

1 Ljud

Ljud är en longitudinell vågrörelse och ljudvågor är tryck- och täthetsvariationer. Ljudvågor fortplantas i gaser, vätskor eller fasta ämnen, och består av frekvenser som kan uppfattas med vår hörsel.



Fig. 1. Ljudvågor är tryck- och täthetsvariationer, som vi kan uppfatta med vår hörsel.

Ljudets utbredningshastighet

Ljudvågor i luft fortplantas genom kollisioner mellan luftmolekyler. I luft av rumstemperatur är ljudhastigheten ungefär 340 m/s. Höjs temperaturen, rör sig molekylerna snabbare och kollisionerna sker oftare. Därför ökar ljudhastigheten med temperaturen.

Ljudvågors hastighet i en gas beror också på gasmolekylernas massa. Ju lättare molekylerna är, desto högre är deras genomsnittsfart vid en given temperatur. I vätska, som har de lättaste molekylerna, är ljudfarten över 1 km/s vid rumstemperatur.

I vatten är utbredningshastigheten ungefär fyra gånger så stor som i luft. I fasta ämnen, där kopplingen mellan partiklarna är avsevärt starkare än i en vätska eller en gas, kan ljudhastigheten uppgå till flera km/s. Fig. 2 visar ett militärflygplan som just överskridit ljudhastigheten.

? TÄNK TILL! 1

Kan det finnas ljud i vakuum?

? TÄNK TILL! 2

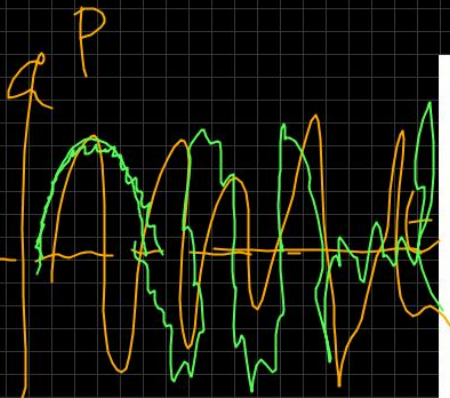
Hörbart ljud av alla frekvenser utbreder sig med samma fart. Om det vore annorlunda, hur skulle personer på olika avstånd från scenen uppfatta musiken vid en konsert?

Ljudintensitet och ljudnivå

"Min nya bashögtalare har ett härligt tryck", berättar Robert. "Man kan se hur högtalarmembranet vibrerar, och man kan faktiskt känna basstöterna." Robert har helt rätt. Ljud är tryckförändringar, och man kan känna kraftiga basstøner inte bara med öronen.

Intensiteten I hos en ljudvåg är den energi som vägen transporterar per sekund genom en tvärsnittad yta med arean 1 m^2 . Enheten är 1 W/m^2 .

Ljudets intensitet bestäms av den energi som per sekund passerar genom en tvärsnittad area. Enheten är 1 W/m^2 .



Man analyserar ljudets exponent storleksordning relativt en referens.
referensnivå = 10^{-12}



Fig. 2. Ett militärflygplan som just överskridit ljudhastigheten. Tryckökningen vid den resulterande "ljudbängen" har fått luftfuktighet att kondenseras till ett moln av små vattendroppar.

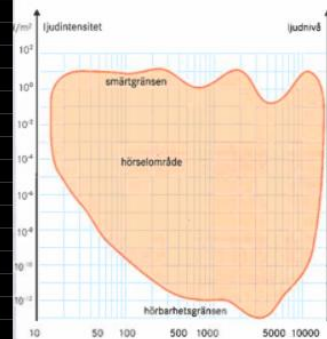


Fig. 3. Hörselområdet för det mänskliga örat.

Fig. 3 visar hörselområdet för ett normalt öra. Observera att skalorna är logaritmiska. Du ser att i det känsligaste frekvensområdet räcker det gott med intensiteten 1 pW/m^2 för att örat ska uppfatta ett ljud. (Amplituden hos luftens svängningar är då bara ca 10^{-11} m , d.v.s. avsevärt mindre än en atomdiameter!) Eftersom trumhinnans area är ungefär 1 cm^2 , betyder det att örat kan registrera en effekt på mindre än 10^{-16} W . Hörselsinnet är tydligen utomordentligt känsligt.

Det finns också en övre gräns för den ljudintensitet som örat tål. Den s.k. smärtsgränsen går vid ungefär 1 W/m^2 . Där är intensiteten ungefär 10^{12} gånger så stor som vid hörselgränsen! Att länge vistas i en miljö med hög ljudintensitet, medför stor risk för nedsatt hörsel eller tinnitus (öronsus).

Ett mått som bättre följer de ljudupplevelser man får vid olika intensiteter är storheten **ljudnivå**. Den betecknas L och definieras så här:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

I är intensiteten hos det ljud vars ljudnivå man mäter och I_0 är en jämförelseintensitet som

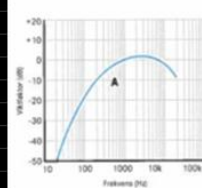


Fig. 5. Kurvan A beskriver ganska bra vårt öras känslighet. Kurvan används för att bestämma ljudnivån genom att summera bidragen från olika frekvenser med en vikt som är lägre vid låga och höga frekvenser. Den resulterande ljudnivån uttrycks i dBA.

Ljud intensitets nivå

$$\begin{cases} \text{intensitet} = I_0 = \text{referensnivå} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \\ \text{intensitet} = I = 1 \text{ } \mu\text{W/m}^2 \end{cases}$$

$$L = 10 \cdot \lg \frac{10^{-6}}{10^{-12}}$$

$$L = 10 \cdot \lg 10^6 = 6 \cdot 10 \lg 10 = 60 \text{ dB}$$

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}$$

$$I \sim P^2$$
$$L_p = 10 \lg \frac{P}{P_0^2}$$

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$

TÄNK TILL! 4

I exempel 1 ökade ljudnivån med 30 dB när ljudintensiteten höjdes från $1,0 \mu\text{W/m}^2$ till $1,0 \text{ mW/m}^2$. Anta att intensiteten görs 1000 gånger så hög ännu en gång, från $1,0 \text{ mW/m}^2$ till $1,0 \text{ W/m}^2$.

- Med hur många dB ökar då ljudnivån?
- Jämför ökningarna av ljudintensiteten respektive ljudnivån.

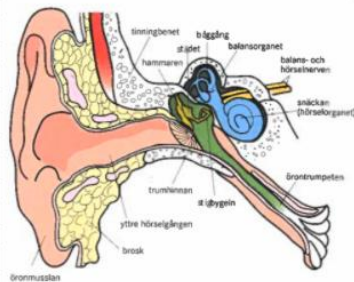


Fig. 4. Örats uppbyggnad.

Örat

Ljud uppstår när en yta svänger eller vibrerar. Vibrationerna överförs till det omgivande mediet, som ofta är luft. Örat fångar upp ljudvågorna och gör om dem till elektriska signaler som förs vidare till hjärnan.

Den synliga delen av örat är öronmusslan, fig. 4. Den samlar upp ljudvågorna och leder dem genom hörselgången till trumhinnan och får den att svänga. Svängningarna fortplantas genom tre rörliga delar av ben: hammaren, städet och stigbygeln. Stigbygels rörelse mot ovala fönstret ger upphov till vågor i innerörats vätska som påverkar innerörats hårceller som i sin tur ger upphov till elektriska impulser som hörselnerven för upp till hjärnan. De här elektriska impulserna uppfattar vi som ljud.

Mätning av ljudnivå

När man mäter ljudnivån tar man hänsyn till hur vi människor uppfattar ljud. Vissa frekvenser uppfattar vi bättre än andra. Fig. 5 visar en kurva som ganska väl beskriver känsligheten hos vår hörsel som funktion av ljudets frekvens (jämför med fig. 3). Kurvan med beteckningen A i diagrammet är en internationellt accepterad kurva som används vid mätning av ljudnivån. Den visar att vår hörsel är mest effektiv mellan 2 och 6 kHz och minskar mycket vid både höga och låga frekvenser. Vår uppfattning av ljudnivån beror på bidragen från ljud med olika frekvenser. En ljudmätare summerar eller integrerar ljudnivån över hela frekvensområdet. En ljudmätare tar hänsyn till att örat inte uppfattar

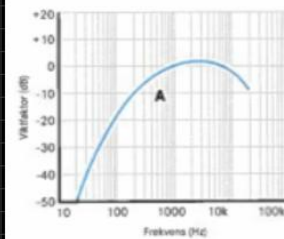


Fig. 5. Kurvan A beskriver ganska bra vårt öras känslighet. Kurvan används för att bestämma ljudnivån genom att summera bidragen från olika frekvenser med en vikt som är lägre vid låga och höga frekvenser. Den resulterande ljudnivån uttrycks i dBA.

2 Dopplereffekt

Om du passeras av en ambulans med påslagen siren, kan du tydligt höra hur dess tonläge – frekvens – plötsligt sjunker när den kör förbi. Fenomenet är exempel på *dopplereffekt*. Den uppträder när ljudkällan och mottagaren rör sig i förhållande till varandra.

I fig. 7b rör sig ljudkällan S åt höger. Då kommer ljudvågorna att ligga tätare framför ljudkällan och glesare bakom den. (De små ringarna visar var ljudkällan befann sig när respektive vågor skapades.) För en stillastående person vid M kommer vågorna tätare, d.v.s. frekvensen blir högre än f . En person vid B tar emot vågor med större tidsmellanrum och uppfattar alltså en lägre frekvens än f .

I fig. 7c är ljudkällan i vila. En person M rör sig i riktning mot den och möter därför ljudvågor oftare. Frekvensen blir större än f . Omvänt blir frekvensen sänkt om M rör sig bort från ljudkällan.

ÖVNING 13.4

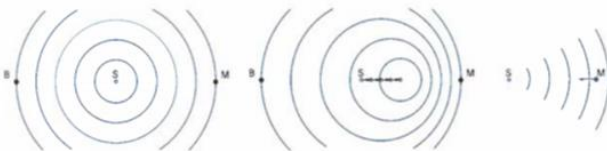


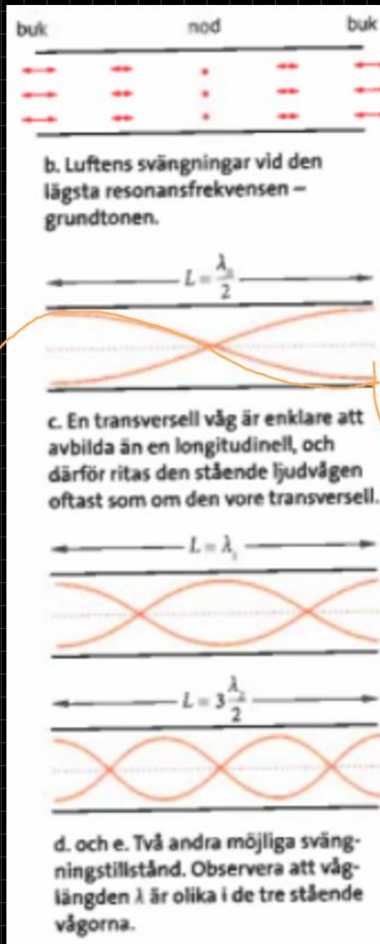
Fig. 7a. Ljudkällan S utsänder ljud med frekvensen f .

b. Om ljudkällan rör sig, registreras högre frekvens än f vid M och lägre vid B.

c. Rör man sig mot S, uppfattar man en förhöjd frekvens hos det ljud man hör.

$$c = 340 \text{ m/s}$$

$$v = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$



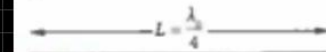
$$c = 340 \text{ m/s}$$

$$c = f \cdot \lambda$$

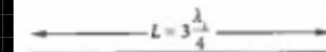
Fig. 10. Stående våg i ett rör som är slutet i ena änden.



a. Luftens svängningar vid grundtonen.



b. Förenklad bild av samma svängning.



c. Första översvängningen.

En öppen pipa är öppen i bägge ändarna.

En sluten pipa är sluten i den ena änden och öppen i den andra.

STRÄNGINSTRUMENT

Huvudorsaken till ljudet från ett blåsinstrument är stående vågor i luftpelare. Men också i andra typer av musikinstrument spelar stående vågor en roll. I en fiol orsakar strängarnas vibrationer mer eller mindre kraftiga resonanssvängningar i luften inuti fiolkroppen. Därmed skapas nya ljudkällor som bidrar till fiolens klang.

En fiolsträng svänger samtidigt med såväl grundtonen som ett antal övertoner. Strängens svängningsmönster blir därför mycket komplicerat. En fiol och en gitarr klingar olika därför att sammansättningen av grundton och övertoner skiljer sig åt.

Fig. 12a visar hur lufttrycksvariationerna från en klang, sammansatt av en grundton och dess första och andra övertonen, kan se ut. En fiolklang med samma grundton men fler övertoner har registrerats med mikrofon i fig. 12b.

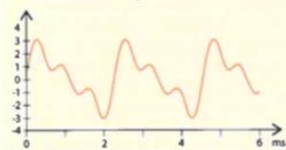


Fig. 12a. En sammansatt ton, bestående av normaltonen som grundton och första och andra övertonen.



b. Samma ton med annan klang från en fiol. Tönen är registrerad med mikrofon.

Trycker man ner en sträng på fiolen så att den förkortas, får dess grundton en högre frekvens, fig. 13a. Placeras fingret löst på samma ställe kan den nya grundtonen undertryckas och en övertone lyftas fram. Då spelas en s.k. flageolet, fig. 13b.



Fig. 13a. Strängen förkortas och ger en annan grundton.



b. Man trycker lätt på samma ställe, varvid grundtonen undertrycks och en övertone framhävs. Oras fiolens stråke på rätt sätt, spelas en flageolet. Den är i sin tur en enda sinusformad svängning, nästan utan övertoner.

Även när man talar spelar resonanssvängningar en viktig roll. För att ge vokaler deras speciella klang formar man om munhålan med tungan och läpparna, så att resonansfrekvenserna ändras. Röstens innehåller många olika frekvenser och deras övertoner, medan en visslad ton brukar ha en enda frekvens.

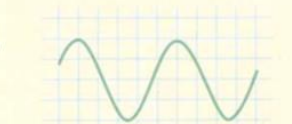


Fig. 14. Registrering av visslad ton. Kurvan har ren sinusform.

? TÄNK TILL! 10

Kan du med hjälp av grafitande räknare efterlikna mönstret i fig. 12b? Försök genom att utgå från en sinusformad grundton och addera övertoner med lämpliga amplituder.



Resonans?

Jo. Medsvängning.

Förstärkning.

Vågrörelselära

BETECKNINGAR, STORHETER OCH ENHETER

f	frekvens	Hz
I	ljudintensitet	W/m ²
L	ljudnivå	dB
λ	våglängd	m
T	svängningstid	s
u, v	hastighet	m/s

FORTSKRIDANDE VÅG

$$v = \lambda \cdot f$$

BRYTNING

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}, \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

INTERFERENS

S_1 och S_2 två punktkällor i fas:

$$PS_2 - PS_1 \begin{cases} = p \cdot \lambda \text{ ger förstärkning i } P. \\ = (p + \frac{1}{2}) \lambda \text{ ger förstärkning i } P. \\ = x\lambda/L, \text{ då } x \ll L. \end{cases}$$

$$(p = 0, 1, 2, \dots)$$

DOPPLEREFFEKT

Vågkällan i rörelse med hastigheten $u < v$:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v - u}, \quad u > 0 \text{ vid rörelse mot observatören.}$$

Observatören i rörelse med hastigheten u :

$$f' = f \left(1 + \frac{u}{v} \right), \quad u > 0 \text{ vid rörelse mot källan.}$$

I båda formelerna betecknar f' den observerade frekvensen.

LUJHASTIGHETENS TEMPERATURBEROENDE

$$v = v_0 \sqrt{\frac{\Theta}{273}}$$

där Θ är mediets absoluta temperatur.

LIJUDINTENSITET

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \text{ på avståndet } r \text{ från isotropt}$$

strålände punktkälla med effekten P .

LIJUDNIVÅ

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

där $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Optik

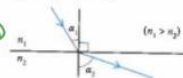
BETECKNINGAR, STORHETER OCH ENHETER

a	avstånd från föremål till lins eller spegel	m
b	avstånd från bild till lins eller spegel	m
c	ljusets hastighet i vakuum	m/s
c_m	ljusets hastighet i annat medium än vakuum	m/s
d	gitterkonstant	m
E	belysning	lux
f	brännvidd	m
Φ	ljusflöde	lm
G	vinkelförstoring	-
I	ljusstyrka	cd
λ	våglängd i vakuum	m
λ_m	våglängd i annat medium än vakuum	m
n	brytningsindex	-
σ	avståndet för tydligt seende	m

Stråloptik

BRYTNINGSLAGEN

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$



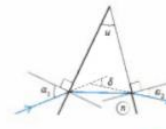
PRISMA

u : brytande vinkel

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - u \text{ (deviationen)}$$

"Tunt" prisma:

$$\delta = (n - 1)u$$



Minimideviationen $\delta_{\min}$:

$$\sin \frac{\delta_{\min} + u}{2} = n \sin \frac{u}{2}$$

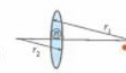
TUNNA LINSER (CENTRALA STRÅLAR)

$$\text{Gauss formel: } \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

("linsmakarformeln")

Newtons formel: $x_o \cdot x_b = f^2$
 x_o är föremålets avstånd till objektfokus
 x_b är bildens avstånd till bildfokus



SFÄRISKA SPEGLAR (CENTRALA STRÅLAR)

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

där r är spegelns radie.

ÖRTISKA INSTRUMENT

$$\text{Lupp: } G = \frac{\sigma}{f}$$

$$\text{Keplerkikare: } G = \frac{f_{ok}}{f_{ok}}$$

$$\text{Mikroskop: } G = \frac{f_{ok}}{f_{ok}} \cdot \frac{f_{ok}}{f_{ok}}$$

där L är avståndet mellan de inre brännpunkterna.

LJUSLÖDE

$$\Phi = 4\pi I$$

(vid lika stort ljuslöd i alla riktningar)

BELYSNING

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

där A är arean av ett område vinkelrätt mot ljuslödet.

$$E = I \cos \alpha$$

där α är infallsvinkeln och r avståndet till ljuskällan.

Vågoptik

LIJSHASTIGHET

$$c_m = \frac{c}{n}$$

VÅGLÄNGD

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{n}$$

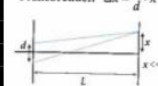
GITTER (VINKELRÄTT INFALL)

$$d \sin \alpha_p = p \cdot \lambda$$

($p = 0, 1, 2, \dots$)

TVÅSPALTSINTERFERENS

$$\text{"Fransbredden" } \Delta x = \frac{L}{d} \cdot \lambda$$



Elektromagnetisk strålning

BETECKNINGAR, STORHETER OCH ENHETER		
A	area	m^2
c	ljushastigheten i vakuum	m/s
C	kapacitans	F
f	frekvens	Hz
h	Plancks konstant	Js
k	Boltzmanns konstant	J/K
L	induktans	H
M_e	emittans	W/m^2
λ	våglängd	m
P	effekt	W
T	absolut temperatur	K

ELEKTRISK SVÄNGNINGSKRETS

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

PLANCKS STRÄLNINGSLAG

Utstrålad effekt i intervallet (λ_1, λ_2) :

$$A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} m_\lambda d\lambda \quad \text{där}$$

$$m_\lambda = 2\pi h c^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Utstrålad effekt i intervallet (f_1, f_2) :

$$A \cdot \int_{f_1}^{f_2} m_f df \quad \text{där}$$

$$m_f = \frac{2\pi h \cdot f^3}{c^2 \cdot (e^{\frac{h f}{kT}} - 1)}$$

STEFAN-BOLTZMANN'S LAG

$$M_e = \sigma T^4 \quad M_e = \frac{P}{A}$$

där $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$

WIENS FÖRSKJUTNINGSLAG

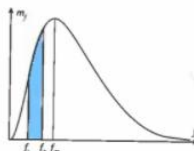
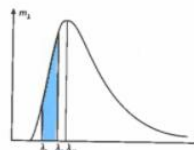
$$\lambda_m \cdot T = b_1 = 2,8978 \cdot 10^{-3} Km$$

$$f_m/T = b_2 = 5,8786 \cdot 10^{10} Hz/K$$

BRAGGS RELATION

$$2d \sin \alpha = p\lambda$$

$$(p = 0, 1, 2, \dots)$$



kap 12

Atom-, kärn- och partikelfysik

BETECKNINGAR, STORHETER OCH ENHETER		
A	aktivitet	becquerel (s^{-1})
D	absorberad dos	gray (J/kg)
E	energi	J
E_k	rörelseenergi	J
E_α	utträdesenergi	J
f	frekvens	Hz
H	ekvivalent dos	sievert (J/kg)
h	Plancks konstant	Js
λ	våglängd	m
N	antal kärnor	-
p	rörelsemängd	kgm/s
Q	strålningsvärd	-
R	Rydbergskonstanten	m^{-1}
T	halveringstid	s
t	tid	s
Z	atomnummer	-

FOTONENERGI

$$E = hf$$

FOTONENS RÖRELSEMÄNGD

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

VÄTEATOMENS ENERGINIVÅER

$$E_n = -\frac{E_1}{n^2}$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$

där $E_1 = 13,6 eV$ är väteatomens jonisationsenergi.

RYDBERGS FORMEL

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$(n_1 = 1, 2, 3, \dots)$$

$$n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots$$

PARTIKELS DE BROGLIEVÅGLÄNGD

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

FOTOLEKTRISK EFFEKT

$$hf = E_\alpha + E_k$$

RADIOAKTIVT SÖNDERFALL

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{eller} \quad N = N_0 2^{-t/T}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad (\text{sönderfallskonstanten})$$

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

$$A = \lambda N$$

STRÅLDOS

$$H = D \cdot Q$$