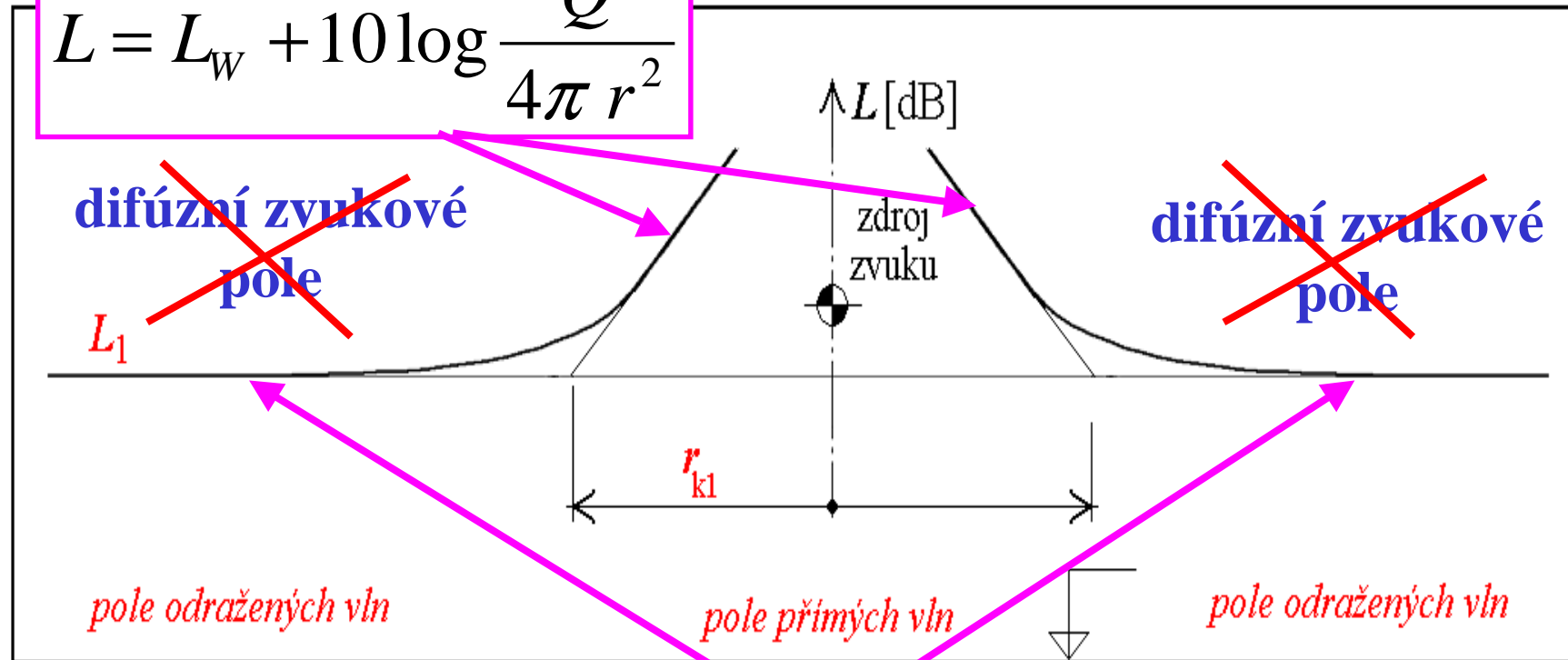


Prostorová akustika

Prostorová akustika se zabývá studiem akustických jevů uvnitř částečně nebo zcela uzavřených prostorů. Cílem není ochrana proti hluku, ale zajištění dobré slyšitelnosti a srozumitelnosti zvuku. Metodami prostorové akustiky se převážně řeší prostory určené k poslechu zvuku a ke sledování produkcí spojených s poslechem zvuku – kina, divadla, koncertní sály, kostely, přednáškové a soudní síně aj. Souhrnně lze tyto prostory označit jako auditoria.

Pole přímých a pole odražených vln difúzní zvukové pole

$$L = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2}$$



$$L_1 = L_w + 10 \log \frac{4(1 - \alpha_m)}{A}$$

Prostorová akustika

- 1) Vlnová akustika
- 2) Geometrická akustika
- 3) Statistická akustika

Vlnová akustika

Stojaté vlnění narušuje
difúznost zvukového
pole – vnímáno jako
změna barvy zvuku

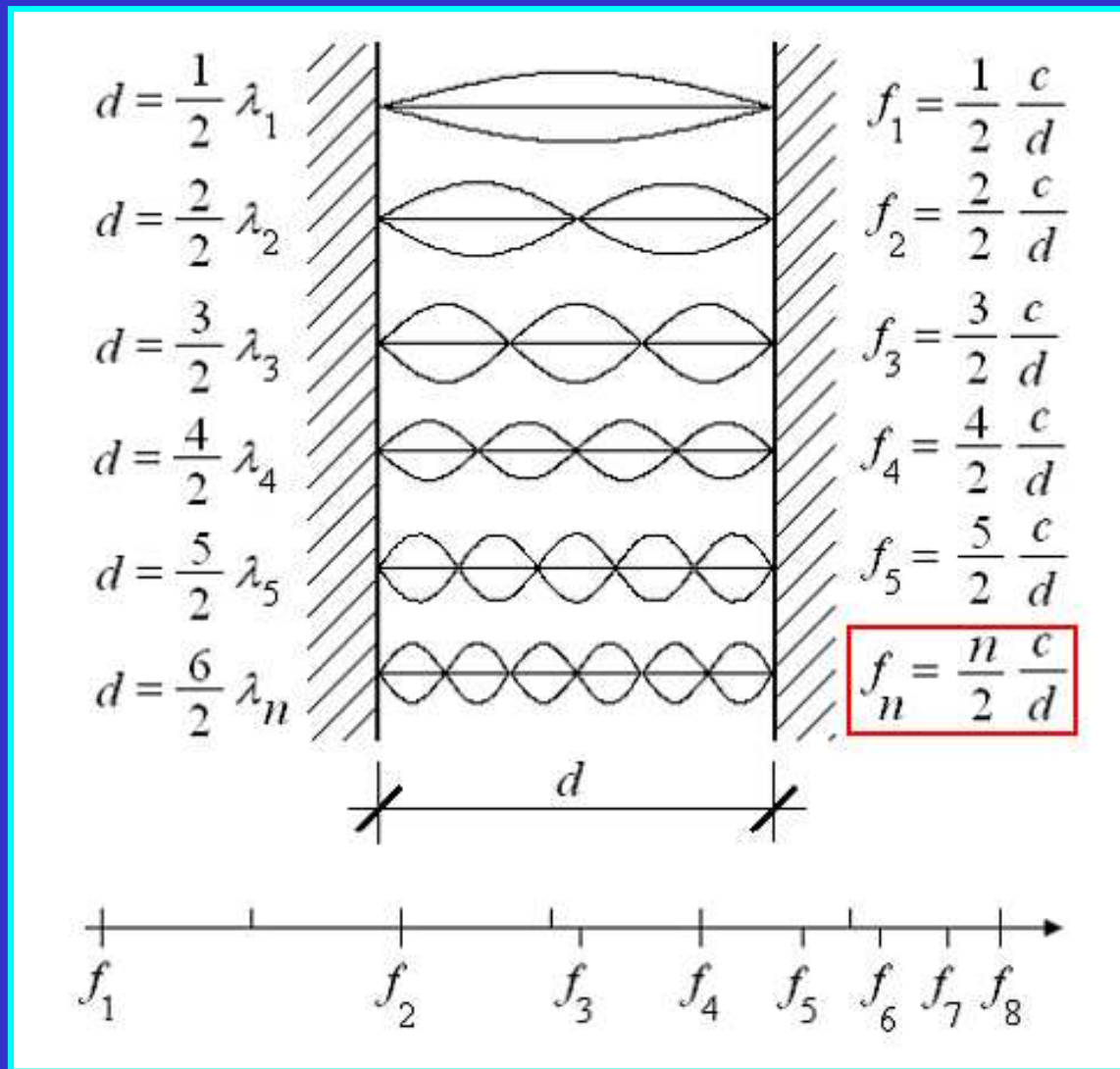
d je násobkem půlvlny

$$d = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

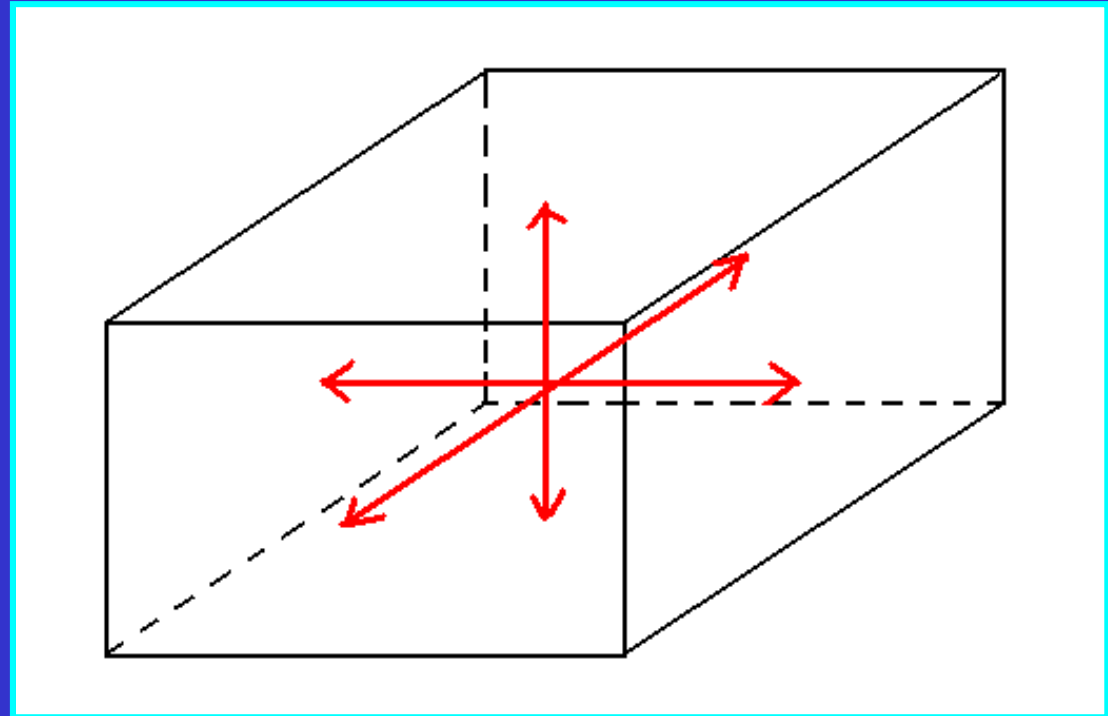
$$d = \frac{nc}{2f}$$

$$f = \frac{nc}{2d}$$



Vlnová akustika

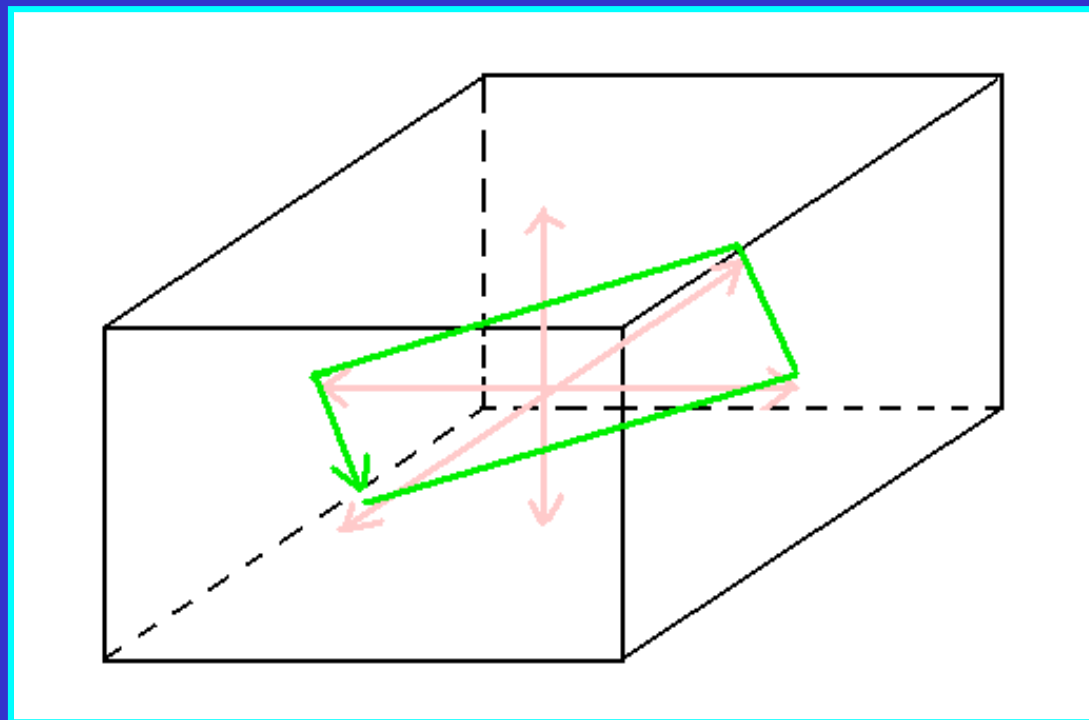
Stojaté vlnění narušuje
difúznost zvukového
pole – vnímáno jako
změna barvy zvuku



osové mody – mezi dvěma stěnami

Vlnová akustika

Stojaté vlnění narušuje
difúznost zvukového
pole – vnímáno jako
změna barvy zvuku

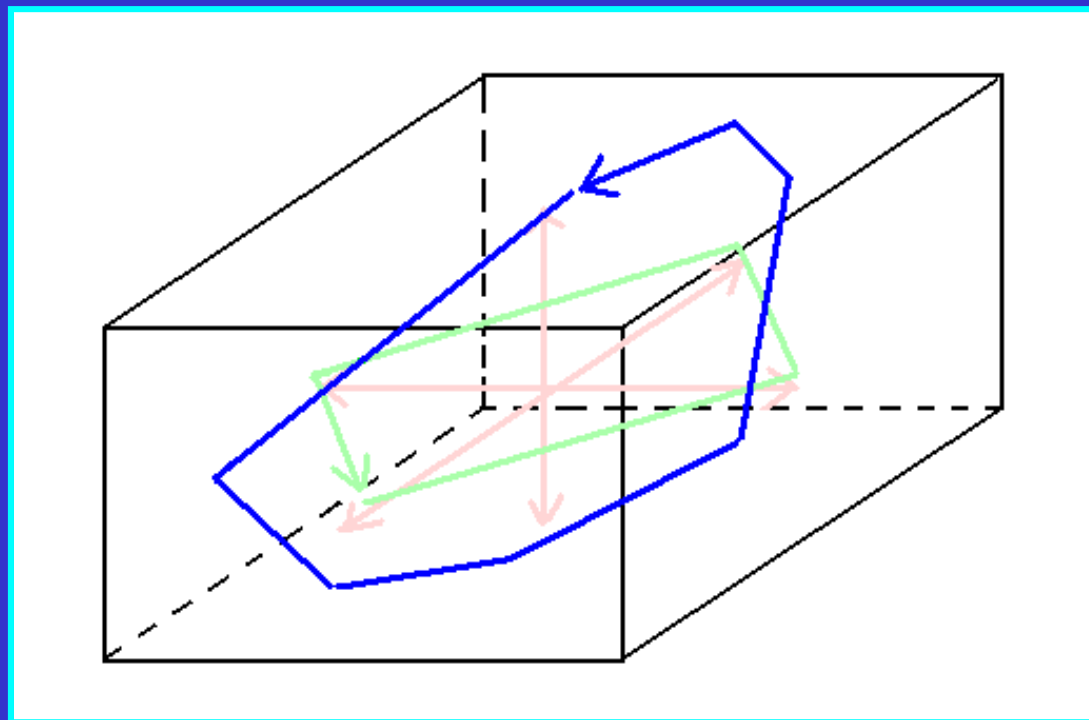


osové mody – mezi dvěma stěnami

tangenciální mody – přes 4 stěny, v rovině
rovnoběžné se zbylou dvojicí stěn

Vlnová akustika

Stojaté vlnění narušuje
difúznost zvukového
pole – vnímáno jako
změna barvy zvuku



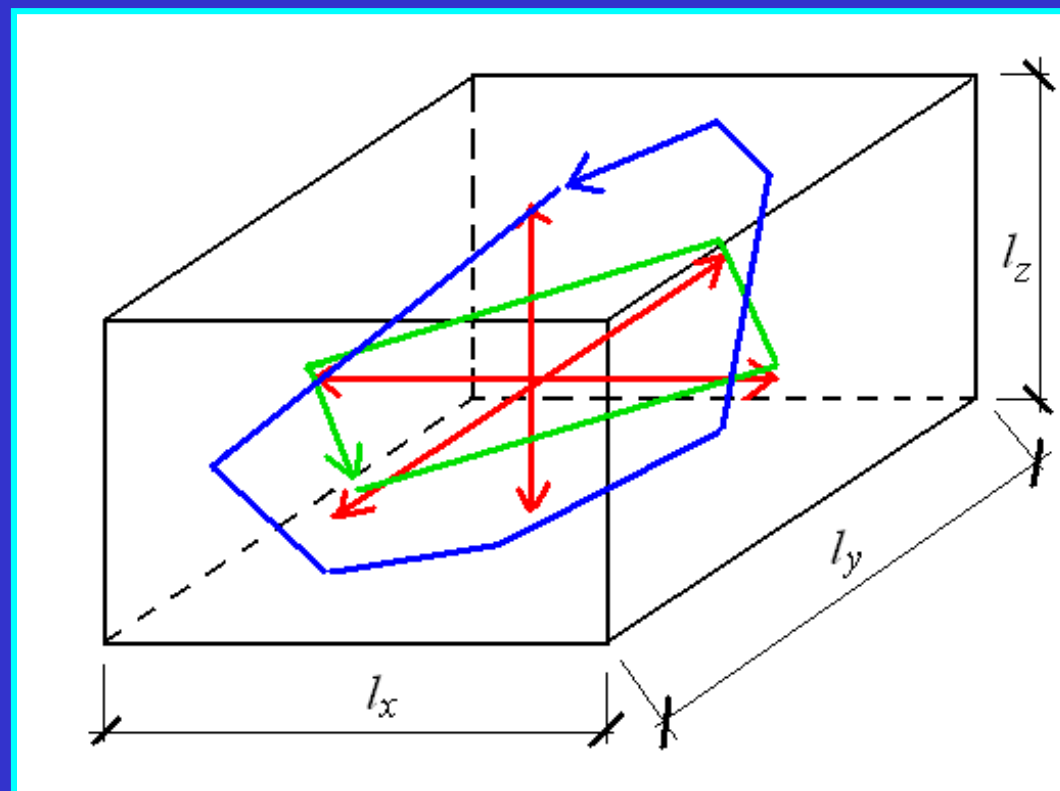
osové mody – mezi dvěma stěnami

tangenciální mody – přes 4 stěny, v rovině
rovnoběžné se zbylou dvojicí stěn

šikmé mody – více stěn, ve skloněné rovině

Vlnová akustika

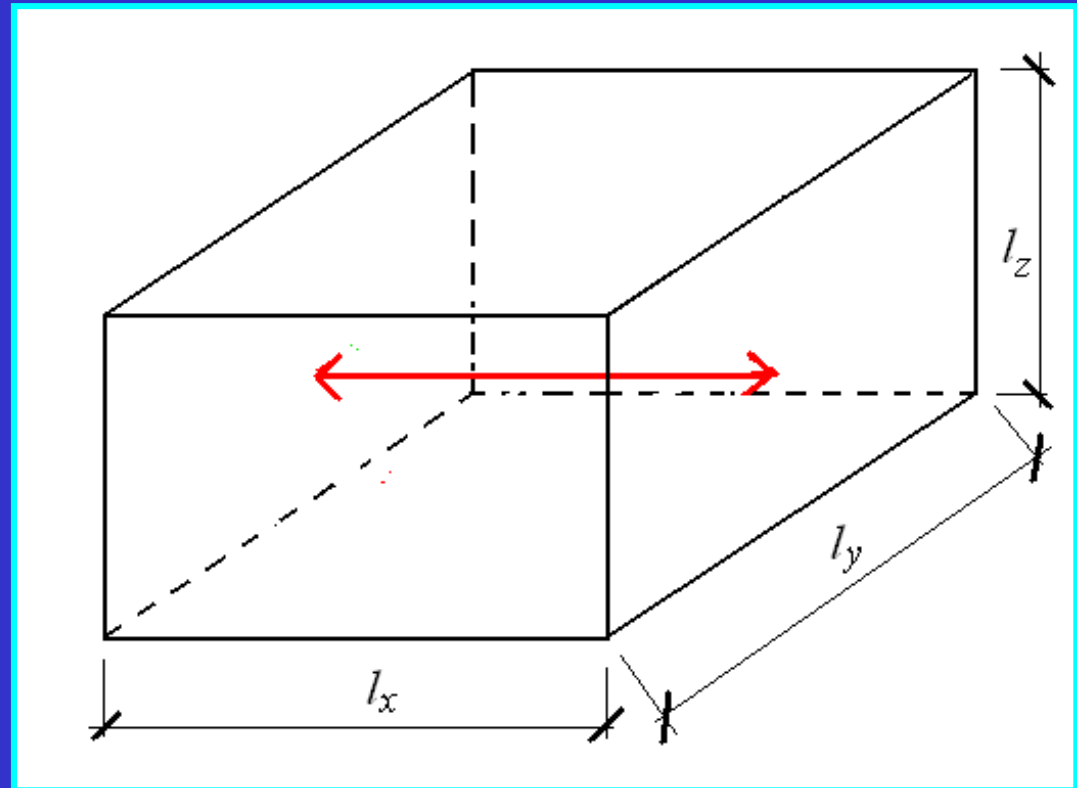
Stojaté vlnění narušuje
difúznost zvukového
pole – vnímáno jako
změna barvy zvuku



$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

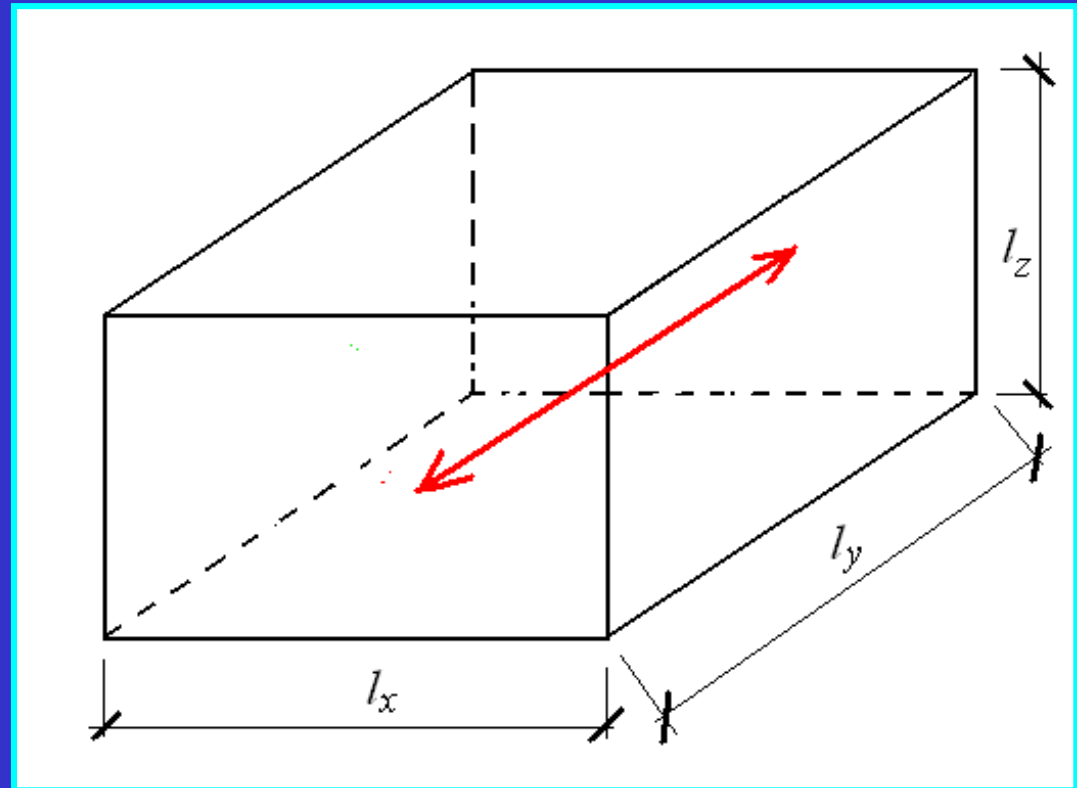
Osový mód ve směru osy x



$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

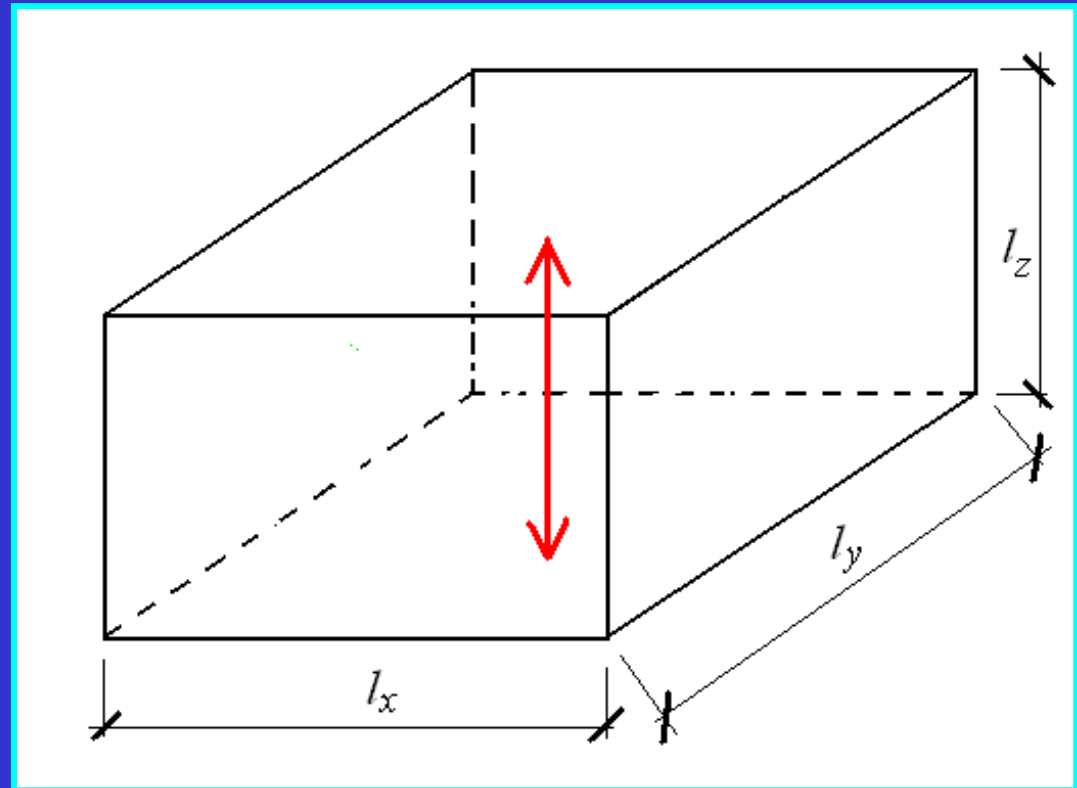
Osový mód ve směru osy y



$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

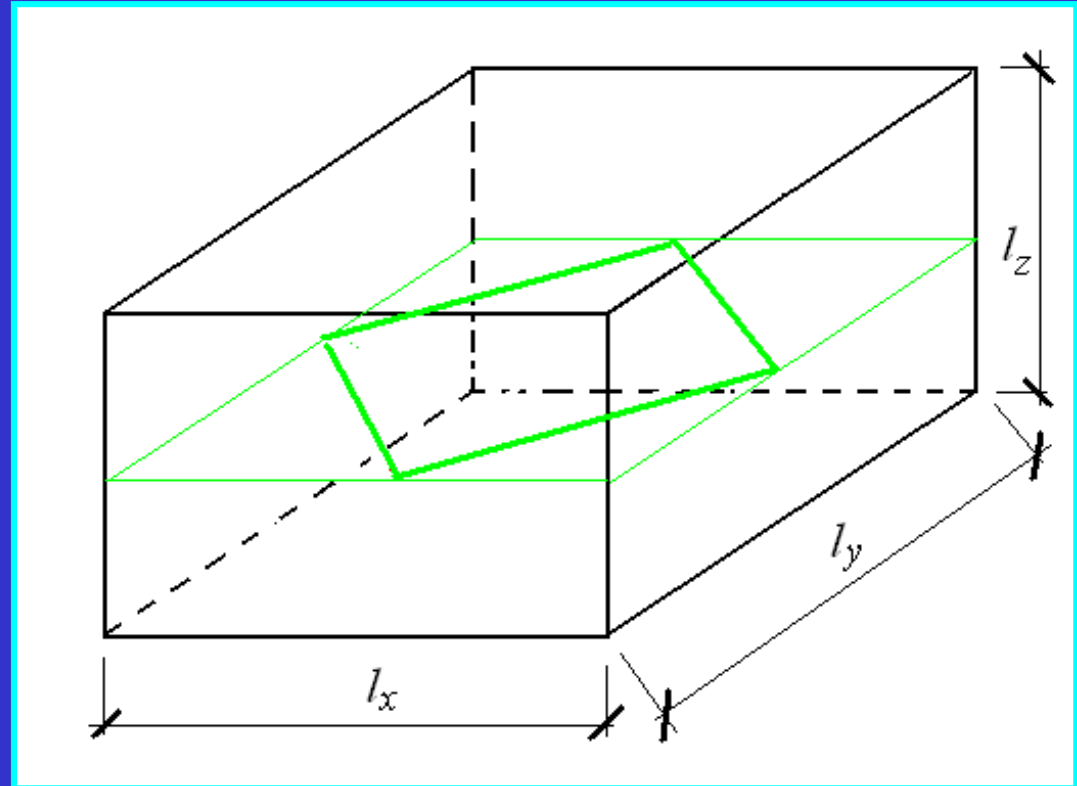
Osový mód ve směru osy z



$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

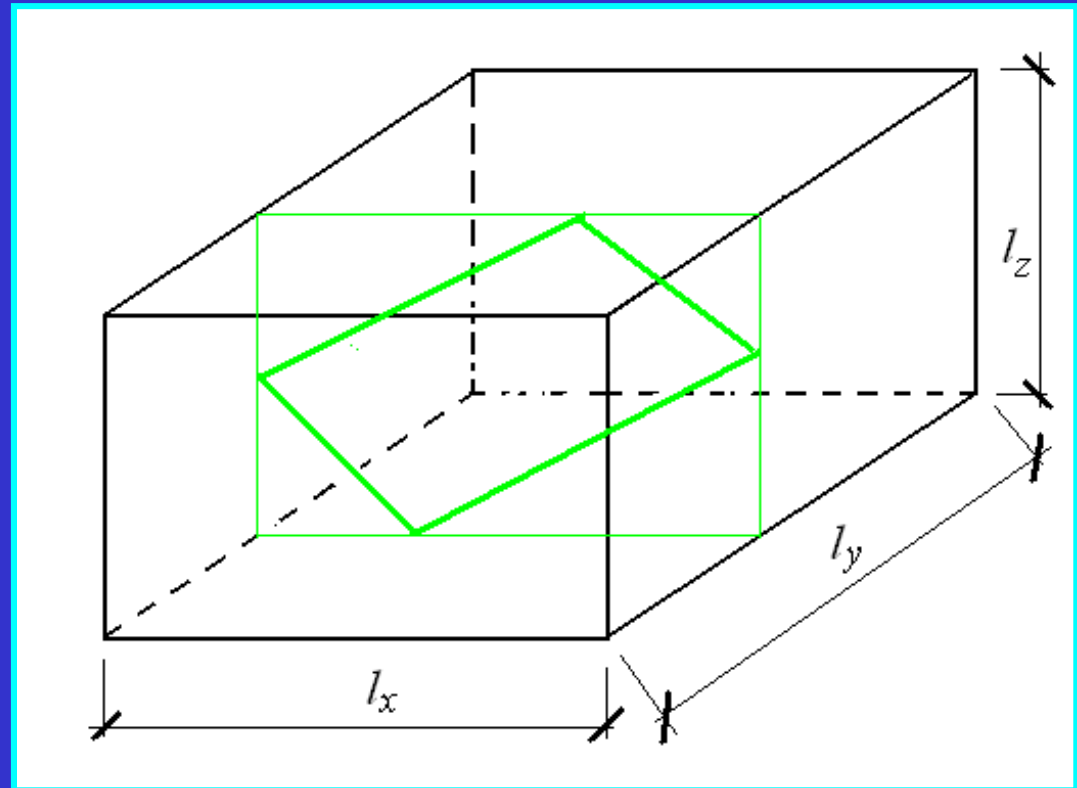
Tangenciální
mód ve směru
os x a y



$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

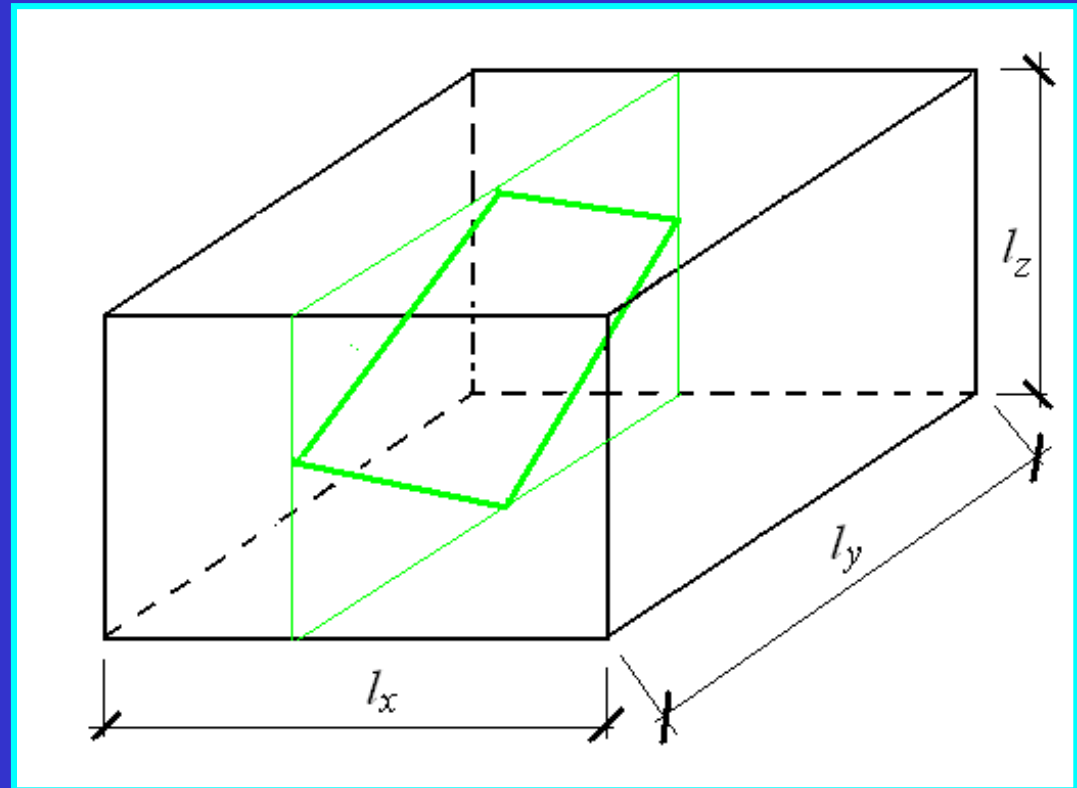
Tangenciální
mód ve směru
os x a z



$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

Tangenciální
mód ve směru
os y a z

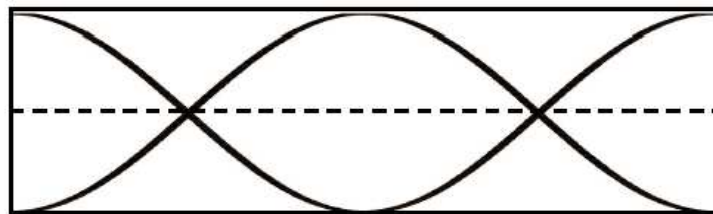
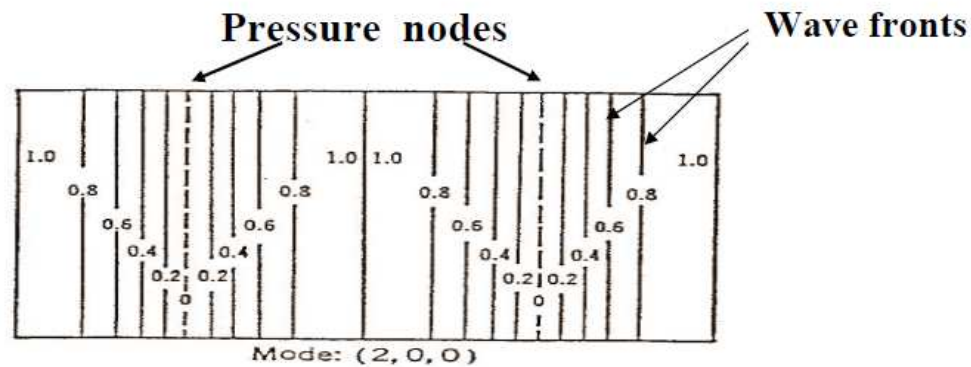


$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Vlnová akustika

AXIAL MODES IN RECTANGULAR ROOMS

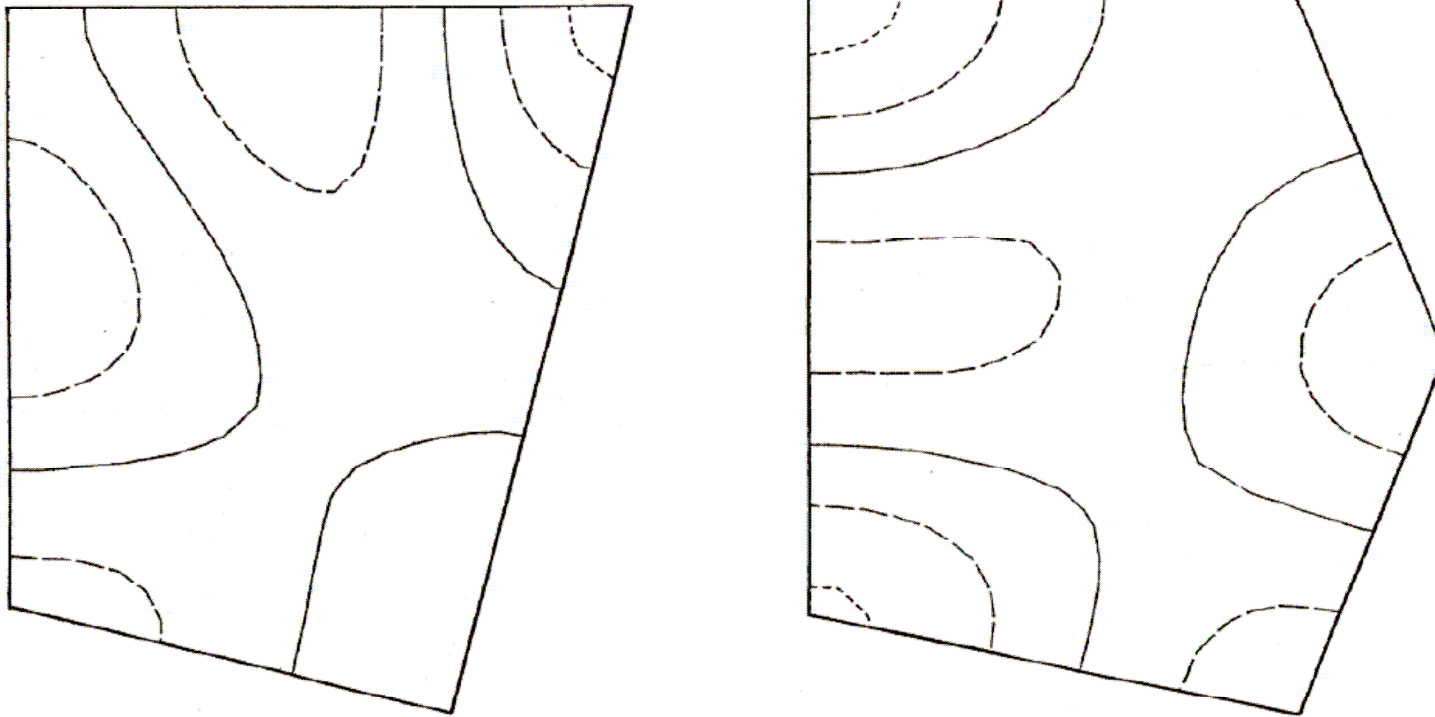
Pressure distribution in (2,0,0) mode



Pressure amplitudes in the standing wave

Vlnová akustika

ROOM RESPONSE – NONPARALLEL WALLS



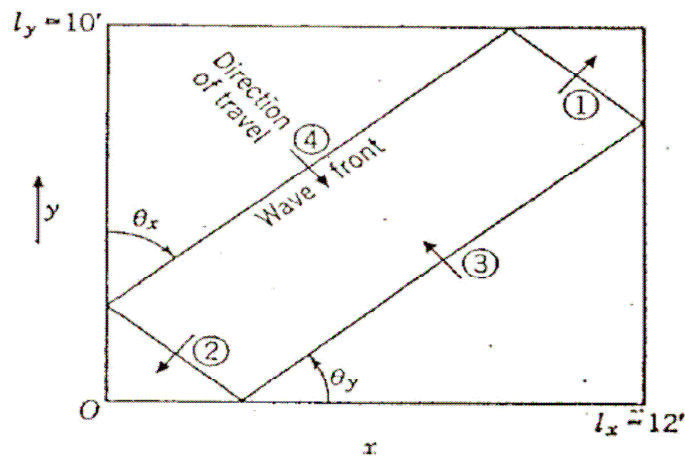
Earl Geddes, Ph.D. dissertation, Penn State 1982

24

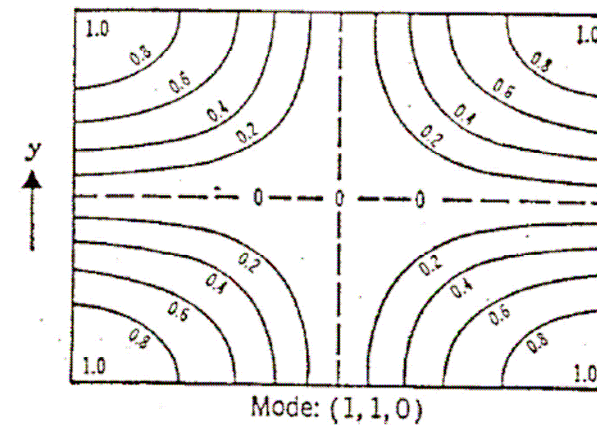
Vlnová akustika

TANGENTIAL MODES IN RECTANGULAR ROOMS

(1,1,0) Tangential mode



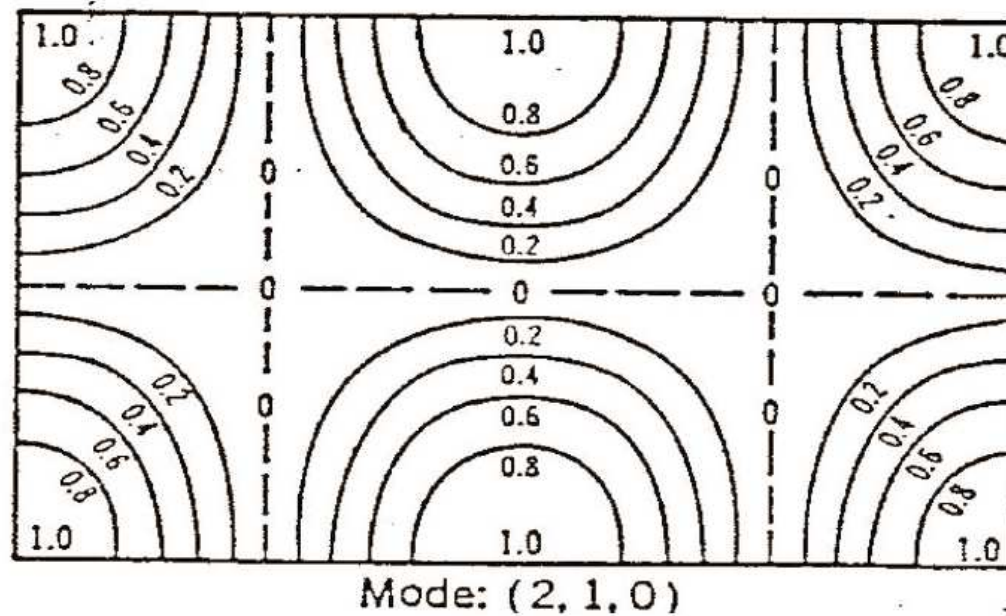
Wave front propagation



Spatial pressure distribution

Vlnová akustika

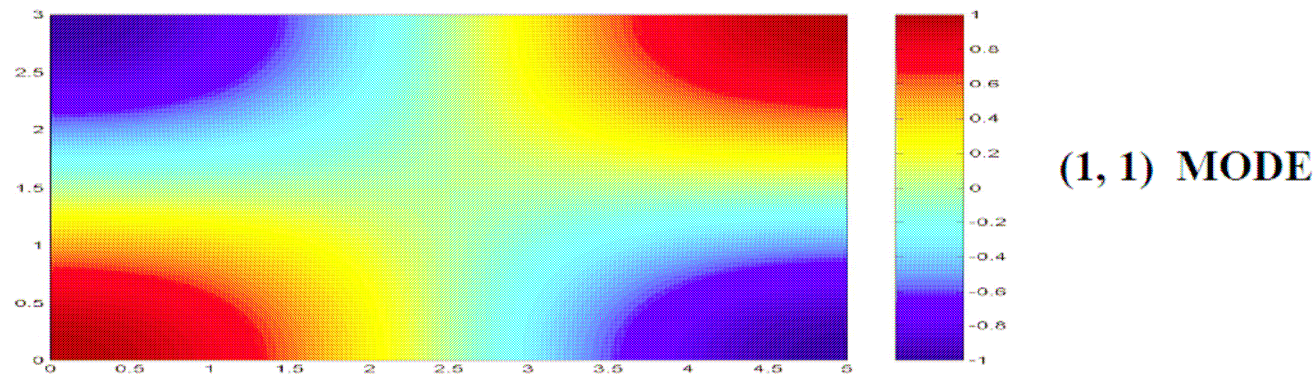
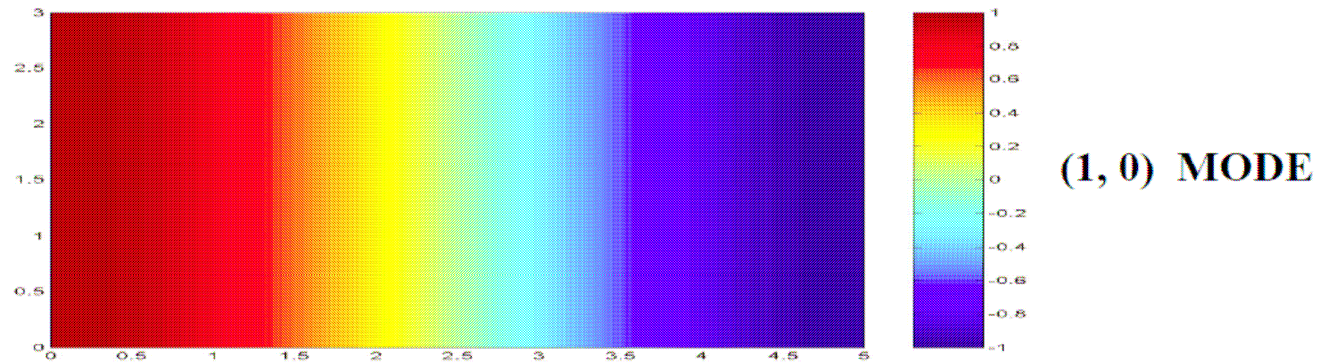
TANGENTIAL MODES IN RECTANGULAR ROOMS



Spatial pressure distribution

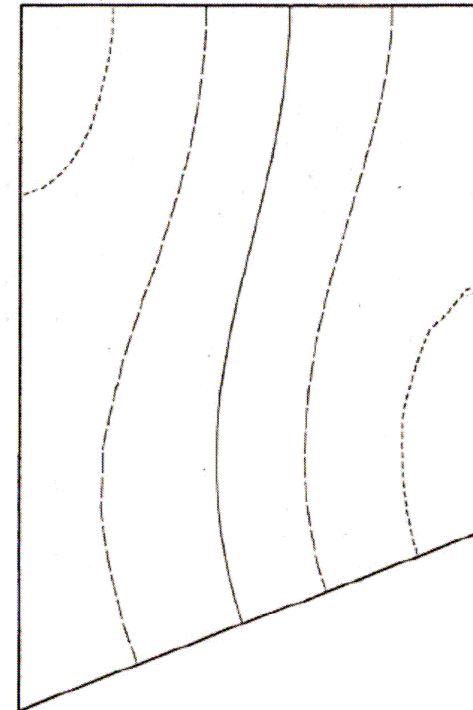
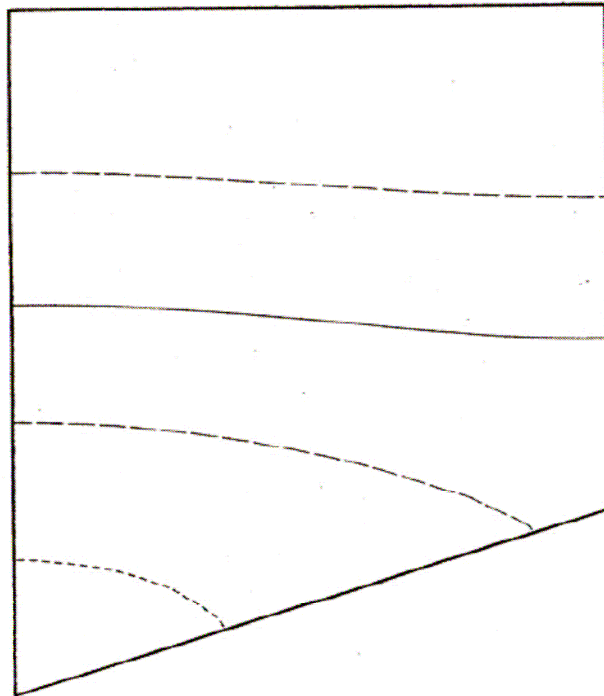
Vlnová akustika

MODES IN RECTANGULAR ROOM



Vlnová akustika

ROOM RESPONSE – NONPARALLEL WALLS



Earl Geddes, Ph.D. dissertation, Penn State 1982

23

Vlnová akustika

Modes in passenger car

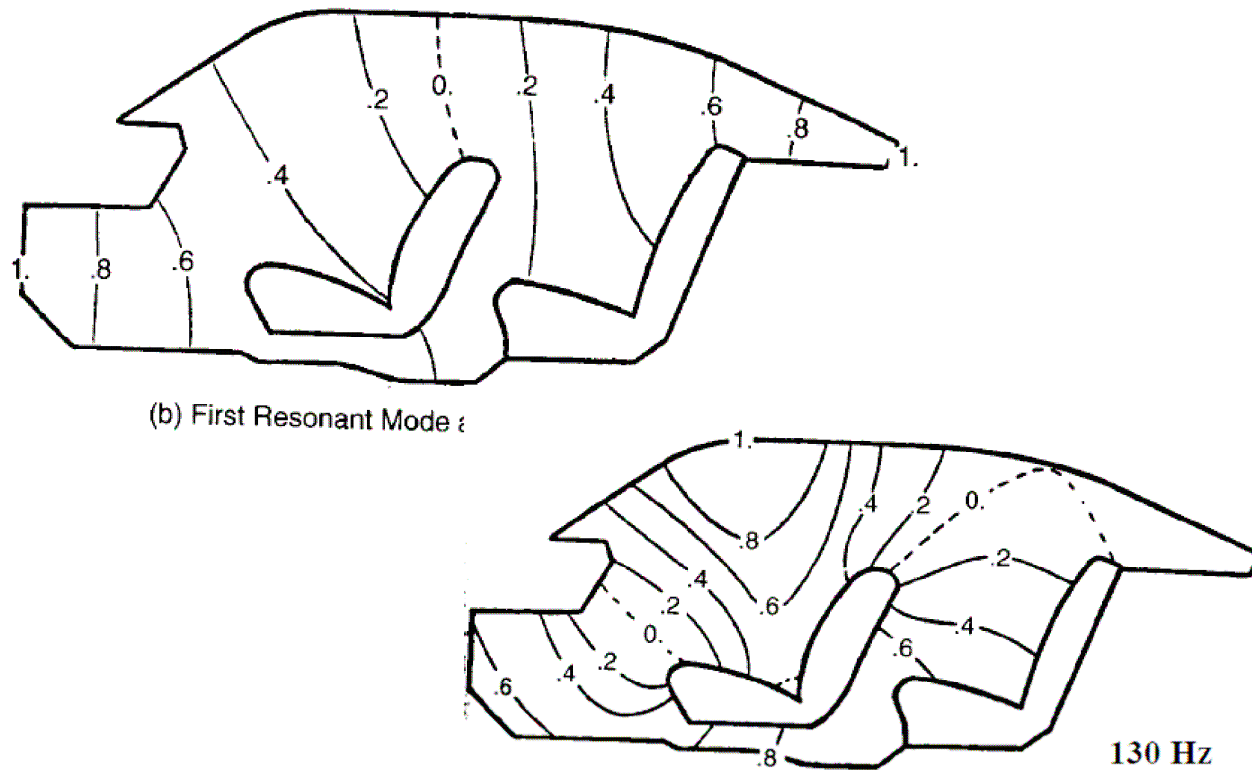
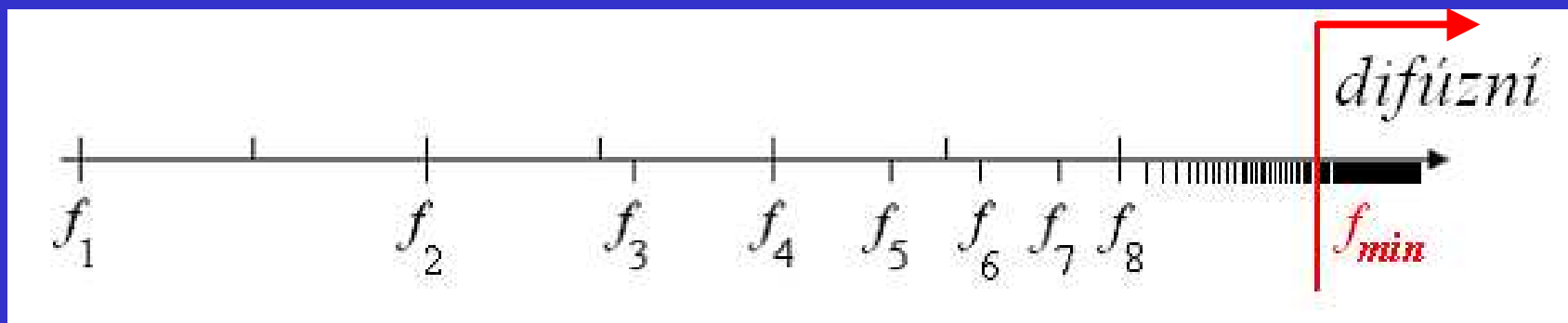


FIGURE 6.3 Acoustical finite-element analysis of automobile passenger compartment to determine the acoustical mode shapes and natural frequencies. The mode shapes become increasingly more complex as the natural frequency increases and as the complexity of the enclosure geometry increases.

Vlnová akustika

Zajistit difúznost akustického pole od co nejnižšího kmitočtu.



Pro pásma celé
oktávy

$$f_{min} = \frac{400}{\sqrt[3]{V}}$$

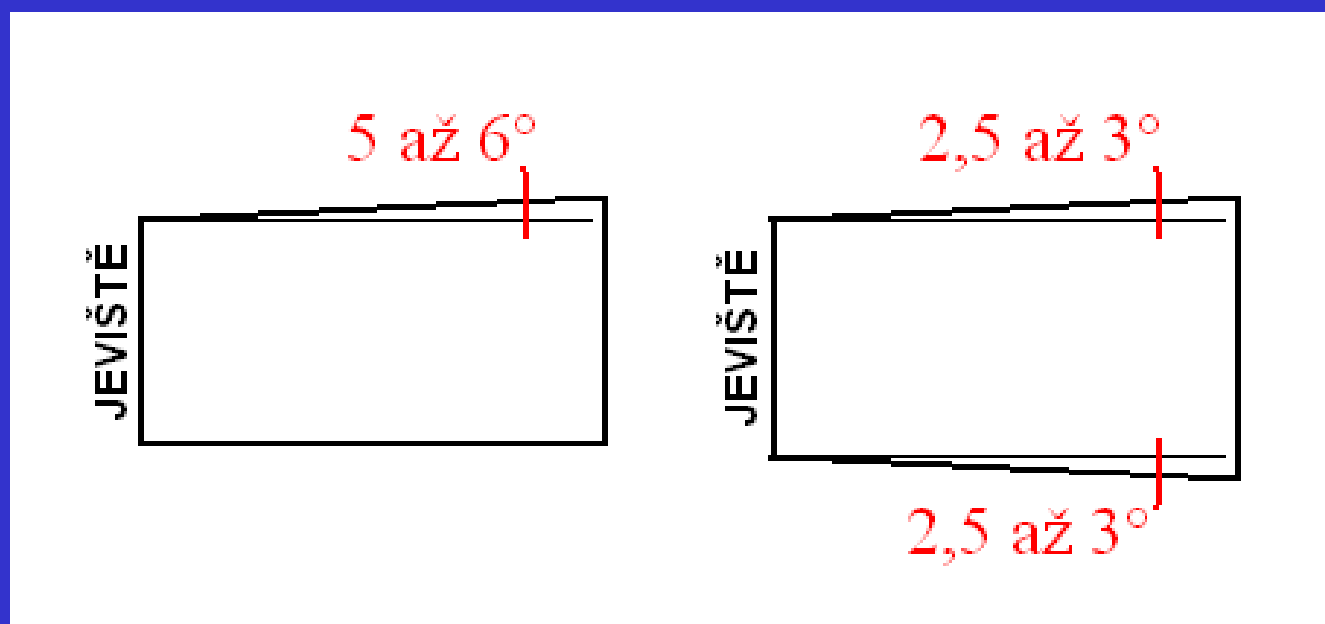
Pro pásma 1/3
oktávy

$$f_{min} = \frac{600}{\sqrt[3]{V}}$$

Vlnová akustika

Zajistit difúznost akustického pole od co nejnižšího kmitočtu.

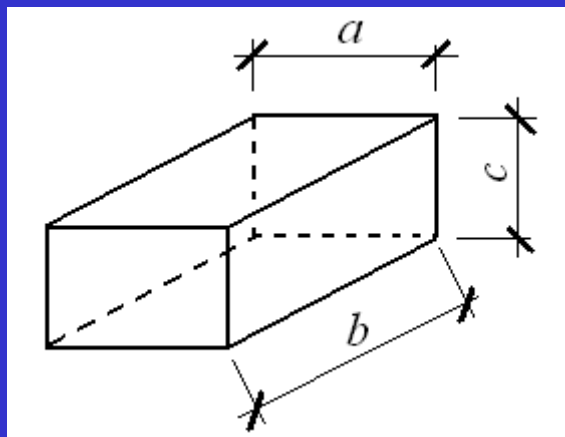
- volba velikosti uzavřeného prostoru. S objemem místnosti se zvyšuje difúznost akustického pole. $V > 100 \text{ m}^3$
- různoběžností stěn místnosti se omezuje stojaté vlnění.



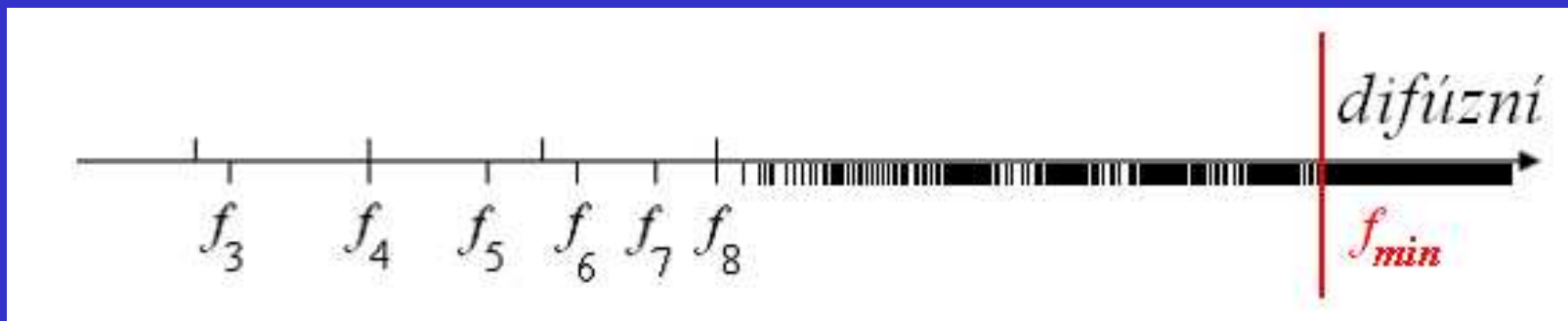
Vlnová akustika

Zajistit difúznost akustického pole od co nejnižšího kmitočtu.

- rozměry pravoúhlého uzavřeného prostoru (tvaru kvádru) nemají být navzájem celistvými násobky.



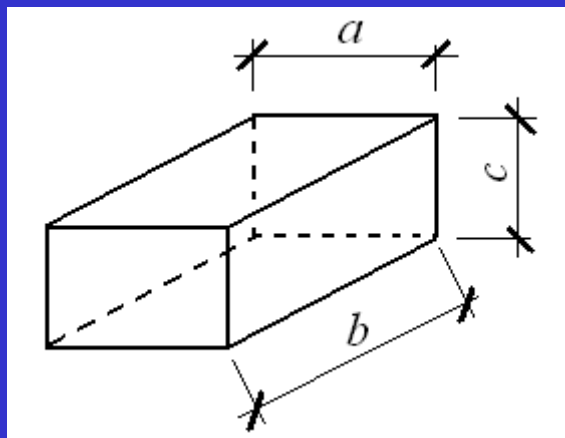
$$a : b : c \neq 1 : 2 : 4$$



Vlnová akustika

Zajistit difúznost akustického pole od co nejnižšího kmitočtu.

- rozměry pravoúhlého uzavřeného prostoru (tvaru kvádru) nemají být navzájem celistvými násobky.



$$\del{a : b : c = 1 : 2 : 4}$$

Doporučené poměry (ČSN 730525)

$$V < 200 \text{ m}^3$$

$$a : b : c = 1 : 1,05 : 1,2$$

$$V > 200 \text{ m}^3$$

$$a : b : c = 1 : 1,25 : 1,6 \text{ nebo } 1 : 1,5 : 2,5 \text{ nebo } 1 : 1,7 : 2,9$$

Vlnová akustika

Zajistit difúznost akustického pole od co nejnižšího kmitočtu.

- difúznost zvukového pole lze zvýšit zvuk pohlcujícím **obložením** stěn a stropu a nebo **členitostí** jejich reliéfu pomocí říms, sloupů a polosloupů



Metropolitní opera NY

Geometrická akustika

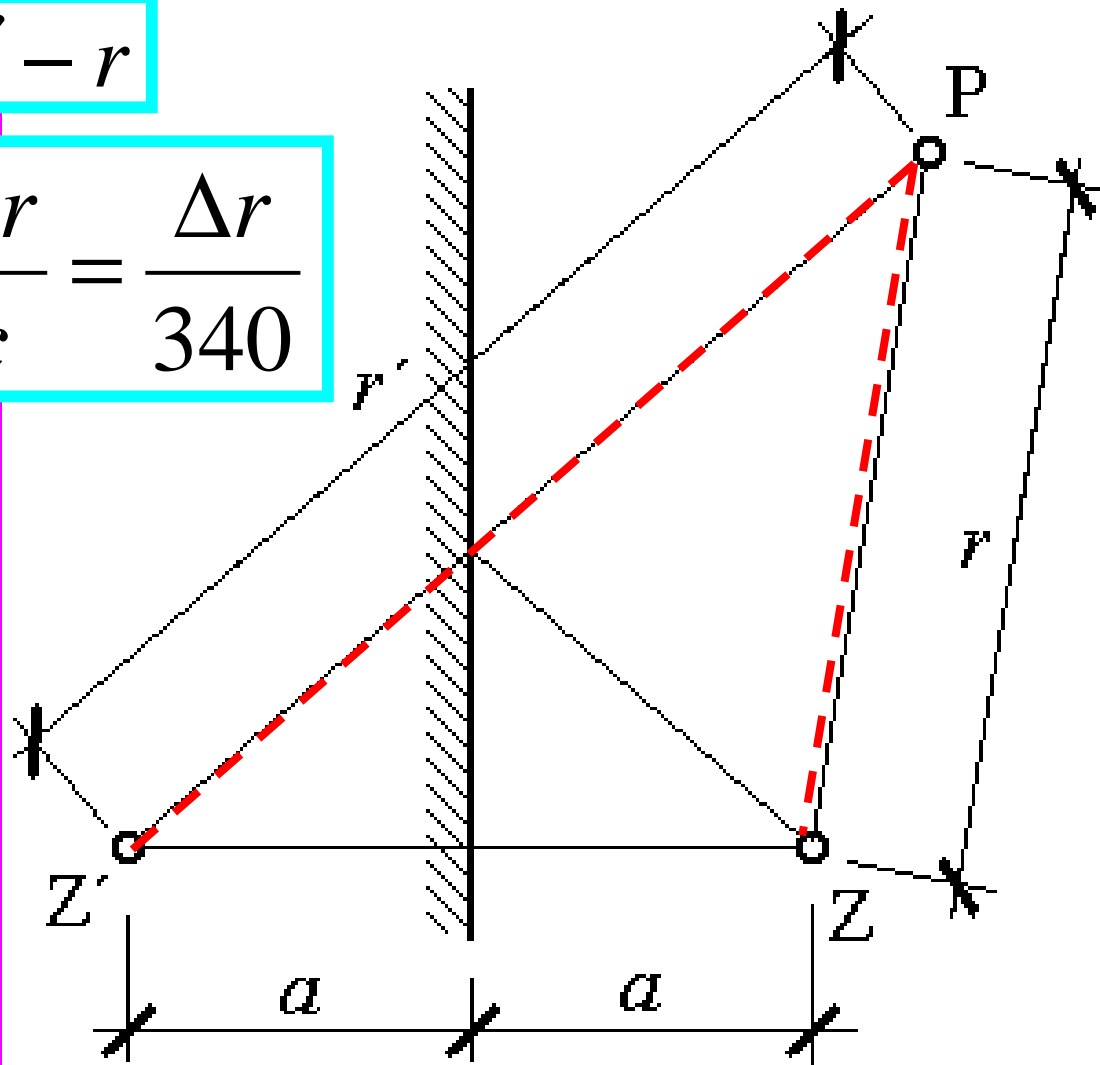
U velkých sálů je potřeba zvukový signál směřující do zadních řad hlediště zesílit.

- **elektroakusticky** pomocí mikrofону a reproduktorové soustavy
- **stavebně** vhodným uspořádáním odrazných ploch umístěných nejčastěji na stropu sálu tak, aby odrazy zvuku byly směřovány převážně do vzdálených míst hlediště.

Konstrukce odrazu

$$\Delta r = r' - r$$

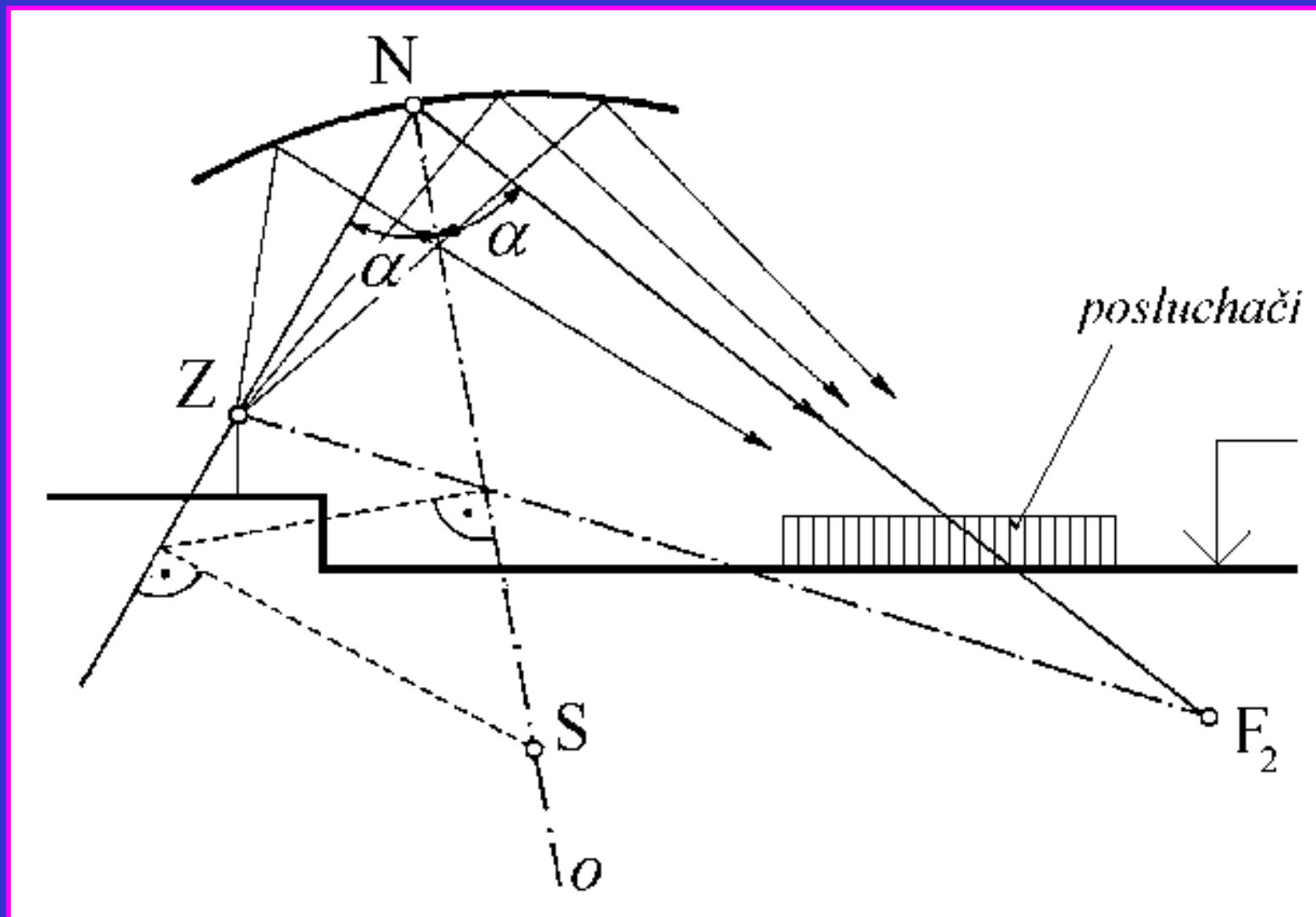
$$\Delta t = \frac{\Delta r}{c} = \frac{\Delta r}{340}$$

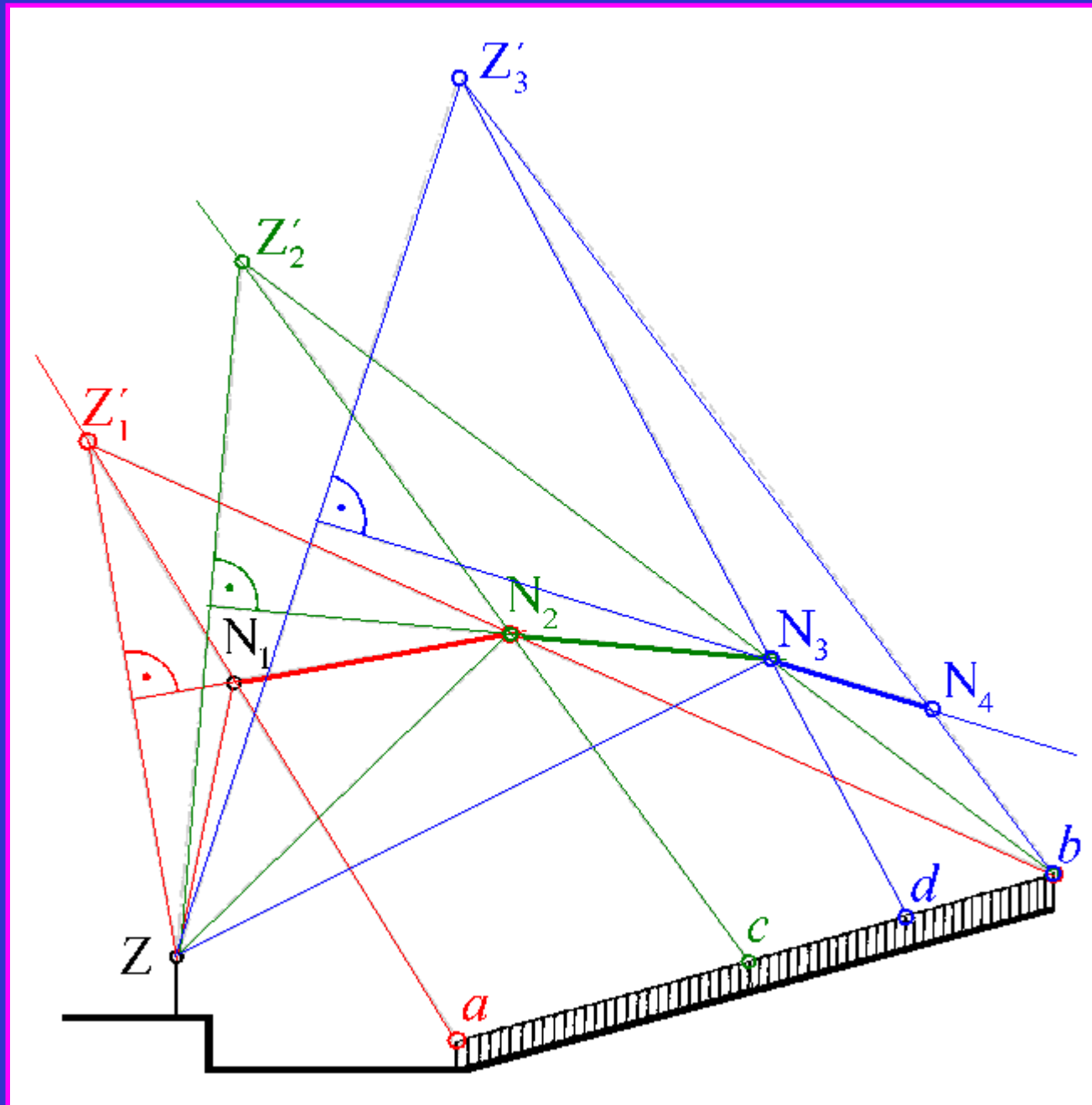


Rozdíl drah a časové zpoždění

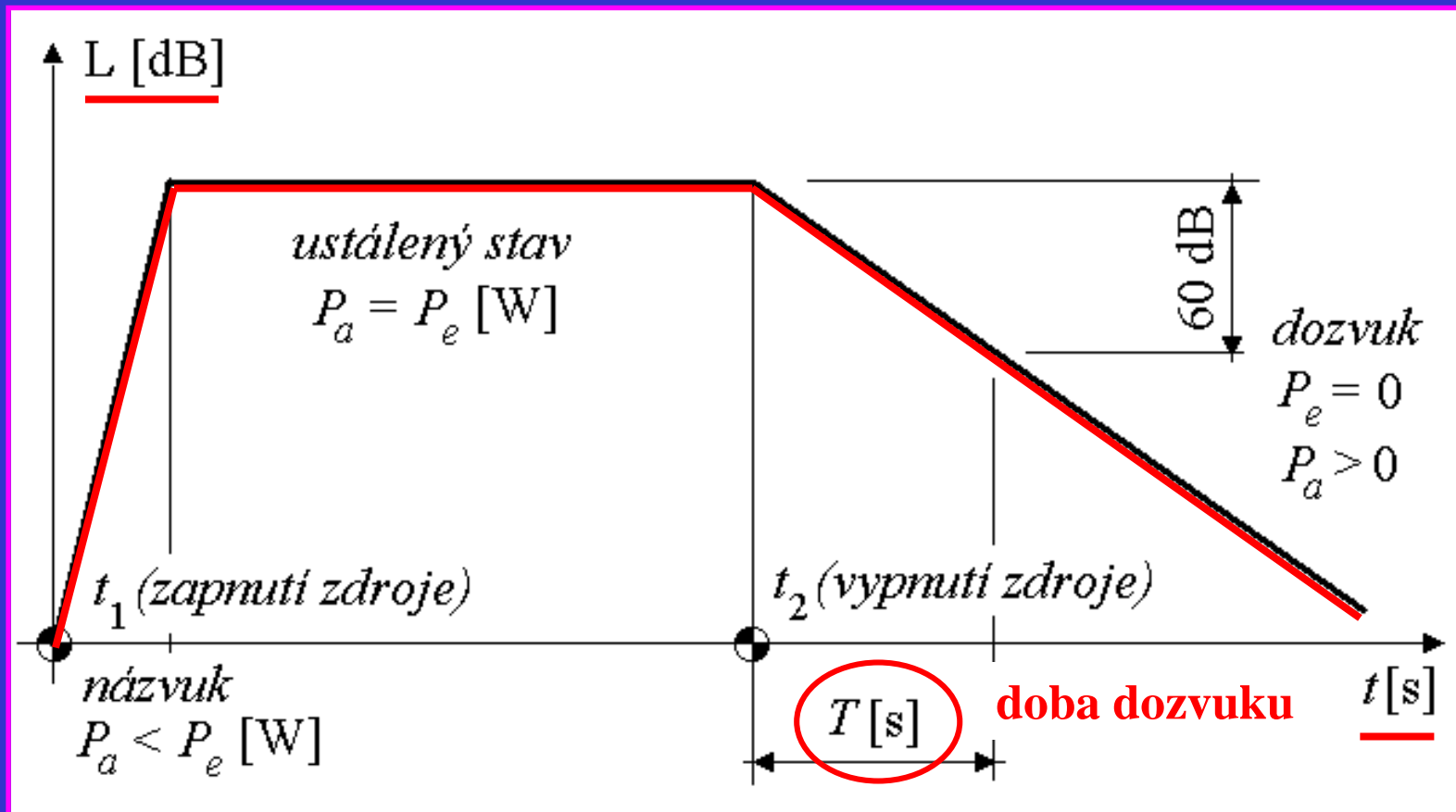
rozdíl drah [m]	časové zpoždění [s]	vliv na srozumitelnost
méně než 10	méně než 0,03	zesílení zvuku – vnímáno jako jeden zvuk
10 až 17	0,03 až 0,05	směšování hlásek
17 až 34	0,05 až 0,1	ozvěna
více než 34	více než 0,1	jednoslabičná ozvěna

Konstrukce části stropu tvaru eliptického válce





Statistická akustika



$$T = 0,163 \frac{V}{A}$$

Sabinův vztah

Sabinův vztah



Wallace Clement Sabine

Wallace Clement Sabine (1868 – 1919) byl americký fyzik. Působil na Harvardské univerzitě a lze ho považovat za zakladatele moderní prostorové akustiky. Mimo jiné navrhl akustické úpravy v sále Symphony Hall v Bostnu, který je dodnes považován za jeden z nejlepších koncertních sálů světa.

$$T = 0,163 \frac{V}{A}$$

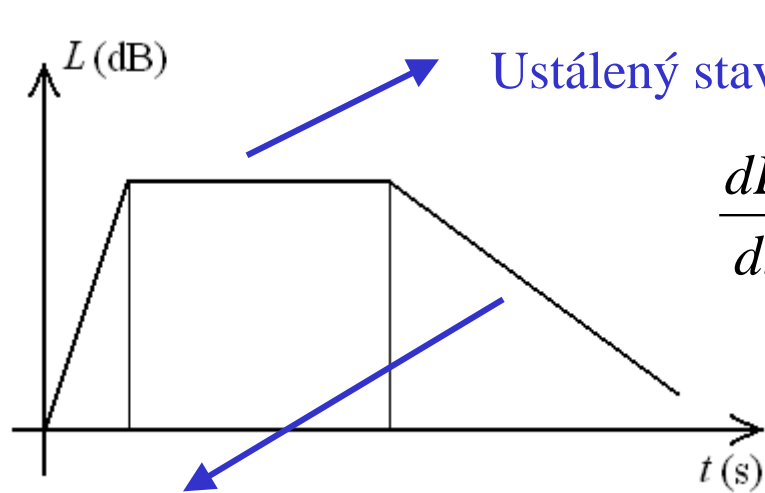
Symphony
Hall Boston

Sabinův vztah



Symphony
Hall Boston





Ustálený stav $P_e - P_a = \frac{dE}{dt} = 0$

$\frac{dE}{dt}$ je změna celkové energie v čase

Nestabilní stav $-P_a = \frac{dE}{dt}$

$$P_a = \frac{I A}{4}$$

$$E = wV = \frac{I}{c} V$$

w (Wsm^{-3}) je hustota ak. energie v difúzním poli

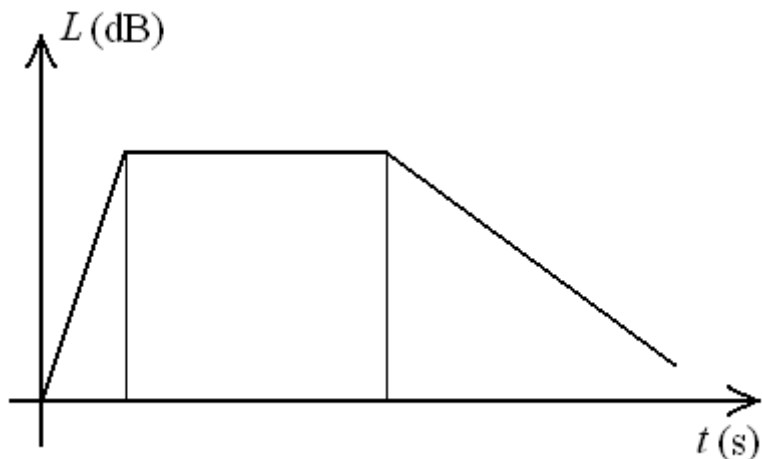
$$\frac{dE}{dt} + P_a = 0$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{V}{c} \frac{dI}{dt}$$

$$\frac{V}{c} \frac{dI}{dt} + \frac{A}{4} I = 0$$

$$\frac{V}{c} y' + \frac{A}{4} y = 0$$

$$y = y_0 e^{-\frac{cA}{4V} t}$$



$$y = y_0 e^{-\frac{cA}{4V}t}$$

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{cA}{4V}t}$$

Doba dozvuku T (s) je čas, za který hladina akustického tlaku v difúzním poli poklesne o 60 dB, tj. intenzita klesne na 10^{-6} původní hodnoty.

$$T = \frac{4V}{cA} 6 \ln 10$$

$$T = \frac{24 \ln 10 V}{340 A}$$

**Sabinův
vztah**

$$T = 0,163 \frac{V}{A}$$

~~$$I_0 10^{-6} = I_0 e^{-\frac{cA}{4V}T}$$~~

$$-6 \ln 10 = -\frac{cA}{4V}T \ln e$$

Eyringův vztah

$$T = 0,163 \frac{V}{-\Sigma S \ln(1 - \alpha_m)}$$

ΣS je součet plch v místnosti (m^2)

α_m je střední činitel pohltivosti (-)

Je přesnější než Sabinův vztah zejména u „zatlumených“ místostí s velkou pohltivostí

Doporučen českými normami

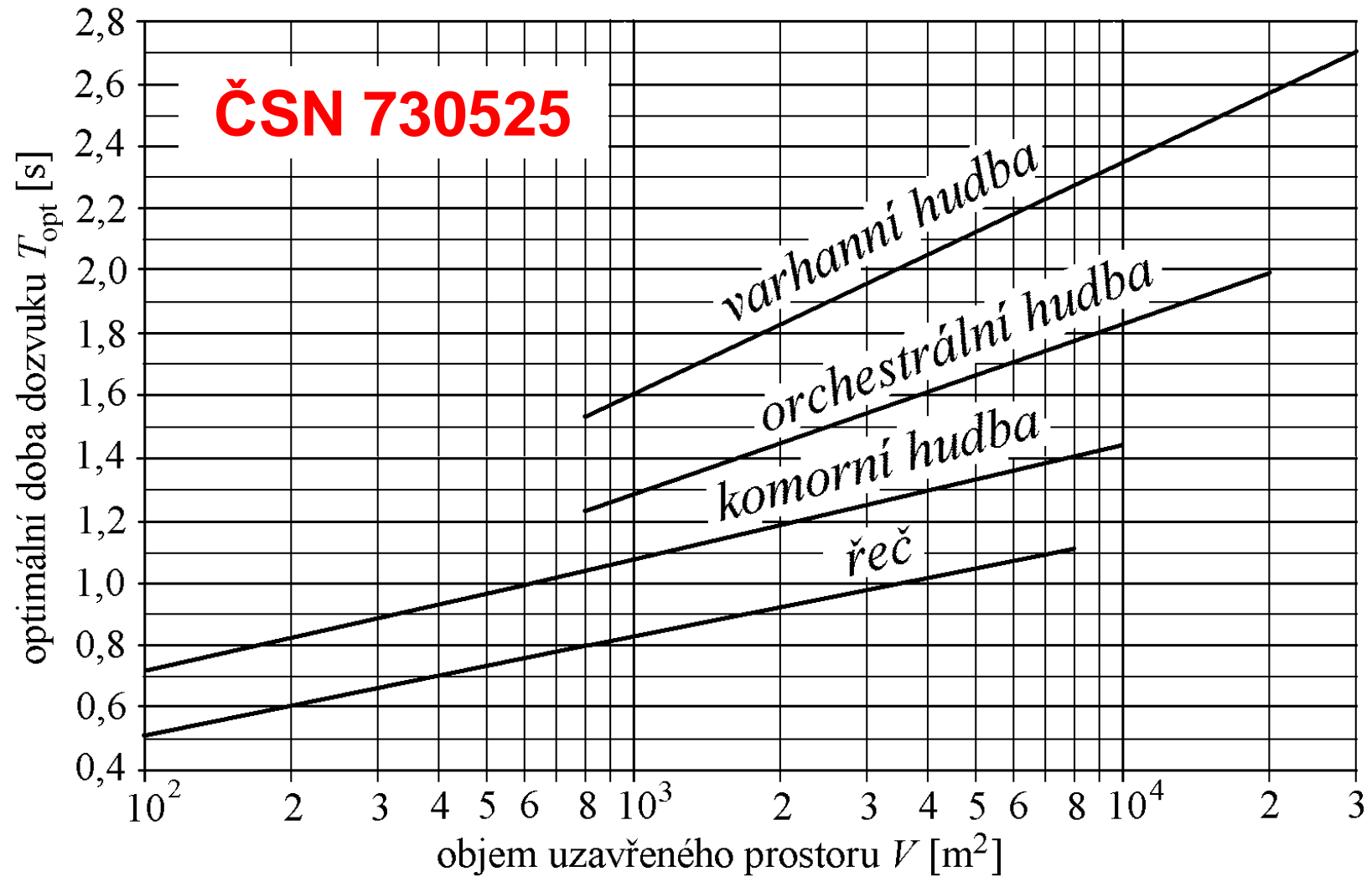
ČSN Projektování v oboru prostorové akustiky

ČSN 730525 - všeobecné zásady

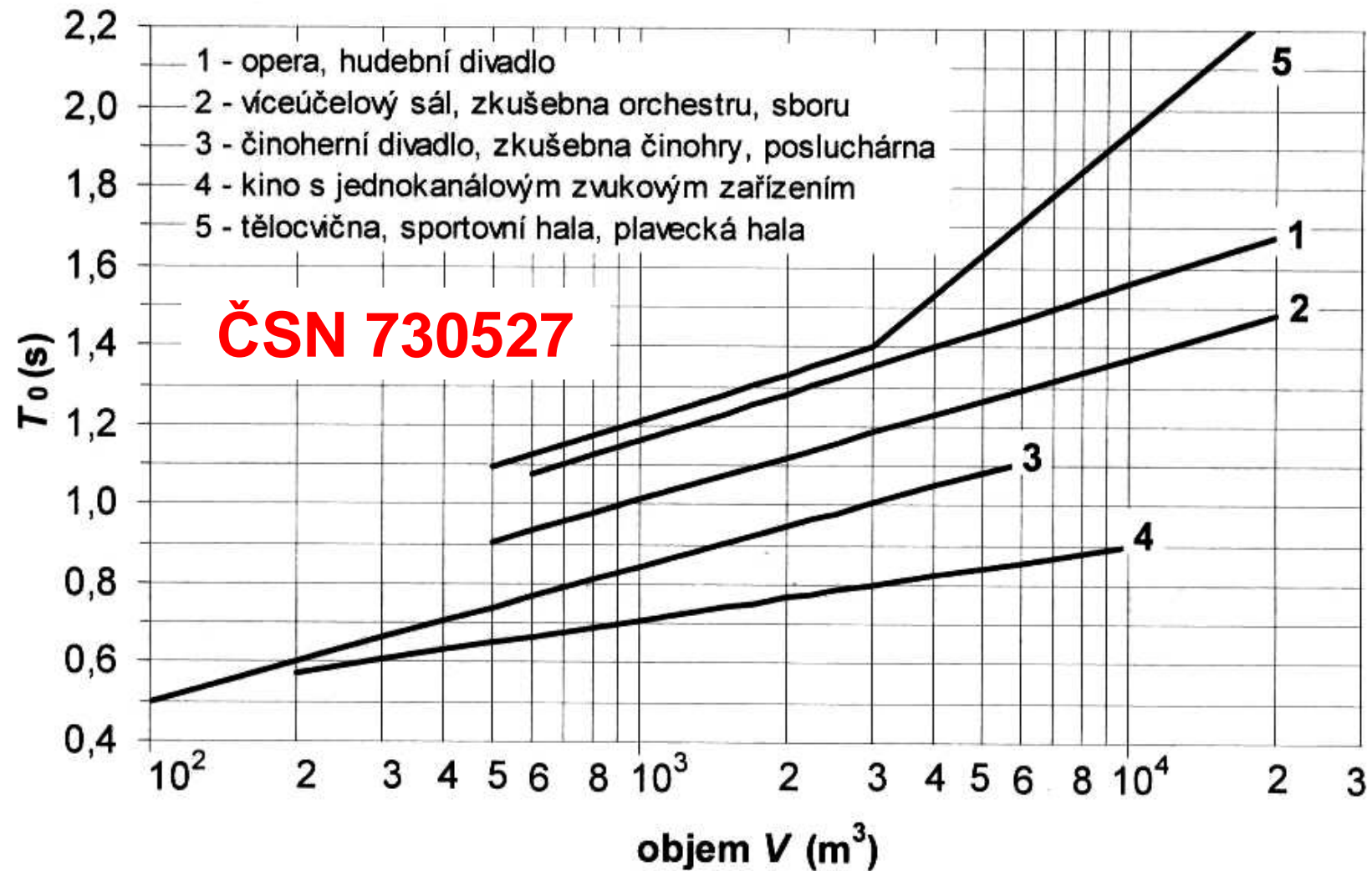
ČSN 730526 - studia a místnosti pro snímání,
zpracování a kontrolu zvuku

ČSN 730527 - prostory pro kulturní účely,
prostory ve školách, prostory pro veřejné
účely

Optimální doby dozvuku



Optimální doby dozvuku



Optimální doby dozvuku

opera, hudební divadlo

$$V = 600 \text{ až } 20000 \text{ m}^3$$

$$T_{opt} = 0,3961 \log V - 0,026$$

víceúčelový sál, zkušebna sboru

$$V = 500 \text{ až } 20000 \text{ m}^3$$

$$T_{opt} = 0,3582 \log V - 0,061$$

činoherní divadlo, zkušebna činohry, posluchárna

$$V = 100 \text{ až } 6000 \text{ m}^3$$

$$T_{opt} = 0,3424 \log V - 0,185$$

kino s jednokanálovým zvukovým zařízením

$$V = 200 \text{ až } 10000 \text{ m}^3$$

$$T_{opt} = 0,1915 \log V + 0,134$$

tělocvična, sportovní hala, plavecká hala – neobsazený prostor

$$V = 500 \text{ až } 3000 \text{ m}^3$$

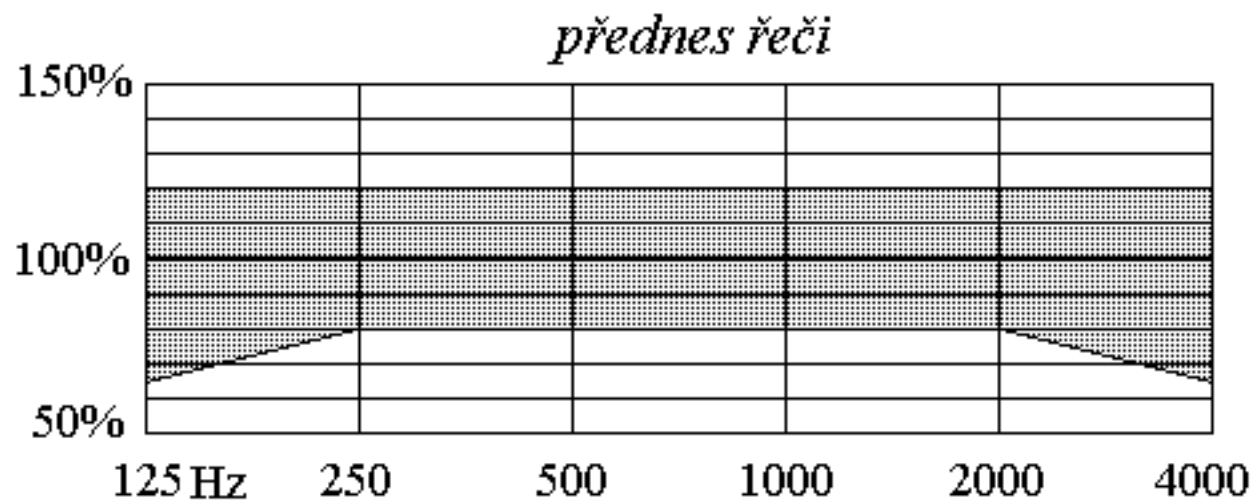
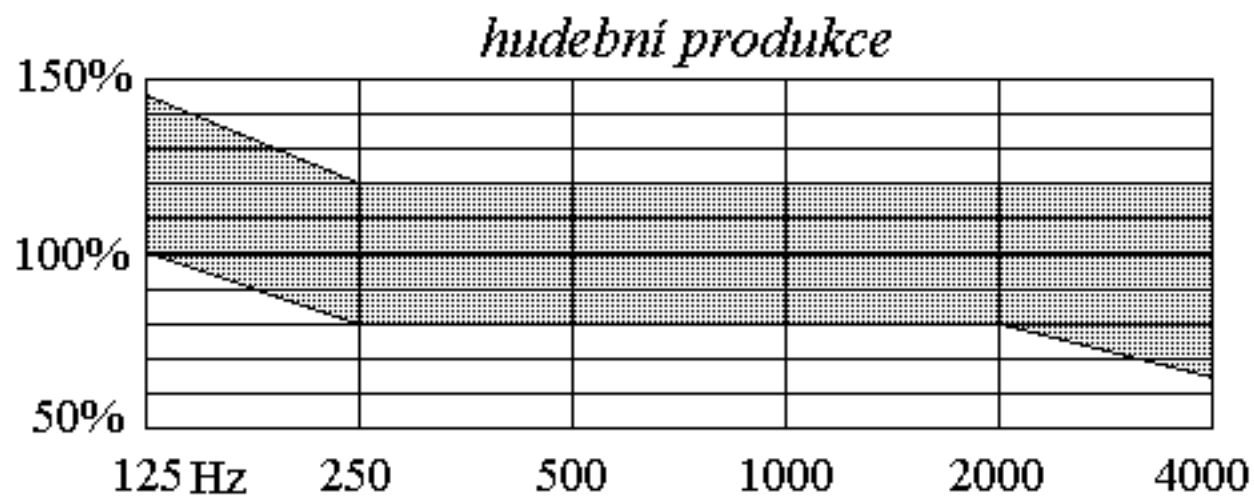
$$T_{opt} = 0,3961 \log V + 0,023$$

$$V = 3000 \text{ až } 20000 \text{ m}^3$$

$$T_{opt} = 1,0366 \log V - 2,204$$

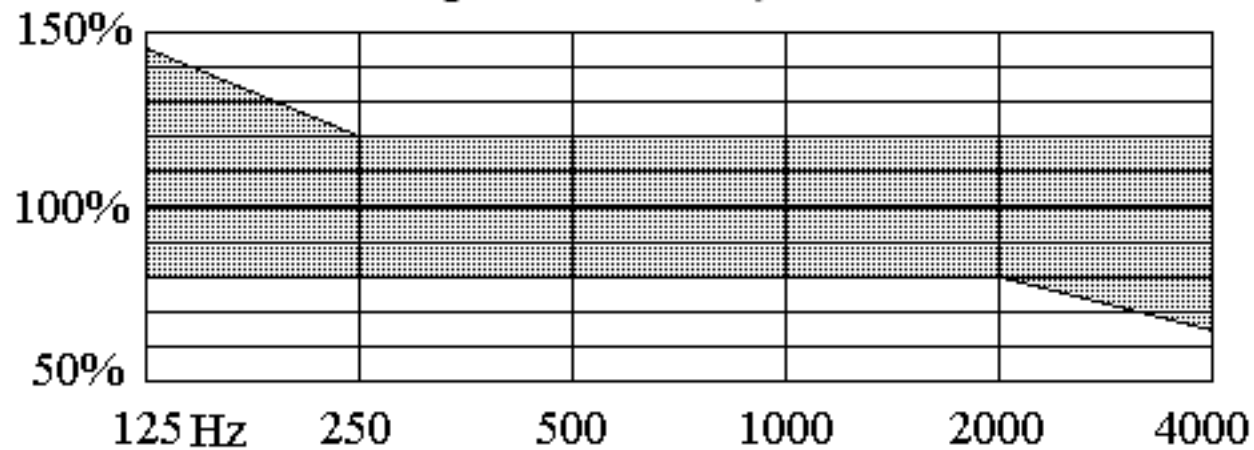
Poznámka: také nádražní a letištní haly

Připustné tolerance doby dozvuku T/T_{opt}

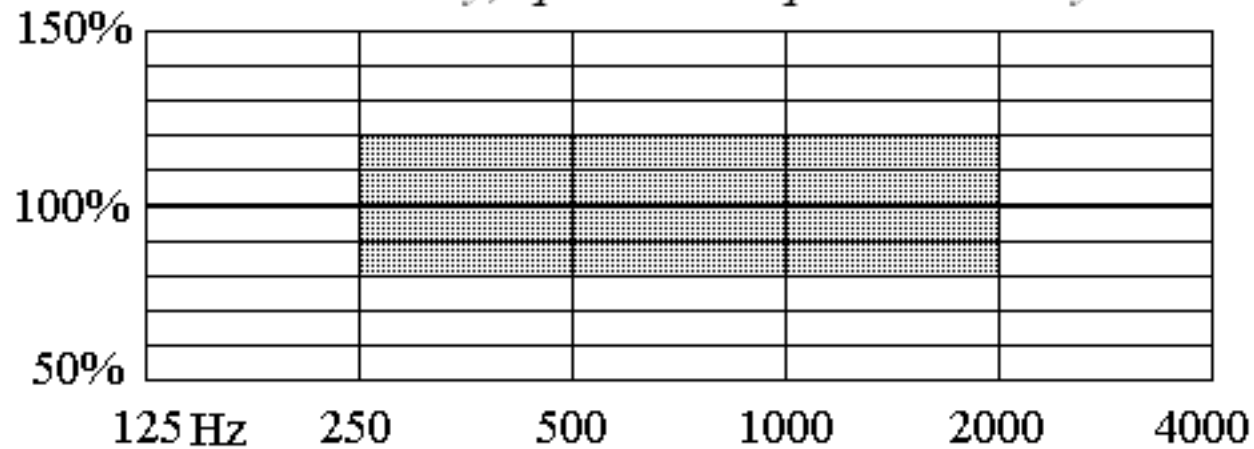


Přípustné tolerance doby dozvuku T/T_{opt}

přednes hudby i řeči



tělocvičny, sportovní a plavecké haly



Doba dozvuku stanovená nezávisle na objemu

prostor	T (s)
učebna, posluchárna	0,7
jazyková učebna	0,45
audiovizuální učebna	0,6
učebna hudební výchovy	0,9
učebna hudební výchovy při reprodukované hudbě	0,5
učebna hry na individuální hudební nástroje a sólového zpěvu	0,7
sborovna, konferenční místnost	*
učebna pracovní výuky	*
učebna gymnastiky a tance	*
místnost pro hry v mateřských školách a družinách	*
denní místnost jeslí	*
školní jídelna, menza	*

* širokopásmový obklad stropu