



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

**49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)**

Dispensa n. 4

**MICROFONI E FONOMETRI
MISURA DELL'INTENSITA' SONORA**

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E
ILLUMINOTECNICA L (A-K)
Ing. Paolo Guidorzi

MICROFONI E FONOMETRI

Indice

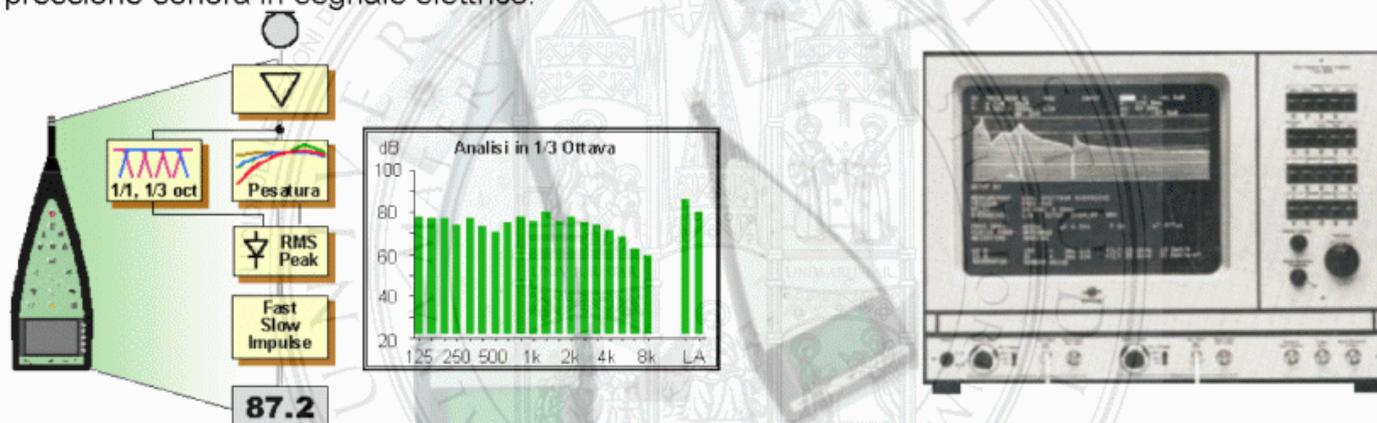
Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - Il fonometro
- 3 - Il microfono a condensatore
- 4 - Misura dell'intensita' acustica
- 5 - La trasformata di Fourier
- 6 - Il prodotto di convoluzione
- 7 - Delta di Dirac
- 8 - Sistemi lineari-stazionari
- 9 - Risposta all'impulso e risposta in frequenza

FONOMETRO E MICROFONO

La misura del suono si effettua con il **fonometro**, uno strumento di precisione.

Il trasduttore, che fa da tramite tra onda sonora e fonometro, è il **microfono**, che trasforma la pressione sonora in segnale elettrico.



Per un'analisi più *fine* del fenomeno acustico, esistono gli **analizzatori di spettro**, che effettuano la FFT in tempo reale, ma sono di solito meno trasportabili dei normali fonometri. Con l'avanzare della tecnologia la distinzione tra fonometri e analizzatori si sta sempre più assottigliando e già si trovano in commercio sofisticati analizzatori FFT di dimensioni molto ridotte.

E' essenziale che l'operatore utilizzi tali strumenti con cognizione di causa, sapendo cosa sta facendo, e verificando l'attendibilità delle misure effettuate.

000105

Image Courtesy of Brüel & Kjær

FONOMETRO - CLASSIFICAZIONE

Le norme internazionali dividono i fonometri in 3 classi di appartenenza:

- CLASSE 0: **di riferimento**. Sono usati per tarare gli altri strumenti. [Precisione: 0,3 dB]
- CLASSE 1: **di precisione**. Utilizzati per misure di inquinamento acustico, emissioni sonore in genere, zonizzazione acustica, ... [Precisione: 0,7 dB]
La legge prescrive di utilizzare solamente strumenti di classe 1 per le misure.
- CLASSE 2: **industriali o ingegneristici**. Si usano per rilevazioni di massima, quando non è richiesto alcun certificato. Forniscono solo il valore istantaneo. [Precisione: 1,1 dB]
- CLASSE 3: **di sorveglianza**. Usati da personale non specializzato per rilevazioni dirette. Questa classe è stata rimossa nella nuova norma. [Precisione: 1,5 dB]

OMOLOGAZIONE

Ogni modello di **fonometro** sul mercato è stato sottoposto a una procedura di **omologazione**, certificato chiesto dal produttore a un ente preposto, specifica per un certo modello.

(come il crash-test e le altre verifiche che si effettuano su un modello di autovettura prima di poterla commercializzare)

TARATURA

Al **fonometro**, prima di uscire dalla fabbrica, viene effettuata la **taratura**. Essa va ripetuta, a cura di un ente accreditato, di solito ogni 2 anni. Uno strumento col certificato di taratura scaduto non può più essere utilizzato con sicurezza (potrebbe fornire misure non corrette).

(come la revisione periodica che si effettua ogni 2 anni all'autovettura)

CALIBRAZIONE

Prima di ogni sessione di misura (e possibilmente alla fine della stessa, per verifica), l'utente del fonometro deve effettuare la **calibrazione**. Questa consiste nel porre sul microfono il **calibratore**, un piccolo apparecchio che emette un tono puro con un'ampiezza molto precisa; si imposta quindi lo strumento in modo da leggere esattamente quel valore (di solito 94 dB, ovvero 1 Pa, a 1 kHz).

*(come il controllo del livello dell'olio e della pressione delle gomme che *andrebbe* fatto tutti i giorni all'autovettura prima di metterla in marcia)*

Image Courtesy of Brüel & Kjær

FONOMETRO – PRINCIPI GENERALI DI FUNZIONAMENTO

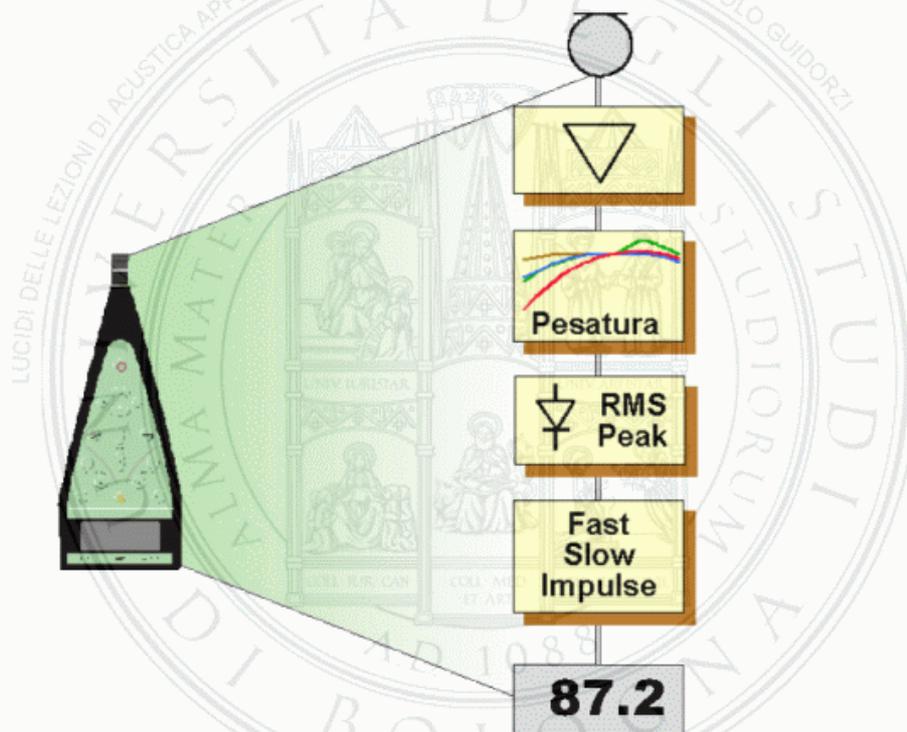


Image Courtesy of Brüel & Kjær

FONOMETRO – ANALISI IN FREQUENZA SERIALE

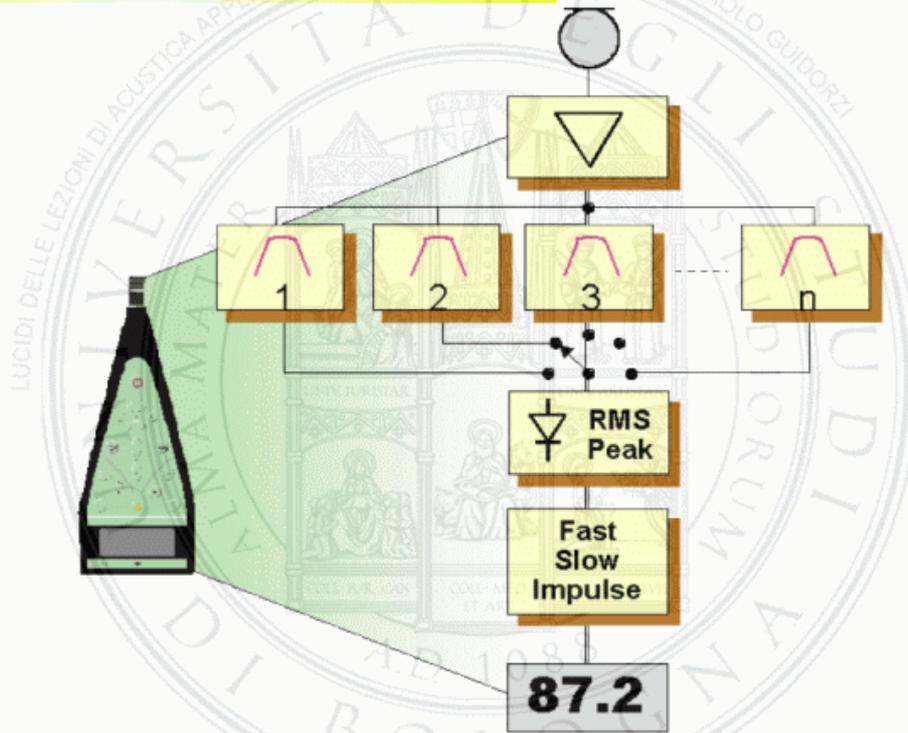


Image Courtesy of Brüel & Kjær

FONOMETRO – ANALISI IN FREQUENZA PARALLELA

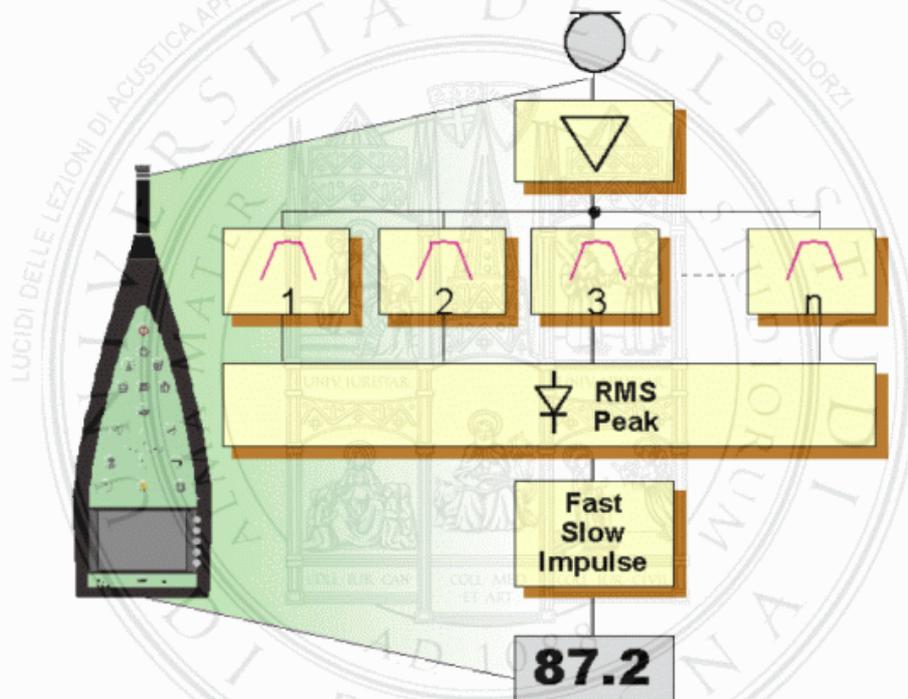


Image Courtesy of Brüel & Kjær

FONOMETRO IN TEMPO REALE

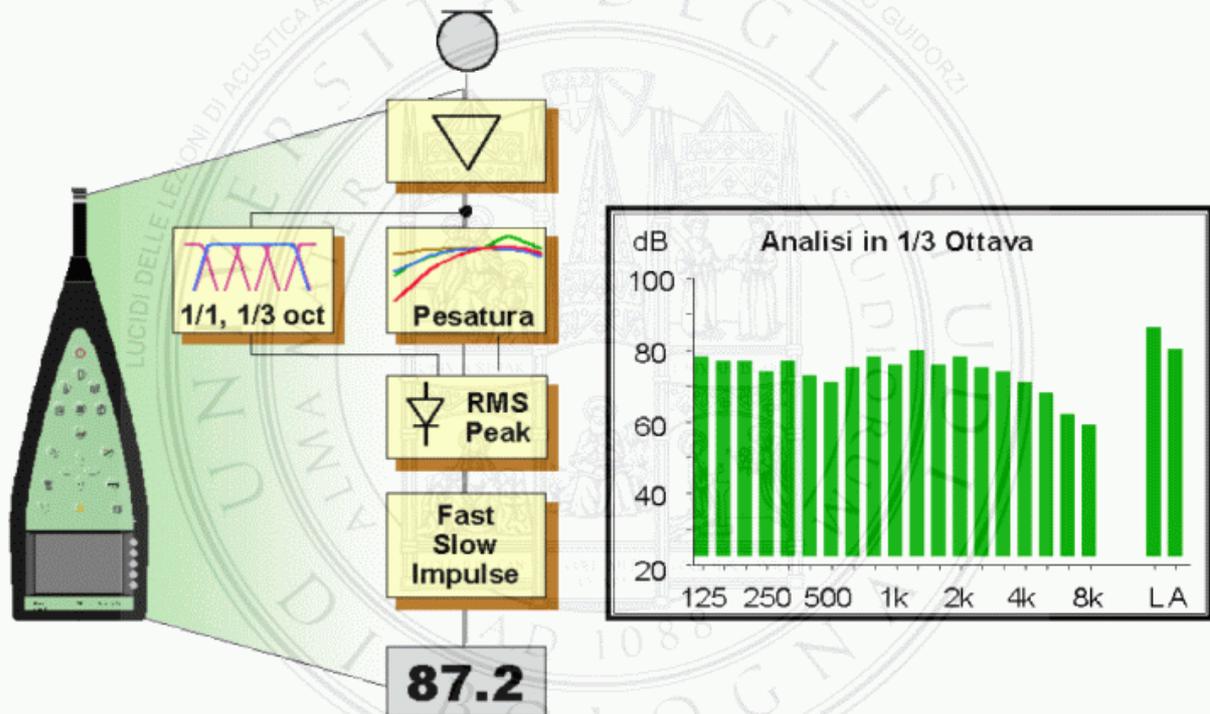


Image Courtesy of Brüel & Kjær

MICROFONO A CONDENSATORE

Il tipo di microfono più utilizzato oggi per le misure acustiche è il microfono a condensatore



- Stabile in condizioni climatiche avverse
- Risposta piatta su un elevato range di frequenze
- Bassa distorsione
- Basso rumore
- Alta dinamica
- Alta sensibilità

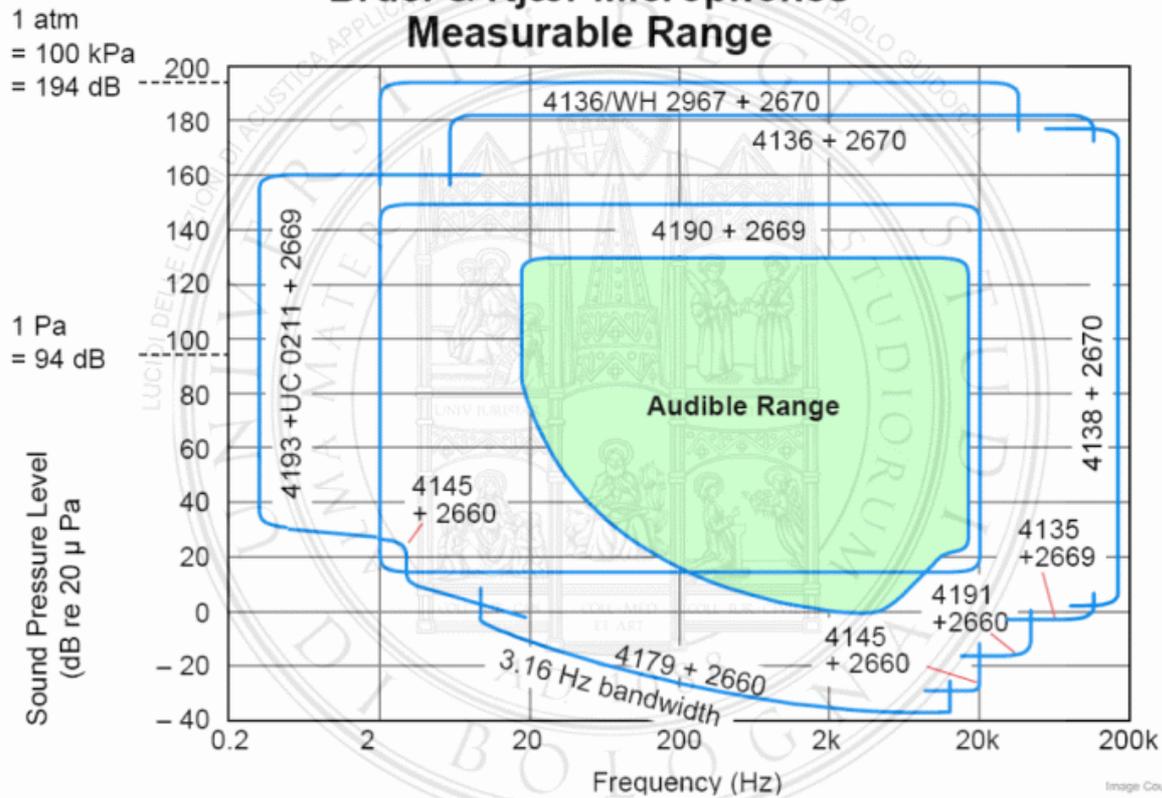
Altre tipologie di microfono:

- DINAMICO
- A CARBONE
- PIEZOELETTRICI
- LASER
- A LIQUIDO (!!)

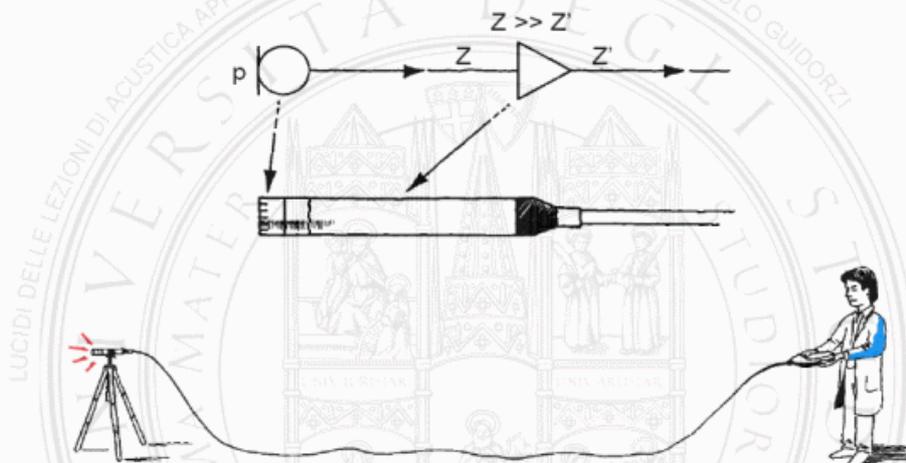
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>

Image Courtesy of Brüel & Kjær

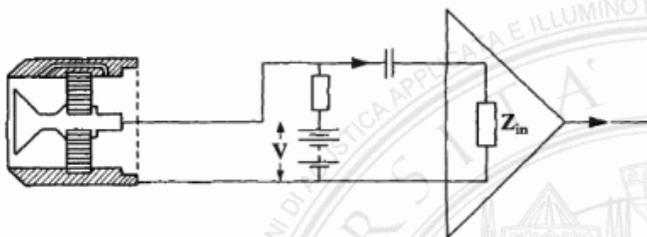
Brüel & Kjær Microphones Measurable Range



MOVIMENTO DEL DIAFRAMMA IN SEGUITO A UNA VARIAZIONE DI PRESSIONE

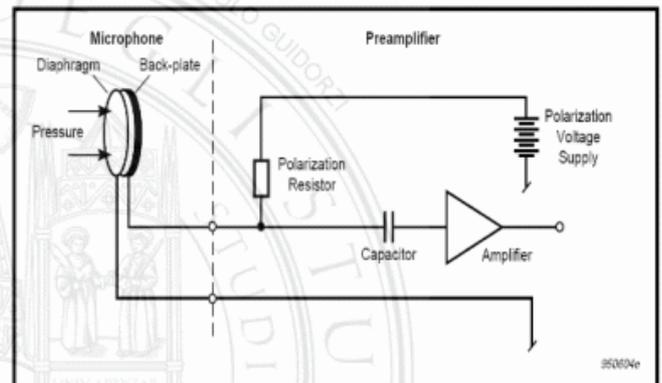


Il microfono a condensatore converte le variazioni di pressione acustica in segnale elettrico. La capsula microfonica è connessa a un preamplificatore, posto molto vicino alla capsula stessa. Il compito del preamplificatore è soprattutto quello di convertire l'uscita ad alta impedenza del microfono in una linea a bassa impedenza, tale da permettere l'utilizzo di cavi lunghi ed essere il più possibile immune da disturbi elettrici ed elettromagnetici.



$$\left. \begin{aligned} Q &= CV \\ C &= \epsilon \frac{A}{d} \end{aligned} \right\} \rightarrow V = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\epsilon A} d \rightarrow \Delta V = \frac{Q}{\epsilon A} \Delta d$$

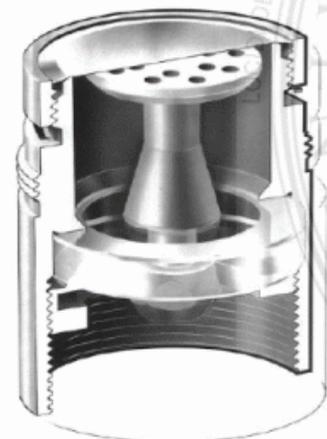
Q: carica sul piatto posteriore
 C: capacità del microfono
 V: tensione di polarizzazione
 A: area del microfono
 d: distanza tra diaframma e piatto
 ε: costante dielettrica del vuoto



La capsula microfonica è formata da un sottile diaframma metallico molto vicino a un piatto posteriore. Questo è in pratica un condensatore, la cui capacità varia al variare della distanza dal piatto del diaframma, il quale è mosso dalle onde sonore. La carica Q viene mantenuta costante dalla tensione di polarizzazione; il variare di capacità dovuto alle onde sonore porta a un variare di differenza di potenziale, proporzionale alla variazione di pressione sonora.

Esistono anche microfoni a condensatore prepolarizzati, il cui principio di funzionamento è lo stesso ma non richiedono tensione di polarizzazione.

Image Courtesy of Brüel & Kjær



950291e

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta d}{d}$$

For typical measurement microphone:

- diameter 12.5 mm
- thickness of diaphragm 5 μm
- distance between diaphragm and backplate 20 μm
- polarisation voltage 200 V
- sensitivity 50 mV/Pa

For 94 dB = 1 Pa the diaphragm moves

$$\Delta d = \frac{\Delta V \times d}{V} = \frac{50 \text{ mV} \times 20 \text{ } \mu\text{m}}{200 \text{ mV}} = 5 \text{ nm}$$

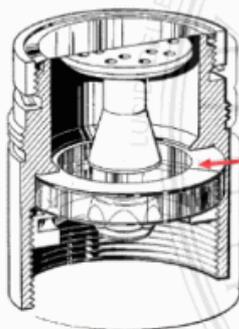
Diameter of diaphragm	Pressure (level re 20μPa)	Diaphragm's movement
12.5mm	1Pa (94dB)	5nm (5 × 10 ⁻⁹ m)
12.5mm	0.02Pa (60dB)	1 Å (10 ⁻¹⁰ m)
12500km (thickness of diaphragm 5km)	0.02Pa (60dB)	0.1m (10 ⁻¹ m)
	0.0002Pa (20dB)	0.001m (10 ⁻³ m)

Image Courtesy of Brüel & Kjær

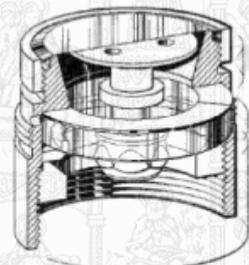
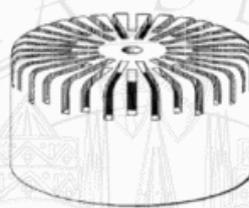


Image Courtesy of Brüel & Kjær

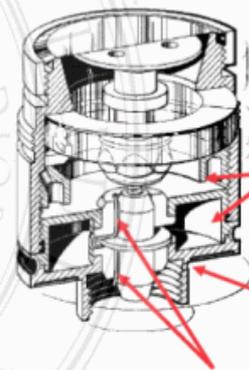
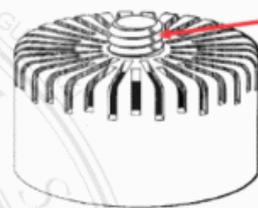
TIPOLOGIE DI MICROFONI



General Purpose



High Frequency



Intensity

Image Courtesy of Brüel & Kjær

SENSIBILITA' E RANGE DI FREQUENZA

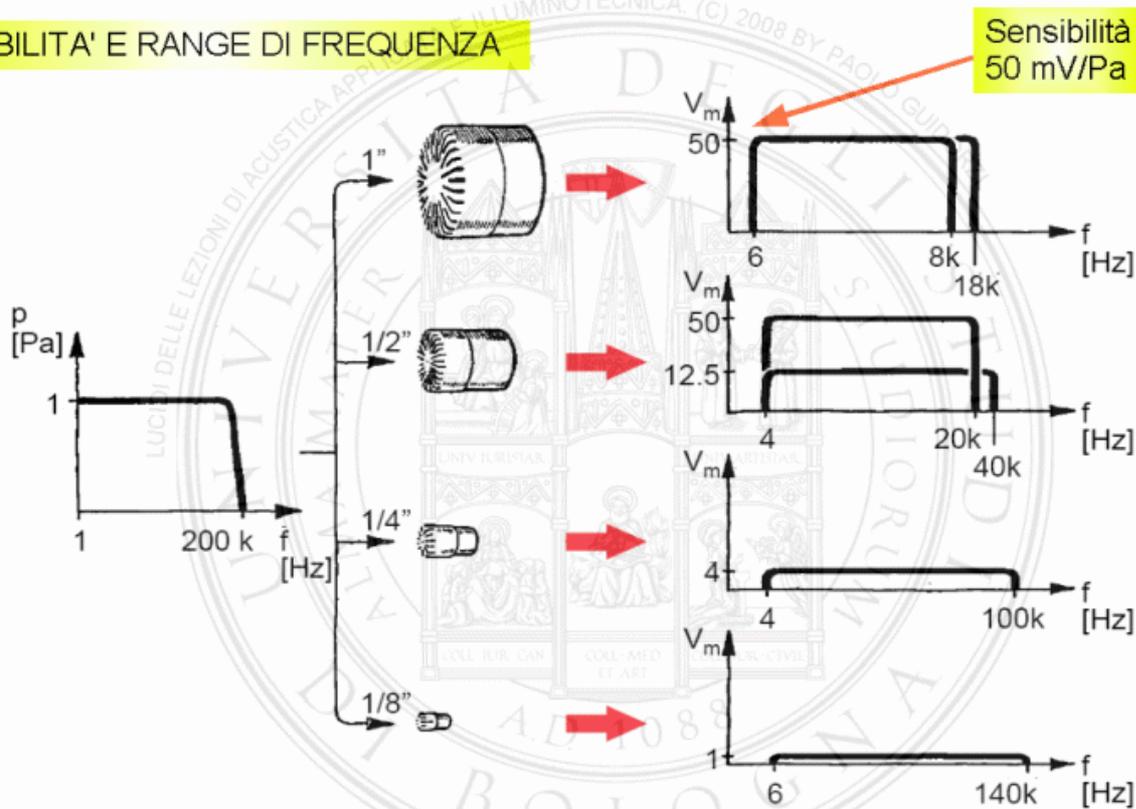
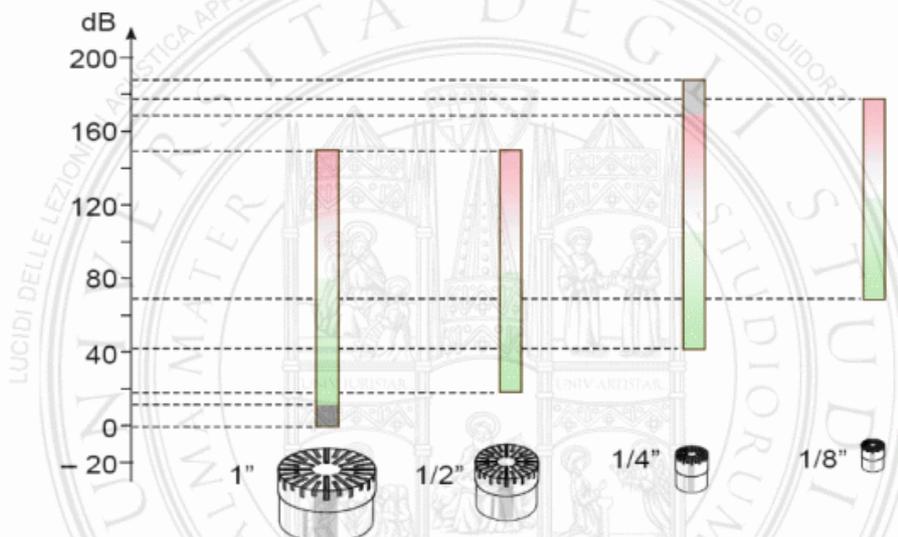


Image Courtesy of Brüel & Kjær

RANGE DINAMICO



Il range dinamico di un microfono è definito come la differenza tra il rumore di fondo pesato "A" del microfono e il livello che fornisce una distorsione del 3%. Il rumore di fondo è il livello di pressione sonora che fa sì che il preamplificatore fornisca in uscita lo stesso livello di segnale elettrico creato dalla sola combinazione microfono e preamplificatore. Il livello corrispondente a una distorsione del 3% è il livello di pressione sonora che produce un segnale in uscita dal preamplificatore con una distorsione del 3%.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

REGIONE OPERATIVA

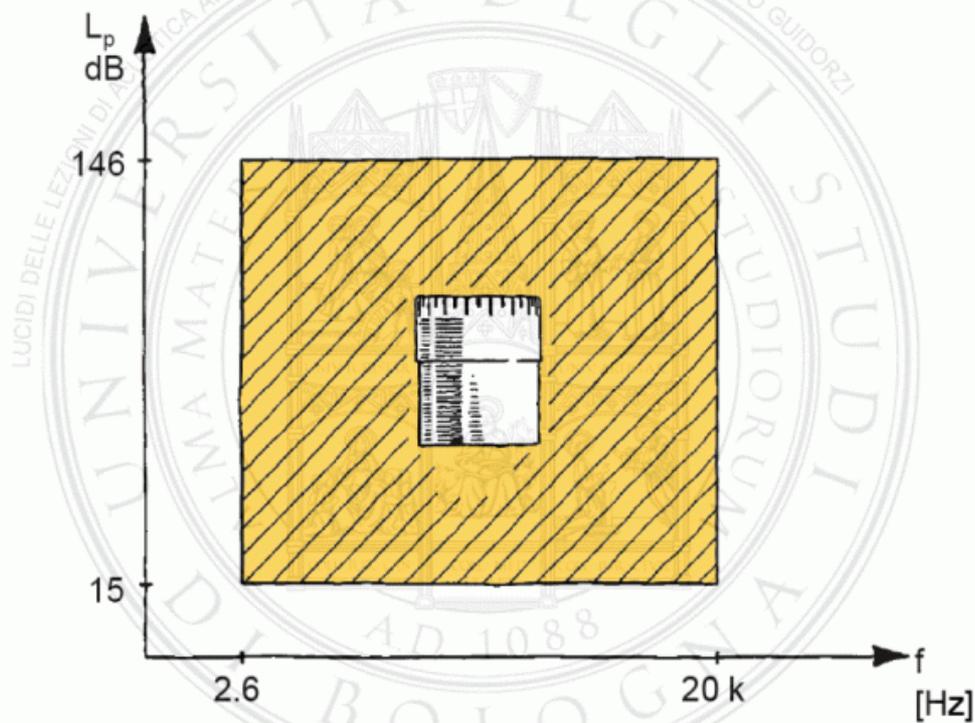
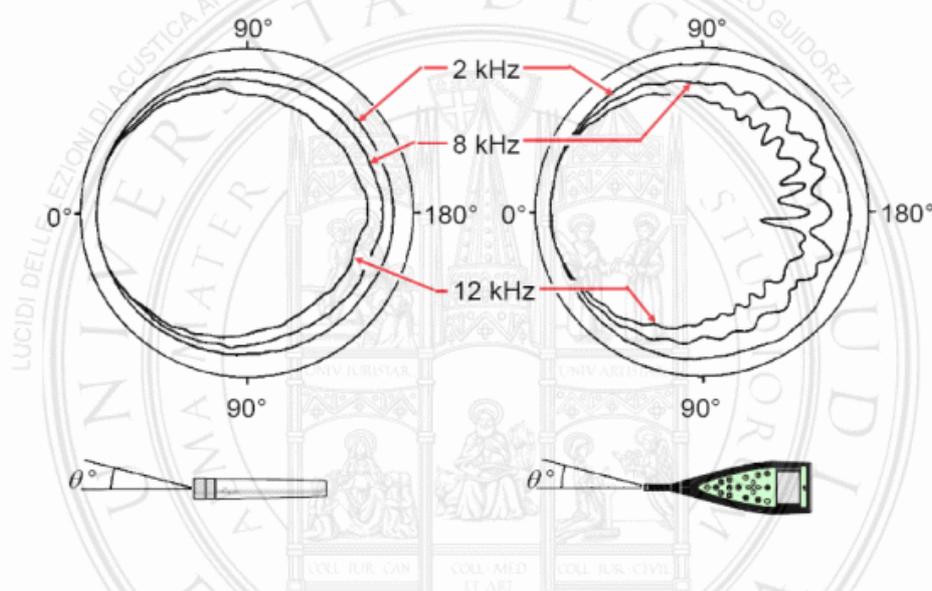


Image Courtesy of Brüel & Kjær

CARATTERISTICHE DIREZIONALI



Il microfono non risponde in egual modo ai suoni provenienti dalle diverse direzioni. A frequenze basse i microfoni sono quasi perfettamente omnidirezionali, mentre ad alte frequenze la sensibilità ai suoni provenienti posteriormente alla capsula è ridotta. Anche l'involucro del fonometro influisce sulla risposta del microfono, quando questo è posto direttamente su di esso.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

CARATTERISTICHE DIREZIONALI

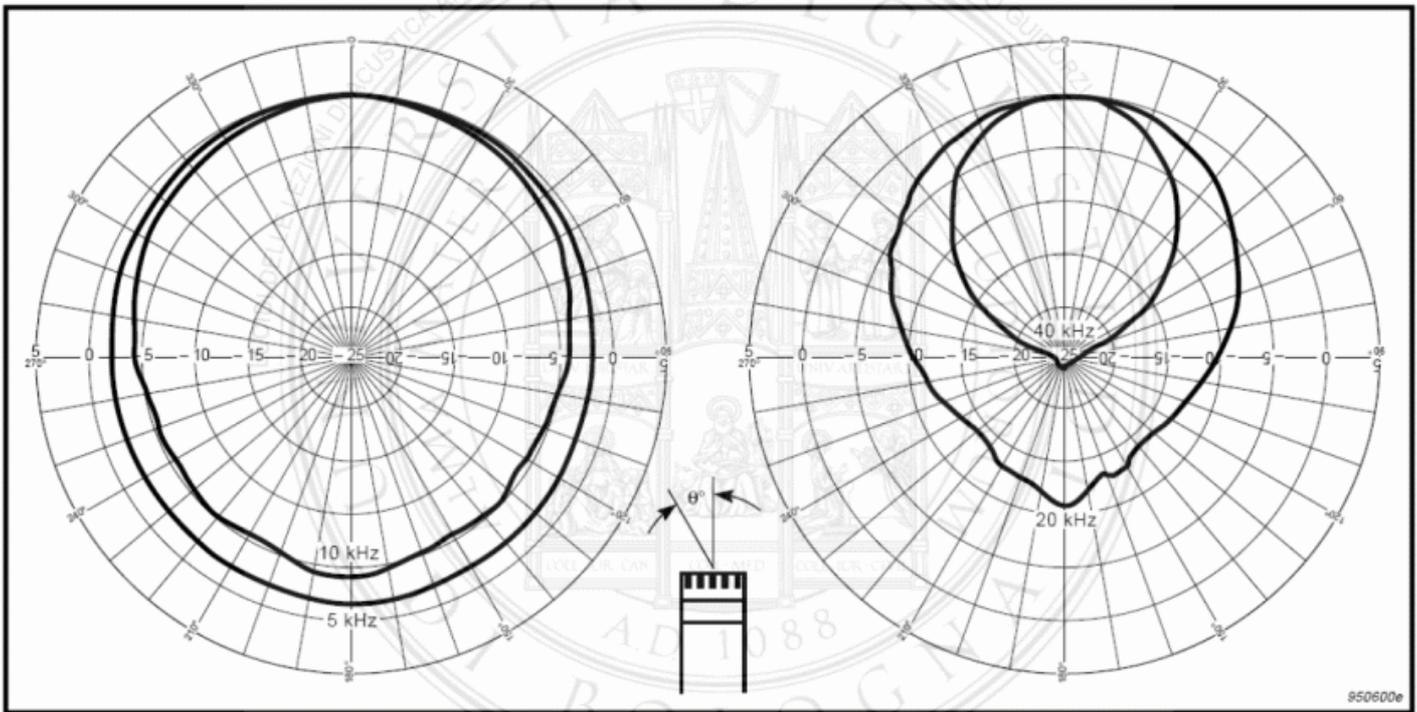
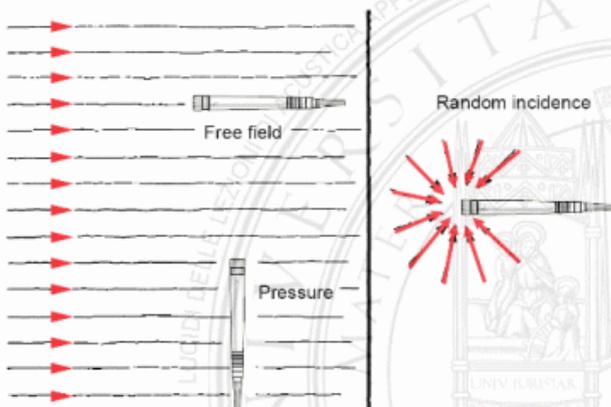


Image Courtesy of Brüel & Kjær

MICROFONI PER CAMPO LIBERO, A PRESSIONE E PER CAMPO DIFFUSO



I microfoni a condensatore sono divisi in 3 tipologie, a seconda della loro risposta nel campo sonoro:

- per campo libero
- a pressione
- per campo diffuso

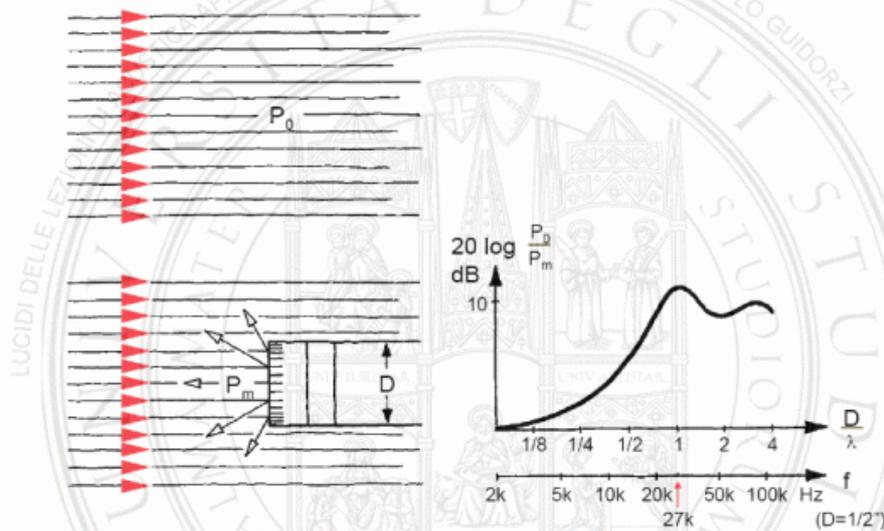
Il microfono **per campo libero** ha una risposta uniforme al campo sonoro che esisterebbe se il microfono non ci fosse. Va notato che ogni microfono disturba il campo acustico in cui è posto, ma il microfono per campo libero è progettato proprio per compensare la sua stessa presenza.

Il microfono **a pressione** è progettato per avere risposta in frequenza uniforme alla vera pressione acustica presente. Non compensa la sua presenza come quello per campo libero.

Il microfono **per campo diffuso** è progettato per rispondere in modo uniforme ai suoni in arrivo contemporaneamente da tutti gli angoli. E' detto anche microfono **per incidenza random**.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

CORREZIONE PER CAMPO LIBERO

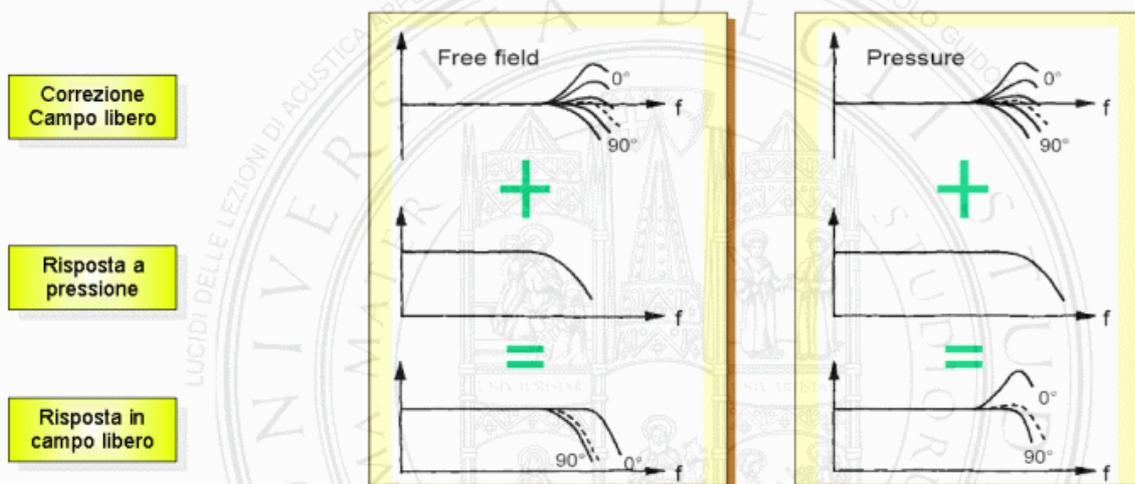


Quando un microfono è posto in un campo sonoro, lo modifica con la sua stessa presenza. Sia p_0 la pressione acustica in un campo sonoro in assenza del microfono.

Se il microfono nel campo sonoro da misurare è posto di fronte alla direzione di arrivo delle onde acustiche, si avrà un incremento della pressione sonora misurata p_m a causa delle riflessioni locali. Questo incremento sarà massimo alla frequenza la cui lunghezza d'onda è uguale al diametro del microfono.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

CORREZIONE PER CAMPO LIBERO

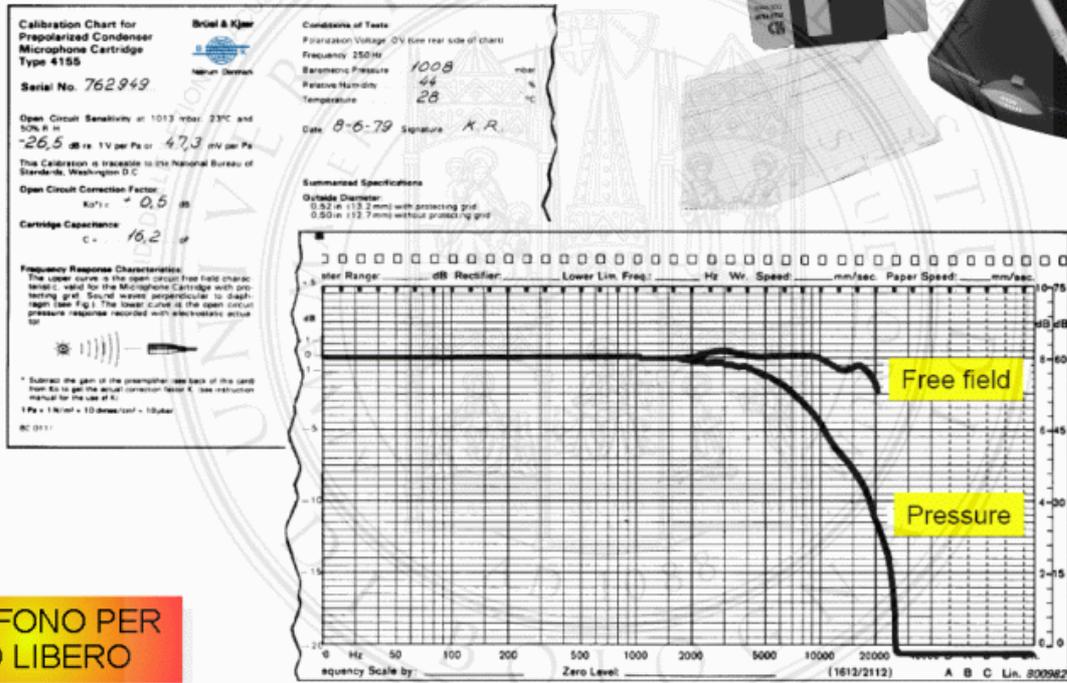


Il microfono **per campo libero** ha una risposta che cala alla frequenza alla quale la sua presenza comincerebbe a creare un incremento nella pressione misurata, così che la sua risposta totale è piatta fino ad alte frequenze, per incidenza normale. Sottostima le alte frequenze per incidenze non normali.

Il microfono **a pressione** ha risposta piatta fino ad alta frequenza, senza alcuna compensazione e va usato quando bisogna misurare il valore della pressione, indipendentemente dal disturbo del microfono al campo sonoro. Se posto in un campo libero e puntato verso la sorgente, sovrastima le alte frequenze

Image Courtesy of Brüel & Kjær

CARTA DI CALIBRAZIONE



MICROFONO PER CAMPO LIBERO

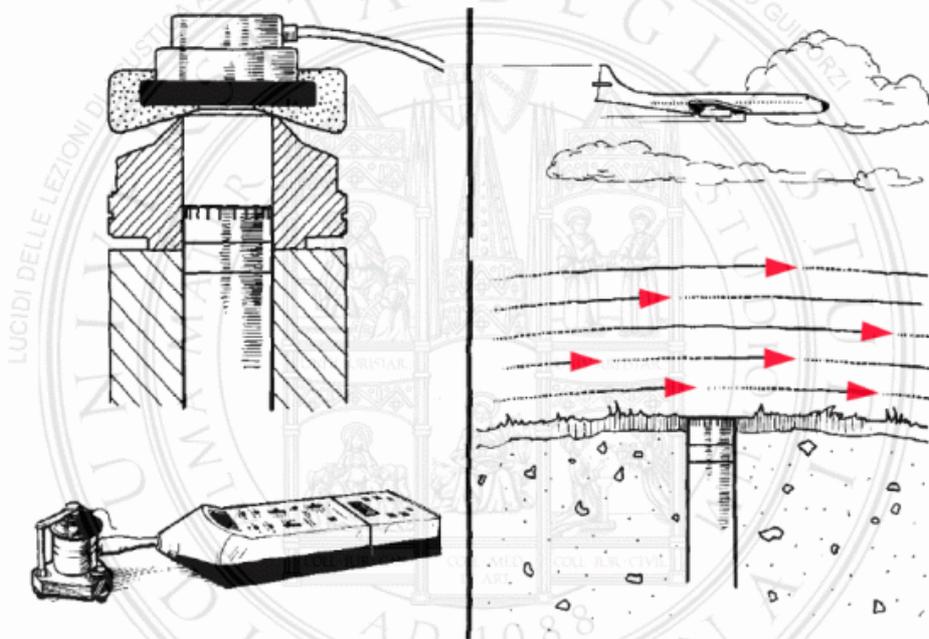
Image Courtesy of Brüel & Kjær

MICROFONO PER CAMPO LIBERO

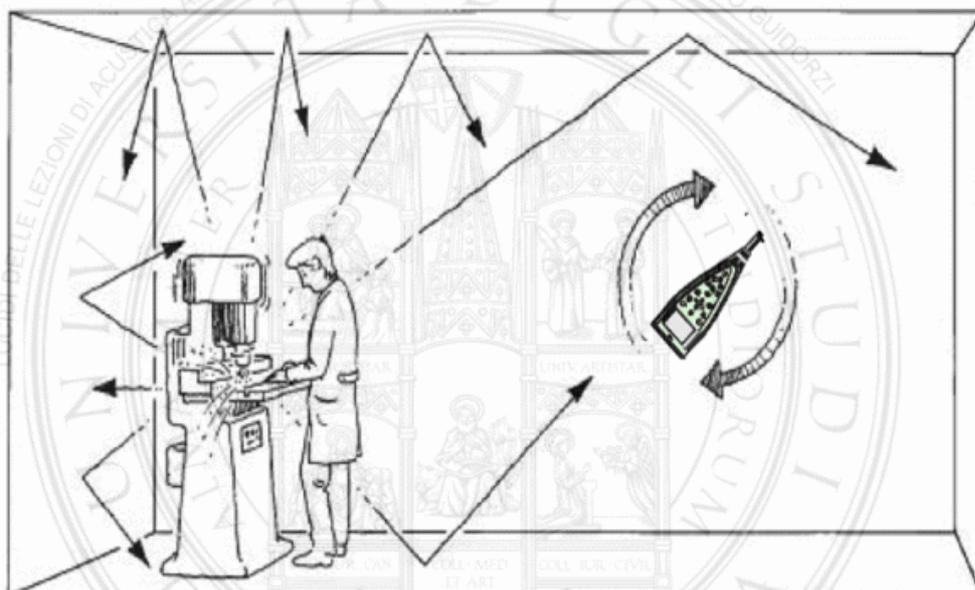


Il microfono per campo libero va usato nei casi in cui il suono arriva principalmente da una sola direzione, e va puntato verso la sorgente.
Si utilizza per misure all'aperto o all'interno di edifici quando non sono presenti riflessioni del suono (per esempio in camera anecoica).

Image Courtesy of Brüel & Kjær

MICROFONO A PRESSIONE

Il microfono a pressione si usa in piccole cavità (ad esempio in un calibratore) e per misure in cui il microfono può essere montato a filo di una parete o comunque quando il parametro da misurare è il valore della pressione acustica, ignorando gli effetti della presenza del microfono. Image Courtesy of Brüel & Kjær

MICROFONO PER CAMPO DIFFUSO

Il microfono per campo diffuso risponde uniformemente ai suoni provenienti simultaneamente da tutte le direzioni. Va usato in camera riverberante, in misure all'interno in ambienti riflettenti e quando si effettuano misure di molte sorgenti contemporaneamente. Image Courtesy of Brüel & Kjær

CONDIZIONI METEOROLOGICHE

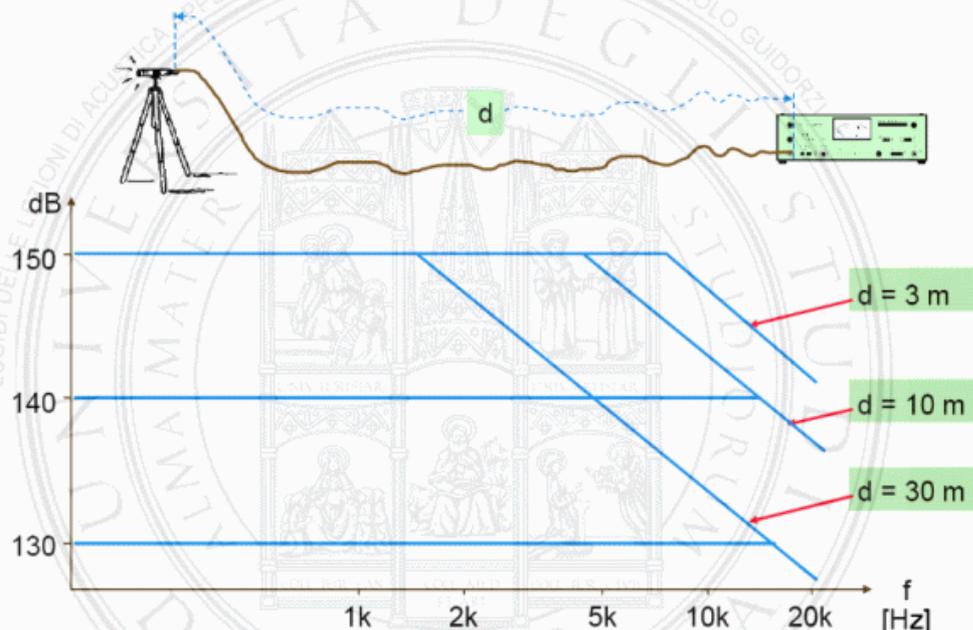


Il microfono deve resistere alle intemperie e all'umidità.

Il vento può indurre rumore al microfono, specie in bassa frequenza, in quanto muove il diaframma. In condizioni ventose bisogna quindi utilizzare la "pallina antivento", che riduce il fenomeno, anche se a volte non lo elimina completamente. L'effetto in bassa frequenza del vento è ulteriormente ridotto quando è attiva nel fonometro la ponderazione "A"

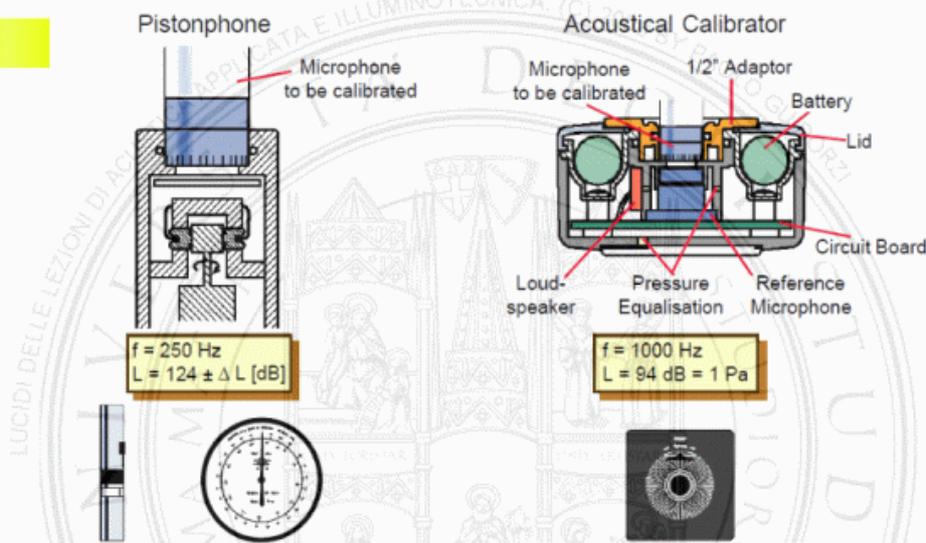
Image Courtesy of Brüel & Kjær

LUNGHEZZA DEI CAVI



L'utilizzo di cavi eccessivamente lunghi può portare a una degradazione della risposta in frequenza

Image Courtesy of Brüel & Kjær

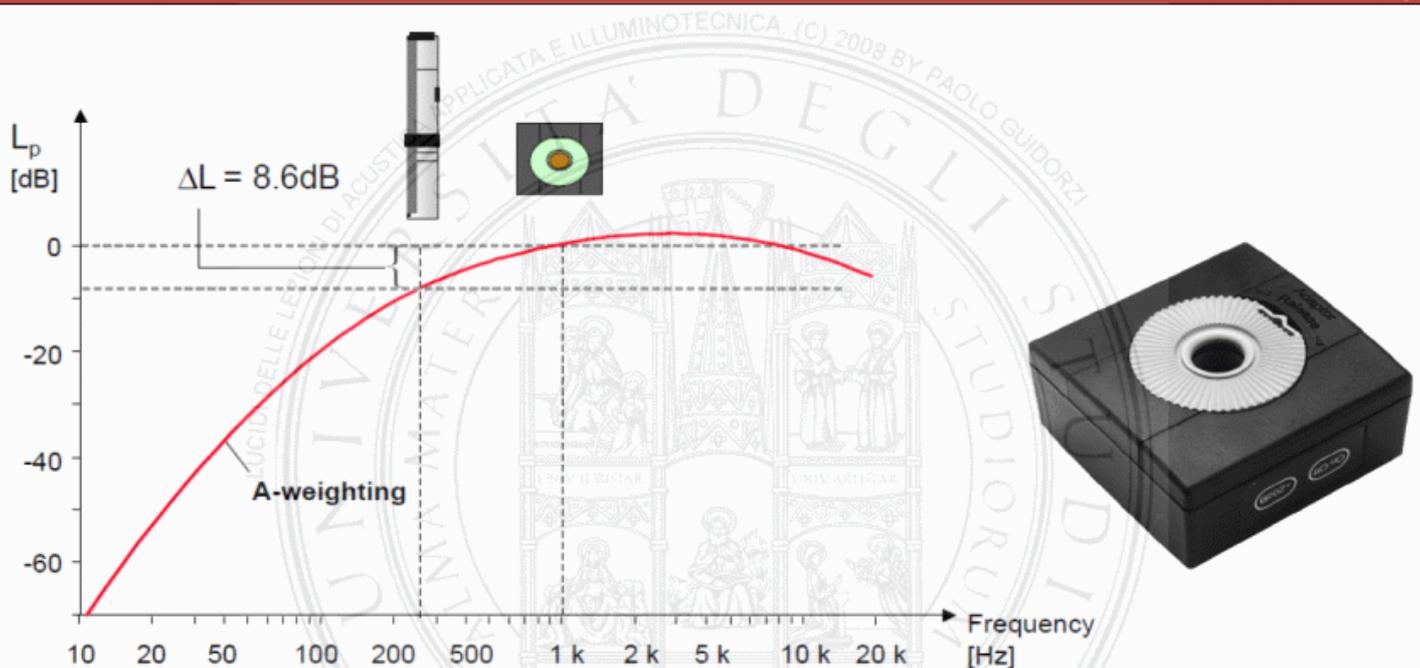
CALIBRAZIONE


La calibrazione si può effettuare in due modi:

- col **PISTONOFONO**, che genera un livello di pressione di 124 dB a 250 Hz utilizzando 2 piccoli pistoni azionati da un motore. Occorre effettuare una correzione dipendente dalla pressione statica
- col **CALIBRATORE ACUSTICO**, che genera un livello di pressione di 94 dB \cong 1 Pa a 1 kHz, utilizzando un piccolo altoparlante e un microfono di precisione in configurazione feedback.

In genere è più utilizzato il calibratore acustico.

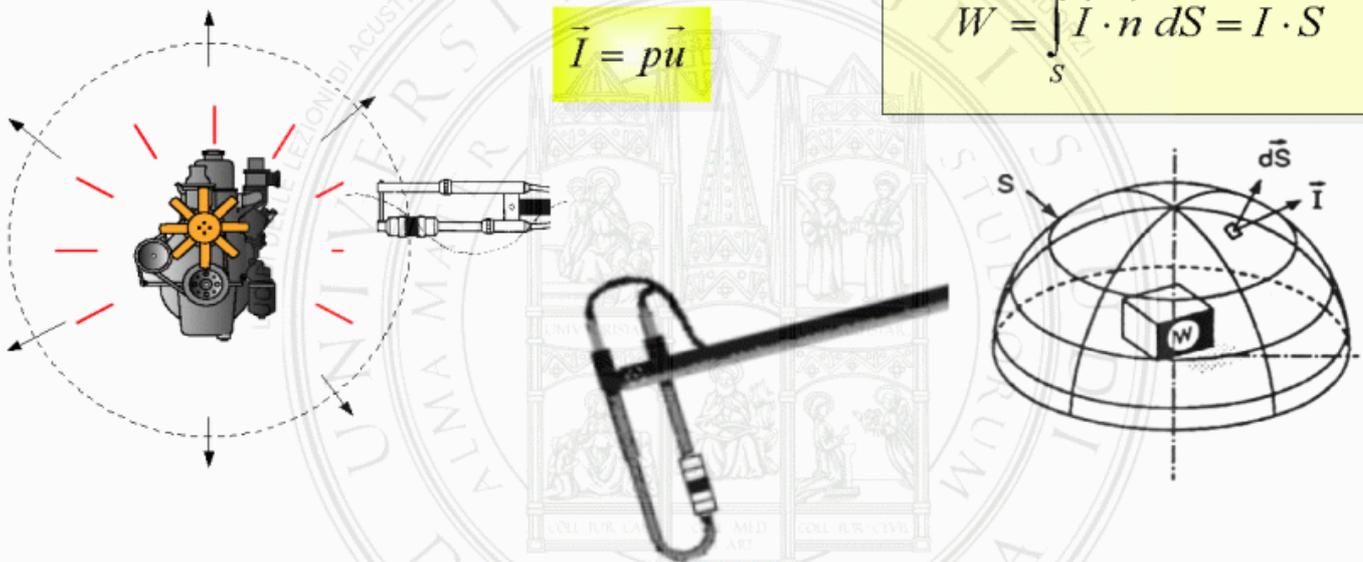
Image Courtesy of Brüel & Kjær



Quando si effettua la calibrazione bisogna disabilitare nel fonometro i filtri di ponderazione. Ciò è ininfluente quando si utilizza il calibratore poiché a 1 kHz i filtri di ponderazione sono normalizzati a 0 dB, ma a 250 Hz, utilizzando il pistonfono, si avrebbe un errore se il fonometro non è in modalità lineare.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

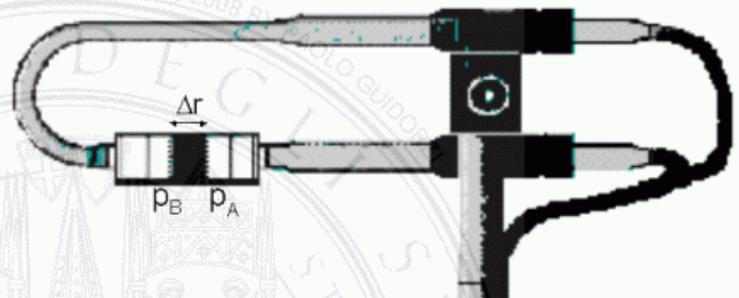
MISURA DELL'INTENSITA'



La misura dell'intensità (grandezza vettoriale) richiede l'utilizzo di una sonda formata da 2 microfoni molto vicini.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

$$\langle I_r \rangle = \overline{p(t) \cdot u_r(t)}$$



Newton

$$F = ma$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$u = \int \frac{F}{m} dt$$

Eulero

$$a = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$u = -\int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

$$u = -\int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$



$$u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt$$

$$p = \frac{p_A + p_B}{2}$$

$$I = p \cdot u$$

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho\Delta r} \int (p_B - p_A) dt$$

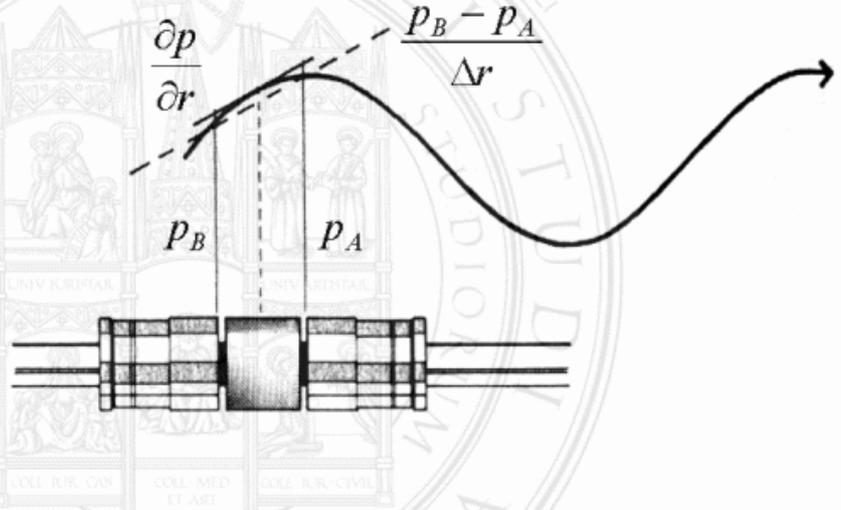
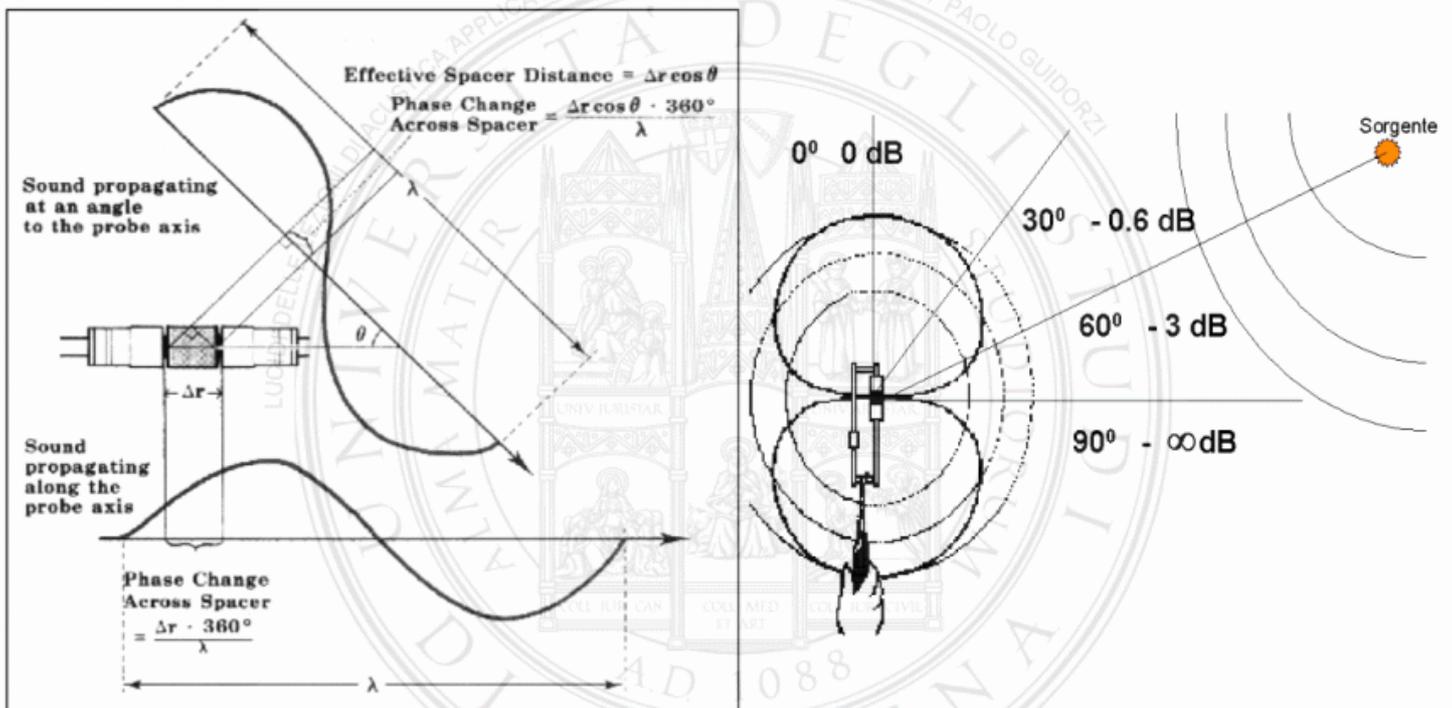
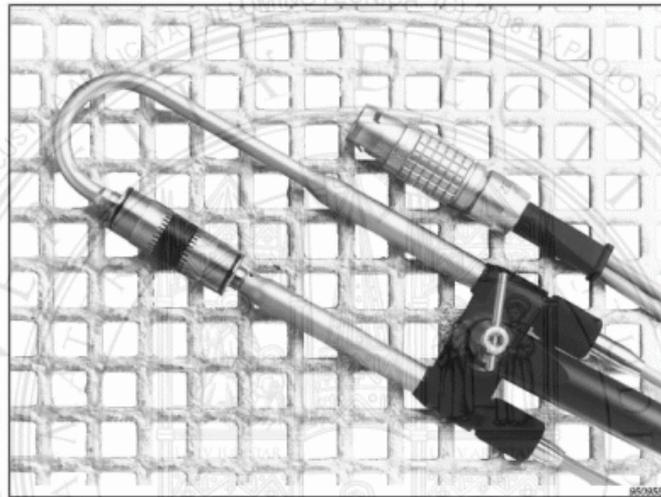


Image Courtesy of Brüel & Kjær



La sonda è direzionale. Si misura la componente dell'intensità in una certa direzione

Image Courtesy of Brüel & Kjær



La misura dell'intensità acustica richiede strumentazione molto precisa. Sono numerose le possibili cause di errore, in parte compensate da un'attenta calibrazione dello strumento di misura.

- errore dovuto all'approssimazione della differenza finita
- errore di disaccoppiamento di fase tra i due microfoni
- errore di misura

La calibrazione dello strumento per la misura intensimetrica è però piuttosto complicata

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Errore di Approssimazione della Differenza Finita

Precisione entro 1 dB:

Distanziale	Limiti
50 mm	fino a 1.25 kHz
12 mm	fino a 5 kHz
12 mm	fino a 10 kHz (*)

(*) con correzione della risonanza alle alte frequenze

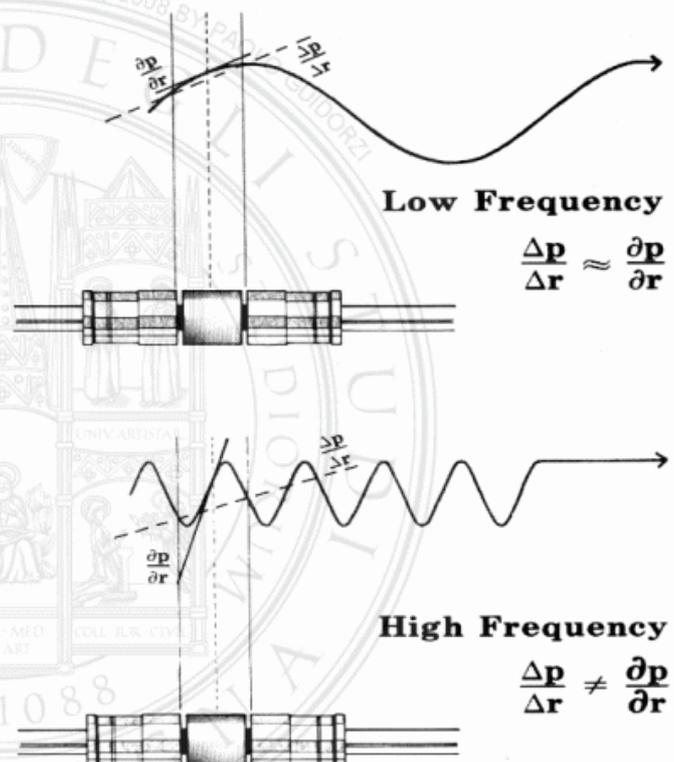


Image Courtesy of Brüel & Kjær

- **L'Intensità Sonora è proporzionale alla fase presente sul distanziale**
- Il disaccoppiamento di fase del sistema di misura (differenza tra le risposte in fase dei 2 microfoni, ad es. $\pm 0,3^\circ$) introduce un errore sul valore calcolato di Intensità Sonora

Free Field Phase Change Over Spacer Distance

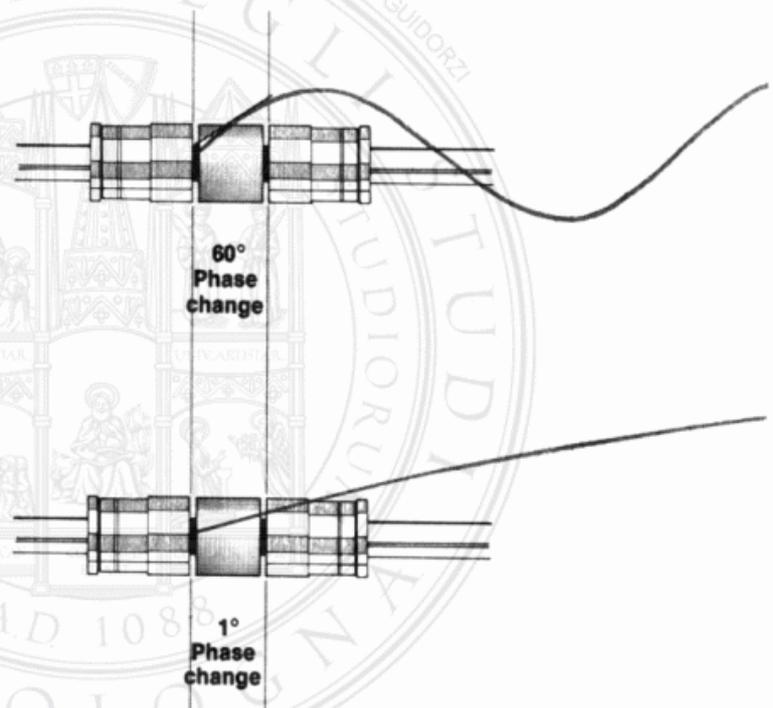
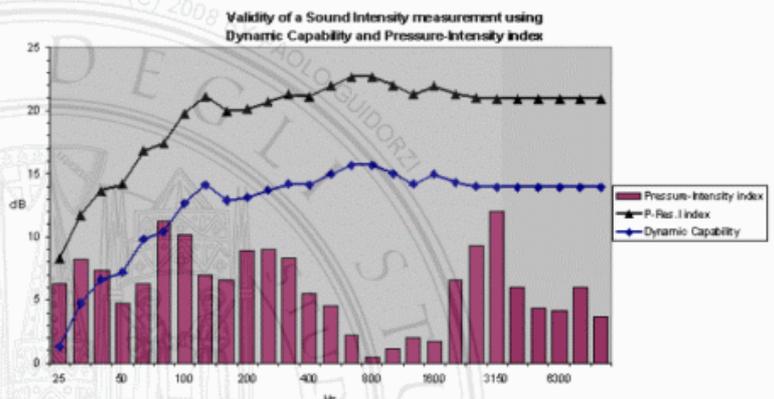


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Il disaccoppiamento di fase è molto più critico alle basse frequenze.



Una complicata procedura di calibrazione e verifica permette infine di effettuare la misura di intensità, tenendo conto dei limiti di dinamica dello strumento e di frequenza dovuti alla distanza tra i microfoni e alle differenze di risposta in fase degli stessi.

Va notato che la grandezza vettoriale intensità può avere componenti attive e reattive. La reattività del campo sonoro si descrive con l'indice pressione-intensità, definito dalla differenza tra livello di pressione e livello di intensità $L_p - L_i$.

In campo libero e per onde piane progressive si ha campo completamente attivo e quindi l'indice pressione-intensità tende a zero. Nel campo vicino a una sorgente e in ambienti riverberanti la reattività del campo acustico cresce (sfasamento tra u e p), e di conseguenza l'indice pressione-intensità cresce. Per misurare livelli di intensità con errore minore di 1 dB, questo indice deve essere minore di 10 dB in tutte le bande di interesse.

La definizione dell'indice pressione-intensità come differenza tra L_p e L_i in realtà non è del tutto corretta perché potrebbe essere negativa e questo è assurdo da un punto di vista fisico (avrei un campo che si propaga più velocemente di un'onda piana progressiva); si definisce quindi più correttamente l'indice pressione-intensità come la differenza tra il livello di un'altro descrittore acustico (la densità sonora) col livello di intensità.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Useful frequency range for an accuracy of 1 dB

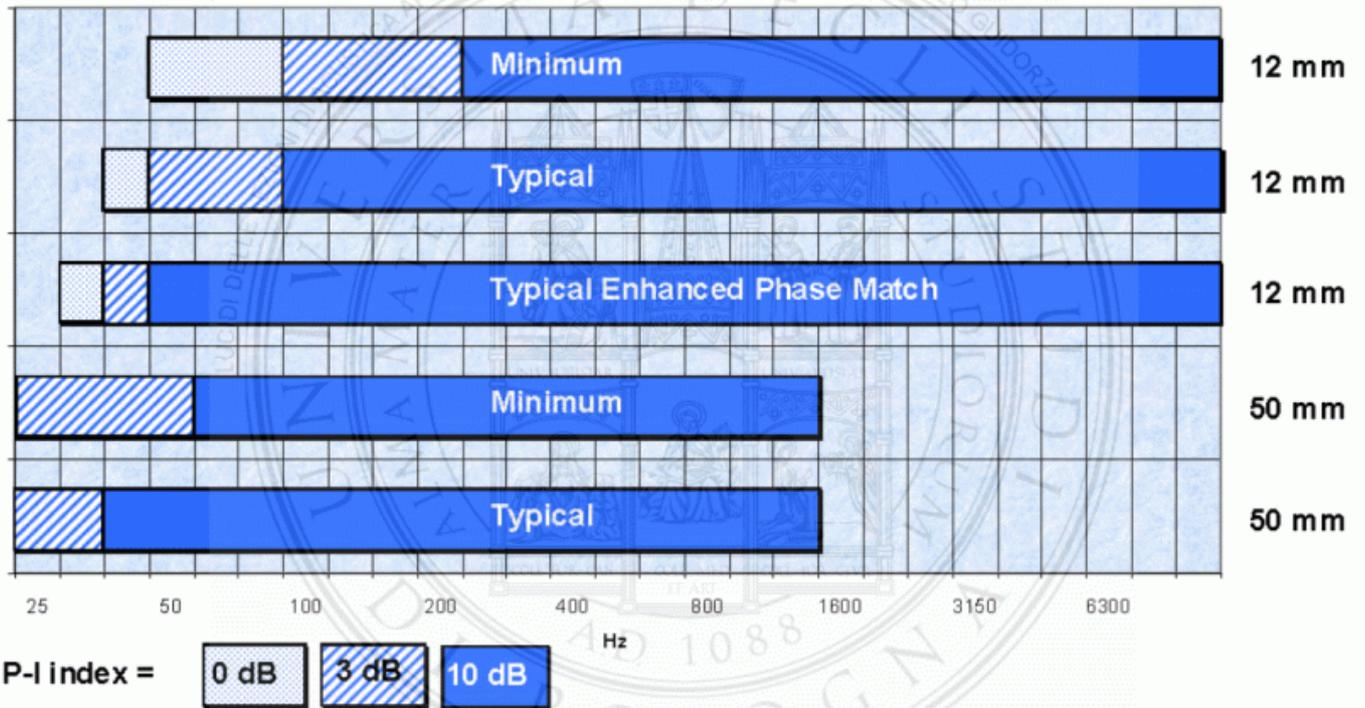
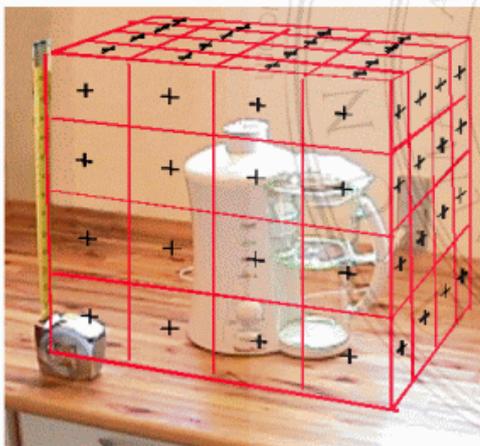
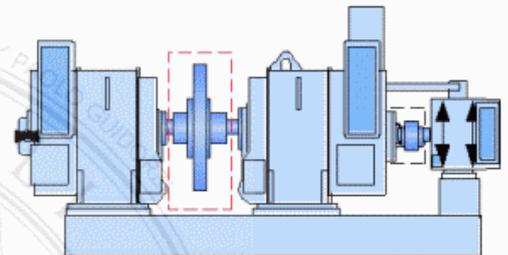


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Perché usare la tecnica intensimetrica ?

- Molto meno sensibile al rumore di fondo
- Offre contemporaneamente informazioni sulla direttività
- Consente la parzializzazione della sorgente sonora
- Con sorgenti complesse è in grado di disaccoppiare i vari elementi



Intensity (z)
Flow: Pos
Freq: 200-315Hz

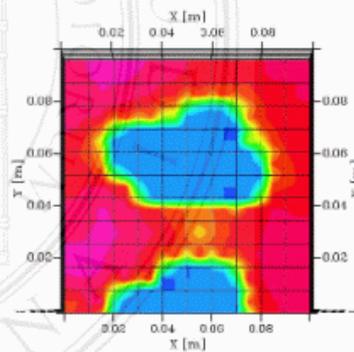
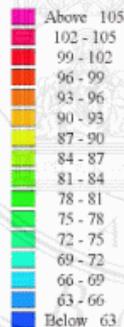


Image Courtesy of Brüel & Kjær

LA TRASFORMATA DI FOURIER

$$x(t) \xrightarrow{F} X(f)$$

$$X(f) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Trasformata **diretta**
Tempo \rightarrow Frequenza

$$X(f) \xrightarrow{F^{-1}} x(t)$$

$$x(t) = F^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{+j2\pi ft} df$$

Trasformata **inversa**
Frequenza \rightarrow Tempo

$$x(t) \xrightarrow{F} X(f)$$

$$x(t - t_0) \xrightarrow{F} X(f) e^{-jt_0 2\pi f}$$

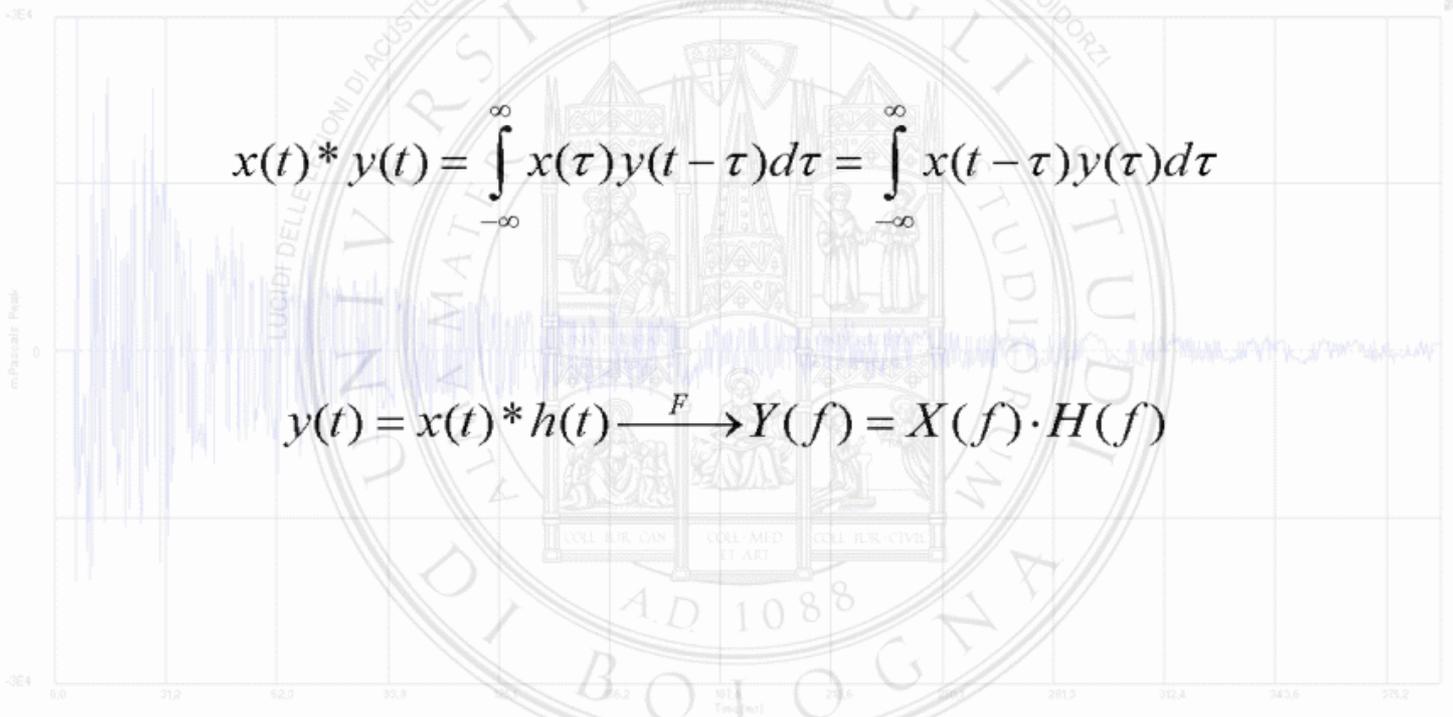
$$\dot{x}(t) \xrightarrow{F} j2\pi f \cdot X(f)$$

$$\int_{-\infty}^t x(t) \xrightarrow{F} \frac{1}{2\pi} \frac{X(f)}{jf}$$

PRODOTTO DI CONVOLUZIONE

$$x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) y(\tau) d\tau$$

$$y(t) = x(t) * h(t) \xrightarrow{F} Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$



LA DELTA DI DIRAC

$$D(t, \Delta) \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} \delta(t)$$

$$\delta(t) \xrightarrow{F} 1$$

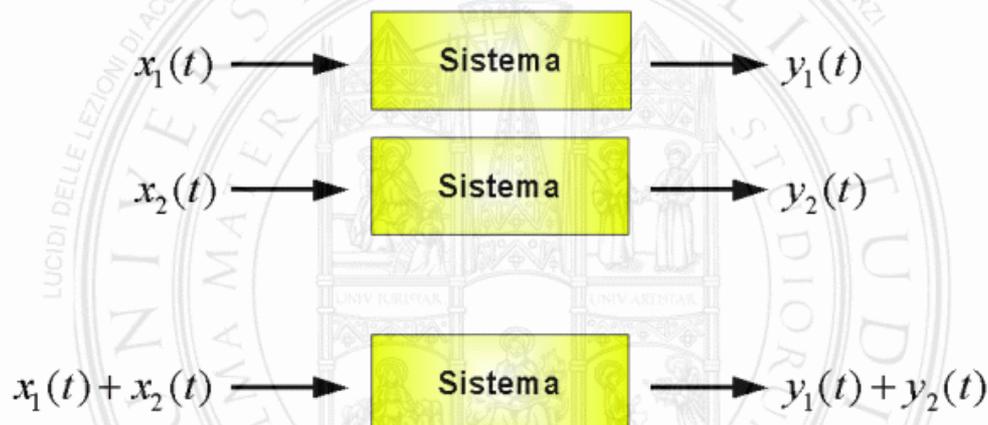
$$x(t) * \delta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau = x(t)$$

$$D(t, \Delta) \xrightarrow{F} \frac{\sin(\pi f \Delta)}{\pi f \Delta} e^{-j\pi f \Delta}$$

$$\frac{\sin(\pi f \Delta)}{\pi f \Delta} e^{-j\pi f \Delta} \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} 1$$

 $D(t, \Delta)$
 $\frac{1}{\Delta}$
 Δ
 $|F[D(t, \Delta)]|$
 $-\frac{1}{\Delta}$
 $\frac{1}{\Delta}$
 $\frac{2}{\Delta}$
 f

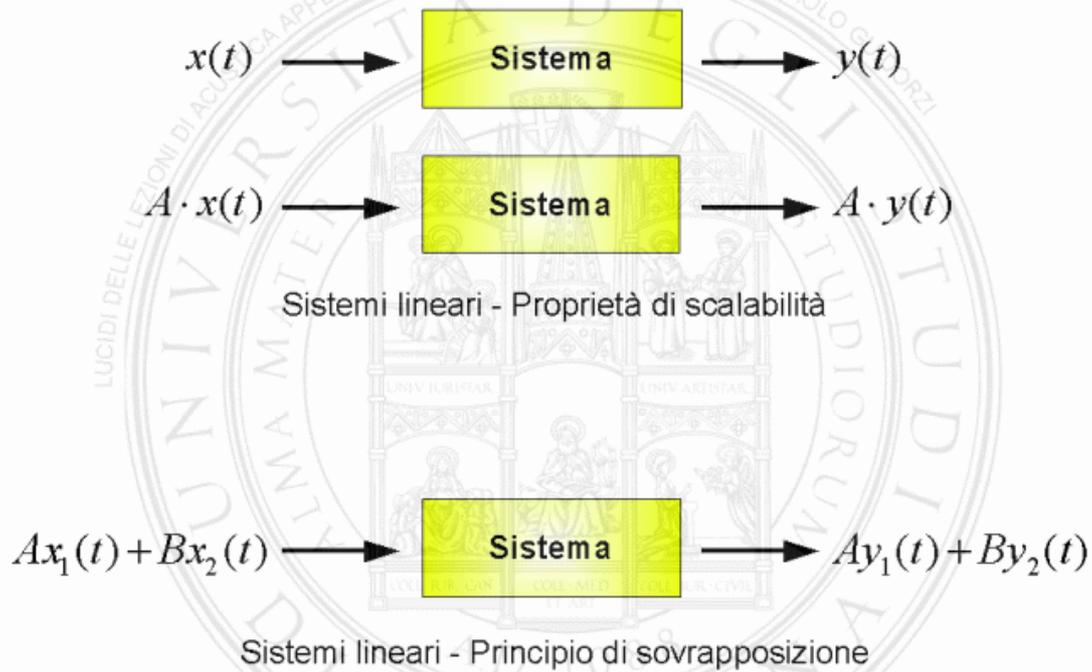
SISTEMI LINEARI-STAZIONARI



Sistemi lineari - Proprietà di additività

A.D. 1088

BOLOGNA



I sistemi lineari-stazionari (detti anche sistemi ideali) sono quelli per cui valgono le proprietà di linearità e stazionarietà.

RISPOSTA ALL'IMPULSO E RISPOSTA IN FREQUENZA

Siano $x(t)$ e $y(t)$ l'ingresso e l'uscita di un sistema ideale, e $X(f)$ e $Y(f)$ le loro rispettive trasformate di Fourier. Si definisce **risposta all'impulso** del sistema una funzione $h(t)$ tale che:

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

La risposta all'impulso $h(t)$ è la risposta del sistema ad una sollecitazione rappresentata dalla **delta di Dirac**. Un sistema lineare-stazionario può essere completamente caratterizzato mediante la sua risposta all'impulso, ovvero, nota $h(t)$, a partire da $x(t)$ è sempre possibile ottenere $y(t)$, per ogni valore di x .

Si definisce **risposta in frequenza** del sistema una funzione $H(f)$ tale che:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

Questo risultato deriva direttamente dalla definizione di prodotto di convoluzione.

Dunque risposta all'impulso e risposta in frequenza sono legate dalla trasformata di Fourier:

$$h(t) \xrightarrow{F} H(f)$$

La risposta in frequenza del sistema si può ottenere dal rapporto tra le trasformate dei 2 segnali:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

RISPOSTA ALL'IMPULSO E RISPOSTA IN FREQUENZA