

# WYBRANE ASPEKTY AKUSTYCZNE W PROJEKTOWANIU BUDYNKÓW

CZ. 1

# 1. Pojęcia podstawowe:

- Rodzaje fal : kuliste, płaskie, stojące – stan ustalony
- Stany nieustalone: narastanie, zanikanie, eksplozje

## Prędkość dźwięku w gazach

$$c = \sqrt{\frac{1,4P_0}{\rho}}$$

$P_0$  = ciśnienie atmosferyczne

$\rho$  = gęstość powietrza

$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$$

t – temperatura powietrza [°C]

c – prędkość dźwięku [ $\frac{m}{s}$ ]

## Prędkość dźwięku w cieczech

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

K - moduł ścisłości cieczy

$\rho$  – gęstość cieczy

## Prędkość dźwięku w ciałach stałych

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E-moduł Younga

$\rho$  – gęstość materiału

Ośrodek	Prędkość [m/s]
Powietrze (21°C)	344
Alkohol	1213
Ołów	1220
Wodór 0 st c	1269
Woda destylowana	1480
Woda zasolona 3,5% (21°C)	1520
Ciało ludzkie tkanki	1558
Plexi	1800
Drewno miękkie	3350
Beton	3400
Jodła	3800
Stal	5050
Aluminium	5150
Szkło	5200
Gips	6800

Długość fali akustycznej  $\lambda = \frac{c}{f}$

$c$  - prędkość dźwięku

$f = \frac{1}{T}$  [Hz] - częstotliwość

$\omega = 2\pi f$  (radian/s) - pulsacja

Ciśnienie akustyczne  $p_a$  – chwilowe oscylacje ciśnienia powietrza wokół statycznego ciśnienia barycznego.

Impedancja akustyczna  $z = \frac{p}{c} = r + jx$

p – ciśnienie akustyczne

c – prędkość dźwięku

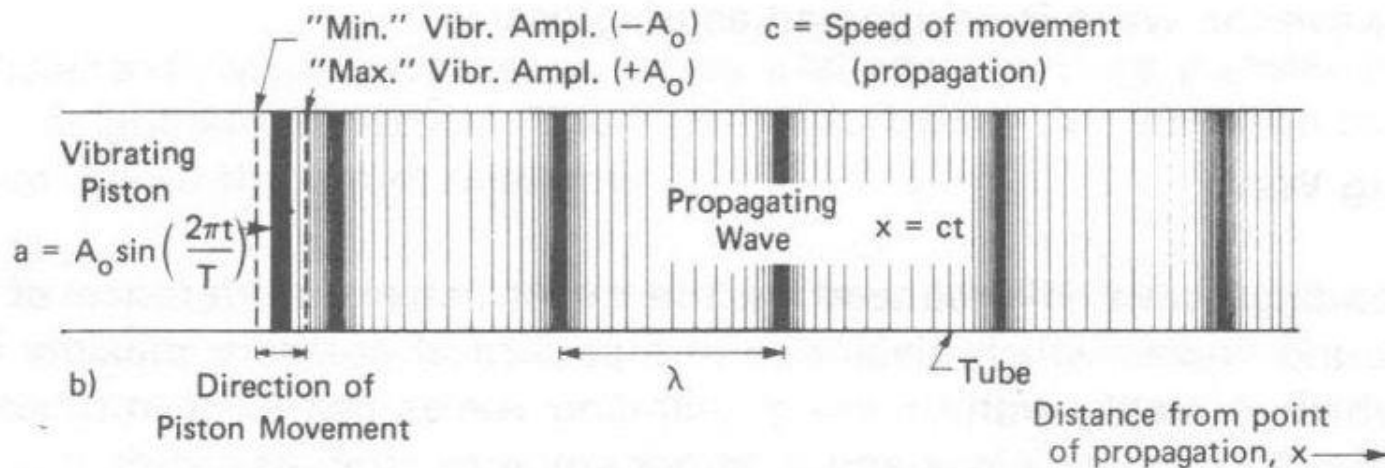
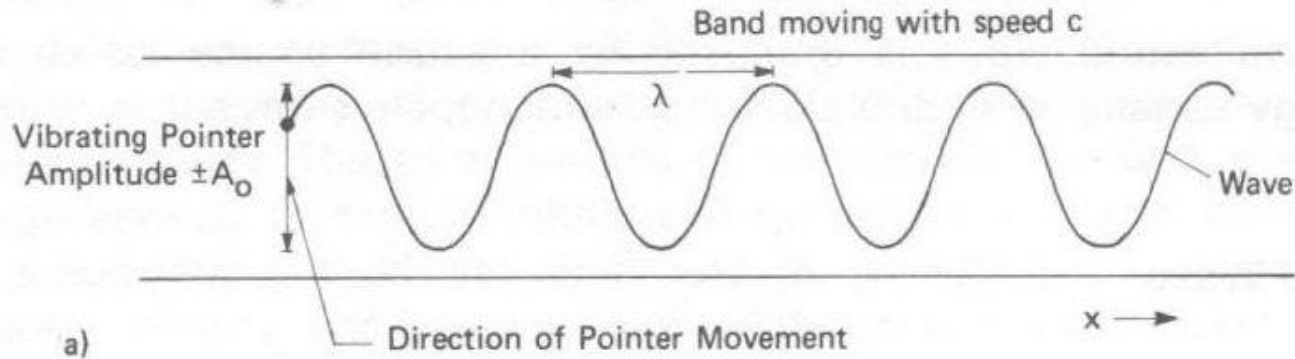
r - składowa rzeczywista rezystancji akustycznej

$j = \sqrt{-1}$

x - składowa urojona

W warunkach normalnych tj. temp powietrza = 20°C i  $p = 10^5 Pa$  impedancja akustyczna powietrza wynosi 415 rayls.

# Wartości charakteryzujące zmienne przebiegi akustyczne:

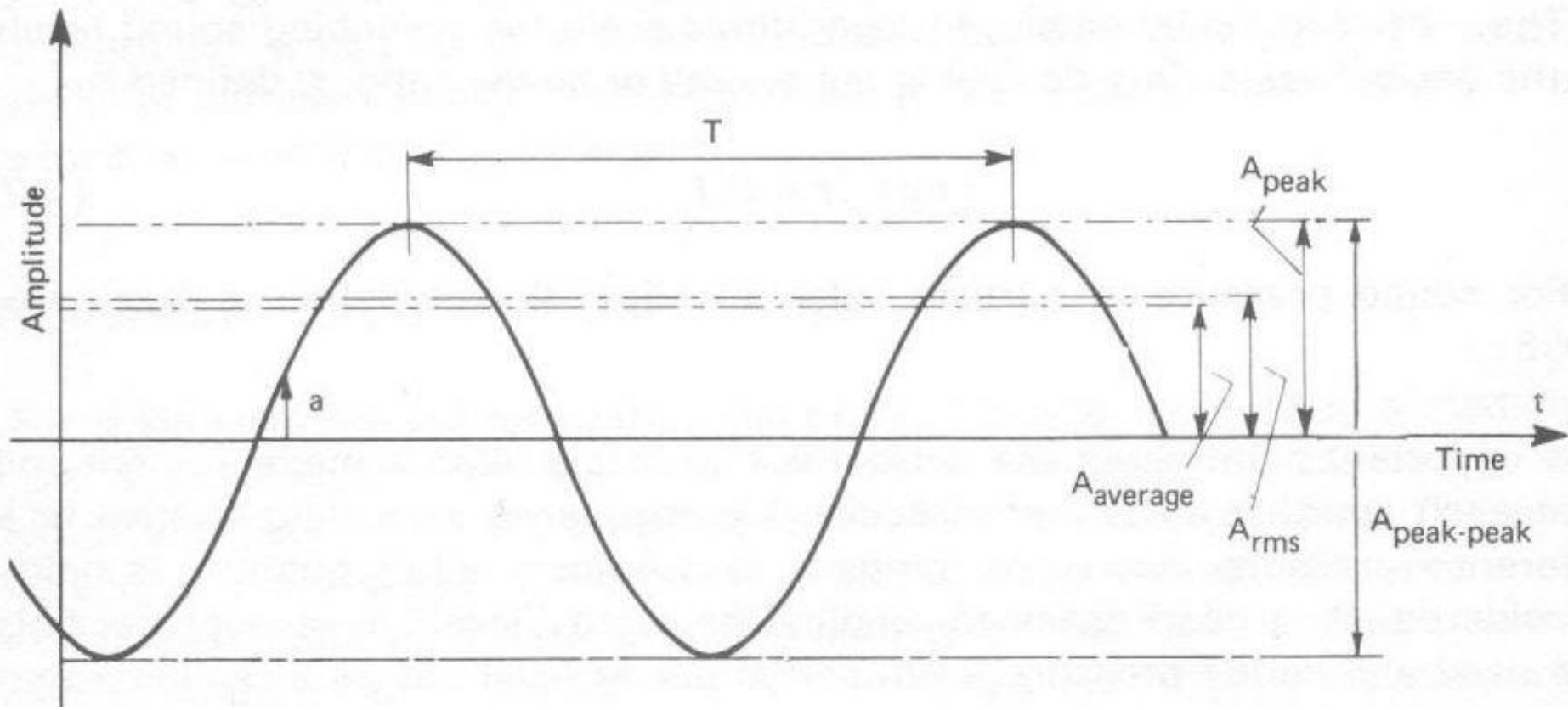




$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad - \text{wartość skuteczna}$$

$$A_{|average|} = \frac{1}{T} \int_0^T |a| dt \quad - \text{wartość średnia}$$

$$A_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} A_{|average|} = \frac{1}{\sqrt{2}} A_{peak}$$



Gęstość energii akustycznej  $E = \frac{p^2_{rms}}{\rho c^2}$

$p_{rms}$  - wartość skuteczna ciśnienia akustycznego [Pa]

$\rho$  - gęstość powietrza

$c$  - prędkość dźwięku

$E$  - gęstość energii (W.s.m<sup>-3</sup>)

Natężenie w polu swobodnym dla fali bieżącej

$$I = \frac{p^2_{rms}}{\rho c}$$

Natężenie w polu rozproszonym dla fali bieżącej

$$I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c}$$

(np. między odbijającymi ścianami w pomieszczeniach)

Gdzie :

$p_{rms}^2$  – skuteczna wartość ciśnienia

$\rho$  – gęstość powietrza

$c$  – prędkość dźwięku

$I$  – natężenie dźwięku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

# Miara decybelowa

Poziom natężenia dźwięku

$$IL = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

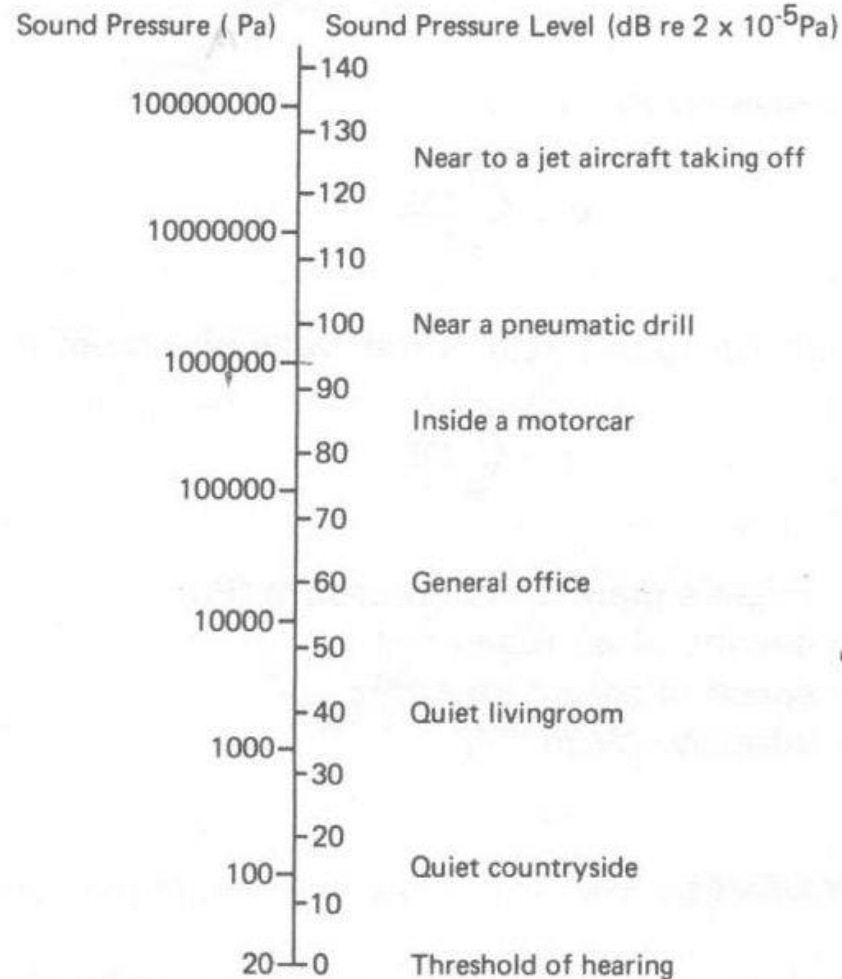
Gdzie:

$I_0 - 10^{-12} \text{ W.m.}^{-2} = 1 \text{ pW/m}^2$  – poziom odniesienia

Poziom ciśnienia dźwięku

$$SPL = 20 \log \frac{p_{rms}}{p_0}$$

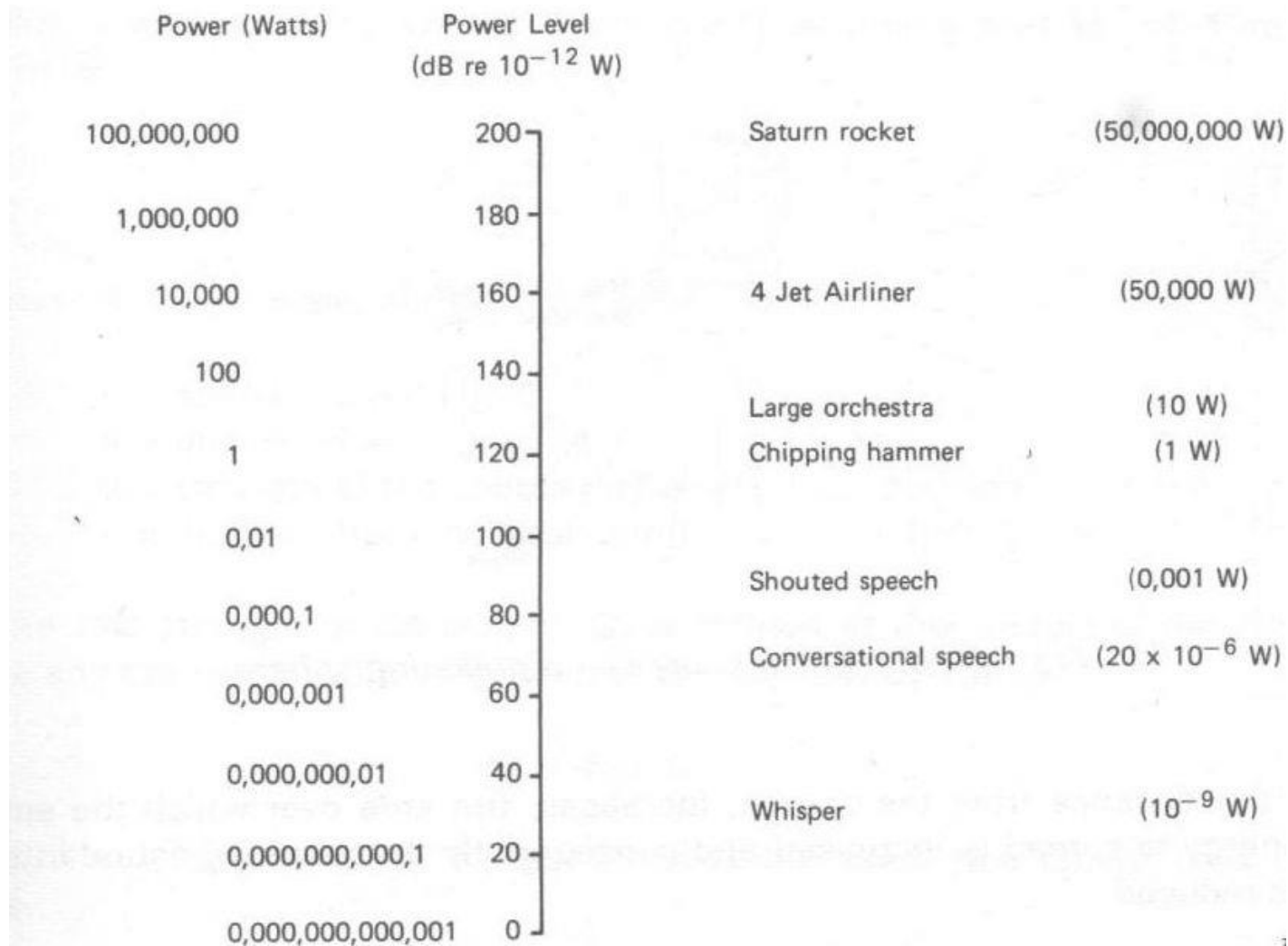
Gdzie  $p_0 - 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 20 \mu\text{Pa}$  dla powietrza  
(dla innych mediów  $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ )



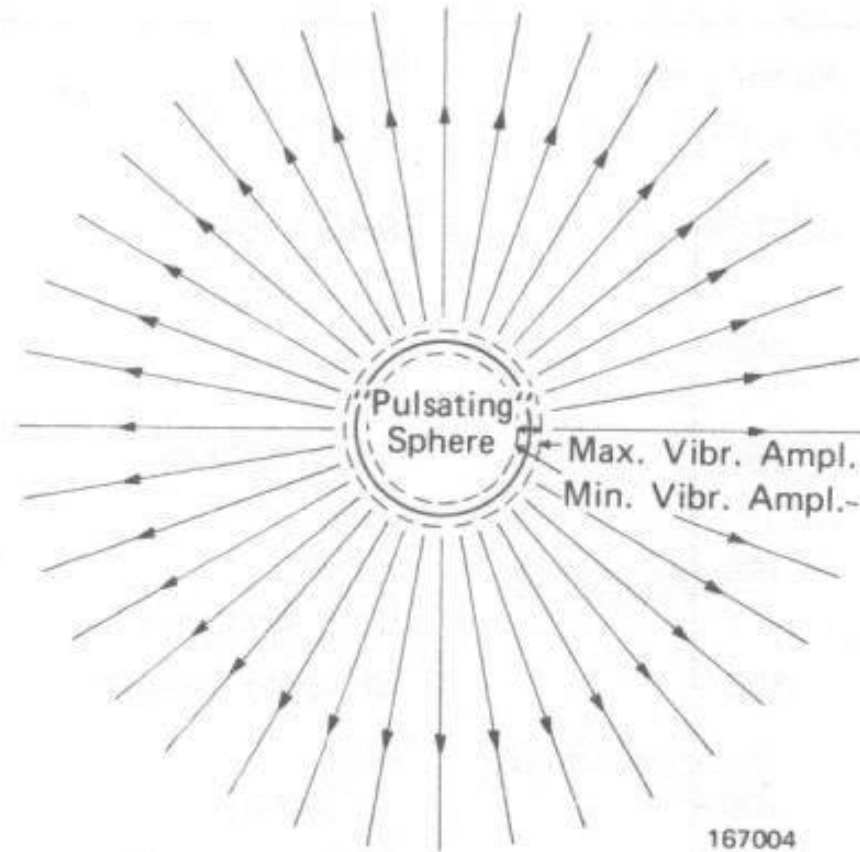
Poziom mocy akustycznej

$$SWL = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right)$$

Gdzie  $W_0 = 10^{-12} \text{ W} = 1 \text{ pW}$



# Typowe źródła dźwięku:



monopol



# Natężenie dźwięku promieniowanego przez monopol

$$I = \frac{W_m}{4\pi r^2}$$

Gdzie:

$W_m$  – moc dźwięku (źródła) [W]

$r$  – odległość od środka źródła [m]

Zależności między poziomem natężenia dźwięku,  
a poziomem ciśnienia dźwięku mają  
następującą postać:

$$\begin{aligned}SPL &= SWL - 20 \log(r) - 10 \log(4\pi) \\ &= SWL - 20 \log(r) - 11dB\end{aligned}$$

Gdzie:

SPL – poziom ciśnienia dźwięku

SWL – poziom mocy dźwięku

r – odległość od źródła

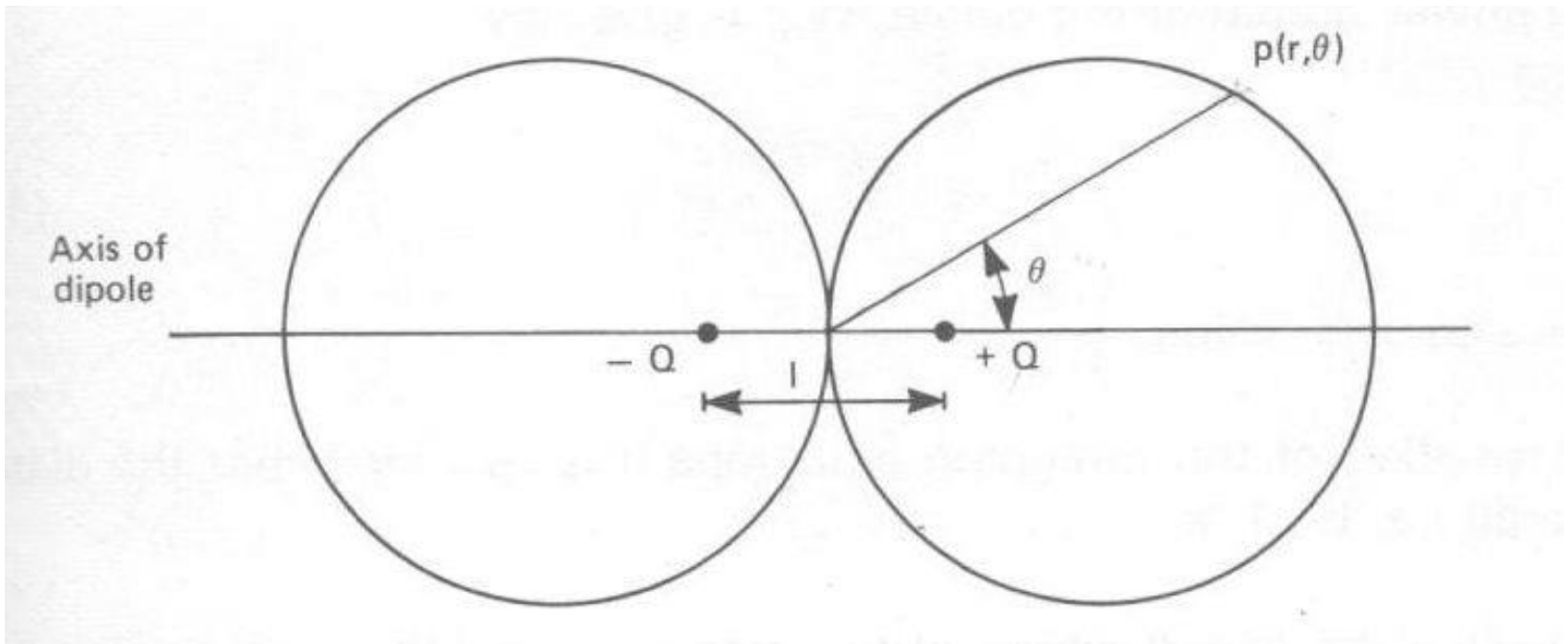
Moc dźwięku promieniowana przez monopol

$$W_m = \frac{\rho c k^2 Q^2}{4\pi}$$

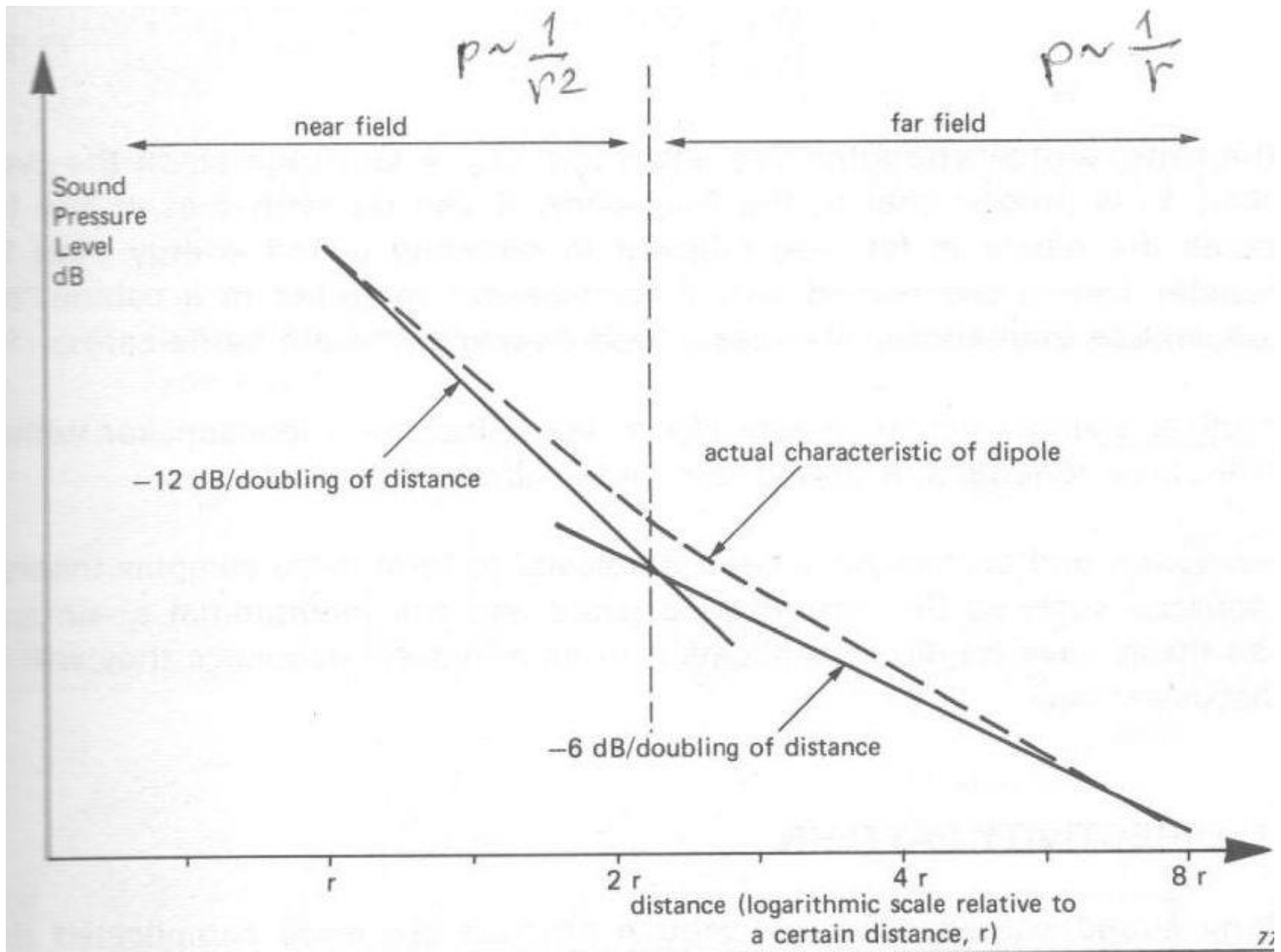
Gdzie:

Q- objętościowa wydajność źródła [m<sup>3</sup>/s]

$k = \frac{2\pi f}{c}$  – liczba falowa



dipol



dipol

Dla  $kl \ll 1$  – ciśnienie dźwięku wytwarzane przez dipol

$$p_d = \frac{\rho c k^2 Q l}{4\pi r} \cos \theta$$

Moc promieniowania dipola

$$W_d = \frac{\rho c k^4 Q^2 l^2}{12\pi}$$

# Wzorce kierunkowości:

Kierunkowość promieniowania źródła zależnie od jego lokalizacji może być określona przez: wskaźnik kierunkowości lub indeks kierunkowości.

Wskaźnik kierunkowości  $D = \frac{I}{I_{ref}}$

Indeks kierunkowości

$$d = 10 \log D = 10 \log \left( \frac{I}{I_{ref}} \right)$$

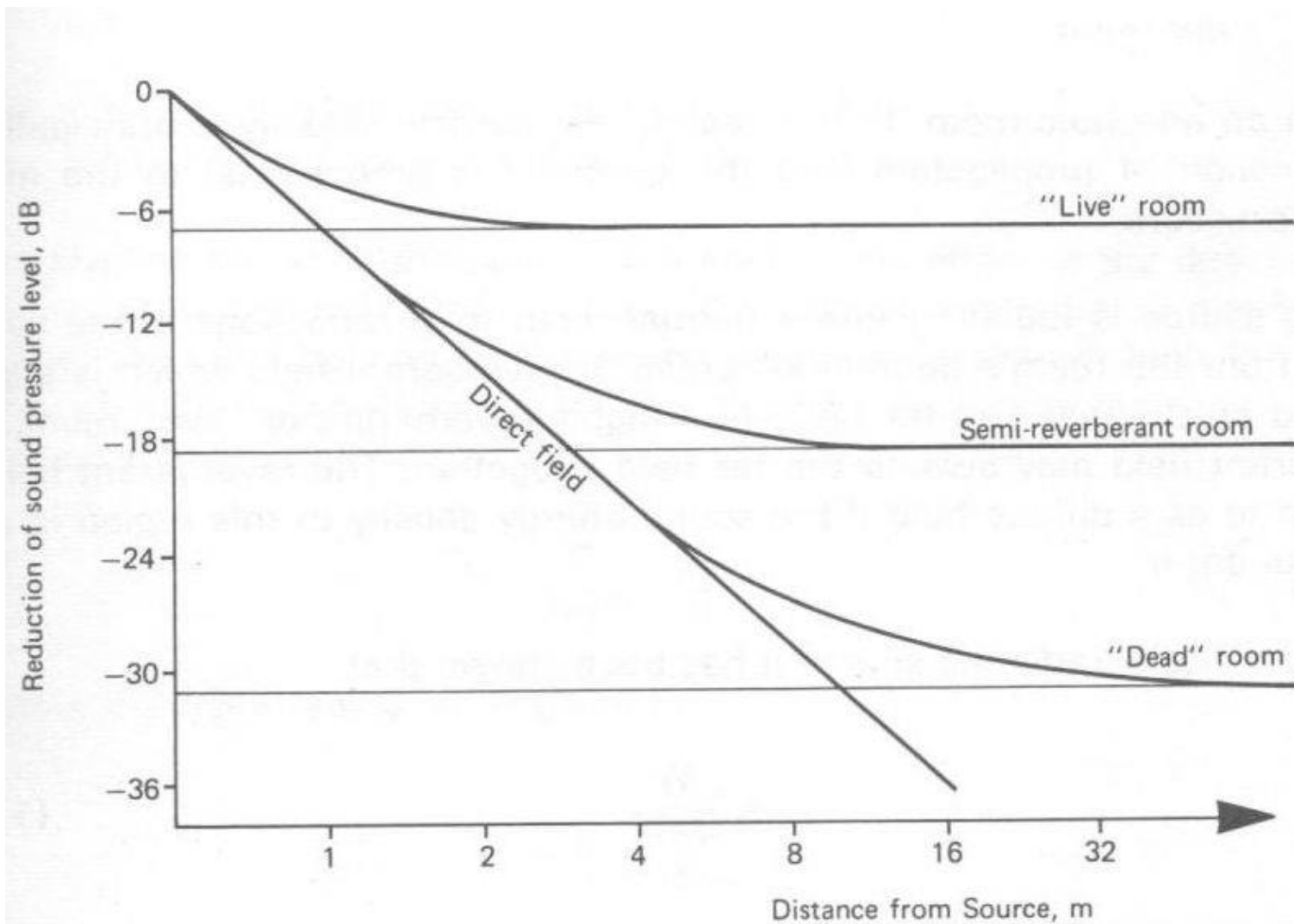
$$I_{ref} = \frac{W}{4\pi r^2}$$

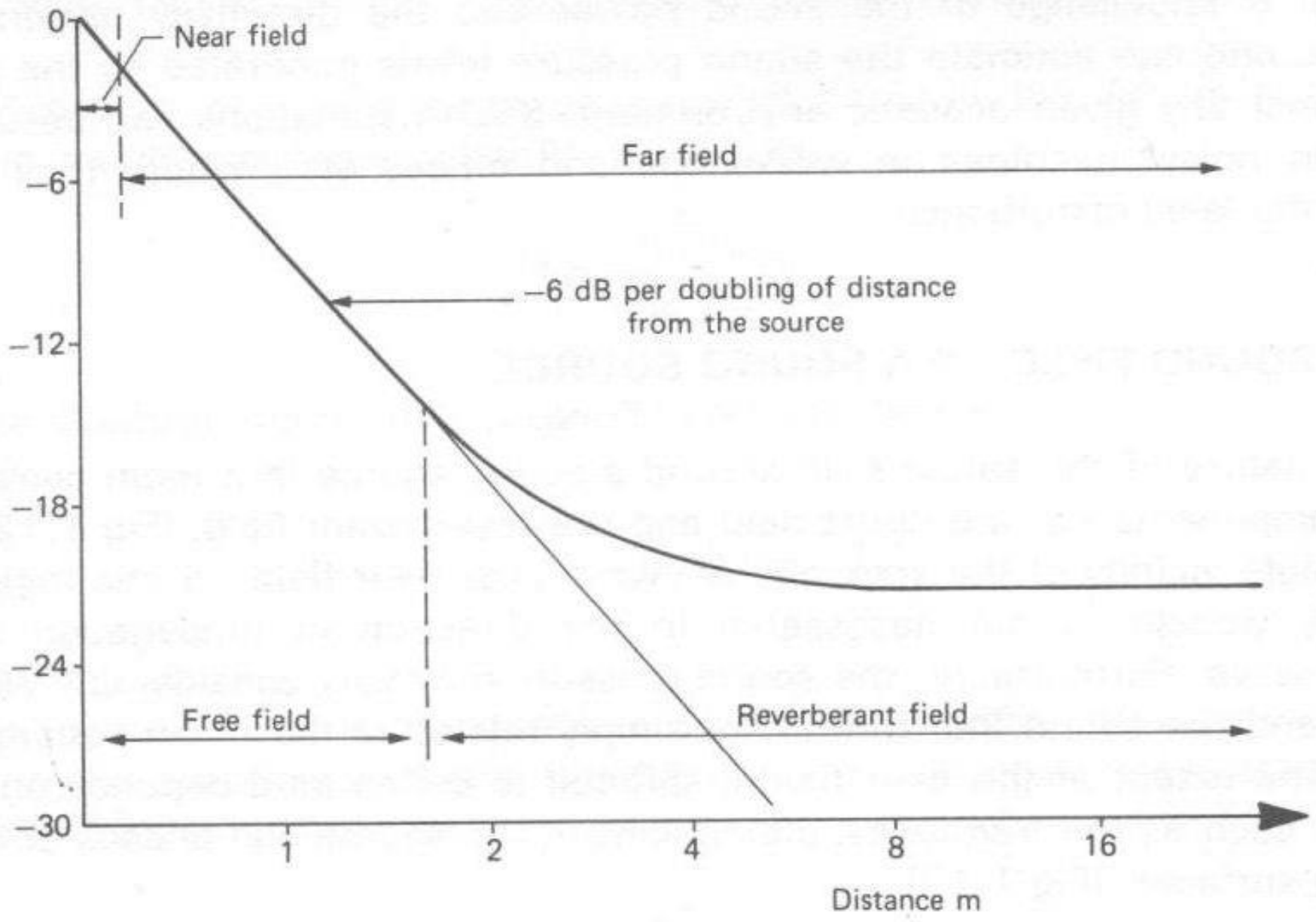
Gdzie  $W$  – moc źródła

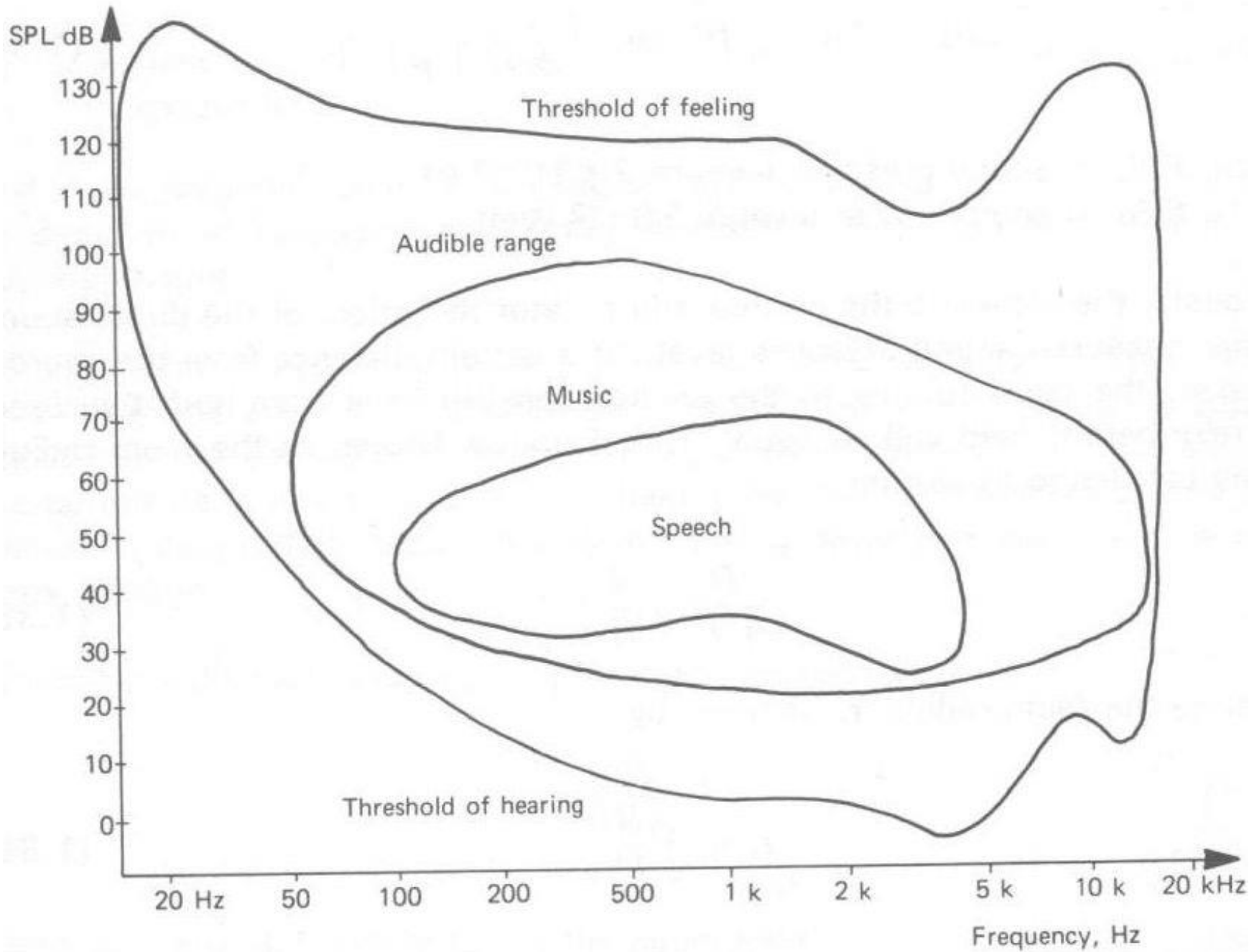
Położenie źródła	Wskaźnik kierunkowości	Indeks kierunkowości [dB]
Pole swobodne (przestrzeń między sufitem, a podłogą)	1	0
Płaszczyzna (podłoga, ściana)	2	3
Naroże (między podłoga i ścianą)	4	6
Między trzema płaszczyznami prostopadłymi (dwie ściany i sufit)	8	9

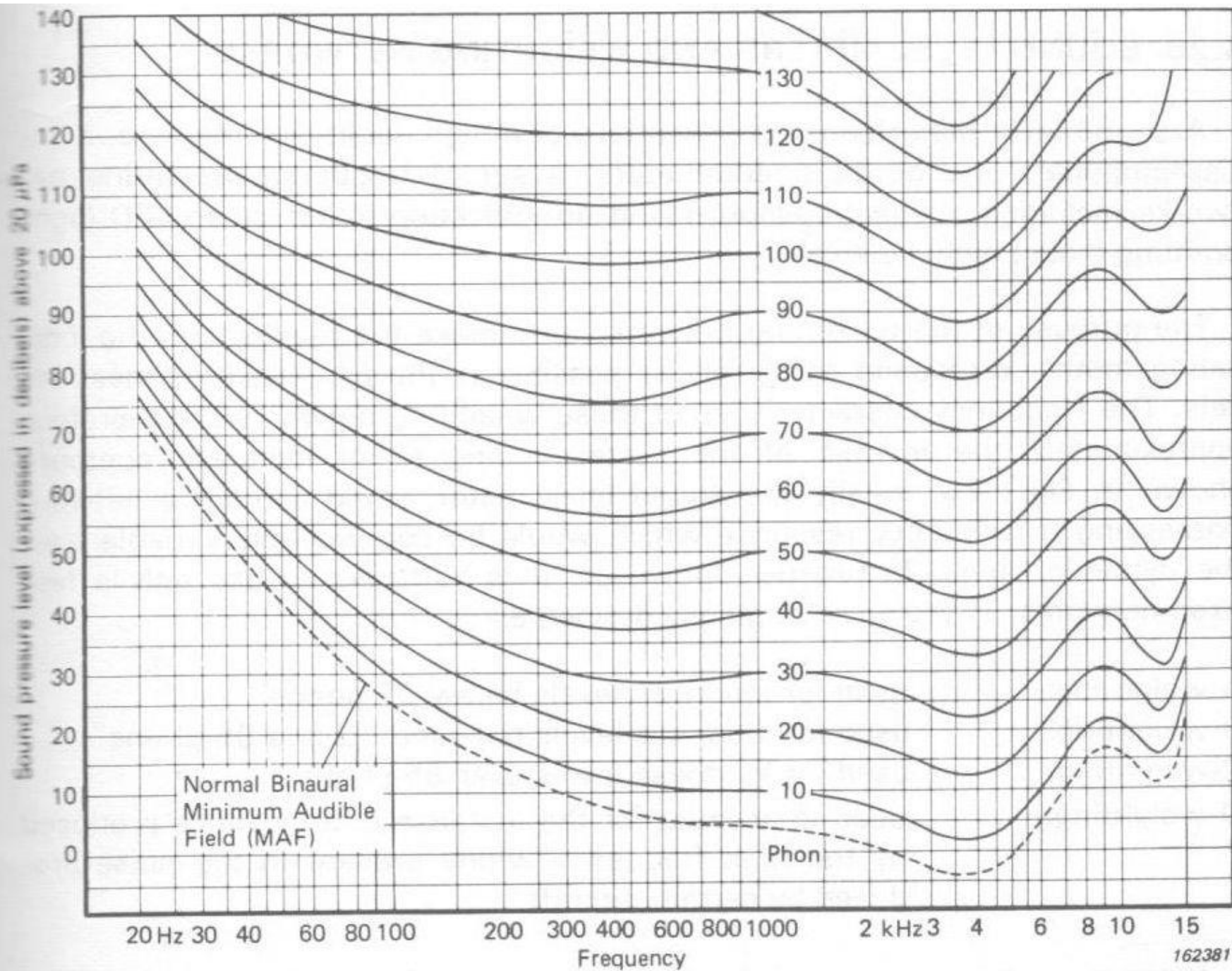


# Pola dźwiękowe









# WSTĘP DO AKUSTYKI POMIESZCZEŃ

Liczby kryterialne dotyczące hałasu

NR (noise rating)

NC (noise criteria)

PNC (preferred noise criteria)

Zależnie od przeznaczenia pomieszczenia NC/NR  
przyjmują następujące wartości:

## STUDIA i AUDYTORIA

- Studia radiowe dramatyczne NC 15(25dBA)
- Typowe studio radiowe/telewizyjne/nagrań NC 20(30dBA)
- Sale koncertowe teatru NC 20-25(30-35dBA)
- Sale kinowe NC 25-30(35-40dBA)

## POMIESZCZENIA SZPITALNE

- Pomieszczenia audiometryczne NC 20-25(30-35dBA)
- Sale operacyjne/izolatki NC 30-35(40-45dBA)
- Sale zbiorowe/pokoje przyjęć NC 35(45dBA)
- Korytarze/laboratoria NC 35-40(45-50dBA)
- Łazienki/kuchnie/toalety NC 35-45(45-55dBA)
- Pomieszczenia administracyjne NC 30-40(40-50dBA)

## HOTELE

- Pokoje NC 20-30(30-40dBA)
- Sale bankietowe/konferencyjne NC 30-35(40-45dBA)
- Korytarze/lobby NC 35-40(45-50dBA)

## RESTAURACJE, SKLEPY, MAGAZYNY

- Restauracje/sklepy/magazyny NC 35-40(45-50dBA)
- Kluby nocne/domy użyteczności publicznej/kawiarnie NC 40-45(50-55dBA)

## PRZEMYSŁ

- Portiernie/garaże NC 45-50(55-60dBA)
- Warsztat – przemysł lekki NC 45-55(55-65dBA)
- Warsztat – przemysł ciężki NC 50-65(60-75dBA)

## MIESZKANIA

- Sypialnie NC 25(35dBA)
- Pokoje NC 30(40dBA)

## BIURA

- Duże sale konferencyjne NC 25-30(35-40dBA)
- Małe sale konferencyjne/biura dyrekcji/pokoje recepcyjne NC 30-35(40-45dBA)
- Open space NC 35(45dBA)
- Kreślarnie obsługa komputerów NC 35-45(45-55dBA)



## BUDYNKI UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

- Sale rozpraw NC 25-30(35-40dBA)
- Sale widowiskowe NC 25-35(35-45dBA)
- Biblioteki/banki/muzea NC 30-35(40-45dBA)
- Łazienki/toalety NC 35-45(45-55dBA)
- Baseny/hale sportowe NC 40-50(50-60dBA)
- Garaże/parkingi NC 55(65dBA)

## BUDYNKI AKADEMICKIE, EDUKACYJNE, ZABUDOWA SAKRALNA

- Kościoły NC 25-30(35-40dBA)
- Sale lekcyjne/wykładowe NC 25-35(35-45dBA)
- Laboratoria/pracownie NC 35-40(45-50dBA)
- Korytarze/sale gimnastyczne NC 35-45(45-55dBA)

# Czas pogłosu

***RT lub  $RT_{60}$  → czas w jakim poziom ciśnienia dźwięku zmniejszy się o 60dB od stanu ustalonego***

**Wg. Sabine**

$$RT = \frac{0,161V}{A}$$

Gdzie:

RT – czas pogłosu [s]

V – objętość pomieszczenia [ $m^3$ ]

A – całkowita chłonność akustyczna pomieszczenia [ $m^2$ ] (w Sabinach)

Wg. Eyringa  $RT = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$

Gdzie:  $\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$  = średni współczynnik pochłaniania pomieszczenia

$S = s_1 + s_2 + \dots + s_n$  = powierzchnia materiałów składowych

**Wg. Fitzroya** 
$$RT = \frac{S_x}{S} \left[ \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}_x} \right] + \frac{S_y}{S} \left[ \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}_y} \right] + \frac{S_z}{S} \left[ \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}_z} \right]$$

Gdzie:

Np.  $\frac{S_x}{S} \left[ \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}_x + 4mV} \right]$  - składowa czasu pogłosu w osi x z uwzględnieniem pochłaniania powietrza (4mV)

S - całkowita powierzchnia pomieszczenia [m<sup>2</sup>]

V – całkowita objętość pomieszczenia [m<sup>3</sup>]

S<sub>x</sub> – całkowita powierzchnia równoległa do osi x

**Wg. Millingtona i Setta**  $RT = \frac{0,161V}{\sum -s_i \ln(1 - \alpha_i)}$

Gdzie:

$s_i$  – powierzchnia i-tego materiału

$\alpha_i$  – współczynnik pochłaniania i-tego materiału

# WSTĘP DO AKUSTYKI POMIESZCZEŃ

W najczęściej spotykanym pomieszczeniu prostopadłościennym o wymiarach  $l_x$   $l_y$   $l_z$  przy odpowiednim pobudzeniu akustycznym powstają fale stojące o następującym rozkładzie częstotliwości:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2\right]}$$

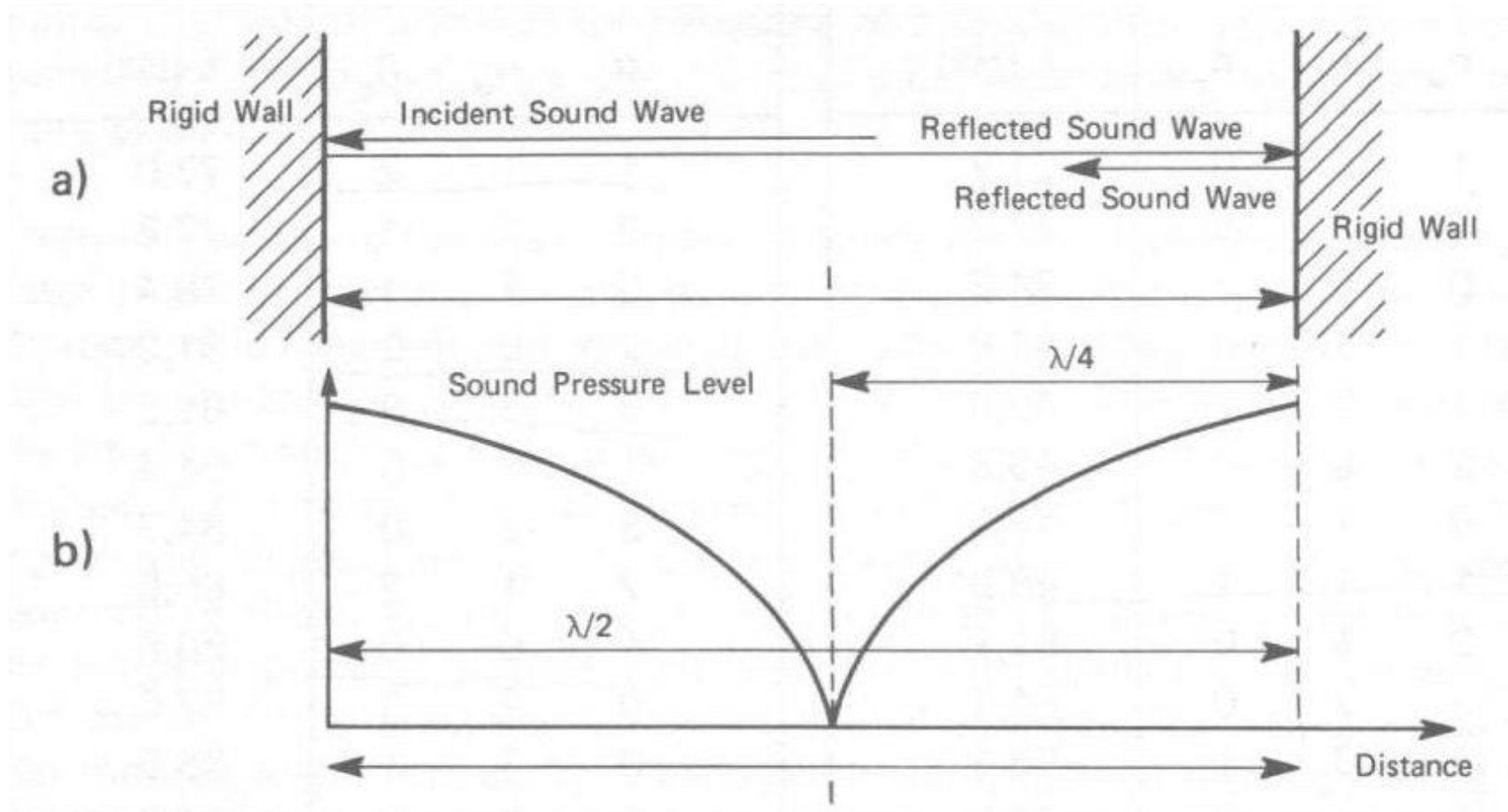
Gdzie:

$f$  – częstotliwości modalne

$l_x$   $l_y$   $l_z$  - wymiary pomieszczenia

$n$  – rząd postaci (0,1,2,3,...)

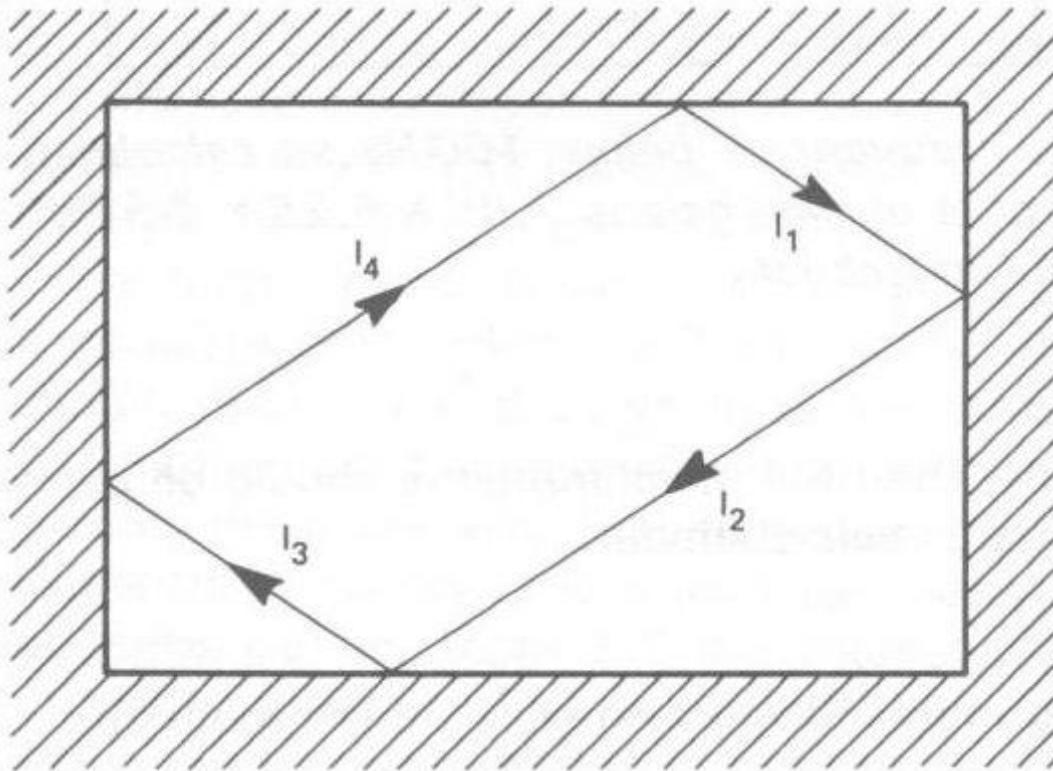
# Postacie drgań



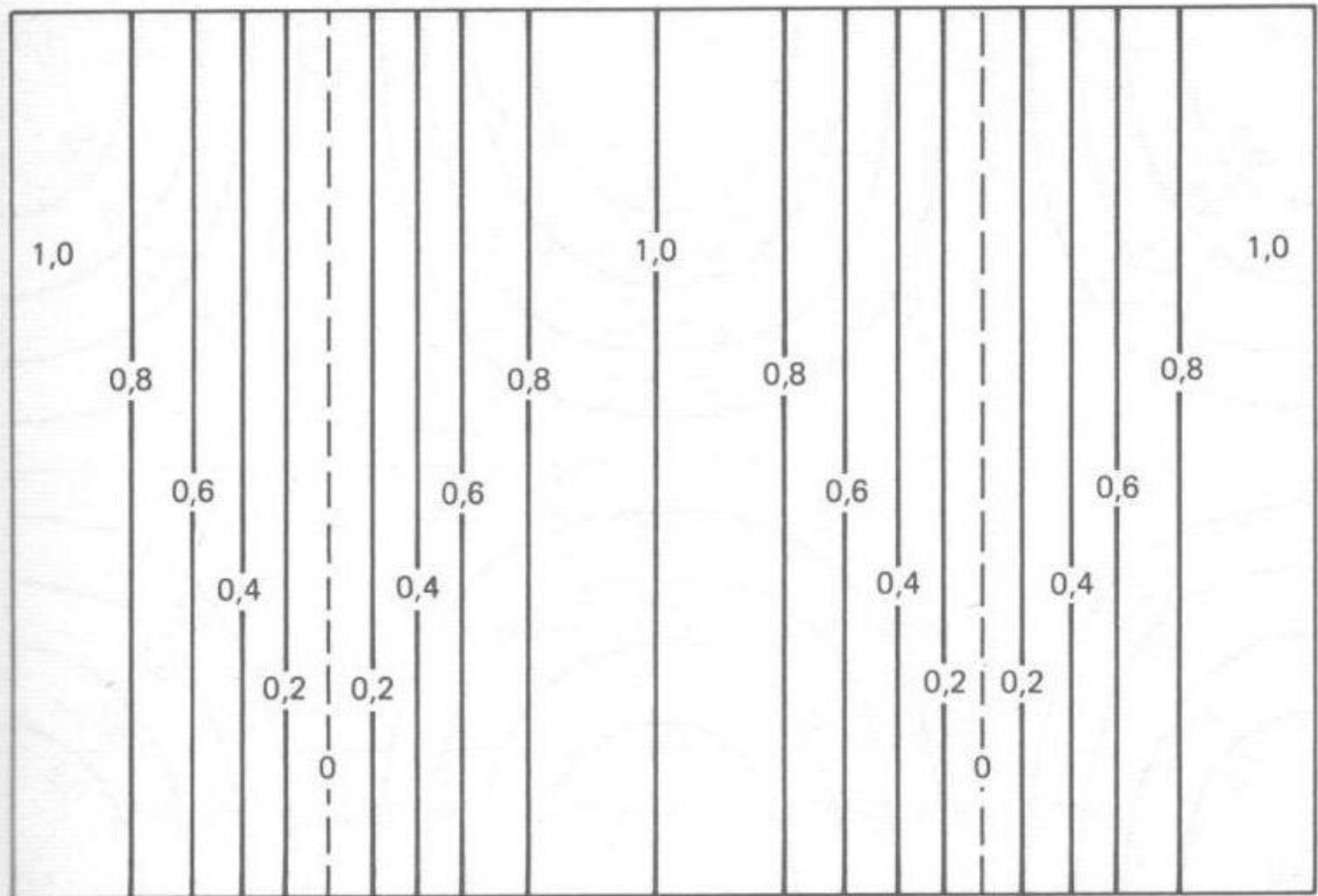
osiowe



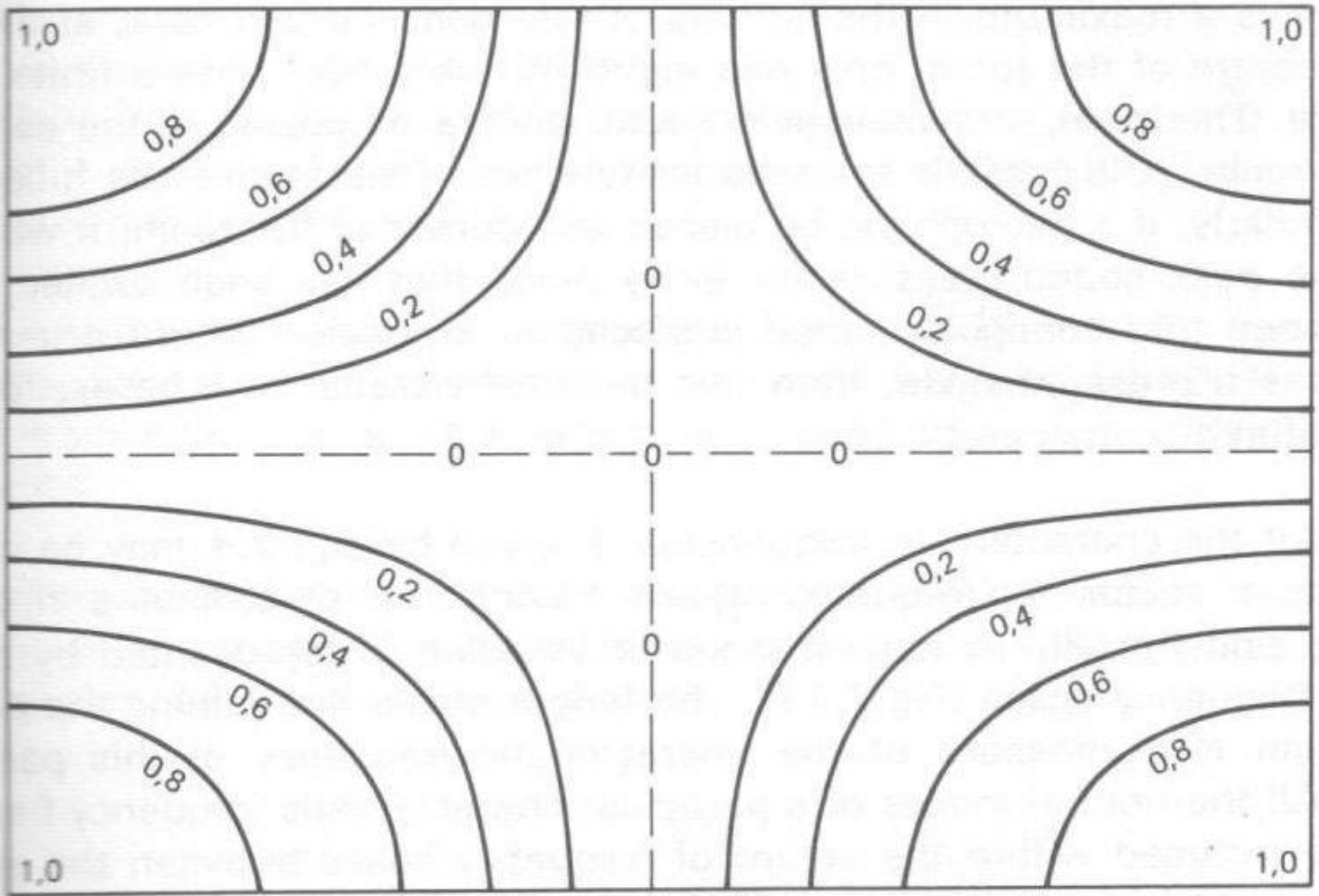
# Tangencjalne



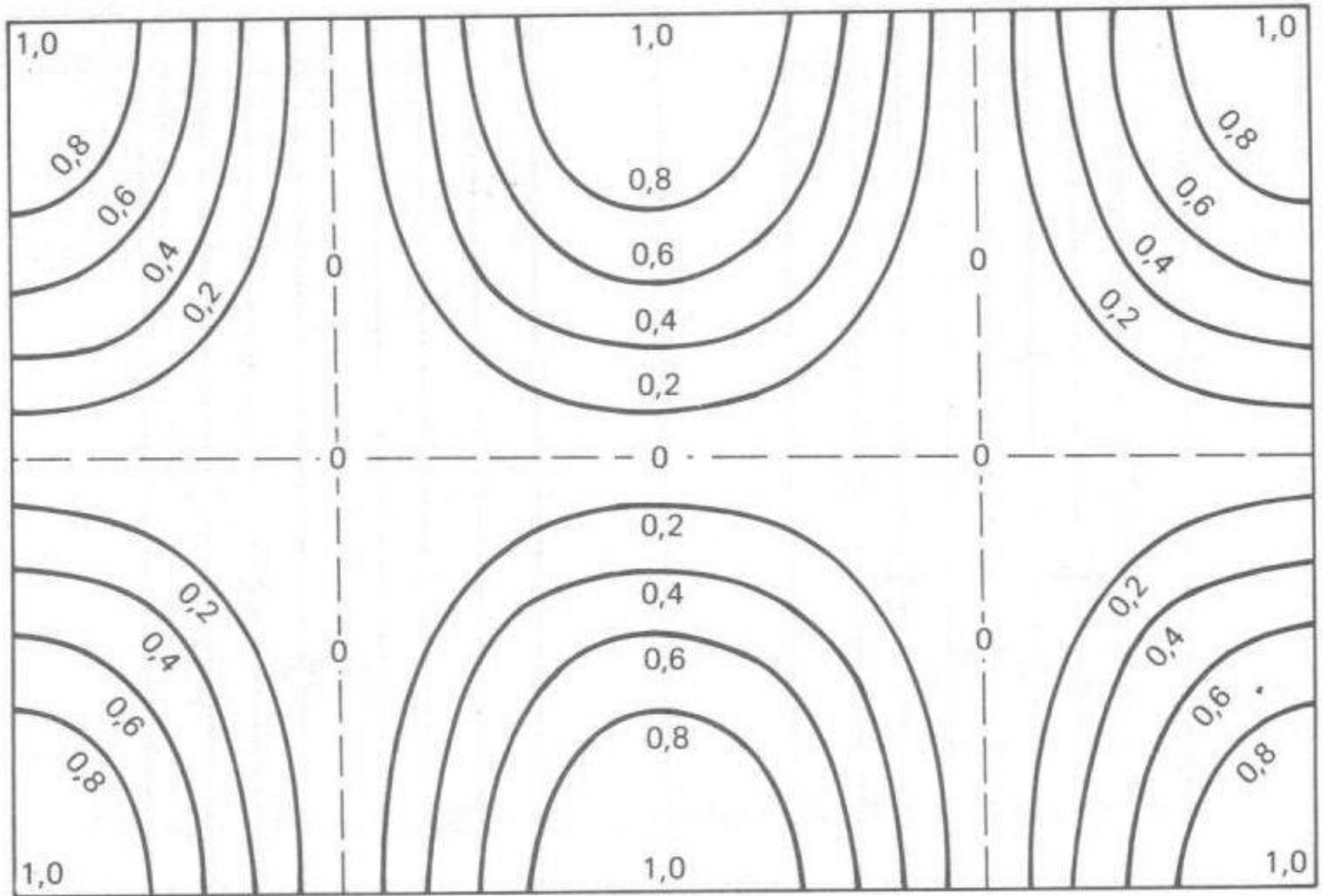
$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = n \frac{\lambda}{2}$$



Mode: (2,0,0)



Mode: (1,1,0)



Mode: (2,1,0)

Całkowita liczba postaci fal akustycznych  $n$  w okolicy częstotliwości  $f_c$

$$n = 4V \left( \frac{f_c}{c} \right)^3$$

$$\frac{\text{postać}}{\text{Hz}} = \frac{12V f_c^2}{c^3}$$

$$MFP = \frac{4V}{S}$$

# „Złote proporcje” pomieszczenia prostokątnego

Wymiary znormalizowane do jednostkowej  
wysokości  $h=1$

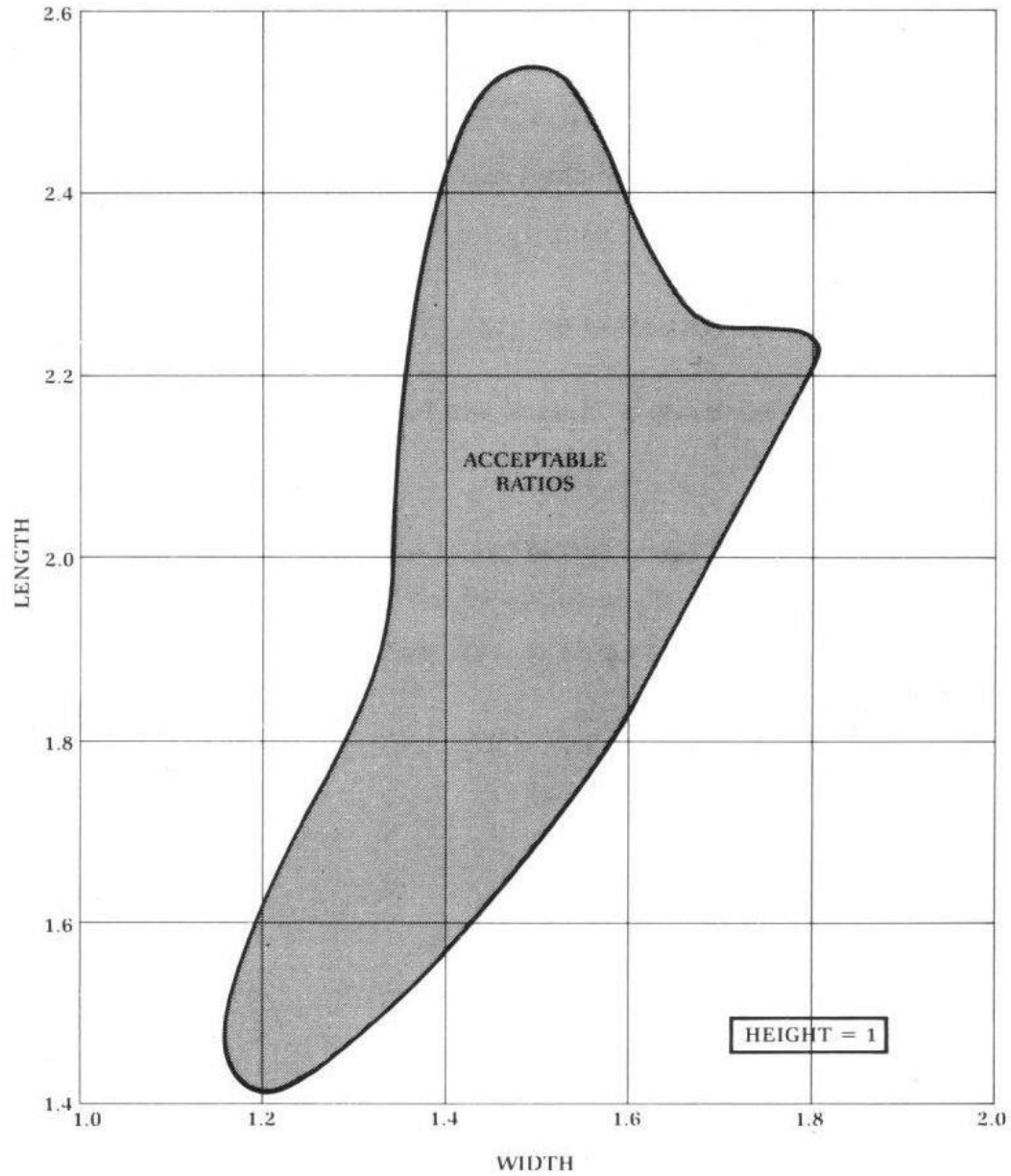
**1,14:1,39:1**

**1,28:1,54:1**

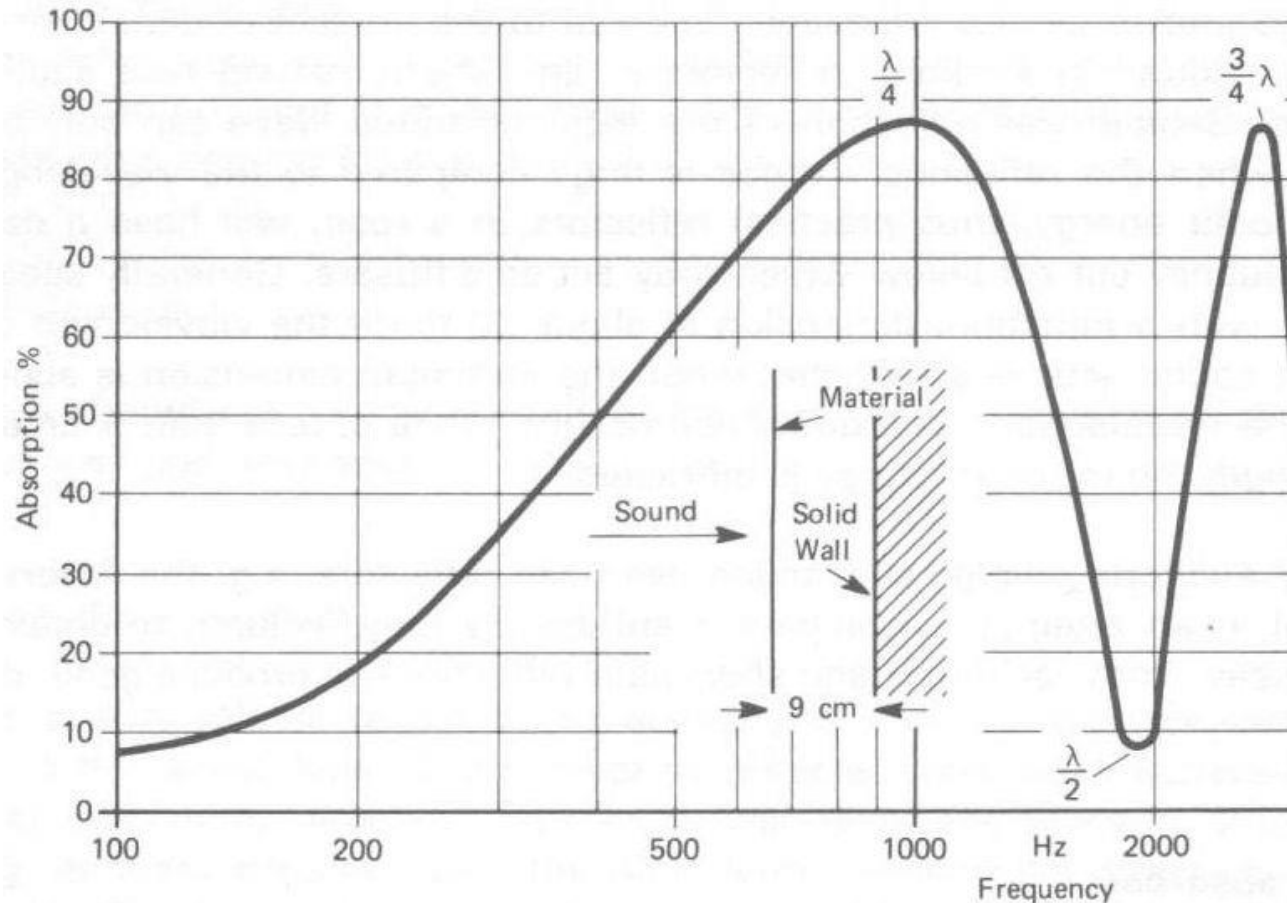
**1,6:2,33:1**

Proporcje te wyznaczają tzw. płaszczyznę Bolta, w której zawarte są akceptowalne, zalecane proporcje akustyczne pomieszczeń prostokątnych ze względu na jakość słuchanej muzyki oraz zrozumiałość mowy.

## Optimum room ratios

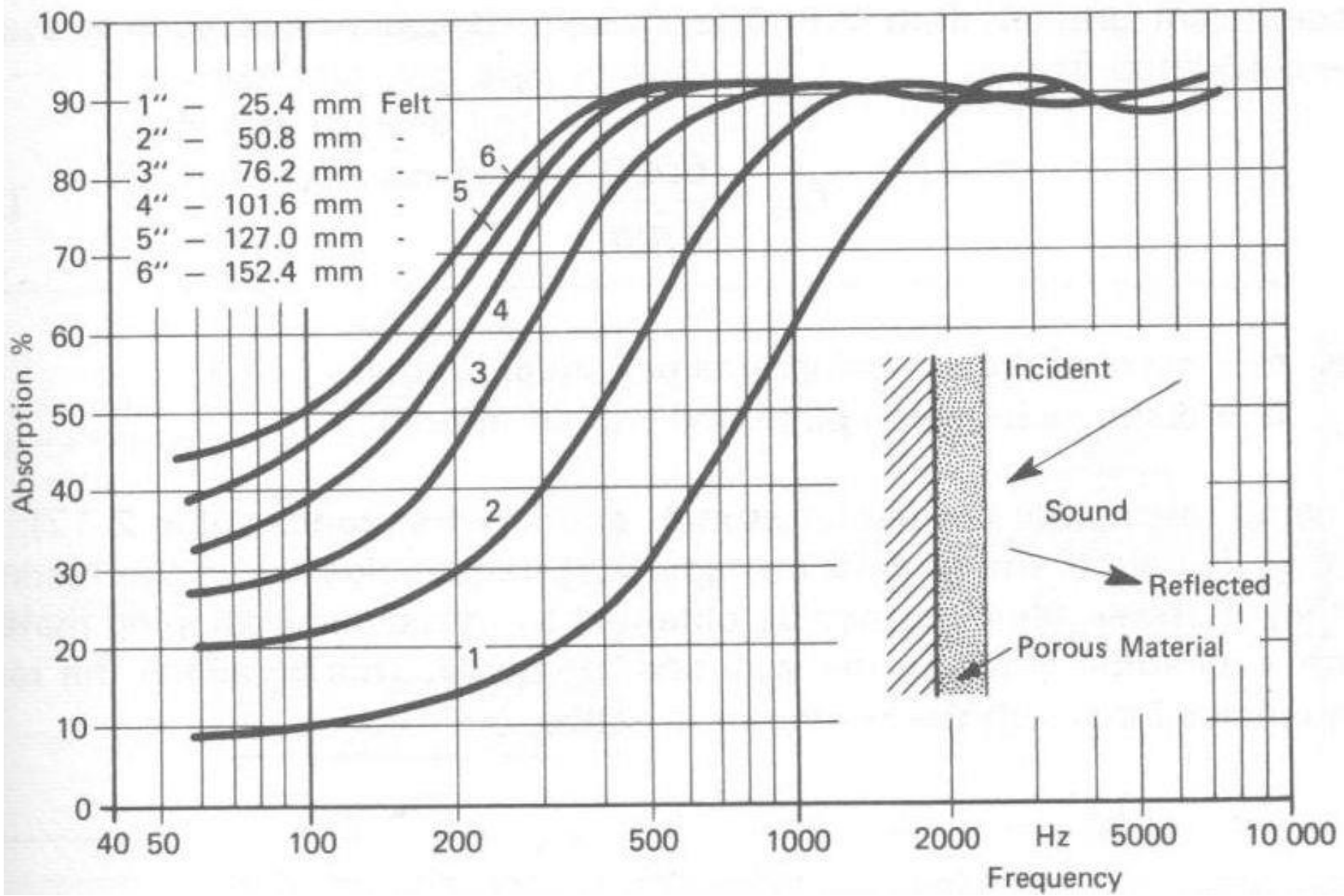


# Elementy akustycznej adaptacji pomieszczeń



Powierzchniowe pochłaniacze dźwięku





# Panelowe pochłaniacze dźwięku

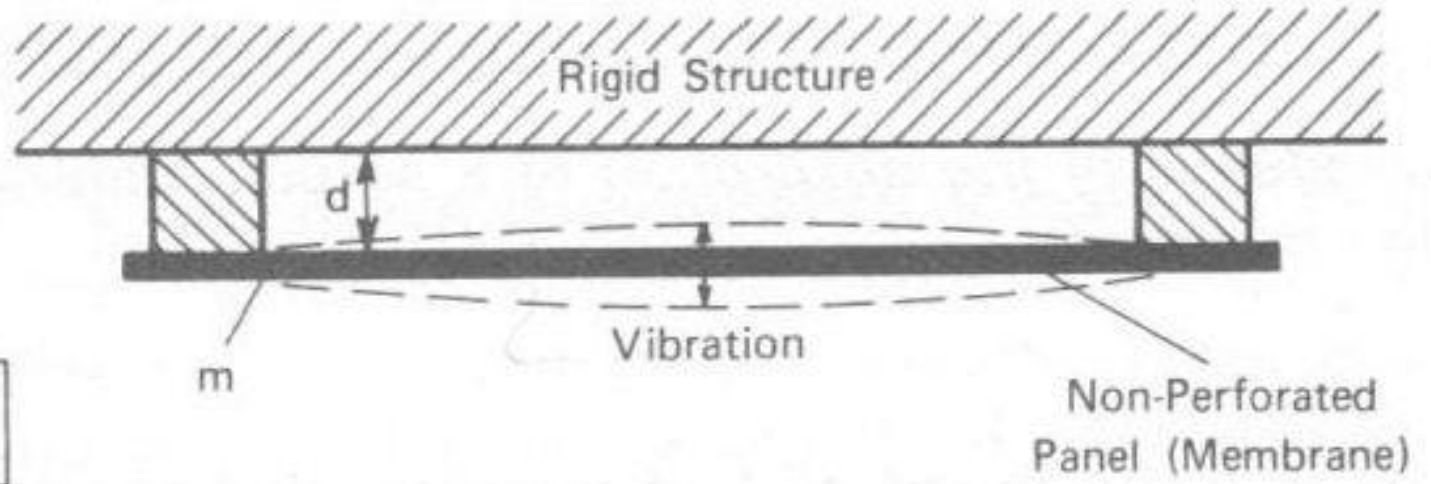
Jeśli współczynnik pochłaniania dźwięku jest większy od 0,5 częstotliwość rezonansowa panelowego pochłaniacza dźwięku wynosi:

$$f_{res} = \frac{6000}{\sqrt{md}}$$

Gdzie:

m – powierzchniowa masa pochłaniacza [kg/m<sup>2</sup>]

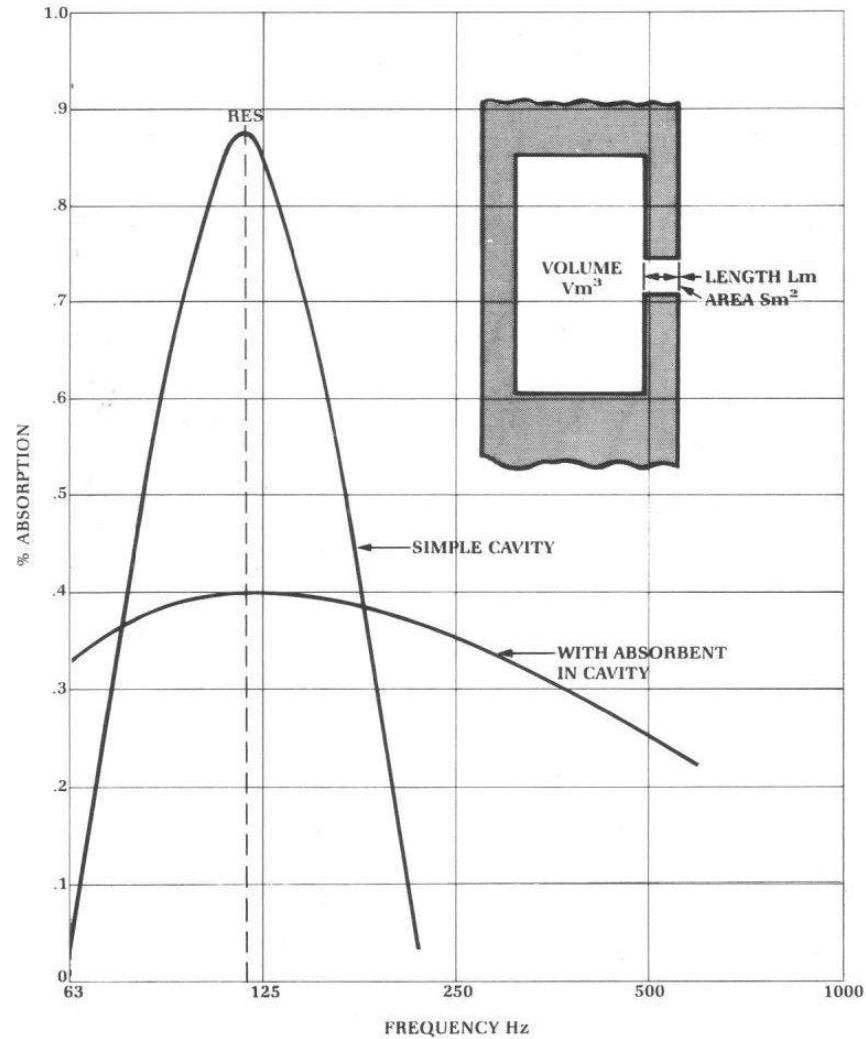
d – odległość między pochłaniaczem a twardą ścianą odbijającą [m]



$$f_o = \frac{6000}{\sqrt{m \cdot d}}$$

$m$  = Mass of panel in  $\text{kg/m}^2$   
 $d$  = Distance Structure-Panel in  $\text{m}$

# Pochłaniacze rezonansowe (rezonatory Helmholtza)



$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}}$$

Gdzie:

$c$  – prędkość dźwięku [m/s]

$S$  – przekrój powierzchni otworu wlotowego rezonatora [ $m^2$ ]

$L$  – długość otworu wlotowego rezonatora [m]

$V$  – objętość wnętrza rezonatora [ $m^3$ ]

Zależnie od własności pochłaniających lub tłumiących wnętrza rezonatora charakterystyki przebiegają następująco:

# Porowate materiały pochłaniające

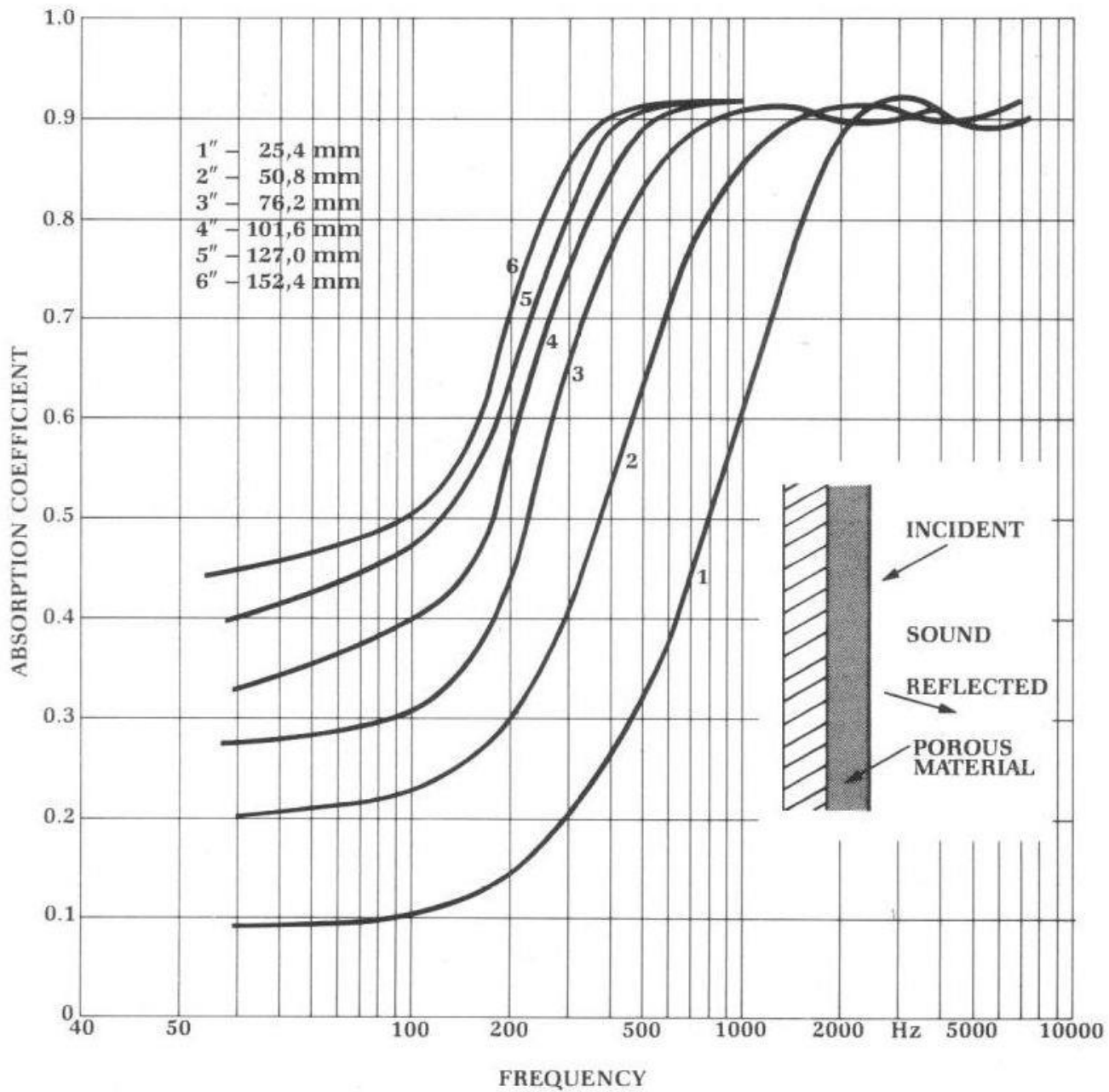
Częstotliwość, poniżej której własności chłonne materiału maleją

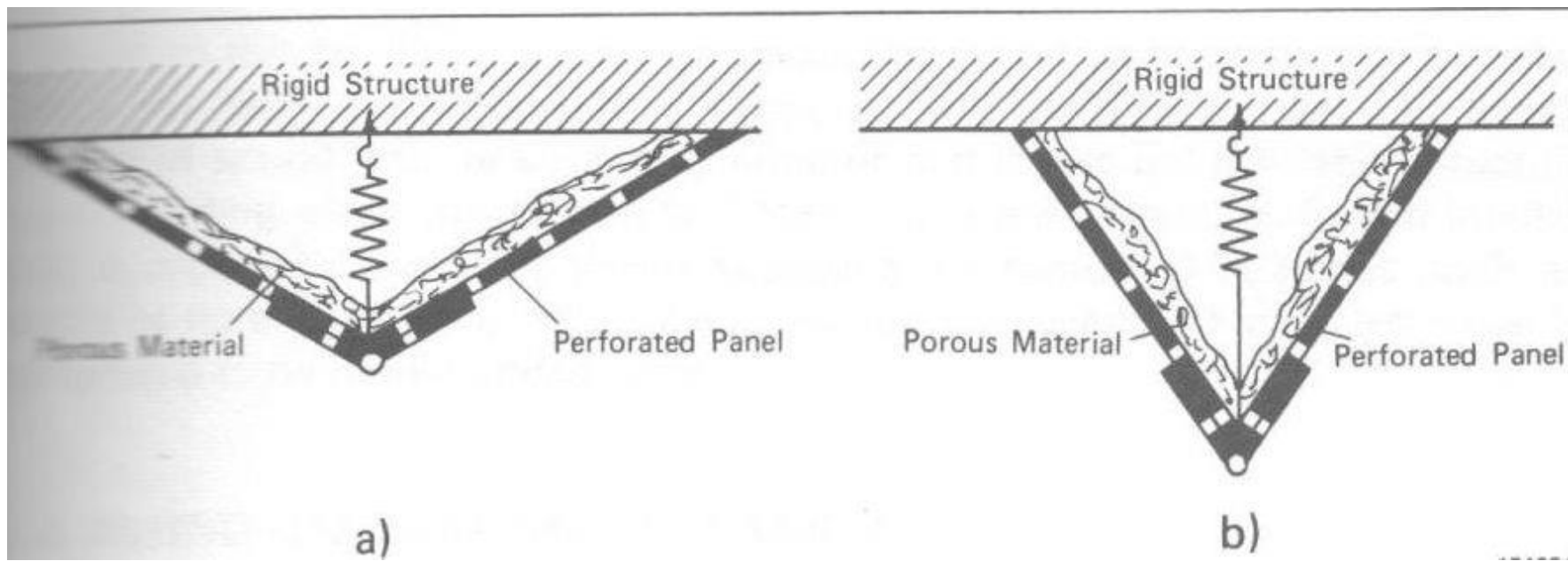
$$f = \frac{c}{2D} [Hz]$$

Gdzie:

$c$  – prędkość dźwięku

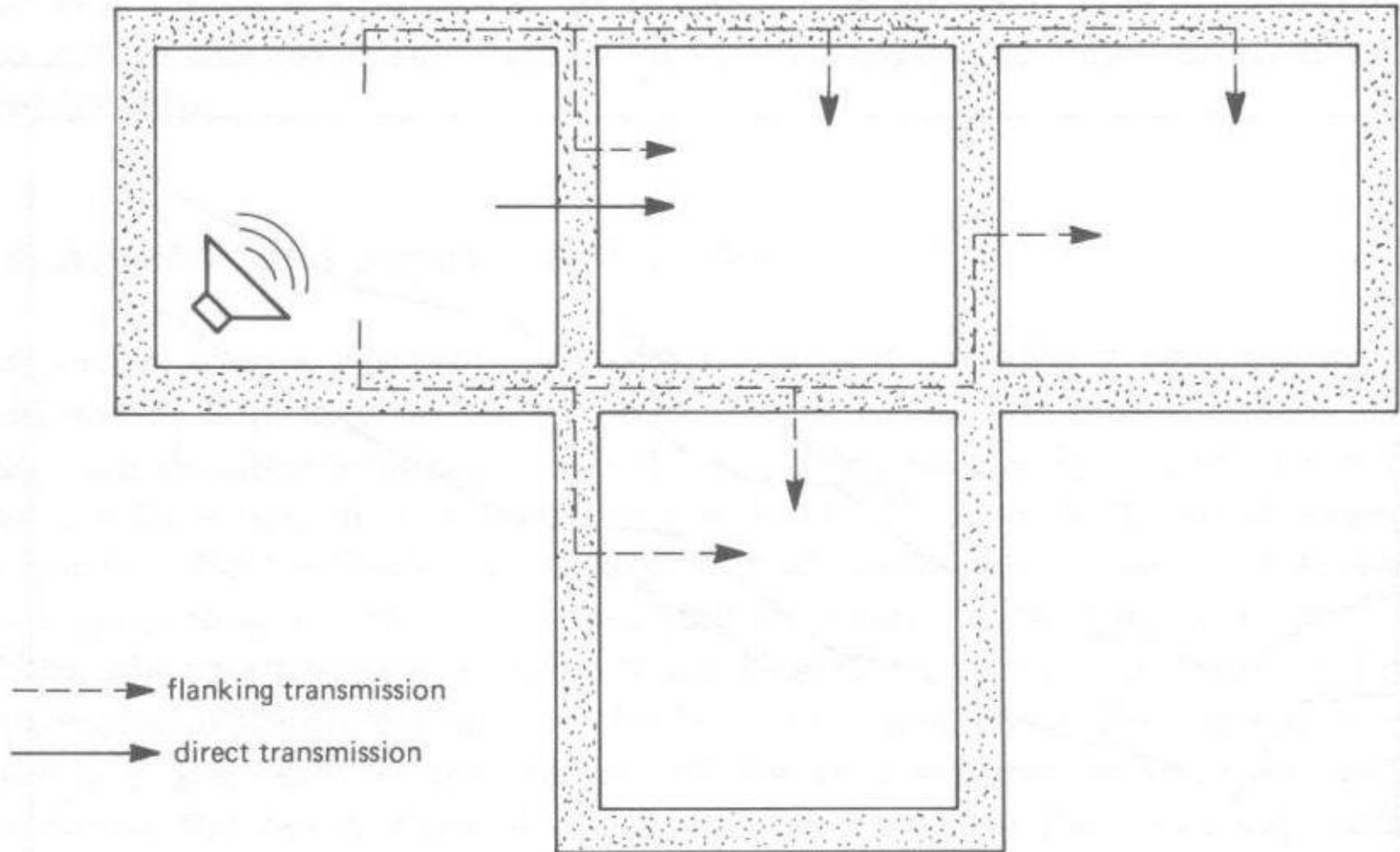
$D$  – grubość materiału porowatego







# Przegrody akustyczne



## Drogi przenoszenia dźwięku między pomieszczeniami

Izolacyjność akustyczną ścian charakteryzuje się jako:

$$R = 10 \log \left( \frac{W_1}{W_2} \right) [dB]$$

Gdzie:

$W_1$  - moc dźwięku padającego na ścianę w pomieszczeniu nadawczym

$W_2$  – moc dźwięku przenikającego przez ścianę w pomieszczeniu odbiorczym (chronionym)

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{S}{A} \right)$$

Gdzie:

$L_1$  – uśredniony poziom ciśnienia dźwięku w pomieszczeniu nadawczym

$L_2$  – uśredniony poziom ciśnienia dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym

$S$  – powierzchnia ściany/przegrody oddzielającej pomieszczenia

$A$  – równoważna chłonność akustyczna pomieszczenia odbiorczego wyznaczona z pomiaru czasu pogłosu

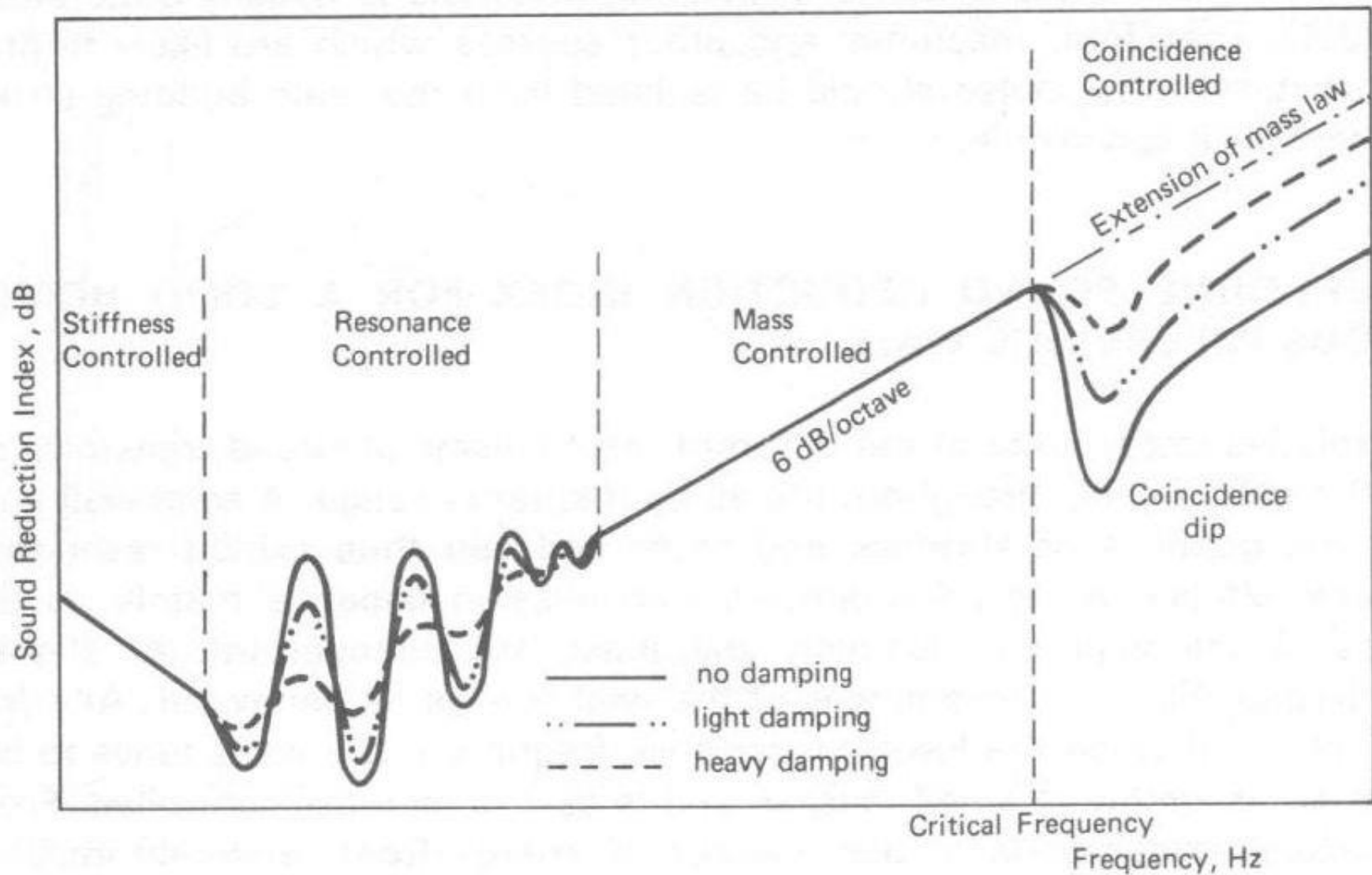
Izolacyjność akustyczna jednorodnej przegrody stałej

$$R = 20 \log(fm) - 47 \text{ dB}$$

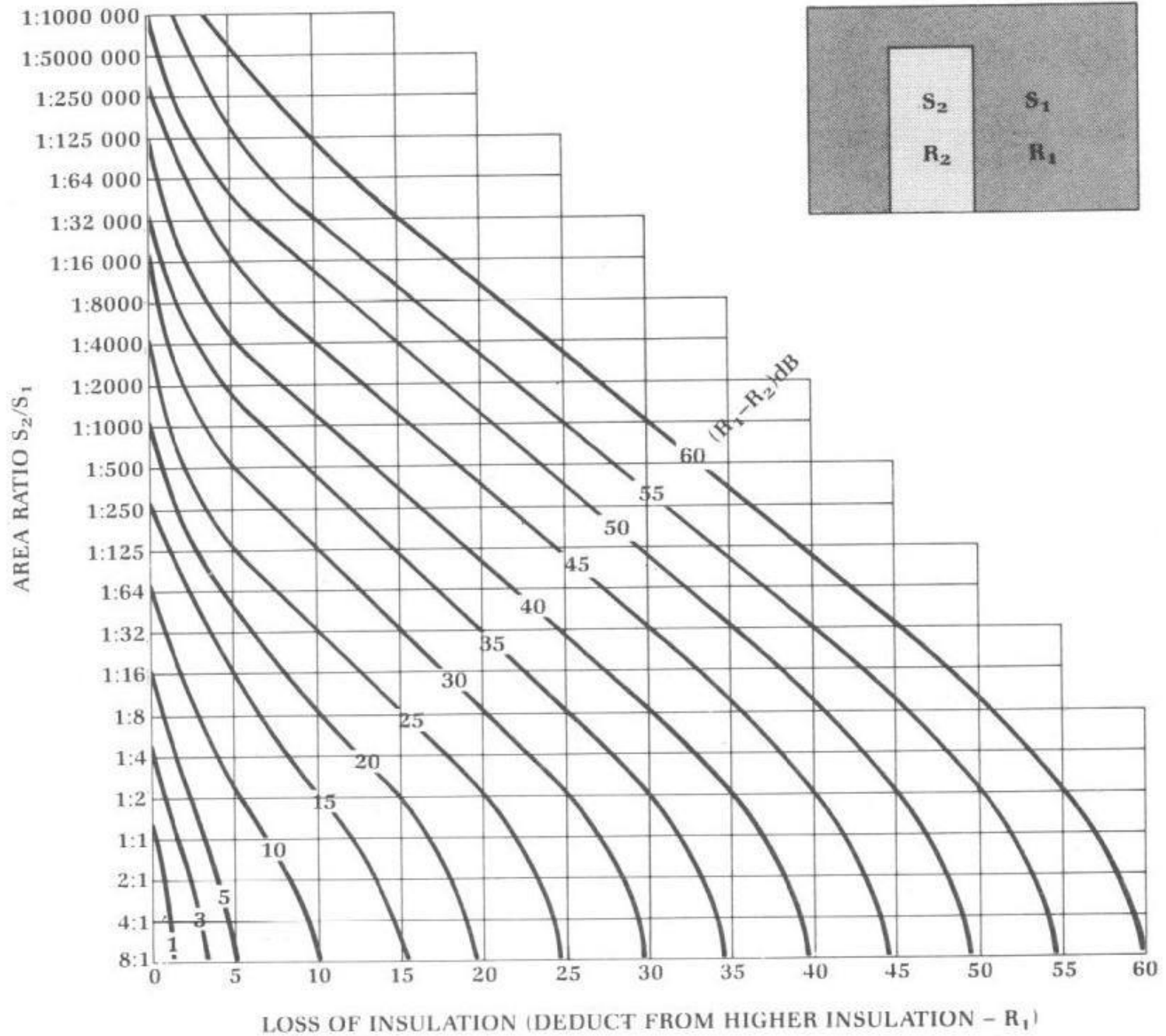
Gdzie:

$f$  – częstotliwość dźwięku padającego [Hz]

$m$  – powierzchniowa gęstość przegrody [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]



W przypadku przegród niejednorodnych o różnych powierzchniach i różnych izolacyjnościach akustycznych strata  $R$  przedstawiona jest na poniższym rysunku.



LOSS OF INSULATION (DEDUCT FROM HIGHER INSULATION -  $R_1$ )

Dziękuję za uwagę



Dr inż. Wit Stanek  
Metoda Studio 2015