Εργαστήριο Ηλεκτρακουστικής

Μέτρηση ακουστικής στάθμης

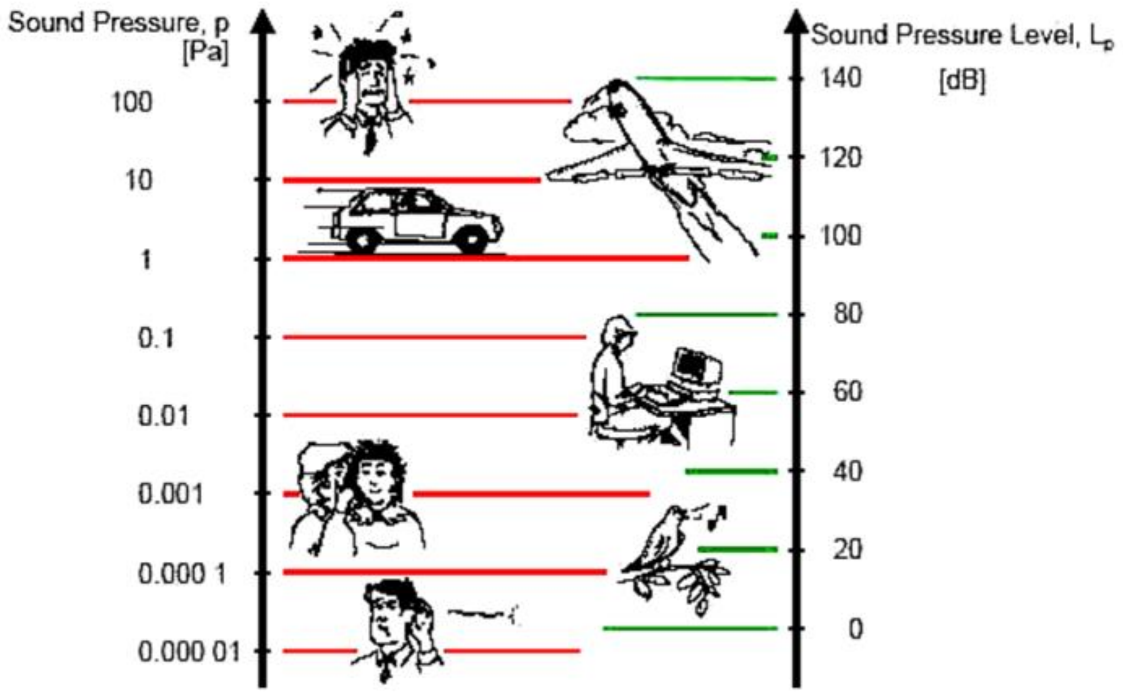
Ορισμός Ακουστότητας και Φυσικά Μεγέθη

- Ακουστότητα = Υποκειμενική αντίληψη έντασης ήχου.
- Σχέση ηχητικής έντασης με πίεση: $I = p^2 / (\rho c)$, για σφαιρικό μέτωπο κύματος.

Λογαριθμικές Κλίμακες

- Γιατί λογαριθμικές:
  - Weber-Fechner νόμος
  - Τεράστιο εύρος τιμών πίεσης και έντασης
- Στάθμη dB: 10 log ή 20 log

Παραδείγματα τιμών ηχητικής στάθμης πίεσης:



Παραδείγματα θορύβων σε τιμές πίεσης και στάθμης πίεσης

Typical sound levels in the environment

Example sound	dB(SPL)	Description
Long range gunfire at gunner's ear	140	
Threshold of pain	130	Ouch!
Jet take-off at approximately 100 m	120	
Peak levels on a night club dance floor	110	
Loud shout at 1 m	100	Very noisy
Heavy truck at about 10 m	90	
Heavy car traffic at about 10 m	80	
Car interior	70	Noisy
Normal conversation at 1 m	60	
Office noise level	50	
Living room in a quiet area	40	Quiet
Bedroom at night time	30	
Empty concert hall	20	
Gentle breeze through leaves	10	Just audible
Threshold of hearing for a child	0	

Παραδείγματα θορύβων σε τιμές πίεσης και στάθμης πίεσης

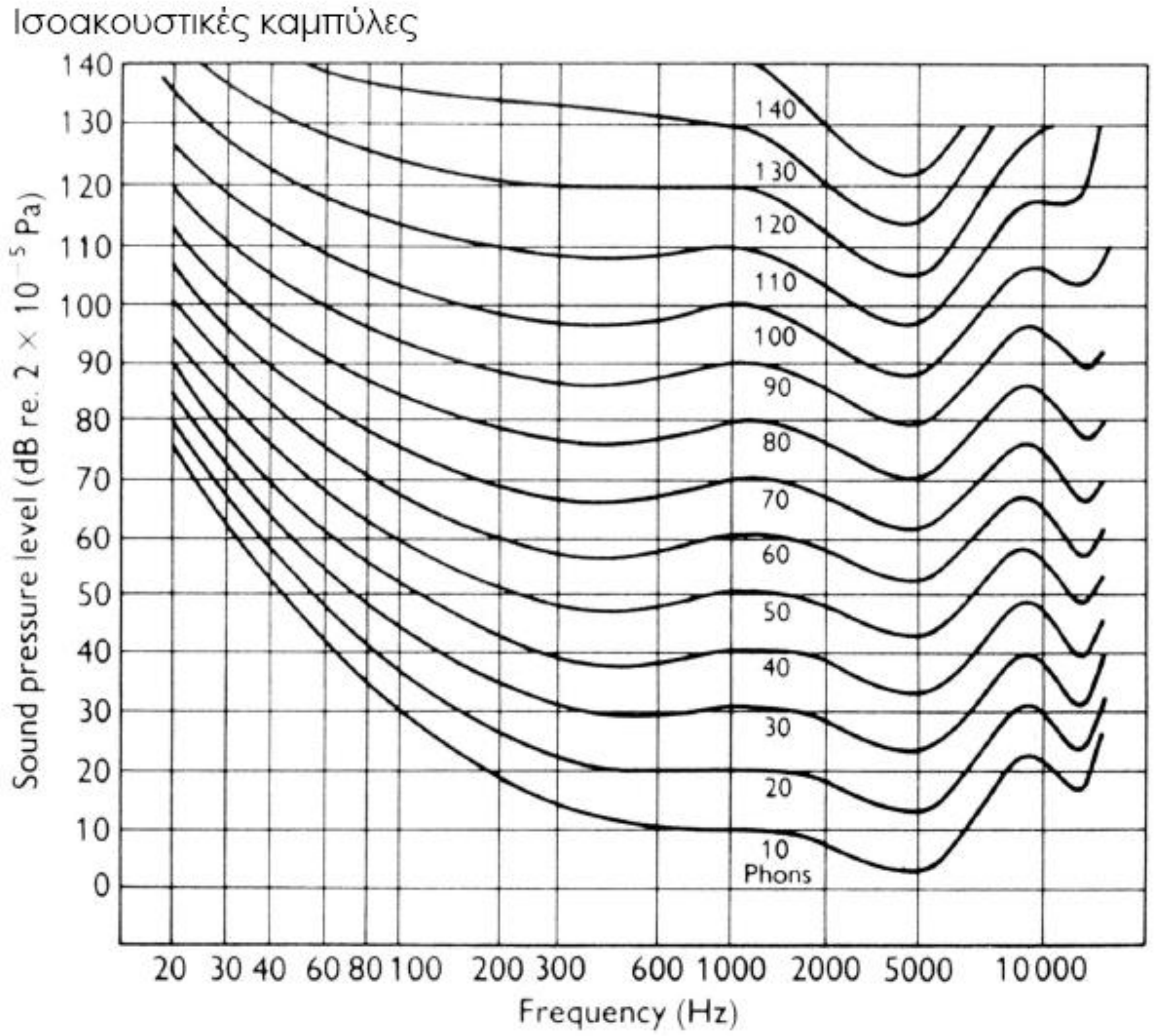
Φυσικά μεγέθη και οι στάθμες τους

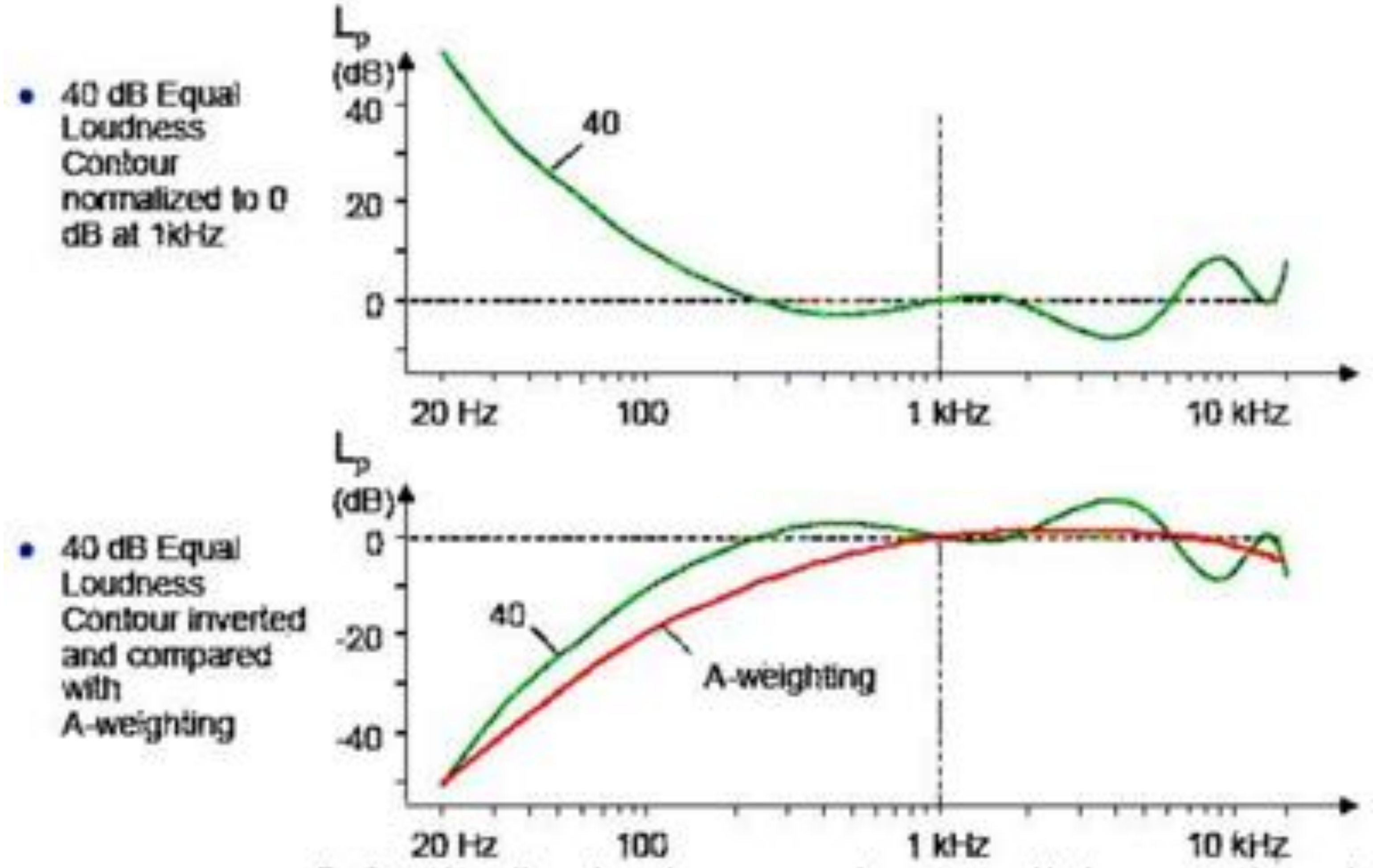
	Στάθμη έντασης	Στάθμη πίεσης	Στάθμη ισχύος
Σύμβολο	SIL ή L_I	SPL ή L_P	SWL ή L_W
Σχέση	$\boxed{L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}}$	$\boxed{L_P = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{ref}}}$	$\boxed{L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}}}$
Μονάδες	$[L_I] = dB$ $[I] = Watt/m^2$	$[L_P] = dB$ $[p] = Pa = Watt/m^2$	$[L_W] = dB$ $[W] = Watt$
Τιμή αναφοράς/ κατώφλι ακουστότητας	$I_{ref} = 10^{-12}\, Watt/m^2$	$p_{ref} = 20\mu Pa = 2 \cdot 10^{-5}\, N/m^2$	$W_{ref} = 10^{-12} Watt$
Όριο πόνου	$I_{max} = 10\, Watt/m^2$	$p_{max} = 63 Pa = 63 N/m^2$	
Στάθμη κατωφλίου ακουστότητας	$L_I = 0 dB$	$L_p = 0 dB$	$L_W = 0 dB$
Στάθμη όριου πόνου	$L_I = 130 dB$	$L_p = 130 dB$	

Συνοπτικός πίνακας φυσικών μεγεθών και αντίστοιχων στάθμεων

Καμπύλες Fletcher - Munson

- Δείχνουν πώς αντιλαμβανόμαστε ήχους ίσης ακουστότητας σε διάφορες συχνότητες.
- Το αυτί πιο ευαίσθητο στα 3–4 kHz, λιγότερο στις χαμηλές.

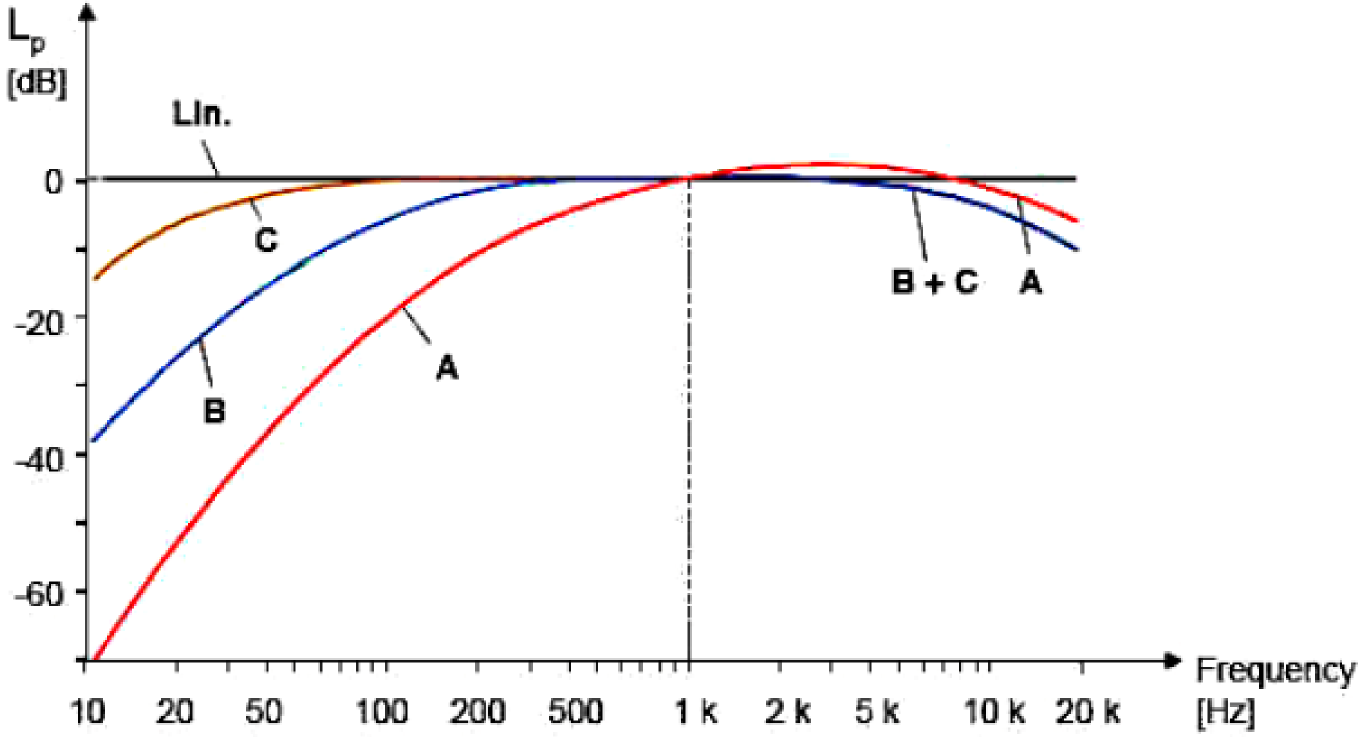




Σταθμισμένο φίλτρο A – σύγκριση με αντίστοιχη καμπύλη ίσης ακουστότητας A

Προσέγγιση της Υποκειμενικής Αίσθησης της Ακουστότητας με τη Χρήση Σταθμισμένων φίλτρων

Σταθμισμένα φίλτρα (Frequency-Weightings)



- Προσαρμόζουν την μέτρηση για να αντιστοιχεί στην ανθρώπινη ακοή.

  - A: για χαμηλές στάθμες
  - B: για μεσαίες
  - C: για υψηλές

- Σημείωση: Όλες οι καμπύλες τέμνονται στο 1 kHz

Σταθμισμένα φίλτρα A, B και C

Συχνότητα (Hz)	Συνάρτηση A	Συνάρτηση B	Συνάρτηση C
10	–70.4		
12.5	–63.4		
16	–56.7		
20	–50.5		
25	–44.7	–20.4	–4.4
31.5	–39.4	–17.1	–3
40	–34.6	–14.2	–2
50	–30.2	–11.6	–1.3
63	–26.2	–9.3	–0.8
80	–22.5	–7.4	–0.5
100	–19.1	–5.6	–0.3
125	–16.1	–4.2	–0.2
160	–13.4	–3	–0.1
200	–10.9	–2	0
250	–8.9	–1.3	0
315	–6.6	–0.8	0
400	–4.8	–0.5	0
500	–3.2	–0.3	0
630	–1.9	–0.1	0
800	–0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	0.6	0	0
1600	1	0	–0.1
2000	1.2	–0.1	–0.2
2500	1.3	–0.2	–0.3
3150	1.2	–0.4	–0.5
4000	1	–0.7	–0.8
5000	0.5	–1.2	–1.3
6300	–0.1	–1.9	–2
8000	–1.1	–2.9	–3
10000	–2.5	–4.3	–4.4
12500	–4.3	–6.1	–6.2
16000	–6.6	–8.4	–8.5
20000	–9.3	–11.1	–11.2

Τιμές συναρτήσεων βάρους A, B και C

Επιλογή φίλτρων

Ηχοστάθμη	Τιμές ηχοστάθμης	Καμπύλη ίσης ακουστότητας	Χρήση φίλτρου
Χαμηλή	20 – 55 dB	40 dB	A
Μεσαία	55- 85 dB	70 dB	B
Υψηλή	85 – 140 dB	100 dB	C

(1) Η διαφορά των τριών φίλτρων είναι ότι το A αφαιρεί μεγάλο μέρος της ηχητικής ενέργειας των χαμηλών συχνοτήτων, το B αφαιρεί λιγότερο και το C σχεδόν καθόλου (είναι γραμμικό για 200 – 1250 Hz).
(2) Παρατηρούμε ότι και οι τρεις καμπύλες συμπίπτουν στο 1 kHz , που σημαίνει ότι οι τιμές και των τριών σταθμισμένων στάθμεων θα είναι ίδιες.
(3) Παρά το γεγονός ότι η στάθμιση με φίλτρο A είναι η καταλληλότερη για χαμηλές στάθμες, συχνά γίνεται χρήση του για οποιαδήποτε ηχοστάθμη, έτσι ώστε όλες οι μετρήσεις να λαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο.

Σταθερές ολοκλήρωσης (time constants)

- Time Weighting: Fast (F) & Slow (S) Time Weightings

  Και οι δύο επιβραδύνουν την αντίδραση της εμφανιζόμενης τιμή στάθμης σε μια ξαφνική αλλαγή της ηχοστάθμης.

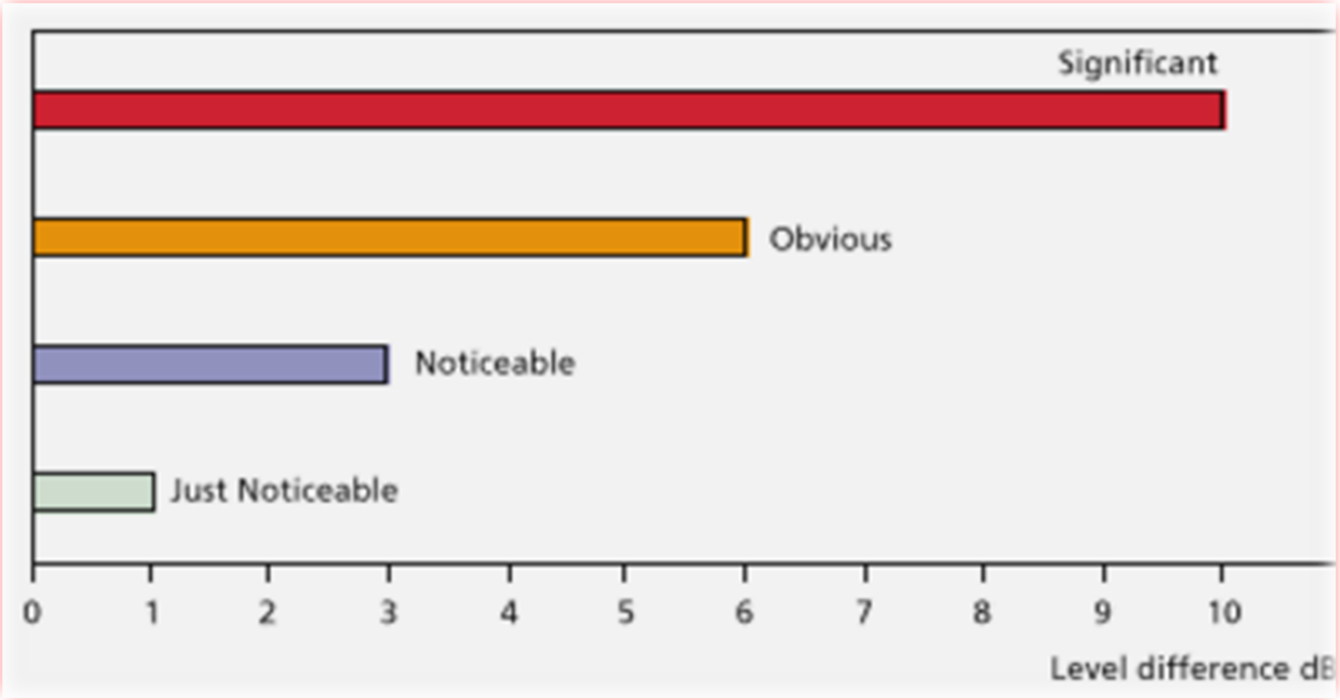
- Για την 'F' (T = 125 ms), για την 'S' (T = 1 s)

Η Fast απόκριση δίνει σταθερή ανάγνωση όταν ο μετρούμενος ήχος είναι σταθερός. Αν όμως η στάθμη του ήχου κυμαίνεται, ο μετρητής προσπαθεί να ακολουθήσει τις διακυμάνσεις αυτές. Η απόκριση Fast χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, όταν διαπιστώνεται η μέγιστη στάθμη θορύβου που παράγεται από ένα μηχανοκίνητο όχημα π.χ. σε ένα test – drive.

Η απόκριση Slow προσπαθεί να σταθεροποιήσει τις ενδείξεις όταν ο θόρυβος έχει κυμαινόμενο χαρακτήρα.

- Υπάρχει και η Impulse Time Weighting (T = 35 ms)

Πόσο είναι αντιληπτές οι διαφορές στάθμης



Πόσο πρέπει να αλλάξει η ένταση για να γίνει αντιληπτή;

1 dB: μη αντιληπτή

3 dB: μόλις αντιληπτή

10 dB: 2 φορές δυνατότερος

Equivalent Continuous Sound Level (Leq, LAeq,T) και Sound Exposure Level (SEL, LAE)

$$L_{eq} = 10 \log\left(\frac{1}{T}\int_{o}^{T} \frac{p^2(t)}{p_o^2}\, dt\right)$$

T = measurement duration

p(t) = sound pressure

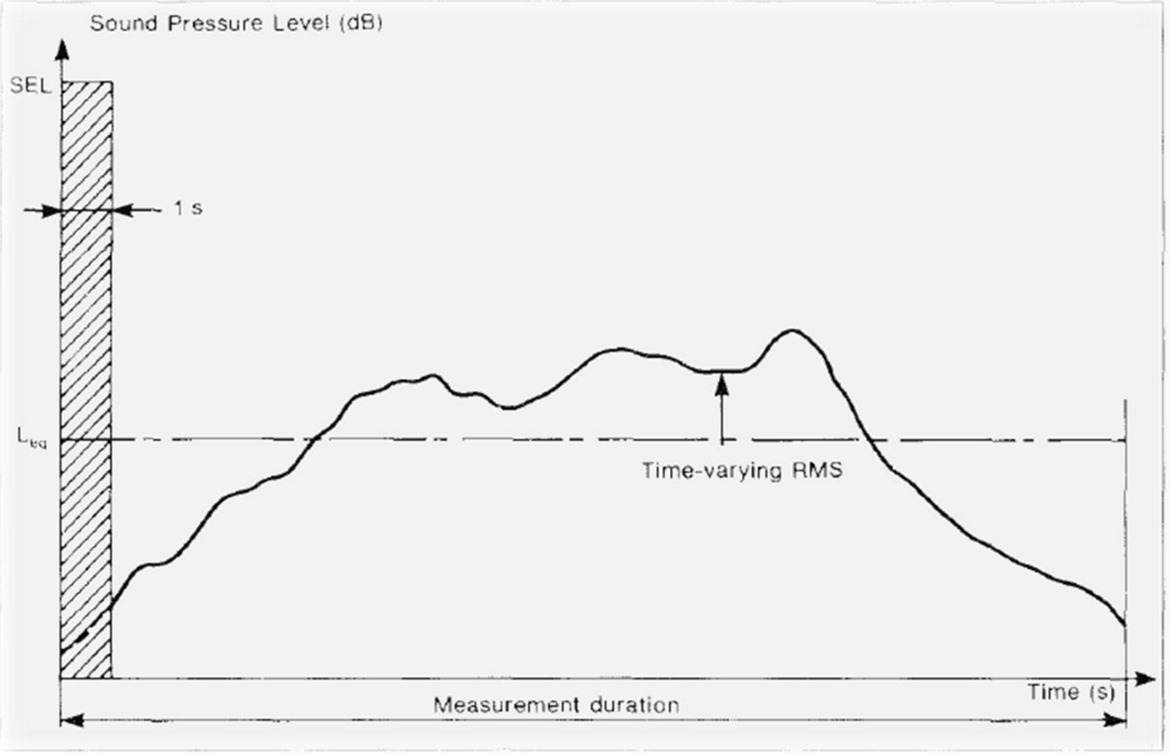
p_o = reference sound pressure of 20 μPa

$$SEL = 10 \log\left(\frac{1}{T_o}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p^2(t)}{p_o^2}\, dt\right)$$

T_o = reference duration of 1 s

p(t) = sound pressure

p_o = reference sound pressure of 20 μPa



Είναι εκείνη η ηχοστάθμη ενός σταθερού θορύβου που για το χρονικό διάστημα της μέτρησης παρέχει τόση σταθμισμένη ηχητική ενέργεια όση και ο μεταβαλλόμενος πραγματικός θόρυβος.

Δηλαδή στο διάγραμμα (8) θα πρέπει η επιφάνεια που περικλείεται ανάμεσα στη οριζόντια γραμμή ενός υποτιθέμενου ήχου σταθερής έντασης και του άξονα του χρόνου για το χρονικό διάστημα T να είναι ίση με την επιφάνεια που περικλείεται ανάμεσα στη γραφική παράσταση του μεταβλητού θορύβου και του άξονα του χρόνου για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Στα *διακριτά* μαθηματικά χωρίζουμε τον άξονα των x σε μικρά κομμάτια και υπολογίζουμε τη συνολική επιφάνεια από το άθροισμα της επιφάνειας των μικρών ράβδων που σχηματίζονται με την κυματομορφή, δηλαδή:

$$\boxed{L_{eq(A)} = 10 \cdot \log\left(\frac{t_1 \cdot 10^{L_1/10} + t_2 \cdot 10^{L_2/10} + t_3 \cdot 10^{L_3/10} + \ldots + t_n \cdot 10^{L_n/10}}{T}\right)}, \text{ όπου } T = t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_n$$

(Ο χρόνος μπορεί να δοθεί σε οποιεσδήποτε μονάδες, εφόσον οι μονάδες του απαλείφονται μέσα στο λογάριθμο).

Αντίστοιχα, μπορούμε να εκφράσουμε το παραπάνω με ένα ολοκλήρωμα:

$$L_{eq(A)} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T}\int_0^T 10^{L(t)/10} \cdot dt\right), \text{ όπου } T = t_b - t_a$$

Προσοχή:

Δίπλα στην τιμή του L_{eq} αναγράφουμε πάντα το αντίστοιχο χρονικό διάστημα T για το οποίο μετρήθηκε.

Παράδειγμα 1

Προσδιορίστε την συνολική Α-σταθμισμένη ηχοστάθμη απο το σύνολο των παρακάτω στάθμεων ηχητικής πίεσης ζωνών οκτάβας.

Band center frequency (Hz)	*Sound pressure level (dB)*
31.5	74
63	66
125	71
250	61
500	60
1,000	75
2,000	82
4,000	80
8,000	87
16,000	90

Λύση (1)

74 dB at 31.5 Hz = 74 − 39.4 = 34.6 dBA

66 dB at 63 Hz = 66 − 26.2 = 39.8 dBA

71 dB at 125 Hz = 71 − 16.1 = 54.9 dBA

61 dB at 250 Hz = 61 − 8.6 = 52.4 dBA

60 dB at 500 Hz = 60 − 3.2 = 56.8 dBA

75 dB at 1000 Hz = 75 + 0 = 75.0 dBA

82 dB at 2000 Hz = 82 + 1.2 = 83.2 dBA

80 dB at 4000 Hz = 80 + 1.0 = 81.0 dBA

87 dB at 8000 Hz = 87 − 1.1 = 85.9 dBA

90 dB at 16,000 Hz = 90 − 6.6 = 83.4 dBA

Band center frequency (Hz)	*Sound pressure level (dB)*
31.5	74
63	66
125	71
250	61
500	60
1,000	75
2,000	82
4,000	80
8,000	87
16,000	90

Λύση (1)

$$L_t = 10 \log \left(\sum_{i=1}^{n} 10^{L_i/10} \right) \quad \text{dBA}$$

$$L_t = 10 \log (10^{34.6/10} + 10^{39.8/10} + 10^{54.9/10} + 10^{52.4/10} + 10^{56.8/10}$$
$$+ 10^{75/10} + 10^{83.2/10} + 10^{81.0/10} + 10^{85.9/10} + 10^{83.4/10}) \quad \text{dBA}$$
$$= 89.9 \text{ dBA}$$

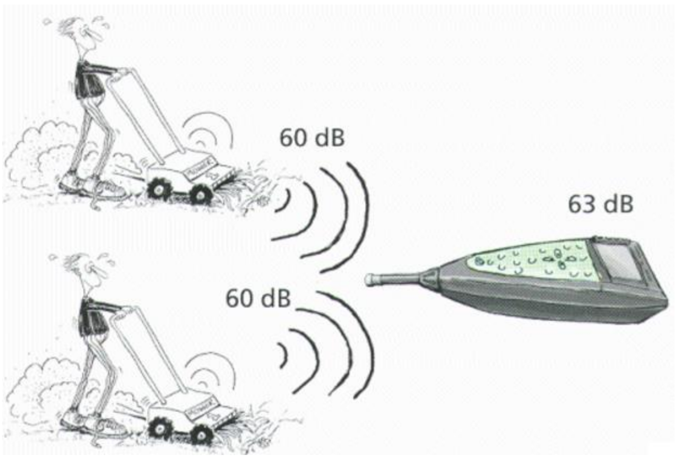
Μέτρηση του ήχου

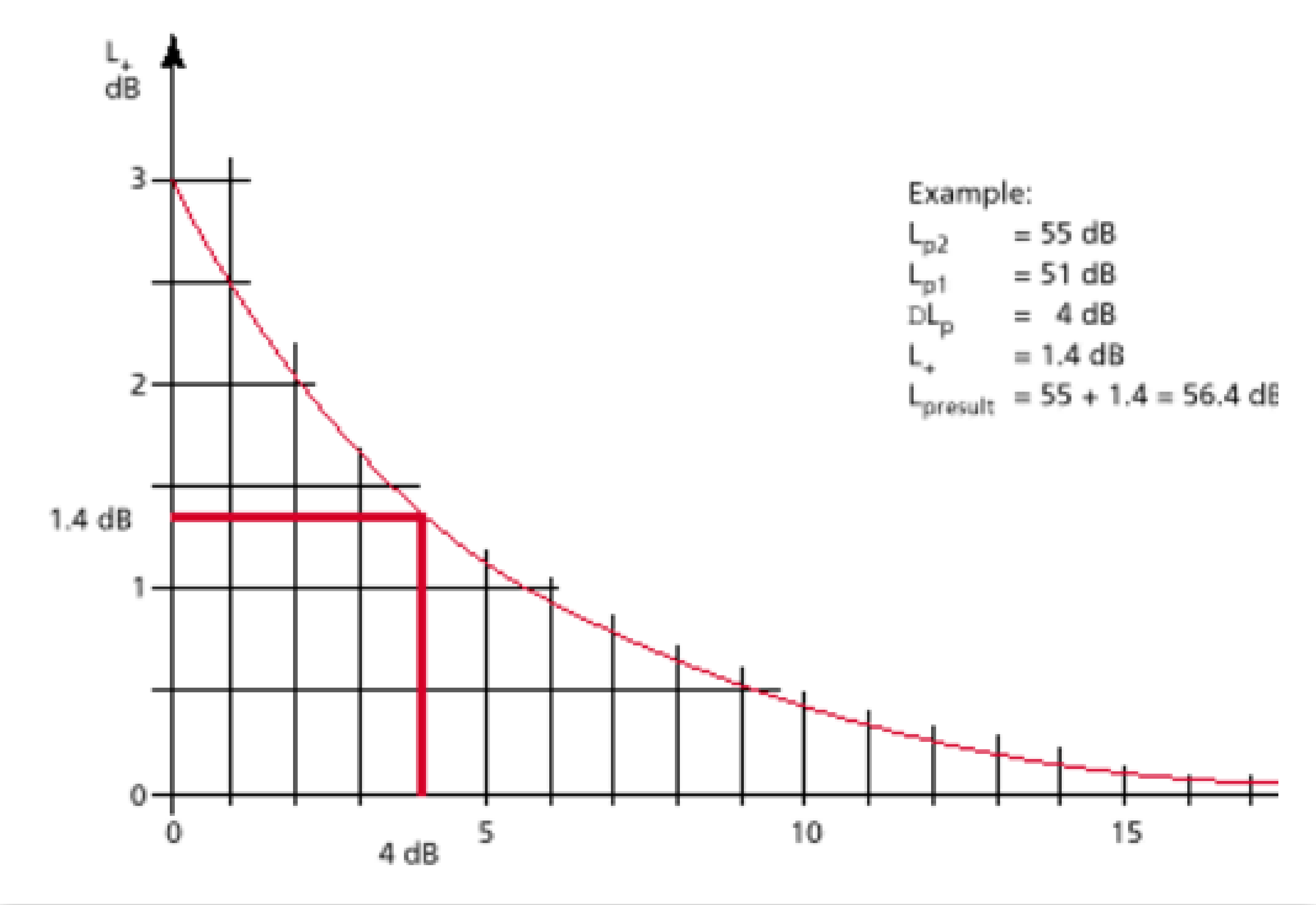
- Μας ενδιαφέρουν οι μέσες τιμές
- Μας ενδιαφέρουν οι (μέσες) τετραγωνικές τιμές
- Άρα για την μέτρηση του ήχου, χρησιμοποιούμε το τετράγωνο της ενεργού (rms) τιμής της πίεσης, η οποία ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)\,dt}$$

Προσθέτοντας ηχητικές στάθμες (μη συσχετισμένων πηγών)

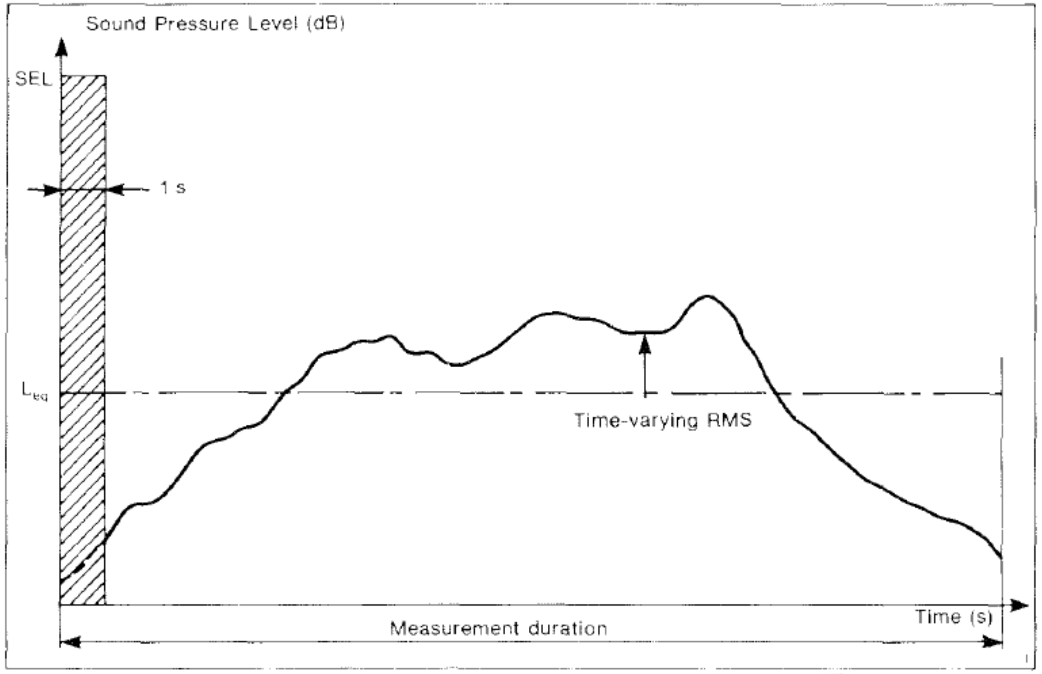
$$L = 10 \cdot \log\left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + 10^{\frac{L_{p3}}{10}} + \ldots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}}\right)$$





Μια «ευκολότερη» μέθοδος

LAeq,T: Ορισμοί



$$L_{eq} = 10 \log\left(\frac{1}{T}\int_{o}^{T} \frac{p^2(t)}{p_o^2}\, dt\right)$$

T = measurement duration

p(t) = sound pressure

p_o = reference sound pressure of 20 μPa

$$L_{Aeq,T} = 10\log[(t_1\times 10^{L_1/10} + t_2\times 10^{L_2/10} + t_3\times 10^{L_3/10} + \ldots\ldots\ T_N\times 10^{L_N/10})/T]$$

Where t_1 is the time at noise level L_1 dB(A)
t_2 is the time at noise level L_2 dB(A)
t_3 is the time at noise level L_3 dB(A), etc
and T is the time over which the value is required.

Calculate the continuous equivalent sound level, $L_{Aeq,8h}$, over an eight hour working day, for an employee exposed to the following pattern of noise levels and exposure times:

94 dB(A) for 3 hours
89 dB(A) for 2 hours
98 dB(A) for 0.5 hours
83 dB(A) for 2.5 hours

Solution

$$L_{Aeq,T} = 10\log[(t_1 10^{L_1/10} + t_2 10^{L_2/10} + t_3 10^{L_3/10} + \ldots\ldots\ T_N 10^{L_N/10})/T]$$

$$= 10\log[(3\times10^{9.4} + 2\times10^{8.9} + 0.5\times10^{9.8} + 2.5\times10^{8.3})/8]$$

$$= 92.034 = 92\ \text{dB}$$

Παράδειγμα 2

Noise from a building site is caused by five items of plant. The periods of operation of each item of plant during the working day and the noise level each produces at a noise sensitive property at the boundary of the site are shown below. Calculate the equivalent continuous noise level over a 12 hour working day.

Compressor	83 dB(A) operating for 5 h
Excavator	85 dB(A) operating for 2 h
Dumper truck	76 dB(A) operating for 6 h
Pump	75 dB(A) operating for 7 h
Pile-driver	88 dB(A) operating for 1.5 h

Solution $L_{Aeq,\,12h} = 10\log[(t_1\times10^{L_1/10} + t_2\times10^{L_2/10} + t_3\times10^{L_3/10} + \ldots\ldots\; T_N\times10^{L_N/10})/T]$

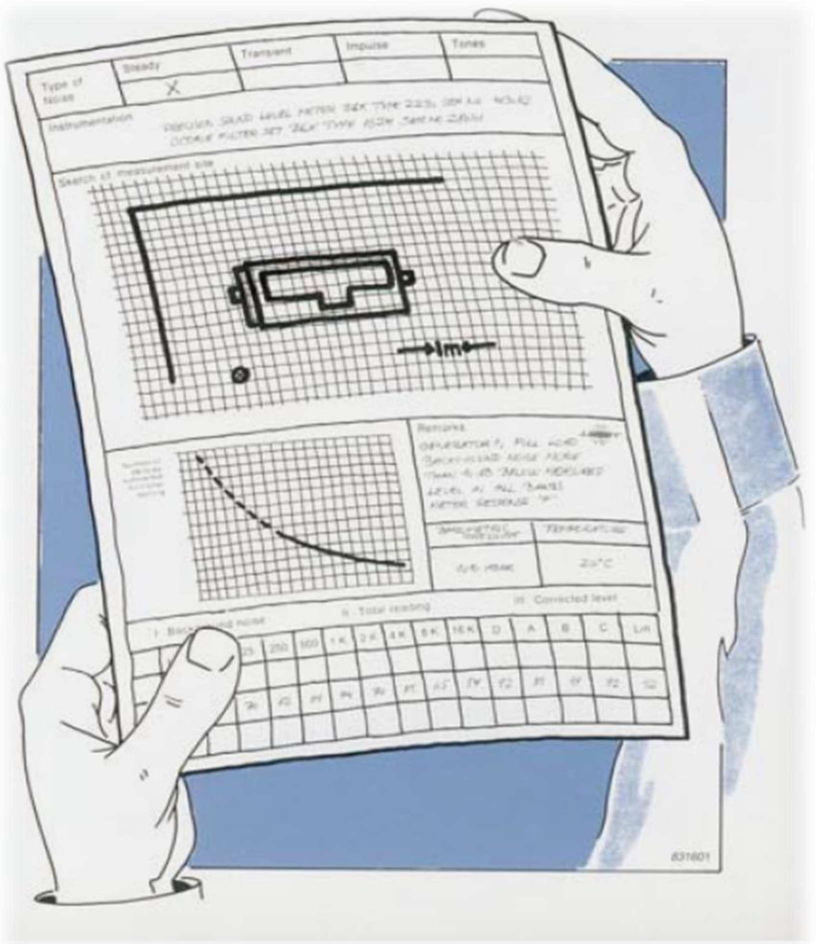
$= 10\log[(5\times10^{8.3} + 2\times10^{8.5} + 6\times10^{7.6} + 7\times10^{7.5} + 1.5\times10^{8.8})/12]$

$= 84.032$

= 84.0 dB (to the nearest 0.5 dB)

Παράδειγμα 3

Φύλλο μετρήσεων & τρόπος μέτρησης



Θα πρέπει να περιέχονται τουλάχιστον τα παρακάτω δεδομένα…

The Measurement Report

1. A sketch of the measurement site showing applicable dimensions (e.g. size of room, machine dimensions), the location of the microphone and object being measured.
2. Standard(s) to which measurements are made.
3. Type and serial number of instruments used.
4. Method of calibration.
5. Weighting networks and detector responses used.
6. Description of type of sound (e.g. impulsive, continuous, tones etc.)
7. Background noise level.
8. Environmental conditions (e.g. type of sound field, atmospheric conditions).
9. Data on object being measured (e.g. machine type, load, speed etc.)
10. Date when measurements were performed.

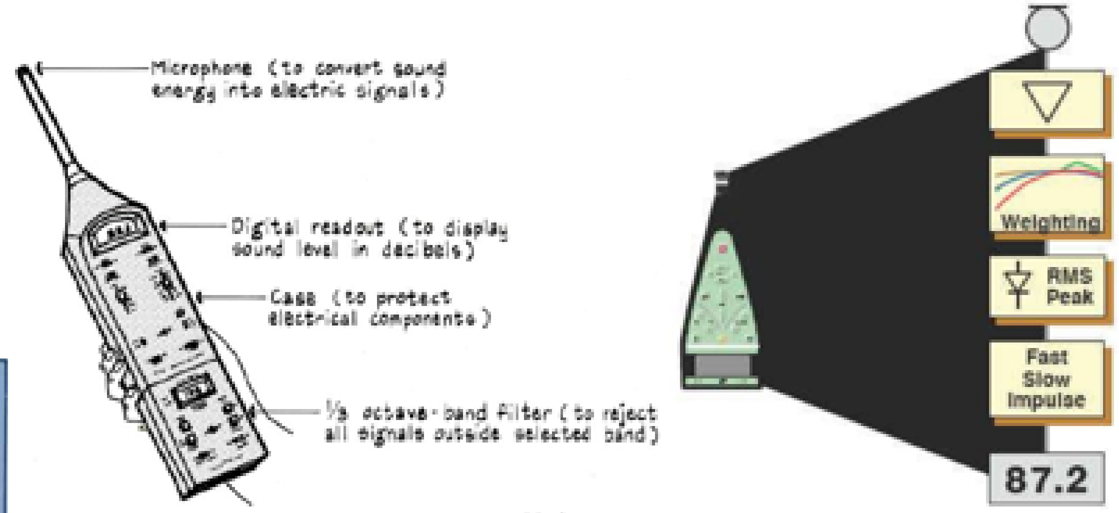
With a carefully written report, future comparisons will be more accurate and reliable.

Ηχόμετρο

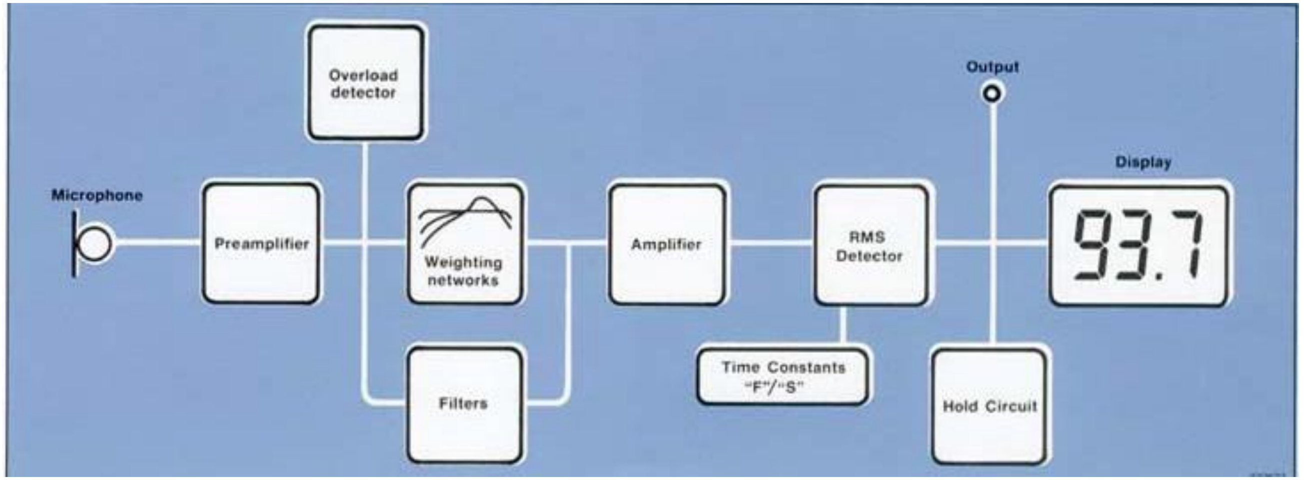
Στο εργαστήριο θα χρησιμοποιήσουμε ένα φορητό ηχόμετρο. Τα ηχόμετρα αποτελούνται από τα εξής: *Μικρόφωνο, κύκλωμα ενίσχυσης, σταθμιστικά φίλτρα, ολοκληρωτής (για τον υπολογισμό του Leq και των στατιστικών δεικτών, βλ. παρακάτω), επεξεργαστής (για φασματική ανάλυση, υπολογισμό παραμέτρων ψυχοακουστικής – ακουστικής χώρου κλπ.) και όργανο ένδειξης:*

μικρόφωνο → Κύκλωμα ενίσχυσης → φίλτρα → επεξεργαστής → Όργανο ένδειξης

Τα ηχόμετρα με τη βοήθεια του μικροφώνου ουσιαστικά μετρούν μεταβολές στις *τιμές της ενεργού πίεσης*, p_{rms}, στη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος (βλέπε 'σταθερές ολοκλήρωσης'). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια ενισχύεται εσωτερικά, διέρχεται από σταθμιστικά φίλτρα και μια συστοιχία φίλτρων (για φασματική ανάλυση) και καταλήγει στην οθόνη, ως τιμή κάποιας σταθμισμένης λογαριθμικής κλίμακας.



Ηχόμετρα



Ηχόμετρο

Εγκαθιστούμε στο pc μας,
το λογισμικό του ηχομέτρου
(svanpc++setup_3_3_25)