tato práce byla vypracována za účelem nalezení co nejnázornější formy výuky základních akustických jevů. Dále si autorka dala za cíl tyto jevy rozebrat z fyzikálního hlediska a zdokumentovat tak, aby si je kdokoli mohl poslechnout.

Součástí práce jsou tedy jednak audionahrávky doprovázené komentáři a v některých případech fotografiemi, ale také studijní text shrnující základy akustiky. Tento text byl napsán tak, aby dané jevy vyložil co nejpřístupnější a nepříliš náročnou formou, ale zároveň kvalitně, aby se na nabytých základech dalo stavět při získávání dalších znalostí o akustice.

Výstupy této práce jsou určeny k využití pedagogy, kteří by ve fyzice chtěli studentům středních škol či gymnázií poskytnout výuku akustiky zábavnější formou, ale mohou ji využít také samouci, kteří by se o akustice sami chtěli něco dozvědět. Práce může pomoci i jako souhrnné opakování probraného učiva v tomto odvětví.

2 Postup práce

Na úplném začátku byl stanoven záměr práce. Autorka si zhruba určila, čeho chce svou prací dosáhnout a jaký bude mít zpracování takové práce význam.

Celková vize byla tato:

Cílem práce je zpracovat přehledný studijní materiál týkající se akustiky na úrovni středních škol a doplnit jej o netradiční multimediální pomůcku v podobě nahrávek akustických jevů demonstrovaných na vhodném hudebním nástroji, za který bylo zvoleno violoncello.

Následovala důkladná rešerše nejrůznějších literárních i internetových zdrojů. Tím se autorka informovala o tom, jak již bylo vybrané téma zpracováno, jaké pomůcky k tomuto učivu jsou dostupné a zda by tedy měl její příspěvek smysl. Bylo zjištěno, že na internetu není moc možností, jak si v českém jazyce nastudovat základy akustiky. Autorka objevila jen několik využitelných webových stránek, které poskytují bližší informace o akustických jevech ve formě přijatelné pro studenta SŠ:

Encyklopedie fyziky. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/150-mechanicke-kmitani-a-vlneni

Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm

Akustika. Dostupné z: http://www.steiner.cz/david/akustika/

Edutorium. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?mn1=100&mn2=431&xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h

V literatuře jsou k dispozici hlavně složitější vysokoškolská skripta, na úrovni SŠ je zpravidla problematice věnováno několik stručných kapitol v učebnici fyziky. V místní knihovně také nebyla nalezena vyhovující publikace. Z toho vyplývá, že tvorba studijního materiálu může být přínosem, zejména pak pro ty, co se v akustice chtějí vzdělávat samostudiem.

Poté byl postupně, za využití internetových (i cizojazyčných) a knižních zdrojů, zpracováván důležitý výstup práce, tedy studijní materiál. Při jeho tvorbě autorka dbala na to, aby akustiku pojímal co nejkomplexněji, a přesto jasnou formou, s velkým množstvím doplňujících názorných obrázků.

Nedílnou až klíčovou součástí práce byla tvorba zvukové učební pomůcky a jejích doplňků. V nahrávacím studiu byly vytvořeny nahrávky vybraných akustických jevů. Dále byly pořízeny fotografie zachycující situaci na nástroji u některých jevů. Následně

byly doplněny komentáři osvětlujícími dění v příslušných nahrávkách z fyzikálního hlediska a obohaceny dalšími postřehy z hudebně interpretační praxe.

Aby nebyla rozebírána jen objektivní stránka hudby a její posuzování fyzikálními metodami, rozhodla se autorka zjistit, jaké fyzikální faktory ovlivňují subjektivní líbivost zvuku. Byla tedy provedena anketa mezi autorčinými spolužáky – účastníky hodin hudební výchovy. Účelem bylo na základě výsledků stanovit hypotézy o vlivu vibrata, alikvótních tónů či rozsahu nástroje na líbivost hudby. Výsledky této ankety malého rozsahu jsou ve výsledném studijním materiálu rovněž zahrnuty. Byly formulovány určité domněnky s tím, že je možné je potvrdit či vyvrátit dotazováním širšího souboru respondentů.

3 Výstupy práce

V rámci práce byl vytvořen studijní materiál shrnující podstatné skutečnosti z učiva akustiky na úrovni středních škol, jež byl rozšířen o další zajímavosti. Popsáno bylo kmitání a vlnění obecně, ale také v kontextu produkce hudby. Účelem byla názornost a výstižné formulace, klíčové vlastnosti výukového materiálu. Ke konci textu jsou navíc uvedeny knihy a webové stránky, které umožňují získávání dalších poznatků o akustice.

Vlnění můžeme také charakterizovat jako přenos energie. Jednotlivé částice hmoty získávají určitou energii, kterou předávají svým sousedním částicím. Existuje několik druhů přenosu této energie. Může se jednat o **příčné vlnění** – částice se zvedají ve vlně kolmo ke směru jejího pohybu. Vzniká při šíření zvuku v pevných látkách.

Obrázek 26 – Příčné vlnění

Dalším typem je **podélné vlnění**, kdy se částice pohybují ve stejném směru jako vlna; nejlépe to lze vidět na obrázku 27. Jako podélné postupné vlnění se šíří zvuk ve vzduchu, jenž se střídavě stlačuje a rozpíná.

Obrázek 27 – Podélné vlnění

Obrázek 1 – Ukázka z vytvořeného výukového materiálu

Studijní materiál byl ovšem doplněn o další komponenty, tentokrát méně typické. Právě ony by měly nejvíce navýšit zábavnost a interaktivnost výuky akustiky.

Vznikly tak zvukové nahrávky akustických jevů, jež byly předvedeny pomocí violoncella. Ve studijním materiálu byly náležitě popsány a okomentovány. Některé z nich byly doplněny také fotografiemi. Mezi tyto jevy náleží například vibrato, spiccato či hra struny při zatlumení ostatních strun. Nechybělo ani stanovení nejvyššího tónu, jenž je možno na nástroji zahrát.

- *Vibrato*

Nahrávka: 6

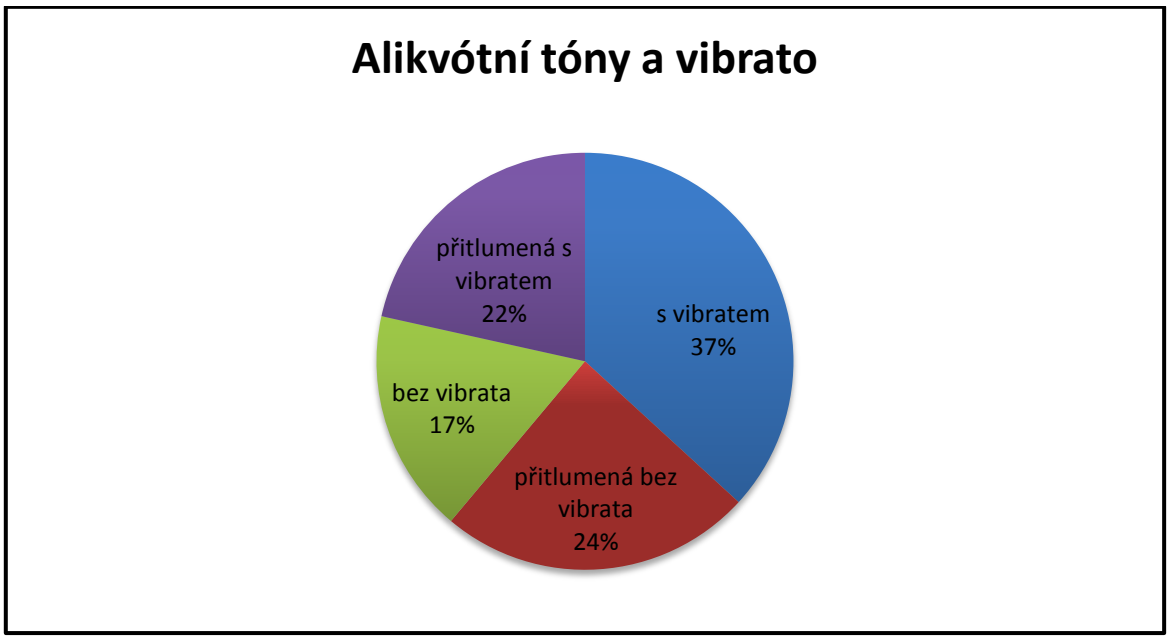
Činnost: Ruka na hmatníku se pravidelně pohybuje tam a zpět

Vysvětlení: Ruka hráče na hmatníku se při hře mírně pohybuje tam a zpět podélně se strunou. Tím se tón dostává chvíli nad čistou podobu daného tónu a chvíli pod něj. Výsledkem je chvějivý zvuk, který získal méně ostrý charakter, je pro lidské ucho příjemnější, a proto je při hře hojně využíván. Vibrato je založeno na principu pravidelné frekvenční změny. V případě, že rukou nevibrujeme, zní pouze plochý, neměnící se tón; neprobíhají žádné změny frekvence ani oscilace.

Obrázek 44 – Vychylování levé ruky při vibratu

Obrázek 2 – Ukázka vysvětlení určitého jevu

Méně podstatnou částí, která však do celého textu také zapadá, je vyhodnocení ankety týkající se libozvučnosti tónů s různými vlastnostmi a jejich vnímání člověkem. Byly vytvořeny grafy a komentáře k nim. V této oblasti byl víceméně ponechán prostor pro další šetření, která mohou přinést komplexnější výsledky. Přesto bylo vytvořeno několik hypotéz, které mají určitý potenciál, jež je možno dále rozvíjet.



Obrázek 3 – Ukázka jednoho z vytvořených grafů

4 Závěr

V rámci této práce byl vytvořen rozsáhlý studijní materiál, jenž zahrnuje přehledně zpracované poznatky o kmitání, vlnění a akustice. Navíc směřuje k akustickým jevům v interpretaci hudby se zaměřením na smyčcové nástroje, konkrétně violoncello. Podstatnou součástí materiálu jsou komentáře k pořízeným audionahrávkám, kde jsou vysvětleny akustické souvislosti v různých typech hry na violoncello. Dalším doplňkem jsou výsledky malé ankety související s vnímáním hudby či odkazy na doporučené zdroje vhodné pro další studium akustické tematiky.

Výsledný materiál má sloužit jako shrnutí akustiky a souvisejících témat přibližně na úrovni středoškolského vzdělání. Je možné jej využít jako doplněk ve školní výuce, zejména pak jeho část týkající se vysvětlení nahrávek. Zmíněné nahrávky mohou sloužit jako zpestření hodin fyziky, zejména z toho důvodu, že ukazují akustické jevy v praxi, a tímto tedy mohou jejich podstatu studentům lépe přiblížit. Autorka však hodlá najít způsob, jak svou práci poskytnout širší veřejnosti a dát tak šanci dozvědět se netradiční formou o akustických jevech praxi také například samoukům.

Základy akustiky

Studijní materiál pro studenty středních škol

Anna Korytářová

Obsah

1 Úvod 3
2 Kmitavý pohyb 4
3 Harmonické řady 9
4 Mechanické vlnění 10
5 Zvukové vlnění a akustika 18
6 Violoncello 31
7 Praktické vysvětlení konkrétních akustických jevů 34
8 Srovnání libozvučnosti tónů 45
9 Závěr 50
10 Rozšiřující odkazy a literatura 51
11 Použitá literatura, zdroje obrázků 52
12 Přílohy 56

1 Úvod

Akustika bývá ve školní výuce obvykle zařazena do učiva pojednávajícího o mechanickém kmitání a vlnění. Studenti by se s touto látkou měli setkat v hodinách fyziky na střední škole. Fyzika je předmětem, v němž jsou mnohdy názorné ukázky klíčem k pochopení a řeknou více nežli suché učebnicové definice, a právě proto byl vytvořen tento studijní materiál.

Tato práce byla vypracována za účelem nalezení co nejnázornější formy výuky základních akustických jevů. Proto je učivo shrnuto takovým způsobem, aby se dalo co nejsnadněji pochopit, a směřuje k aplikaci poznatků z akustiky v praxi u hudebních nástrojů, které mohou být mnohým lidem blízké. Právě z praktických ukázek si studenti probírané jevy zapamatují nejlépe, proto jsou součástí práce audionahrávky konkrétních jevů demonstrovaných na violoncellu. Jsou zde i patřičně okomentovány a rovněž je vysvětlena jejich fyzikální podstata.

Text je určen jednak k využití pedagogy, kteří by ve fyzice chtěli studentům středních škol či gymnázií poskytnout výuku akustiky zábavnější formou, ale mohou ji využít i studenti samouci, kteří se o akustice chtějí něco dozvědět. Práce může pomoci také jako souhrnné opakování probraného učiva akustiky.

Autorce připadá ideální využít k názornému předvedení akustických jevů violoncello. Struny a tělo nástroje jsou vhodným objektem pro pozorování kmitání a vlnění. Díky smyčci je možno ukázat, jaký dopad mají různé druhy smyků na barvu či hlasitost daného tónu a jak se zvukově liší použití smyčce od brnkání neboli pizzicata. Herní vlastnosti cella zkrátka poskytují řadu možností. K práci jsou tedy připojeny zvukové nahrávky akustických jevů, jež jsou předváděny právě na violoncellu, a jejich fyzikální vysvětlení. Malým bonusem jsou rovněž výsledky ankety týkající se vnímání tónů.

Celá tato práce byla napsána tak, aby dané jevy vyložila co nejpřístupnější a nepříliš náročnou formou, ale zároveň i kvalitně, protože na nabytých základech by mělo být možné dále stavět a získávat další znalosti o akustice.

2 Kmitavý pohyb

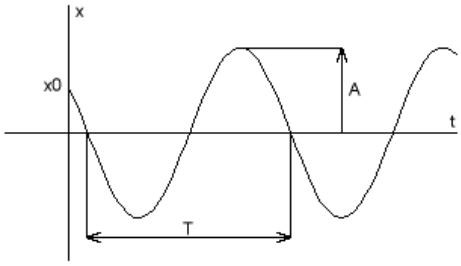
Pohyb obecně dělíme na tři základní části:

- **přímočarý**
- **křivočarý**
- **kmitavý** (jinak také **mechanické kmitání** neboli **oscilace**)

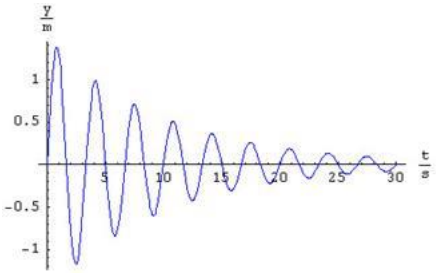
V akustice je podstatný hlavně pohyb kmitavý, neboť jej v případě, že vyvolává sluchový vjem, označujeme jako **zvuk**. Ten vzniká při kmitání jak v pevných, tak i v kapalných a plynných látkách. Kmitající těleso můžeme nazvat též **mechanický oscilátor**.

O kmitání mluvíme v případě, že kmitá **hmota** či **soustava hmotných bodů**. Přítomny jsou zde tzv. **pružné síly**. Příkladem soustavy hmotných bodů jsou různé součásti hudebních nástrojů jako struna (třeba v případě kytary) nebo membrána (u bubnu).

Kmitající těleso se pohybuje kolem určitého bodu, který nazýváme **rovnovážná poloha**. Těleso se pohybuje jak pod úroveň rovnovážné polohy, tak nad ní (křivka jeho pohybu tedy zasahuje do kladných i záporných hodnot). Vlivem setrvačnosti je vždy znova vychýlen na opačnou stranu. Pokud se toto těleso do daného bodu vrací pravidelně, jedná se o **periodický kmitavý pohyb** neboli **harmonické kmitání**. To je i případ strun na strunných hudebních nástrojích. Jedná se však o **nerovnoměrný pohyb**, jelikož rychlost tělesa se v průběhu děje mění. Harmonický pohyb hmotného bodu zavěšeného např. na pružině nazýváme **volné kmitání** (též **vlastní kmitání**), ke kterému nepřispívá žádná vnější síla. V přírodě se zde ovšem uplatňuje tření, které postupně mění pohybovou energii na teplo, tudíž volné kmitání je tlumeno a nakonec zcela ustane.



Obrázek 1 – Periodický kmitavý pohyb (*T* označuje periodu, *A* amplitudu, *t* je čas, *x* výchylka bodu)



Obrázek 2 – Tlumené kmitání

Harmonické kmitání můžeme charakterizovat těmito základními veličinami:

doba periody *T* (také perioda, doba kmitu) – časový úsek zahrnující jeden **kmit**

amplituda *A* (případně **výchylka amplitudy y_m**) – maximální kladná výchylka pohybujícího se bodu od rovnovážné polohy

okamžitá amplituda *y(t)* – vertikální výchylka pohybujícího se bodu v časovém okamžiku t uplynulém od počátku pohybu, s časem se mění v závislosti na funkci sinus (jak je zřetelné také na obrázku 1 na předešlé straně)

Kmitání může představovat fyzikální děj, jenž střídavě mění velikost dané veličiny (např. elektrického napětí, proudu…) v závislosti na čase. Pokud kmitání zakreslíme do grafu, jeho časovým diagramem je **sinusoida**.

Kmit je ovlivněn dvěma veličinami – již zmíněnou dobou kmitu T a **frekvencí (kmitočtem) *f***, jež reprezentuje počet kmitů za sekundu. Její jednotkou je **hertz Hz** (podle německého fyzika Heinricha Hertze), ale můžeme použít i zápis s^{-1}, význam je stejný. Například v běžné elektrické zásuvce je frekvence střídavého proudu 50 hertzů, tj. perioda se zopakuje 50krát za sekundu. Kmitočet je roven převrácené hodnotě periody (jinak řečeno je nepřímo úměrný této veličině):

$$f = \frac{1}{T}$$

Pro výpočet výchylky harmonického pohybu tělesa, které se v počátečním okamžiku nachází v rovnovážné poloze, platí tento vztah:

$$y = y_m \sin \omega t$$

kde

y_m…maximální výchylka amplitudy

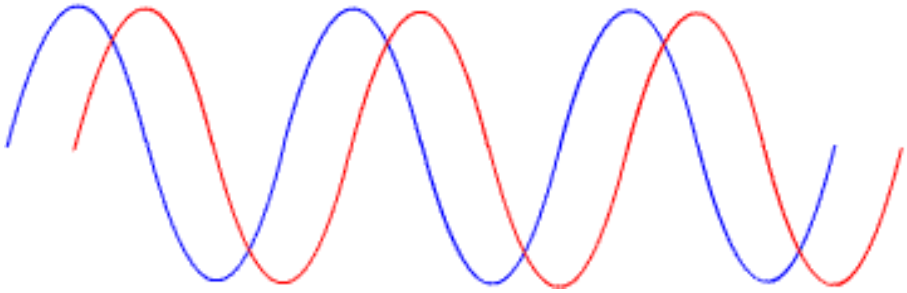
ωt …**fáze kmitavého pohybu**, přičemž t je čas a ω je **úhlová frekvence**, kterou vypočítáme takto:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

kde

f…frekvence (kmitočet)

Fáze kmitavého pohybu se za sebou opožďují o určitý úhel φ a znázornění potom může vypadat tak jako na obrázku 3.



Obrázek 3 – Fáze kmitavého pohybu

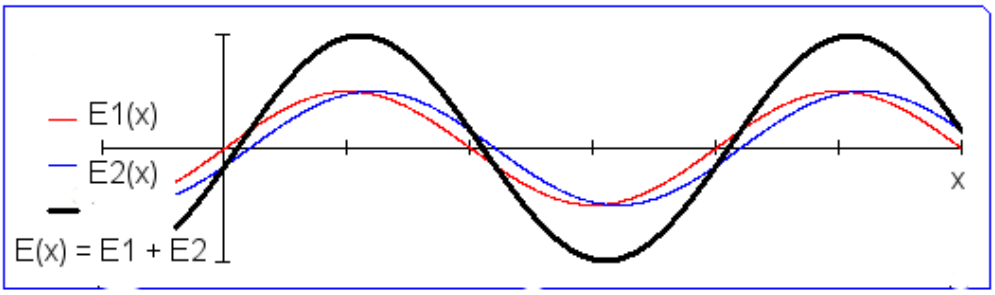
Předměty, které mohou kmitat (souhrnně **oscilátory**), vydávají při úderu či jiném rozpohybování daného tělesa kmitání o tzv. **přirozené frekvenci**, jenž je při úderu vždy stejná. Díky tomu můžeme používat ladičky (nejčastěji s frekvencí 440 Hz, tedy tzv. komorní *a*, jež je často využíváno k ladění nástrojů), u nichž známe frekvenci jejich kmitání, tedy víme i jaký tón vydávají, a můžeme tak podle nich ladit nástroje.

Jestliže mluvíme o strunách hudebního nástroje, můžeme říci, že mezi délkou struny (ta se mění, když hráč na nástroj zmáčkne strunu v určitém bodě) a frekvencí vzniklého zvuku panuje nepřímá úměra – čím kratší struna, tím vyšší frekvence. V praxi to můžeme snadno pozorovat. Čím postupuje hráč po hmatníku nástroje blíže ke kobylce a čím více tak zkracuje kmitající část struny, tím vyšší tón slyšíme.

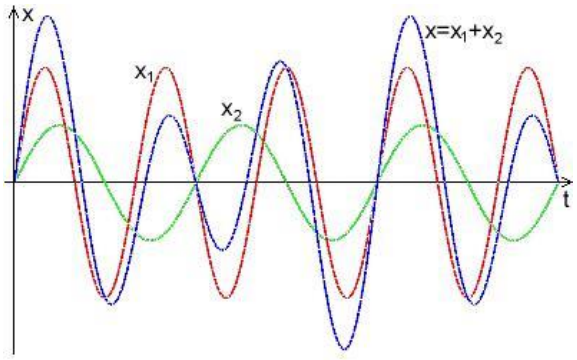
Kmitající hmotný bod disponuje **celkovou energií** $\boldsymbol{E}$, která se skládá ze dvou složek, **energie kinetické** $\boldsymbol{E_k}$ a **energie potenciální** $\boldsymbol{E_p}$. Kinetická energie značí energii pohybujícího se hmotného bodu, kdežto energie potenciální je rovna práci potřebné k vytlačení bodu na danou výchylku.

V případě, že na hmotné body působí vnější síla (nekmitají na své přirozené frekvenci, ta je měněna vnějšími vlivy), vykonávají tzv. **nucené kmity**. Pokud je frekvence vnější budicí síly shodná s frekvencí soustavy, způsobí tím **rezonanci** této soustavy. Rezonance značí dosažení maximální možné výchylky hmoty, případně rychlost kmitání při **rezonanční frekvenci**. Maximum výchylky je nepřímo úměrné tlumení soustavy. Jestliže soustava koná několik nucených kmitů zároveň, dochází ke **skládání kmitů**. V tomto případě jsou kromě obvyklých podmínek výsledné kmity soustavy závislé také na směru, ve kterém vnější síly působí.

Pomocí existence skládaných kmitů je možno vysvětlit, jak vzniká periodické a neperiodické kmitání – za situace, že jsou doby period či frekvence skládaných kmitů v **racionálním poměru** malých přirozených čísel, vzniká periodické kmitání. Naopak **poměr iracionální** je příčinou neperiodického kmitání. Skládání kmitů ovšem složitějším způsobem ovlivňují také fáze kmitání.



Obrázek 4 – Součet dvou kmitání stejné frekvence



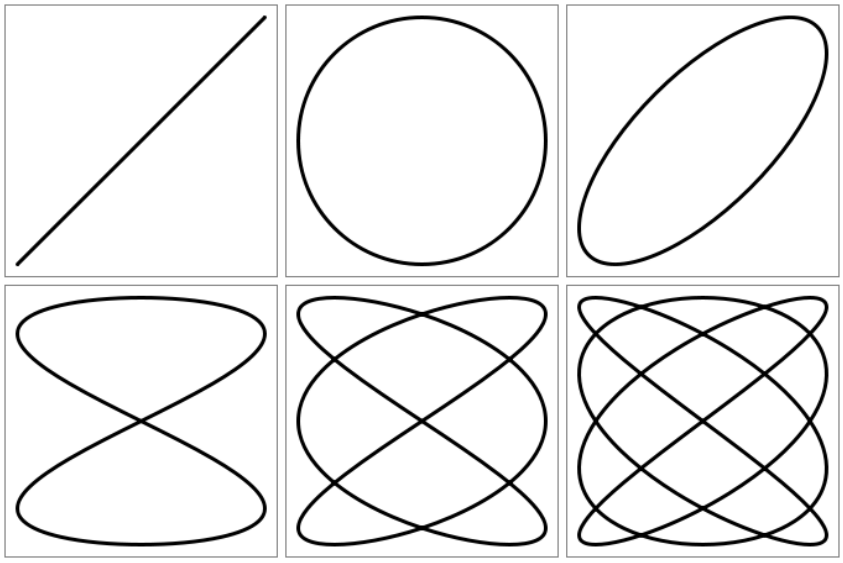
Obrázek 5 – Součet (x) dvou kmitání (x_1, x_2) různé frekvence

Za předpokladu, že dojde ke skládání dvou harmonických kmitání působících ve stejném směru a mající blízké frekvence, vznikají tzv. **rázy** neboli **zázněje**. Někdy bývá akustickou terminologií označován ráz jako kmitání o frekvenci menší než 20 hertzů a zázněj jako rozdílový tón o frekvenci větší než 20 hertzů. Výsledný ráz má také harmonický průběh a jeho frekvenci je možno zjistit pomocí výpočtu aritmetického průměru frekvencí skládaných kmitání. Jestliže se skládají dvě kmitání, vypočítáme tedy výslednou frekvenci následujícím způsobem:

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Rázy fungují jako určitý indikátor rovnosti frekvencí. Ovšem je nutné vědět, že při skládání kmitání se shodnými frekvencemi žádný ráz nevzniká. Lidé rázy velice dobře slyší, což výrazně pomáhá při ladění hudebních nástrojů.

Kmity se však mohou skládat v různých směrech. V grafu kmitání tohoto druhu je výsledkem křivka, která patří do skupiny drah kmitání známých jako **Lissajousovy obrazce**. Na obrázku na další straně je uvedeno několik těchto obrazců.



Obrázek 6 – Lissajousovy obrazce

Soustav hmotných bodů je více druhů. Jednak známe **soustavy se soustředěnými prvky** jako je např. **Helmholtzův rezonátor**. Opakem jsou **soustavy s rozprostřenými prvky** (struna, vzdušný sloupec…).

Obrázek 7 – Helmholtzův rezonátor

3 Harmonické řady

Pokud je skládáno několik sinusových kmitání, jejichž frekvence se rovnají, vznikne vždy jednotné kmitání o této frekvenci. Jestliže ale skládáme kmitání o různých frekvencích, vzniká **složené kmitání**, kde je nejdůležitější součet řady kmitů, jejichž frekvence jsou celistvým násobkem určité **základní frekvence** $\boldsymbol{f}$. Zmiňovanou skutečnost můžeme stručně vyjádřit takto:

$$f_1 = f,\ f_2 = 2f,\ f_3 = 3f,\ \ldots$$

Výsledné kmitání je periodické a jeho frekvence odpovídá základní frekvenci. Jedná se o **harmonickou řadu**. Její části jsou **základní (první) harmonická složka** $\boldsymbol{f_1}$ a **vyšší harmonické složky** $\boldsymbol{f_2}$**,** $\boldsymbol{f_3}$ atd., označované někdy jako **alikvótní tóny**. Tyto složky, případně konkrétní tóny, představují různé intervaly.

Intervaly mezi:

- 1. a 2. harmonickou - oktáva
- 2. a 3. harmonickou - kvinta
- 3. a 4. harmonickou - kvarta
- 4. a 5. harmonickou - velká tercie

Skládání harmonických tónů je označováno **harmonická syntéza** nebo také **superpozice**. Opačný postup, rozklad harmonických tónů, je znám pod pojmem **harmonická analýza**. Pokud je některá z harmonických složek výraznější než ostatní (podílí-li se více na výsledném tónu), nazýváme ji **formant**.

Zvláštním jevem je to, že někdy můžeme slyšet tón o určité frekvenci, která se však v reálu mezi složkami daného tónu nevyskytuje. Představme si tón o frekvenci 110 hertzů, jenž má další alikvóty – 220 hertzů, 330 hertzů, 440 hertzů… I když některá z těchto alikvót chybí, stále je výsledný tón stejného kmitočtu. To samé však platí i v případě, že chybějící složkou je samotná složka s frekvencí 110 hertzů, neslyšíme 220 hertzů, jak bychom očekávali. Klíč je v tom, že kdyby byla výsledná frekvence 220 hertzů, byly by další harmonické složky jiné a rozhodně by neobsahovaly frekvence 330 hertzů či 550 hertzů. Proto se za absence základního tónu složky zformují do takové podoby, že slyšíme tón mající frekvenci 110 hertzů.

Vzájemné uspořádání frekvenčních složek daného signálu nazýváme souhrnně **frekvenční struktura**. Její numerický či grafický zápis je označován jako **frekvenční spektrum**.

4 Mechanické vlnění

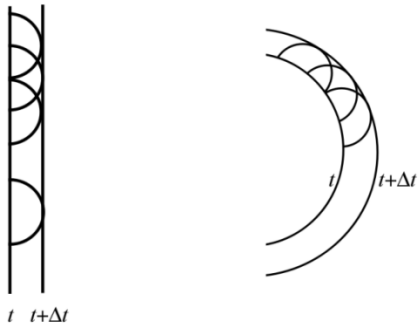
V případě, že soustava hmotných bodů nekmitá jako celek a jednotlivé části se různě vychylují, mluvíme o **vlnění**, případně **chvění** (od vlnění se liší tak, že při tomto ději část hmotných bodů kmitá a část je úplně v klidu). Kmitající soustava má právě jednu rezonanci, kdežto u vlnění jich nalezneme celou řadu. Jestliže má toto látkové prostředí, v němž se vlnění šíří, ve všech směrech shodné fyzikální vlastnosti, nazýváme jej **izotropní prostředí**. Vlnění se zde šíří do všech směrů stejnou rychlostí. Nejjednodušší šíření vlnění je pak v **bodové řadě**.

Dále existuje **prostorové vlnění** neboli šíření vln v různých směrech, které je možno vysvětlit například na situaci, kdy hodíme kámen do vody. Na hladině se vytvářejí kruhy a mohou rozhoupat spadané listy plovoucí na vodě. Šíření vln není šíření látky (zde vody), vlněním je přenášena samotná energie, která pak rozhoupe plovoucí listy. Prostředí se v tomto případě nikam neposouvá.

U vlnění se můžeme setkat s pojmem **vlnoplocha**. Značí geometrické místo bodů v izotropním prostředí, do kterých se vlnění dopravilo za stejný čas z jednotného zdroje, a všechny tyto body kmitají stejně. Rozlišujeme **vlnovou a kulovou vlnoplochu**. První zmíněná je mnohem častější, zdroj vlnění je zde menší než vlnová délka. U rovinných vln, které jsou využívány hlavně v úvahách, je tomu právě naopak.

Obrázek 8 – Typy vlnoplochy (vlevo kulová, vpravo rovinná)

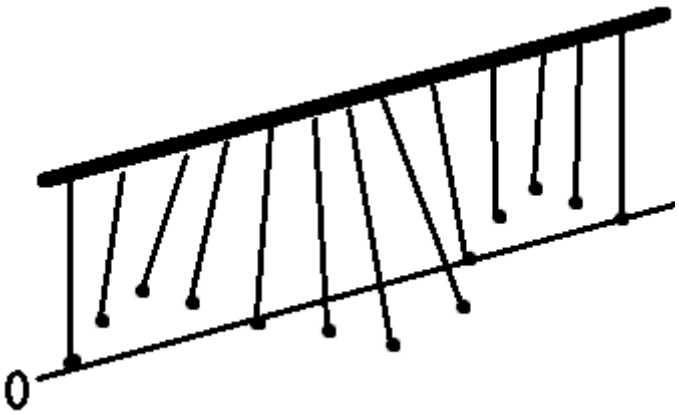
K vlnoploše se rovněž vztahuje tzv. **Huyghensův princip**, který říká, že každý z bodů vlnoplochy je zdrojem vlnění, ze kterého se šíří kulová vlna interferující s dalšími vlnami. Tím vzniká poněkud složitější soustava kulových vlnoploch kolem „hlavního“ zdroje.



Obrázek 9 – Huyghensův princip u rovinné (vlevo) a kulové vlnoplochy (vpravo)

Vlnění probíhá v látkách všech skupenství, jelikož pro jeho šíření je nejdůležitější existence vazeb mezi částicemi dané látky. Jedině díky nim se mezi atomy či molekulami přenáší energie kmitavého pohybu. Prostředí, v němž se vlnění šíří, označujeme jako **pružné prostředí**.

Daný jev můžeme demonstrovat i pomocí známého experimentu s kyvadly – řada kyvadel (můžeme si je představit jako atomy hmoty) je spojena vazbami (představme si je podobně jako chemické vazby mezi atomy). Pokud první z kyvadel vychýlíme z rovnovážné polohy a necháme kmitat kolmo k ose, postupně se pohyb přenáší na další a další kyvadla – vzniká **postupné vlnění příčné**, které postupuje konstantní rychlostí. Kyvadla v pohybu můžeme vidět na obrázku 10. Největší kladnou výchylku někdy nazýváme **vrch** a zápornou **důl**.



Obrázek 10 – Postupné vlnění

Vzdálenost, kterou se vlnění urazilo za periodu T, nazýváme **vlnová délka λ.** Jinak řečeno, je to vzdálenost dvou bodů kmitajících se stejnou fází (tj. se stejnou výchylkou – dobře viditelné na obrázku výše). Definujeme ji vztahem:

$$\lambda = c \,.\, T = \frac{c}{f}$$

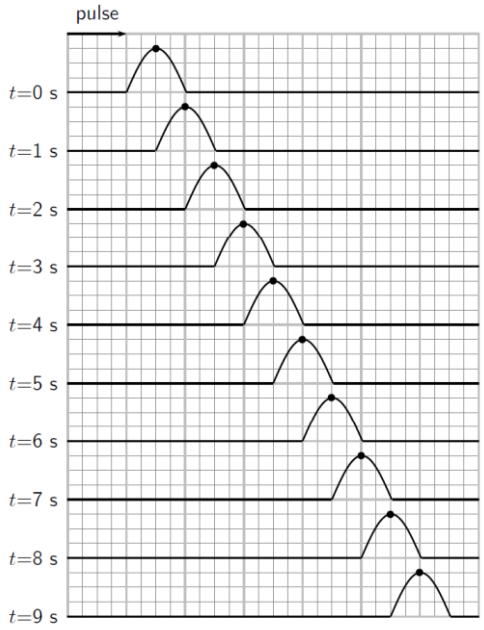
kde

c…rychlost šíření (v m/s)

T…doba periody (v sekundách)

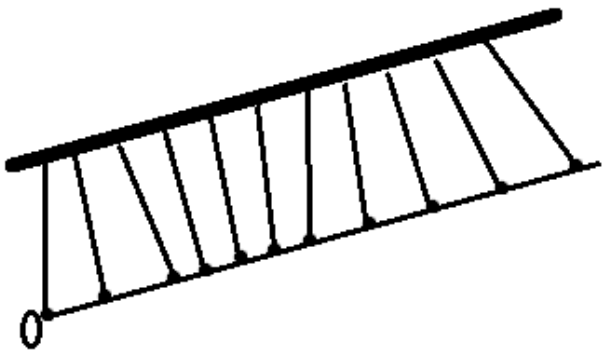
f…frekvence (v Hz)

Na obrázku 11 můžeme vidět vznik postupné vlny. Za povšimnutí stojí, že kmitání všech bodů má stejnou amplitudu a stejnou frekvenci, liší se jen fáze jejich kmitání. Konkrétní bod má také, pokud zaneseme vlnu do grafu, stále stejnou souřadnici *x*, ale mění se výchylka *y*.

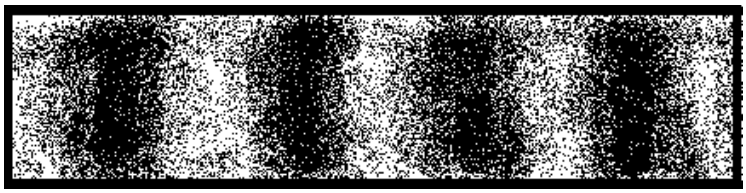


Obrázek 11 – Postupné vlnění příčné znázorněné řadou bodů

Kromě příčného postupného vlnění však existuje taktéž **postupné vlnění podélné** (viz obrázek 12). Vzniká v těch látkách, které vykazují pružnost při změně objemu – můžeme je stlačovat a rozpínat. Právě tímto typem vlnění se v pružných látkách šíří zvuk. Zůstaneme-li u analogie s řadou kyvadel, tentokrát budou kmitat ve směru osy (takže ke svým sousedům a zase od sebe). Jedná se o **zhušťování a zřeďování** bodů poblíž míst s nulovou výchylkou.



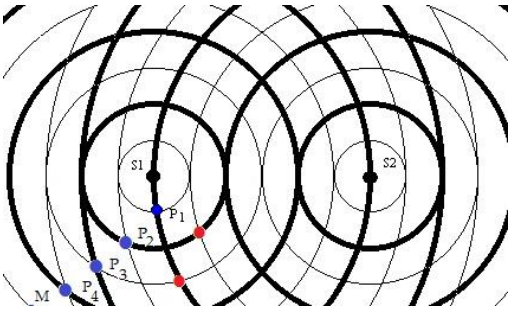
Obrázek 12 – Postupné vlnění podélné



Obrázek 13 – Částice vzduchu jsou vlněním posunovány tak, že vznikají místa s hustší i řidší koncentrací těchto částic

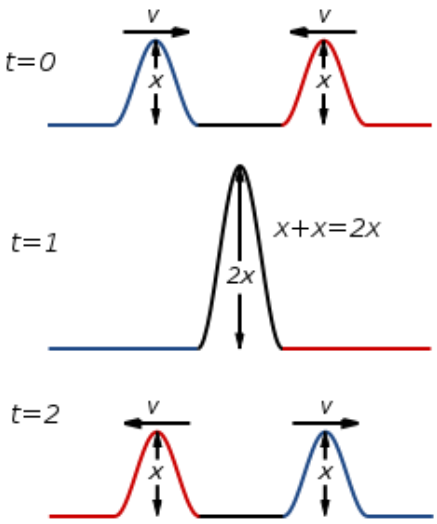
Důležité je, že v pevných látkách se šíří vlnění příčné i podélné, v kapalinách a plynech má tuto možnost pouze vlnění podélné.

Když se vrátíme k příměru s kamenem dopadajícím do vody, můžeme si položit otázku – co se stane, pokud ve stejnou chvíli dopadnou na hladinu dva kameny? Jaký vliv to bude mít na šíření vlnění? Dojde tady ke skládání dvou vlnění nebo také **interferenci**. Amplituda výsledného vlnění je největší tam, kde se setkávají stejné fáze vlnění a nejmenší tam, kde jsou fáze opačné. Tento jev se často týká elektromagnetického vlnění.



Obrázek 14 – Interference vlnění

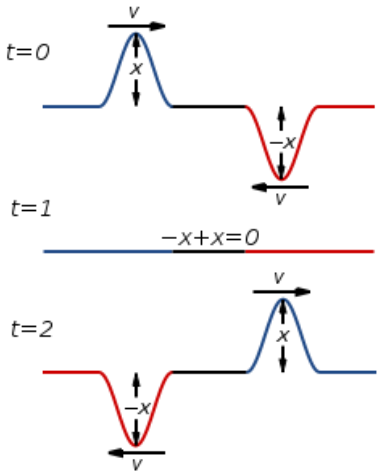
Když se dvě podobné vlny setkají a interferují, je výsledná amplituda v průběhu jejich setkání dvakrát větší než u jedné vlny. Tento děj je patrný z obrázku 15.



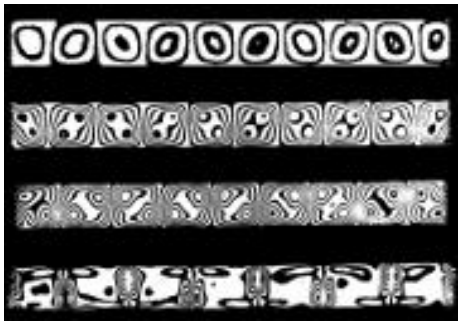
Obrázek 15 – Dvě vlny vlevo před, během a po interferenci

V takovém případě mluvíme o **konstruktivní interferenci**. Známe ještě další typ, se kterým se setkáme v případě, že vlna není orientována nahoru, jako u předchozího obrázku, ale dolů. Jedná se vlastně o to samé, jen obrácené opačným směrem.

Vlny však nejsou obráceny vždy na stejnou stranu. Jedna může mířit nahoru a druhá dolů. Nyní je to **destruktivní interference**. Tentokrát se výsledná vlna nesčítá, ale naopak vyruší, tak jako je to na obrázku 16.



Obrázek 16 – Průběh destruktivní interference

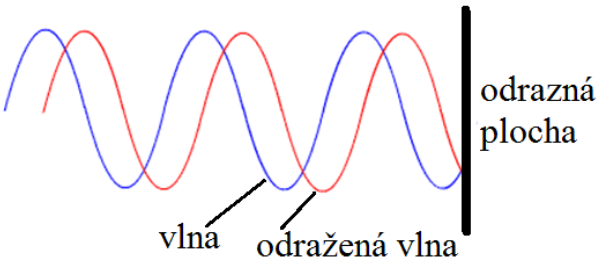


Obrázek 17 – Interferogramy na desce

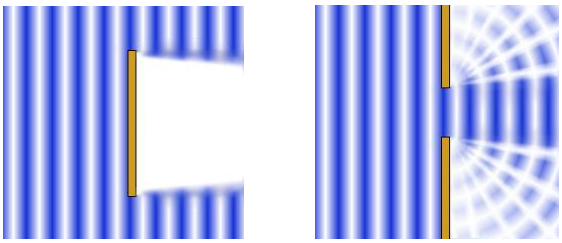
Když položíme prst přesně do středu struny (tzn. ve stejné vzdálenosti od obou úchytů struny), je to právě na **uzlu stojatého vlnění**, což je místo, které je během kmitání struny stále v klidu. **Stojaté vlnění** je důsledkem postupného vlnění – vzniká při interferenci dvou postupných vlnění se stejnými vlastnostmi proti sobě. Na struně se tak ve stejný moment nacházejí místa, která nekmitají vůbec, což jsou zmíněné uzly. Místa naopak kmitající s největší amplitudou nazýváme **kmitny stojatého vlnění**. Uzly jsou od sebe na struně vždy ve vzdálenosti $\lambda/2$ a kmitny jsou vzdáleny $\lambda/4$ od uzlu. Tím, že položíme prst doprostřed struny (hrajeme takzvaný **flažolet**) a strunu rozezníme, získáme tón dvojnásobné frekvence – struna totiž kmitá ve dvou samostatných částech – a tento tón je o oktávu vyšší než prázdná struna. Jedná se také o **první alikvótní tón** (jinak první vyšší harmonický).

Existují rovněž kmitny tlaku, které se nacházejí v uzlech výchylky. Uzly tlaku jsou naopak umístěny v kmitnách výchylky. Průběh **akustické rychlosti** je vzhledem k tlaku posunut o čtvrtinu vlnové délky. Touto rychlostí kmitají částice prostředí, avšak pozor, nejedná se o rychlost šíření vlnění.

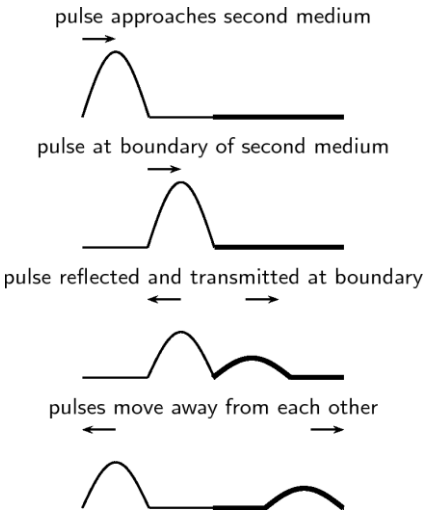
Jestliže vlna doputuje na konec předmětu (označujeme jako rozhraní s jiným prostředím), kterým se pohybuje, známe několik možností jejího dalšího chování, konkrétně čtyři – **odraz** (také **reflexe**, vlna se odrazí a míří zase zpátky), **ohyb** (jinak **difrakce**, jedná se o jakési ohnutí kolem překážky), **transmise** (vlna projde dále do nového prostředí) a **lom** (neboli **refrakce**, probíhá obvykle společně s transmisí, dochází ke změnám rychlosti a směru vlny).



Obrázek 18 – Odraz vlny



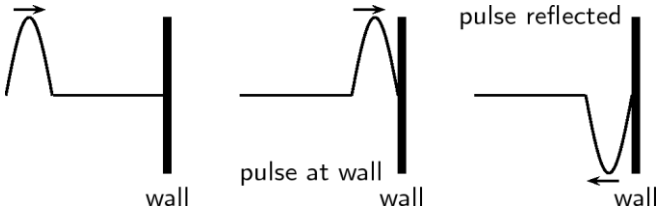
Obrázek 19 – Příklady ohybu (vlevo můžeme pozorovat **akustický stín** – za překážkou, kam se vlnění nedostalo)



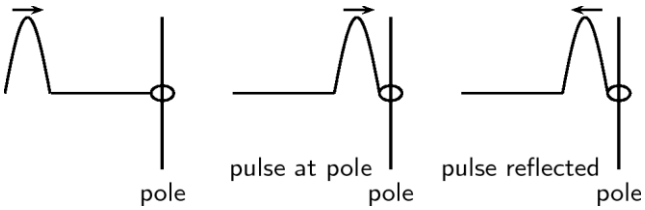
Obrázek 20 – Průběh transmise zároveň s lomem

U odrazu navíc rozlišujeme dva jeho druhy. Setkat se můžeme s **reflexí s uzavřeným koncem** (obrázek 21) či naopak **s koncem otevřeným** (obrázek 22). Z obrázků je velmi dobře patrný rozdíl v odražené vlně – u pevného konce se vlna „obrátí“ dolů. Za poznámku také stojí, že tyč na obrázku, od které se vlnění odráží, by měla při odrazu mírně vibrovat. Vlny na uzavřeném konci jí totiž postupně předávají svou energii (z praxe víme, že vlny – třeba když rozpohybujeme vodu v umyvadle – jsou stále menší a menší, až nakonec přestanou být patrné). V případě otevřeného konce bývá energie předána vzduchu. Chceme-li uvést příklad odrazu v konkrétním případě, může to být u některého z dechových nástrojů – dochází k částečnému odrazu a transmisi.

Někdy vlnění dorazí k parabolicky zakřivené ploše, kde dochází k zaměření téměř veškerého vlnění do jednoho bodu a tím se tzv. amplifikuje. Takže nasloucháme-li u **fokálního bodu**, uslyšíme i zvuky, které bychom za normálních okolností nevnímali (šepot v dálce apod.).



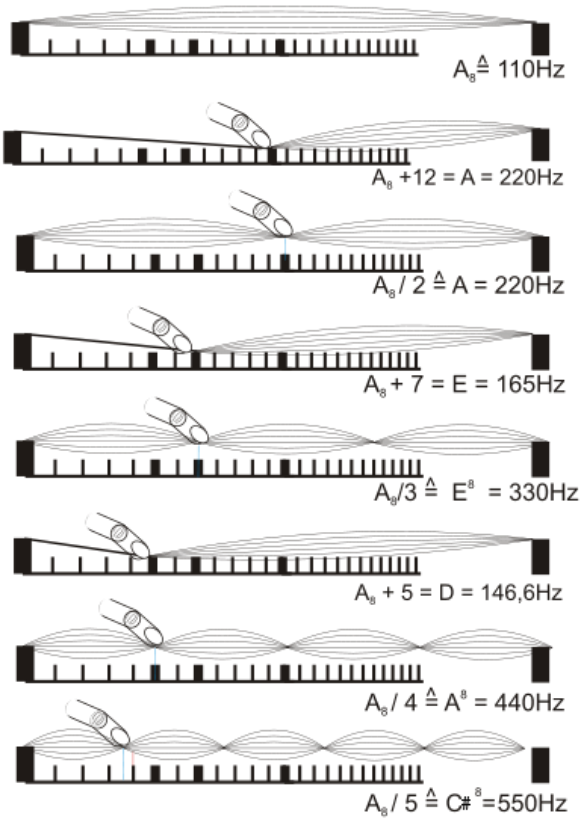
Obrázek 21 – Odraz s uzavřeným koncem



Obrázek 22 – Odraz s otevřeným koncem

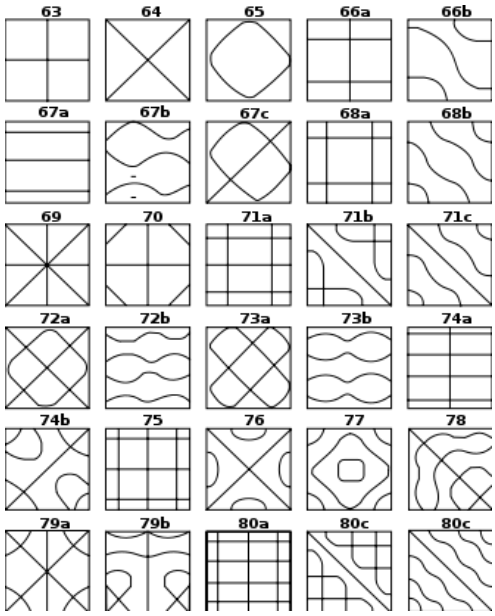
U difrakce zase platí, že čím má vlna větší vlnovou délku, tím výraznější ohyb způsobí. Proto si u zvuků můžeme říci jednoduché pravidlo – hluboké zvuky (mající větší vlnovou délku) jsou schopny se odrazit dále než vysoké zvuky (s kratší vlnovou délkou). V živočišné říši tuto výhodu využívají sloni. Tím, že vydávají zvuky spadající do infrazvuku (tedy pro člověka neslyšitelné), spolu komunikují na velké vzdálenosti. Netopýři naopak vydávají ultrazvuk, neboť je to výhodné pro provádění **echolokace** (detekování jiných živočichů podle odražených vln). Tím, že je u těchto vln malá vlnová délka, je zaručeno, že vlny se budou spíše odrážet než ohýbat.

Stojaté vlnění se však od postupného významně liší tím, že body díky němu kmitají s různou amplitudou a nepřenáší se jím energie, jen se u částic mění polohová energie na pohybovou a zase zpátky. Je to typický jev u hudebních nástrojů. Konkrétně u smyčcových nástrojů se jedná o příčné stojaté vlnění struny, které také označujeme jako **chvění**.



Obrázek 23 – Flažolety, uzly, kmitny a frekvence

Uzly a kmitny však nalezneme nejen na strunách, ale i na deskách (jako třeba na těle smyčcového nástroje) či blánách (např. buben). Pokud daný objekt rozkmitáme a posypeme jej sypkou látkou (písek, nadrcený korek, prášek), tak se tato látka uspořádá do určitého obrazce. Zvolená látka se totiž shromažďuje na uzlech. Vzniknuvším obrazcům se obecně říká **Chladniho obrazce**. Znát vlastnosti různých materiálů je důležité především pro elektroakustiku, hlavně co se týče membrán reproduktorů.



Obrázek 24 – Chladniho obrazce

5 Zvukové vlnění a akustika

Zvukové vlnění je součástí vlnění mechanického. Je předmětem zkoumání vědy zvané **akustika**. Ta má různé podobory:

- **fyzikální akustika** - zabývá se zvukem, šířením, pohlcováním zvuku
- **hudební akustika** - studuje zvuk v kontextu s hudbou a jejími potřebami
- **fyziologická akustika** - zkoumá přijímání zvuků lidským sluchovým orgánem a jeho produkcí v hlasovém orgánu
- **stavební akustika** - řeší akustické podmínky v místnostech a sálech
- **elektroakustika** - zabývá se záznamem zvuku či jeho reprodukcí pomocí elektřiny
- **psychoakustika** - zkoumá procesy, jež se odehrávají v našem vědomí díky působení zvuku
- **geometrická akustika** - řeší putování zvukových paprsků, jež se odrážejí od rozličných druhů ploch

Hudební signály mohou být **přirozené** (hudební nástroj, lidský hlas) i **umělé** (generované elektrickým obvodem). Pokud v akustice mluvíme o **organickém celku**, myslíme tím hráče a nástroj dohromady, neboť propojení nástroje s hráčem se velmi značně promítá do výsledku.

Hudební nástroje můžeme rozdělit na:

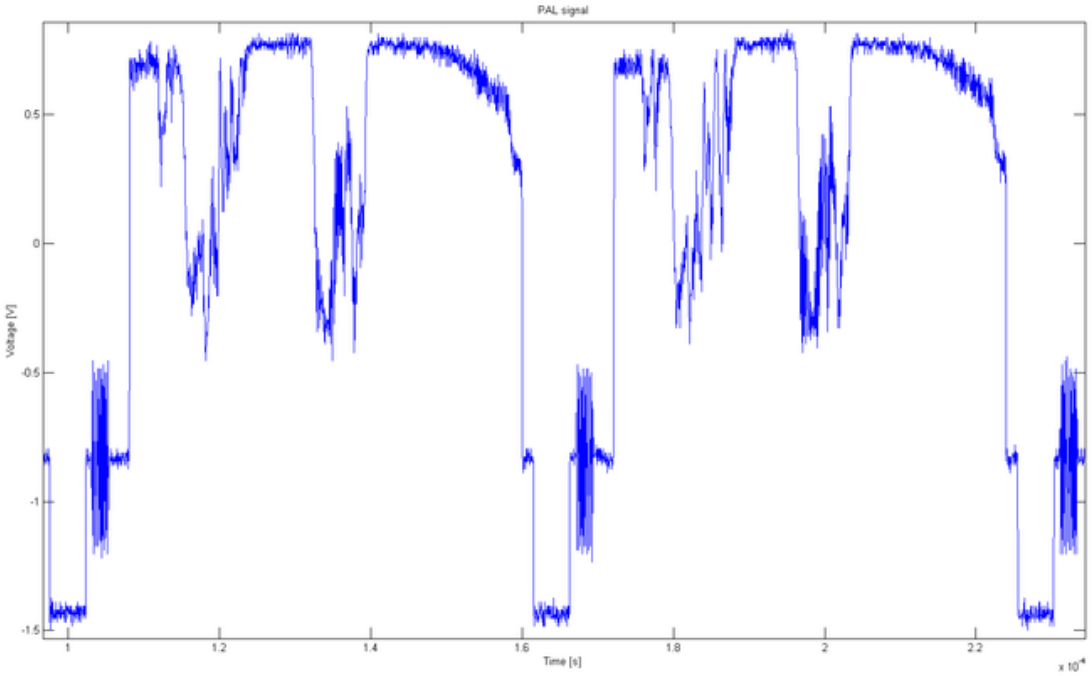
- **chordofony** – strunné nástroje
- **aerofony** – dechové nástroje
- **membranofony** – blanozvučné nástroje (buben)
- **idiofony** – samozvučné nástroje (tyč, trubice, deska)

Každý akustický systém by měl mít tři části:

- **excitátor** (někdy také generátor, budicí mechanismus systému)
- **oscilátor** (kmitající část)
- **rezonátor** (zesiluje a slouží k vyzařování zvuku)

Tabulka 1 – Hudební nástroje a jejich akustický systém

NÁSTROJ	EXCITÁTOR	OSCILÁTOR	REZONÁTOR
housle	smyčec	struna	ozvučná skříňka
kytara	prst	struna	ozvučná skříňka
harfa	prst	struna	ozvučná skříň
klavír	kladívko	struna	ozvučná deska
cembalo	brk	struna	ozvučná deska
flétna	proud vzduchu	vzdušný jazýček	vzdušný sloupec
hoboj	proud vzduchu	třtinový strojek	vzdušný sloupec
trubka	proud vzduchu	rty hudebníka	vzdušný sloupec
tympán	palička	membrána	vzdušná dutina
vibrafon	palička	kámen	vzdušný sloupec
brumle	prst	kovový jazýček	dutina úst
zpěvák	proud vzduchu	hlasivky	soustava dutin



Obrázek 25 – Příklad oscilogramu zachycujícího průběh zvuku

Termínem **zvuk** označujeme mechanické vlnění, jež jsme schopni vnímat sluchem. Vlnění pod touto škálou nazýváme **infrazvuk**, naopak nad ní je **ultrazvuk**. U člověka je vnímání zvuku možné v intervalu asi od 16 do 16 000 hertzů (je to velice individuální, každý člověk může mít jiné rozpětí frekvence slyšitelných zvuků). Psi mají větší rozsah, a to cca 50 až 45 000 hertzů. A delfíni jsou schopni zachytit i zvuky o kmitočtu 200 000 hertzů. To sloni zase mají tento rozsah nezvykle nízko, slyší zvuky o frekvenci 5 až 10 000 hertzů.

Infrazvuk je dobře šiřitelný hlavně ve vodě a někteří mořští živočichové jsou schopni jej zachytit. I když člověk infrazvuk neslyší, může pro něj být nebezpečný, jelikož při frekvenci podobné kmitočtu tlukotu srdce rozhodně není pro lidské tělo prospěšný. Ovšem nevnímání tohoto druhu zvuku má rovněž výhodu – jinak bychom slyšeli nepřetržitý hluk vydávaný prostředím, dokonce i šumění naší vlastní krve.

Ultrazvuk na rozdíl od nás vnímají různá zvířata včetně psů. Je velmi přínosný pro potřeby medicínské diagnostiky (i v mnohých dalších oblastech) – nejznámější využití je u kontroly vnitřních orgánů. Do těla se vysílá ultrazvukový signál o vysoké frekvenci, který se následně odrazí od vnitřností. Jedním z důvodů jeho hojného užívání je také to, že není škodlivý jako rentgenové paprsky. Přesto u něj hrozí různé druhy poškození vyšetřovaného organismu, ať už mechanické (potrhání buněk při určitých frekvencích) či kupříkladu chemické (změny ve struktuře některých důležitých chemických látek, znehodnocení enzymů). Při trvalém vlivu ultrazvuku na organismus může nastat smrt.

Zvuk se šíří výhradně pružným látkovým prostředím, ale nezáleží na skupenství. Nejčastěji se jedná o vzduch, ovšem není vyloučeno ani šíření vodou (na velmi velké vzdálenosti, což je využíváno některými vodními živočichy) i pevnými tělesy.

Rychlost vlny na struně je možno vypočítat pomocí vzorce:

$$v = \left(\frac{T}{\mu}\right)^{0,5}$$

kde

T…síla vychylující strunu v newtonech

μ…lineární hustota struny, kterou je možno zjistit díky vzorci:

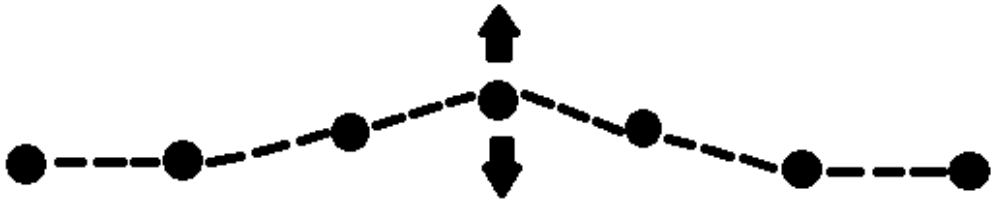
$$\mu = \frac{m}{L}$$

kde

m…hmotnost v kilogramech

L… délka v metrech

Vlnění můžeme také charakterizovat jako přenos energie. Jednotlivé částice hmoty získávají určitou energii, kterou předávají svým sousedním částicím. Existuje několik druhů přenosu této energie. Může se jednat o **příčné vlnění** – částice se zvedají ve vlně kolmo ke směru jejího pohybu. Vzniká při šíření zvuku v pevných látkách.

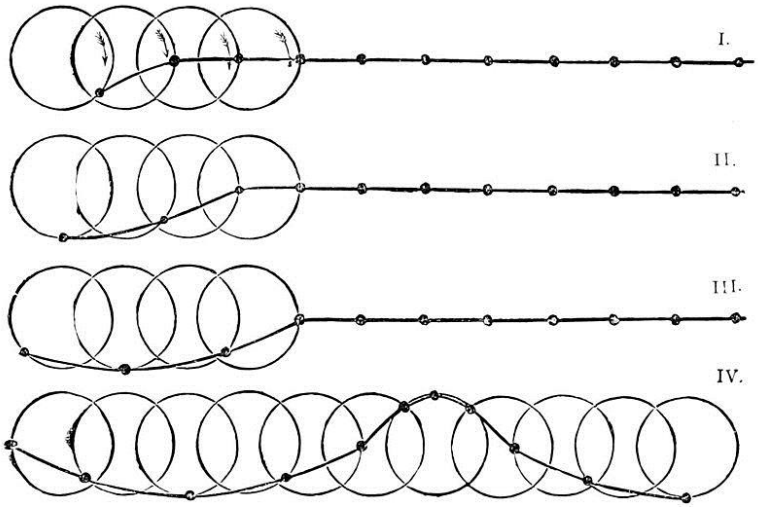


Obrázek 26 – Příčné vlnění

Dalším typem je **podélné vlnění**, kdy se částice pohybují ve stejném směru jako vlna; nejlépe to lze vidět na obrázku 27. Jako podélné postupné vlnění se šíří zvuk ve vzduchu, jenž se střídavě stlačuje a rozpíná.

Obrázek 27 – Podélné vlnění

Také známe **povrchové vlnění**, během jeho průběhu se částice pohybují po kružnici. Tento typ vlnění můžeme zaznamenat na pružině.



Obrázek 28 – Povrchové vlnění

Rychlost zvuku používaná ve výpočtech činí obvykle 340 m/s. Ve skutečnosti však tato hodnota vždy neplatí, neboť záleží na momentálních podmínkách jako je teplota či vlhkost (s tím souvisí i hustota vzduchu, která se na šíření zvuku jistě podepíše).

Můžeme si všimnout, že je značný rozdíl v tom, když dva lidé chytnou strunu a je rozeznívána a když ji jedním z jejích konců připevníme k **ozvučné skříňce** (např. tělo kytary). V druhém případě je výsledný zvuk mnohem hlasitější. Struna totiž přinutí ozvučnou skříňku, aby začala vibrovat na stejné přírodní frekvenci, a tím zvuk umocní.

Zvuková vlna představuje **periodické rozpínání a stlačování** pružného prostředí, ať už se jedná o jakýkoli materiál. Proto můžeme ušima vnímat změny atmosférického tlaku jako určitý zvuk. Čím jsou změny markantnější, tím se více rozkmitá ušní bubínek. Toto je také příčinou známého „zaléhání uší".

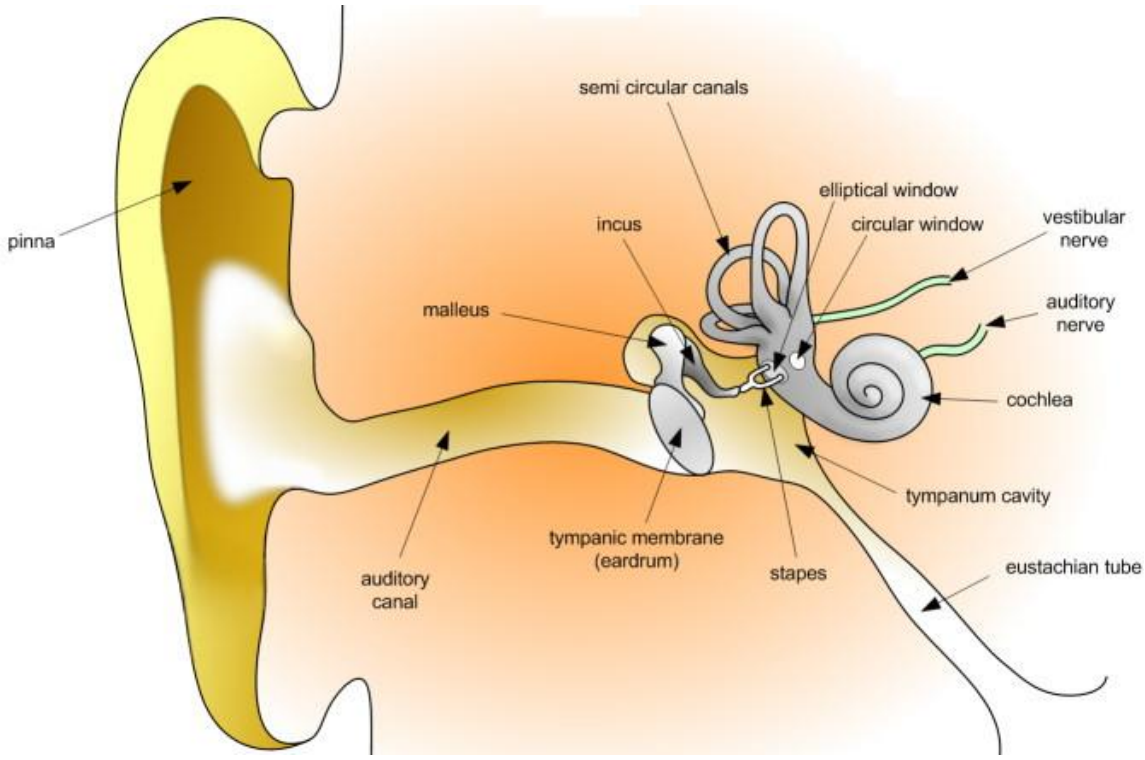
Lidské uši jsou vůbec podivuhodný orgán. Umožňují nám ve spojení s mozkem rozeznávat rozličné vlastnosti zvuku (co to je za zvuk, kdo je jeho původcem, jak je hlasitý). Ucho se skládá ze tří částí – vnější, střední a vnitřní. **Vnější ucho** zvuk zachycuje a vede do dalších částí sluchového ústrojí. Ve **středním uchu** se přemění energie zvukové vlny na vibrace, které zamíří do **vnitřního ucha**. Tam se nacházejí nervy přenášející informace o zvuku do mozku, kde jsou vyhodnocovány. Ve vnitřním uchu se již signál šíří na rozdíl od předchozích oblastí kapalinou.

Pro úspěšnost tohoto procesu jsou nezbytné tři malé kůstky nacházející se ve středním uchu – **kladívko, kovadlinka a třmínek**, společně s drobnou blánou, **bubínkem**. Bubínek vibruje, když do něj narážejí zvukové vlny a ty pak přecházejí v podobě zmíněných vibrací do vnitřního ucha. Zdravý člověk má **binaurální slyšení** – tj. zvuky zaznamenává pomocí páru uší. Díky tomu obecně přijímáme zvuky mnohem lépe, než kdybychom měli k dispozici jen jeden přijímač. Formě vjemu hudebních signálů pomocí sluchu říkáme **percepce**.

K dobrému vnímání zvuků stačí jedno zdravé ucho, ale k orientaci – odkud zvuk přichází, jak je vzdálen apod. – je potřeba dvou přijímačů. **Sluchový vjem** můžeme definovat jako odraz vlastností kmitání v našem vědomí. To jak daný tón vnímáme, záleží na frekvenci, intenzitě a také délce trvání vjemu. **Absolutní výška** označuje výšku tónu, jehož frekvence je dána frekvencí čistého tónu, u něhož při našem subjektivním posuzování detekována stejná výška. Má-li někdo **absolutní sluch**, znamená to, že umí spolehlivě a přesně určit výšku tónu. **Relativní výšku** zase vnímáme při posuzování vzdálenosti (intervalu) mezi dvěma tóny, **relativní sluch** tedy znamená, že je člověk schopen určit konkrétní interval.

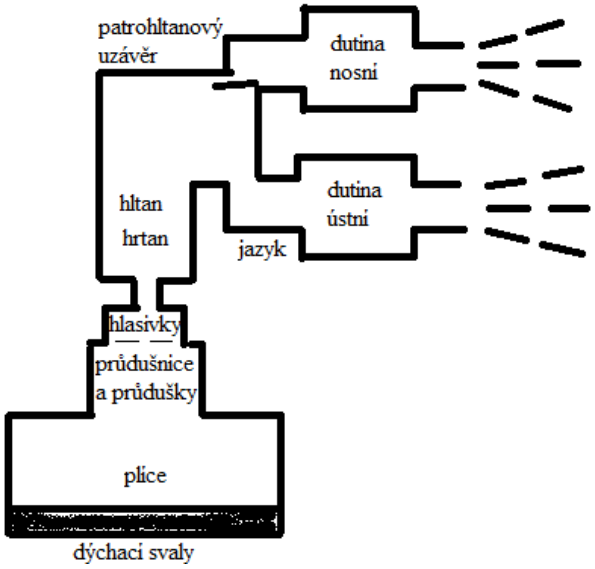
Zvuky posuzujeme **subjektivně** (výška, hlasitost, barva – faktory závislé na ostatních) a **objektivně** (frekvence, amplituda, intenzita, časový průběh – faktory nezávislé na ostatních). To, jakou výšku tónu slyšíme, je určeno vztahy mezi frekvencemi jednotlivých vyšších harmonických složek, nikoli nejnižší ze souboru složek (takto to funguje jedině u ideálního celočíselného uspořádání).

Obvykle dokážeme sluchem rozlišit nebo alespoň odhadnout, jaký nástroj slyšíme. Podivné však je, že klíčové jsou pro nás takové faktory jako nasazení tónu (s hluky a šumy vydávanými například smyčcem) a hlasitostí v jeho průběhu (třeba u klavíru je typické, že na začátku zní prudce a pak postupně utichá). Bylo to prokázáno tím, že lidem byly pouštěny nahrávky tónů s tím, že začátek nezazněl. Nástroje pak tito lidé poznávali hůře, než když mohli slyšet také ruch provázející začátek.



Obrázek 29 – Lidské ucho

Lidský hlas vzniká podobně jako zvuk v jazýčkové píšťale. V hrtanu jsou dvě pružné blány **hlasivky**, které jsou při hovoření a zpívání napnuté tak, že je mezi nimi úzká hlasová štěrbina. Proudem vzduchu z plic se hlasivky rozkmitají, čímž v prostoru na jejich druhé straně vzniká pravidelné kolísání tlaku vzduchu. To se šíří přes ústa do okolí v podobě zvukového vlnění. Výška hlasu závisí na délce hlasivek (u mužů asi 18 milimetrů, u žen asi 12 milimetrů) a jejich napínání, které se působením příslušného svalstva může měnit. Tyto hranice určují výškový rozsah lidského hlasu, který se rovná asi dvěma oktávám, které mohou být u různých osob v různých polohách. Významný podíl má také rezonance. Rezonátor některé frekvence zesiluje, jiné potlačuje. Pomocí **artikulace** měníme tvar, velikost a vzájemný poměr prostorů, v nichž k rezonanci dochází, a tím i výsledný zvuk. Základní zpěvné hlasy jsou **soprán, alt** (ženské), **tenor, baryton a bas** (mužské).



Obrázek 30 – Hlasové ústrojí

Zvuk vzniká chvěním pružných těles, které proniká do okolního prostředí, rozhýbává jeho molekuly a díky tomu se šíří jako podélné postupné vlnění. Například vzduch můžeme označit za nezbytný, neboť ve vakuu (tedy za absence molekul vzduchu) nemá zvuk šanci se šířit. Hudební zvuky nebo tóny bývají periodické, pokud je však zvuk neperiodický, jedná se o **hluk**. Zajímavé je, že pokud tento poznatek uplatníme při sledování průběhu lidské řeči, zjistíme, že samohlásky (periodické) můžeme označit za tón, ovšem souhlásky (neperiodické), jsou vlastně hlukem. Pojem **komplexní tón** vyjadřuje sice periodický signál, který však nemá sinusový průběh a vzniká hluk či šum.

Hudební nástroje, zejména dechové, pracují při tvorbě zvuku se **vzduchovým sloupcem**. U flétny můžeme říci, že je tento sloupec celkem přímý, oproti tomu u lesního rohu je kovová trubice tvořící nástroj výrazně zakroucená. Konec dechového nástroje je otevřen, aby mohl volně vibrovat. Jiné je to však v místě, kde hráč nástroj rozeznívá nástroj. Jestliže jsou oba konce nástroje otevřené, mluvíme o tom, že využívají **otevřený vzduchový sloupec** (jako zmíněná flétna). Proto budou oba konce vibrovat, neboť se zde nacházejí kmitny.

Obrázek 31 – Kmity v otevřeném vzduchovém sloupci (zleva 1., 2. a 3. harmonická)

Ovšem nástroje s **uzavřeným vzduchovým sloupcem** (žesťové nástroje) mají u uzavřeného konce uzel a u otevřeného konce kmitnu. U takovéhoto typu sloupce se nevyskytují sudé harmonické složky, neboť kvůli uzlu u uzavřeného konce to zkrátka není možné.

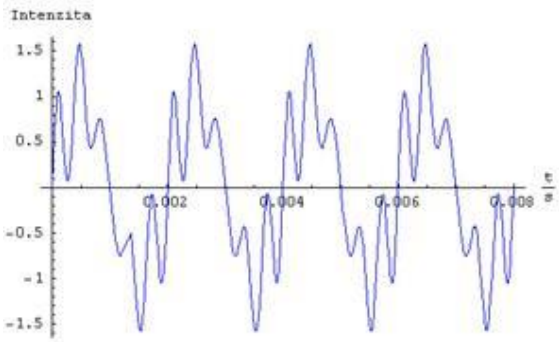
Obrázek 32 – Kmity v uzavřeném vzduchovém sloupci (zleva 1., 3. a 5. harmonická)

Někdy se můžeme setkat se známým jevem jménem **ozvěna**, jenž je způsoben odrazem zvuku od rozsáhlejší překážky. Je způsoben vlastností lidského sluchu, jelikož rozlišíme dva po sobě jdoucí zvuky (interval asi 0,1 s). Vzniká však pouze za určitých podmínek – záleží na vzdálenosti od překážky. Někdy ozvěnu provází i **dozvuk**, který může za delší trvání zvuku. Proto je potřeba velké místnosti, jako třeba sály určené hudební produkci, projektovat s ohledem na tyto faktory, které mohou rušit a zkreslovat zvuky. Opakem dozvuku je **názvuk**, během kterého dochází k nárůstu hustoty zvukové energie v prostoru do ustálené hodnoty.

Někdy se setkáme s pojmem **„vřelost zvuku“.** Vzniká tak, že doba dozvuku je mírně delší a pod frekvencí 250 hertzů. **Světlost zvuku** (neboli **brilance**) také značí nárůst dozvuku, ale tentokrát nad 2 kilohertze.

V koncertních sálech si můžeme povšimnout, že na stěnách bývají spíše hrubší než hladké materiály. Je to kvůli tomu, že od hladkého povrchu se zvuk odráží takovým způsobem, že se nám bude zdát téměř ztracený. Ovšem v případě stěn pokrytých hrubým materiálem je zase šíření zvuku takové, že nám bude naopak připadat, jako by jej místnost byla plná.

Výška tónů je vždy určena jejich frekvencí. Vyšší tóny mají tuto veličinu větší – zvukové vlny narazí na náš ušní bubínek vícekrát za sekundu. Pokud současně probíhá více harmonických kmitání s rozdílnými frekvencemi, absolutní výška výsledného tónu je určena frekvencí nejnižšího kmitání. Ostatní složky tónů jsou nazývány **vyšší harmonické tóny** a dotvářejí charakter tónu, **barvu** neboli **témbr**. Barva je naše subjektivní představa vnímání zvuku a u smyčcových nástrojů je ovlivněna i šumem. Pokud obsahuje tón jen jednu frekvenci, říkáme, že zní velmi čistě (je to **jednoduchý tón**, ten s dalšími složkami označujeme jako **složený tón**). S přibývajícími složkami nám připadá bohatší, musí ale být ve vhodném matematickém poměru.

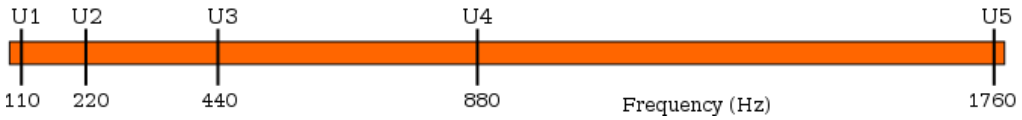


Obrázek 33 – Graf průběhu složeného tónu

O tom, které vyšší harmonické frekvence budou převážně zastoupeny ve výsledném zvuku, rozhoduje velkou měrou to, jak nástroj rozezníváme. Záleží na tom, jestli strunu vybudíme smyčcem, brnknutím nebo třeba úderem kladívka. Při užití tvrdšího budiče struny bývá zvuk velmi ostrý, naopak pokud ji uvedeme do kmitavého pohybu prstem, bude jemnější.

Někdy zaznívá více tónů naráz – **akord**. Ten nám může znít příjemně a libozvučně, ale jiný zase vyzní velmi neharmonicky. Záleží na tom, jaké jsou mezi tóny akordů **hudební intervaly**, které jsou vyjádřeny poměrem mezi frekvencemi dvou tónů. Asi nejznámější „příjemný" akord je **oktáva**, kde je poměr frekvencí 2:1 – oktáva má dvojnásobnou frekvenci prvního tónu **primy**.

Když si graficky znázorníme rozestupy frekvencí a rozestupy intervalů, zjistíme, že mezi frekvencemi oktáv jsou různé vzdálenosti, ale intervaly jsou shodné jednotky. Proto také intervaly existují, protože shodné vzdálenosti mezi oktávami mnohem přesněji odpovídají tomu, jak tóny slyšíme my.



Obrázek 34 – Grafické znázornění rozestupů frekvencí oktáv

Obrázek 35 – Grafické znázornění rozestupů intervalů

V tabulce 2 jsou vypsány základní intervaly do oktávy a názorně popsané vzdálenosti mezi tóny. Existují ještě vyšší intervaly (nona, decima, undecima…), ale nejsou příliš časté. V tabulce však ani tak není vyčerpávající výčet. Intervaly dělíme na **čisté** (**prima, kvarta, kvinta, oktáva**), **malé a velké** (do obou patří **sekunda, tercie, sexta a septima**). Čisté intervaly mohou být zvětšené či zmenšené (s **křížkem nebo béčkem**), malé intervaly však můžeme pouze zmenšit (béčkem) a velké jedině zvětšit (křížkem). Takové intervaly nazýváme **alterované (změněné) intervaly**.

Tabulka 2 – Intervaly do oktávy

název intervalu	vzdálenost od 1. tónu ve stupnici	příklad ve stupnici C dur
prima	= vzdálenost prvního tónu	(c - c)
sekunda	= vzdálenost druhého tónu	(c - d)
tercie	= vzdálenost třetího tónu	(c - e)
kvarta	= vzdálenost čtvrtého tónu	(c - f)
kvinta	= vzdálenost pátého tónu	(c - g)
sexta	= vzdálenost šestého tónu	(c - a)
septima	= vzdálenost sedmého tónu	(c - h)
oktáva	= vzdálenost osmého tónu = oktáva + prima	(c - c)

Ještě podrobnější výčet intervalů si můžeme prohlédnout v tabulce 3. Nejlépe nám obvykle zní intervaly čisté, jak napovídá už jejich název.

Tabulka 3 – Kompletní přehled intervalů

tóny	intervaly	ekvivalentní intervaly
his = c	zvětšená septima	= čistá oktáva
h = ces	velká septima	= zmenšená oktáva
ais = hes =b	zvětšená sexta	= malá septima
a = heses	velká sexta	= zmenšená septima
gis = as	zvětšená kvinta	= malá sexta
g = asas	čistá kvinta	= zmenšená sexta
fis = ges	zvětšená kvarta	= zmenšená kvinta
eis = f	zvětšená tercie	= čistá kvarta
e = fes	velká tercie	= zmenšená kvarta
dis = es	zvětšená sekunda	= malá tercie
d = eses	velká sekunda	= zmenšená tercie
cis = des	zvětšená prima	= malá sekunda
c = deses	čistá prima	= zmenšená sekunda

Tabulka 4 – Poměry intervalů

interval	prima	malá sekunda	velká sekunda	malá tercie	velká tercie	čistá kvarta
poměr	1:1	16:15	9:8	6:5	5:4	4:3
interval	čistá kvinta	malá sexta	velká sexta	malá septima	velká septima	oktáva
poměr	3:2	8:5	5:3	9:5	15:8	2:1

To, že některé intervaly nám znějí dobře a jiné hůře, má logické opodstatnění. Zakreslíme-li si do grafu časový průběh frekvencí jednotlivých tónů akordu a jejich sinusoidy se vždy v určitém intervalu setkávají, jedná se o velmi libozvučný **konsonantní** zvuk. Pokud se ale tyto křivky nesetkávají, zní výsledný zvuk až nepříjemně neboli **disonantně**.

Matematika je s tedy s hudbou skutečně provázána. Někteří hudební skladatelé na to při skládání svých děl mysleli a využívali ve svých kompozicích např. **Fibonacciho posloupnost** – 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 18, 31, atd. To souvisí také s číslem ϕ, známějším pod pojmem „zlatý řez“, který využívali i jiní umělci, například malíři.

U zvuku jsme schopni rozlišit také **hlasitost a intenzitu**. Lidé hlasitost vnímají subjektivně, protože záleží na citlivosti sluchu konkrétního jedince. Naše ucho je obvykle nejcitlivější na zvuky s frekvencí 700 Hz až 6 kHz. Zvuky mimo tento interval obvykle vnímáme málo nebo vůbec. Také kvůli odlišné citlivosti lidského ucha byl

pro porovnávání hlasitosti různých zvuků zaveden tzv. **referenční kmitočet** o hodnotě 1 kHz. V hudbě se užívá tzv. **komorní a** o kmitočtu 440 Hz. Zvuk o této frekvenci můžeme slyšet kupříkladu v podobě signálu hlásícího čas v rozhlasovém vysílání.

V případě hlasitosti je nutné si uvědomit zásadní věc – dva houslisti hrající identický tón nevyprodukují zvuk o dvakrát větší hlasitosti než jeden houslista. Obvykle se uvádí, že takové hlasitosti dosáhne deset houslistů. Jestliže by chtěli zahrát tón čtyřikrát hlasitější, muselo by jich tedy být sto. Vysvětlení tohoto jevu však není nijak složité, vlastně i docela logické. Když jeden hráč zahraje tón, je to oproti předešlému tichu výrazný rozdíl. S dalšími přibývajícími hráči je sice malý rozdíl znát, ale také se stále zmenšuje. Z praxe nám připadá samozřejmé, že když hraje padesát houslistů stejný tón, nepostřehneme, že se k nim přidal další.

Jestliže chceme zvuk objektivně hodnotit, musíme vyjít z toho, že šíření zvukového vlnění úzce souvisí s přenosem energie. K přijímači zvuku, třeba lidskému uchu, se ale nedostane stejné množství **energie zvukového vlnění $\boldsymbol{\Delta E}$**, jež vyjde z vysílače zvuku. Čím větší část této energie se přenese z vysílače do přijímače za **čas $\boldsymbol{\Delta T}$**, tím je vyšší **akustický výkon $\boldsymbol{P}$** daného zvukového vlnění. Udáváme jej ve wattech (W).

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

I díky této veličině jsme schopni dále určit **intenzitu zvuku $\boldsymbol{I}$**. Určujeme ji pomocí **plochy $\boldsymbol{\Delta S}$**, kterou projde kolmo energie reprezentující akustický výkon. Jednotkou intenzity je watt na metr čtverečný $\mathbf{W/m^2}$. Za normálních podmínek se s rostoucí vzdáleností od zdroje zmenšuje s druhou mocninou dané vzdálenosti.

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

Zvuky o určitém akustickém výkonu jsme schopni slyšet, jiné ne a další jsou pro náš sluch nesnesitelné. **Práh slyšení** (velmi slabý zvuk, který ale naše ucho zaznamená) činí 1 pikowatt, tedy 10^{-12}W. Nesnesitelné a pro ucho bolestivé zvuky začínají na výkonu 1W, který je nazýván **práh bolesti**. Poměr mezi těmito dvěma hodnotami je tedy evidentně obrovský. Abychom mohli poměr akustického výkonu zaznačit jednodušeji, je v logaritmické stupnici v jednotkách **bel** se značkou $\boldsymbol{B}$. Když se držíme tohoto způsobu, zapíšeme práh bolesti hodnotou 12 B. V praxi je však mnohem častěji využíván **decibel dB**. Touto jednotkou bývá vyjádřena i **hladina akustického výkonu $\boldsymbol{L_w}$**. V dB zde je vyjádřen poměr akustického výkonu P k výkonu P_0 označujícím práh slyšení (0 dB, práh bolesti je pak 120 dB).

$$L_w = 10\ log \frac{P}{P_0}$$

Je nutné chránit si sluch před příliš velkou intenzitou zvuku, neboť si neopatrností můžeme přivodit poruchu sluchového orgánu. Velmi hlasité zvuky mají negativní vliv na nervovou soustavu, mohou způsobit dokonce prasknutí bubínku a znehodnotit celý sluchový orgán. Právě proto jsou stavěny protihlukové stěny u vytížených dopravních komunikací a také ostatní zdroje většího hluku jsou dnes sráženy pokud možno na minimum.

Snadno pozorovatelný je tzv. **Dopplerův jev**. V praxi často můžeme zaznamenat, že když se k pozorovateli blíží těleso vydávající hluk (může to být rychle jedoucí auto), nejprve slyšíme vysokou frekvenci daného hluku a když objekt pozorovatele mine, najednou frekvence velmi znatelně a prudce klesne. Jev vzniká při vzájemném pohybu zdroje a přijímače zvuku. Při přibližování se frekvence výsledného zvuku zvyšuje. Když se tyto objekty od sebe vzdalují, je naopak nižší. Může nastat i situace, kdy pohybující se těleso překoná rychlost zvuku. Toho jsou schopna nadzvuková letadla, o kterých říkáme, že se pohybují **nadzvukovou rychlostí**, kterou obvykle označujeme **Machovým číslem *M***. Při takovém pohybu vzniká **rázová vlna** (prudké stlačení vzduchu), kterou slyšíme v podobě zvuku nazývaného **akustický třesk** (jinak také **supersonický**), jenž připomíná abnormálně hlasitý výstřel.

Celkem rozlišujeme u Dopplerova efektu 3 základní typy:

1) **Zdroj a prostředí v klidu, pozorovatel v pohybu**

$$f_1 = \frac{c \pm v}{c} \cdot f$$

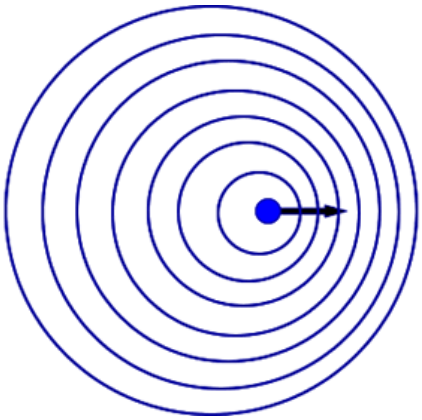
c…rychlost šíření vlnění; *v*…rychlost pohybu pozorovatele (znaménko + při pohybu ke zdroji, - od zdroje); *f*…frekvence vlnění vydávaného zdrojem

2) **Pozorovatel a prostředí v klidu, zdroj v pohybu**

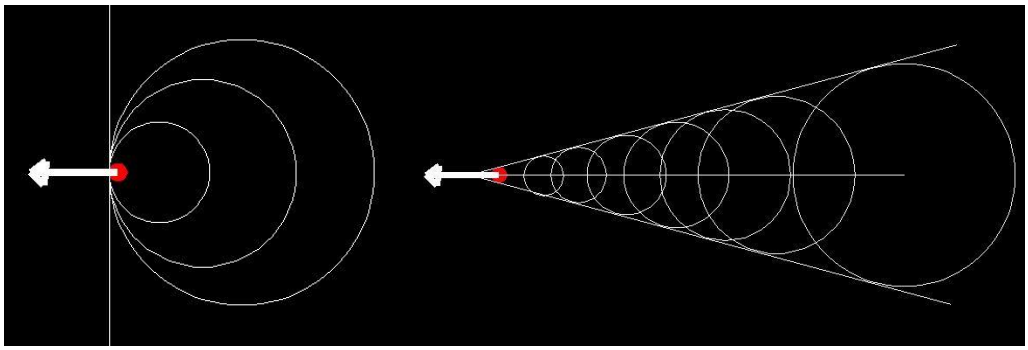
$$f_2 = \frac{c}{c \pm v} \cdot f$$

v…rychlost pohybu zdroje (znaménko + reprezentuje pohyb od pozorovatele, znaménko – k pozorovateli)

3) **Pozorovatel a zdroj v klidu, prostředí v pohybu (zde nedochází k žádným změnám frekvence)**



Obrázek 36 – Schéma Dopplerova jevu



Obrázek 37 – Těleso pohybující se rychlostí zvuku (vlevo) a nadzvukovou rychlostí (vpravo)

6 Violoncello

Violoncello je, stejně jako ostatní hudební nástroje, složeno z několika navzájem spřažených kmitajících soustav spojených tak, aby se rozkmitávaly i mezi sebou navzájem. U tohoto nástroje je mezi soustavami těsná vazba mechanického typu v podobě dřevěné kobylky. Má funkci pojítka mezi strunami a tělem violoncella.

Jedná se o smyčcový nástroj se čtyřmi strunami, který vznikl v Itálii kolem roku 1600. Nabízí širokou paletu využití – může fungovat jako sólový nástroj, v komorní hře, orchestru či v populární hudbě. Barva zvuku cella bývá často přirovnávána k lidskému hlasu.

Struny cella se nazývají C, G, d, a (od nejhlubší a nejhrubší k nejvyšší a nejtenčí). Je tedy laděno v čistých kvintách. Notace pro cello je psána v basovém klíči, ve vyšších pasážích se používá i houslový klíč a méně často tenorový klíč. Struny je sice možno podladit (tzv. scordatura), ale pouze o jeden tón.

Materiál na výrobu strun byla dříve střeva dobytka, nyní se setkáme spíše se strunami kovovými. Chvějí se mezi malým pražcem a kobylkou. Pomocí kobylky se chvění přenáší na horní desku a prostřednictvím duše neboli ozvučného kolíku dále na spodní desku. Obě desky jsou spojeny tzv. luby.

Rozsah violoncella je poměrně diskutabilní, různé zdroje uvádějí odlišné údaje, například C – e_3). Nejnižší hratelnou notou je pochopitelně prázdná struna C. Nejvyšší nota se nachází poblíž konce hmatníku na struně a. My ji však můžeme konkrétně detekovat pomocí výpočtů a experimentu. Postup je podrobněji popsán v další kapitole.

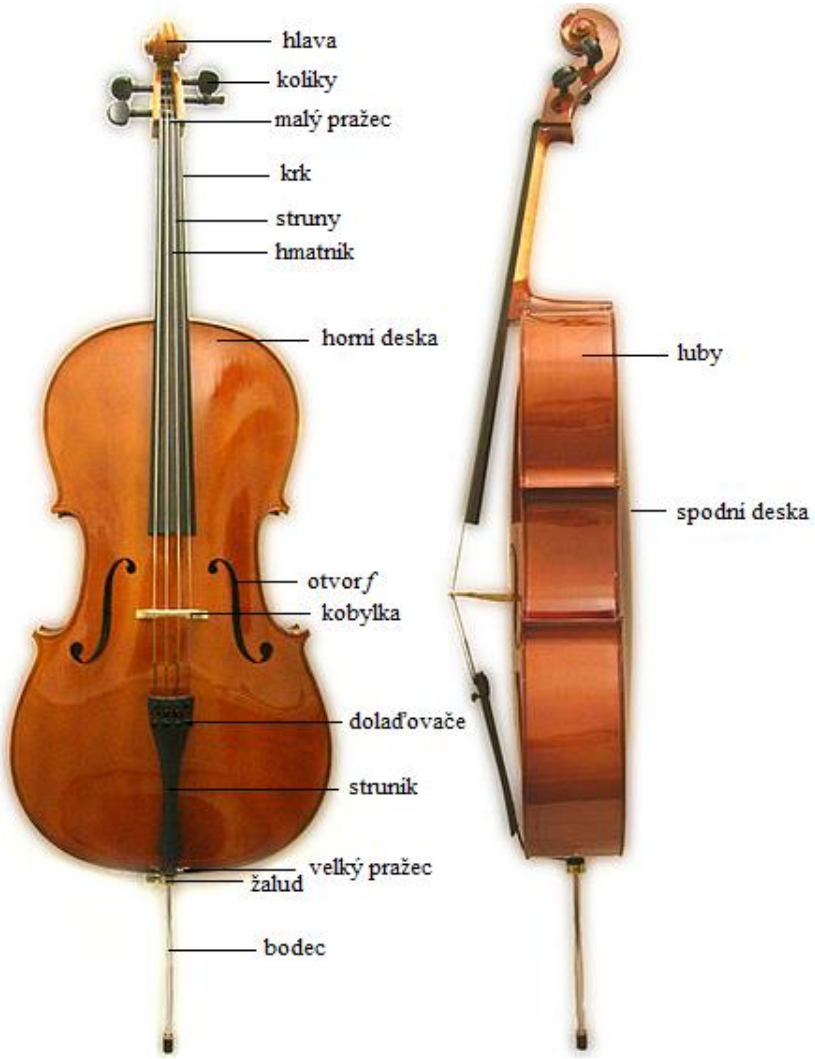
Výjimečně můžeme narazit na violoncello s pěti strunami (přibývá struna e_1), které se už podobá spíše svému předchůdci viole da gamba. Někteří violoncellisté mají ještě jednu strunu připevněnou pod hmatníkem pro lepší rezonanci.

Cello je větší než housle a viola; menší než kontrabas. Při hře jej držíme mezi koleny, o zem se opírá vysouvatelným bodcem, často zakončeným gumovou špičkou bránící sklouznutí nástroje. Většina částí violoncella je ze dřeva (smrku, javoru, ebenu, aj.), ovšem některé prvky jsou vyrobené z jiných materiálů (např. bodec může být kovový či plastový).

V horní desce si můžeme všimnout dvou otvorů ve tvaru písmene *f*, které slouží k lepšímu vyzařování zvuku. K stavbě těla bývá často využíván smrk či javor, ale také vrby, hrušně či dalších druhů dřeva. Žíně smyčce bývají pro lepší hraní potírány kalafunou, přírodní nebo umělou pryskyřicí.

Violoncello existuje ve více velikostech. Dělí se po osminách - nejmenší hráči hrají obvykle na 2/8 cello (také 1/4), největší je 8/8 neboli celé cello. Můžeme se setkat také se 7/8 „dámským“ cellem.

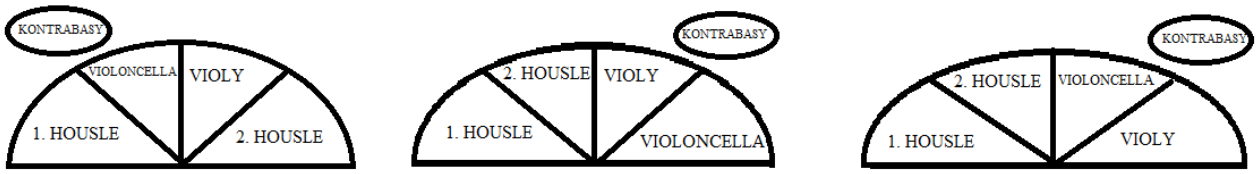
Podrobná stavba violoncella i smyčce je popsána na obrázcích 38 a 39.



Obrázek 38 – Stavba violoncella

Obrázek 39 – Stavba smyčce

Pro lepší a rovnoměrnější vyzařování zvuku bývá někdy při sólové hře používán stupínek, na kterém hráč sedí. Na přirozené vyzařování zvuku se musí myslet také při rozsazení smyčcového orchestru, aby jedna část příliš nevystupovala a nepřehlušovala ostatní nebo naopak nezanikala. Proto existuje několik druhů rozsazení, která usiluje o co nejlepší výsledné vyzařování orchestru jako celku.



evropské (německé) americké (podle Stokowského) americké (podle Furtwänglera)

Obrázek 40 – Tři typy rozsazení smyčcového orchestru

7 Praktické vysvětlení konkrétních akustických jevů

- ***Kmitavý pohyb***

  Nahrávka: 1

  Činnost: Rozeznění struny prstem

  Vysvětlení: Vybuzením se struna vychyluje z rovnovážné polohy a kmitá. Výchylka se postupně zmenšuje, až pohyb úplně ustane. V průběhu doznívání zvuku je patrné lehké snižování výšky tónu. Je způsobeno tím, že struna kmitá stále pomaleji, a pomalejší kmitání značí nižší frekvenci a tedy i nižší tón. Můžeme zaznamenat také mírnou nerovnoměrnost v síle zvuku, která se zřejmě projevuje díky měnící se míře oscilace struny.

Obrázek 41 – Rozeznění struny pizzicatem

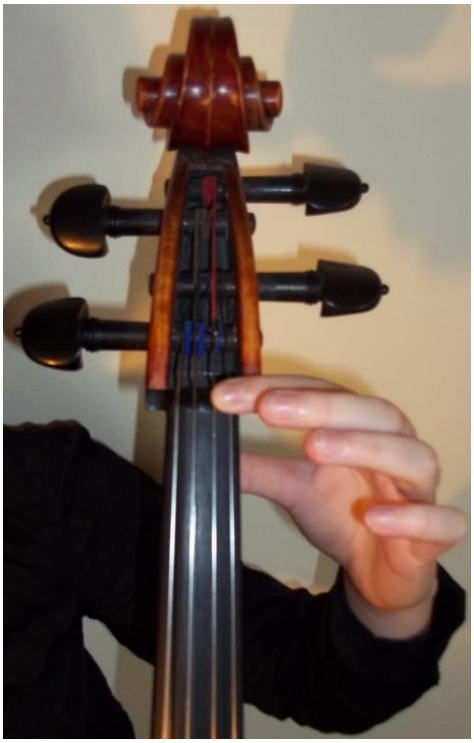
- ***Prázdné struny violoncella***

  Nahrávka: 2

  Činnost: Postupná hra prázdných strun *C*, *G*, *d*, *a*

  Vysvětlení: Violoncello je laděno po čistých kvintách, což jsou intervaly mezi prázdnými strunami. Při hře se zkušenější hráči snaží vyhýbat hře prázdných strun zahráním daného tónu na jiném místě hmatníku (s výjimkou tónu *C*, jenž jinde na violoncellu není), neboť zejména struny *d* a *a* vydávají nepříjemný, drnčivý zvuk. Původcem tohoto nežádoucího jevu je pravděpodobně malý pražec, kde jsou struny ukotveny; rychle kmitající struny do něj narážejí a vytvářejí hluk. Zbavit se nepříjemného hluku můžeme buď hrou tónu výše na hmatníku na nižší

struně (tím se rozumí blíže ke kobylce, k zemi), nebo přiložením prstu na danou strunu na pražci (viz obrázek 42).



Obrázek 42 – Prst přiložený na malém pražci

- ***Nejnižší nota hratelná na violoncellu***

  Nahrávka: 3

  Činnost: Zaznění nejnižší struny *C* (asi 65,5 Hz)

  Vysvětlení: Čím delší a hrubší je struna, tím hlubší zvuk je vytvořen. Největší průměr ze strun violoncella má struna *C* a největší délka struny je v tvorbě zvuku zapojena právě tehdy, kdy je hrána prázdná struna. Povšimněme si také dozvuku ostatních strun po ukončení pohybu smyčce.

- ***Nejvyšší nota hratelná na violoncellu***

  Nahrávka: 4

  Činnost: Postupná hra tónů po oktávách počínaje strunou *a*, konče nejvyšším hratelným tónem

  Vysvětlení: Struna *a* je, stejně jako ostatní struny na užitém nástroji, dlouhá 68 centimetrů. Postupným zkracováním délky struny vždy na polovinu bychom se postupně měli dostat až k onomu nejvyššímu tónu, jenž je možno na nástroji zahrát. Strunu je možno dělit do nekonečna, ovšem je jasné, že nás nyní zajímá maximum, které může v praxi zaznamenat hráč. V následující tabulce je přehled tónů, jež zazněly v nahrávce.

Tabulka 5 – Frekvence jednotlivých tónů

pořadí	název	frekvence (Hz)	část struny	délka kmitající části struny (cm)
1	a	220	1	68
2	a_1	440	1/2	34
3	a_2	880	1/4	17
4	a_3	1760	1/8	8,5
5	a_4	3520	1/16	4,25

Vytvořit tón a_5 se nezdařilo, velice problematická byla již tvorba předešlého a_4. Kmitající úsek struny by musel být 2,125 cm dlouhý, což je těžko realizovatelné, jestliže je délka kmitající struny určována umístěním prstu. Kromě toho je šířka užitého smyčce 1,4 cm, což je vzhledem k požadované délce struny poměrně hodně a při jeho větším naklonění není zvuk příliš kvalitní. Výsledkem pokusu o zahrání tak vysokého tónu by byl jen nepříjemný neartikulovaný šum.

Obrázek 43 – Hra tónů a_1(vlevo nahoře), a_2 (vpravo nahoře), a_3 (vlevo dole) a a_4 (vpravo dole)

- ***„Běžný“ smyk (détaché)***

  Nahrávka: 5

  Činnost: Plynulý pohyb smyčce po struně

  Vysvětlení: Pod tímto pojmem rozumíme druh smyku, který provádíme libovolnou rychlostí, délkou smyčce a na libovolném místě smyku. Pravidlem je jeden tón na jeden smyk. Vzhledem k této plynulosti pohybu zní tón prakticky po celou dobu stejně.

- ***Vibrato***

  Nahrávka: 6

  Činnost: Ruka na hmatníku se pravidelně pohybuje tam a zpět

  Vysvětlení: Ruka hráče na hmatníku se při hře mírně pohybuje tam a zpět podélně se strunou. Tím se tón dostává chvíli nad čistou podobu daného tónu a chvíli pod něj. Výsledkem je chvějivý zvuk, který získal méně ostrý charakter, je pro lidské ucho příjemnější, a proto je při hře hojně využíván. Vibrato je založeno na principu pravidelné frekvenční změny. V případě, že rukou nevibrujeme, zní pouze plochý, neměnící se tón; neprobíhají žádné změny frekvence ani oscilace.

Obrázek 44 – Vychylování levé ruky při vibratu

- ***„Skákavý“ smyk (spiccato)***

  Nahrávka: 7

  Činnost: Smyčec se odráží od struny, na které setrvává jen krátkou dobu

  Vysvětlení: Smyčec se odráží od struny do vzduchu. Tímto nárazem vzniká zvláštně nakřáplý, ostrý tón. Spiccato je vytvořeno z velice krátkých úderů smyčce o strunu, jež umožňují další skákání smyčce na základě elastických

vlastností smyčce a struny. Pohyby jsou nepatrné a uskutečňují se lehkými krátkými pohyby zápěstí a prstů. Základní problém spiccata spočívá v opravdu rovnoměrných poskocích smyčce. Ruka koná půlkruhovitý pohyb, v jehož nejspodnějším bodě se dotkne smyčec na krátkou chvíli struny. Tento rychlý a prudký náraz způsobí to, že slyšíme spíše hluk (úder smyčce na strunu) než zvuk.

- ***Sautillé (zrychlené spiccato)***

  Nahrávka: 8

  Činnost: Smyčec se odráží od struny v kratších časových intervalech než je tomu u spiccata

  Vysvětlení: Sautillé je prováděno stejně jako spiccato, ovšem na nejen na velmi malém úseku, ale také v ještě kratších časových intervalech. Zkrácenou periodou dopadu smyčce na strunu dochází k většímu „navrstvení" hluku než u klasického spiccata. Výsledkem je tedy ještě o něco mocnější hluk.

- ***Rikošé (směs spiccata a staccata)***

  Nahrávka: 9

  Činnost: Smyčec je utlumován hráčem a postupně se zkracuje perioda jeho dopadu na strunu

  Vysvětlení: Hráčem a zároveň i gravitací je postupně snižována perioda dopadu na struny, takže smyčec dopadá stále častěji a zvuk se „zhušťuje". Po rikošé vždy v nahrávkách následuje spiccato, kde je hráno několik not na jeden smyk, a následuje další rikošé. Nárazy opět vzniká hluk, který také výsledek ozvláštňuje a vytváří rytmický celek, který může velice zpestřovat některé skladby.

- ***Legato (vázaně)***

  Nahrávka: 10

  Činnost: Tóny ve stupnici *G* dur na sebe plynule navazují bez rozdělení smyku

  Vysvětlení: Změnou délky struny se změní frekvence a tím i výška produkovaného tónu. To, že jednotlivé tóny nejsou rozděleny do více smyků, má za následek plynulý přechod z jednoho tónu do druhého.

- ***Staccato (ostře)***

  Nahrávka: 11

  Činnost: Smyk je hráčem cíleně zkracován, hraje se na malé délce smyčce

Vysvětlení: Smyk je téměř usekáván, čímž tón získává typický ostrý charakter. Ten je způsoben nárazem, jenž vznikl při násilném zastavování smyčce (podobně jako u výše zmíněného spiccata). Výsledkem tak jsou velice průrazné tóny.

- ***Martelé (ostře a pevně)***

  Nahrávka: 12

  Činnost: Mezi dvěma sousedními notami je na chvíli zastaven smyčec

  Vysvětlení: Smyk je velice podobný staccatu. Spočívá v okamžitém a úplném zastavení celé ruky při smyku. V pauzách se tlak smyčcem na strunu zeslabí, ale je zachován kontakt smyčce se strunou. Díky pevnému držení smyčce nedochází k doznívání, zvuk je tedy naprosto jasně ohraničen a jednotlivé tóny jsou odděleny pauzami.

- ***Tremolo (sekaně)***

  Nahrávka: 13

  Činnost: Rychlé krátké pohyby ruky se smyčcem

  Vysvětlení: Smyčec se pohybuje velice rychle na poměrně krátkém úseku, kromě toho je držen spíše lehce, takže výsledný zvuk je třesavý a neartikulovaný, může působit nerovnoměrně. Také zde může být náznak přechodu ze zvuku do hluku.

- ***Trylek***

  Nahrávka: 14

  Činnost: Rychlé střídání dvou tónů na jeden smyk

  Vysvětlení: Dochází k rychlé změně z jedné frekvence na druhou a jednotlivé úseky se periodicky přelévají jeden do druhého.

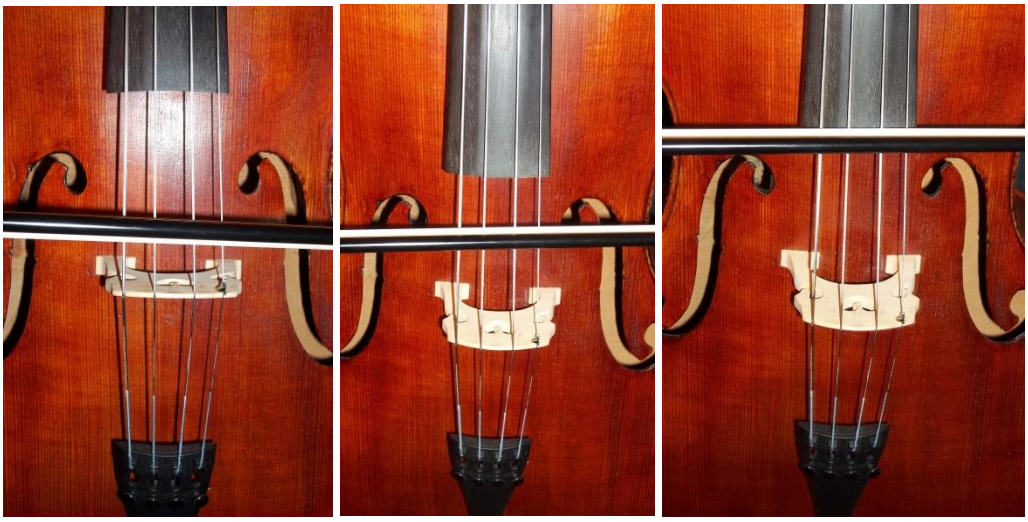
- ***Hra v poloviční vzdálenosti mezi koncem hmatníku a kobylkou, sul ponticello (blíže kobylky) a sul tasto (blíže hmatníku)***

  Nahrávka: 15

  Činnost: Smyčec je nejprve ve střední vzdálenosti mezi kobylkou a koncem hmatníku, pak blíže ke kobylce a následně blíže k hmatníku

  Vysvětlení: Při hře ve střední vzdálenosti mezi zakončením hmatníku a kobylkou je struna vhodně napjatá a slyšíme typ tónu, jenž je běžně užíván. Blíží-li se smyčec ke kobylce, pohybuje se v oblasti většího pnutí a zvuk je ostřejší, skřípavější. Naopak v případě, že je smyčec umístěn poblíž konce hmatníku, zní tón o něco jemněji a vřeleji, neboť struna je zde mírně volnější. Těchto různých

pozic se dá využít v praxi, když chceme odlišit charakter výsledného zvuku podle toho, zda požadujeme tón zvonivější či tlumenější.



Obrázek 45 – Umístění smyčce v různé vzdálenosti od kobylky a hmatníku

- ***Glissando (sklouznutí)***

  Nahrávka: 16

  Činnost: Prst tisknoucí strunu se během smyku posouvá po struně

  Vysvětlení: Jedná se o pohyb ruky sjíždějící po hmatníku mezi dvěma tóny bez zastavení smyku, a prst putující po struně tuto strunu plně domačkává – mezi dvěma tóny zazní všechny ostatní nacházející se mezi jejich pozicemi. Frekvence tak poměrně konstantní rychlostí stoupá či klesá, pozice mezi tóny se přelévají do sebe.

- ***Rozeznění struny G smyčcem***

  Nahrávka: 17

  Činnost: Struna *G* je zahrána pomocí smyčce

  Vysvětlení: Přestože samotný hlavní tón dozněl, slyšíme po něm dozvuk. Je zde tedy patrný výskyt alikvótních tónů, které vznikají také rezonancí ostatních strun nástroje.

- ***Rozeznění struny G smyčcem, zatímco ostatní struny jsou přidušeny***

  Nahrávka: 18

  Činnost: Struna *G* je zahrána pomocí smyčce

  Vysvětlení: Přidušením ostatních strun bylo zabráněno tvorbě některých alikvótních tónů. Zahraný hlavní tón sice nezní samotný, ovšem není doplňován

tolika dalšími tóny jako v předešlé nahrávce. Z této nahrávky je patrné, že alikvótní tóny významně dotvářejí celkový charakter zvuku, který osamoceně zdaleka nezní tak libozvučně.

- ***Hra jiného tónu a než prázdná struna***

  Nahrávka: 19

  Činnost: Je zahrán tón *A* na struně *G*

  Vysvětlení: V nahrávce je po ukončení hlavního tónu naprosto zřetelný dozvuk, ve kterém dokonce můžeme rozeznat tón *a*, tedy prázdnou strunu. Vlivem tónu o oktávu níže se prázdná struna přirozeně rozkmitala a přidala se k alikvótním tónům. Tento mechanismus funguje u všech strun. Rozechvívat struny může nejen aktivita na stejném nástroji, ale i zvnějšku. Hraje-li jeden violoncellista a druhý zlehka položí prsty na struny, může cítit jejich chvění. To samé funguje i mezi různými typy nástrojů – struny violoncella mohou reagovat i na tóny hrané na klavír. V neposlední řadě může nástroj rozezvučet i silnější hudba z reproduktorů. Citlivý je hlavně na čisté intervaly, mezi nimi je i oktáva, která je hrána k prázdné struně také v této nahrávce.

- ***Hra jiného tónu a než prázdná struna s vibratem***

  Nahrávka: 20

  Činnost: Je zahrán tón *A* na struně *G*, prováděno vibrato

  Vysvětlení: Nyní je kromě dozvuku prázdné struny v tónu zřejmá mírná oscilace způsobená vibrováním ruky. Jinak se výsledek neliší od předchozí nahrávky.

- ***Hra jiného tónu a než prázdná struna s přidušením této prázdné struny***

  Nahrávka: 21

  Činnost: Je zahrán tón *A* na struně *G*

  Vysvětlení: V tomto případě slyšíme po doznění hlavního tónu několik alikvótních tónů, avšak přidušené *a* mezi nimi pochopitelně není. Není zde tedy tolik různých tónů, zvuk je tak chudší a zní méně příjemně.

- ***Hra jiného tónu a než prázdná struna s přidušením prázdné struny a s vibratem***

  Nahrávka: 22

  Činnost: Je zahrán tón *A* na struně *G*, prováděno vibrato

  Vysvětlení: Zde je sice vlivem vibrata vytvořena oscilace, ovšem tento úkon zdaleka nenapraví absenci alikvótních tónů. Vibrato je sice prostředkem

k případnému dotvoření zvuku, ale bez odpovídajících alikvót přesto není dosaženo zvukově plného výsledného tónu.

- ***Con sordino (s dusítkem)***

  Nahrávka: 23

  Činnost: Na kobylce je při hře umístěno speciální dusítko

  Vysvětlení: Během hry s dusítkem dochází k potlačení některých harmonických složek, takže výsledný tón obsahuje jen část z nich. Tím se stává slabším a méně plným. Tento efekt je využíván zejména tehdy, když chceme snížit hlasitost hry, případně když má v dané situaci nástroj pouze doprovodný účel. Zvuk je totiž jemnější než v běžné hře bez dusítka.

Obrázek 46 – Kobylka s dusítkem

- ***Tón h***

  Nahrávka: 24

  Činnost: Hra tónu *h*

  Vysvětlení: Po zahrání tónu *h*, který se hraje na struně *a*, lze slyšet podobně jako u prázdných strun bohatý dozvuk. Tón *h* je navíc v porovnání s ostatními tóny překvapivě zvonivý. Tímto se *h* odlišuje od ostatních, nutno však podotknout, že pro zmíněnou zvonivost je nutné posunout prst o několik milimetrů blíže k malému pražci, než je normální. Lehkým snížením se frekvence s největší pravděpodobností dostává do lepšího poměru s dalšími frekvencemi, což dává vzniknout jevu slyšitelnému v nahrávce.

Obrázek 47 – Poloha levé ruky při hře tónu *h*

- ***Flažolet***

  Nahrávka: 25

  Činnost: Lehký dotek prstem v polovině a poté v třetině napnuté struny

  Vysvětlení: Při pouhém doteku na struně dochází k cílenému tlumení lichých harmonických složek frekvence pomocí nedokonalého přitlačení struny k hmatníku. Výsledný tón pak není plný jako při úplném přitisknutí struny na hmatník. V nahrávce jsou první dva tóny zahrány synchronně s přiložením prstu v polovině struny *d*. Posléze dvakrát zazní ten samý tón, ovšem tentokrát se prst hráče nachází ve třetině struny *G*. Zde lze jasně vidět, že většina tónů je hratelná na více místech na violoncellu. Konkrétně tento příklad se stejně znějícími flažolety na různých strunách bývá využíván při ladění nástroje. Existuje také tzv. umělý flažolet, kdy je délka struny zkrácena hráčem a ten následně provede dotyk v jejím příslušném zlomku. Klasický flažolet je ale mnohem více využíván.

Obrázek 48 – Vlevo hra flažoletu v polovině struny (prsteníkem), vpravo ve třetině struny (ukazovákem)

- ***Hra mezi kobylkou a struníkem***

  Nahrávka: 26

  Činnost: Smyčec se pohybuje na krátkém úseku strun mezi kobylkou a struníkem

  Vysvětlení: Struny jsou na daném místě výrazně zkrácené a pevně napnuté, což dohromady způsobuje skřípání a vysokou frekvenci tónu (proto je vydávaný zvuk nezvykle vysoký), který ale ve výsledku nezní příliš příjemně.

Obrázek 49 – Umístění smyčce při hře pod kobylkou

8 Srovnání libozvučnosti tónů

V interpretaci hudby slouží poznatky akustiky zejména k tomu, aby byly vytvářené zvuky co nejlepší, tedy nejpřijatelnější pro posluchače. Je tedy vhodné vědět, které skutečnosti způsobí to, že zvuk lidskému uchu více vyhovuje. Na tomto místě se již odvracíme od objektivního posuzování hudby, neboť její vnímání je subjektivní.

V návaznosti na téma tohoto studijního materiálu byla autorkou provedena anketa mezi spolužáky – účastníky hodin hudební výchovy. Respondentů bylo celkem 24, z toho 11 mužského pohlaví a 13 ženského pohlaví. Jedná se o malý vzorek, nicméně i přes tuto skutečnost je možno z výsledků vyvodit určité hypotézy.

Anketa měla dvě části: první zaměřenou na důležitost alikvót a vibrata v hudbě, druhou na preference respondentů co se zvuku smyčcových nástrojů týče. Respondentům byly nejprve přehrány 4 nahrávky, ve kterých byl na violoncello pokaždé hrán tón *A*, ovšem za rozdílných podmínek (bez vibrata, s vibratem, bez vibrata se zatlumením ostatních strun, s vibratem se zatlumením ostatních strun). Jedná se o nahrávky **19**, **20**, **21** a **22** z předchozí kapitoly. Úkolem bylo očíslovat ukázky postupně od 1 (nejlepší) do 4 (nejhorší), podle toho, jak dobře příslušnému jedinci nahrávky znějí. Stejné číslování bylo užito taktéž ve druhé části, kdy čtyřikrát zazněla skladba Air od Johanna Sebastiana Bacha, pokaždé hrána na jiný nástroj (housle, viola, violoncello, kontrabas).

Anketa – akustické jevy Jsem: muž/žena

1) Seřaďte tóny v nahrávkách A, B, C, D dle příjemnosti poslechu (1 – nejlepší, 4 – nejhorší):
   A: B: C: D:
2) Seřaďte ukázky E, F, G, H podle toho, jak se vám líbí zvuk nástroje:
   E: F: G: H:

Obrázek 50 – Podoba formuláře

První část byla koncipována tak, aby se ukázalo, zda posluchači v hudbě poznají absenci alikvótních tónů a jestli jim zní lépe tón s vibratem. Ve druhé části bylo cílem odhadnout, který nástroj je svým rozsahem, barvou apod. nejpříjemnější k poslechu. Výchozím bodem bylo tvrzení, že violoncello je svým položením nejblíže lidskému hlasu – nabízela se tak otázka, zda je proto pro člověka hra na violoncello příjemnější v porovnání s ostatními smyčcovými nástroji. Respondenti neměli hodnotit kvality interpreta, jehož nahrávka jim byla přehrána, ale výslovně to, jak se jim líbí rozsah příslušných nástrojů.

Použity byly tyto nahrávky:

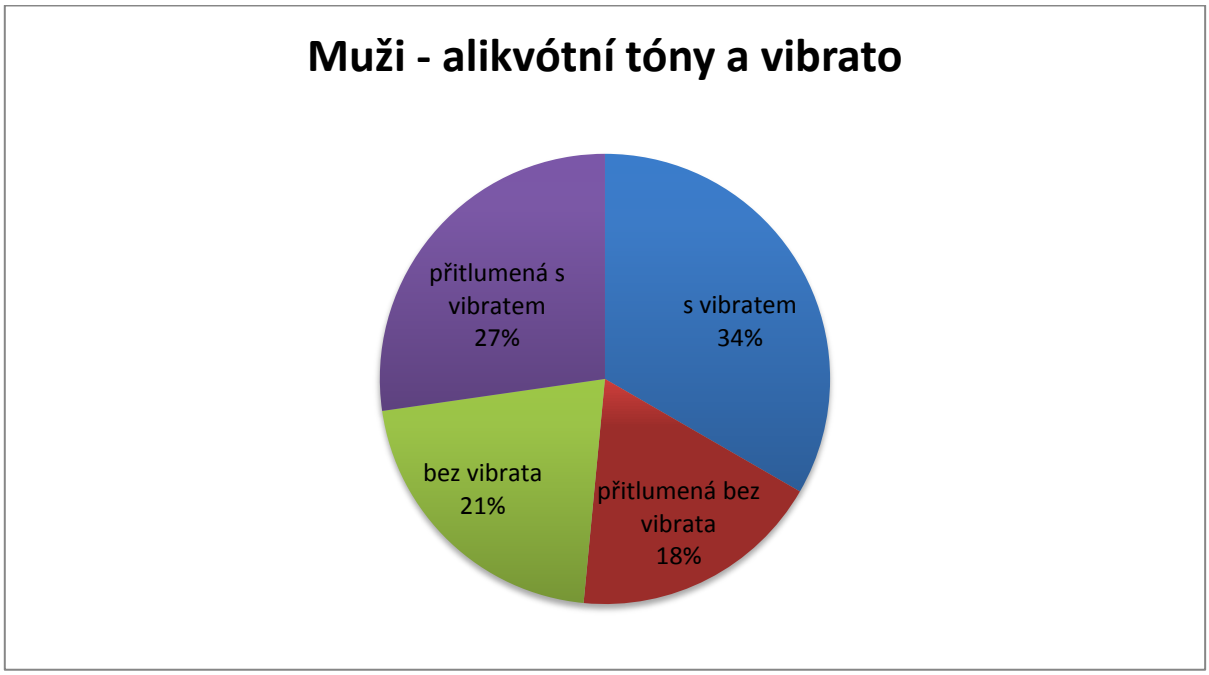
housle https://www.youtube.com/watch?v=9GIi2z_puHs

viola https://www.youtube.com/watch?v=WY8LcI60ugo

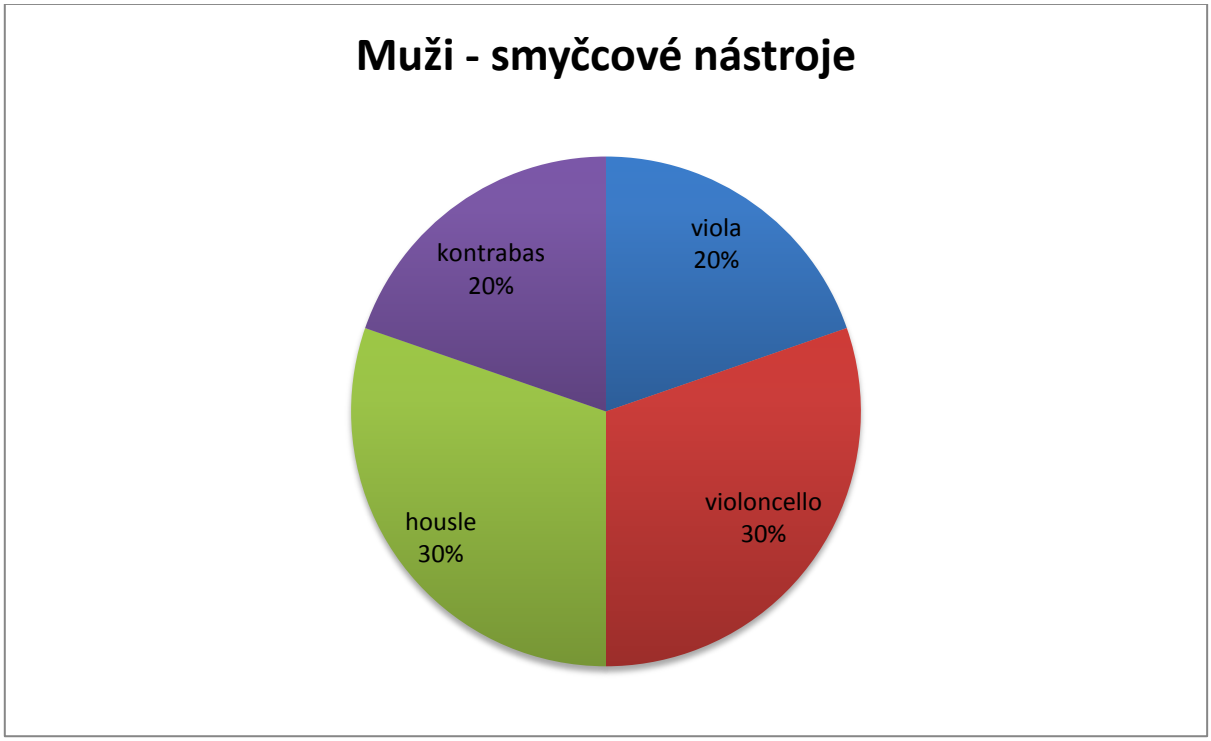
violoncello https://www.youtube.com/watch?v=Ri8hDWRRde0

kontrabas https://www.youtube.com/watch?v=71GLXVAb7NA

Odpovědi byly vyhodnoceny tak, že za hodnocení 1 od respondenta byly položce přiděleny 3 body, za hodnocení 2 to byly 2 body, za hodnocení 3 byl přidělen 1 bod a za hodnocení 4 (nejhorší) nebyl přidělen žádný bod. Následně bylo kruhovým grafem určeno, které ukázky respondenti preferovali. Data byla zpracována pro všechny respondenty, ale také zvlášť pro ženy a muže.



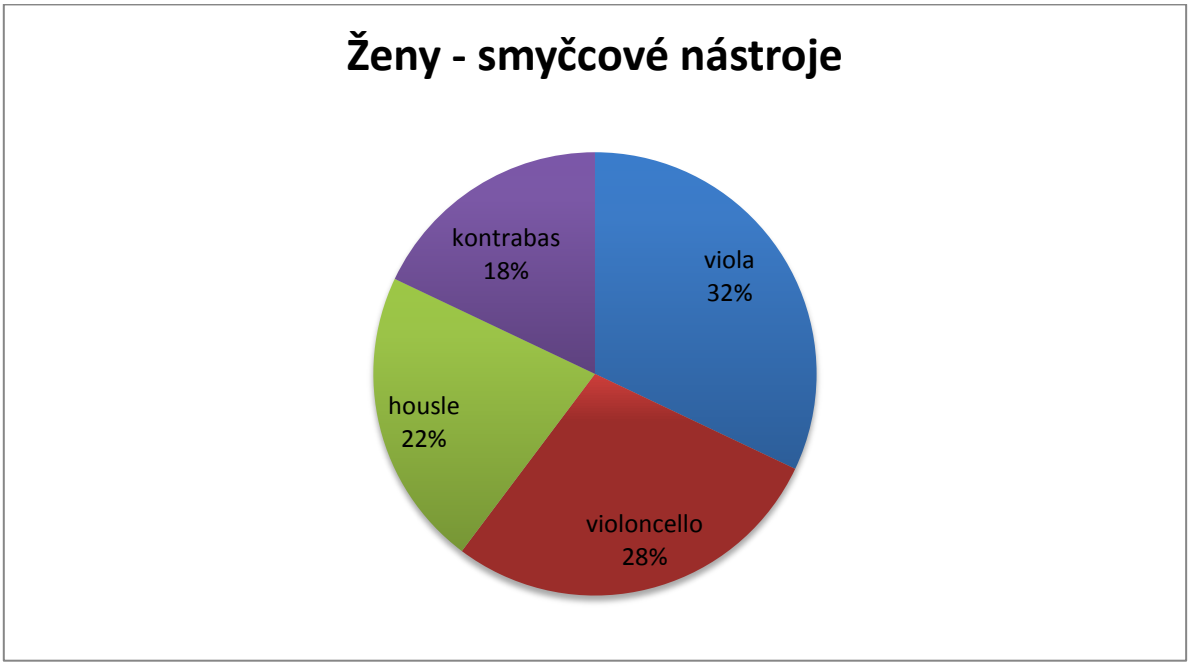
Obrázek 51 – Graf (muži – alikvótní tóny a vibrato)



Obrázek 52 – Graf (muži – smyčcové nástroje)

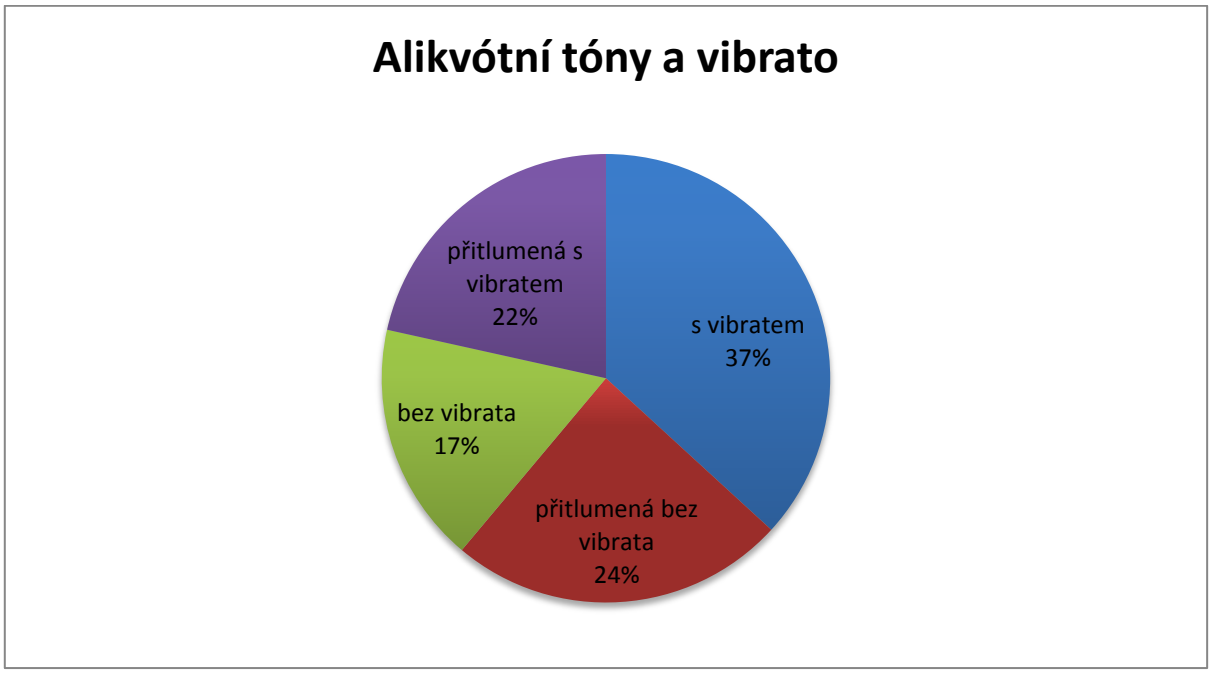
Z grafu na obrázku 51 je patrné, že mužská část dotázaných preferovala tóny s vibratem, lépe si vedl tón hraný „běžným“ způsobem, bez jakéhokoli zatlumení. Právě hra s vibratem je mezi pokročilými hráči velice frekventovaná. Nejhůře dopadl tón bez vibrata, který navíc postrádal alikvóty. Druhý graf z obrázku 52 pak značí, že nejlépe byly hodnoceny housle a violoncello. Úspěch violoncella byl předpokládán, ovšem housle získaly stejný počet bodů. Pochopitelně tento výsledek nemůžeme zobecnit, je totiž možné, že přítomní respondenti zkrátka mají tyto nástroje v oblibě z jiných než čistě poslechových důvodů.

Obrázek 53 – Graf (ženy – alikvótní tóny a vibrato)

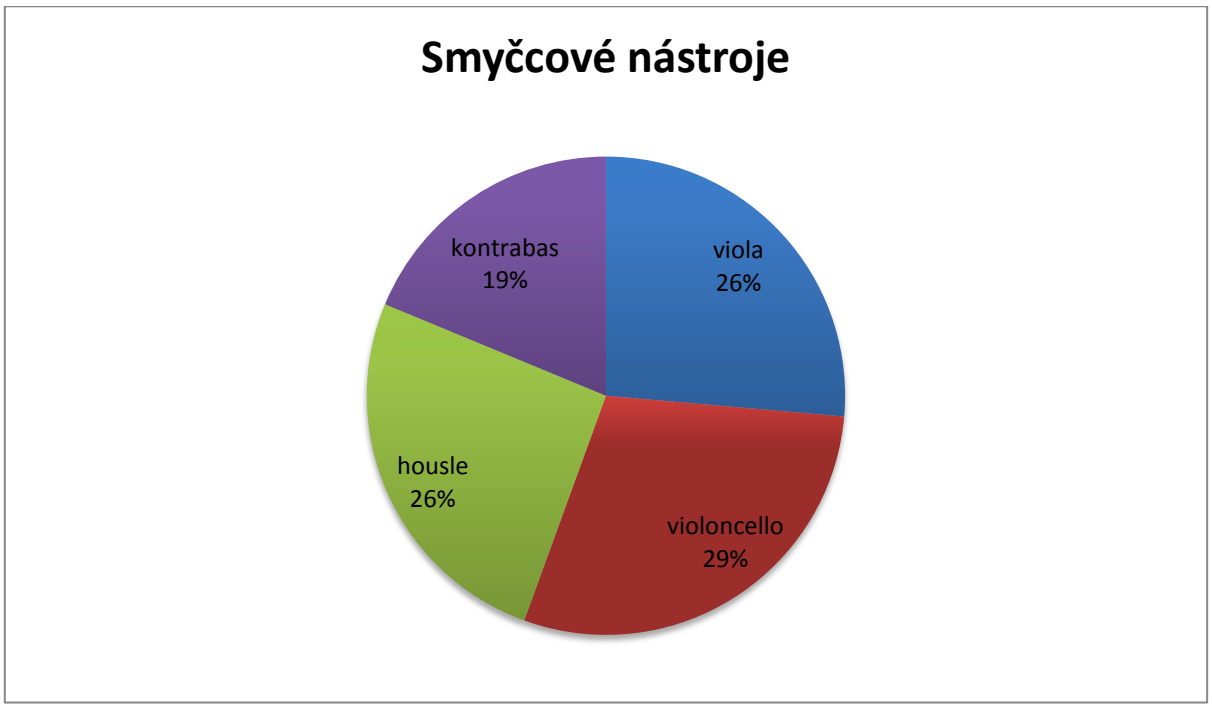


Obrázek 54 – Graf (ženy – smyčcové nástroje)

Dotázané ženy rovněž vyhodnotily, jak je zřejmé z grafu na obrázku 53, tón s vibratem jako ten nejpříjemnější. Překvapivý je však druhý nejlepší výsledek tónu bez vibrata se zatlumenými strunami, v čemž se výrazně liší od hodnocení mužů. V posuzování hudebních nástrojů pak nejvíce bodů obdržela viola, za kterou pak těsně následovalo violoncello. Rozdíl není nikterak velký a výsledky jsou samozřejmě ovlivněny počtem dotázaných. Nabízí se ovšem hypotéza, že ženám je příjemnější o něco vyšší než cellový tón, čemuž viola vyhovuje. Nicméně jsou zde ještě výsledky zahrnující všechny dotázané.



Obrázek 55 – Graf (alikvótní tóny a vibrato)



Obrázek 56 – Graf (smyčcové nástroje)

Z celkového vyhodnocení získaných dat vyplývá, že jednoznačně nejlépe byl hodnocen tón s vibratem, jež nepostrádal alikvóty. Je tedy evidentní, že v interpretační praxi má vibrato i možnost přirozené rezonance strun nezastupitelnou roli a absencí jednoho či druhého se příjemnost zvuku snižuje. Z dalšího pořadí tónů již není snadné vyvodit závěry, avšak průkaznější by výsledky nepochybně byly, kdyby byl objem získaných dat větší.

Ze smyčcových nástrojů získalo nejvyšší hodnocení violoncello, ovšem rozdíly mezi nástroji nejsou ve výsledku nikterak markantní. Je možné, že je sluchu člověka příjemnější, nemůžeme to ale tvrdit s určitostí.

Provedená anketa byla jakousi sondou, která měla potenciál poukázat na některé skutečnosti týkající se vnímání hudby, které by mohly být zajímavým objektem dalšího zkoumání. Dotazníkovým šetřením širšího rozsahu by bylo možno prokázat to, co se zde objevilo jen v náznacích – zda zní vibrato bez zatlumení strun nejlépe (což je silně pravděpodobné), zda je violoncello pro člověka nejpříjemnější na poslech ze všech smyčcových nástrojů, zda ženy skutečně preferují violu apod. Dalším průzkumem by pak byly dané hypotézy potvrzeny nebo naopak vyvráceny.

9 Závěr

Jestliže jste ve čtení této práce dospěli až sem, téměř na její konec, měli byste – ať jste tento text dostali do rukou jako úplný neznalec akustiky nebo jste o ní věděli více – mít základní povědomí o elementárních akustických pojmech a chápat běžné zvukové jevy.

Na úplném začátku stál jasný záměr: zpracování shrnujícího materiálu základů akustiky na úrovni středních škol rozšířené o netradiční doplněk v podobě nahrávek konkrétních jevů předvedených na hudebním nástroji a zároveň, pokud možno, srozumitelně vysvětlených z pohledu fyziky.

Autorka doufá, že se jí podařilo tento úmysl naplnit s co největší úspěšností a že její práce má reálný přínos pro praxi, tedy studium jednoho z odvětví fyziky. Sama při tom mnohé lépe pochopila a obohatila se o nové vědomosti. Snad tomu tak bude také u jiných lidí se zájmem o tak fascinující část fyziky, jakou akustika bezpochyby je.

10 Rozšiřující odkazy a literatura

Tato práce v žádném případě není vyčerpávající, je to pouhý základ, na kterém je možno vystavět podrobnější znalosti akustiky a příbuzných témat. Následující odkazy dávají možnost k rozšíření znalostí či ještě kvalitnějšímu pochopení problematiky probírané v této práci.

Zajímavá kniha o akustice pro laiky:

POWELL, John. *Jak funguje hudba, Průvodce posluchače vědou a psychologií krásných zvuků*. 1. vyd. Vimperk: Dokořán, 2012. ISBN 978-80-7363-400-1

Učebnice o akustice pro vysoké školy:

SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2. dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8

Krátké naučné video České televize o intervalech apod.:

http://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/matematika/771-matematika-hudby/

Soundwaves and Music (stránky v angličtině):

http://www.physicsclassroom.com/class/sound

Obšírné zpracování informací o mechanickém kmitání a vlnění:

http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/150-mechanicke-kmitani-a-vlneni

Odkaz pojednávající o akustice:

http://www.steiner.cz/david/akustika/

Sbírka řešených příkladů z fyziky:

http://www.sbirkaprikladu.cz/sbirka_prikladu/mechanicke_kmitani_a_vlneni.html?stupen=s

Podrobně o intervalech (tabulky apod.):

http://www.webhouse.cz/kurz-harmonie/intervaly.htm

Akustika na webové stránce o varhanách:

http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm

Pojednání o akustických jevech na Techmanii:

http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?mn1=100&mn2=431&xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h

11 Použitá literatura, zdroje obrázků

1. LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia, Mechanické kmitání a vlnění*. Dotisk 4. vyd. Havlíčkův Brod: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-387-5
2. MĚRKA, Ivan. *Violoncello*. 1. vyd. Lipník nad Bečvou: Montanex, 1995. ISBN 80-85780-05-4
3. POWELL, John. *Jak funguje hudba, Průvodce posluchače vědou a psychologií krásných zvuků*. 1. vyd. Vimperk: Dokořán, 2012. ISBN 978-80-7363-400-1
4. SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2. dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8
5. Mechanické kmitání a vlnění. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2014 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/150-mechanicke-kmitani-a-vlneni
6. Seminární práce. *David Steiner* [online]. 1995 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://www.steiner.cz/david/akustika/
7. Sound Waves and Music. *The Physics Classroom* [online]. 1996-2014 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://www.physicsclassroom.com/Class/sound
8. Matematika hudby. *Česká televize* [online]. 2012 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/matematika/771-matematika-hudby/
9. Music and mathematics. *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2014 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Music_and_mathematics
10. Guitar String Theory. *The Engineer´s Pulse* [online]. 2011 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://theengineerspulse.blogspot.cz/2011/05/guitar-string-theory.html
11. Equation for Sound Created from a Wire. *School for Champions* [online]. 2012 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://www.school-for-champions.com/science/sound_from_wire_equation.htm#.VFT5b2x0zIV
12. Úvod. *Violoncello: Internetový portál o violoncelle* [online]. 2006-2014 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://violoncello.ondrejkratochvil.eu/
13. Housle. *Nauka o hudebních nástrojích: Konzervatoř v Brně* [online]. 2010 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://hudebninastroje1.webnode.cz/strunne-nastroje/smyccove-nastroje/housle/

Zdroje obrázků:

Obr. 1 Oscillations libres conservatif. *Wikimedia Commons* [online]. 2005 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oscillations_libres_conservatif.png

Obr. 2 Tlumené kmitání. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2015 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/162-tlumene-kmitani

Obr. 3 Active Noise Cancellation. *School for Champions* [online]. 2012 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://www.school-for-champions.com/science/noise_cancellation.htm#.VFU8wmx0zIU

Obr. 4 Constructive and destructive interference. *Wikimedia Commons* [online]. 2010 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ConstructiveAndDestructiveInterference.png

Obr. 5 Skládání lineárních kmitů. *Wikimedia Commons* [online]. 2007 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skladani_linearnich_kmitu.png

Obr. 6 Lissajous. *Wikimedia Commons* [online]. 2009 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lissajous.svg

Obr. 7 Helmholtz resonator. *Wikimedia Commons* [online]. 2006 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helmholtz_resonator.jpg

Obr. 8 vlastní dílo

Obr. 9 Huyghens principle. *Wikimedia Commons* [online]. 2007 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Huygens_principle.png

Obr. 10 vlastní dílo

Obr. 11 Transverse pulses. *OpenStax CNX* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://cnx.org/contents/9b5ee55f-161f-4ee3-8d93-8ad3e93754a2@1.7:4/Derived_copy_of_Physics_-_Grad

Obr. 12 vlastní dílo

Obr. 13 vlastní dílo

Obr. 14 Holopln3. *Wikimedia Commons* [online]. 2012 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Holopln3.jpg

Obr. 15 Constructive interference. *Wikimedia Commons* [online]. 2009 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Constructive_interference.svg

Obr. 16 Destructive interference. *Wikimedia Commons* [online]. 2009 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Destructive_interference1.svg

Obr. 17 Rayleigh-Bénard Convection Rolls. *Wikimedia Commons* [online]. 2010 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rayleigh-B%C3%A9nard_Convection_Rolls.png

Obr. 18 upraveno: Active Noise Cancellation. *School for Champions* [online]. 2012 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://www.school-for-champions.com/science/noise_cancellation.htm#.VFU8wmx0zIU

Obr. 19 Difrakce. *Wikimedia Commons* [online]. 2007 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Difrakce_prekazka_velka.png

Difrakce. *Wikimedia Commons* [online]. 2007 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Difrakce_sterbina_mala.png

Obr. 20 Transverse pulses. *OpenStax CNX* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://cnx.org/content/m37832/latest/?collection=col11309/latest

Obr. 21 Transverse pulses. *OpenStax CNX* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://cnx.org/contents/9b5ee55f-161f-4ee3-8d93-8ad3e93754a2@1.7:4/Derived_copy_of_Physics_-_Grad

Obr. 22 Transverse pulses. *OpenStax CNX* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://cnx.org/contents/9b5ee55f-161f-4ee3-8d93-8ad3e93754a2@1.7:4/Derived_copy_of_Physics_-_Grad

Obr. 23 Flageolette. *Wikimedia Commons* [online]. 2006 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flageolette.svg

Obr. 24 Chladni Diagrams for Quadratic Plates. *Wikimedia Commons* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chladini.Diagrams.for.Quadratic.Plates.svg

Obr. 25 PAL 2 lines. *Wikimedia Commons* [online]. 2008 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PAL_2_lines.png

Obr. 26 vlastní dílo

Obr. 27 vlastní dílo

Obr. 28 Wave formation by circular motion. *Wikimedia Commons* [online]. 2010 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSM_V13_D179_Wave_formation_by_circular_motion.jpg

Obr. 29 Human Ear. *Wikimedia Commons* [online]. 2006 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:HumanEar.jpg

Obr. 30 vlastní dílo

Obr. 31 vlastní dílo

Obr. 32 vlastní dílo

Obr. 33 Základní dělení zvuků. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2015 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/186-zakladni-deleni-zvuku

Obr. 34 Octaves and Frequencies. *Wikimedia Commons* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4Octaves.and.Frequencies.svg

Obr. 35 Octaves and Frequencies. *Wikimedia Commons* [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4Octaves.and.Frequencies.Ears.svg

Obr. 36 Doppler Effect for Sound. *School for Champions* [online]. 2012 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://www.school-for-champions.com/science/sound_doppler_effect.htm

Obr. 37 Particula sonica. *Wikimedia Commons* [online]. 2008 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Particula_sonica.jpg

Particula supersonica. *Wikimedia Commons* [online]. 2008 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Particula_supersonica.jpg

Obr. 38 upraveno: Cello front side. *Wikimedia Commons* [online]. 2005 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cello_front_side.jpg

Obr. 39 upraveno: Bow Cello. *Wikimedia Commons* [online]. 2005 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bow_Cello.jpg

Obr. 40 podle: SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2. dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8; str. 404, obr. 7.11)

Obr. 41–56 vlastní dílo

Tabulka 1 podle: SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2. dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8; str. 202, tab. 6.1

Tabulka 2 podle: Intervaly. *Kurz harmonie bez not* [online]. [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://www.webhouse.cz/kurz-harmonie/intervaly.htm

Tabulka 3 podle: Intervaly. *Kurz harmonie bez not* [online]. [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://www.webhouse.cz/kurz-harmonie/intervaly.htm

Tabulka 4 podle: Tuning systems. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2015 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Music_and_mathematics#Tuning_systems

Tabulka 5 vlastní dílo

12 Přílohy

Tabulka frekvencí

podle: Piano key frequencies. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2014 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies

H – housle, V – viola, VCL – violoncello, CB – kontrabas, K – kytara

Číslo klávesy (klavír)	Jméno podle Helmholtze	Vědecký název	Frekvence (Hz)	Odpovídající prázdné struny				
				H	V	VCL	CB	K
88	c′′′′′ pětičárkovaná oktáva	C8 osmá oktáva	4186.01					
87	b′′′′	B7	3951.07					
	a♯′′′′/b♭′′′′	A♯7/B♭7	3729.31					
85	a′′′′	A7	3520.00					
	g♯′′′′/a♭′′′′	G♯7/A♭7	3322.44					
83	g′′′′	G7	3135.96					
	f♯′′′′/g♭′′′′	F♯7/G♭7	2959.96					
81	f′′′′	F7	2793.83					
80	e′′′′	E7	2637.02					
	d♯′′′′/e♭′′′′	D♯7/E♭7	2489.02					
78	d′′′′	D7	2349.32					
	c♯′′′′/d♭′′′′	C♯7/D♭7	2217.46					
76	c′′′′ čtyřčárkovaná oktáva	C7	2093.00					
75	b′′′	B6	1975.53					
	a♯′′′/b♭′′′	A♯6/B♭6	1864.66					
73	a′′′	A6	1760.00					
	g♯′′′/a♭′′′	G♯6/A♭6	1661.22					
71	g′′′	G6	1567.98					
	f♯′′′/g♭′′′	F♯6/G♭6	1479.98					
69	f′′′	F6	1396.91					
68	e′′′	E6	1318.51					
	d♯′′′/e♭′′′	D♯6/E♭6	1244.51					
66	d′′′	D6	1174.66					
	c♯′′′/d♭′′′	C♯6/D♭6	1108.73					
64	c′′′ tříčárkovaná oktáva	C6 sopránové C (vysoké C)	1046.50					
63	b′′	B5	987.767					
	a♯′′/b♭′′	A♯5/B♭5	932.328					

61	a′′	A5	880.000					
	g♯′′/a ♭ ′′	G♯5/A ♭ 5	830.609					
59	g′′	G5	783.991					
	f♯′′/g ♭ ′′	F♯5/G ♭ 5	739.989					
57	f′′	F5	698.456					
56	e′′	E5	659.255	E				
	d♯′′/e ♭ ′′	D♯5/E ♭ 5	622.254					
54	d′′	D5	587.330					
	c♯′′/d ♭ ′′	C♯5/D ♭ 5	554.365					
52	c′′ dvoučárkovaná oktáva	C5 tenorové C	523.251					
51	b′	B4	493.883					
	a♯′/b ♭ ′	A♯4/B ♭ 4	466.164					
49	a′	A4 A440	440.000	A	A			kom. A
	g♯′/a ♭ ′	G♯4/A ♭ 4	415.305					
47	g′	G4	391.995					
	f♯′/g ♭ ′	F♯4/G ♭ 4	369.994					
45	f′	F4	349.228					
44	e′	E4	329.628					vys. E
	d♯′/e ♭ ′	D♯4/E ♭ 4	311.127					
42	d′	D4	293.665	D	D			
	c♯′/d ♭ ′	C♯4/D ♭ 4	277.183					
40	c′ jednočárkovaná oktáva	C4 prostřední C	261.626					
39	b	B3	246.942					B
	a♯/b ♭	A♯3/B ♭ 3	233.082					
37	a	A3	220.000			A		
	g♯/a ♭	G♯3/A ♭ 3	207.652					
35	g	G3	195.998	G	G			G
	f♯/g ♭	F♯3/G ♭ 3	184.997					
33	f	F3	174.614				F	
32	e	E3	164.814					
	d♯/e ♭	D♯3/E ♭ 3	155.563					
30	d	D3	146.832			D		D
	c♯/d ♭	C♯3/D ♭ 3	138.591					
28	c malá oktáva	C3 nízké C	130.813	C	C		C	
27	B	B2	123.471					
	A♯/B ♭	A♯2/B ♭ 2	116.541					
25	A	A2	110.000					A
	G♯/A ♭	G♯2/A ♭ 2	103.826					
23	G	G2	97.9989			G	G	
	F♯/G ♭	F♯2/G ♭ 2	92.4986					
21	F	F2	87.3071	F				

20	E	E2	82.4069					níz. E
	D♯/E♭	D♯2/E♭2	77.7817					
18	D	D2	73.4162				D	
	C♯/D♭	C♯2/D♭2	69.2957					
16	C velká oktáva	C2 nízké C	65.4064			C		
15	B,	B1	61.7354					B
	A♯,/B♭,	A♯1/B♭1	58.2705	B♭				
13	A,	A1	55.0000				A	
	G♯,/A♭,	G♯1/A♭1	51.9131					
11	G,	G1	48.9994					
	F♯,/G♭,	F♯1/G♭1	46.2493					F♯
9	F,	F1	43.6535					
8	E,	E1	41.2034				E	
	D♯,/E♭,	D♯1/E♭1	38.8909					
6	D,	D1	36.7081					
	C♯,/D♭,	C♯1/D♭1	34.6478					C♯
4	C, kontra oktáva	C1	32.7032					
3	B,,	B0	30.8677				B	
	A♯,,/B♭,,	A♯0/B♭0	29.1352					
1	A,, subkontra oktáva	A0	27.5000					