

A HANG

Készítette: Porkoláb Tamás

1. *A hang mint hullám*
2. *A hang visszaverődése*
3. *Hanghullámok interferenciája*
4. *Állóhullámok, rezonancia*
5. *A hangskála és a hangszerek hangja*
6. *Az ultrahangok*
7. *A Doppler-effektus*

1. A hang mint hullám

A hang longitudinális hullám. Minden anyagi közegben tovaterjed, az anyag jellemzőitől függő sebességgel. Az emberi fül számára hallható hangok a 20 Hz-16000 Hz frekvenciájú tartományba esnek. Ez levegőben 2 cm – 17 m -es hullámhossznak felel meg. A 20 Hz-nél kisebb rezgésszámú hangokat infra-, a 20000 Hz-nél nagyobb frekvenciájúakat pedig ultrahangoknak nevezzük. A rezgésszámmal együtt nő a hang magassága is. Az emberi fül igen érzékeny, az $1,1 \cdot 10^{-8}$ mm amplitúdójú, 1000 Hz-es hangot is képes érzékelni. Ebben az esetben a levegő $3 \cdot 10^{-5}$ Pa nyomásváltozást szenved csupán, ami a normál légnyomás 10 milliárdod része. A legérzékenyebb a 3000 Hz frekvenciájú hangra. Az életkorral azonban csökken ez az érzékenység. 35 éves korban a felső határ 15000 Hz, 47 évesen pedig 13000 Hz. A közönséges emberi hang frekvenciája 200 –300 Hz. A normál *a* hang rezgésszáma 440 Hz, az énekarban a legmagasabb hang kb. 1000 Hz-es, zenekarban pedig a pikolófuvalé 4600 Hz. A kutya, a macska, a csimpánz és a denevér az ultrahangokat is érzékelik. A bálnák pedig infrahangok segítségével „beszélgetnek” több száz km távolságból.

A hang erősségét az amplitúdó határozza meg. Mértékegysége a dB. A 90 dB-es tartós zajszint halláskárosodással jár. Amennyiben a hangerő meghaladja a „fájdalomküszöb” értékét (120 dB), már egyszeri zajártalom is dobhártyarepedéssel és visszafordíthatatlan halláskárosodással járhat. A diszkózene néha eléri a 130 dB-es értéket is.

A hang terjedési sebessége függ a közeg hőmérsékletétől. Levegőben 0 °C -on $331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, 15 °C -on pedig kb. $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Általában: $c = 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$.

A terjedési sebesség függ még a közeg egyéb paramétereitől is. Gázok esetén a nyomástól és a sűrűségétől: $c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$, azaz nagyobb nyomású és kisebb sűrűségű gázban gyorsabban terjed a hang. Folyadékok esetén szintén hasonló összefüggésben van a sűrűséggel. Szilárd testekben pedig $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, vagyis az anyag rugalmasságától is függ.

Elsősorban nyilván a részecskék közti kapcsolat erőssége felel a terjedési sebességért. Ezt mutatja az alábbi táblázat is.

Üvegben	$5200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Jégben	$3200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Alumíniumban	$5100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Vízben	$1440 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Acélban	$4900 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Ólomban	$1300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Tégla falban	$3600 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Gumiban	$50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

2. A hang visszaverődése

Mint minden hullám, a hang is akadályba ütközve visszaverődik onnan. A terjedés iránya visszaverődés után ugyanolyan szöget zár be a felülettel, mint előtte.

Az emberi fül a 0,1 s-nál sűrűbben érkező hangeffektusokat nem tudja megkülönböztetni. Így ahhoz, hogy visszhangot halljunk, az eredeti és a visszhang észlése közt legalább 0,1 s-nak kell eltelnie. Ez 34 m-es hangútnak felel meg, tehát a fal 17 m-nél távolabb kell legyen.

A szócső és a hallócső is a visszaverődés által erősíti fel a hangokat.

A hang visszaverődését használják fel a geológusok is a talajrétegek vizsgálatára. Földbe fűrt lyukakban végzett robbantások hangjának a visszaverődéséből vonnak le következtetéseket.

A hangvisszaverődés nem mindig örömdetes esemény. A hangverseny- vagy előadótermekben kifejezetten zavaró, ha a hang még sokáig zeng. Ezért olyan anyagokkal borítják a falakat, amelyek elnyelik a hangot. Vagy eleve úgy építik a termet, hogy alakja, illetve a kisebb-nagyobb ki- és beugrások ne hagyják sokáig zengeni a hangot.

Régen előfordult ellipszis alakú termek építése is. Ha valaki le akarta hallgatni egy asztaltársaság beszélgetését, akkor azokat az egyik fókuszba kellett ültetnie, neki pedig a másik fókuszba kellett ülnie, és így az ellipszis tulajdonságai miatt a felerősítve hallotta.

3. Hanghullámok interferenciája

A hanghullámok is annak megfelelően erősítik vagy gyengítik egymást, hogy milyen frekvenciájúak és milyen a fáziseltolódásuk egymáshoz képest. Elérhető pl. egy hang és visszhangjának kioltása, ha a visszaverő felület megfelelő távolságban van. A lebegés is megfigyelhető két közel azonos frekvenciájú hang esetén. Pl. két hangvilla vagy hangsíp megszólaltatásakor vagy hangszerek hangolásakor.

4. Állóhullámok, rezonancia

A legismertebb példák a fúvós hangszerekben kialakuló állóhullámok. A hang állóhullámok is másképpen viselkednek szabad ill. rögzített vég esetén. Ezek szemléltetésére kiválóan alkalmas a Kundt-féle cső, vagy a rezonanciadobozzal ellátott hangvilla. A levegőoszlopban kialakuló állóhullámok közül a leghosszabb hullámhosszú, vagyis a legkisebb frekvenciájú hullám frekvenciáját alapfrekvenciának nevezzük. A három lehetséges esetre vonatkozó összefüggések a következők (n a duzzadóhelyek számát jelenti):

- a) Ha mindkét vég rögzített, akkor a végeken csomópont van. Így a levegőoszlop hossza a félhullámhossz egészszámú többszöröse.

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{c}{2f} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{2l}{n} \quad , \quad f = n \cdot \frac{c}{2l}$$

A lehető leghosszabb hullám hossza kétszerese a levegőoszlop hosszának, ekkor egy fél hullámhossznyi állóhullám alakul ki egy duzzadóhellyel ($n = 1$). Ennek alaphfrekvenciája :

$$f = \frac{c}{2l}$$

- b) Ha egyik vég rögzített, a másik pedig szabad, akkor a rögzített végnél csomópont, a szabad végnél pedig duzzadóhely alakul ki. Így a szabad végnél egy negyed hullámhossznyi állóhullám van, amelyet félhullámok követnek a rögzített vég felé.

$$l = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} = (2n - 1) \cdot \frac{c}{4f} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{4l}{2n - 1} \quad , \quad f = (2n - 1) \cdot \frac{c}{4l}$$

A leghosszabb állóhullám egy negyedhullámból áll, egy duzzadóhellyel ($n = 1$). Ekkor az alaphfrekvencia:

$$f = \frac{c}{4l}$$

- c) Ha mindkét vég szabad, akkor mindkét végnél duzzadóhely van. Tehát a végeknél egy-egy negyedhullám alakul ki, amelyek közt félhullámok találhatók.

$$l = (n - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = (n - 1) \cdot \frac{c}{2f} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{2l}{n - 1} \quad , \quad f = (n - 1) \cdot \frac{c}{2l}$$

Az alaphfrekvenciájú hullám két negyedhullámból áll, két duzzadóhellyel ($n = 2$). Így az alaphfrekvencia:

$$f = \frac{c}{2l}$$

A mindkét végén nyitott levegőoszlopot nyitott sípnek, a „vegyes” végűt pedig zárt sípnek nevezzük. A fentiekből látszik, hogy az ugyanolyan hosszúságú nyitott síp alaphfrekvenciája kétszer akkora, mint a zárt sípé, vagyis egy oktávval magasabb. Ezenkívül a felharmonikusok nyitott sípnál az alaphfrekvencia bármilyen egészszámú többszöröse lehetnek, zárt síp esetén azonban csak páratlan számszorosai. Vagyis a zárt síp hangja fakóbb a nyitotténál, hiszen minden második felharmonikus hiányzik belőle.

5. A hangskála és a hangszerek hangja

A zeneelmélet alapjai az ókori Görögországba nyúlnak vissza. Pithagorasz és Arkhütasz nevéhez kötődik a skála hangjai közti összefüggések megállapítása. Egy húr hossza és a hang magasságának kapcsolatát vizsgálták. Úgy találták, hogy azok a hangok csengenek szépen együtt, amelyek esetén a húrok hossza és így a rezgések frekvenciája is úgy aránylik egymáshoz, mint a kis természetes számok.

Hang	f(Hz)	A hangköz neve	A hang frekvenciájának aránya az alaphanghoz
c	261,6	prím	1
d	293,7	nagy szekund	9/8
e	329,6	nagy terc	5/4
f	349,2	kvart	4/3
g	392,0	kvint	3/2
a	440,0	nagy szext	5/3
h	493,9	nagy szeptim	15/8
c	523,3	oktáv	2

A hangoknak azonban nem csak a magassága a fontos, hiszen az ugyanolyan frekvencián megszólaló különböző hangszerek hangjait másmilyennek halljuk. Ennek oka a hang összetettsége, a felharmonikusok megszólalása. Fourier tétele alapján minden periodikus rezgés felbontható olyan harmonikus rezgések összegére, amelyek frekvenciái egy alaphang frekvenciájának egészszámu többszörösei. Az ezeken a frekvenciákon megszólaló hangokat felhangoknak nevezzük. Minél több felhang szólal meg, annál selymesebb, lágyabb a hang. A hangszerek hangja tehát nem harmonikus rezgés, hanem azok összege.

A húros és a fúvós hangszerekben is állóhullámok alakulnak ki megszólaltatásukkor: az alaphang és felharmonikusai. A húr ill. a levegőoszlop hosszának változtatásával csalogathatók elő mélyebb vagy magasabb hangok. A húr és a levegőoszlop egymagában azonban nem elegendő megfelelő erősségű hangok előállítására. Ezért egy fadoboz vagy egy tölcser rezonál velük és ezáltal erősítik fel a hangrezgést.

6. Az ultrahangok

A 20000 Hz-nél nagyobb frekvenciájú hangok előállítására elsősorban piezzo-elektromos kristályokat (pl. kvarc) használnak, illetve a magnetostrikció jelenségét alkalmazzák. Az ilyen nagy rezgésszámú hullámokban a közeg részecskéi óriási sebességekre tesznek szert. Ha pl. az amplitudó 2 cm és a frekvencia 20 kHz, akkor ez kb. $2500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Így az ultrahangok energiája is jóval nagyobb a közönséges hanghullámoknál. Egy ágyúdörgés hangteljesítménye pl. 0,001 W, egy közönséges ultrahangé pedig 10 W könnyedén lehet.

Az ultrahangoknak számos felhasználási területe van az ipari alkalmazásuktól egészen a gyógyászatig.

A várandós kismamák hasában ultrahanggal vizsgálják magzatot. A 3D-s és 4D-s ultrahang 3 illetve 4 forrás és detektor segítségével készül.

Az ultrahangos párasító membránja nagy sebességre gyorsítja fel a vízmolekulákat, amelyek kiszakadnak a vízből.

Fontos eszköz pl. a hajózásban a vízmélység megállapítására. Itt a visszavert hullám sebességéből és az eltelt időből számítják ki az utat.

A vakok számára olyan szemüveget készítettek, amely ultrahangokat bocsát ki és a tárgyról visszavert hullámokat is érzékeli. A tárgyak távolságának függvényében mélyebb vagy magasabb hangon jelez a hallható hangok tartományában. A denevérek is hasonlóképpen tájékozódnak, csak ők nem alakítják át az ultrahangokat hallható hullámokká.

Anyagok vizsgálatára is alkalmas az ultrahang, hiszen az anyagban lévő üregekről, hibákról visszaverődik és ezt detektorokkal érzékelni lehet.

Folyadékok gáztalanítására is felhasználható. ugyanis nagy frekvenciája miatt a folyadékreszcskék óriási gyorsulásra tesznek szert és így szétszakadva, köztük üregek jönnek létre. A gázok beáramlanak ezekbe, egyre nagyobb buborékká növe, majd felszállnak a felszínre.

A bor érési idejét harmadára csökkenthetik ultrahangos kezeléssel.

Az alumínium forrasztásakor is ultrahangokat használnak, mert hatásukra a keletkező oxidréteg ill. egyéb szennyeződés leválik.

Folyadékok egyenletes elkeverésére is használatos, mert hatására azok finom eloszlású emulziót képeznek és sokkal jobban keverednek egymással.

Varrni is lehet ultrahanggal tű helyett, ugyanis hatására az anyagok úgy összegubancolódnak, hogy ez a cérnánál is erősebb kötést jelent. Ugyanígy helyettesíthető a papírragasztó ultrahanggal, vagy a hegesztőpáka fémek esetén.

Gázok tisztítására és repülőterek ködmentesítésére is alkalmas, mert hatására a levegő apró szemcséi nagyobb halmazokká állnak össze és kicsapódnak. Ugyanezen elven teszik láthatóvá nagyobb hajók esetén a hajó előtti pár száz méteres részt ködös időben.

Biológiai hatásai közé tartozik pl., hogy mikroorganizmusokat képes elpusztítani. Így felhasználják élelmiszerek sterilizálására is.

A gyógyászatban reumatikus betegségek kezelésére is használják. Ezenkívül testünk belső részeinek feltérképezésére.

Japánban igen sok háztartásban van aranyhal. A földrengéseket ugyanis infrahangok kibocsátása előzi meg, amelyeket az aranyhalak jól érzékelnek és hatásukra menekülni kezdenek. Ezt a lakók észreveszik és még idejében elmenekülhetnek.

7. A Doppler-effektus (1842)

Mindenkinek ismerős valószínűleg, hogyha autóban utazva templom vagy szirénázó mentőautó mellett haladunk el, akkor jól hallhatóan megváltozik a hang magassága. Ennek oka abban rejlik, hogy ha a megfigyelő és a hangforrás mozog egymáshoz képest, akkor az észlelt hang frekvenciája megváltozik a megfigyelő számára.

Legyen a megfigyelő sebessége: v , a hang frekvenciája: f , hullámhossza: λ , sebessége: c .

a) Ha a megfigyelő mozog a hangforráshoz képest:

Közeledéskor:

Ekkor a megfigyelő időegység alatt nem csak a kibocsátott f számú rezgést érzékeli, hanem annyival többet, amennyi az általa megtett útra „ráfér”, vagyis $f + \frac{v}{\lambda}$ -t. Így az észlelt frekvencia:

$$f' = f + \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda} = \frac{c+v}{c} \cdot f$$

Távolodáskor:

A megfigyelő most időegység alatt f -nél annyival kevesebb hanghullámot érzékel, mint amennyi általa megtett útra „ráfér”. Így:

$$f' = f - \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} - \frac{v}{\lambda} = \frac{c-v}{c} \cdot f$$

b) Ha a hangforrás mozog a megfigyelőhöz képest:

Közeledéskor:

Időegység alatt a hanghullám c utat tesz meg, a hangforrás pedig v -t. Így $c-v$ hosszúságú útra f hullám esik. (A hullám a közeghez képest most is c sebességgel halad!) Az így megváltozott hullámhossz:

$$\lambda' = \frac{c-v}{f} = \frac{c-v}{c} \cdot \lambda$$

A frekvencia pedig:

$$f' = \frac{c}{c-v} \cdot f$$

Távolodáskor:

Az előzőhöz hasonlóan:

$$f' = \frac{c}{c+v} \cdot f$$

A Doppler-effektusnak számos alkalmazása van. Pl. ultrahangos szívvizsgálat esetén a szívről visszavert, megváltozott frekvenciájú hullámokból következtetnek a szív működésének milyenségére. Hasonló elven alapszik az érrendszer vizsgálata az áramló vérről visszaverődött ultrahangok segítségével. Ezenkívül felhasználják a csillagászatban is sebességmérésre az elektromágneses hullámok frekvenciaváltozását és a közúti forgalomban a rendőrségi radarok is ezen az elven működnek.

Ha a hang forrásának sebessége átlépi a hangsebességet, a hullámfrontokat kell áttörnie, így hangrobbanás következik be.