

SUPSI

Nozioni di base sul suono

Fondamenti di Multimedia Processing

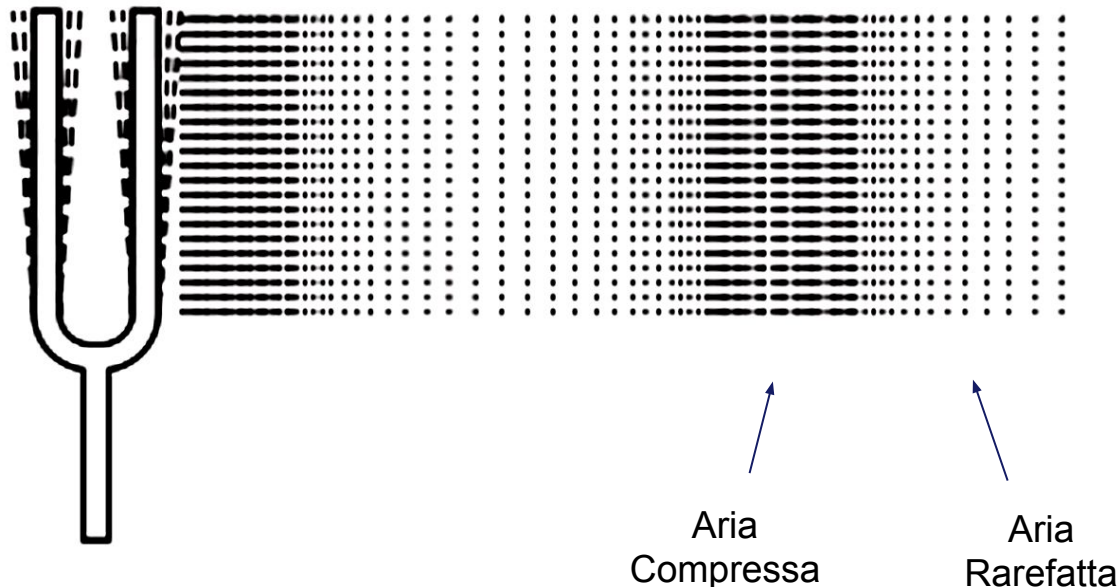
Tiziano Leidi

21.09.2018

Cos'è il suono

Il suono è una forma di energia. È la versione “aerea” della vibrazione.

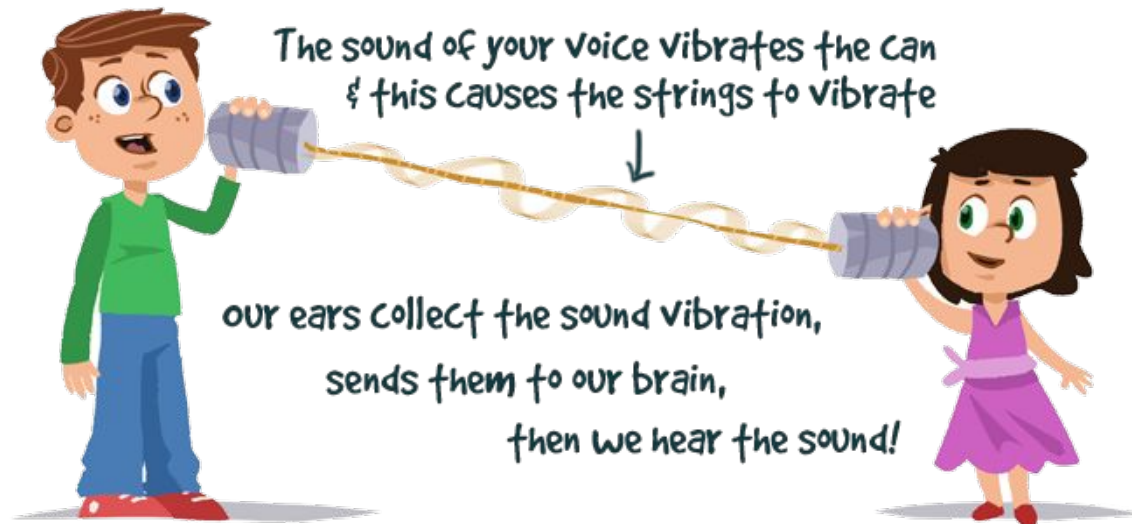
Sulla terra, vibrazione e suono sono legati in maniera inscindibile. I suoni vengono generati da corpi in oscillazione, ad esempio a causa di urti, e trasmessi da mezzi elastici (principalmente fluidi).



Cos'è il suono

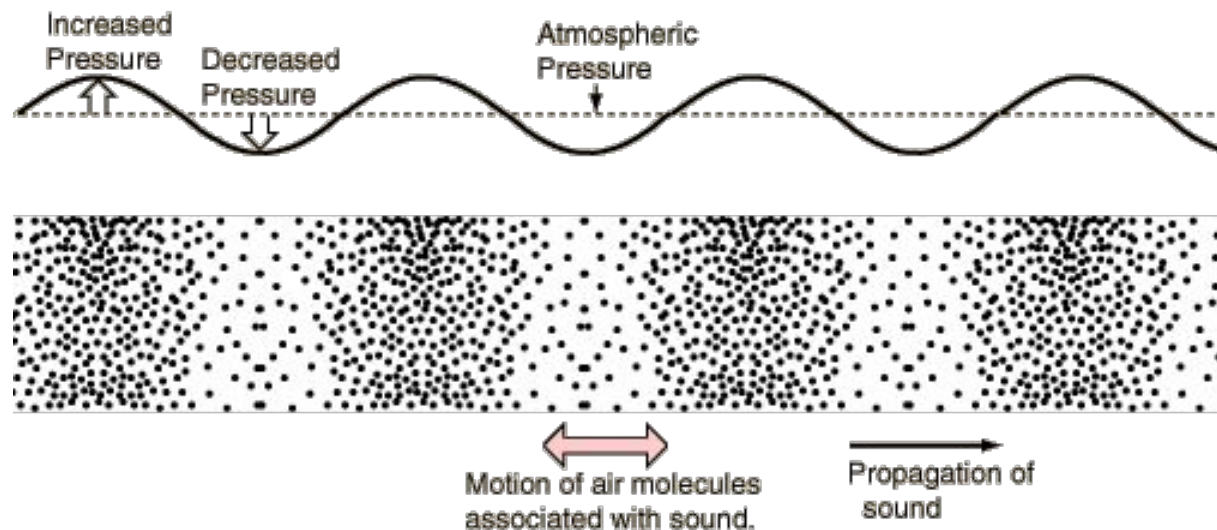
Sentire suoni è una delle capacità che fa parte dei 5 sensi di molti esseri viventi, inclusi gli esseri umani.

Le vibrazioni sonore si propagano nell'aria (o in altri mezzi elastici, come l'acqua), raggiungendo l'apparato uditivo dell'orecchio, che li percepisce e li interpreta.



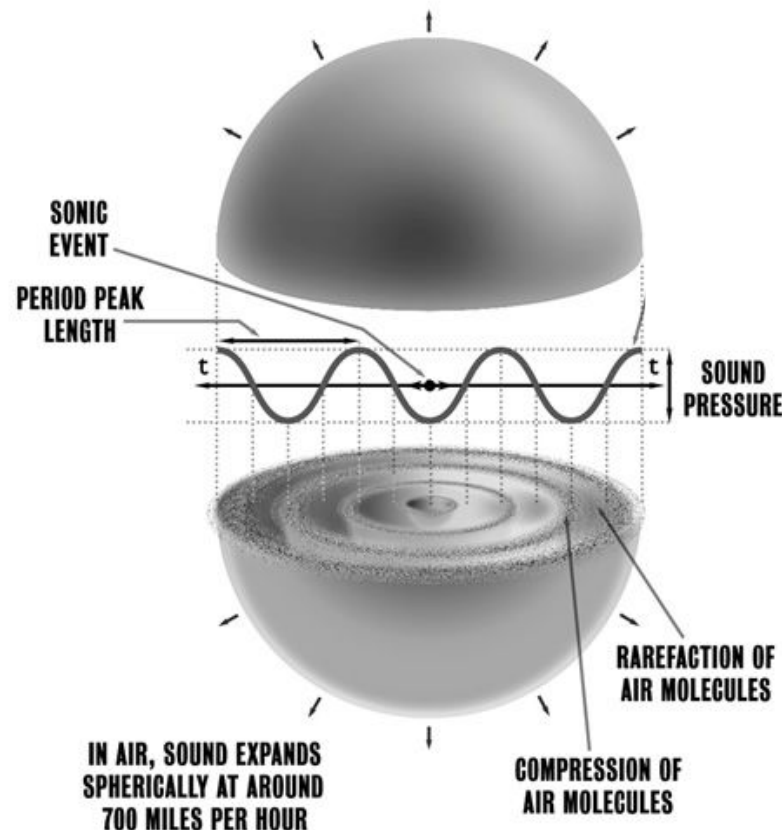
Propagazione dell'energia sonora

Le vibrazioni sonore vengono trasmesse dalle particelle d'aria (o del mezzo di propagazione in questione), che scontrandosi con quelle a loro prossime, generano delle “onde” di pressione.



Propagazione dell'energia sonora

La rappresentazione abituale del suono è quella di un'onda e si parla di onde sonore. Ma la trasmissione è differente da quella di un'onda del mare:



Velocità di propagazione

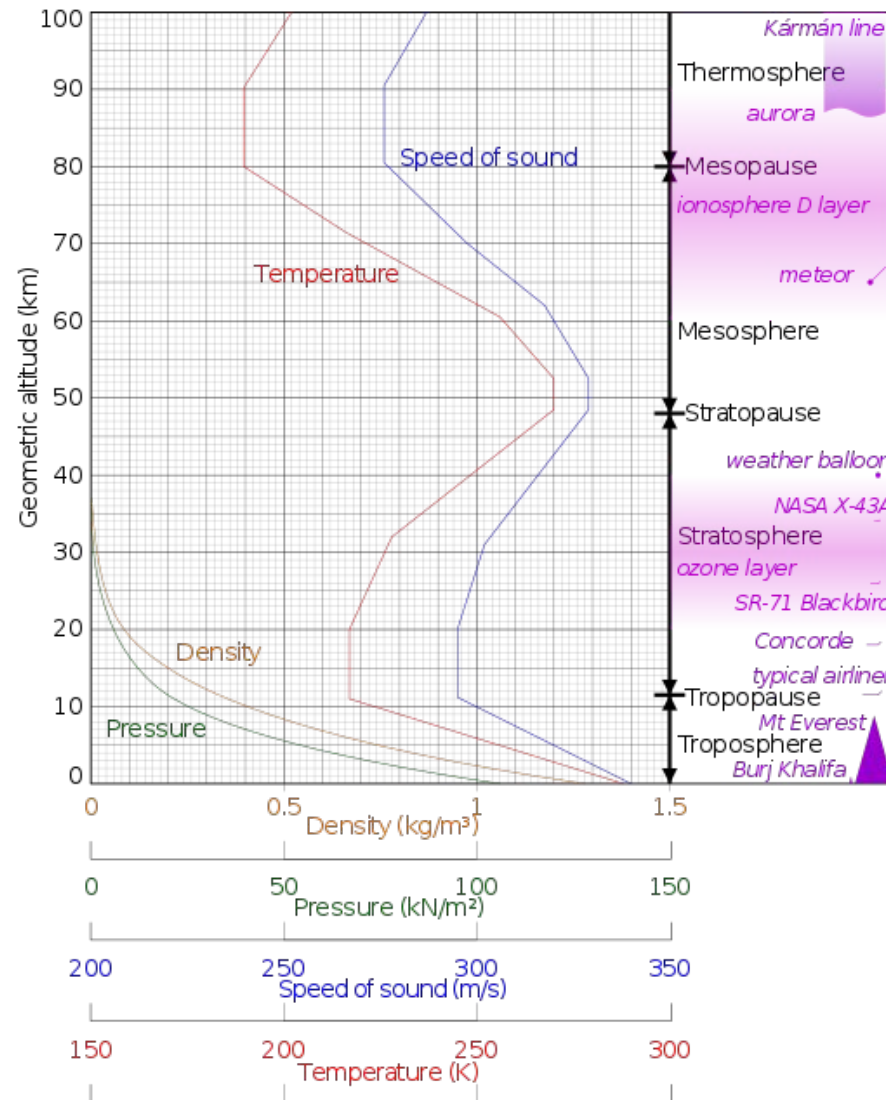
La velocità di propagazione del suono è determinata dal mezzo di trasmissione e dalla temperatura:

- In aria secca a 0°C la velocità è di 340.27 m/s, mentre a 20°C è di 343 m/s = 1235 km/h (mach 1).
- Nell'acqua, il suono viaggia 4.3 volte più veloce che nell'aria.
- Nel vuoto, ... non c'è suono.

Oggetti che si muovono a velocità maggiori di mach 1 viaggiano a velocità supersonica.



Velocità di propagazione



Velocità di propagazione

<https://www.khanacademy.org/science/physics/mechanical-waves-and-sound/sound-topic/v/speed-of-sound>

Energia sonora

L'unità di misura dell'energia sonora è il joule (J).

Il mezzo di propagazione (aria, acqua, ...) funge da accumulatore dell'energia, sia potenziale che cinetica.

$$W = W_{\text{potential}} + W_{\text{kinetic}} = \int_V \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} dV + \int_V \frac{\rho v^2}{2} dV$$

- V è il volume d'interesse
- p è la pressione sonora
- v è la velocità delle particelle
- ρ_0 è la densità del mezzo in assenza di suono
- ρ è la densità locale del mezzo
- c è la velocità del suono



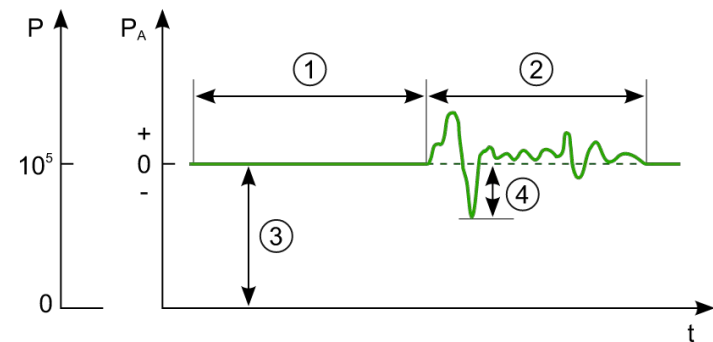
Pressione sonora

La pressione sonora, detta anche pressione acustica, è rappresentata dalla variazione di pressione esercitata dal suono rispetto alla pressione atmosferica ambientale.

L'unità di misura della pressione sonora è il pascal (Pa).

$$p_{\text{total}} = p_{\text{stat}} + p,$$

p è la pressione sonora
 p_{total} è la pressione totale
 p_{stat} è la pressione ambientale



1. silenzio
2. suono udibile
3. pressione atmosferica
4. pressione sonora

Pressione sonora effettiva (RMS)

Esistono più varianti di rappresentazione della pressione sonora. Quella più utilizzata è la pressione sonora effettiva, comunemente chiamata pressione RMS (da Root Mean Square).

Si tratta di un valore medio della pressione istantanea calcolato su un intervallo di tempo definito.

$$P = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} p(t)^2 dt}$$

La media RMS viene anche detta media quadratica, un valore statistico utilizzato in vari ambiti, ad esempio della fisica e dell'elettronica.

Livello di pressione sonora (SPL)

A causa dell'ampio intervallo di percezione dell'orecchio umano, l'utilizzo del valore assoluto di pressione sonora risulta scomodo.

Viene quindi utilizzato il livello di pressione sonora.

È un valore relativo calcolato come il logaritmo del rapporto fra una data pressione sonora e una pressione sonora di riferimento.

Come pressione di riferimento si usa $20 \mu\text{Pa}$ per la propagazione nell'aria e $1 \mu\text{Pa}$ in altri mezzi di propagazione. Si tratta del limite di capacità di udito dell'essere umano (che equivale più o meno al suono di una zanzara a 3 metri di distanza).

Decibels (dB) SPL

Il livello di pressione sonora si misura in decibels (dB) SPL:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{\text{rms}}}{p_{\text{ref}}} \right) \text{ dB}$$
$$L_p = \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ Np} = 2 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ B} = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}$$

p_{rms} → p
→ p_0 p_{ref}

Np è il neper
B è il bel
dB è il decibel

Una pressione RMS di 1 Pa corrisponde ad un livello di 94 dB SPL.

Esempi

	Sound Pressure RMS	SPL
	Pa	dB
Auditory threshold at 1 kHz	2×10^{-5}	0
Breathing	6.32×10^{-5}	10
Normal Conversation	$2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$	40 – 60
Television at home	2×10^{-2}	approx. 60
Hearing Damage limit	$2 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-1}$	60 – 80
Jack hammer at 1 m	$2 \times 10^{-1} - 6.32 \times 10^{-1}$	80 – 90
Hearing damage (possible)	20	approx. 120
Vuvuzela horn at 1 m	20	120
Threshold of pain	63.2	130
Jet engine at 30 m	632	150
Stun grenades	6,000–20,000	170–180
Theoretical limit for undistorted sound	101,325	194
Shockwave (distorted sound waves)	>101,325	>194

Potenza sonora e livello di potenza sonora

Un altro valore spesso utilizzato è quello della potenza sonora (in inglese sound power). Rappresenta l'energia acustica emessa da una sorgente. È un valore assoluto.

A differenza della pressione, è indipendente dalla distanza e, ad esempio, dalle dimensioni della stanza. È la potenza totale emessa dalla sorgente in tutte le direzioni.

Il livello di potenza sonora (L_w) viene misurato in dB SWL. Viene ad esempio utilizzato per misurare la quantità di rumore prodotto dagli utensili di lavoro.



Livello di potenza sonora

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) (dB)$$

L_w = sound power level

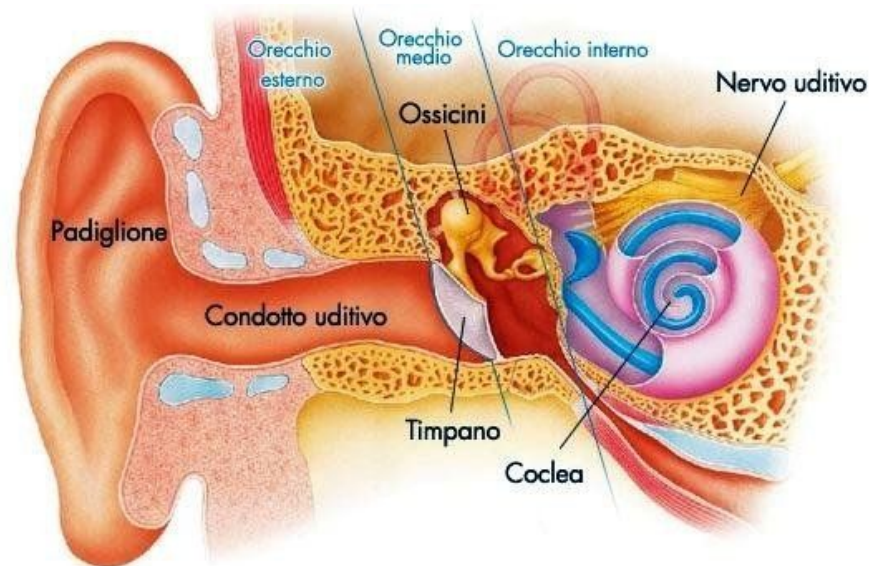
W = power of the sound

$W_{ref} = 10^{-12}$ W (a power level suited to human perception)

sound	L_w	
threshold of hearing	0	
background in sound studio	20	
whisper at 2m	40	quiet
conversation at 1m	50	
office environment	50	
restaurant/store	60	noisy
pneumatic drill	90	
punch press	110	very loud
truck horn	110	
propeller airplane	120	intolerable
propeller cargo airplane	140	
saturn V rocket	195	

Il sistema uditivo

Il sistema uditivo (più semplicemente udito) è il primo dei cinque organi di senso a svilupparsi nel feto e a favorire il contatto con l'ambiente esterno. Il sistema comprende sia gli organi sensoriali (orecchie e altri organi preposti alla percezione e alla traduzione del suono), sia le parti uditive del sistema sensoriale.



Il sistema uditivo

https://www.youtube.com/watch?v=TzdxCWli3_M

Psicoacustica

La psicoacustica è la scienza che studia la percezione del suono. Più specificamente, studia la risposta psicologica e fisiologica associata al suono (rumore, voce, musica, ...).

L'orecchio interno esegue una moltitudine di trattamenti del segnale quando converte le onde sonore in stimoli neurali. È quindi capace di filtrare e trasformare l'informazione.

Psicoacustica

Effetti psicoacustici intervengono, ad esempio:

- Nella localizzazione delle sorgenti sonore,
- nella riconoscimento dei timbri dei suoni e delle note,
- negli effetti di mascheramento.

In varie situazioni si riesce ad ingannare l'orecchio approfittando degli effetti psicoacustici. Si pensi ad esempio alla stereofonia o alla compressione psicoacustica usata ad esempio nei formati come l'MP3.

Tipologie di suoni

Un suono può essere causato da un singolo evento (ad esempio una percussione), detto transiente, o da una vibrazione ripetuta, come ad esempio quella di un diapason. Ci sono suoni periodici e aperiodici.

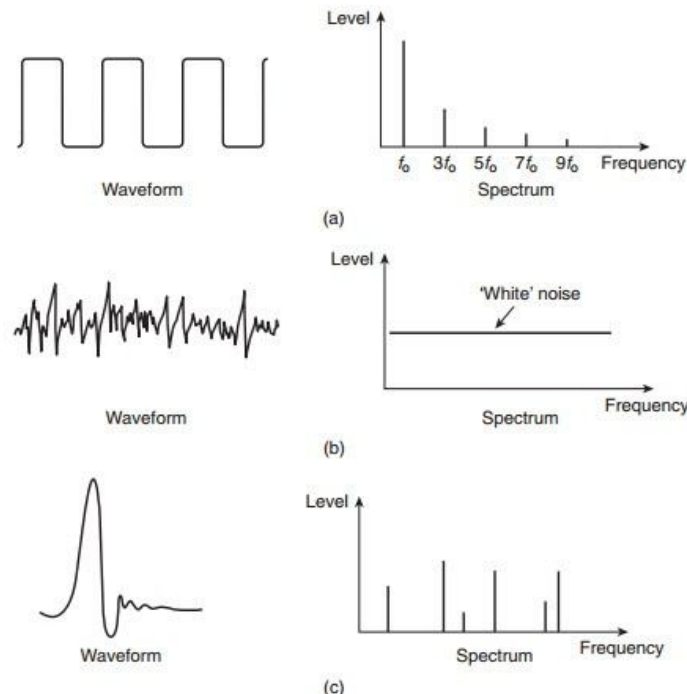


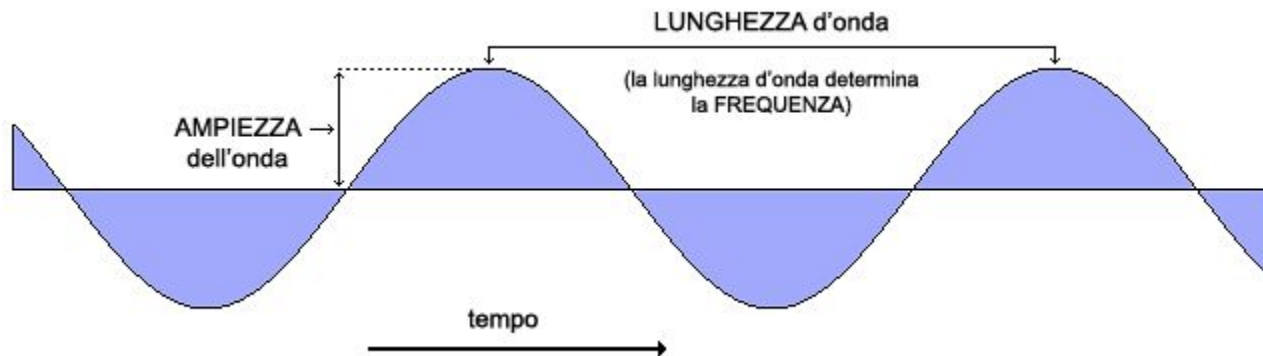
Figure 1.3: (a) A periodic signal repeats after a fixed time and has a simple spectrum consisting of fundamental plus harmonics. (b) An aperiodic signal such as noise does not repeat and has a continuous spectrum. (c) A transient contains an anharmonic spectrum.

Ampiezza, lunghezza d'onda e frequenza

Due delle caratteristiche principali delle onde sonore sono:

- ampiezza (amplitude): determina l'intensità del suono.
- lunghezza d'onda (wavelength) e frequenza (frequency): per i suoni periodici determinano l'altezza (pitch) del suono.

La frequenza è proporzionale alla lunghezza d'onda. Per una maggiore lunghezza d'onda si avrà una minore frequenza e viceversa.



Periodo e frequenza

La lunghezza d'onda di un suono ne determina il periodo: è il tempo necessario per completare un ciclo di vibrazione.

Più il periodo è lungo, più la frequenza (e di conseguenza la nota) sarà bassa. Più il periodo è breve, più la frequenza (e di conseguenza la nota) sarà alta.

Il periodo T viene misurato in secondi (s).

La frequenza è definita come $1/T$ ed è misurata in Hertz (Hz).

La frequenza misura il numero di oscillazioni.

440 Hz significa 440 oscillazioni al secondo.

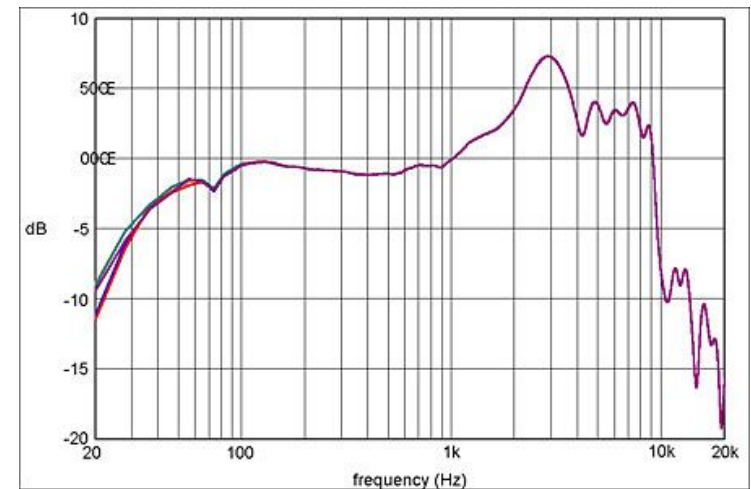
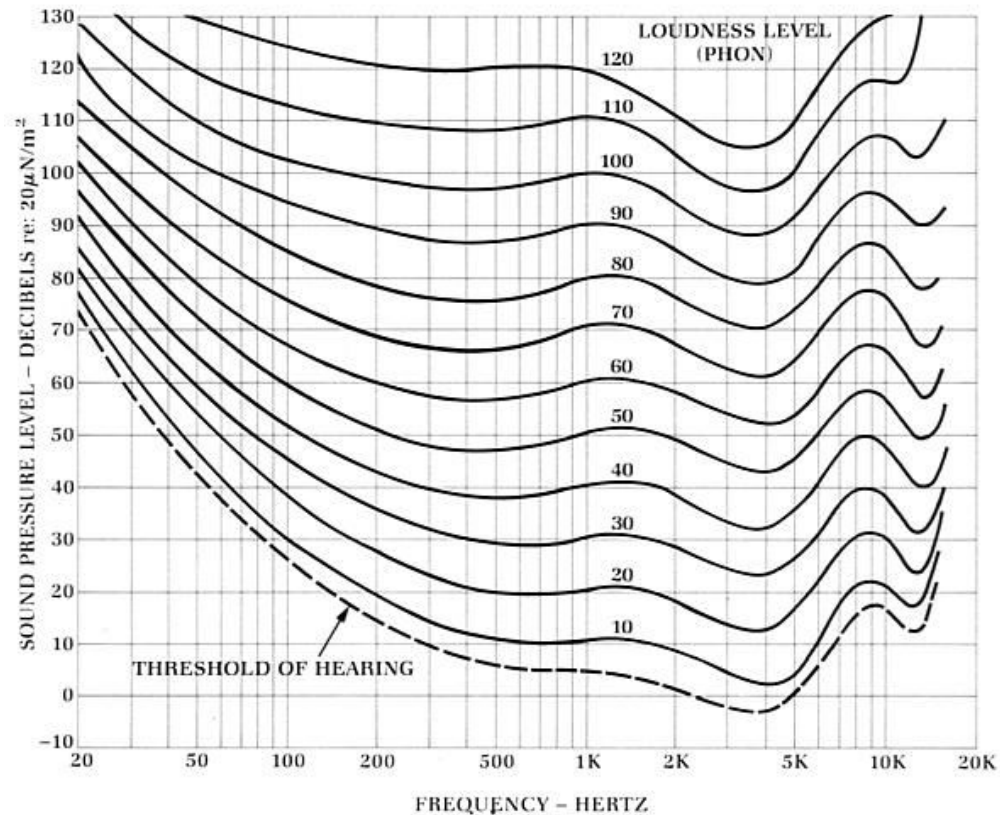
Frequenze udibili

L'orecchio umano è capace di percepire suoni nell'intervallo fra i 20 Hz e i 20 kHz. Il limite massimo decresce con l'invecchiamento. La maggior parte degli adulti non sente sopra ai 16 kHz.

Le frequenze sotto i 20 Hz possono essere percepite solo per vibrazione tramite il corpo, attraverso il suolo o per contatto con oggetti.

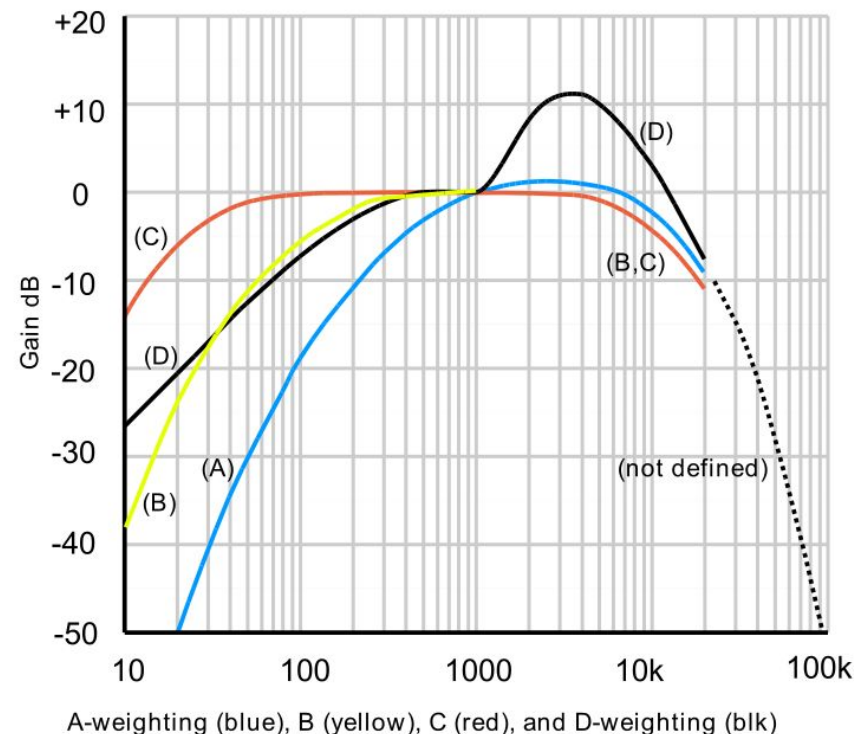
Frequenze udibili

L'orecchio umano non percepisce il livello sonoro in maniera uguale a tutte le frequenze. Fra i 3 e i 4 KHz è dove si sente meglio.

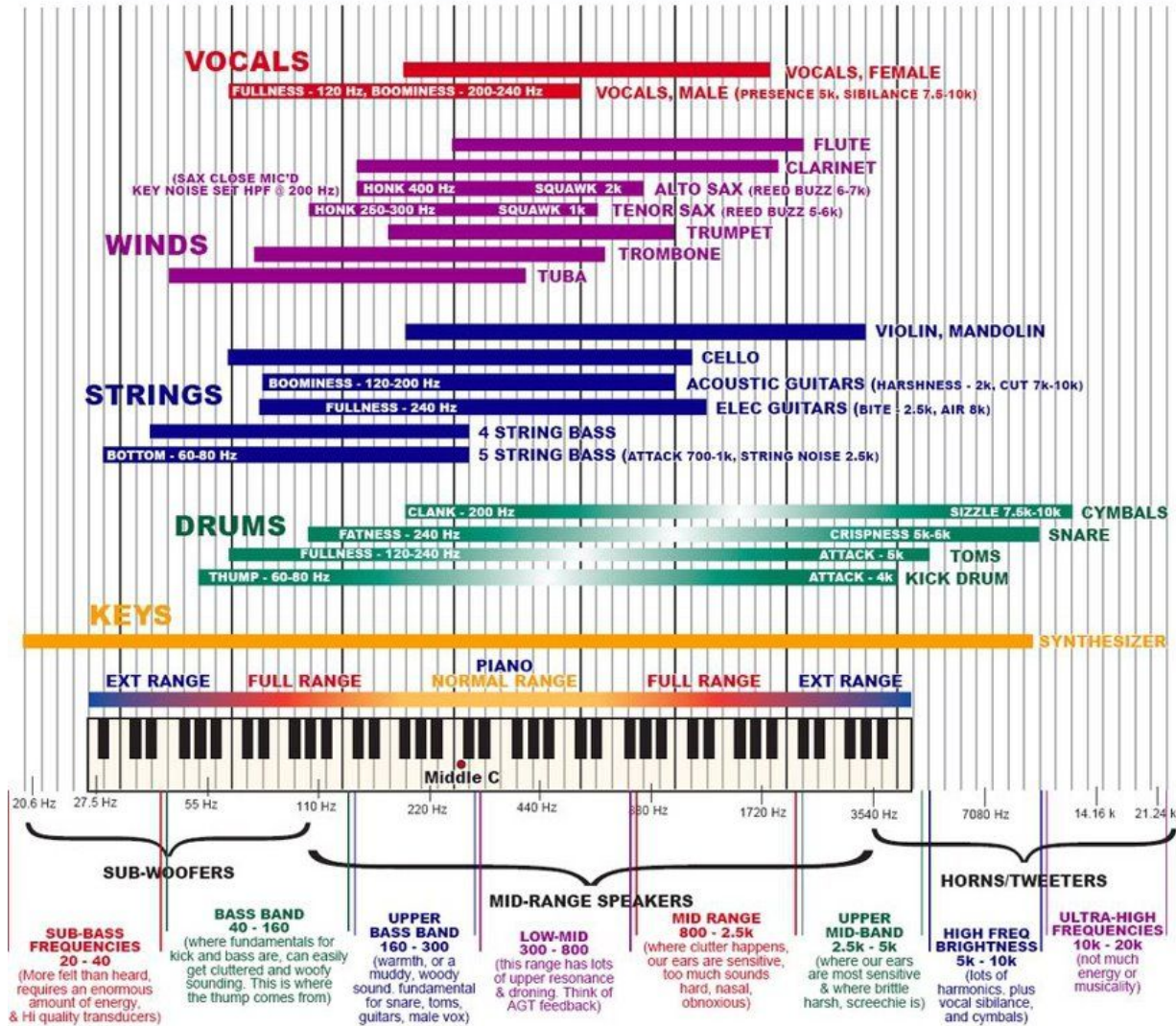


A-weighting (dB_A)

Per adattare le misure di livello sonoro alla differente percezione che l'essere umano ha delle frequenze vengono usate delle pesature. La più comune è l'A-weighting utilizzata nel dB_A.



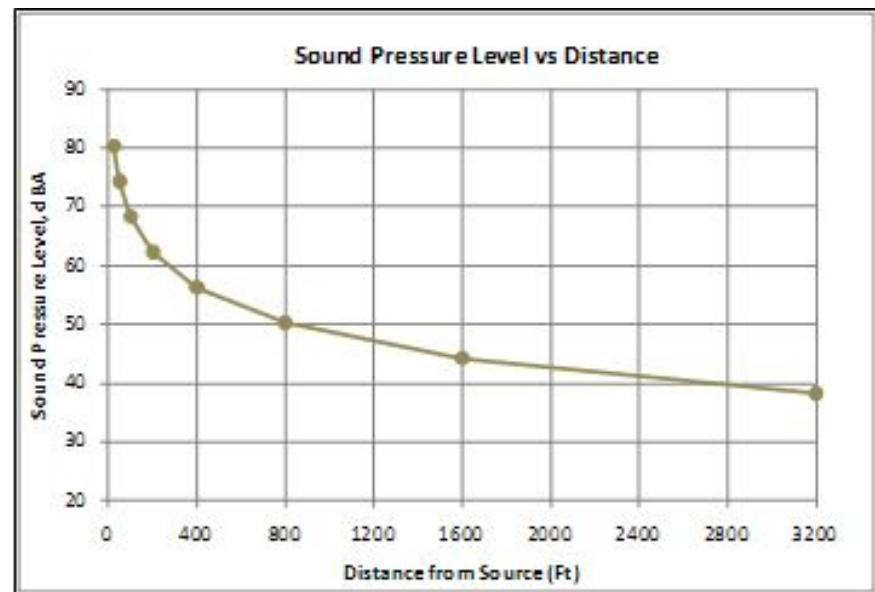
Frequenze udibili



Dispersione del suono

Come ogni forma di energia, anche l'energia sonora si disperde nell'ambiente. Il fattore di dispersione è proporzionale alla distanza.

Source Sound Power Level (L _{WA}) = 106 dBA	
Distance, Feet	Sound Pressure Level, dBA
25	80
50	74
100	68
200	62
400	56
800	50
1600	44
3200	38

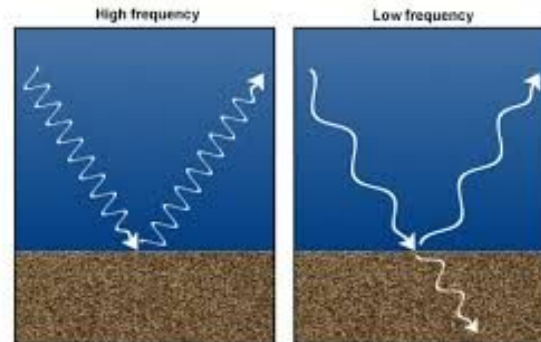


Propagazione delle frequenze sonore

Le onde sonore non si propagano in maniera identica per tutte le frequenze.

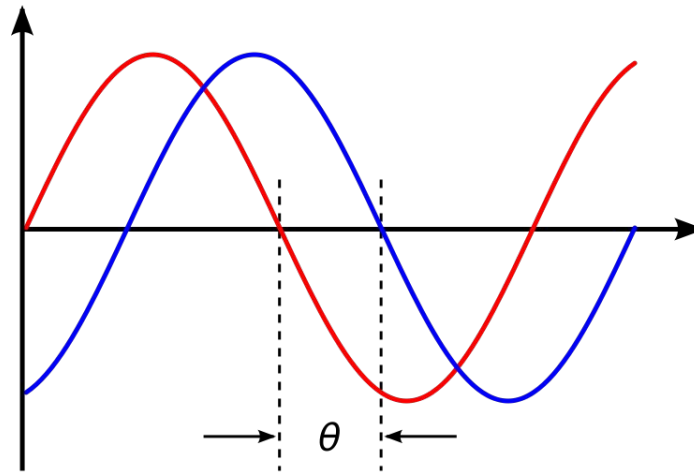
Le frequenze acute contengono poca energia e quindi si disperdono e vengono assorbite più facilmente dagli oggetti nell'ambiente.

Anche le riflessioni contro le barriere (ad esempio i muri) dipendono dalle frequenze. Le frequenze alte vengono più facilmente riflesse, mentre quelle basse riescono ad attraversare le barriere.



Fase

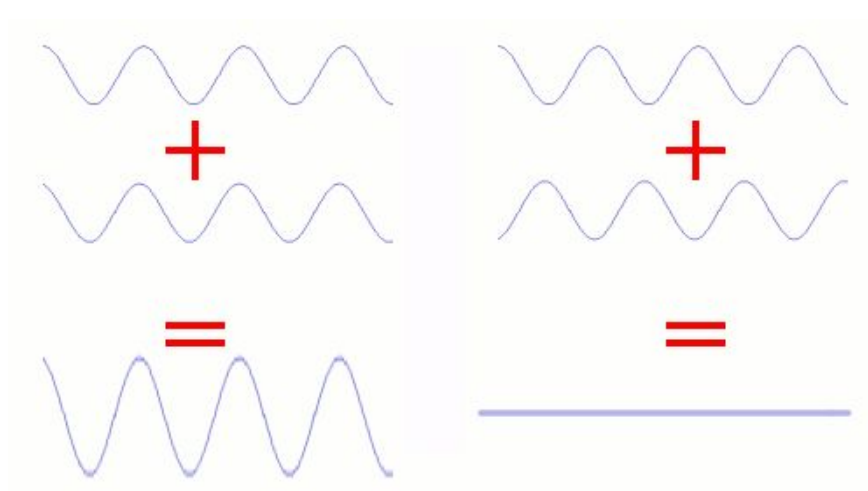
Un'altra proprietà importante delle onde sonore è la fase. Varia a dipendenza dell'istante in cui l'onda comincia la propria oscillazione. Onde sonore con la stessa frequenza possono avere una differenza di fase: è la distanza tra due punti al medesimo frangente di oscillazione delle due onde.



Fase

Le differenze di fase sono inudibili, ma possono avere forte effetto quando i suoni vengono combinati.

Ad esempio, se si somma un'onda sinusoidale con la sua esatta opposta (cioè un'onda a 180° di fase), si ottiene silenzio.



Timbro

Il timbro di un suono ne determina il carattere sonoro. Strumenti diversi producono suoni di timbro differente. Il timbro viene anche chiamato colore del suono.

Il suono con il timbro più semplice è quello prodotto da un sintetizzatore di senoide:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

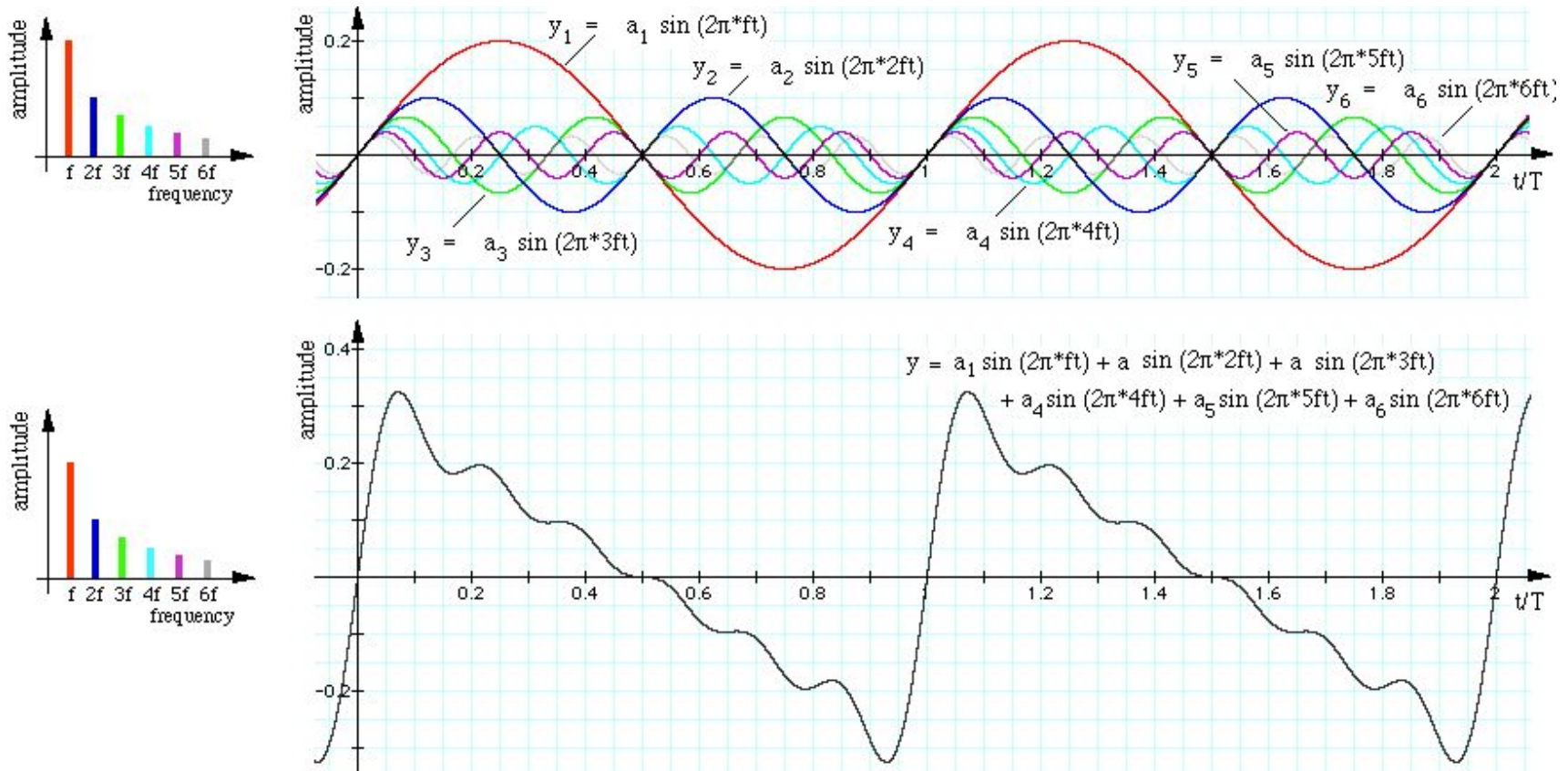
A:	ampiezza
f:	frequenza
$\omega = 2\pi f$:	frequenza angolare
phi:	fase

Quello più complesso è quello del rumore bianco.

La percezione del timbro è determinata da due caratteristiche fisiche: lo spettro e l'involuppo.

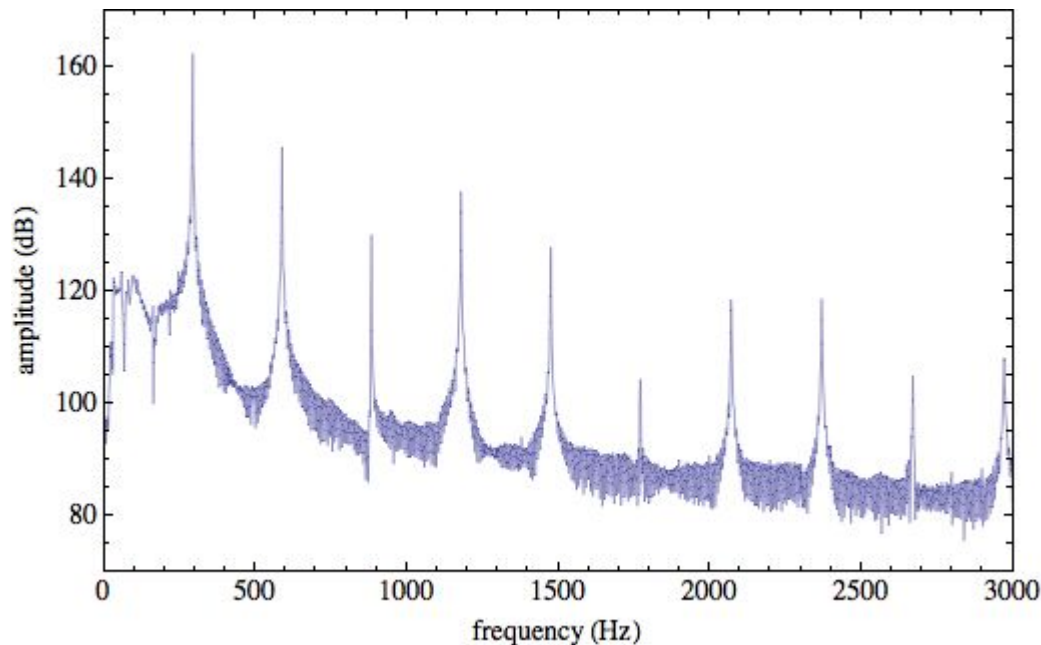
Spettro sonoro (delle frequenze)

Ogni suono può essere modellato come combinazione di onde sinusoidali a differenti frequenze.



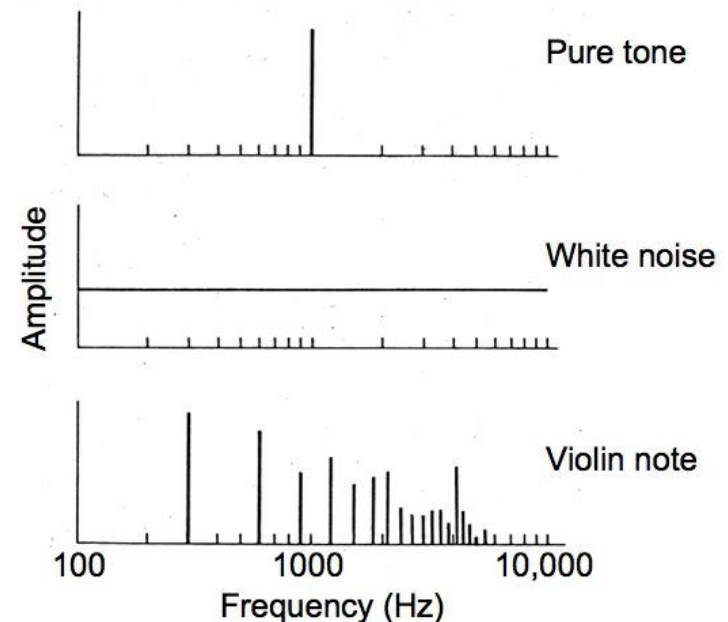
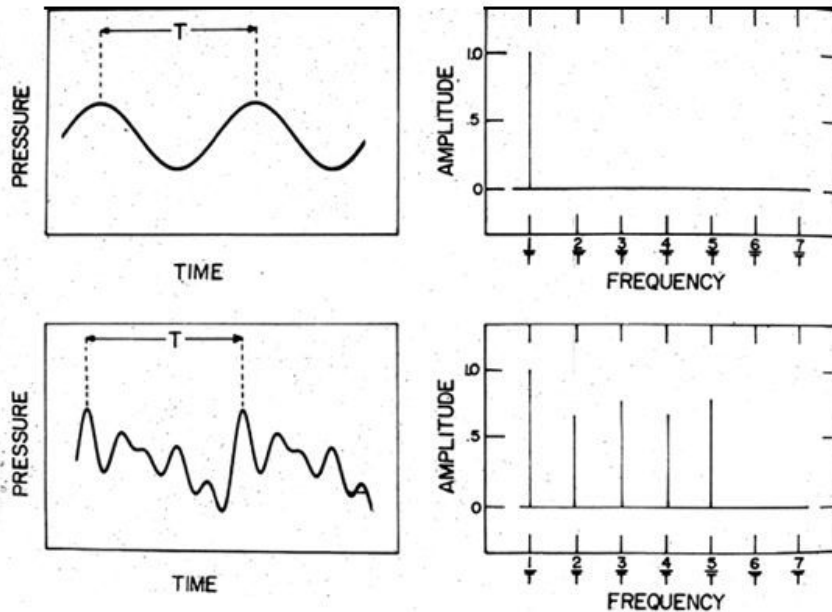
Spettro sonoro

Se un suono contiene frequenze che sono multipli di una frequenza “fondamentale”, l’unione di questi suoni viene percepita come un unico suono la cui frequenza è quella fondamentale e il cui carattere è determinato dalle frequenze e ampiezze coinvolte.

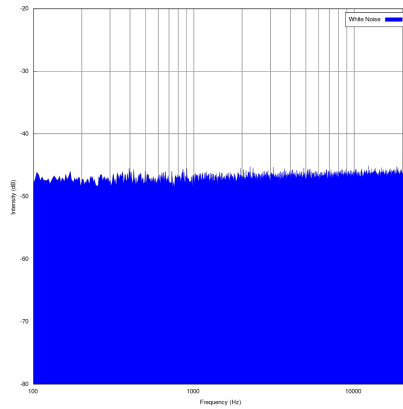


Spettro sonoro

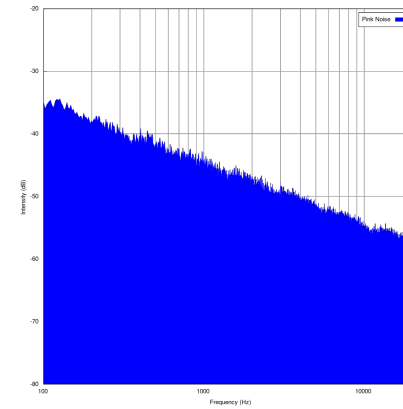
Per un tono puro (una sinusoide) il grafico è formato da una semplice linea verticale, per un suono musicale da una serie di linee in corrispondenza alle frequenze fondamentali e alle armoniche, per un rumore lo spettro è costituito da una banda di frequenze.



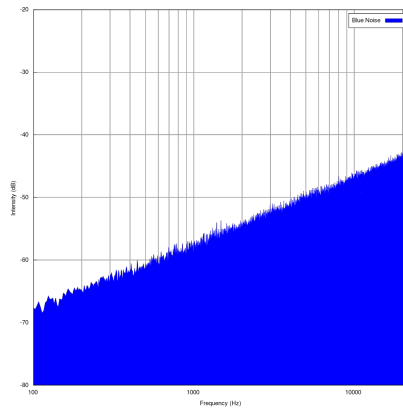
Spettro del rumore



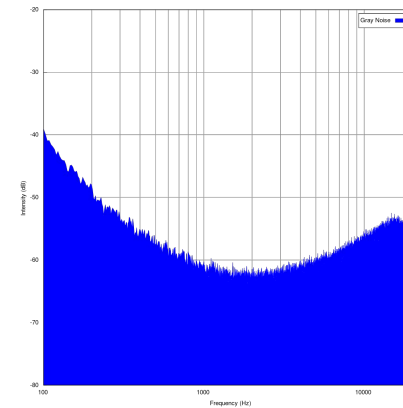
Rumore bianco



Rumore rosa



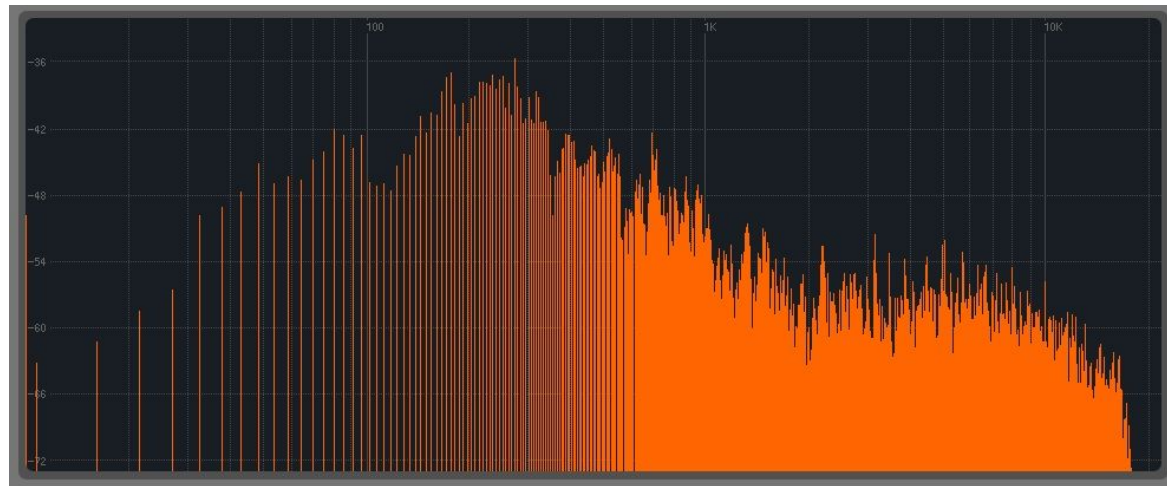
Rumore blu



Rumore grigio

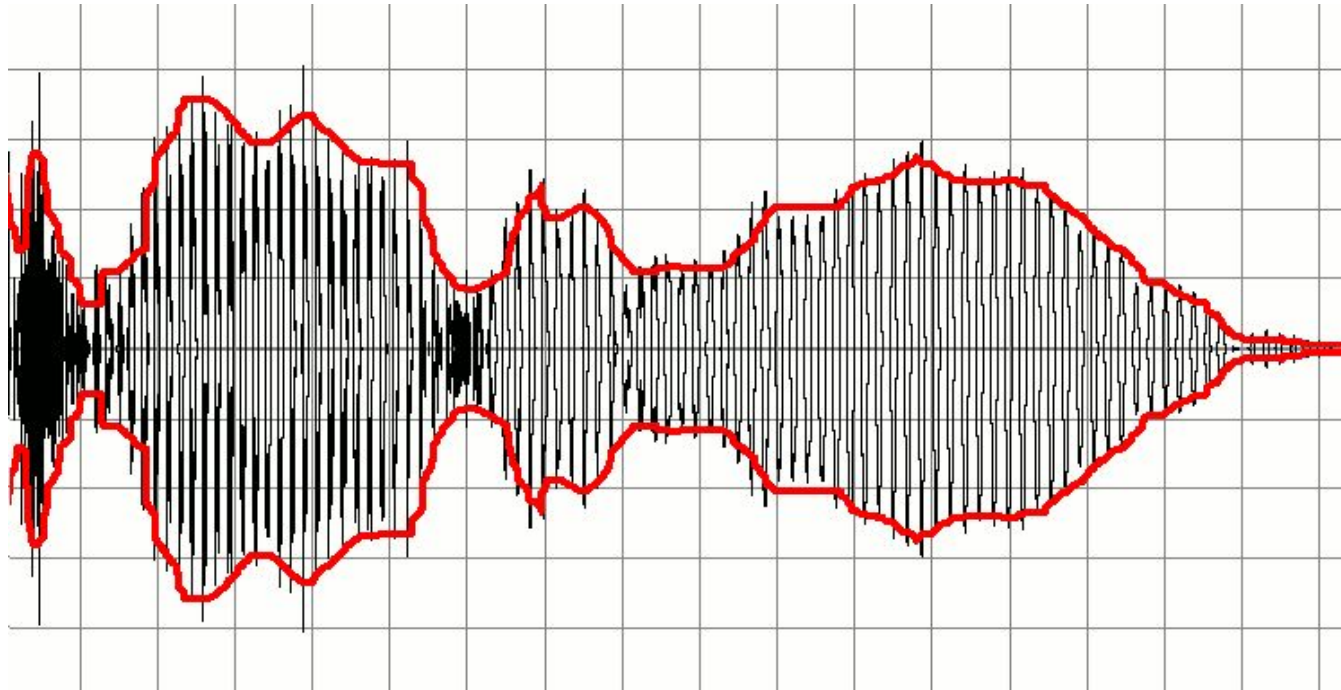
Spettro sonoro

Lo spettro sonoro può essere visualizzato e utilizzato nell'analisi di un suono o rumore: vi si riportano i livelli sonori delle singole sinusoidi.



Inviluppo

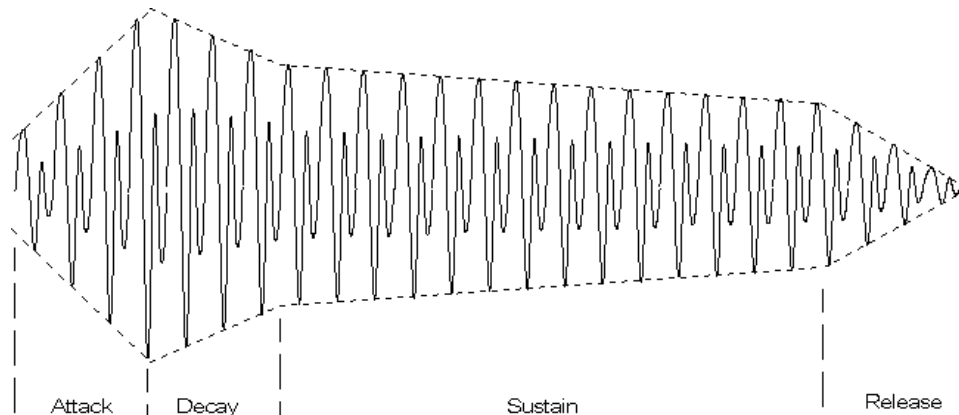
L'inviluppo è l'andamento dell'ampiezza di un suono nel tempo. Ogni timbro sonoro ha un suo particolare inviluppo.



Inviluppo

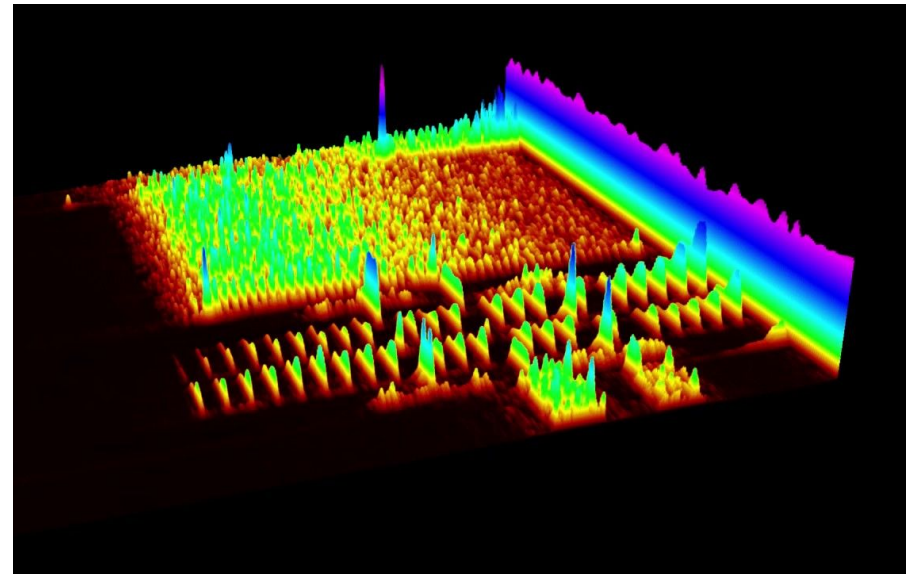
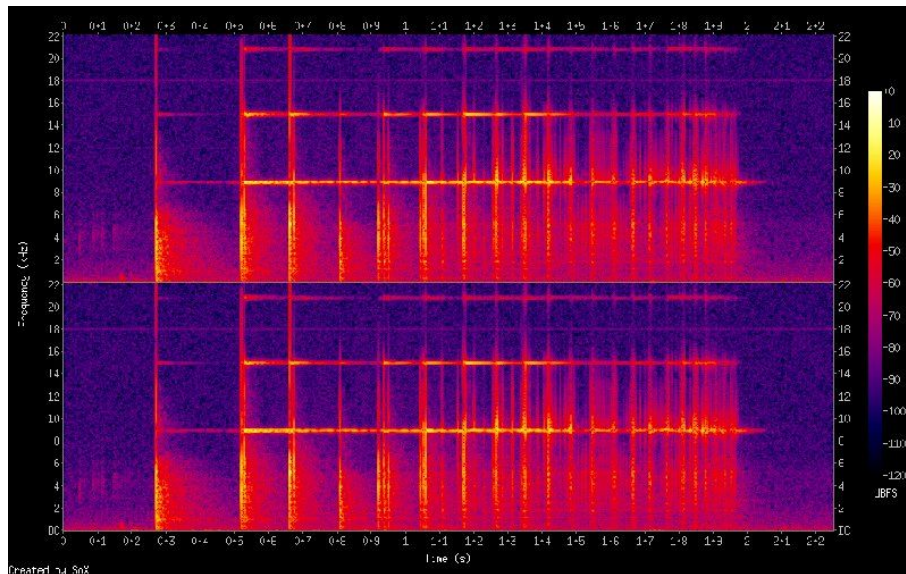
L'inviluppo di un suono è solitamente composto da 4 fasi, dal momento in cui viene originato, al momento in cui si estingue:

- Attacco (Attack): l'ampiezza raggiunge, a partire da zero, il suo valore massimo.
- Decadimento (Decay): dopo l'attacco, parte dell'energia iniziale viene persa e l'ampiezza diminuisce.
- Sostegno (Sustain): l'ampiezza mantiene un livello quasi costante per un certo tempo.
- Rilascio (Release): l'ampiezza decresce fino ad estinguersi completamente.



Spettrogramma

Lo spettrogramma è la rappresentazione grafica dell'intensità di un suono in funzione sia del tempo, che della frequenza. È lo strumento migliore per osservare il timbro di un suono. Ne esistono due varianti: bidimensionale e tridimensionale.



Direzione e distanza del suono

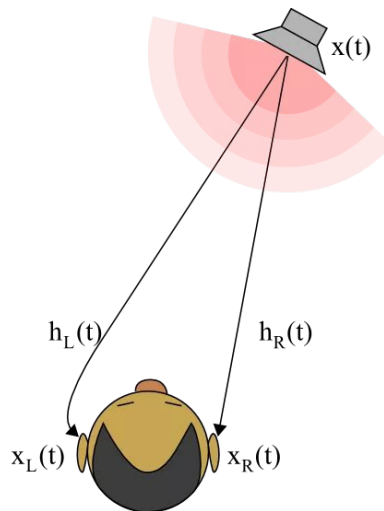
Oltre a riconoscere l'intensità e l'altezza dei suoni, il sistema uditivo degli esseri umani è capace di distinguerne la direzione di provenienza.

Questa capacità viene chiamata ascolto binaurale (binaural hearing).

Inoltre, l'orecchio umano è capace di stimare la distanza della sorgente sonora.

Direzione del suono

Sul piano orizzontale, la direzione viene identificata soprattutto sfruttando la differenza tra l'istante di arrivo del suono ad un orecchio, rispetto a quell'altro. Per le frequenze sotto gli 800 Hz, per cui la metà della lunghezza d'onda è maggiore della distanza fra le orecchie (21.5 cm), è possibile un'identificazione inequivocabile basata sulle differenze di fase.



Direzione del suono

Da 200 Hz in su, viene inoltre sfruttata la leggera differenza di livello sonoro, causata dall'effetto di mascheramento della testa. Questa differenza non è udibile sotto i 200 Hz.

A partire da 1600 Hz in su, la lunghezza d'onda è minore della distanza fra le orecchie e quindi le differenze di fase non possono più essere sfruttate. Viene utilizzata praticamente solo la differenza di livello sonoro, che fortunatamente è più marcata per le alte frequenze.

Per le frequenze alte, in ambienti riverberanti alcune informazioni di direzione possono venir estrapolate anche dalle riflessioni iniziali del suono sulle pareti.

Direzione del suono

Per quanto concerne le frequenze basse sotto gli 80Hz, l'orecchio non ha grandi capacità di riconoscere la direzione di provenienza. Le differenze di fase sono troppo piccole per venire riconosciute.

Inoltre, ci sono casi in cui l'orecchio può entrare in confusione (ad esempio suono proveniente frontalmente o da dietro). In queste situazioni, il cervello attiva comportamenti istintivi, in cui viene ruotata leggermente la testa lateralmente per per permettere l'identificazione della direzione.

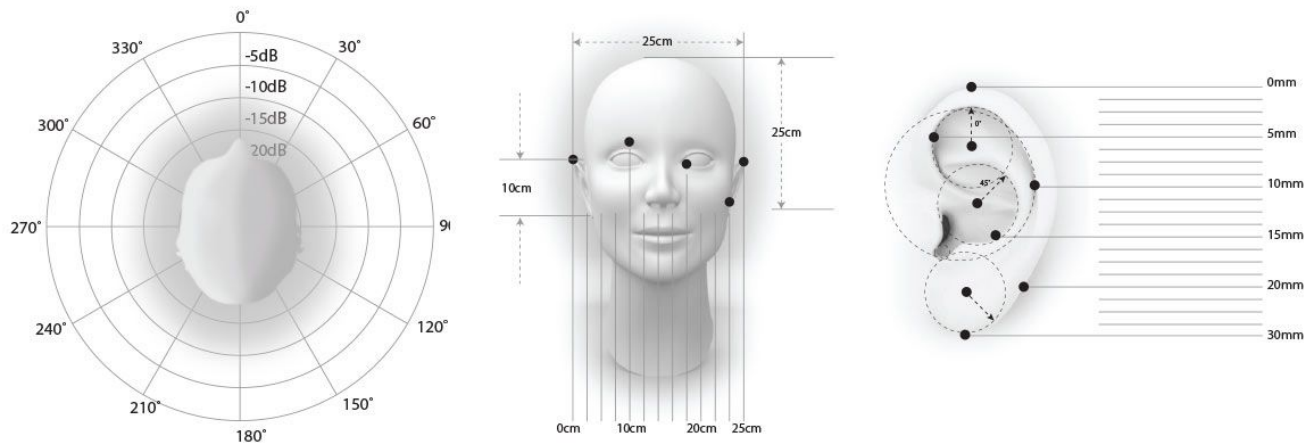
Head related transfer function (HRTF)

L'ascolto binaurale non è l'unica capacità sfruttata per l'identificazione della direzione del suono. Ad esempio per distinguere suoni provenienti da sopra rispetto a suoni provenienti dal basso, viene sfruttata la cosiddetta head related transfer function (HRTF).

Quando il suono si scontra con l'ascoltatore, la dimensione e forma della testa, delle orecchie, del canale delle orecchie, la densità della testa, dimensione e forma delle cavità nasali e orali, modificano il suono e quindi la percezione ottenuta, intensificandone alcune frequenze e attenuandone altre.

Head related transfer function (HRTF)

In generale, l'HRTF intensifica le frequenze fra i 2 - 5 kHz con una risonanza primaria (il suono viene rinforzato a causa delle riflessioni) di +17 dB at 2,700 Hz. Ma la risposta di frequenza è più complessa e ha impatto su spettro più ampio, variando in maniera importante fra persona e persona.



Distanza del suono

Per la stima della distanza, vengono soprattutto sfruttati i riverberi (prodotti dall'ambiente), in particolare l'informazione di predelay (il tempo che intercorre fra l'arrivo del suono diretto e le prime riflessioni).

A contribuire è anche lo spettro di frequenze del suono d'arrivo. Le frequenze acute contengono poca energia e quindi si disperdono più facilmente. Vengono anche più facilmente filtrate da eventuali ostacoli.

Stereofonia

L'ascolto stereofonico è un inganno psicoacustico in cui vengono utilizzate due sorgenti sonore (correttamente posizionate), con una tecnica di riproduzione in cui i medesimi contenuti sonori vengono riprodotti con differenti ampiezze.

Quest'inganno permette di posizionare sorgenti sonore virtuali nello spazio compreso fra i due altoparlanti.

