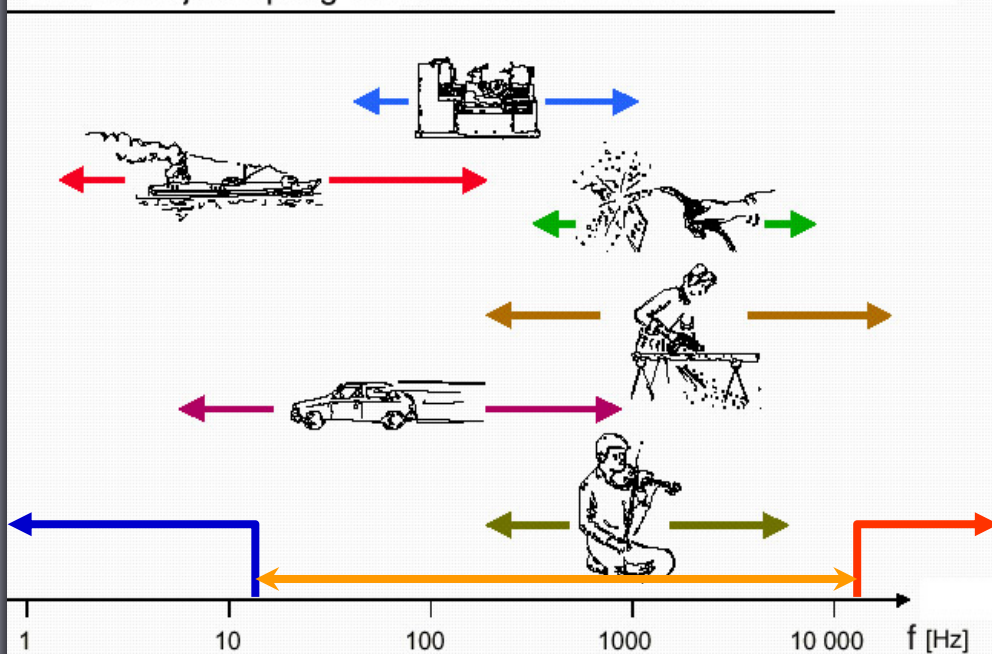


FIZIOLOŠKI KONCEPT BUKE

► Zvučni signala koje generišu različiti izvori zvuka su veoma širokog frekvencijskog opsega:

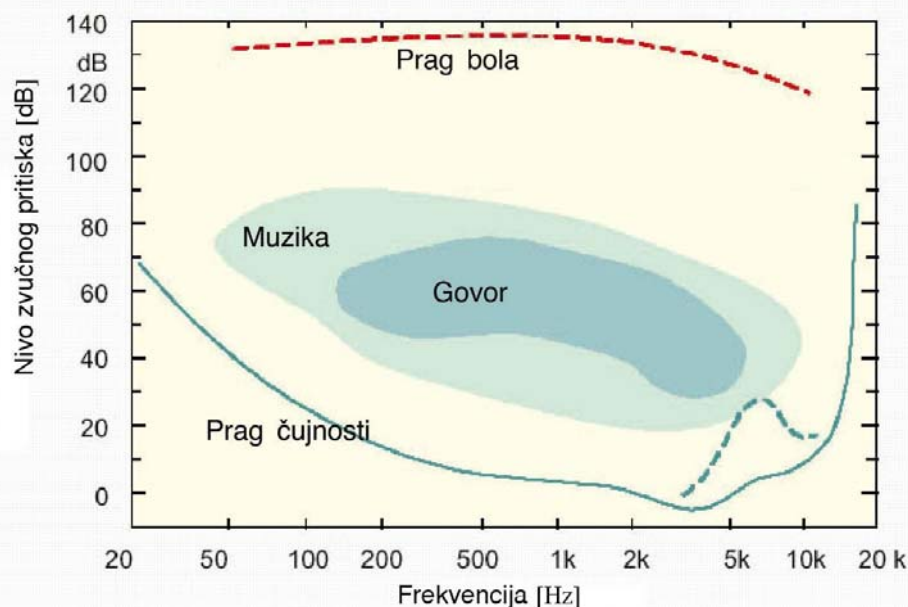
- **infrazvuk, $f < 20\text{Hz}$**
- **čujni zvuk, $20\text{Hz} < f < 20\text{kHz}$**
- **ultrazvuk, $f > 20\text{kHz}$**

Frekvencijski opseg različitih zvučnih izvora



Frekvencijski opseg čujnosti ljudskog uha iznosi od 20Hz do 20kHz. Mlađe osobe mogu čuti, ponekad, frekvencije veće od 20kHz, dok osobe starije od 50 godina retko čuju frekvencije veće od 15kHz, a ponekad i ne veće od 10kHz.

- ▶ Zahvaljujući svoj prirodi **dinamičkom opsegu** ljudsko uho može da registruje zvučne signale u opsegu od praga čujnosti do praga bola.
- ▶ **Prag čujnosti** predstavlja najniži zvučni pritisak (intenzitet zvuka) koji ljudsko uvo može da registruje. Prag čujnosti zavisi od frekvencije i predstavlja se krivom praga čujnosti.

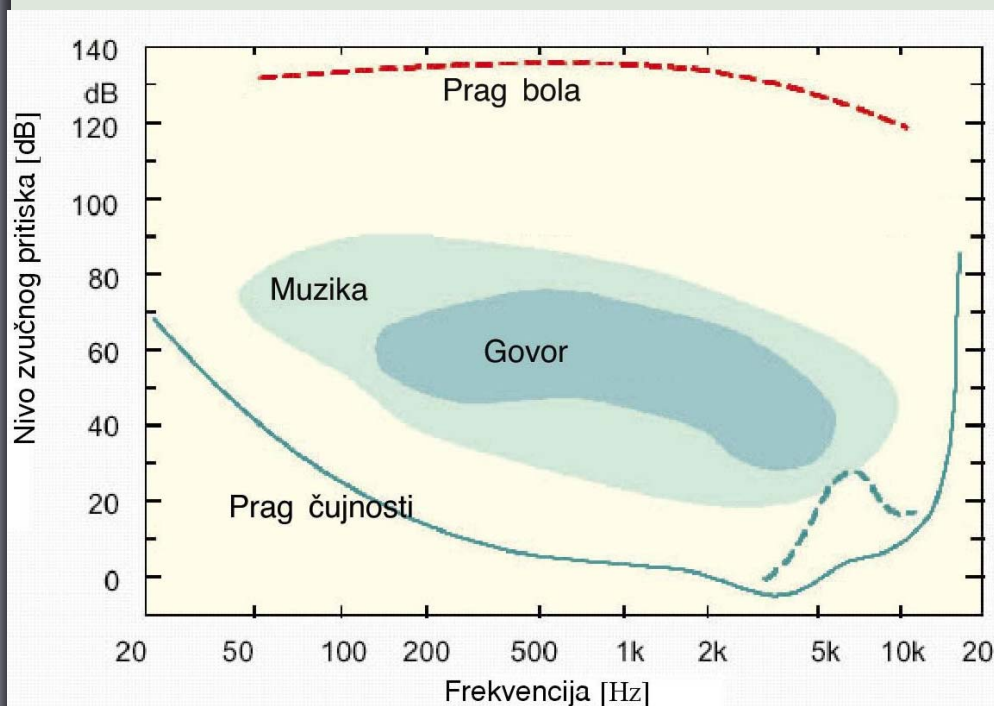


Prag čujnosti na 1000Hz
ima vrednosti:

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa}$$

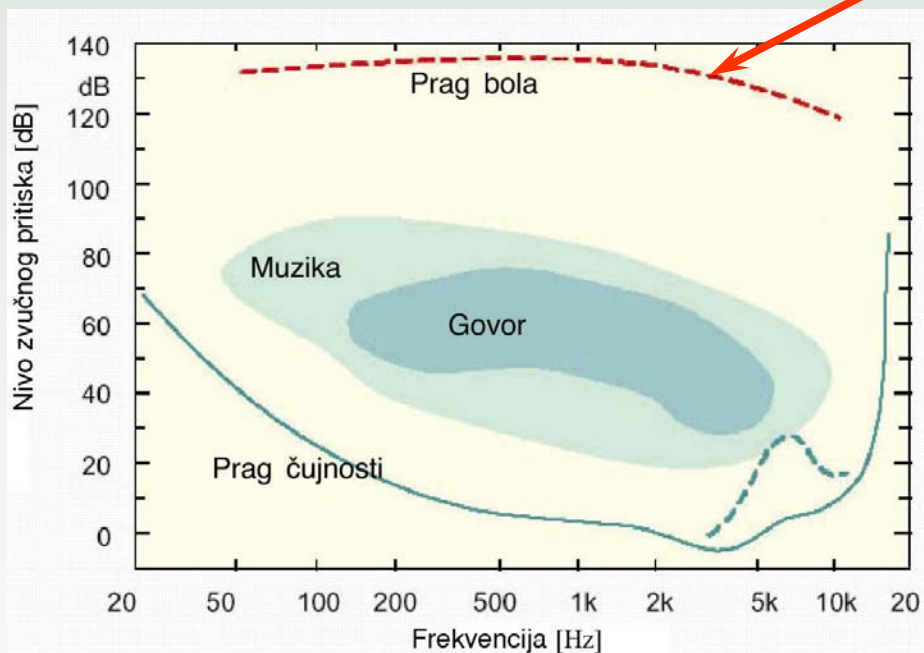
$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

- ▶ Na niskim frekvencijama pobuđuje se cela bazilarna membrana pa je potrebna veća energija za njeno pokretanje, tako da je prag čujnosti viši.



- ▶ Na višim frekvencijama pobuđuje se samo deo membrane i manji deo energije je može pokrenuti, tako da je prag čujnosti niži, izuzev na veoma visokim frekvencijama.

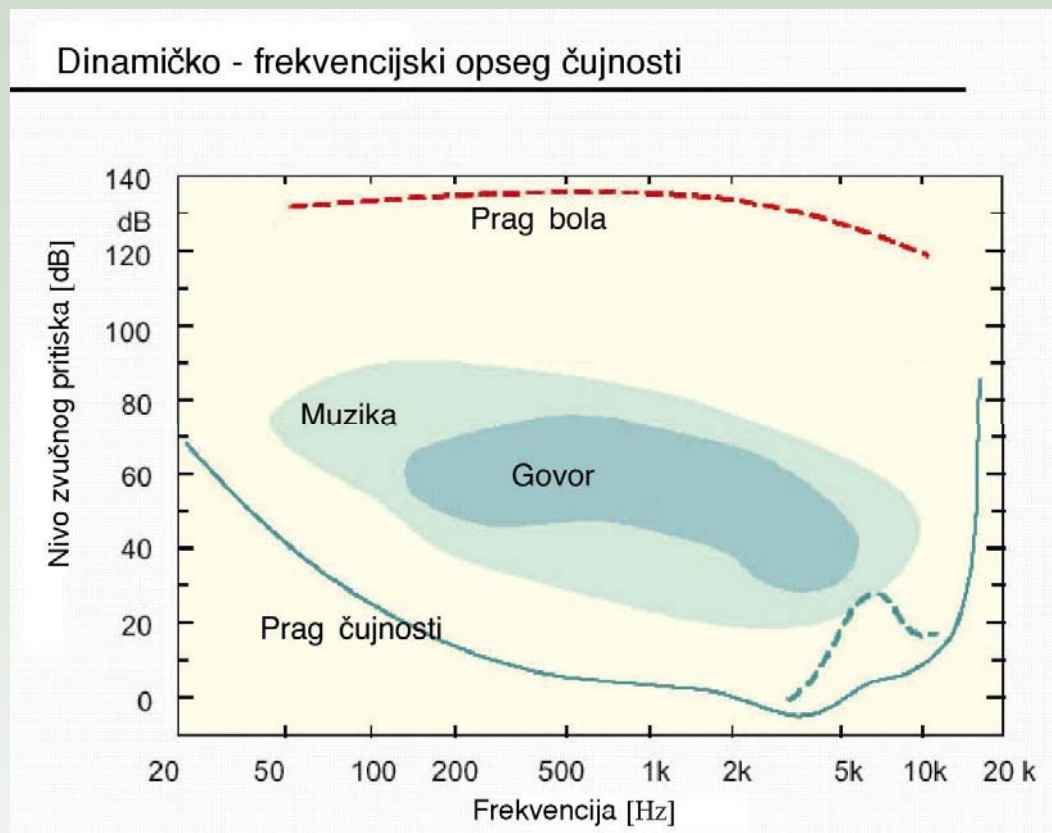
- **Prag bola** predstavlja najviši zvučni pritisak (intenzitet zvuka) koji ljudsko uvo može da registruje a da ne dođe do oštećenja organa sluha i neprijatnog osećaja bola. Prag bola zavisi od frekvencije i predstavlja se krivom praga bola.



Prag bola na 1000Hz ima vrednost za zvučni pritisak koja je za 10^6 puta (za intenzitet zvuka 10^{12}) veća od praga čujnosti:

$$p = 20\text{Pa}$$

$$I = 1\text{W/m}^2$$



► Dinamički opseg čujnosti ljudskog uha na 1kHz iznosi:

● $p = (2 \cdot 10^{-5} \div 20) \text{Pa}$

● $I = (10^{-12} \div 1) \text{W/m}^2$

1. Frekvencijski opseg čujnosti.
2. Dinamički opseg čujnosti.
3. Prag čujnosti.
4. Prag bola.



Nivo zvuka – zašto?

Dinamički opseg
čujnosti uva:
 $10^{-12} \text{W/m}^2 \div 1 \text{W/m}^2$.

Izražavanje veličina
intenziteta zvuka
sistemom malih brojeva
za uobičajene zvučne
događaje;
npr. normalan razgovor
 0.000001W/m^2

Efekat	Odnos intenziteta zvuka (referentna vrednost)	Intenzitet zvuka [W/m^2]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10^{-5}	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	 Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10^{-7}	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10^{-8}	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10^{-9}	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	 Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	Anehoična prostorija
			Prag čujnosti

Nivo zvuka – zašto? (+)

Korišćenjem linearne skale veliki broj uobičajenih zvučnih događaja bio bi između 0 i 1W/m^2 a mali broj između 1 i 10W/m^2 .

Teško uočavanje zvučnih događaja između 0 i 1W/m^2 .

Efekat	Odnos intenziteta zvuka (referentna vrednost)	Intenzitet zvuka [W/m^2]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	 Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	 Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	 Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	Anehoična prostorija
			Prag čujnosti

Nivo zvuka – zašto? (+)

Otežana komparacija različitih zvučnih događaja.

Komparacija podrazumeva korišćenje sistema velikih brojeva, npr. odnos praga bola i praga čujnosti $10^{12}:1$.

Efekat	Odnos intenziteta zvuka (referentna vrednost)	Intenzitet zvuka [W/m^2]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	 Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	 Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	 Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	Anehoična prostorija
			Prag čujnosti

- ▶ Nivo određuje relativni odnos dve veličine ali ne i apsolutnu vrednost i u opštem slučaju određuje se kao logaritamski odnos dve veličine:

$$n = \log \frac{I_1}{I_2} [\text{Bel}]$$

- ▶ Imajući u vidu male promene zvuka koje uvo zapaža, a u cilju dobijanja finije podela skale nivoa, za nivo zvuka uzeta je deset puta manja jedinica - decibel [dB]:

$$n = 10 \log \frac{I_1}{I_2} [\text{dB}]$$

- ▶ Da bi se odredio apsolutni iznos određene veličine potrebno je imati vrednost jedne od veličina, tzv. referentnu vrednost.

► Za nivo zvuka usvojena je konvencija da se kao referentna vrednost uzima vrednost koja odgovara pragu čujnosti na 1000Hz. Na decibelskoj skali referentna vrednost predstavlja nulu i svaka druga vrednost se poredi sa njom.

► Referentne vrednosti:

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} [\text{Pa}] = 20 [\mu\text{Pa}] \quad a_0 = 10^{-6} [\text{m/s}^2] = 1 [\mu\text{m/s}^2]$$

$$I_0 = 10^{-12} [\text{W/m}^2] = 1 [\text{pW/m}^2] \quad v_0 = 10^{-9} [\text{m/s}] = 1 [\text{nm/s}]$$

$$P_0 = 10^{-12} [\text{W}] = 1 [\text{pW}] \quad \xi_0 = 10^{-12} [\text{m}] = 1 [\text{pm}]$$

- ▶ Nivo veličina koje definišu generisanje i prostiranje zvučnih talasa:

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \log \frac{I}{I_0} & L_p &= 20 \log \frac{p}{p_0} & L_P &= 10 \log \frac{P_a}{P_0} \\ L_a &= 20 \log \frac{a}{a_0} & L_v &= 20 \log \frac{v}{v_0} & L_\xi &= 20 \log \frac{\xi}{\xi_0} \end{aligned}$$

- ▶ Nivo zvuka se izražava ili preko nivoa zvučnog pritiska ili nivoa intenziteta zvuka koji **SAMO** u uslovima slobodnog zvučnog polja imaju istu vrednost.

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 20 \log \frac{p}{p_0} [\text{dB}]$$

- ▶ **NIVO ZVUKA JE OBJEKTIVNA VELIČINA.**

Dinamički opseg
čujnosti uva:
 $0 \div 120 \text{ dB}$.

Izražavanje veličina
nivoa zvuka pomoću
brojeva sa malim
brojem cifara.

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	110	Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	100	Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	90	Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	80	Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	70	Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	50	Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	40	Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	30	Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	20	Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	10	Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Korišćenjem nivoa zvuka lakše se raspoređuje veći broj uobičajenih zvučnih događaja na logaritamskoj skali.

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	I [W/m^2]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	110	Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	100	Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	90	Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	80	Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	70	Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	50	Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	40	Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	30	Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	20	Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	10	Suštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Komparacija različitih
zvučnih događaja
sistemom brojeva sa
manje cifara.

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	110	Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	100	Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	90	Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	80	Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	70	Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	50	Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	40	Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	30	Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	20	Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	10	Suštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Jednake promene nivoa bilo gde na dB skali subjektivno se ocenjuju kao jednake promene jačine zvuka, tako da je nivo zvuka mera subjektivne jačine.

promena nivoa	ocena
1dB	neuočljivo
3dB	na granici uočavanja
6dB	uočljivo
10dB	jasno uočljivo

Efekat	Odnos intenziteta zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	110	Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	100	Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	90	Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	80	Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	70	Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	50	Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	40	Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	30	Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	20	Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	10	Suštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Formula:

$$p = 1 \text{ Pa}$$

$$L_p = 20 \log \frac{1}{20 \times 10^{-6}}$$

$$= 20 \log 50\,000$$

$$= 94 \text{ dB}$$

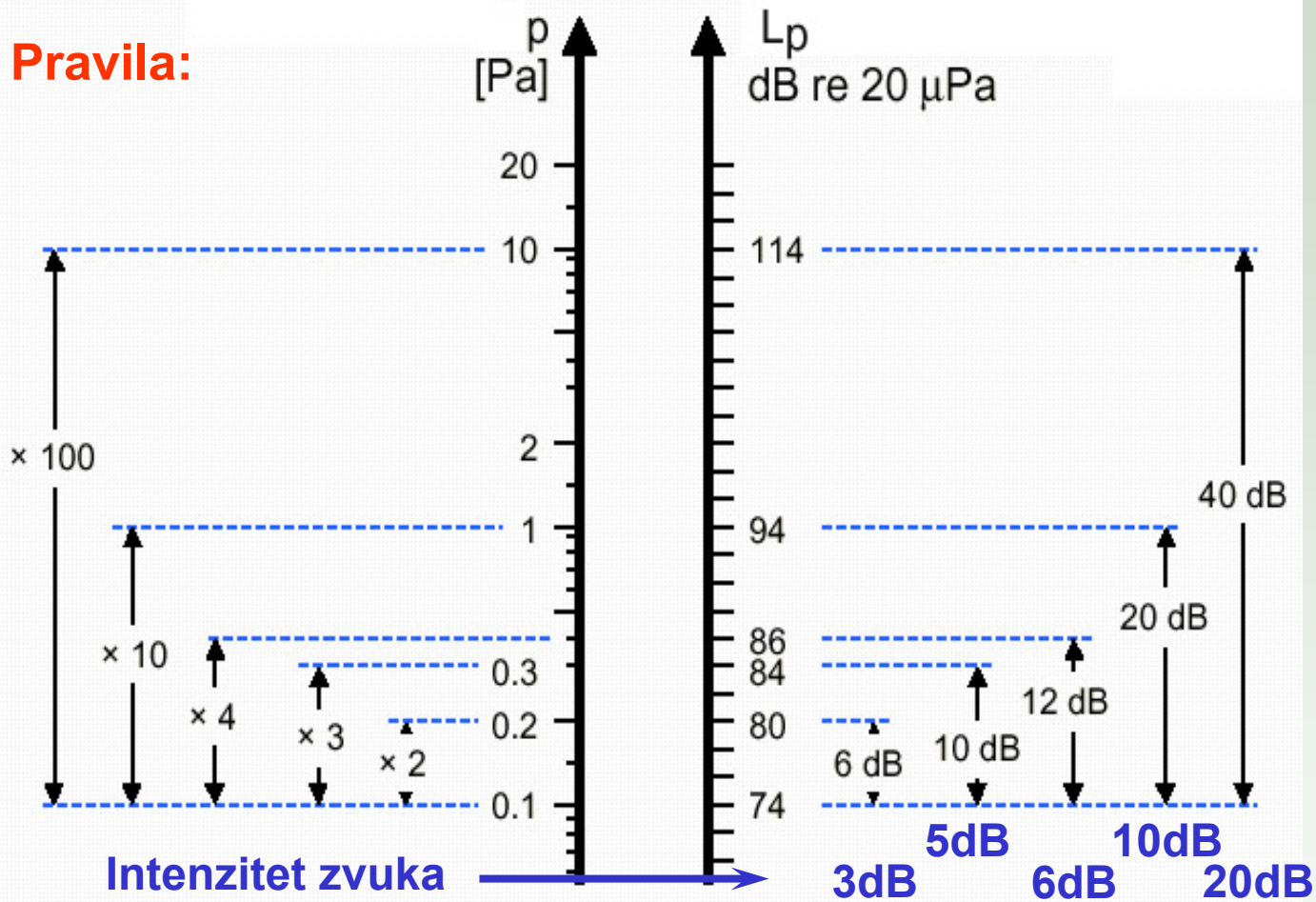
$$p = 31.7 \text{ Pa}$$

$$L_p = 20 \log \frac{31.7}{20 \times 10^{-6}}$$

$$= 20 \log 1.58 \times 10^{-6}$$

$$= 124 \text{ dB}$$

Pravila:



Sabiranje nivoa složenog zvuka

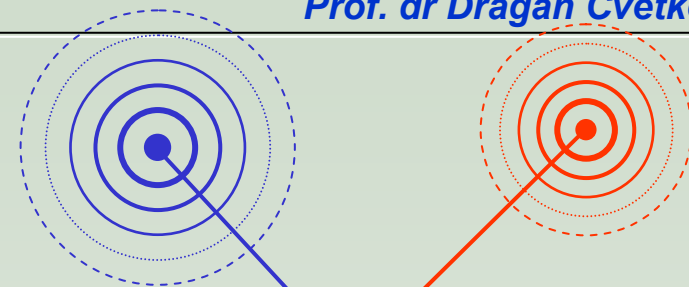
► Za složeni zvuk:

$$I_R = I_1 + I_2$$



$$L_R = 10 \log \frac{I_R}{I_0}$$

DVA IZVORA



$$L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

$$L_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$

$$L_R = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_0} = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} \right)$$

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{L/10}$$

$$L_R = 10 \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right)$$

$$L_R = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$$

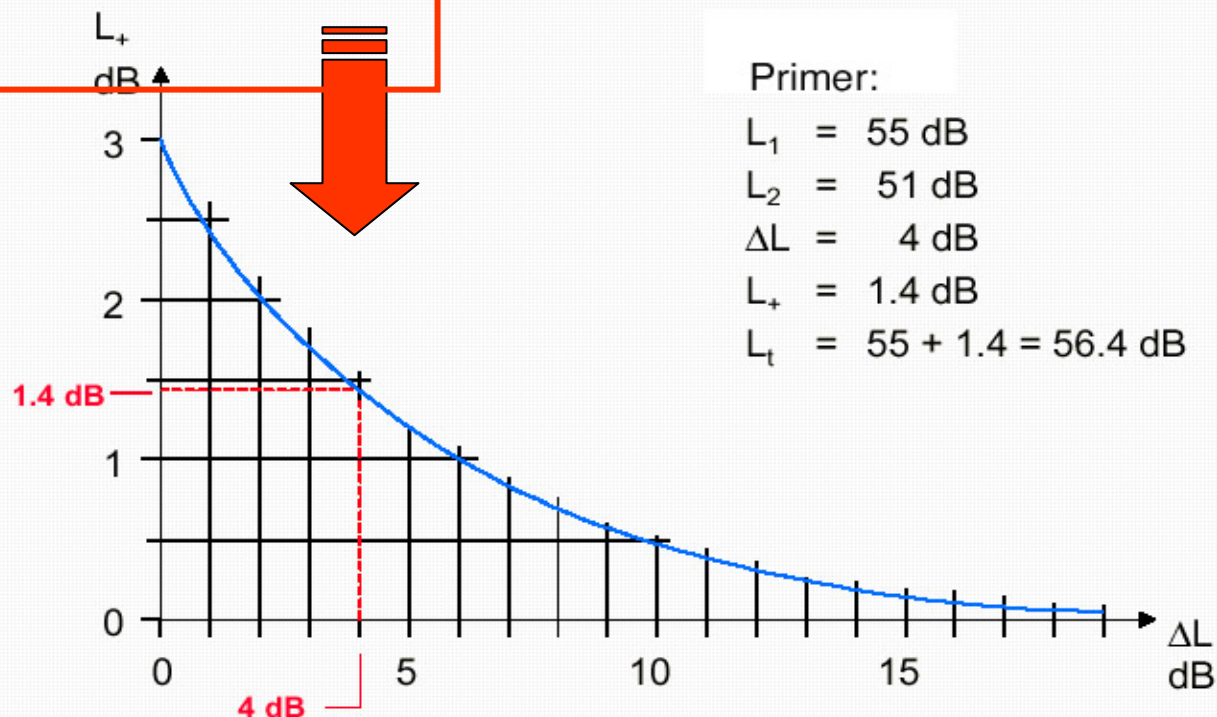
$$= 10 \log 10^{L_1/10} [1 + 10^{(L_2 - L_1)/10}]$$

$$= 10 \log 10^{L_1/10} + 10 \log [1 + 10^{(L_2 - L_1)/10}]$$

$$= L_1 + L_+$$

$$L_+ = 10 \log [1 + 10^{-(L_1 - L_2)/10}] = 10 \log [1 + 10^{-\Delta L/10}]$$

$$\Delta L = L_1 - L_2$$



Primer:

$$L_1 = 55 \text{ dB}$$

$$L_2 = 51 \text{ dB}$$

$$\Delta L = 4 \text{ dB}$$

$$L_+ = 1.4 \text{ dB}$$

$$L_t = 55 + 1.4 = 56.4 \text{ dB}$$

Postupak:

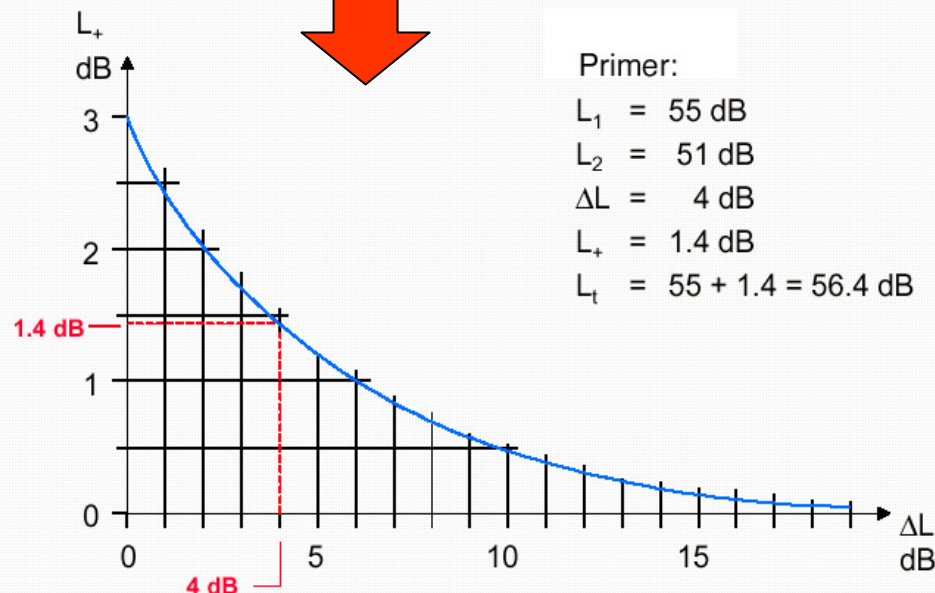
1. Izračunavanje razlike dva nivoa:

$$\Delta L = L_1 - L_2, L_1 > L_2$$

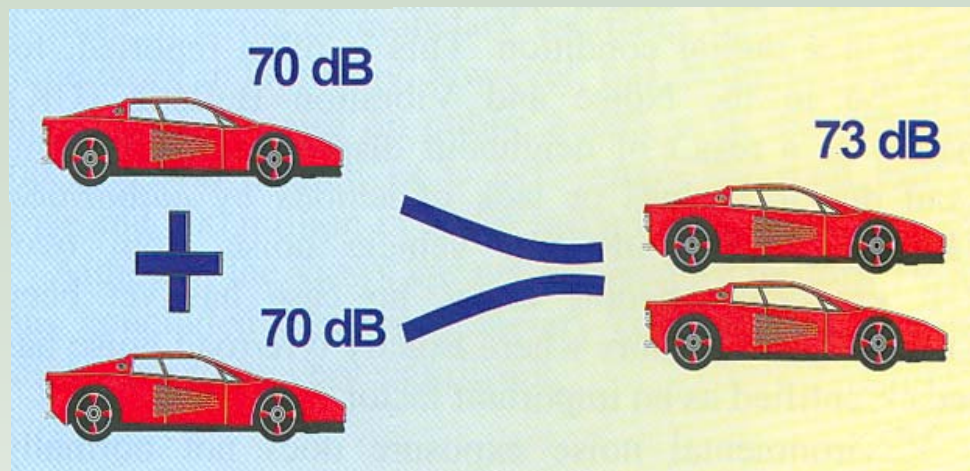
2. Određivanje L_+ na osnovu grafika ili prethodno prikazane jednačine.

3. Dodavanje L_+ većem nivou daje rezultujući nivo.

$$L_R = L_1 + L_+$$



► Za dva identična izvora:



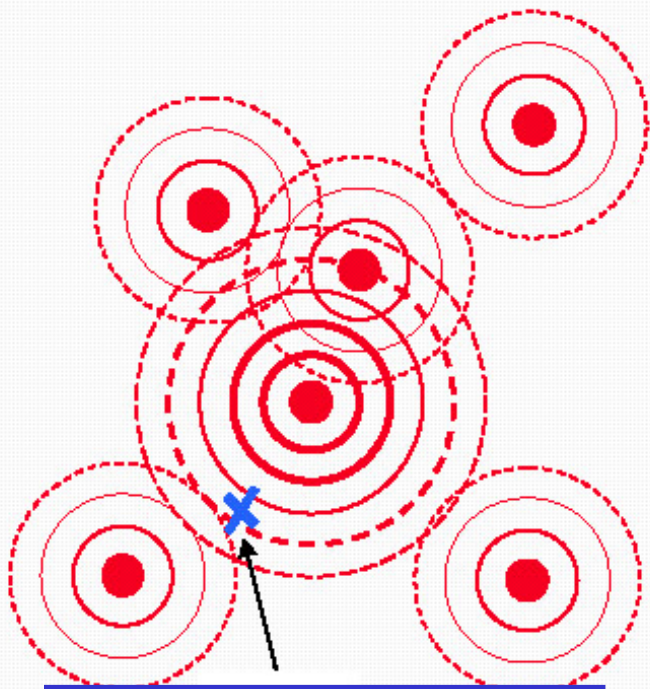
Pravila:

1. Za dva ista nivoa rezultujući nivo je za 3 dB veći.

$$70 \text{ dB} + 70 \text{ dB} = 73 \text{ dB}$$

2. Ako je razlika nivoa veća od 10dB, rezultujući nivo jednak je većem nivou.

VIŠE IZVORA

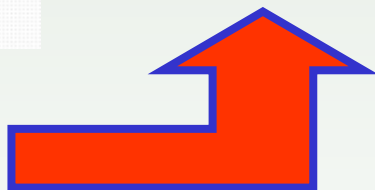


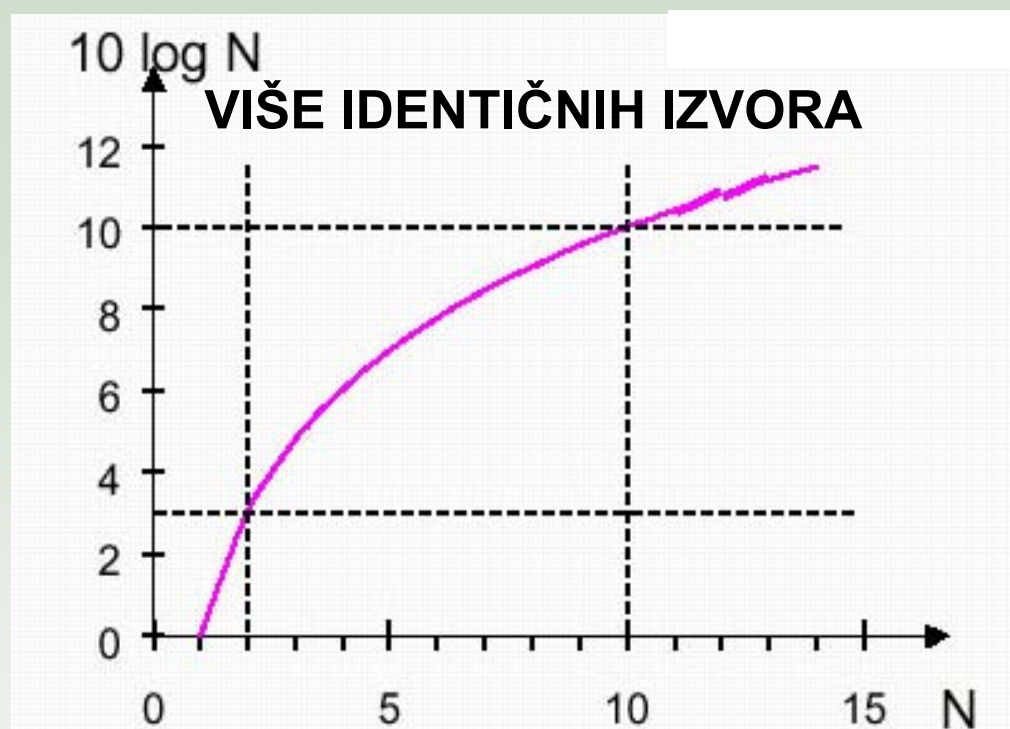
$$L_R = 10 \log \frac{I_R}{I_0} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0}$$

$$L_R = 10 \log \frac{p_R^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{p_0^2}$$

$$L_R = 10 \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10} \right)$$

$$L_R = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}$$

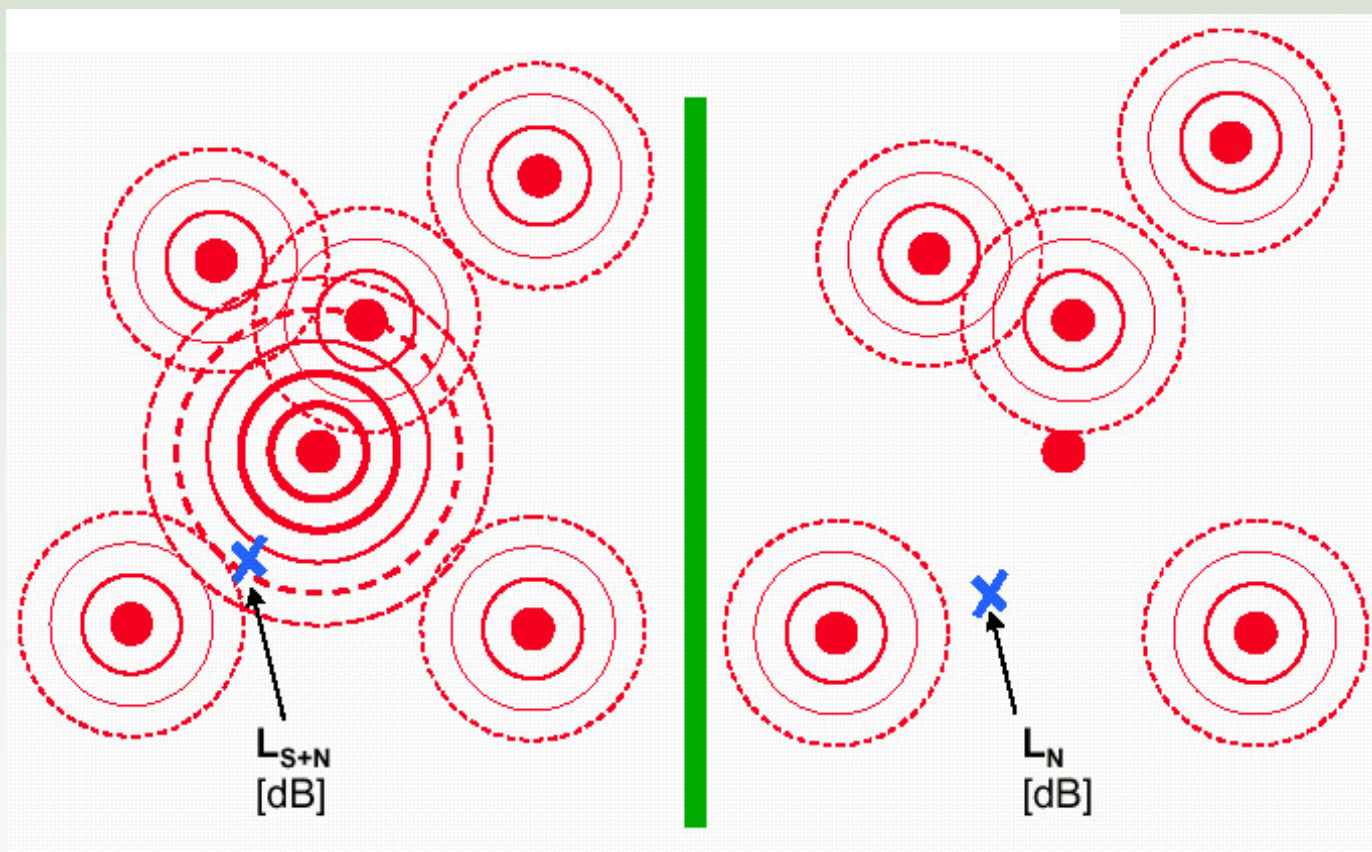




$$L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_n$$

$$L_R = L_1 + 10 \log N$$

- Postupak oduzimanja nivoa zvuka primenjuje se u slučaju kada se određuje nivo zvuka u prisustvu pozadinskog zvuka (drugih izvora – koji se ne mogu isključiti).



$$I_S = I_{S,N} - I_N = I_0 \cdot 10^{L_{S,N}/10} - I_0 \cdot 10^{L_N/10}$$

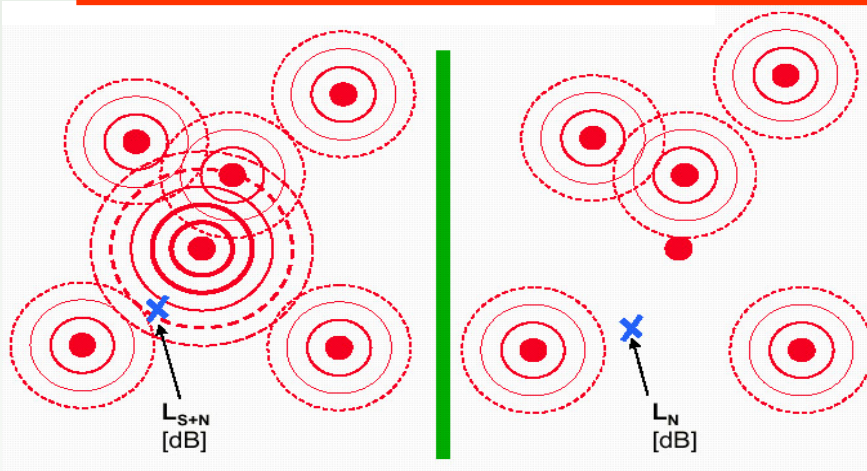
$$L_S = 10 \log \frac{I_S}{I_0} = 10 \log (10^{L_{S,N}/10} - 10^{L_N/10})$$

$$L_S = 10 \log 10^{L_{S,N}/10} (1 - 10^{\frac{L_{S,N} - L_N}{10}})$$

$$L_S = 10 \log 10^{L_{S,N}/10} + 10 \log (1 - 10^{\frac{L_{S,N} - L_N}{10}}) = L_{S,N} - L_-$$

$$L_- = -10 \log (1 - 10^{\frac{L_{S,N} - L_N}{10}}) = -10 \log (1 - 10^{\frac{\Delta L}{10}})$$

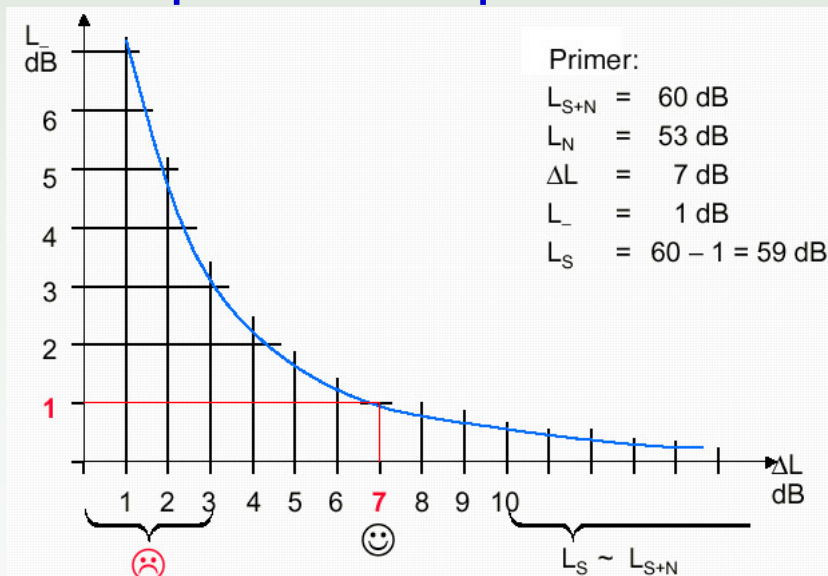
$$\Delta L = L_{S,N} - L_S$$



Postupak:

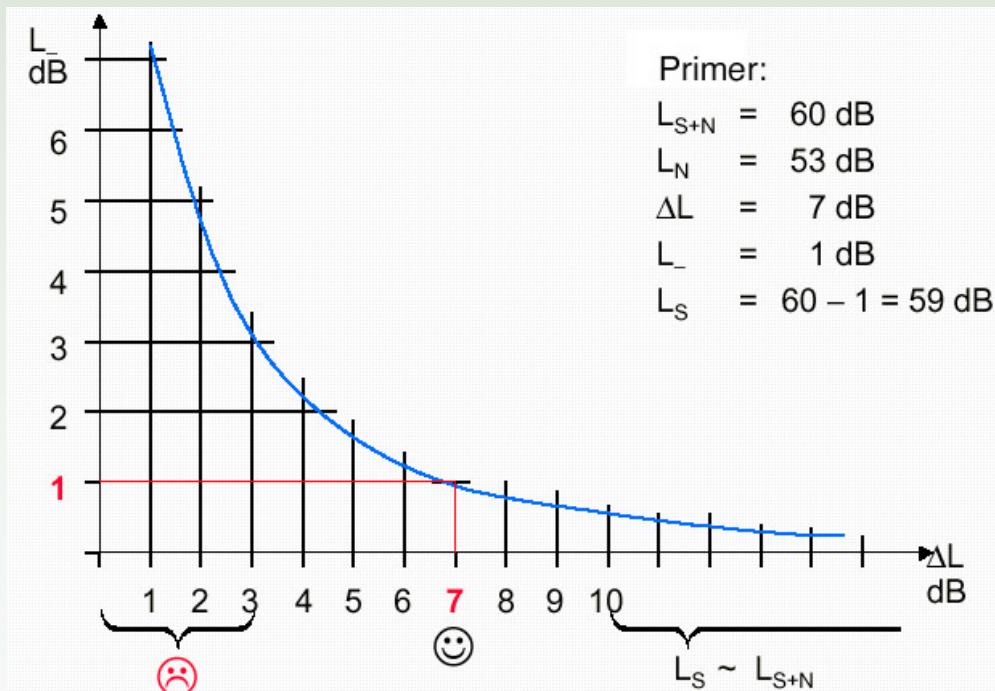
1. Merenje ukupnog nivoa zvuka izvora i pozadinskog zvuka (buke), $L_{S,N}$
2. Isključivanje izvora zvuka i merenje pozadinskog nivoa zvuka (buke), L_N
3. Izračunavanje razlike dva nivoa:
4. Određivanje L_- na osnovu grafika ili prethodno prikazane jednačine
5. Oduzimanje L_- od nivoa $L_{S,N}$

$$L_S = L_{S,N} - L_-$$



Pravila:

- ⊕ Ako je ΔL manje od 3dB, pozadinska buka je prevelika za tačno merenje i mora se smanjiti.
- ⊕ Ako je ΔL veće od 10dB pozadinska buka se može ignorisati.
- ⊕ U ostalim slučajevima izmereni ukupni nivo buke treba korigovati za uticaj pozadinske buke opisanim postupkom.



1. Razlozi za uvođenje pojma nivoa buke.
2. Nivo buke.
3. Prednosti dB skale.
4. Sabiranje nivoa.
5. Oduzimanje nivoa.



- ▶ Promene objektivnog nivoa zvuka odgovaraju subjektivnom osećaju promene jačine zvuka.

IPAK ...

- ▶ Objektivni nivo zvuka ne daje potpunu informaciju o subjektivnom osećaju jačine zvuka, odnosno ljudskoj reakciji na utvrđeni nivo.

TAKO DA ...

- ▶ Postoji izvesno neslaganje između objektivnih vrednosti i subjektivnog doživljaja zvučnog nadražaja.

- ▶ Subjektivni osećaj jačine zvuka zavisi od:

- ⊕ nivoa zvuka
- ⊕ frekvencije

TAKO DA ...

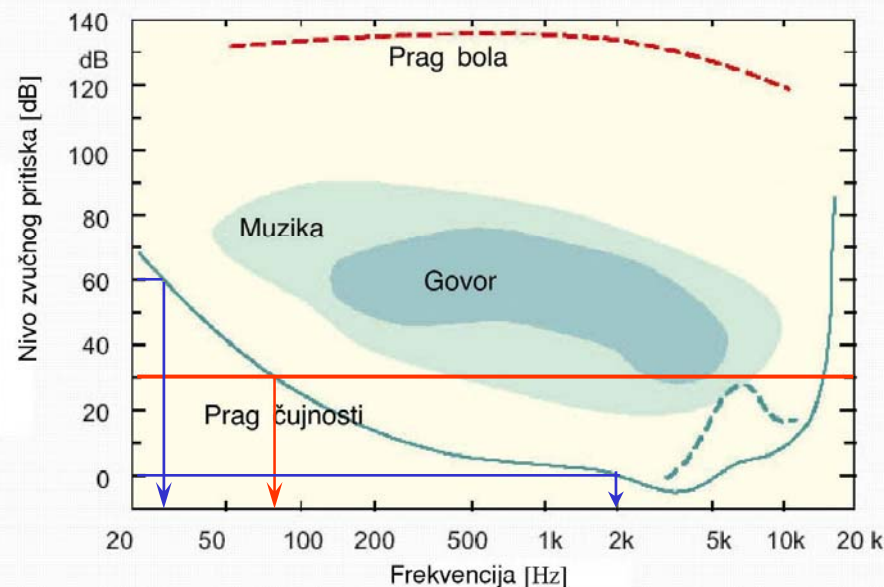
- ▶ Dva zvuka istog nivoa, a različitih frekvencija, nemaju isti subjektivni osećaj.



Sinus.exe

- ▶ **Razlog:** Prag čujnosti kao i druge krive jednakih nivoa su frekvencijske zavisne.

Dinamičko - frekvencijski opseg čujnosti



Posledice:

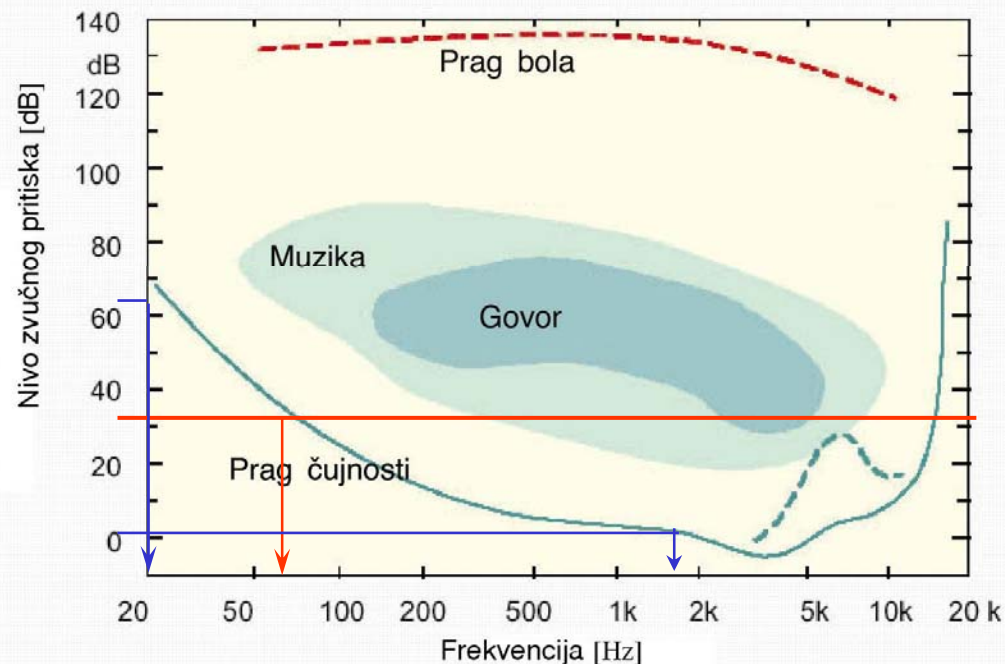
- ▶ Objektivni nivo zvuka od 30dB neće se čuti ispod 80Hz, dok je iznad te frekvencije znatno iznad krive praga čujnosti.



Sinus.exe

- ▶ Prag čujnosti na 30Hz je za 60dB veći od praga čujnosti na 2kHz.

Dinamičko - frekvencijski opseg čujnosti



► Za izražavanje subjektivnog osećaja jačine zvuka uvedena je nova veličina - **subjektivna jačina zvuka Λ [fon]**.

► **OSOBINA:** Subjektivna jačina dva zvuka sa istim brojem fona identična za ljudsko uho.

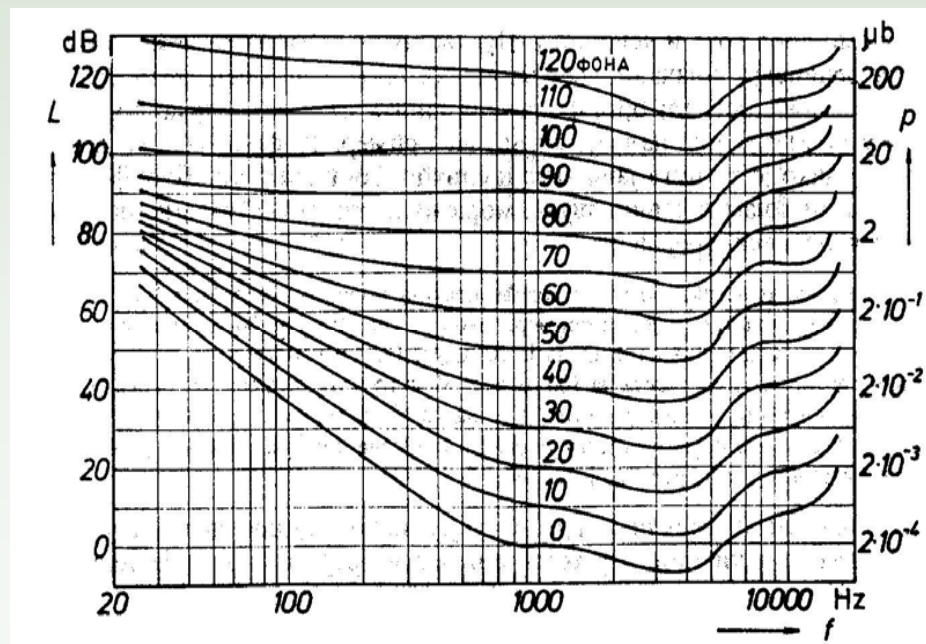
► **DOGOVOROM USVOJENO:**

Na 1000Hz subjektivna jačina zvuka ima istu vrednost kao objektivna jačina zvuka.

$$L[\text{fon}] = \Lambda[\text{fon}]$$

Subjektivna jačina zvuka (+)

- ▶ Za frekvencije iznad i ispod 1000Hz, fonska i decibelska skala nisu ekvivalentne.
- ▶ Subjektivna jačina zvuka u fonima određena je eksperimentalno, menjanjem nivoa zvuka odgovarajućeg tona sve dok subjektivna ocena njegove jačine nije izjednačena sa subjektivnom jačinom tona na 1000Hz.
- ▶ Na taj način dobijene su izofonske linije - **linije sa istim brojem fona bez obzira na frekvenciju.**
- ▶ Pomoću izofonskih linija se može naći veza između objektivne i subjektivne jačine, odnosno fona i decibela i obrnuto.



Izofonske linije po Flečer i
Mansonu

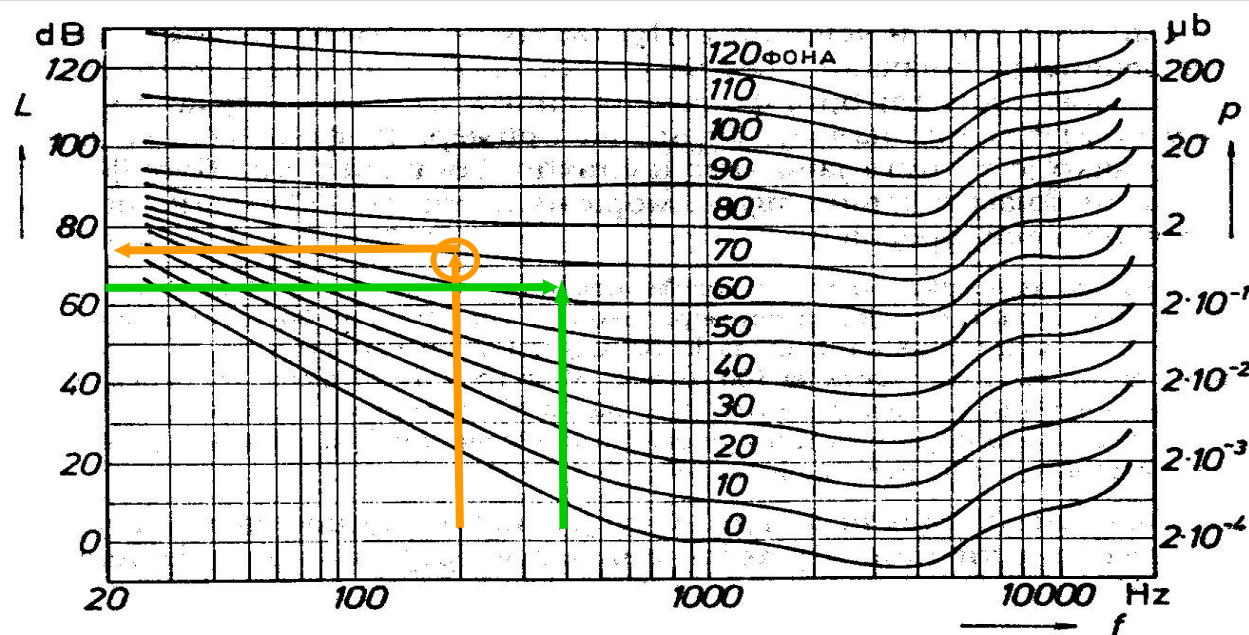
Fiziološki koncept buke



Primeri:

$L=50\text{dB}$, $f=400\text{Hz}$:
 $\Lambda=46\text{fona}$

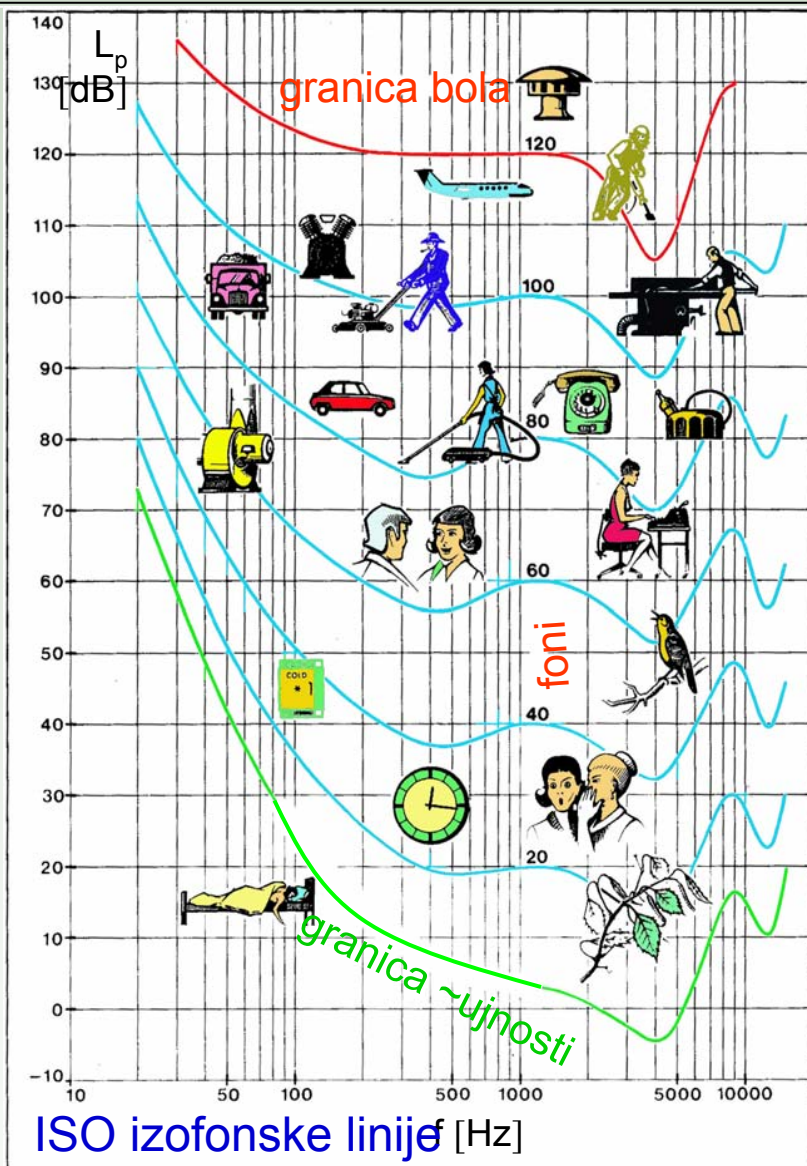
$\Lambda=60\text{fona}$, $f=200\text{Hz}$:
 $L=64\text{dB}$



Izofonske linije po Flečer i Mansonu

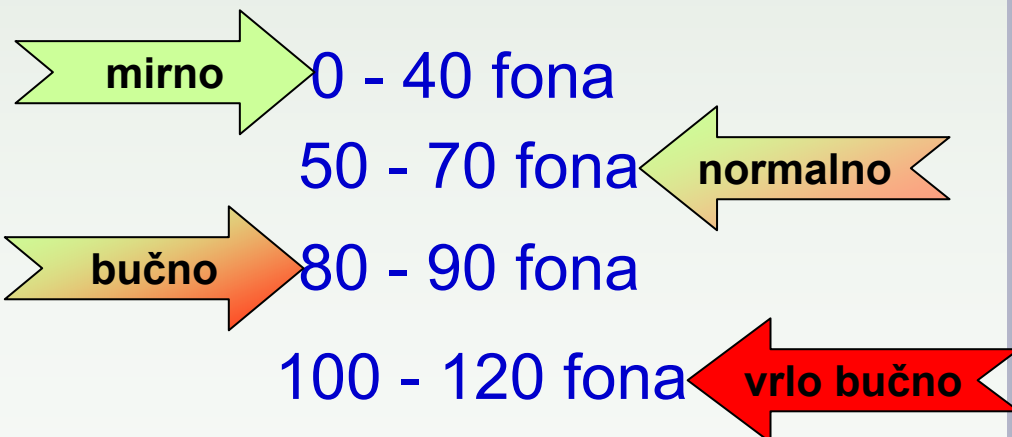
- Izofonske linije na višim frekvencijama su ekvidistantne (međusobno rastojanje krivih jednako) što ukazuje na logaritamski karakter jedinice fon. **Pojačanje za jednak broj fona uvek se ocenjuje jednako**, kao što je slučaj i kod **dB skale**.

Subjektivna jačina zvuka (+)



➤ Međunarodna organizacija za standardizaciju korigovala je izofonske linije po Flečer i Mansonu i preporučuje nešto drugačije krive prikazane na slici.

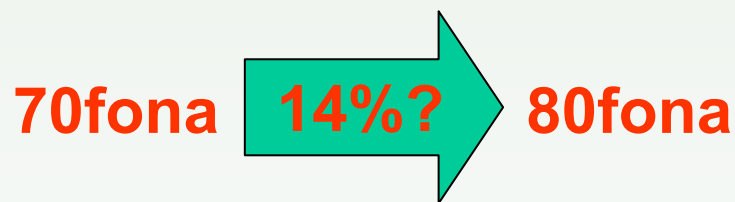
➤ Subjektivna jačina se može gradirati prema sledećoj skali:



- ▶ Primena fonske skale i veličine subjektivne jačine zvuka ne omogućuje da se izvrši subjektivna gradacija jačine zvuka tako da nam ne može ilustrovati kako ljudsko uho razlikuje različite jačine zvuka.

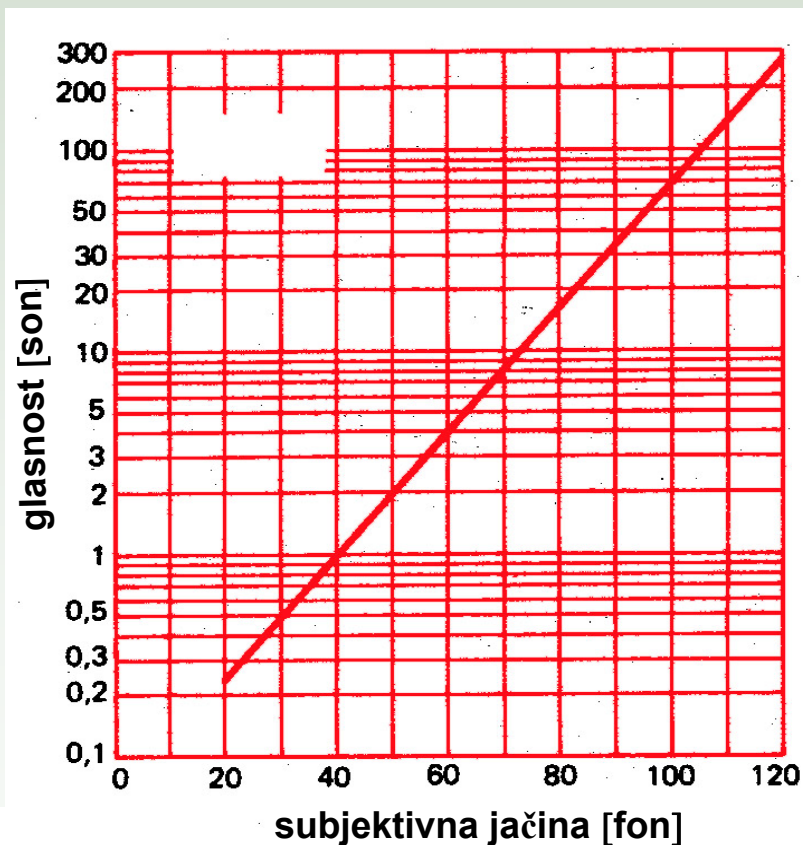
TRAGANJE ZA ODGOVORIMA NA PITANJA

- ⊕ Da li je promena subjektivne jačine od X fona mala ili velika?
- ⊕ Koliko puta se subjektivno povećala jačina zvuka?



- ▶ Odgovore na postavljena pitanja daje **sonska skala**, odnosno veličina **glasnost zvuka**, sa jedinicom **son**.
- ▶ Glasnost zvuka definiše koliko je neki zvuk glasniji od zvuka čija je glasnost **1son**.
- ▶ Pomoću sonske skale može se izvršiti gradacija glasnosti zvuka:

Zvuk koji ima 8sona je dvostruko glasniji od zvuka čija je glasnost 4sona.



▶ Svako povećanje subjektivne jačine od 10 fona udvostručuje glasnost.

▶ Subjektivnoj jačini od 40 fona odgovara glasnost od 1 sona.

$$S = 2^{\frac{\Lambda - 40}{10}}$$

$$\Lambda = 40 + \frac{10}{\log 2} \log S = 40 + 33 \log S$$

NIVO GLASNOSTI

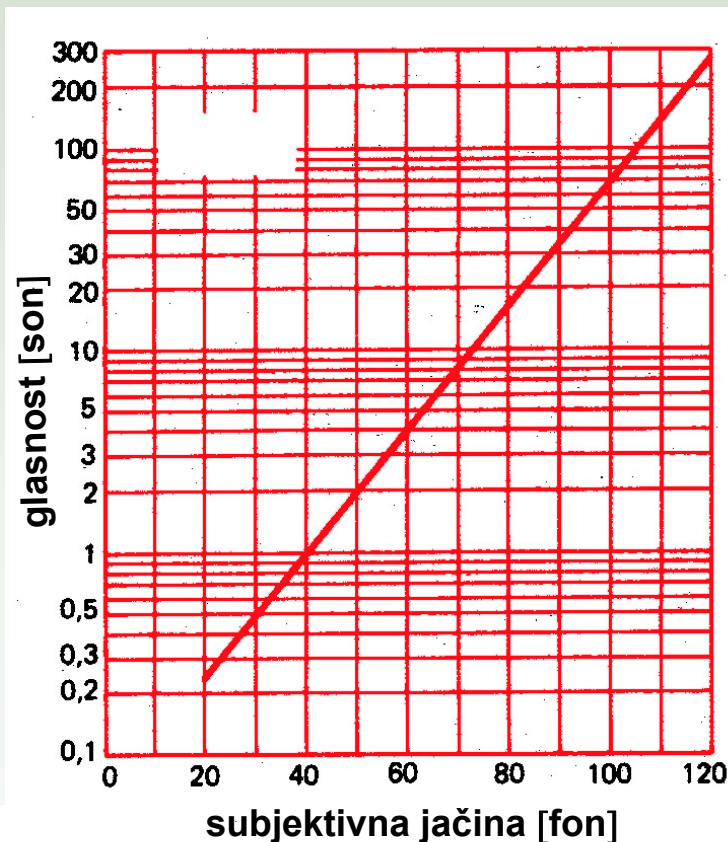
45-85dBA (korak 10) 45-85dB (korak 10)



Ruzicasti sum

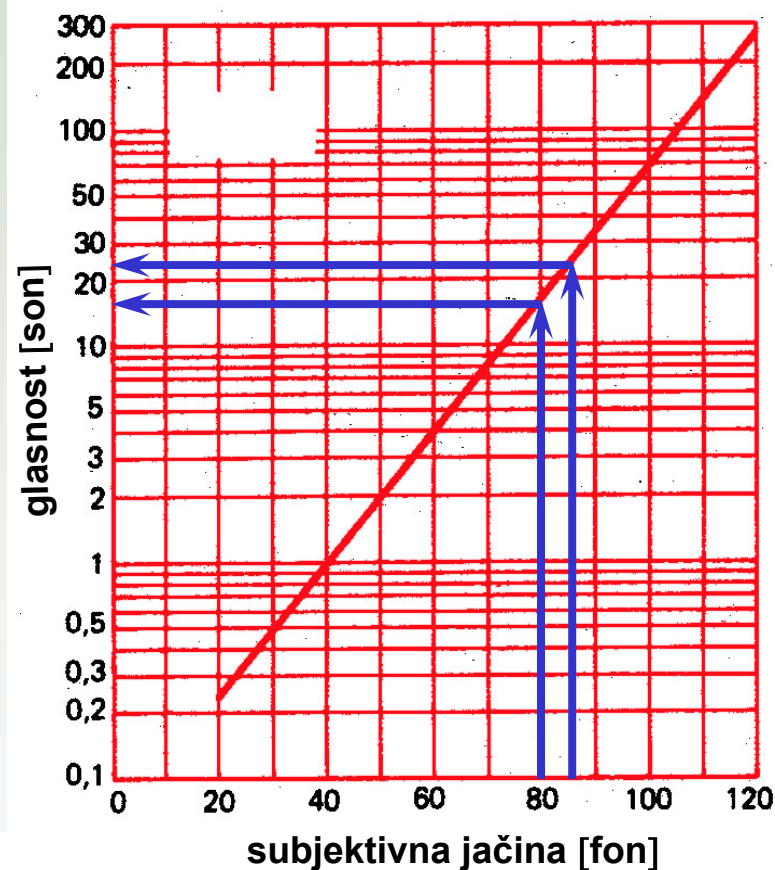


Ton 1kHz



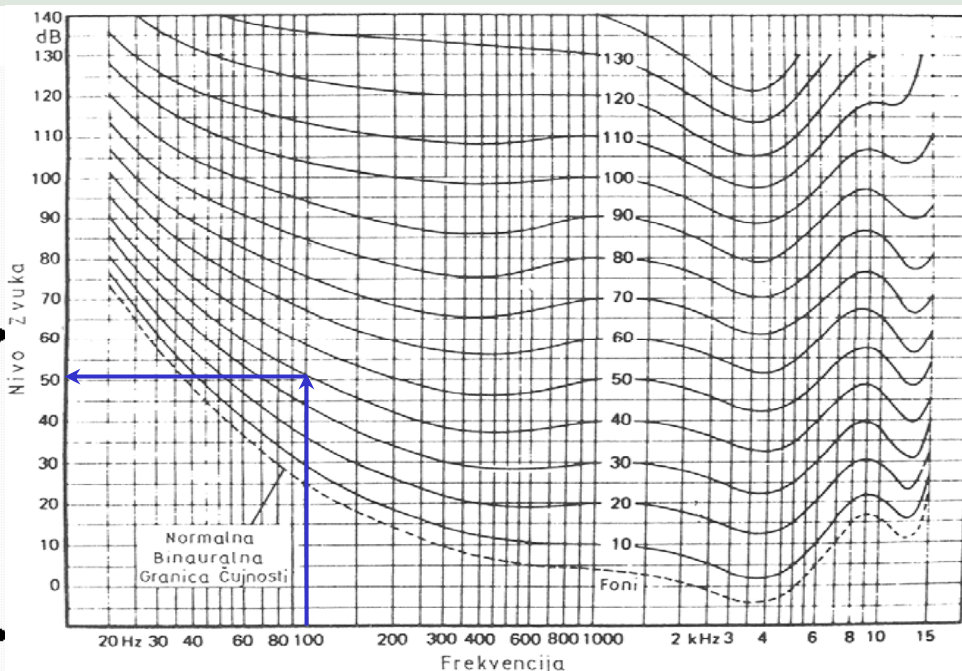
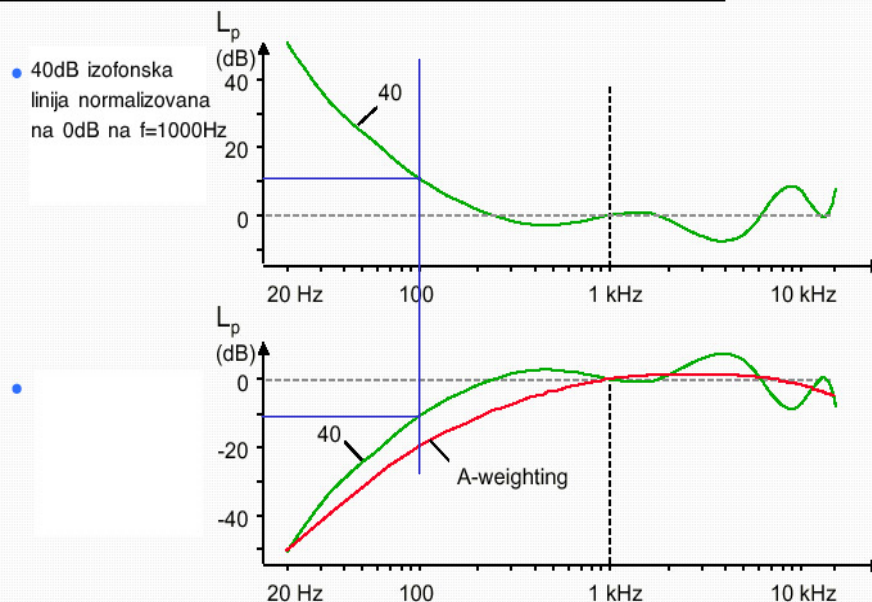
Primer: Ako motocikl proizvodi zvuk u srednje frekventnom opsegu subjektivne jačine 80fona, četiri takva motocikla stvaraće subjektivnu jačinu od 86fona. Porast jačine iznosi 7.5%.

Analiza preko glasnosti pokazuje da je glasnost u prvom slučaju 16 sona a u drugom 24 sona, tako da porast jačine stvarno iznosi 50%.



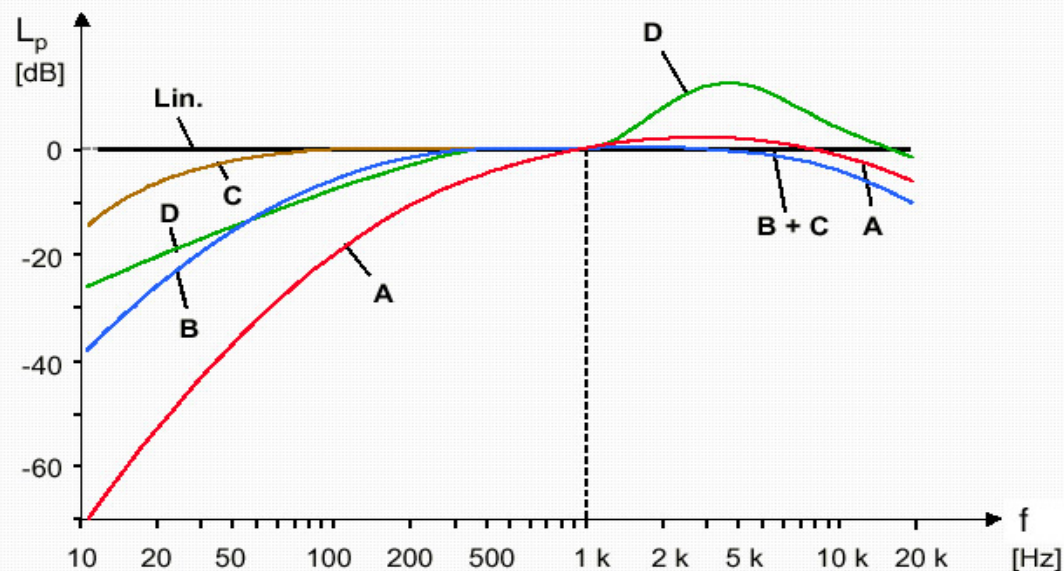
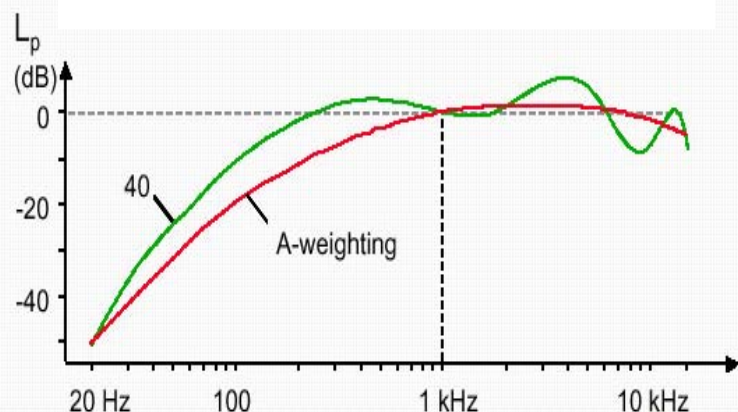
- Da bi zvuk na **100Hz** imao subjektivnu jačinu od **40fona** taj zvuk mora da ima objektivni nivo od **51dB**. Prema tome, da bi instrument umesto **51** pokazao **40** potrebno je uneti slabljenje od **11dB**. To je upravo razlika između vrednosti izofonske linije od **40fona** na **1000Hz** i **100Hz**. Ako se analogno primeni isti zaključak i za ostale frekvencije, frekventijska karakteristika instrumenta bi trebalo da ima vrednost izvrnute izofonske linije od **40 fona** normalizovane na nultu vrednost na **1000Hz** da bi instrument pokazivo subjektivnu jačinu.

40dB izofonska linija i A-težinska kriva



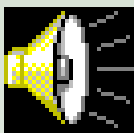
- Zato su standardizovane tri frekvencijske karakteristike, A, B i C težinske krive, koje približno odgovaraju izvrnutim izofonskim linijama od 40, 70 i 100fona prethodno normalizovanim na nultu vrednost na 1000Hz.
- **Težinska kriva** predstavlja frekvencijsku karakteristiku koja daje pojedinim frekvencijama veći ili manji značaj, odnosno “težinu”, usklađujući time reakciju instrumenta sa osetljivošću organa sluha na zvuk (izofonskim linijama).

Težinske krive

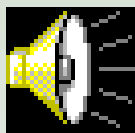


► Slabljenje težinskih krivi

Efekat A-težinske krive

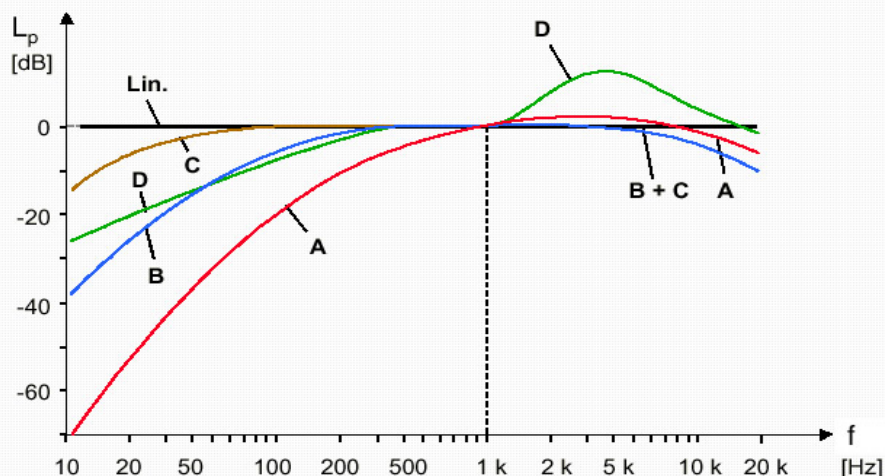


Uzletanje i sletanje
aviona



Industrijska buka

Težinske krive

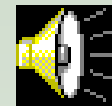


f[Hz]	Kriva A [dB]	Kriva B [dB]	Kriva C [dB]
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3.0	-0.1
200	-10.9	-2.0	0
250	-8.6	-1.8	0
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	0.6	0	0
1600	1.0	0	-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	-0.7	-0.8
5000	0.5	-1.2	-1.3
6300	-0.1	-1.9	-2.0
8000	-1.1	-2.9	-3.0
10000	-2.5	-4.3	-4.4

1. Subjektivna jačina zvuka.
2. Izofonske linije.
3. Glasnost zvuka.
4. Težinske krive.
5. A-težinska kriva.



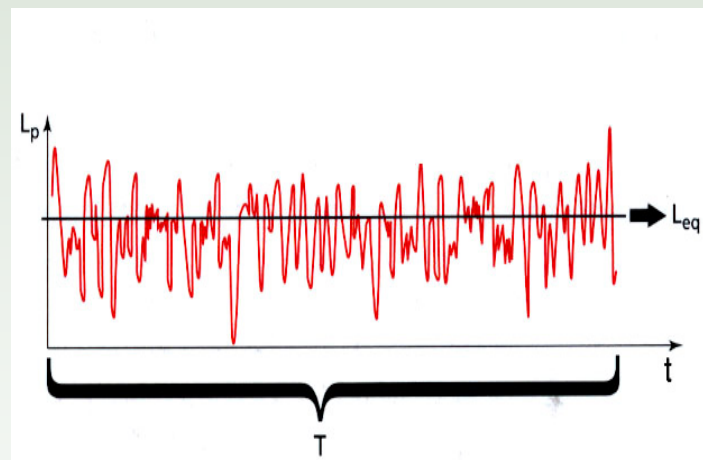
- ▶ U realnim uslovima čest je slučaj da je zvuk dugotrajan i da je nivo zvuka (buke) promenljiv sa vremenom (buka u industriji, saobraćajna buka, muzika).



Betoven

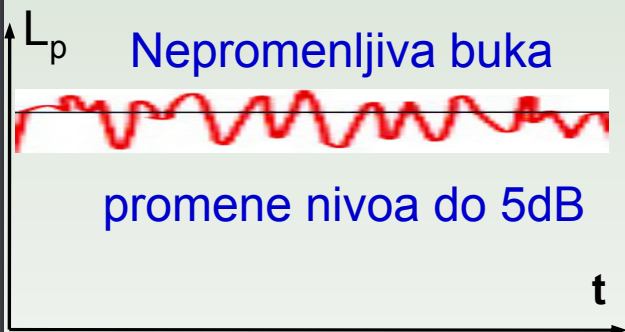
$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

- ▶ Da bi se procenjivao uticaj takvog zvuka na čoveka, ili komparirala izmerena vrednost nivoa sa dozvoljenom, uvedeno je jednobrojno izražavanje vremenski promenljivog zvuka pojmom - ekvivalentni nivo zvuka (buke), L_{eq} [dB(A)].



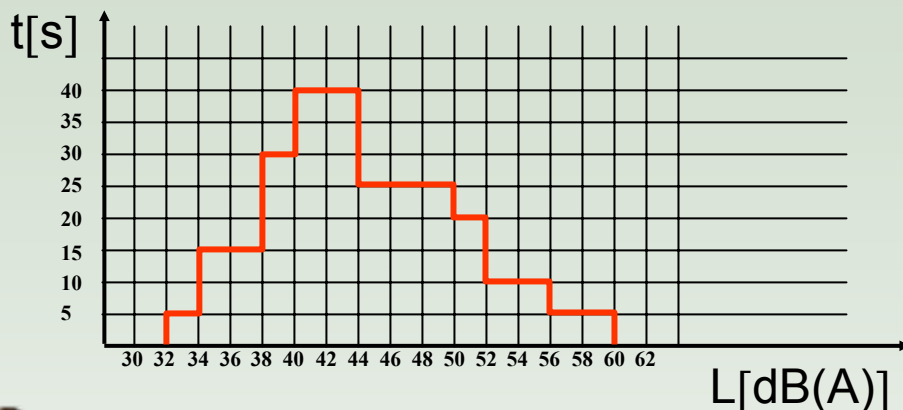
$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_A(t)/10} dt \quad [\text{dB(A)}]$$

- Ekvivalentni nivo zvuka (buke) predstavlja konstantni (prosečni) nivo zvučnog pritiska, koji u određenom vremenskom intervalu ima istu zvučnu energiju kao posmatrani, vremenski promenljiv nivo zvučnog pritiska.

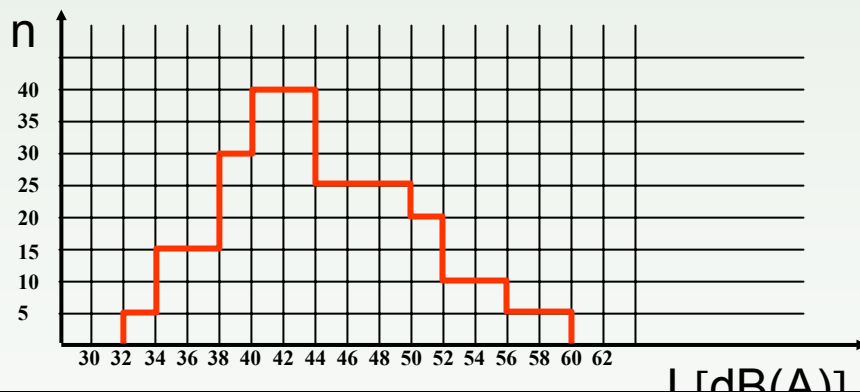


➤ Ekvivalentni nivo zvuka se može praktično odrediti:

- uzorkovanjem promenljivog nivoa zvuka i određivanjem vremena trajanja pojedinačnih nivoa promenljivog zvuka



- uzorkovanjem promenljivog nivoa zvuka i klasiranjem pojedinačnih nivoa promenljivog zvuka prema nivou



$$L_{eq} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T} 10^{0.1 L_i}$$

t_i - trajanje i-tog nivoa zvuka L_i
 T - ukupno vreme uzorkovanja
 n_i - broj uzoraka nivoa L_i
 n - ukupan broj uzoraka

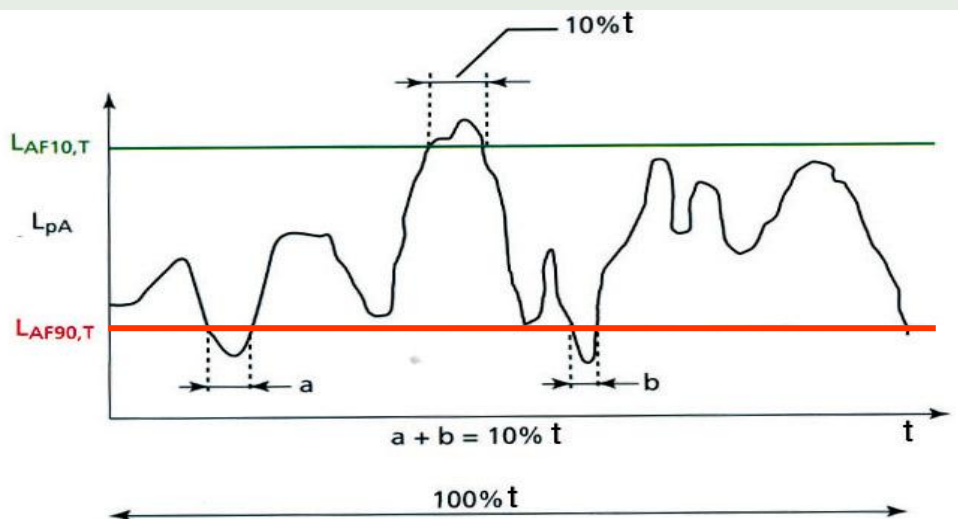
$$L_{eq} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{n} 10^{0.1 L_i}$$

- ▶ Izražavanjem vremenski promenljivog nivoa zvuka (buke) pomoću ekvivalentnog nivoa uspostavlja se veza sa **vremenom** kao parametrom koji u proceni štetnog dejstva zvuka (buke) izražava dužinu ekspozicije posmatranom nivou i **frekvencijom** korišćenjem A-težinske krive pri merenju promenljivog nivoa zvuka (buke).
- ▶ Statističkom analizom vremenski promenljivog zvuka u amplitudnom domenu, mogu se izračunati i procentualni nivoi L_n , koji predstavljaju nivoe koji su premašeni u $n\%$ ukupnog mernog vremena.

$L_{10}[\text{dB(A)}]$ – nivo koji je premašen u 10% posmatranog vremenskog intervala

$L_{50}[\text{dB(A)}]$ – nivo koji je premašen u 50% posmatranog vremenskog intervala

$L_{90}[\text{dB(A)}]$ – nivo koji je premašen u 90% posmatranog vremenskog intervala



➤ Ako je verovatnoća raspodele nivoa približna Gausovoj tada važi relacija:

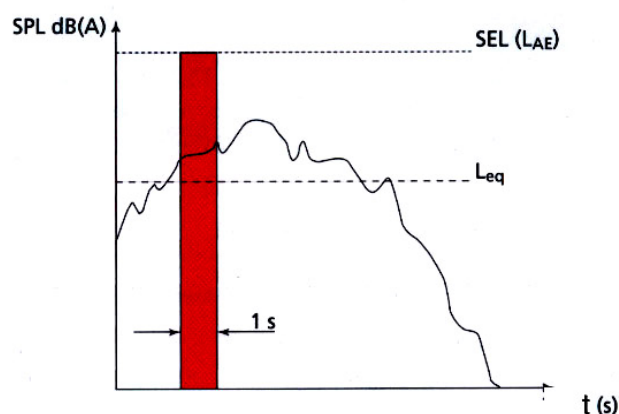
$$L_{eq} = L_{50} + \frac{L_{10} - L_{90}}{60}$$

▶ ANALOGIJA



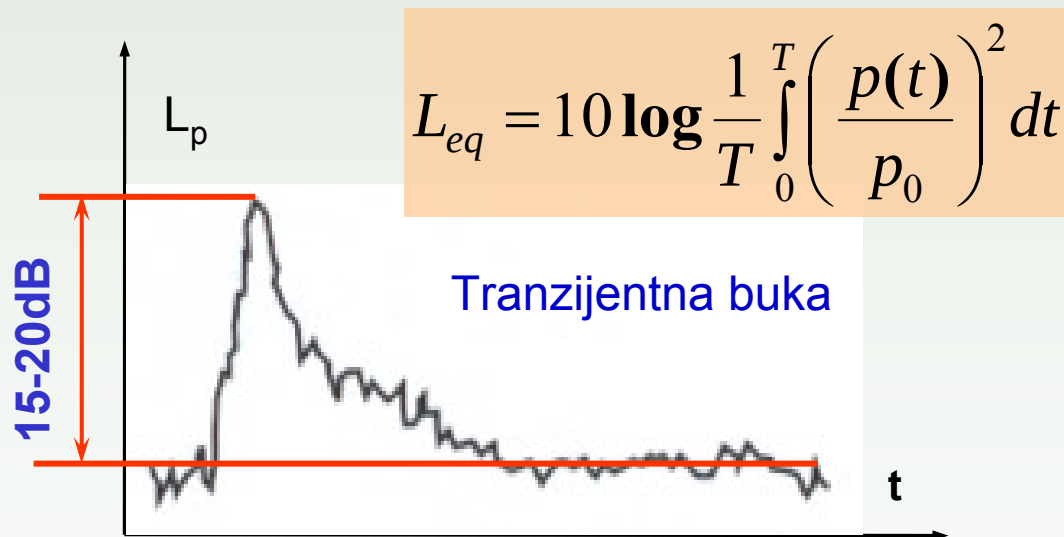
Strujomer ne pokazuje trenutnu potrošnju električne energije već nam omogućava da povremenim očitavanjem utvrdimo **ukupnu potrošenu energiju** u određenom periodu, što odgovara veličini **SEL**. Račun koji plaćamo ne zavisi od toga kako smo trošili energiju već koliko smo ukupno potrošili.

Ako ukupnu potrošenu energiju podelimo sa odgovarajućim vremenskim periodom dobićemo **prosečnu angažovanu električnu snagu** izvora, što odgovara veličini **Leq**. Sada možemo da znamo kako smo prosečno trošili energiju.



SEL opisuje ukupnu zvučnu energiju u posmatranom vremenskom intervalu, dok Leq opisuje vremenski usrednjenu vrednost zvučne energije – zvučnu snagu.

- ▶ Zvučni događaji gde je razlika između maksimalnog i pozadinskog nivoa zvuka (buke) velika, predstavljaju tranzijentne (kratkotrajne) pojave. Na ukupnu zvučnu energiju, a samim tim i na L_{eq} , kao prosečnu zvučnu energiju, utiču samo najviši nivoi koji se od maksimalnog nivoa razlikuju 15÷20dB.
- ▶ Za tranzijentne (kratkotrajne) pojave, kao što su preleti aviona, prolazak automobila, eksplozije i sl., gde merenje počinje i završava u pozadinskoj buci, ekvivalentni nivo zavisi od mernog perioda, čak i ako je ukupna energija posmatrane pojave ista.



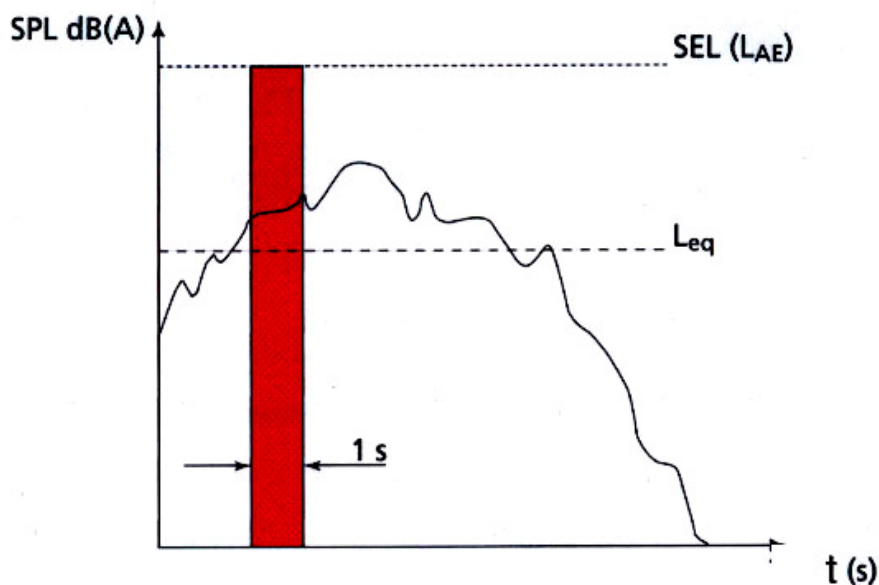
- Za tranzijentne pojave koristi se SEL (Sound Exposure Level - nivo izloženosti zvuku), koji eliminiše uticaj mernog perioda.

SEL se definiše kao konstantni nivo zvučnog pritiska koji ima istu energiju u jednoj sekundi kao i posmatrana pojava.

$$L_{AE} = 10 \log \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt [\text{dB(A)}], T_0 = 1\text{s}$$

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

- Kao i kod ekvivalentnog nivoa, ukupna zvučna energija se računa za ukupni merni period, ali se umesto usrednjavanja u celom mernom periodu usrednjavanje vrši u toku referentnog vremena od 1s. SEL stoga definiše ukupnu zvučnu energiju, a ekvivalentni nivo vremenski usrednjenu zvučnu energiju – zvučnu snagu.



▶ SEL se može primeniti za izračunavanje ekvivalentnog nivoa za dati period T ako su poznate pojedinačne vrednosti SEL-a za različite zvučne događaje, L_{AE} , koji se pojavljuju u tom periodu. Za samo jedan događaj u vremenskom intervalu T veza između SEL-a i L_{eq} je:

$$L_{eq} = L_{AE} - 10 \log \frac{T}{T_0}, T_0 = 1s$$

a za više događaja:

$$L_{eq} = 10 \log \sum_i 10^{0.1 L_{AEi}} - 10 \log \frac{T}{T_0}, T_0 = 1s$$

Primer:

Izračunati ekvivalentni nivo za osmočasovni period rada mašine koja u tom periodu ima 400 ciklusa rada operacija. SEL vrednost za svaki ciklus iznosi 105dB(A).

$$L_{eq} = 10 \log 400 \cdot 10^{105/10} - 10 \log \frac{8 \cdot 3600}{1}$$

$$L_{eq} = 10 \log 400 + 105 - 10 \log 28800$$

$$L_{eq} = 86.4 \text{dB(A)}$$

1. Ekvivalentni nivo.
2. Određivanje ekvivalentnog nivoa.
3. Procentualni nivoi.
4. SEL.
5. Ekvivalentni nivo - SEL.

