

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2005)

**Heft:** 4

**Artikel:** Le onde sonore

**Autor:** Romer, Arturo

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-133220>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Le onde sonore

Arturo Romer

## La definizione di un'onda sonora

Un'onda è una perturbazione  $\xi$ , normalmente legata al trasporto di energia e impulso, che si propaga nello spazio e nel tempo. Essa si lascia dunque descrivere quale funzione delle coordinate spaziali  $x, y, z$  e di quella temporale  $t$ . In generale l'equazione di un'onda che viaggia con la velocità  $v$  lungo la direzione  $x$  (Fig. 1) e la cui forma non varia nel corso del tempo, può venire scritta come:

$$\xi = \text{funzione}(x - vt)$$

Nel caso particolare di un'onda armonica semplice si ha:

$$y = y_m \cos [2\pi/\lambda (x - vt) + \delta] \text{ oppure:}$$

$$y = y_m \sin [2\pi/\lambda (x - vt) + \delta]$$

con:

$y$ : ampiezza

$y_m$ : ampiezza massima

$\lambda$ : lunghezza d'onda

$\delta$ : spostamento di fase (dipende dallo zero di entrambi le variabili  $x$  e  $t$ ).

Graficamente un'onda può essere rappresentata in due modi: rispetto alla variabile  $x$  o alla variabile  $t$ . La seguente figura mostra queste due possibili rappresentazioni.

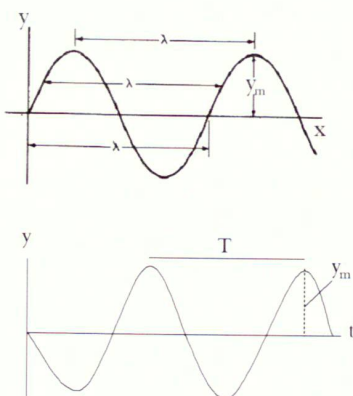


Fig. 1 - La rappresentazione grafica di un'onda armonica

Nel primo caso la lunghezza d'onda  $\lambda$  (in m), definita come la distanza tra due massimi, è la grandezza principale. L'inverso della lunghezza d'onda è proporzionale al vettore d'onda  $k$ :  $k = 2\pi/\lambda$  (in  $1/m$ ).

Nel secondo caso il periodo  $T$  (in s), da non confondersi con la temperatura nella termodinamica, è la grandezza caratteristica. L'inverso del periodo viene chiamato frequenza  $f = 1/T$  ed ha unità  $1/s$  (anche chiamata Hz). La frequenza circolare  $\omega$  si ottiene semplicemente moltiplicando  $f$  con  $2\pi$ , ossia  $\omega = 2\pi f$  (in  $1/s$ ; la designazione Hz non viene invece mai usata per descrivere  $\omega$ ).

La velocità di propagazione  $v$  si lascia pertanto esprimere come prodotto tra la lunghezza d'onda e la frequenza:

$$v = \lambda \cdot f$$

Se la velocità di propagazione di un'onda è nota, conoscendo la frequenza è possibile determinarne subito la lunghezza d'onda e viceversa. Frequenza e lunghezza d'onda racchiudono dunque la stessa informazione.

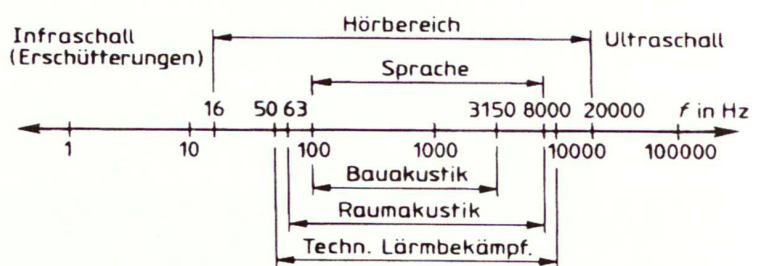


Fig. 2 - Il dominio delle frequenze acustiche

Le onde sonore sono *onde meccaniche* che si propagano nei gas, nei liquidi e nei solidi. Se le particelle materiali (per esempio dell'aria), che trasmettono il suono, vibrano nella stessa direzione di propagazione del segnale, si parla di on-

de longitudinali. In un medio di propagazione sufficientemente rigido (come i corpi solidi o eventualmente i liquidi) si possono anche avere onde trasversali per le quali le particelle vibrano perpendicolarmente alla direzione di propagazione. Per semplificazione ci limiteremo prevalentemente alla descrizione delle onde longitudinali.

Il campo di frequenze in cui possono essere generate le onde meccaniche longitudinali è assai ampio. Il cervello e l'orecchio umano tuttavia possono venire solo stimolati da onde con una frequenza compresa tra 20 e 20'000 cicli/s (o Hz). Tale intervallo viene definito come campo di udibilità. Un'onda meccanica la cui frequenza è inferiore a tale campo viene chiamata infrasuono ed un'onda la cui frequenza è superiore ultrasuono. Gli infrasuoni sono solitamente generati da sorgenti molto estese come per esempio nel caso delle onde sismiche. Gli ultrasuoni invece vengono prodotti, per esempio, dalle vibrazioni elastiche di un cristallo di quarzo quando un campo elettrico alternato vi viene applicato. Gli esperti parlano di effetto piezoelettrico. In tal modo si raggiungono frequenze fino a  $6 \times 10^8$  Hz che corrispondono in aria ad una lunghezza d'onda di circa  $5 \times 10^{-7}$  m. Nella Tab. 1 sono messe a confronto le caratteristiche del suono e della luce per quelle frequenze che possiamo rilevare con i nostri sensi. Il tono ed il timbro sono due grandezze che caratterizzano i suoni. Il primo è la frequenza di vibrazione di un suono puro. Esso è pertanto quell'attributo della sensazione acustica in termini del quale essa viene classificata. Per un suono complesso il tono è determinato da tutte le sue frequenze e dalla pressione e forma dell'onda. Il secondo descrive la qualità del suono, considerando numero, intensità, distribuzione e fase delle armoniche che compongono i suoni complessi.

	Suono	Luce
Tipo d'onda	Onde meccaniche	Onde elettromagnetiche
Frequenza	16 Hz...16 kHz	400 THz...790 THz
Lunghezza d'onda	20 m...2 cm	750 nm...380 nm
Sensibilità alla frequenza	Altezza del suono (tono)	Colore
Sensibilità alla intensità	Livello sonoro	Luminosità
Velocità	340 m/s	300'000 km/s

Tab. 1 – Intervallo di frequenza per suono e luce

Corde vibranti (di violino, corde vocali umane), colonne d'aria vibranti (di un organo, di un clarinetto), piastre e membrane (tamburi, altoparlanti) generano onde sonore. Tutti questi elementi vibranti, muovendosi in avanti e all'indietro, comprimono e rarefanno alternativamente l'aria circostante. L'aria trasmette queste perturbazioni sotto forma di un'onda, pressoché periodica, che si allontana dalla sorgente. Quest'onda produce nell'orecchio la sensazione piacevole (se l'intensità non è troppo elevata) del suono. I suoni che invece non sono periodici sono percepiti come rumori.

Le onde sonore, se sono libere di farlo, si propagano in tutte le direzioni partendo dalla sorgente. Poiché è più semplice trattare la propagazione unidimensionale anziché quella tridimensionale, tratteremo la propagazione di onde longitudinali in un tubo pieno di gas.

### La propagazione di un'onda sonora longitudinale

Consideriamo un'onda sonora, cioè un treno continuo di compressioni e rarefazioni, che si propaga lungo un tubo pieno di gas. Durante tale propagazione ogni piccolo elemento di volume di gas oscilla intorno alla sua posizione di equilibrio. Per semplicità la Fig. 3 mostra solo un impulso di compressione, ben squadrato e definito. Tale perturbazione rappresenta una schematizzazione del movimento delle molecole del medio.

Differenti sono i sistemi di riferimento che si hanno a disposizione per descrivere questo problema. Nel sistema di riferimento in cui il gas imperturbato è a riposo, l'impulso si sposta da sinistra verso destra a velocità  $v$ . Noi vogliamo però considerare un sistema di riferimento in cui l'impulso è stazionario (cioè non cambia nel tempo) e in cui il gas al di fuori della zona di compressione scorre lungo il tubo da destra verso sinistra con velocità  $v$ .

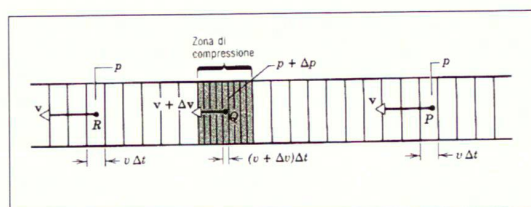


Fig. 3 – Spostamento di un impulso di compressione lungo con tubo pieno di gas

La velocità  $v$  dipende dalle caratteristiche del mezzo in cui l'onda si propaga. La Tab. 2 presenta le velocità delle onde sonore longitudinali in differenti medi.

Mezzo	Velocità m/s
Aria secca (0 ° C)	331
Aria secca (20 ° C)	343
Vapore (134 ° C)	494
Idrogeno	1330
Acqua distillata	1486
Acqua di mare	1519
Piombo	1190
Rame	3810
Alluminio	5000
Vetro Pyrex	5170
Acciaio	5200
Berillio	12900

Tab. 2 - Velocità del suono a 1 atm e 20° C per diversi mezzi

Se il mezzo è un gas che viene considerato come ideale, è possibile esprimere  $v$  in funzione della sua pressione di equilibrio  $p_0$ . Per un'onda sonora si ottiene perciò:

$$v = \sqrt{p_0 \kappa / \rho_0}$$

dove  $\kappa$  è il rapporto tra i calori specifici del gas:  $\kappa = c_p / c_v$ . Per gas monoatomici (elio, neon, argon)  $\kappa$  è circa 1,67, per gas biatomici 1,40. Vogliamo ora analizzare il nostro modello di un'onda che si propaga in un tubo di gas e formulare in modo più preciso la perturbazione  $y$ . Questa rappresenta ognuno degli elementi di volume di gas che si sposta dalla posizione di equilibrio  $x$ , lungo la direzione di propagazione dell'onda longitudinale. Nel caso di un'oscillazione armonica semplice possiamo scrivere:

$$y = y_m \cos(kx - \omega t)$$

Nel caso delle onde sonore è tuttavia più conveniente considerare le variazioni di pressione piuttosto che gli spostamenti delle particelle che trasmettono l'onda. Per la pressione  $p$  vale l'equazione seguente:

$$p = [k\rho_0 v^2 y_m] \sin(kx - \omega t)$$

$\rho_0$  = densità del gas al di fuori della zona di compressione.

Il termine tra parentesi quadra rappresenta la massima variazione di pressione e viene chiamata *ampiezza di pressione*. Designando questa grandezza con:

$$p_m = k\rho_0 v^2 y_m \quad \text{si ha} \quad p = p_m \sin(kx - \omega t)$$

Pertanto un'onda sonora può essere considerata sia come un'onda di spostamento che come un'onda di pressione. Se nella prima si ha una funzione coseno nella seconda si ha una funzione seno, e viceversa. L'onda di spostamento è sfasata di 90° rispetto all'onda di pressione, e dunque quando lo spostamento dalla posizione di equilibrio è massimo, la variazione di pressione è nulla, e viceversa. Ricordiamo che  $p$  e  $p_m$  sono espressi in [Pa], Pa = Pascal.

#### L'intensità di un'onda sonora

In generale l'intensità  $I$  di un'onda, cioè l'energia per unità di tempo (detta potenza  $P$  in W) e per unità di superficie, è proporzionale al quadrato della perturbazione  $y$ . Nel caso di un'onda armonica semplice si ha pertanto:

$$I \sim y_m^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

Integrando poi su di un periodo  $T$  si ottiene l'intensità media in funzione dell'ampiezza dell'onda di pressione

$$I_{\text{media}} = p_m^2 / (2\rho_0 v)$$

La pressione esercitata da un'onda sonora sull'orecchio umano varia dal massimo rumore tollerato di 28 Pa al minimo suono udibile di  $2 \times 10^{-5}$  Pa, con un rapporto di  $1,4 \times 10^6$ . Il rapporto fra le intensità è pertanto il quadrato di tale grandezza:  $2 \times 10^{12}$ .

Tuttavia si deve *distinguere* fra l'intensità  $I$  di un'onda sonora che si lascia oggettivamente misurare, e la sensazione soggettiva di rumore percepibile dal cervello dell'ascoltatore. Ci si può dunque chiedere: quando un'onda sonora di intensità  $I$  raggiunge l'orecchio umano, quale variazione  $\Delta I$  produce una variazione sensibile nella percezione dell'orecchio? Il nostro sistema uditivo è fatto in modo che  $\Delta I$  risulta essere proporzionale a  $I$ , e di conseguenza l'orecchio umano ci permette di ascoltare suoni con intensità molto diverse. La Fig. 4 fornisce un'immagine schematizzata dell'orecchio umano.

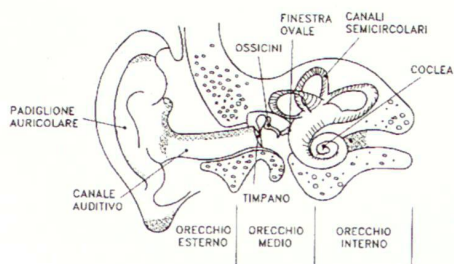


Fig. 4 - L'orecchio umano

In pratica i suoni non vengono comunque caratterizzati con l'intensità  $I$  (in  $W/m^2$ ) ma con un parametro (adimensionale) chiamato *livello sonoro* e designato con la lettera greca  $\beta$ :

$$\beta = 10 \cdot \lg (I/I_0) \text{ [dB]}$$

$I_0$  è un'intensità standard di riferimento:  $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ , vicina alla soglia di udibilità.  $\lg$  designa il logaritmo in base 10.

Il livello sonoro viene espresso in Decibel (dB) in onore di Alexander Graham Bell. L'intensità di riferimento corrisponde dunque a 0 dB. La tabella seguente (Tab. 3) propone le intensità e i livelli sonori di alcuni suoni

	$I$	$\beta$
	$W/m^2$	dB
Soglia dell'udito	$10^{-12}$	0
Stormire delle fronde	$10^{-11}$	10
Bisbiglio (ad 1 m)	$10^{-10}$	20
Strada di città con poco traffico	$10^{-9}$	30
Uffici, aule di scuola	$10^{-7}$	50
Conversazione normale (ad 1 m)	$10^{-6}$	60
Strada di città con molto traffico	$10^{-5}$	70
Cascate del Niagara	$10^{-4}$	80
Martello pneumatico (a 3 m)	$10^{-3}$	90
Impianto Hi-Fi di 10 W (a 3 m)	$10^{-1}$	110
Soglia del dolore	1	120
Motore a reazione (a 50 m)	$10^1$	130
Razzo Saturno (a 50 m)	$10^8$	200

Tab. 3 - Intensità  $I$  (in  $W/m^2$ ) e livelli sonori  $\beta$  (relativi all'intensità di riferimento  $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ )

Per produrre una data variazione nel livello sonoro  $\beta$  si deve produrre una variazione di  $I$  proporzionale all'intensità stessa. Come detto questo è il modo con il quale funziona l'udito umano. Con la Fig. 5 vogliamo mostrare come la risposta dell'orecchio non è la stessa ad ogni frequenza. Le soglie di udibilità e di dolore, che limitano l'intervallo di udibilità, dipendono difatti dalla frequenza. A livelli di intensità bassi l'orecchio umano è più sensibile alle frequenze tra 1000 e 5000 Hz, mentre a livelli di intensità molto alti la sensibilità dell'orecchio è più uniforme.

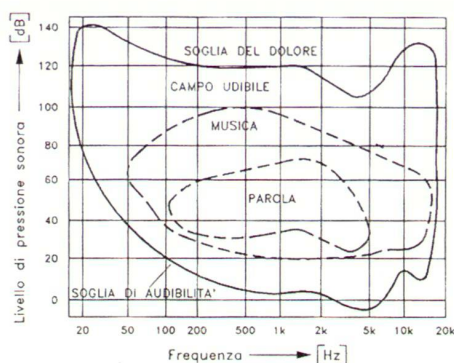


Fig. 5 - Il livello sonoro in funzione della frequenza