

Priestorová akustika

Odporúčaná literatúra:

- + **Tomašovič, P., Rychtáriková, M., Dlhý, D., Gašparíková, M.: Akustika budov – priestorová akustika. STU Bratislava, 2010.**
- + **Kaňka, J.: Akustika stavebních objektu, ERA 2010**

Priestorová akustika skúma kvalitu priestorov z akustického hľadiska berúc do úvahy:

- + **Čo preferujú poslucháči**
- + **Čo preferujú hudobníci/zvuková produkcia**
- + **Vhodnosť priestoru pre jednotlivé zvukové produkcie**
- + **Metódy, ako je možné dosiahnuť stanovené parametre**
- + **Ako eliminovať nežiaduce signály.**
- + **Zakladateľ vedného odboru Priestorová akustika: Wallace Clement Sabine, okolo r. 1890**
- + **Definoval pojem dozvuk, autor riešenia akustiky Symphony Hall, Boston**

Zvuky a hluky: Hluk – nežiadúci zvuk, môže byť škodlivý človeku a jeho úroveň je limitovaná hygienickými normami – ustálený ($\delta < 5\text{dB}$), premenný ($\delta > 5\text{dB}$)

Pasívna akustika:

Urbanistická

- + **Riešenie akustických vlastností vonkajšieho prostredia, hlukové štúdie,**
- + **situovanie stavebných objektov do priestoru z akustického hľadiska**

Stavebná

- + **Riešenie izolačných vlastností stavieb z hľadiska prieniku zvuku**
- + **zvýšenie zvukovej nepriezvučnosti stropov**
- + **zlepšenie pozdĺžnej zvukovej izolácie medzi susednými miestnosťami**
- + **riešenie vetrania, okien, ostatných častí tak, aby sa minimalizoval prienik zvuku a hluku**

Priestorová

- + ***optimalizácia parametrov priestoru z hľadiska šírenia zvuku v miestnostiach (čas dozvuku, homogenita zvuku,...) s ohľadom na účel ich využitia***
- + **znižovanie hladiny hluku vo výrobných/ iných priestoroch**

Aktívna akustika: Elektroakustické zariadenia v miestnostiach. Ich inštalácia, korekcie zvuku,...

Priestorová akustika - delenie podľa modelu šírenia zvuku:

Vlnová akustika:

- + teória akustického poľa uzatvorených priestorov**
- + množina riešení, nevyhnutná ak vlnové dĺžky zvukových vln sú porovnateľné s rozmermi miestností**
- + Vlnová teória akustického poľa vychádza z matematického modelovania chovania sa vlny v uzatvorenom priestore – vlnové rovnice, vychádzajúce z lineárnej akustiky (linearizované Eulerove rovnice):**
 - + Pohybových rovníc (zákon zachovania hybnosti)**
 - + Stavových rovníc (zákon zachovania stavu)**
 - + Rovníc kontinuity (zákon zachovania hmoty)**
- + Riešenie vedie na nehomogénne parciálne diferenciálne rovnice riešiteľné len pre určité okrajové podmienky (napr. pravouhlé súradné systémy, určitý typ budiaceho signálu a pod.)**
- + Výsledky popisujú chovanie sa priestoru z hľadiska jednotlivých frekvencií v priestore a čase**
- + Akustické veličiny sú funkciou polohy bodu a času – vieme parametre v určitom bode priestoru, ale nie vlastnosti skúmanej miestnosti (hodnoty sa bod od bodu líšia)**

Jeden z jednoducho použiteľných záverov: riešenie módov priestoru

Geometrická akustika

- + Veľké a najmä nepravidelné priestory – vlnová akustika nedáva jednoducho dosiahnuteľné výsledky**
- + Použitá analógia s teóriou optiky – zvuk reprezentujú zvukové lúče (papršky, úzke výseky guľovej zvukovej vlny)**
- + Dĺžka vlny musí byť podstatne menšia ako rozmery priestoru**
- + Lúče sa odrážajú od priestorových prvkov v súlade so základnými pravidlami mechaniky/optiky**

Predpokladá sa:

- + priamočiare šírenie zvukových lúčov**
- + platnosť Snellovho zákona (uhol dopadu = uhol odrazu)**
- + superpozícia energie pri sčítaní príspevkov výkonov lúčov dopadajúcich súčasne do skúmaného bodu priestoru – energetické hľadisko šírenia zvukovej vlny**
- + pri dopade veľkého množstva lúčov rôznych intenzít z rôznych smerov predpokladáme rovnomerné rozloženie amplitúd v priestore a ich náhodné fázy (difúzne zvukové pole, umožňuje zanedbať interferencie a ohyb vln)**
- + Zvuková energia sa sčíta/pohlcuje/odráža – činiteľ odrazu/pohltivosti plochy (priestoru)**

Geometrická akustika silne zjednodušuje mechanizmy šírenia zvuku, ale je veľmi často používaná v technickej praxi (návrh priestorov a ich úpravy, dozvuk a jeho úpravy, merania a pod.)

Štatistická akustika

 **Na rozdiel od vlnovej akustiky pracuje s priemernými hodnotami výkonových veličín akustického poľa:**

 **Hustota zvukovej energie**

 **Intenzita zvuku.**

Predpoklady:

 **Veľkosť energie zvukového poľa v ľubovoľnom bode skúmaného uzatvoreného priestoru je daná súčtom stredných hodnôt energií, dopadajúcich do skúmaného bodu odrazom od stien**

 **Hustota zvukovej energie je vo všetkých bodoch priestoru rovnako veľká**

 **Uhly, pod ktorými dopadá zvuková energia do daného bodu sa vyskytujú s rovnakou pravdepodobnosťou.**

Vlnová rovnica šírenia vlny v prostredí typu kváder:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2}$$

$$f_n = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Objem $V (m^3)$	Výška $v (m)$	Šírka $\bar{s} (m)$	Dĺžka $d (m)$
Do 300 m ³	1	1,25	1,6
Stredne veľké miestnosti do 800 m ³	1	1,6	2,6
Miestnosti s nízkou svetlou výškou	1	2,5	3,2
Veľké miestnosti	1	1,25	3,3
Kiná:			
907 m ³	1	1,9	3,0
1408 m ³	1	2,2	3,5 (3,3)
2073 m ³	1	2,2	3,7
2870 m ³	1	2,3	3,8
3557 m ³	1	2,5	4,0

Geometrická akustika

Plošná kombinácia odrazivých a pohltivých vlastností priestoru pri predpokladaní základných pravidiel šírenia sa odrazených vln v priestore

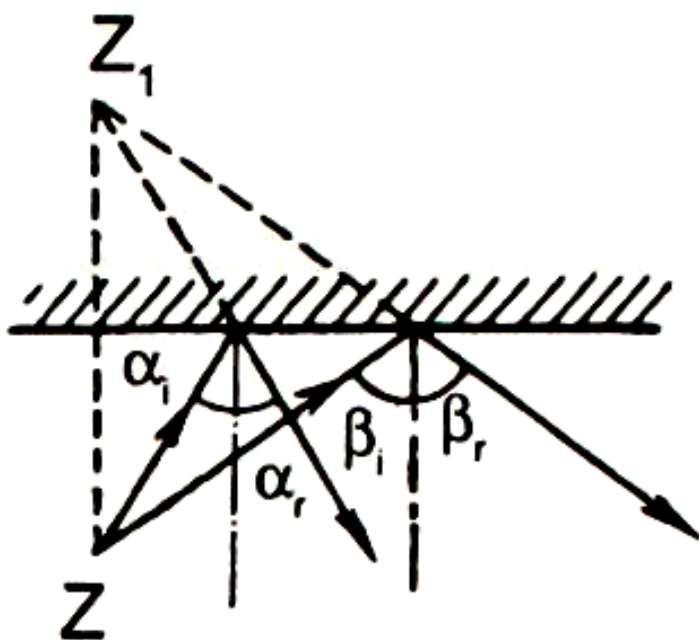
Využíva rovinné, duté a vypuklé tvary povrchov na odraz papršku zvuku a filtráciu zvuku

Staré Grécko, Taliansko – akustické riešenie amfiteátrův a špeciálnych priestorov je založené na geometrickej akustike



(obr.: Epidauros, Grécko, 14 000 divákov)

Odraz od rovinného stropu/steny miestnosti



Metóda zrkadlenia zdroja – vytvorenie fiktívnych zdrojov zvuku symetricky usporiadaných okolo odrazovej plochy

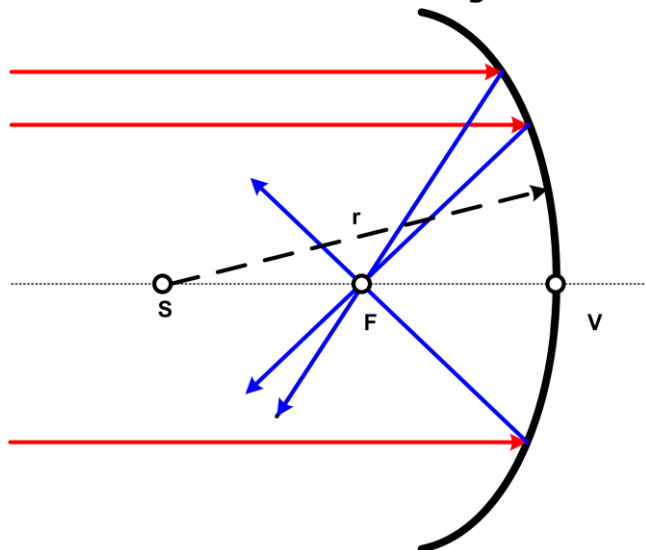
Z – reálny zdroj zvuku

Z₁ – virtuálny zrkadlený obraz

α_i , β_i – uhly dopadu zvukových papršlekov

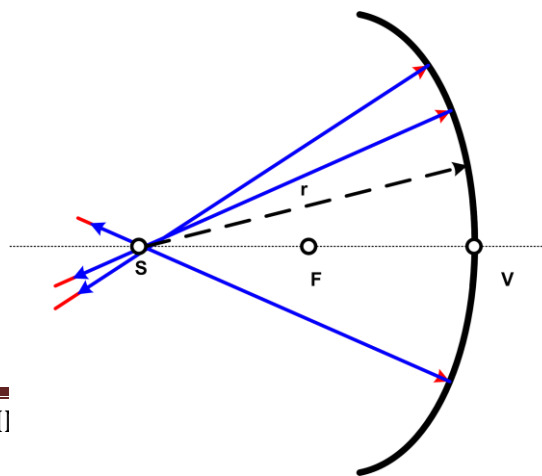
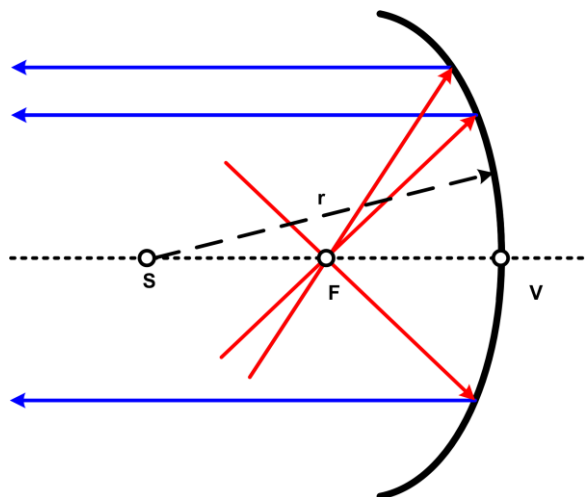
α_r , β_r – uhly odrazu zvukových papršlekov

Odraz od zakrivenej konvexnej plochy:



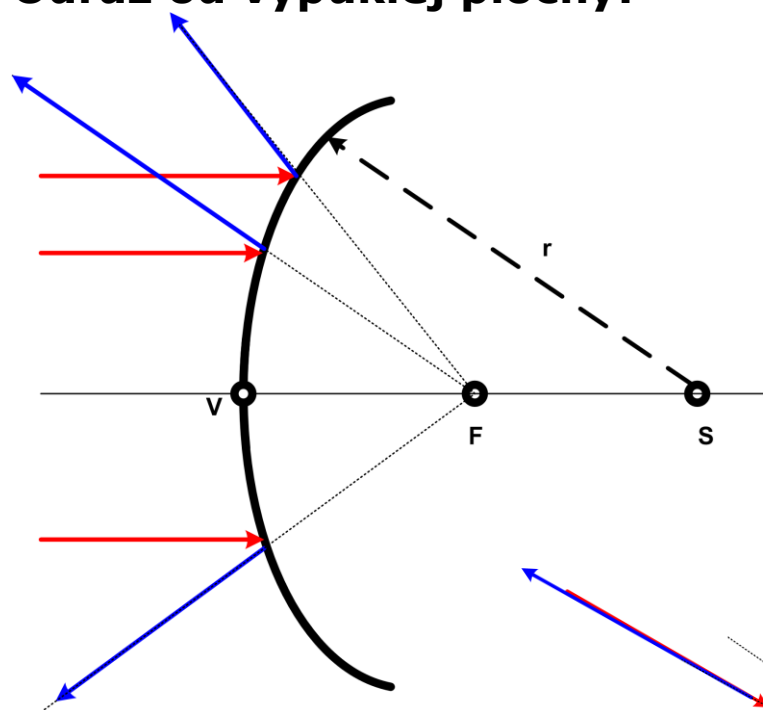
Fyzikálna teória zobrazovania zrkadlom. Platí zákon zhody uhlov dopadu a odrazu (referenčná os S-Vx):

- ✚ Geometrická os plochy prechádza stredom zakrivenej plochy S
- ✚ Os pretína plochu vo vrchole V
- ✚ Vzdialenosť S-V = polomer krivosti plochy r
- ✚ F = ohnisko,
- ✚ F-V ohnisková vzdialenosť $f = r/2$
- ✚ Papršky dopadajúce rovnobežne s geom. osou sa odrážajú do ohniska
- ✚ Papršky prechádzajúce ohniskom smerujú rovnobežne s osou
- ✚ Papršky prechádzajúce stredom S sa odrážajú bez zmeny uhla.

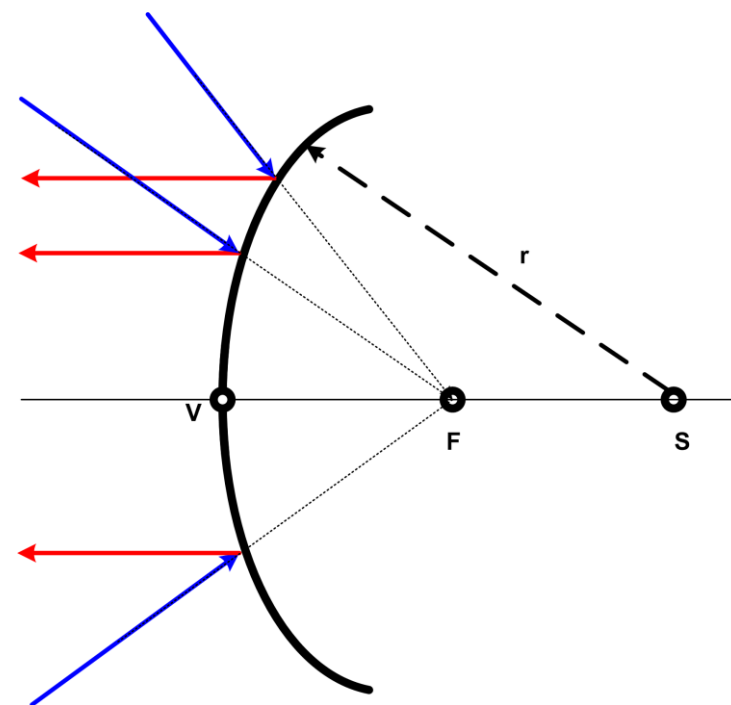
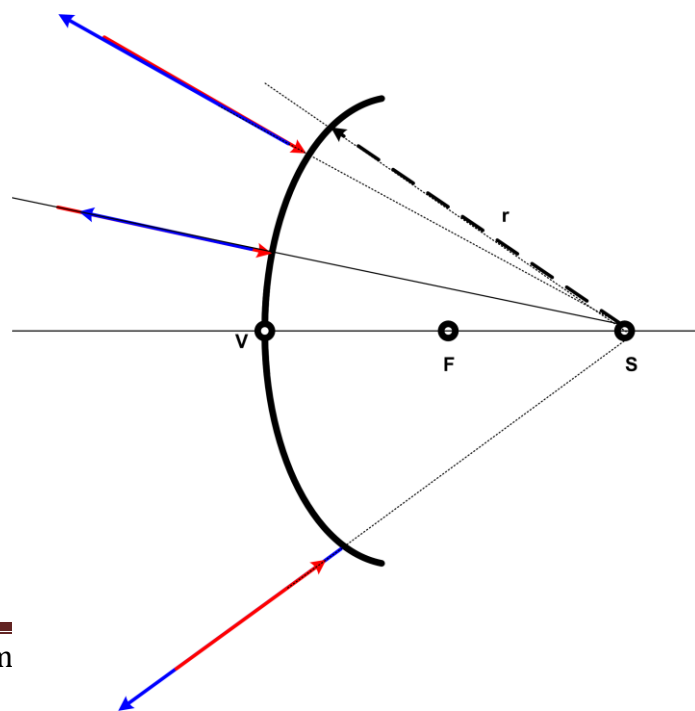


Koncentrácia zvukovej energie na určité miesto / plochu

Odraz od vypuklej plochy:



-  **Divergentnosť odrazených papršlekov**
-  **Zabezpečenie difúzity zvuku**
-  **Papršky rovnobežné s geom. Osou odraz v smere F-Vx**

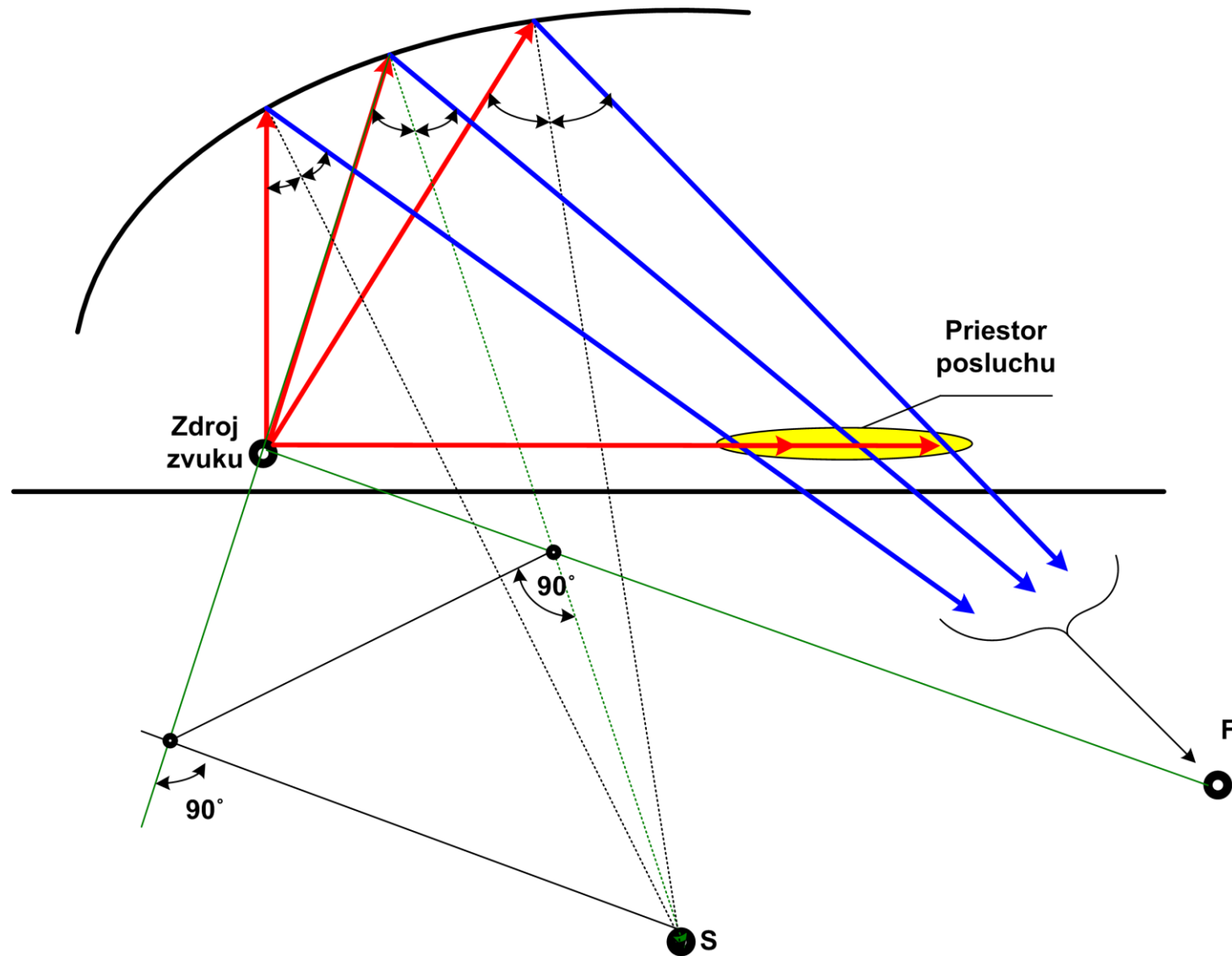


Smerovanie papršlekov závisí na geomerickom tvare zakrivenej plochy:

-  **Eliptická plocha: zbiehavosť odrazených lúčov**
-  **Parabolická plocha: rovnobežnosť**
-  **Hyberbolická plocha: rozptyl akustických papršlekov**
-  **Kruhová plocha: koncentrácia lúčov do ohniska (v priestorovej akustike len výnimočne)**

V praxi sólový odraz len výnimočne, často je kombinovaný – viacnásobný na susedných/rovnobežných/kolmých stenách (podlaha-stena, dve steny,....)

Využitie odrazu na distribúciu zvuku na posluchové miesto



Podmienky používania odrazných plôch

-  **Dostatočné rozmery plochy: $L_{\min} = 170 / f_{\min}$**
-  **Dostatočná hmotnosť plochy: min. 20 kg.m^{-2}**
-  **Dostatočná odrazivosť: činiteľ absorpcie $\alpha < 0,1$ v oblasti potrebných frekvencií**
-  **Oneskorenie zvuku a jeho diferencie**

Rozdiel medzi priamym a odrazeným zvukom v mieste príjmu do 30 ms – dochádza len k zvýšeniu hlasitosti

Vyššie oneskorenia – zníženie slabikovej zrozumiteľnosti až echo.

Štandardné umiestnenie zdroja zvuku: 150 cm nad podlahou, pre plošne rozhláhlé zdroje (orchestra a pod.) sa zdrojový bod umiestňuje v ťažisku zaberanej plochy

Štatistická akustika

Pretože exaktné riešenie vlastností zvukového poľa v uzatvorenom priestore je veľmi obtiažne a vyžaduje použiť množstvo zjednodušujúcich predpokladov, pre bežné typy priestorov je možné obmedziť riešenie na energetickú bilanciu zvukových vln.

Zakladateľ štatistickej teórie Wallace Clement Sabine (1868 – 1919) – matematicky definoval pojem dozvuku a odvodil jeho závislosť na energetických vlastnostiach priestoru.

**Rovnica kontinuity – energetická bilancia zvukového poľa:
Súčet potenciálnej, kinetickej a akustickej intenzity zvukového poľa je nulový**

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{2} \frac{p^2(t)}{\rho_0 c_0^2} + \frac{1}{2} \rho_0 \cdot v_i(t) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} [p(t) v_i(t)] = 0$$

Kde:

p – akustický tlak

ρ_0 – merná hustota prostredia

c_0 – rýchlosť šírenia sa vlny

v_i – akustická rýchlosť i-tej zložky energie

x – súradnica v priestore

Merný tok akustickej energie (okamžitý, stacionárne pole): $i_i(t) = p(t) \cdot v_i(t)$

Akustická intenzita:

$$I \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

Hladina akustickej intenzity:

Hladina akustickej intenzity:

$$L_I \equiv 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad I_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Akustická intenzita pre rovinnú harmonickú postupnú vlnu:

Akustický tlak: $p = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = \rho_0 \omega |A| \sin(\omega t - k \cdot x + \varphi_A)$

Akustická rýchlosť: $v = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = k |A| \sin(\omega t - k \cdot x + \varphi_A)$

Vlnový odpor prostredia: $z_0 = \frac{p}{v} = \frac{\rho_0 \cdot \omega}{k} = \rho_0 c_0$

Hustota (okamžitá) akustickej energie: $i_{(t)} = \rho_0 k^2 |A|^2 \sin^2(\omega t - k \cdot x + \varphi_A)$

Akustická intenzita: $\{v = p / \rho_0 c_0\}$

$$I = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) \cdot v(t) dt = \frac{1}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot T} \int_{-T/2}^{T/2} p^2(t) dt = \frac{p_{ef}^2}{\rho_0 \cdot c_0}$$

Hustota akustickej energie (akustický výkon):

$$W_S = \oiint_{(S)} I \cdot n dS = \sum_i W_i$$

n – jednotkový vektor v smere normály k elementu plochy dS
 W_i – parciálne zdroje/spotrebiče

Hladina akustického výkonu:

$$L_W \equiv 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \qquad W_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

Spektrum signálu a výkon

Výkonová spektrálna hustota: výkon, pripadajúci na šírku pásma 1 Hz

Výkon periodického signálu - stredná hodnota okamžitého výkonu integrovaného cez periódu signálu:

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x^2(t) dt$$

Šírka pásma:

 **ideálny filter – obdĺžniková charakteristika**

- ✚ reálny filter – definovaný poklesom prenosu o 3 dB, alebo
- ✚ efektívnou šírkou pásma (šírka pásma ideálneho filtra prepúšťajúceho rovnaký výkon bieleho šumu ako reálny filter)

spektrálna analýza s podporou analógovej alebo digitálnej filtrácie signálu

- ✚ oktavové filtre $\{f_{c2} = 2 \cdot f_{c1}, f_d = 0,707 \cdot f_c, f_h = 1,41 \cdot f_c\}$ $f_{c0} = 31,5 \text{ Hz}$
- ✚ tretinooktavové filtre $\{f_{c2} = 2^{1/3} \cdot f_{c1}, f_d = f_c / 2^{1/6}, f_h = 2^{1/6} \cdot f_c\}$

Digitálna oblasť: výpočet spektra cez DFT (FFT):

**Vzorkovanie signálu so vzorkovacou frekvenciou f_s
kvantovanie na konečný počet hladín**

DFT:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j(2\pi/N) \cdot nk}$$

IDFT:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{+j(2\pi/N) \cdot nk}$$

Spektrum s charakterom diskretných čiar, každá odpovedá frekvenčnému pásmu so šírkou:

$$B = f_s / N \quad (N - \text{počet vzoriek, šírka okna})$$

a strednou frekvenciou: $f_c = k \cdot f_s / N$, $k = 1, 2, 3, \dots, N-1$

Všetky spektrálne čiary majú rovnakú šírku pásma (analýza s konštantnou šírkou pásma)

Operácie s akustickými výkonmi:

**✚ násobenie výkonu n-krát: $L_n = L_i + 10 \cdot \log n$
(predpokladáme nekoherentné zdroje)**

**✚ Zmena vzdialenosti od zdroja z hodnoty r_1 na r_2 :
 $L(r_2) = L(r_1) + 20 \cdot \log (r_1 / r_2)$**

Dvojnásobná vzdialenosť: pokles intenzity o 6 dB (voľné ak. pole, rovinná vlna)

✚ Sčítanie výkonových hladín cez šírku pásma (konštantné šírky pásma):

$$L(\Delta f) = 10 \cdot \log (10^{0,1L(\Delta f_1)} + 10^{0,1L(\Delta f_2)} + \dots + 10^{0,1L(\Delta f_n)}); \quad \Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2 + \dots + \Delta f_n$$

(pri meraní spojitého spektra oktávovým analyzátorom sú hladiny o 4,8 dB vyššie použítí tretinooktávového filtra)

Ekvivalentná trvalá hladina: stála hladina hodnoty, že má rovnaké fyziologické

$$L_{ekv} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^N t_i \cdot 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad \begin{array}{l} \text{ako pri} \\ \text{takej} \\ \text{účinky ako} \end{array}$$

premenlivá úroveň – energetická stredná hodnota akust. tlaku za čas:

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

p – akustický tlak, p_0 – referenčná hladina $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Hladina zvukovej expozície (Sound Exposure Level, SEL): prepočítaná na jednotku času

$$L_{ekv} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad [\text{dB, Pa, Pa}]$$

Energetická bilancia priestoru – zákon zachovania energie:

$$W = V \frac{de}{dt} + W_a \quad [w, -, m^3, J \cdot m^{-3}, s, W]$$

Výkon W vyžarovaný zdrojom je rovný súčtu energie pohltenej stenami W_a a zmeny hustoty zvukovej energie e v priestore s objemom V (ustálený stav).

$$W_a = \alpha \cdot S \cdot \frac{e \cdot c_0}{4}$$

$$[w, -, m^2, J \cdot m^{-3}, m \cdot s^{-1}]$$

α - činiteľ zvukovej pohltivosti

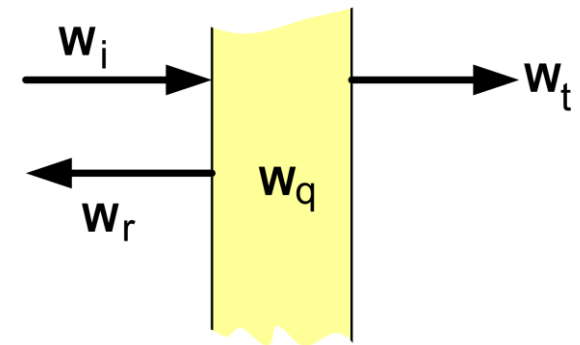
S - povrch priestoru

e - hustota zvukovej energie

c_0 - rýchlosť šírenia zvuku

Činiteľ zvukovej pohltivosti:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} = \frac{W_q + W_t}{W_i}$$



$$W_i = W_r + W_a$$

preto $0 < \alpha < 1$

V čase $t = 0$ vypneme zdroj:

$$-\alpha \cdot S \cdot \frac{e \cdot c_0}{4} = V \frac{de}{dt} \quad \Rightarrow \quad e = e_0 \cdot e^{-c_0 \cdot \alpha \cdot S \cdot t / (4V)}$$

Hustota energie exponenciálne klesá, pre pokles na $1/10^6$ dostaneme:

$$T_{S60} = \frac{0,161.V}{\alpha.S}$$

Platí len pre obmedzené podmienky ($0.2 > \alpha > 0$), upravená konštanta na 0,164 (Sabine)

Eyringov vzťah:

$$T_E = \frac{0,164.V}{-S.\ln(1-\alpha)}$$

Eyringov činiteľ zvukovej pohltivosti:

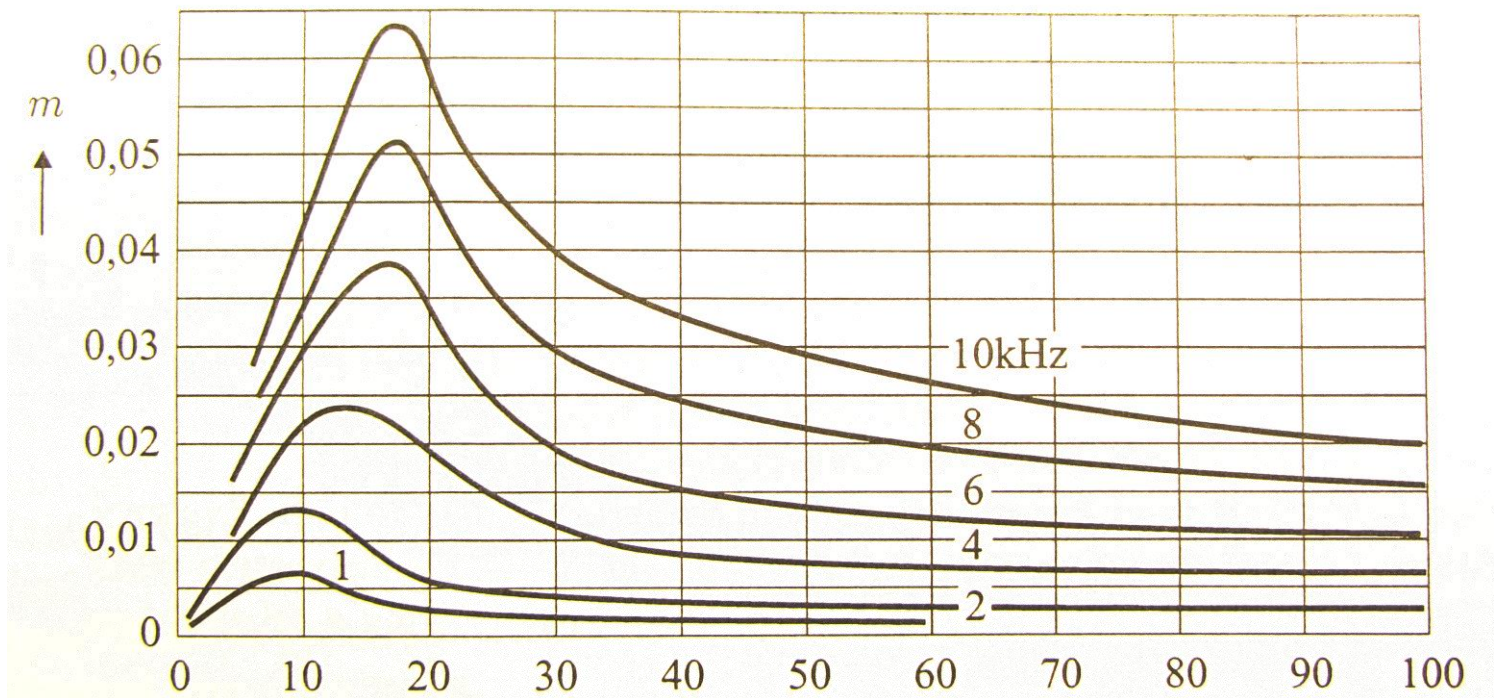
$$\alpha_e = -\ln(1-\alpha)$$

Millington:

$$T_M = \frac{0,164.V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)}$$

Pre hodnoty α blízke nule vzťahy platia len obmedzene, treba pre všetky vzťahy korekcia na tlmenie závislé na vlhkosti:

$$T_{S60} = \frac{0,161.V}{\alpha.S + 4m.V}$$



m – činiteľ tlmenia (0....0,06)

Koeficient absorpcie (ekvivalentná pohltivá plocha):

$$A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i \quad [\text{m}^2, \text{m}^2, -]$$

Priemerná hodnota absorpčnej konštanty:

$$\alpha_m = \frac{A}{S} \quad [-, \text{m}^2, \text{m}^2]$$

Reflexné číslo R (konštanta uzatvoreného priestoru)

$$R = \frac{A}{1 - \alpha_m} \quad [\text{m}^2, \text{m}^2].$$

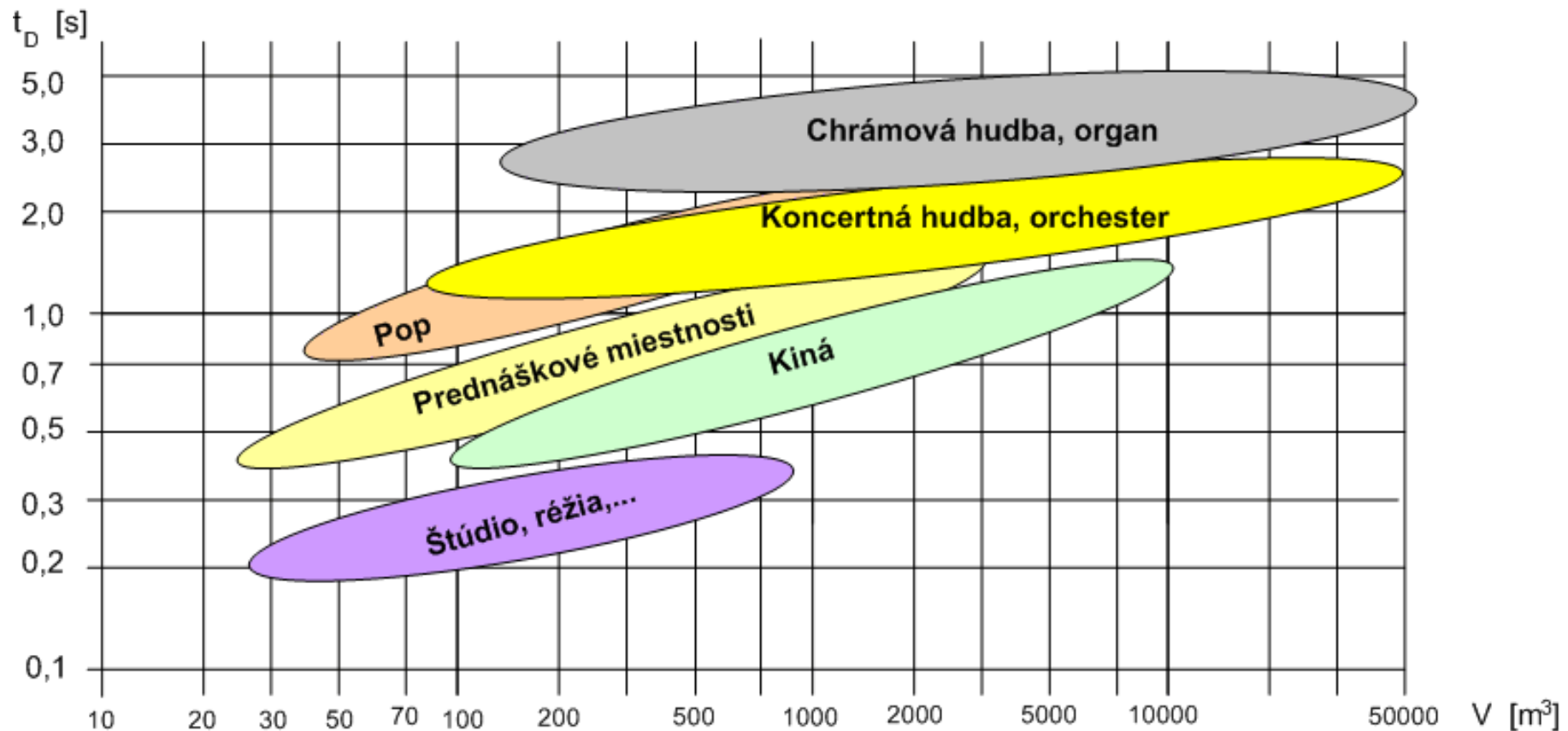
Hladina akustického tlaku v mieste prijímača:

$$L_P = L_W + 10 \cdot \log \left(\frac{D_R}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}, \text{dB}, -, \text{m}, \text{m}^2]$$

DR – smerovitosť zdroja

Subjektívne vlastnosti a objektívne parametre uzatvorených priestorov

Doba dozvuku – základný parameter



V praxi meriame čas dozvuku pre pokles o 30 dB a dobu násobíme 2 x:

$$T_{60} = 2 \cdot T_{30}$$

Frekvenčná závislosť dozvuku

- ✚ Požiadavka na frekvenčne vyrovnanú dobu dozvuku, min. v frekvenčnom pásme 500 Hz – 12 kHz s maximálnym nárastom 1,21,5 x na frekvencii 62 Hz.
- ✚ Tolerancia na rozptyl hodnoty 10 – 20 %

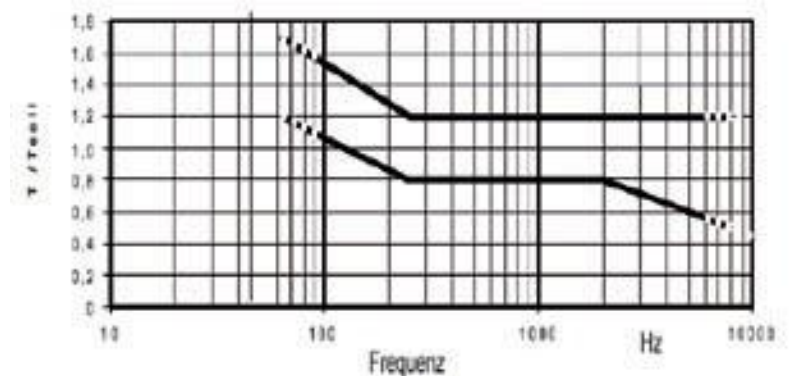
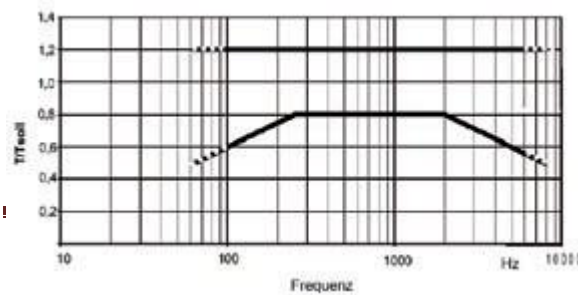
Okrem hodnoty T_{60} sa používa aj hodnota T_{10} – **Počiatočná doba dozvuku** pre pokles o 10 dB.

Doba dozvuku a ekvivalentná pohltivá plocha:

$$T = 0,164 \cdot \frac{V}{A} \quad [s, m^3, m^2]$$

Orientačné stanovenie hodnôt dozvuku:
Priestory skupiny A (počuteľnosť na stredné a veľké vzdialenosti)

Hudobná produkcia: $T = 0,07 + (0,45 \cdot \log V)$



Reč:

$$T = (0,37 \cdot \log V) - 0,14$$

Učebné priestory: $T = (0,32 \cdot \log V) - 0,17$

Športové haly s objemom medzi 2000 a 8500 m³, **jedna aktivita:**
 $T = (1,27 \cdot \log V) - 2,49$

Športová multifunkčná hala: $T = (0,95 \cdot \log V) - 1,74$

Špecifické priestory (skupina B) - Konferenčné, štúdiové priestory:
 $T = 0,4 \cdot \log(V + 62) - 0,38$

Samotná doba dozvuku nie je dostatočným parametrom hodnotenia vlastností priestoru!

Kritéria definované na základe impulzovej odozvy priestoru

Vybudíme priestor akustickým Diracovým impulzom a sledovaním impulzovej odozvy ak. tlaku $p^2(t)$ vyhodnocujeme pokles zvukovej energie $E(t)$ v danom bode:

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \underbrace{\int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau}_{E_{\infty}} - \underbrace{\int_0^t p^2(\tau) d\tau}_{E_t}$$

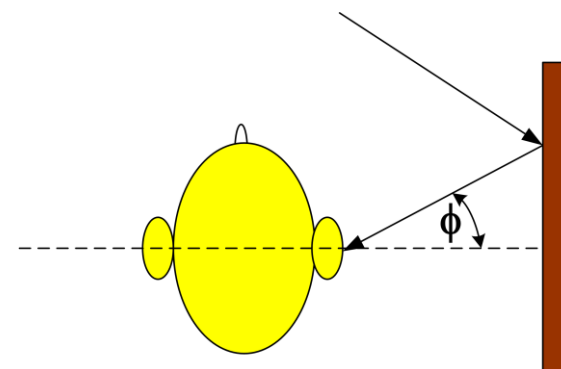
Pokles hladiny akustického tlaku v závislosti na čase:

$$D(t) = 10 \log \left(1 - \frac{E_t}{E_\infty} \right) \quad [\text{dB}]$$

Priestorovosť:

- ✚ Subjektívne vnímanie priestoru okolo seba
- ✚ Súvislosť medzi difúzitou priestoru a odrazmi od bočných stien
- ✚ Miera bočnej energie, definovanej vzťahom:

$$LE = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) \cdot \cos^2 \Phi dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} = \frac{(E_{80} - E_5) \cos^2 \Phi}{E_{80}}$$



Subjektívna hlasitosť:

Primeranosť sluchového vnemu k zdroju, korelácia s objektívnym kritériom "Miera hlasitosti" definovaným:

$$G = 10 \log \frac{E_{\infty}}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt}$$

**Kde $p^2(t)$ je impulzová odozva vo vzdialenosti 10 m
Optimálne normované hodnoty -4... -9 dB**

Jasnosť:

Rozlišovanie rýchlych krátkych tónov, vplyv rýchlosti prvých odrazov, dominantná časť odrazenej energie musí doraziť do 80 ms po priamej vlne:

$$C_{80} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}}$$

Optimálne normované hodnoty 1 ± 2 dB

Zrozumiteľnosť (reálnej reči a logatomoch): pomer správne/všetky

Korelácia s objektívnym kritériom Miera zrozumiteľnosti:

$$C_{50} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}$$

vždy viac ako 0 dB

Väčšina energie musí doraziť k poslucháčovi do 50 ms

Čas ťažiska kvadrátu impulzovej odozvy:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{E_{\infty}} \quad [\text{s}]$$

Optimálne hodnoty pre koncertné sály $t_s = 120 - 140 \text{ ms}$

Pomer nízkych a vysokých frekvencií (spektrálna vyváženosť basov/výšok):

Bass Ratio:

$$BR = \frac{T^{125} + T^{250}}{T^{500} + T^{1000}}$$

High Frequency Ratio:

$$HFR = \frac{T^{2000} + T^{4000}}{T^{500} + T^{1000}} \quad \mathbf{BR > 1, HFR > 1}$$