

dopadu α_1 , pri ktorých polomer $\overline{SA_2}$ elementárnej guľovej vlnoplochy okolo bodu rozhrania (obr. 8.28) je menší ako vzdialenosť \overline{SO} , lebo v opačnom prípade elementárne guľové vlnoplochy vzťahujúce sa na druhé prostredie sa nachádzajú jedna vnútri druhej, takže spoločnú obálku nemajú. Z podmienky $\overline{SA_2} < \overline{SO}$, t. j.

$$\frac{v_2}{v_1} \overline{SA'} = \frac{v_2}{v_1} \overline{SO} \sin \alpha_1 < \overline{SO}$$

vyplýva, že keď platí vzťah $v_2 > v_1$, vlnenie môže vniknúť aj do druhého prostredia len pri dostatočne malých uhloch dopadu α_1 , pri ktorých je ešte $\sin \alpha_1 < \frac{v_1}{v_2} = n$. Uhol dopadu α_0 , daný rovnicou $\sin \alpha_0 = n < 1$, nazýva sa *hraničný*. Podľa rovnice (1) pri hraničnom uhle dopadu uhol lomu je $\alpha_2 = 90^\circ$. Ak je uhol dopadu väčší ako α_0 , lom už vôbec nenastáva a vlnenie sa v plnej svojej intenzite odráža naspäť do prvého prostredia. Hovoríme, že nastáva *úplný odraz (totálna reflexia)* vlnenia.

Príklad 1. Podľa vzorca (8.5.5) rýchlosť zvuku vo vzduchu pri obvyklých podmienkach je asi 340 ms^{-1} . Zo vzorca $v = \sqrt{1/ks}$, kde k je koeficient stlačiteľnosti a s merná hmotnosť, vyplýva, že rýchlosť zvukového vlnenia vo vode ($k = 49 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kp}$) je $v_2 = 1400 \text{ ms}^{-1}$. Hraničný uhol pre lom vlnenia na rozhraní vzduch/voda je teda určený rovnicou $\sin \alpha_0 = n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{340}{1400} = 0,24$, podľa ktorej $\alpha_0 = 14^\circ$. Tento výsledok vysvetľuje, prečo sa nad pokojnou vodnou hladinou dobre šíria aj slabé zvuky, ako aj to, že pod vodnou hladinou môžeme počuť len zvuky, ktoré dopadajú na hladinu vody skoro kolmo. Zvukové vlny dopadajúce na vodnú hladinu pod uhlom väčším ako 14° sa od nej totálne odrážajú a nevnikajú teda pod vodnú hladinu.

9. AKUSTIKA

9.1. Obsah a rozdelenie akustiky. Vlnenie hmotného prostredia, pokiaľ sa o jeho jestvovaní môžeme presvedčiť sluchom, nazýva sa vo fyzike aj v bežnej reči *zvuk*. Je predmetom štúdia časti fyziky, presnejšie náuky o mechanickom

vlnení, ktorá sa nazýva *akustika*. Zvukmi sa možno však zaoberať z rôznych príčin a s nerovnakým cieľom. Tá časť akustiky, ktorá skúma zvuky a ich kombinácie so zreteľom na potreby hudby, nazýva sa *hudobná akustika* alebo aj fyzikálna teória hudby. *Fyzikálna akustika* študuje spôsob vzniku zvuku v hudobných nástrojoch a v iných zdrojoch zvuku, ako aj šírenie, odraz a pohlcovanie zvuku v rôznych materiáloch. *Fyziologická akustika* sa zaoberá vznikom zvuku v hlasovom orgáne človeka a jeho vnímaním v uchu. Predmetom *stavebnej akustiky* je skúmanie podmienok dobrej a nerušenej počuteľnosti hudby a reči v obytných miestnostiach a sálach. *Elektroakustika* sa zaoberá záznamom, reprodukciou a šírením sa zvuku, pričom používa aj niektoré pojmy zavedené v teórii vedenia striedavých elektrických prúdov. V akustike sa zvyčajne pojednáva aj o vzniku, vlastnostiach a účinku tzv. *ultrazvuku*, mechanického vlnenia s veľmi vysokou frekvenciou, na ktoré už ľudské ucho nereaguje.

Zdroj zvukového vlnenia sa stručne nazýva *zdroj zvuku* a hmotné prostredie, v ktorom sa toto vlnenie šíri, jeho *vodič*. Vodič zvuku, zvyčajne vzduch, sprostredkuje spojenie medzi zdrojom zvuku a jeho *príjímačom* (*detektorom*), ktorým v praxi býva ucho alebo mikrofón.

Zdrojom zvuku môže byť každé teleso v stojatom vlnení, v chvení. O vlnení v okolí zdroja zvuku nerozhoduje však len energia jeho chvenia, ale aj okolnosť, či je tento dobrým alebo zlým *žiaričom zvuku*. Táto jeho vlastnosť, ako sa hneď presvedčíme na prípade struny, závisí najmä od jeho geometrického tvaru. Struna napnutá medzi dvoma pevnými bodmi telesa s veľkou hmotnosťou nie je dobrým žiaričom zvuku, lebo pri chvení struny v smere jej pohybu vzniká pretlak a súčasne na opačnej strane podtlak. Tým sa najbližšie okolie struny stáva druhotným zdrojom dvoch vlnení, ktoré sa šíria na všetky strany prakticky s opačnou fázou, lebo priečne rozmery struny sú vzhľadom na vlnovú dĺžku zvukového vlnenia vždy veľmi malé. Takéto dve vlnenia sa však — ako už vieme — interferenciou rušia.

Podmienky vzniku zvuku pôsobením chvenia struny sa podstatne zlepšia, keď jeden z pevných koncov účinnej dĺžky struny je mechanicky spojený s tzv. ozvučnou doskou, ktorá sa takto dostáva do značne tlmeného vynúteného chvenia. Tým, že jej rozmery sú pomerne veľké, zrovnateľné s vlnovými dĺžkami zvukového vlnenia, oddeľuje dostatočne miesta pretlaku a podtlaku. Pre tú istú príčinu, t. j. aby nenastal — ako sa hovorí — zvukový skrat, elektrodynamické reproduktory zvuku sa montujú do výrezu masívnej dosky vhodne volených rozmerov. V tomto poslednom prípade chvenie dosky nenastáva a ani nie je potrebné, lebo zdrojom zvukového vlnenia je teraz membrána reproduktora s veľkou plochou.

Zvuky rozdeľujeme na *hudobné (tóny)* a *nehudobné*. Nehudobným zvukom

je každé nepravidelné vlnenie vodiča zvuku, ktorého príčinami sú nepravidelné rozruchy (zrážka dvoch telies, výstrel, preskočenie elektrickej iskry a pod.). Na rozdiel od nehudobných zvukov hudobné zvuky sú podmienené pravidelným, v čase periodicky prebiehajúcim pohybom hmotného prostredia. Pri ich počúvaní vzniká v uchu s časom sa nemeniaci, a preto príjemný vnem, ktorý sa využíva v každej hudbe. Zdrojmi hudobných zvukov sú napríklad ľudské hlasivky, rôzne hudobné nástroje, prípadne aj reproduktory zvuku.

Každý zvuk, hudobný aj nehudobný, vyznačuje sa svojou fyzikálnou *intenzitou*, s ktorou je rovnocenná veličina nazývaná *hladinou intenzity zvuku*, a fyziologickou *hladinou* svojej *hlasitosti*. Hudobné zvuky sa okrem toho vyznačujú ešte *výškou* a *zafarbením*.

Pod pojmom intenzita zvuku rozumieme strednú hodnotu intenzity zvukového vlnenia, ktorá je pri jednoduchom harmonickom vlnení daná vzorcami (8.6.9 na str. 319)

$$i_s = 2\pi^2 scv^2u_0^2 = \frac{1}{2} scv_0^2 = \frac{P_s^2}{sc} \quad (1)$$

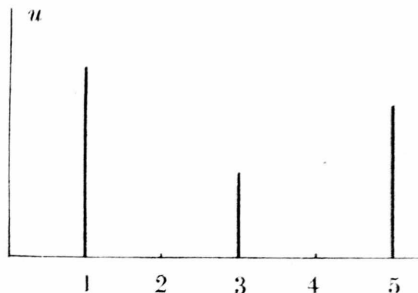
kde s je merná hmotnosť vzduchu, c rýchlosť postupu vlnenia, v frekvencia, u_0 amplitúda výchylky objemového elementu vodiča zvuku z jeho rovnovážnej polohy, ktorá sa v akustike nazýva *zvuková* alebo aj *akustická výchylka*, v_0 amplitúda rýchlosti pohybu elementu vodiča zvuku (*akustickej rýchlosti*) a P_s stredná hodnota zvukového pretlaku, nazývaná aj *efektívny* pretlak.

Výška tónu sa udáva absolútne a relatívne. *Absolútna výška* tónu ako fyzikálna veličina je určená jeho frekvenciou, reciprokom hodnotou periódy príslušného zvukového vlnenia. Absolútna výška tzv. komorného a (a') — podľa rozhodnutia viedenskej konferencie hudobníkov konanej r. 1885 — bola 435 Hz (hertzov), dnes je to 440 Hz. *Relatívna výška* dvoch hudobných zvukov sa rovná podielu ich frekvencií čiže absolútnych výšok.

Zvláštny prípad hudobného zvuku je *jednoduchý tón*, ktorým sa rozumie jednoduché a prísne harmonické vlnenie hmotného prostredia. Tóny vo všeobecnosti sú však súčtom (superpozíciou) tzv. *základného tónu*, ktorého frekvencia sa rovná frekvencii daného tónu, a príslušných *vyšších harmonických tónov* s frekvenciami rovnajúcimi sa celistvým násobkom frekvencie základného tónu. Fyzikálnou príčinou tejto skutočnosti je nám už známa okolnosť, že v rôznych zariadeniach schopných sa chvieť, ktoré teda môžu byť zdrojmi hudobných zvukov (zložených tónov), môže vzniknúť chvenie, ktoré je superpozíciou chvení s frekvenciami rovnajúcimi sa celistvým násobkom základnej frekvencie. Zo stránky matematickej je to dôsledok definície hudob-

ného zvuku a matematickej poučky, podľa ktorej každú periodickú funkciu možno napísať v tvare Fourierovho radu (pozri čl. 2.21).

Pod pojmom zafarbenie tónu rozumieme tú jeho vlastnosť, podľa ktorej rozoznáme aj dva tóny rovnakej výšky a intenzity, avšak zahrané napr. na rozličných hudobných nástrojoch. Príčinou tejto rozličnosti je nerovnaký časový priebeh kmitania v perióde, čiže v zmysle toho, čo sme práve povedali o zložených tónoch, nerovnaké zastúpenie vyšších harmonických tónov v zloženom tóne, pričom podľa skúsenosti rozhoduje len ich frekvencia a amplitúda, nie však aj ich fázová konštanta. Táto okolnosť umožňuje vyjadriť zložený hudobný tón jeho tzv. *frekvenčným spektrom*, v ktorom dĺžky *akustických spektrálnych čiar* vyjadrujú amplitúdy harmonických zložiek zloženého tónu. Obr. 9.1 predstavuje frekvenčné spektrum huslí.



Obr. 9.1

Hudobné zvuky, v ktorých je mnoho vyšších harmonických tónov, avšak s intenzitami, ktoré sa znižujú s ich poradovým číslom, vnímame ako *plné*. Takéto zvuky možno vytvoriť napríklad zahráním nerozložených akordov na hudobných nástrojoch. Keď z vysokých harmonických tónov sú silné len niektoré, zvuk nadobúda na prenikavosti a *lesku*, ako napríklad zvuk huslí. Zvuk, v ktorom sú zastúpené len harmonické tóny s menšími frekvenciami, javí sa ako *dutý*.

Subjektívny dojem výšky tónu okrem od jeho frekvencie závisí aj od jeho intenzity a zafarbenia. Pre túto príčinu v hudobnej akustike sa výška tónu určuje jeho subjektívnym porovnaním s jednoduchým tónom, ktorého hladina intenzity je 40 dB (pozri č. 9.2). Jednotka takto určenej výšky tónu sa nazýva *mel*.

9.2. Hladina intenzity a hlasitosti zvuku. Zvuky vnímame ako silné alebo slabé. Za objektívnu fyzikálnu mieru sily zvuku bola zvolená stredná hodnota intenzity príslušného zvukového vlnenia, ktorá — ako už vieme — má význam energie vlnivého pohybu, prechádzajúcej za jednotku času cez plošnú jednotku na smer postupu vlnenia kolmú.

Subjektívna sila zvuku alebo *hladina* jeho *hlasitosti* v dôsledku toho, že sluch je nerovnako citlivý pre tóny rôznych výšok, môže však byť aj pri dvoch zvukoch rovnakej intenzity rôzna. Okrem toho subjektívny vnem sily zvuku nerastie úmerne s jeho fyzikálnou intenzitou, ale zhruba podľa *Weberovho a Fechnerovho fyziologického zákona*: keď fyzikálna intenzita tónu *i* danej frekvencie rastie geometrickým radom (zväčšuje sa teda vždy v tomže