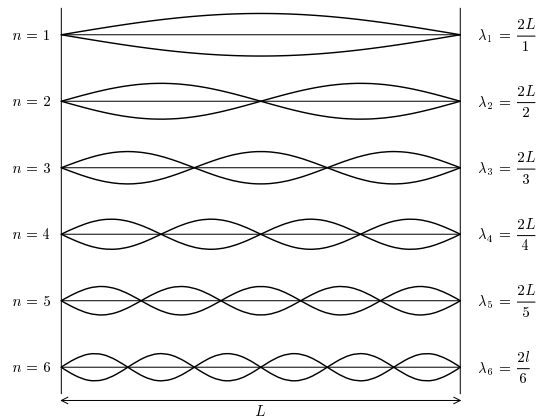


Akustika a hudební nástroje

- Tón – časově periodické změny akustického tlaku
- Je-li $p(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$, jde o jednoduchý tón, jinak je tón složený
- složený tón: $p(t) = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + \dots$, obsahuje vyšší harmonické frekvence $2\omega, 3\omega$ atd.
- Tón má výšku (danou základní frekvencí), barvu (danou spektrem frekvencí v něm obsažených), intenzitu (energie vlny)
- Hladina intenzity – logaritmická stupnice, jednotkou 1 bell (zvýšení hladiny o 1 bell odpovídá desetinásobnému zesílení tónu), 0 dB je práh slyšení, práh bolesti je u člověka kolem 120 dB
- Ucho – úžasný přístroj, má velký rozsah frekvencí, ale hlavně obrovský rozsah intenzit (rozsah intenzit slyšitelných zvuků odpovídá 120 - 130 dB, tj. poměru 10^{12} až 10^{13})
- Třmínkový sval (nejmenší v těle) – spolu s napínačem bubínku chrání ucho před poškozením nadměrným hlukem. Ke stažení obou svalů dochází při překročení hladiny akustického tlaku asi 70dB, ovšem se zpožděním 30 ms.
- Zkoumání kmitů struny → tzv. **módy** – způsoby kmitání:



- Módy lze demonstrovat pomocí gumového lana na jednom konci upevněného, druhý konec držíme v ruce a kmitáme jím
- Flažolety – zatlumíme základní tón a některé další, vybudíme vyšší harmonické, slyšíme vyšší tón
- Lze na jedné struně vyloudit tón různých barev, ale stejných výšek? Ano, záleží na místě, zda např. drkneme, hrajeme smyčcem nebo udeříme kladívkem a na tom, kde to uděláme (uprostřed, na kraji apod.)
- Počáteční tvar struny se rozloží do módů struny, tento rozklad určuje, jak silné budou jednotlivé harmonické
- Lze to ukázat pomocí frekvenční analýzy zvuku, kde je vidět, že vskutku záleží na způsobu a místě rozkmitání

- Helmholtz – ukázal, že dva tóny tvoří tím dokonalejší konsonanci, čím mají větší počet společných vyšších harmonických tónů. Jsou-li vyšší harmonické tóny pouze blízké, ale nikoliv stejné, tvoří se mezi nimi rázy, které způsobují disonanci.
- Aby tóny zněly pěkně pohromadě (např. při **akordu**), musí jejich frekvence být v poměru malých celých čísel (objevil již Pythagoras) → pythagorejské ladění → **přirozené ladění**
- Na klavír v přirozeném ladění bychom mohli hrát jen v jedné či dvou tóninách – proto se užívá **temperované ladění**: oktávu (poměr frekvencí 2:1) rozdělíme na 12 stejných částí; frekvence tónů pak tvoří geometrickou posloupnost s kvocientem $\sqrt[12]{2}$
- Frekvence v přirozeném a temperovaném ladění pak vypadají dle tabulky, v níž jsou násobky frekvence základního tónu

prima		sekunda		tercie	kvarta		kvinta		sexta		septima	oktáva
C	Cis	D	Dis	E	F	Fis	G	Gis	A	Ais (B)	H	C
1		9/8		5/4	4/3		3/2		5/3		15/8	2
1		1,125		1,250	1,333		1,500		1,667		1,875	2
1	$2^{1/12}$	$2^{2/12}$	$2^{3/12}$	$2^{4/12}$	$2^{5/12}$	$2^{6/12}$	$2^{7/12}$	$2^{8/12}$	$2^{9/12}$	$2^{10/12}$	$2^{11/12}$	2
1		1,122		1,260	1,335		1,498		1,682		1,888	2

Hudební nástroje

Strunné nástroje (chordofony) – např. kytara, klavír, housle, violoncello, kontrabas...

- U chordofonů zvuk vzniká kmitáním struny. Barva tónu strunných nástrojů závisí na poloze bodu, v němž strunu rozechvíáme, a na způsobu, jímž jsme strunu uvedli do chvění. Podle způsobu rozechvívání strun můžeme strunné nástroje rozdělit na drnkací, kladívkové a smyčcové.
- Pokud chceme, aby počet tónů vydávaných nástrojem byl vyšší než počet jeho strun, zařídíme to pomocí tzv. hmatníku, který je součástí rezonanční skříňky nástroje. Chce-li hráč změnit frekvenci kmitů struny, přitiskne jednou rukou v určitém místě strunu k hmatníku a druhou rukou rozkmitá část struny. Tímto způsobem se vlastně mění délka struny a tedy i její frekvence. Pro snadnější orientaci jsou u některých nástrojů na hmatníku tzv. pražce. Jsou to tenké kovové pásky vsazené do dřeva hmatníku v určitých rozestupech od sebe, které z hmatníku mírně vystupují. Jestliže přitiskneme prstem strunu k hmatníku před některým pražcem, struna se tak dotkne vyčnívajícího pražce a její chvějná délka sahá jen od pražce ke kobylce. Pražec je užší, tvrdší a ostřejší než prst, proto se kmity struny tlumí méně, než kdybychom délku struny ohraničili jenom prstem (podobně jako se liší úder na strunu měkkým nebo tvrdým kladívkem). K těmto nástrojům s pražci patří např. kytara nebo mandolína. Hmatníky bez pražců pak mají všechny smyčcové nástroje.
 - **Drnkací** – kytara, harfa, mandolína, banjo, cembalo
 - **Smyčcové** – housle, violoncello, basa atd. Relativně složitý proces vedoucí k vytvoření tónu, rozdíl mezi statickým a dynamickým třením se zvyšuje potřením kalafunou
 - **Kladívkové** – klavír, cimbál – počáteční podmínka kmitu je jiná než u drnkacích, jiný je i zvuk

- U strunných, ale i některých jiných hudebních nástrojů hraje zásadní roli **rezonanční deska nebo skříňka**. Od strun se totiž rozechvěje a tak zesiluje vazbu mezi oscilátorem a vzduchem, protože má výrazně větší plochu než samotné struny. Zvuk se pak přenesení do vzduchu mnohem efektivněji. Lze to ilustrovat pomocí ladičky, která bez ozvučné skříňky zní slabě, téměř neslyšně, ale po přiložení ke skříňce zní mnohem hlasitěji, nebo pomocí vrzající fixy s přiloženým papírem. Podobně elektrická kytara zní déle než akustická, ale bez zesilovače není vůbec slyšet. Ozvučná skříňka určuje kvalitu zvuku nástroje.

Idiofony – např. xylofon, metalofon, triangel. . .

- Idiofony jsou hudební nástroje, u kterých zvuk vzniká kmitáním pružných tyčí a desek. Na rozdíl od strun, které konají příčné kmity, kmitavý pohyb tyčí a desek je mnohem složitější, konají tzv. ohybové kmity, které mají charakter příčné i podélné vlny. Při těchto kmitech mění tyče a desky i jako celek periodicky svou polohu. U tyčí kmitají jednotlivé částice kolmo ke směru podélné osy, tedy příčně, u desek pak kolmo k rovině desky.

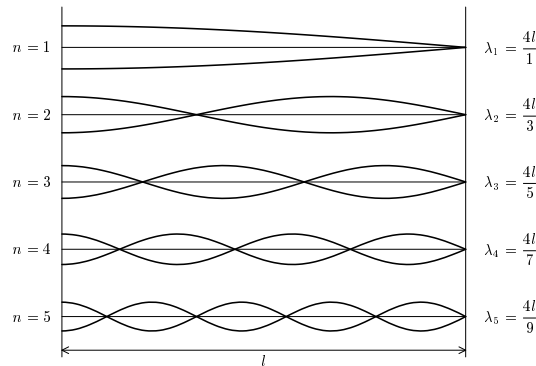
Membránofony – např. bubny, tympán

- Membránofony jsou hudební nástroje, u nichž zvuk vzniká kmitáním blány nebo membrány. Podobně jako desky jsou membrány rovinnými zářiči akustické energie. Na rozdíl od desek však nemají vlastní pružnost, podobně jako struny. Pružnost dodáme membráně tak, že ji napneme po celém jejím obvodu např. na kovový rám. Membrány kmitají stejně jako struny příčně, avšak jejich pohyb se skládá z příčných kmitů ve dvou směrech, a proto je složitější než u strun. Výsledné kmity membrány budou jistě záviset na tvaru rámu, v němž je membrána napnutá.

Aerofony – např. flétny, trubka, lesní roh, klarinet, saxofon, hoboj, fujara, fagot, varhany. . .

- Aerofony jsou hudební nástroje, u kterých zvuk (tón) vzniká kmitáním vzdušného sloupce, uzavřeného v určité rezonanční dutině. Do této skupiny patří všechny hudební nástroje dechové a také některé další. Kmity vzdušného sloupce je možné vybudit různými způsoby a podle tohoto hlediska můžeme aerofony rozdělit do dvou základních skupin: nástroje založené na principu retné píšťaly a jazýčkové hudební nástroje. Tyto nástroje můžeme ještě dále rozdělit podle typu a funkce jazýčku na jednoplátkové hudební nástroje, dvojplátkové hudební nástroje, plechové (žesťové) hudební nástroje a hudební nástroje s kovovými jazýčky
- Aerofony jsou složeny ze dvou spřažených systémů. První systém - budič - zajišťuje samotný vznik kmitů, které mohou mít různé frekvence. Tóny takto vybudené mohou být však velice slabě slyšitelné a také je velice obtížné nastavit budič tak, aby vydával tón o jedné konkrétní předem stanovené frekvenci. K tomu slouží druhý systém - rezonátor - vzdušný sloupec uzavřený v rezonanční dutině, který má za úkol zesílit vybudené kmity. Vzdušný sloupec však zesílí kmity pouze takových frekvencí, které tvoří spektrum jeho vlastních frekvencí. Výslednou frekvenci tedy můžeme ovlivňovat cíleným nastavením vlastností (především rozměrů) vzdušného sloupce a tedy rezonanční dutiny (rezonátoru).
- **Nástroje založené na principu retné píšťaly** (zobcová flétna, příčná flétna, . . .): Retná píšťala je válcová trubice, která ohraničuje vzduchový sloupec. Může být otevřená i uzavřená (krytá) a její průřez může být kruhový i obdélníkový. Počáteční část trubice je zúžená do

šterbiny, kterou se do trubice vhání vzduch. Hned za šterbinou je v horní stěně trubice malý úzký otvor, který je ukončen ostrou hranou tak, že proud vzduchu, který projde šterbinou, narazí přesně do této ostré hrany. Tato část trubice (otvor a hrana) se nazývá rty píšťaly (proto pojmenování retná píšťala). Od šterbiny se trubice rozšiřuje a od rtů píšťaly až ke konci už má stálý průřez. Jestliže proud vzduchu prošlý úzkou šterbinou narazí do ostré hrany, mění se dříve ustálený vzdušný proud v turbulentní proudění. Po obou stranách hrany, uvnitř i vně, se tvoří periodicky se opakující víry. Tyto periodicky se opakující víry vznikají nejen při nárazu na hranu, ale také při průchodu proudy vzduchu úzkou šterbinou, u které alespoň jedna z delších hran je zaostřena. Počet vírů, které vznikají při popsanych dějích v jedné sekundě, určuje frekvenci tónu nazývaného třecím tónem. Prvních několik módů retné píšťaly je znázorněno na obrázku, kmitna je na otevřeném konci (přibližně), uzel na uzavřeném.



- **Jazýčkové hudební nástroje (např. harmonika, harmonium):** jejich základ tvoří vzduchová komora, která má tvar protáhlého úzkého dutého kvádru. Horní stěnu komory zčásti nahrazuje pružný jazýček, upevněný na jednom konci šroubem, na druhém konci volný. Jazýček může mít rozměry nepatrně menší než výřez ve stěně komory. Tomuto typu jazýčku říkáme jazýček průrazný (nebo také volný). Jsou-li rozměry jazýčku takové, že jen nepatrně překrývá otvor komory, narazí jazýček při kmitání na okraj pevné stěny komory. Tento typ jazýčku nazýváme jazýček nárazný.

- **Jednoplátkové hudební nástroje:** Hlavním nástrojem v této skupině je klarinet. Je to dřevěná nebo umělohmotná válcová trubice, která je na svém horním konci zobcovitě zúžená (z jedné strany je šikmo seříznutá) a uzavřená a na dolním konci otevřená a nálevkovitě rozšířená. Na horním konci trubice je v boční stěně naproti seříznuté části vyříznut otvor přibližně obdélníkového tvaru. Tento otvor zcela překrývá tenký třtinový plátek, který je také přibližně obdélníkový a na svém konci je upevněn šroubem k trubici v místě dolní části otvoru (jedná se o jazýček nárazný). Důležité však je, že plátek má klínovitý průřez - zužuje se od místa svého upevnění až k volnému konci, ale také od středu do stran. Takový tvar plátku jednak zvyšuje jeho pružnost a jednak způsobuje, že plátek úplně nedoléhá ke stěně trubice a vzniká tak zde úzká klínovitá mezera. Jestliže proudí touto mezerou do trubice vzduch, rychlost jeho proudění je vyšší, než rychlost vzduchu vně plátku. V mezeře tak vzniká podtlak a plátek se přiblíží k otvoru. Už toto náhlé přiblížení plátku utvoří na začátku vzduchového sloupce postupnou tlakovou vlnu, která se šíří až k otevřenému konci trubice, kde se odrazí a vzniká stojatá vlna o vlastní frekvenci vzduchového sloupce. Tato vlna rozkmitá také plátek, který bude kmitat rovněž vlastní frekvencí sloupce. Kmity vzduchového sloupce mají větší útlum než kmity plátku. Plátek zde tvoří budič kmitů a vzduchový sloupec představuje rezonátor.

(klarinet, saxofon)

- **Dvojpátkové hudební nástroje (hoboj, fagot, dudy):** Jazýček (vlastní oscilátor) těchto nástrojů je složen ze dvou rákosových plátků, vyduťých a nahoře rovně seříznutých. Plátky

jsou k sobě přiloženy konkávními stěnami. Jsou upevněny do tzv. strojku, který je mechanicky spřažen s trubicí nástroje a je tak v kontaktu se vzduchovým sloupcem. Úzkou štěrbinou mezi oběma plátky proudí z hudebníkových úst vzduch, jehož rychlost je vyšší než rychlost vzduchu vně plátek. Vzniká tak mezi nimi podtlak, přiblíží se k sobě a vytvoří tlakovou vlnu v trubicí. Dále je už je princip úplně stejný jako u klarinetu. Plátky se při kmitání střídavě k sobě přibližují a oddalují.

- **Plechové (žesťové) hudební nástroje** (trubka, lesní roh, . . .): U plechových (neboli žesťových) hudebních nástrojů tvoří jazýček hudebníkovy rty - je to dvojitý blanitý (membranózní) jazýček. Na začátek nástrojové trubice se nasazuje tzv. nátrubek, který má nálevkovitý nebo kotlovitý tvar a je vyroben většinou z mosazi. Nátrubek je mechanicky spřažen se vzduchovým sloupcem uzavřeným v nástrojové trubicí. Při hře hudebník vloží střední část rtů do nátrubku, rozkmitá rty a současně fouká do nástroje vzduch. Od kmitů rtů se rozkmitá vzduch v trubicí vlastní frekvencí vzduchového sloupce a této frekvenci se pak také přizpůsobí hudebníkovy rty.
- **Hudební nástroje s kovovými jazýčky** (foukací harmonika, některé varhanní píšťaly): diskrétní spektrum jejich frekvencí je pevně dáno jejich tvarem a rozměry. Jediný typ nástroje s kovovými jazýčky spojených s rezonátorem je jazýčková varhanní píšťala, ostatní nástroje nemají rezonátor.

Pokusy:

- Ladička ryje sinusovku v začazeném sklíčku
- Ladička bez skříňky – zní slabě, se skříňkou silně
- Rezonance: rozkmitat ladičku, od ní se rozkmitá druhá, první pak zatlumíme, druhá zní
- Rázy (zázněje): dvě ladičky, jedna trochu rozladěná přívažkem, pravidelně kolísá intenzita zvuku, frekvence kolísání (rázů) je rozdílem frekvencí obou tónů
- Zviditelnit kmit ladičky stroboskopem
- Kmitové módy struny, flažolety, vyšší harmonické atd.
- Ukázat pomocí Fourierovy analýzy více frekvencí u struny a jak záleží na tom, kde se struna rozechvěje
- Stojaté vlny na vlákně, která se třepe (příčné vlnění), zviditelnění stroboskopem
- Kmitové módy gumového lana

Literatura: Magdalena Čermáková, AKUSTIKA PRO STUDENTY STŘEDNÍCH ŠKOL, diplomová práce, PŘF MU, 2002.