

temperované poltóny tvoria temperovaný celý tón atď. Je pochopiteľné, že hra na nástroji s temperovaným ladením nedosahuje lahodnosť čistého ladenia, aj keď sa temperované ladenie s ladením čistým dosť dobre zhoduje. Ukazuje to *tabuľka 9.3*, v ktorej sú uvedené logaritmny jednotlivých intervalov tvrdej hudobnej stupnice v ladení čistom a temperovanom, pričom za základ logaritmov bola zvolená relatívna výška dvoch tónov tvoriacich malý temperovaný poltón.

Tabuľka 9.3

Vzťah medzi temperovaným a čistým ladením

Ladenie	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Čisté	0	2,04	3,86	4,98	7,02	8,84	10,88	12
Temperované	0	2	4	5	7	9	11	12

Je pozoruhodné, že pomerne najmenej sa od seba líšia temperovaná a čistá kvarta a kvinta.

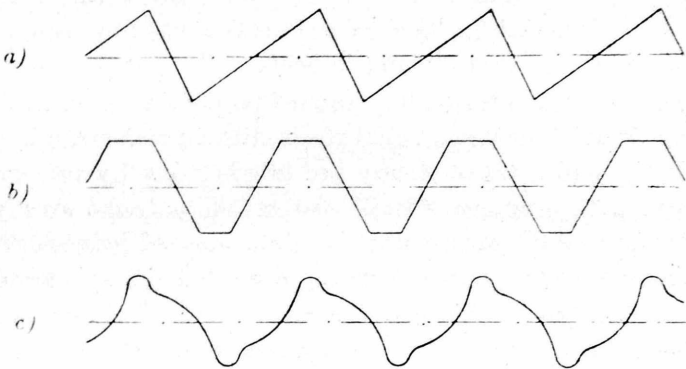
Na to, aby sa súčasne mohlo hrať na väčšom počte hudobných nástrojov, je potrebné, aby nimi vydávané tóny mali rovnaké relatívne výšky vzhľadom na spoločný základ. Týmto základným, dohodou prijatým tónom je komorné a , presnejšie a^1 , s frekvenciou 440 s^{-1} . Keď tento tón je šiestym tónom v tvrdej stupnici tónov, stupnica sa nazýva tvrdou stupnicou c ($c \text{ dur}$) a jej jednotlivé tóny sa označujú písmenami c, d, e, f, g, a, h, c , presnejšie c^1, d^1, \dots, c^2 . Hudobné označenie nižšie a vyššie položených oktáv je: *subkontraoktáva* (C_2, D_2, \dots, C_1), *kontraoktáva* (C_1, D_2, \dots, C), *veľká oktáva* (C, D, \dots, c), *malá oktáva* (c, d, \dots, c^1), *jednočiarkovaná oktáva* (c^1, d^1, \dots, c^2) atď. Zvýšenie tónu o poltón vyjadruje sa príponou *-is*, napríklad *fis*, a označuje znakom \sharp ; zníženie o poltón sa vyjadruje koncovkou *-es*, napríklad *hes*, a označuje znakom \flat . v obidvoch prípadoch pred značkou príslušného tónu.

9.5. Niektoré zdroje hudobných zvukov. Zdrojom hudobného zvuku môže byť každé pravidelne kmitajúce teleso. V praxi zdrojmi hudobných zvukov sú hudobné nástroje, ľudské hlasivky a reproduktory zvuku. Najdôležitejšie druhy hudobných nástrojov sú nástroje *strunové* a nástroje založené na *pišťalách*. Strunové nástroje sa rozdeľujú ďalej na nástroje *sláčikové* (husle, viola, čelo, basa), na nástroje *brnkacie* (harfa, gitara, balalajka, mandolína) a na nástroje, na ktorých sa struny uvádzajú do chvenia úderom kladivka (klavír, cimbál).

Absolútnu výšku základného tónu struny určuje vzorec, ktorý sme odvodili už v čl. 8.3

$$v_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{s}}, \quad (1)$$

kde l je dĺžka struny, F jej napätie a s hmotnosť dĺžkovej jednotky struny, pričom vo všeobecnosti struna môže vydávať súčasne aj všetky príslušné vyššie harmonické tóny s frekvenciami $v_k = kv_1$. Ako to dokazujú príslušné grafické záznamy po rozklade ich priebehu na harmonické zložky, o tom, ktoré vrchné tóny a s akou intenzitou sú zastúpené vo zvuku struny, rozhoduje hlavne



Obr. 9.7

spôsob, ako sa struna privádza do chvenia. Na obr. 9.7 je reprodukováný záznam chvenia struny: a) udržovanej vo chvení sláčikom, b) privedenej do chvenia brnknutím a c) privedenej do chvenia úderom kladivka.

Zvuk struny, ktorá chveje účinkom sláčika, obsahuje mnoho vyšších harmonických tónov, ktorých intenzity sa s ich stúpajúcim poradovým číslom znižujú. Výnimku tvoria tie tóny, pri ktorých miesto styku sláčika a struny by muselo byť uzlom, lebo tieto tóny vôbec nevzniknú. Intenzita zvuku vydávaného takouto strunou závisí hlavne od rýchlosti pohybu sláčika po strune, menej od jeho tlaku. Hudobník pomocou sláčika môže v širokom rozsahu meniť silu aj zafarbenie zvuku, čím hra na sláčikových hudobných nástrojoch nadobúda neobyčajnú výraznosť, takže z tejto stránky sa im žiadny iný nástroj nevyrovná.

Struny sláčikových hudobných nástrojov sú naladené na tieto tóny:

husle g, d^1, a^1, e^2 , celkové napätie 23 kg,

viola c, g, d^1, a^1 , celkové napätie 31 kg.

čelo C , G , d , a , celkové napätie 45 kg,
 basa E_1 , A_1 , D , G , celkové napätie 200 kg.

Ostatné tóny vytvára hudobník tak, že prstami ľavej ruky pritlačí strunu ku hmatníku a tým skráti jej účinnú dĺžku.

Keď sa struna uvádza do chvenia brnkáním pomocou tvrdého hrotu, amplitúdy a vrchných harmonických tónov sa zmenšujú — ako rozbor grafického záznamu jej pohybu ukazuje — približne len s prvou mocninou ich poradového čísla, takže ich intenzita, úmerná súčinnu $v^2 a^2$, je prakticky rovnaká. Zvuk struny v tomto prípade je až nepríjemne ostrý, znesiteľný len pri oceľových strunách, ktorých malá ohybnosť vyššie harmonické tóny silne tlmí. Keď sa však brnká mäkkým prstom, prevláda vo zvuku struny základný tón a vrchné harmonické tóny sú o niečo slabšie. Tým sa zvuk stáva mäkkším, ostáva však plným. Význačným nástrojom tohto druhu je *harfa*.

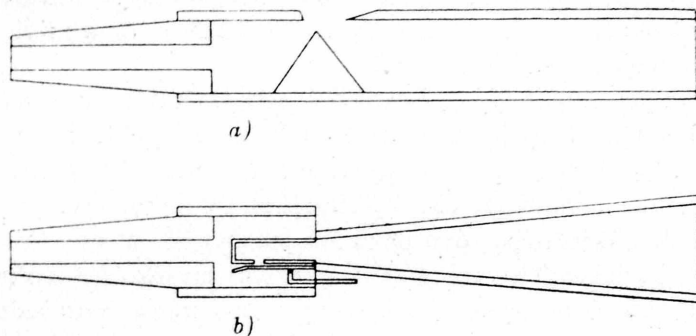
Struny *klavíra* majú ladenie temperované po poltónoch od A_2 do a^4 . Celkové napätie strún je asi 11 000 kg. Veľmi rôzna dĺžka a tiaž strún klavíra by mala za následok, že dlhé a ťažké struny pre hlboké tóny by pri rovnakých úderoch vydávali zvuk omnoho silnejší ako krátke a tenké struny pre vysoké tóny. Aby sa to nestalo, struny pre najhlbšie tóny sú jednoduché, struny pre tóny o niečo vyššie sú po dvoch a struny pre stredné a vysoké tóny po troch.

Struny sláčikových hudobných nástrojov sú napäté cez ľahkú kobyľku, ktorá stojí na ťutej skrinke s prehnutými stenami a s otvormi do tvaru f . Takúto skrinku alebo aspcň dosku musia mať všetky strunové hudobné nástroje, lebo kmitajúca struna vyvoláva v svojom blízkom okolí len vírivé, v sebe uzavreté prúdenie vzduchu, nie však aj významnejšie kolísanie tlaku, potrebné na vyvolanie pozdĺžneho zvukového vlnenia. Skrinka je vnútri vystužená kolíčkom (dušou) pri pravej nôžke kobyľky, a pozdĺžnym trámčekom pod ľavou nôžkou kobyľky. Účelom zvláštného tvaru ozvučnej skrinky je, aby podľa možnosti rovnomerne zosilňovala tóny rôznych výšok. Pravda, ozvučná skrinka podľa svojho materiálu a tvaru vždy pozmeňuje zafarbenie zvuku samotnej struny tým, že niektoré zložky jej zložitého zvuku zosilňuje viac a iné menej, a tak rozhoduje o sile, čistote, lahodnosti a jasnosti zvuku. Pre túto príčinu sú vysoko cenené najmä husle vyrobené talianskymi majstrami v 17. storočí, ktoré sa vyznačujú neobyčajne jasným a čistým zvukom.

Ozvučné skrinky sláčikových hudobných nástrojov majú veľmi silné tmenenie, čo — keďže struny udržiavané stále vo chvení sláčikom poskytujú pre vznik zvuku dosť energie — nielen že nie je na škodu, ale dokonca výhodné, pretože sa takto zvuk vydávaný hudobným nástrojom môže veľmi rýchle meniť, lebo neruší *doznívanie*. Naproti tomu ozvučné skrinky hudobných nástrojov, ktorých struny sa privádzajú do chvenia brnkáním (napríklad *gítara*) alebo úderom

kladivka (*klavír, cimbal*), majú mať menšie tlmenie, aby sa náhle vzbudený zvuk dlhšie udržal.

V niektorých hudobných nástrojoch sa namiesto strún naladených na určité tóny používajú píšťaly *retné*, obyčajne otvorené, alebo *jazyčkové*. Sú to trubice s prierezom kruhovým, štvorcovým alebo obdĺžnikovým, v ktorých sa vzduch uvádza do pozdĺžneho chvenia buď fúkaním proti ostrej hrane, ktorá sa nazýva *ret* (*obr. 9.8a*), alebo chvením pružného *jazyčka* (*obr. 9.8b*).



Obr. 9.8

Výška základného tónu, ktorý môže vydávať píšťala retná, závisí od jej dĺžky a pre otvorenú píšťalu retnú je určená vzorcom (8.5.7)

$$v_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\kappa \frac{p}{s}} \quad (2)$$

pričom píšťala môže vydávať aj všetky vyššie harmonické tóny s frekvenciami $v_k = kv_1$. Silnejšie fúkanie do píšťaly môže spôsobiť, že sa nezvje jej základný tón, ale až tóny počínajúc niektorým vyšším harmonickým tónom. Vzorec (2) nevyjadruje však frekvenciu otvorenou retnou píšťalou vydávaných tónov celkom presne, lebo pri jeho odvodzovaní sme predpokladali, že v otvorenom valci, v ktorom je vzduch v stojatom vlnení, kmitne sú presne na oboch koncoch valca. V skutočnosti pri otvorenej retnéj píšťale ani hrana rtu ani koniec píšťaly svojou polohou neurčujú presne polohu kmitní na koncoch píšťaly, ktoré sú vždy o niečo ďalej, takže dĺžka vzduchového stĺpca v stojatom vlnení je o príslušnú opravu väčšia ako dĺžka píšťaly. Okrem toho rýchlosť postupu vlnenia vo vnútri píšťaly je vždy o niečo menšia ako vo voľnom vzduchu. Príčinou tohto poklesu je vnútorné trenie a trenie vzduchu na styku so stenami píšťaly, ako aj to, že zmeny tlaku vzduchu v píšťale nie sú presne

adiabatické. Výška tónu vydávaného otvorenou retnou píšťalou je pre tieto príčiny, ktoré všetky pôsobia v súhlasnom zmysle, vždy menšia ako podľa vzorca (2).

Najdokonalejším hudobným nástrojom, v ktorom sa používajú retné píšťaly, je *organ*. Zafarbenie zvuku píšťal organa závisí od materiálu ich stien a od tzv. *menzúry*. Píšťaly drevené dávajú tón mäkkší (steny tlmia vyššie harmonické tóny), píšťaly cínové tón tvrdší, prenikavejší. Pod menzúrou píšťaly sa rozumie pomer hĺbky hranatej píšťaly k jej dĺžke a pohybuje sa v hraniciach $\frac{1}{25}$ až $\frac{1}{6}$. Úzka menzúra podporuje vznik vyšších tónov harmonických, ktoré dodávajú zvuku určitý lesk; široká menzúra podporuje základný tón a nižšie tóny harmonické, čím zvuk nadobúda plnosť.

Z orchestrálnych hudobných nástrojov k retným píšťalám patrí len *flauta* a *pikola*. Tóny rôznej výšky vytvára hudobník na týchto nástrojoch tým, že znižuje účinnú dĺžku píšťaly otváraním bočných dierok, ktoré boli zakryté prstom alebo klapkou, ako aj silnejším fúkaním, tzv. *prefukovaním*, čím sa namiesto základného tónu ozvú len jeho vyššie alebo nižšie násobky.

V píšťalách jazýčkových vzniká zvuk chvením jazýčka (pružného mosadzného prúžku), ktorý prikrýva obdĺžnikový výrez medzi vzdušnou komorou a ozvučnou rúrkou píšťaly. Jazýček je buď o niečo menší ako tento výrez, takže môže v ňom kmitať (jazýček prierazný), buď o niečo väčší (jazýček nárazný). Jazýček prierazný dáva mäkký zvuk; jazýček nárazný, ktorý pri svojom pohybe naráža na okraje výrezu medzi vzdušnou komorou a jej pokračovaním, dáva zvuk drsnejší. Na rozdiel od píšťaly retnéj, pri ktorej o výške tónu rozhoduje dĺžka píšťaly, výška tónu jazýčkovej píšťaly je určená hmotnosťou, rozmermi a pružnosťou jazýčka a ozvučná rúrka píšťaly len podporuje vznik tónu, ktorý rezonanciou súčasne zosilňuje. Z hudobných nástrojov jazýčkové píšťaly obsahujú najmä *harmónium* a rôzne ručné a fúkacie *harmoniky*.

Dychové hudobné nástroje orchestrálne okrem flauty a pikoly sú vlastne tiež všetky píšťaly jazýčkové. *Hoboj*, *anglický roh* a *faĝot* majú dvojité (trstinový) jazýček, a ich zvuk vplyvom kužeľovitého tvaru rezonančnej rúry obsahuje všetky vyššie harmonické tóny; *klarinet* a *basový klarinet* majú jednoduchý drevený jazýček, a ich (pri jazýčku uzavretá) rezonančná rúrka, ktorá má valcovitý tvar, umocňuje vznik len nepárnych vrchných harmonických tónov [pozri vzorec (8.5.5)].

Plechové hudobné nástroje sú tiež jazýčkové píšťaly, v ktorých úlchu jazýčka zastupujú rôzne napínané perý hudobníka. Z týchto nástrojov najušľachtilejší zvuk dáva *roh*, ktorého rezonančný zvukovod sa už od samého počiatku mierne rozširuje. Trúbky a pozauny majú zvukovody až do dvoch tretín valcovité a až posledná tretina sa kužeľovite rozširuje. Úzka menzúra

plechových nástrojov spôsobuje, že z nich nemožno vylúdiť ich základný tón, zato však ľahko všetky vyššie harmonické tóny, od druhého až po dvanásť. Starší prirodzený roh, ktorý nemal ventily, umožňoval zahrať len vyššie harmonické tóny svojho základného tónu, teda ak tento bol napríklad C_1 , mohli sa na rohu hrať len C , G , c , e , g , hes , c^1 , d^1 , e^1 , f^1 , g^1 , pričom tón f^1 nebol už čistý. Pri dnešných ventilových hudobných nástrojoch dopĺňujú sa chýbajúce tóny tým, že sa pomocou ventilov vradujú do rezonančného zvukovodu predlžujúce rúrky, čím sa účinná dĺžka zvukovodu zväčšuje a tón znižuje; prvý ventil znižuje o celý tón, druhý o poltón a tretí o malú terciu. Pri *pozaune* sa zníženie tónu dosahuje vyťahovaním dvoch do seba zapadajúcich trubíc tvaru U .

Okrem strún a píšťal ako zdroje hudobných zvukov sa používajú ešte pružné kovové *tyče*, *dosky* a *napäté blany*. Tyč sa môže chvieť dvojakým spôsobom, pozdĺžne a priečne.

Pozdĺžne chvejúce tyče sa však v hudbe nepoužívajú z dvoch príčin: pre ťažké pozdĺžne rozochvievanie tyčí a pre ich prílišnú dĺžku, ktorá by bola potrebná pre vznik tónov s výškami obvyklými v hudbe.

Priečne chvenie tyčí je jav omnoho zložitejší ako ich pozdĺžne chvenie, a týmto javom sme sa v svojich úvahách o vlnivom pohybe pružného hmotného prostredia nezaoberali. Príslušná teória pre frekvenciu priečne chvejúcej sa tyče so stálym prierezom, dĺžky l , poskytuje vzorec

$$\nu = \frac{m^2 R}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{s}}, \quad (3)$$

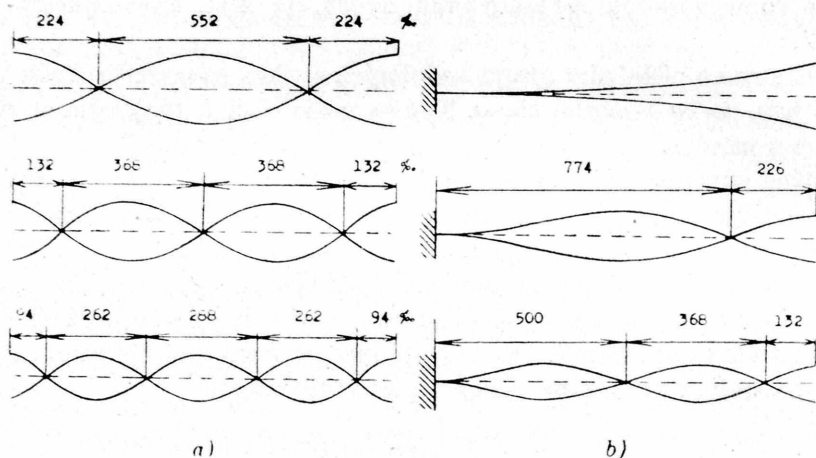
v ktorom E je modul pružnosti materiálu tyče v ťahu, R polomer zotrvačnosti prierezu tyče vzhľadom na ohybovú os, s merná hmotnosť a m niektorý koreň transcendentnej rovnice

$$\cos m \cdot \cosh m = \pm 1, \quad (4)$$

v ktorej horné znamienko platí pre tyč na obidvoch koncoch voľnú alebo na obidvoch koncoch upevnenú a znamienko dolné pre tyč na jednom konci upevnenú a na druhom konci voľnú. Podľa vzorca (3) základná frekvencia priečneho chvenia tyče sa znižuje s druhou mocninou jej dĺžky, teda rýchlejšie ako pri pozdĺžnom chvení. Významnejšie je však, že frekvencie možných priečných chvení tyče nie sú celistvé násobky základnej frekvencie. Pomer druhých mocnín prvých troch koreňov rovnice (4) pre tyč na obidvoch koncoch voľnú (na jednom konci upevnenú a na druhom konci voľnú) je napríklad $1 : 2,7565 : 5,4039$ ($1 : 6,2686 : 17,5475$). Pre túto okolnosť zvuk priečne chvejúcich sa tyčí nie je dosť príjemný a nehodí sa dobre na hudobné účely. Rozloženie

kmitní a uzlov na priečne chvejúcej sa tyči na oboch koncoch voľnej (na jednom konci upevnenej a na druhom konci voľnej) ukazujú obr. 9.9a a 9.9b.

V tejto súvislosti sa zmienime ešte o *ladičke*, ktorá sa používa ako zdroj zvuku so známou a konštantnou frekvenciou. Je to kovová, obyčajne ocelová tyč, ohnutá do tvaru vidlice, ktorá v mieste ohybu má nôžku. Keď na niektoré rameno ladičky udrieme napríklad mäkkým kladivom, ramená ladičky sa rozochvejú priečne, pričom nôžka ako celok kmitá pozdĺžne. Pravda, popri svojom základnom tóne môže ladička vydávať aj neharmonické a omnoho



Obr. 9.9

vyššie tóny, ktoré však vplyvom tlmenia pomerne rýchle zanikajú. Za normálnej frekvencie sa ladička hodí najmä preto, lebo teplota má na frekvenciu jej chvenia pomerne veľmi malý vplyv. Pre ocelovú ladičku je táto závislosť vyjadrená pokusne získaným vzorcom $\nu = \nu_0 (1 - 0,00011 t)$. Ladičky zo zliatiny zvanej *elinvar* (niklová oceľ) vydávajú tón, ktorého frekvencia sa s teplotou prakticky vôbec nemení.

Kovové alebo sklené, v strede upevnené dosky kruhového alebo štvorcového tvaru možno uvádzať do priečneho chvenia pomocou sláčika, ktorý ťaháme po okraji dosky, pričom dosku v niektorom bode jej obvodu pridržujeme prstom. Takýmto rozochvievaním dosák môžeme sa presvedčiť o tom, že dosky môžu chvieť najrôznejším spôsobom. Keď doska, upevnená vo vodorovnej polohe, bola pred pokusom posypaná jemným pieskom, piesok sa z kmitní presunie do uzlových čiar, čím vzniknú známe *Chladniho obrázky*. Z takýchto pokusov vyplýva, že doska môže dávať niekoľko základných tónov a súčasne veľmi mnoho vysokých tónov, ktoré — práve tak ako tóny priečne chvejúcich sa

tyčí — nie sú však harmonické. Základný tón dosky je tým vyšší, čím menšia a hrubšia je doska. Tenké dosky, aj keď sú malé, majú základné tóny pomerne hlboké a okrem toho môžu sa chvieť rozličným spôsobom. Môžu preto reprodukovať rôzne zvuky s veľkou presnosťou, čo sa využíva v mikrofónoch a reproduktoroch zvuku.

Veľké dosky, keď sú dosť hrubé, môžu vydávať primerane vysoký zvuk, ktorý je v dôsledku veľkosti dosky aj mohutný. Takýmito doskami sú vo svojej podstate *kostolné zvonky*. Voľbou vhodného tvaru zvonu možno dosiahnuť, že jeho základné tóny sú konsonantné, čím sa mohutný zvuk zvonu stáva súčasne lahodný a velebný.

Napäté blany ako zdroje zvuku sa používajú pri bubnoch. Ich neurčitý zvuk slúži len na podporu rytmu. Keď je však blana vypnutá nad vhodnou rezonančnou dutinou, potrebným vypnutím blany možno dosiahnuť, že vydávaný zvuk má zreteľne svoju výšku. To sa využíva pri *tympanoch*, medených kotloch tvaru pologúľ, cez obvod ktorých je vypnutá dobre vypracovaná telacia koža.

9.6. Vznik, vlastnosti a použitie ultrazvuku. Podľa všeobecného zvyku zvukom sa nazýva len také vlnenie hmotného prostredia, o ktorom sa môžeme presvedčiť sluchom. Zo skúsenosti vieme (pozri *obr. 9.3*), že na to treba, aby frekvencia vlnenia bola v rozsahu od 16 až asi do 20 000 Hz, pričom však tieto hranice sú do istej miery individuálne. S ohľadom na túto okolnosť a podľa analógie s príslušnými názvami v optike vlnenie akéhokoľvek hmotného prostredia s frekvenciou menšou ako 16 Hz sa volá *infrazvuk* a vlnenie s frekvenciou väčšou ako asi 20 000 Hz *ultrazvuk*. Teoreticky zaujímavým a aj prakticky významným javom je len vlnenie ultrazvukové (nadvukové). Ultrazvuk sa teda od obyčajného zvuku líši len svojou vysokou frekvenciou. Jej pomerne príliš vysoká hodnota je predsa príčinou, že sa ako zdroje ultrazvuku obyčajne používajú osobitné prístroje a zariadenia. Z čiste mechanických zdrojov ultrazvuku sú to najmä: špeciálne konštruovaná kovová uzavretá píšťala veľmi malých rozmerov, tzv. *Galtonova píšťala*, a na podobnom princípe založený *Hartmannov akustický generátor*, v ktorom prúd vzduchu unikajúci z kužeľovej trubice naráža na valcový rezonátor. Pomocou Hartmannovho generátora možno získať ultrazvuk s frekvenciou až 130 kHz, pri použití vodíka — s frekvenciou až 500 kHz. Pri pokusoch s ultrazvukom a pri jeho praktickom používaní zdrojmi ultrazvuku sú však najčastejšie piezoelektrické alebo magnetostriekné ultrazvukové generátory, ktoré možno omnoho ľahšie ovládať ako generátory mechanické.

Keďže ultrazvukové vlny sú veľmi krátke, v zhode s Huygensovým princípom (čl. 8.11) sa ultrazvuk okolo nie veľmi malých prekážok šíri prakticky