

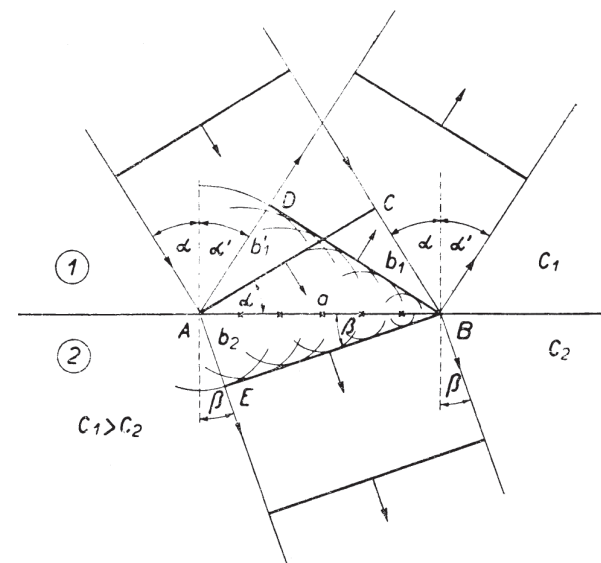
# Odraz a lom vlnění

## 22,4 Odraz a lom vlnění

V homogenním prostředí se šíří vlnění přímočaře. Na rozhraní dvou prostředí se vlnění zčásti odráží zpět, částečně prochází do druhého prostředí. Při přechodu z jednoho prostředí do druhého se mění směr šíření vlnění a říkáme, že se vlnění láme.

☒ odrazu a lomu v uvedeném smyslu dojde jen tehdy, když má rozhraní (překážka) větší rozměry než je vlnová délka vlnění (zvuku). Jsou-li vlnové délky řádově stejné s rozměry překážek, je lom doprovázen ohybem, popř. dochází jen k ohybu (odst. 22,52).

Zákony odrazu a lomu odvodíme pro rovinné rozhraní dvou různých prostředí z Huygensova principu. Dvě prostředí 1 a 2 necht' se stýkají v rovinném rozhraní. Rychlost šíření vlnění v prostředí 1 je  $c_1$ , v prostředí 2  $c_2$  a předpokládejme zatím, že je  $c_1 > c_2$ . Na rozhraní dopadá ze strany prostředí 1 rovinné vlnění (obr. 22,09) pod úhlem dopadu  $\alpha$ . Úhlem dopadu rozumíme úhel mezi normálou k rozhraní a normálou k vlnoploše (paprskem). Při dopadu vlnění na rozhraní se bod za bodem rozhraní postupně stávají zdroji rozruchu, z nichž se podle Huygensova principu šíří kulové vlny. Všimněme si podrobněji vlnoplochy  $AC$ . V okamžiku, kdy se tato vlnoplocha dotýká rozhraní v bodě  $A$ , stává se bod  $A$  zdrojem rozruchu. Při jejím dalším postupu budou zdroji rozruchu postupně další body, až po proběhnutí dráhy  $\overline{CB} = b_1$  bude zdrojem rozruchu bod  $B$ . V bodě  $A$  vznikl rozruch nejdříve a rozšíří se proto nejdále, tj. jemu příslušná kulová vlnoplocha má největší poloměr. Odražená vlnění se vracejí do původního prostředí 1 a při odrazu se proto nemění rychlost šíření vlnění. Za dobu  $\tau$ , za kterou vlnění proběhlo dráhu  $b_1 = \overline{CB}$ , rozšíří se rozruch z bodu  $A$  do bodu  $D$ , tedy na dráhu  $b'_1 = \overline{AD}$ . Protože je rychlost šíření dopadající a odražené vlny stejná, musí být stejné i dráhy proběhnuté za stejnou dobu:  $b_1 = b'_1$ . Odraženou vlnoplochu  $DB$  dostaneme jako obálku vlnoploch vycházejících z bodů rozhraní a pro úhel odrazu  $\alpha'$  stanovíme ze shodných pravoúhlých trojúhelníků  $ABC$  a  $ABD$ :



22,09 Huygensova konstrukce pro odraz a lom vlnění.

se tato vlnoplocha dotýká rozhraní v bodě  $A$ , stává se bod  $A$  zdrojem rozruchu. Při jejím dalším postupu budou zdroji rozruchu postupně další body, až po proběhnutí dráhy  $\overline{CB} = b_1$  bude zdrojem rozruchu bod  $B$ . V bodě  $A$  vznikl rozruch nejdříve a rozšíří se proto nejdále, tj. jemu příslušná kulová vlnoplocha má největší poloměr. Odražená vlnění se vracejí do původního prostředí 1 a při odrazu se proto nemění rychlost šíření vlnění. Za dobu  $\tau$ , za kterou vlnění proběhlo dráhu  $b_1 = \overline{CB}$ , rozšíří se rozruch z bodu  $A$  do bodu  $D$ , tedy na dráhu  $b'_1 = \overline{AD}$ . Protože je rychlost šíření dopadající a odražené vlny stejná, musí být stejné i dráhy proběhnuté za stejnou dobu:  $b_1 = b'_1$ . Odraženou vlnoplochu  $DB$  dostaneme jako obálku vlnoploch vycházejících z bodů rozhraní a pro úhel odrazu  $\alpha'$  stanovíme ze shodných pravoúhlých trojúhelníků  $ABC$  a  $ABD$ :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \frac{b_1/a}{b'_1/a} = 1$$

$$\boxed{\alpha = \alpha'} \quad (22,36)$$

Zákon odrazu zní: *Vlnění se odráží pod tímž úhlem, pod kterým dopadá, čili úhel odrazu se rovná úhlu dopadu.* Z konstrukce v obr. 22,09 vyplývá, že dopadající i odražený paprsek leží vždy v téže rovině, kolmé k rozhraní.

U lomu je situace podobná, musíme však uvážit, že je v druhém prostředí jiná rychlost šíření  $c_2$ . I zde se stávají body rozhraní postupně zdroji rozruchu a lomenou vlnu dostaneme jako obálku kulových vlnoploch, které vycházejí z bodů rozhraní. Úhel lomu  $\beta$ , tj. úhel mezi normálou k rozhraní a normálou k lomené vlnoploše vypočteme takto: K proběhnutí dráhy  $b_1 = \overline{CB}$  v prvním prostředí při rychlosti  $c_1$  potřebovalo vlnění dobu  $\tau$ . Je tedy

$$b_1 = c_1 \tau.$$

Za tutéž dobu proběhne vlnění v druhém prostředí při rychlosti  $c_2$  dráhu  $b_2 = AE$

$$b_2 = c_2 \tau.$$

Poměr obou drah je  $b_1 : b_2 = c_1 : c_2$ , tj. stejný jako poměr rychlostí šíření v obou prostředích. Nyní určíme z pravoúhlých trojúhelníků  $ABC$  a  $AEB$  poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{b_1/a}{b_2/a} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\boxed{\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{12}} \quad (22,37)$$

**Zákon lomu zní:** *Poměr sinů úhlu dopadu a úhlu lomu je pro dané rozhraní dvou prostředí konstantní a je dán poměrem rychlostí, jimiž se šíří vlnění v obou prostředích.* Tento konstantní poměr nazýváme index lomu pro dané rozhraní a dané pořadí obou prostředí. Při záměně pořadí obou prostředí má index lomu převrácenou hodnotu:

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \quad (22,38)$$

I u lomu platí, že dopadající a lomený paprsek leží v téže rovině kolmé k rozhraní.

Ze zákona lomu vyplývá zajímavý důsledek. Pokud je  $c_1 > c_2$  a tedy  $n_{12} > 1$ , může úhel dopadu nabývat všech hodnot mezi  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Úhel lomu se přitom mění od  $0^\circ$  do určité mezní hodnoty  $\beta_m$  a je vždy menší než úhel dopadu. Nastává lom ke kolmici. Mezní úhel určíme ze zákona lomu pro  $\sin \alpha = 1$ :

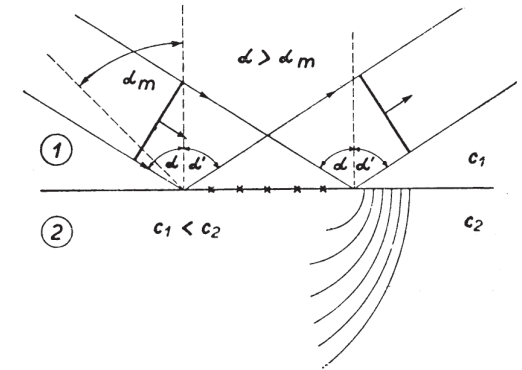
$$\sin \beta_m = \frac{1}{n_{12}}.$$

Vlnění se může lámat nejvýše pod mezním úhlem  $\beta_m$ . Je-li  $c_1 < c_2$  a tedy  $n_{12} < 1$ ,

může naopak úhel lomu nabýt všech hodnot od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , kdežto úhel dopadu je omezen mezním úhlem  $\alpha_m$ , který stanovíme pro  $\sin \beta = 1$ :

$$\sin \alpha_m = n_{12} < 1. \quad (22,39)$$

Dopadá-li v tomto případě vlnění pod menším úhlem než je mezní úhel  $\alpha_m$ , nastává lom, při kterém je úhel lomu větší než úhel dopadu, tzv. lom od kolmice. Při dopadu pod větším úhlem  $\alpha > \alpha_m$  nemůže nastat lom, protože vychází  $\sin \beta > 1$ , což není možné. V takovém případě skutečně lom nenastane a všechno vlnění se odráží. Hovoříme o *úplném odrazu* čili *totální reflexi*. Z Huygensovy konstrukce zjistíme, že v případě totální reflexe nemají lomené kulové vlnoplochy společnou obálku (obr. 22,10) a že tedy nemůže lomené vlnění vůbec vzniknout.



22,10 Úplný odraz, lomené vlnoplochy nemají společnou obálku.

**Příklad 22,7:** Zvukové vlnění se šíří ve vzduchu rychlostí  $c_1 = 340 \text{ ms}^{-1}$ , kdežto ve vodě rychlostí  $c_2 = 1445 \text{ ms}^{-1}$ . Má se stanovit index lomu a mezní úhel při přechodu z jednoho prostředí do druhého a vyložit následky tohoto jevu.

**Řešení:** Index lomu při přechodu zvuku ze vzduchu do vody je  $n_{12} = c_1/c_2 = 340/1445 = 4/17$ , je tedy  $< 1$ .

Úhel lomu ve vodě může tedy nabývat libovolných hodnot kdežto úhel dopadu je omezen podmínkou  $\sin \alpha_m \sin 90^\circ = 4/17 = n_{12}$ , čili mezní dopadový úhel  $\alpha_m$  se určí ze vztahu  $\sin \alpha_m = 4/17 = 0,2353$ , z čehož  $\alpha_m = 13^\circ 37'$ .

Úplný odraz nastává tedy při přechodu zvuku ze vzduchu do vody, a to již při dopadovém úhlu  $13^\circ 37'$ . Následkem toho lze vodou slyšet jen ony zvuky ze vzduchu přicházející, které dopadají na vodní hladinu téměř kolmo; u všech ostatních šikměji dopadajících zvuků nastává na hladině úplný odraz. Tím si vysvětlíme, proč se nad klidnou hladinou vodní zvuk dobře šíří.