

A wide-angle photograph of a grand concert hall. The stage is filled with an orchestra of musicians and their instruments, including violins, cellos, and a harp. The hall features ornate architectural details, including a coffered ceiling with gold accents and decorative wall sconces. The audience seating is visible in the foreground, consisting of rows of dark blue seats.

WYBRANE ASPEKTY AKUSTYKI SAL KONCERTOWYCH

TADEUSZ KAMISIŃSKI

**IX Webinarium Techniczne Akademii Inżynierskiej w Polsce
Styczeń 2022**



Plan wystąpienia

- Wprowadzenie
- Teatr Variete – nowy panel refleksyjny
- Opera we Lwowie - panel dyfuzyjny
- Opera Krakowska –bariera orkiestronu
- Podsumowanie

Czas pogłosu

$$T_{60} = \frac{0.16 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}}$$

Sabine

$$T_{60} = \frac{0.16 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha} + 4mV} \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \cdot \alpha_i$$

V – objętość

S – pole powierzchni ścian

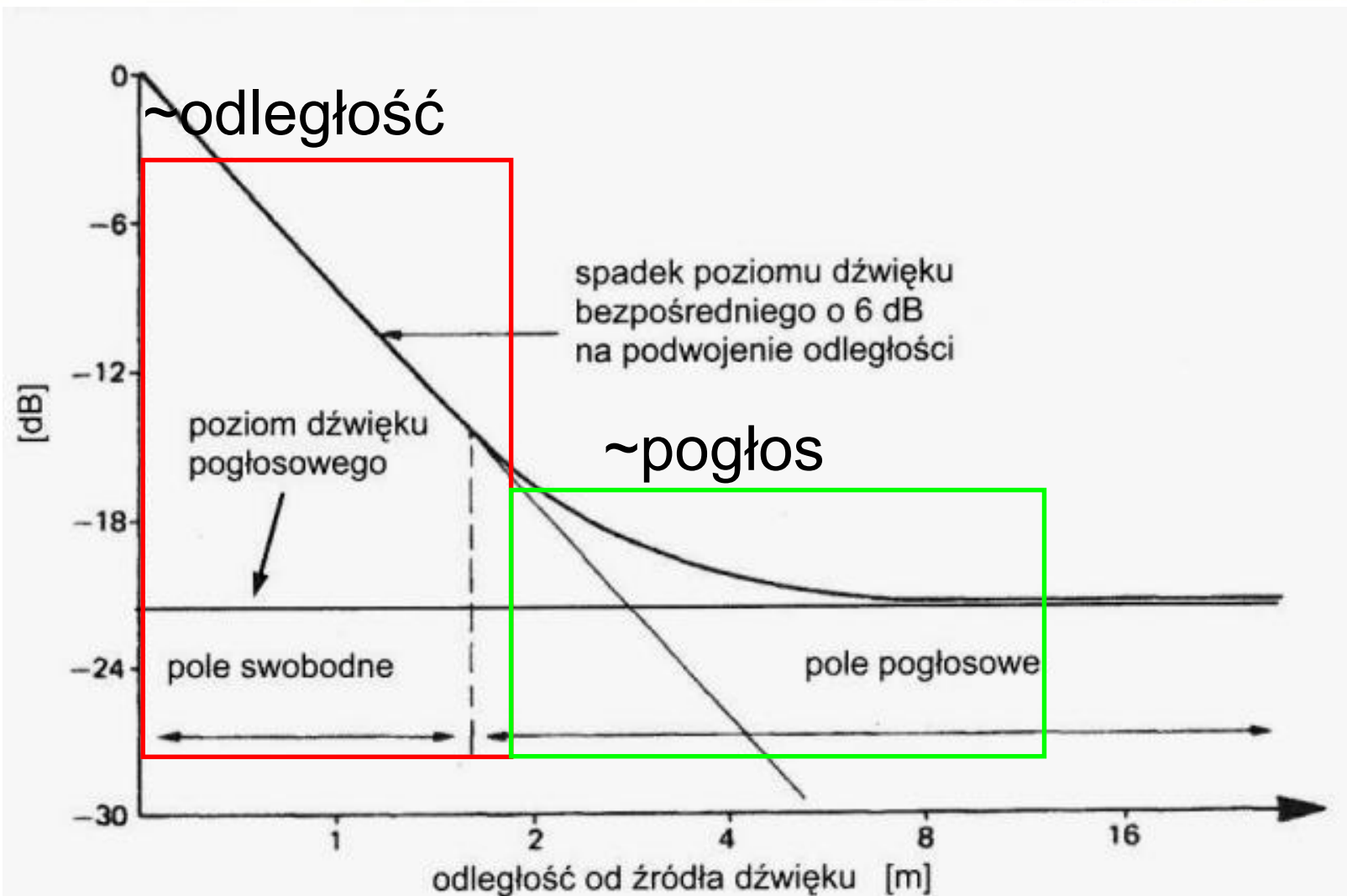
α_i – współczynnik pochłaniania dźwięku powierzchni S_i

m – współczynnik określający chłonność akustyczną powietrza

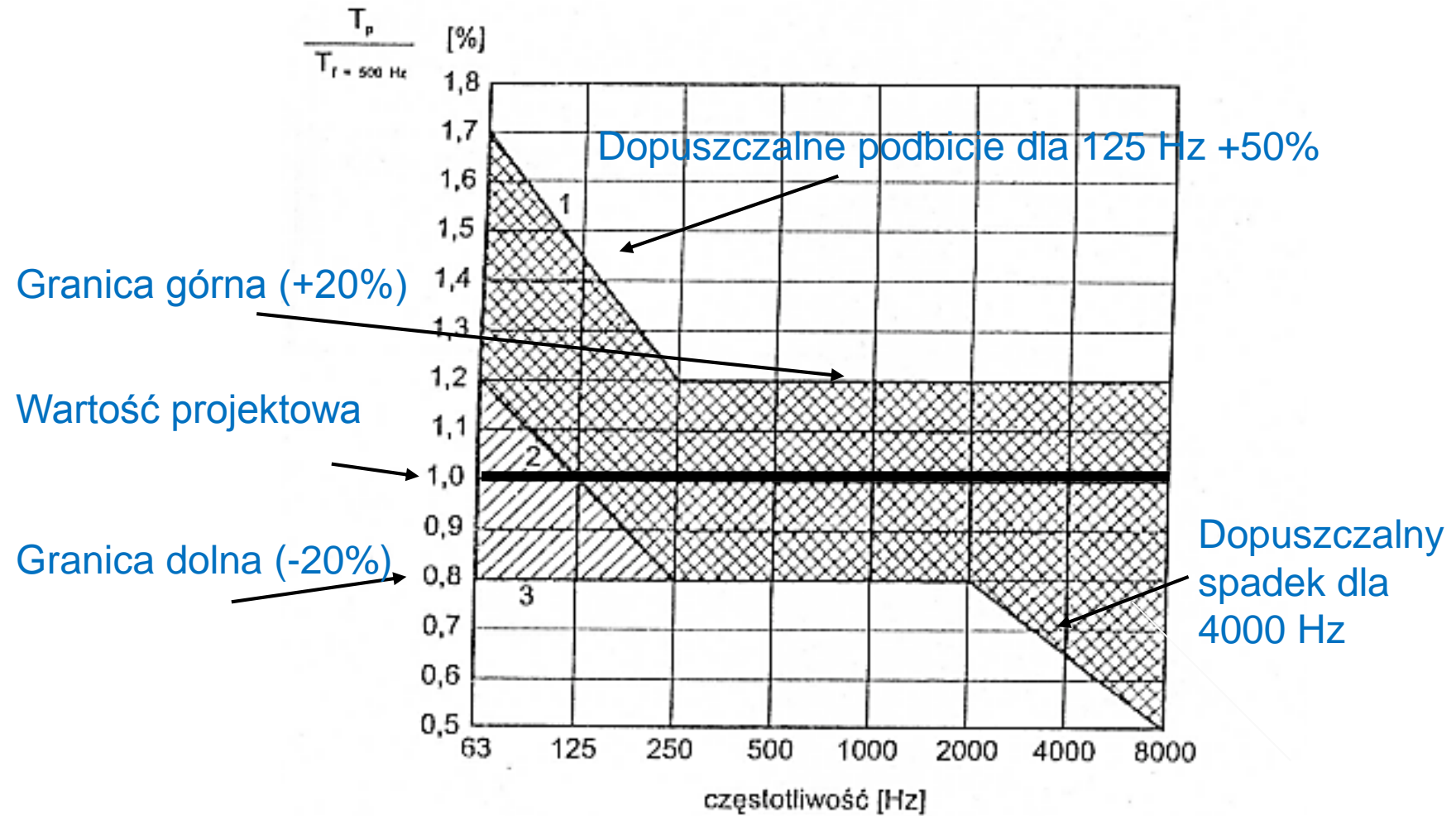


Wallace Sabine 1868-1919

Spadek poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji odległości od źródła dźwięku



Czas pogłosu – typowa charakterystyka



Czas pogłosu - zalecenia

Czas pogłosu zalecany dla różnego rodzaju produkcji dźwiękowej
wg Meyera i Neumana [26, część 2]

Rodzaj produkcji dźwiękowej	Czas pogłosu [s]
Mowa: kabarety, widowiska odczyty	0,8 1,0
Muzyka: muzyka kameralna	1,0 do 1,5
opery	1,3 do 1,6
koncerty	1,7 do 2,1
muzyka organowa	2,5 do 3,0

Czas pogłosu zalecany dla sal o różnej funkcji
wg Brückmayera [82, rozdz. 3]

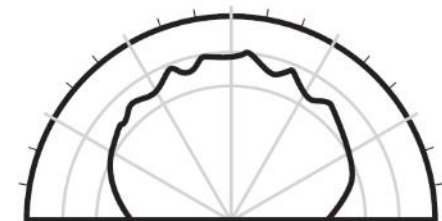
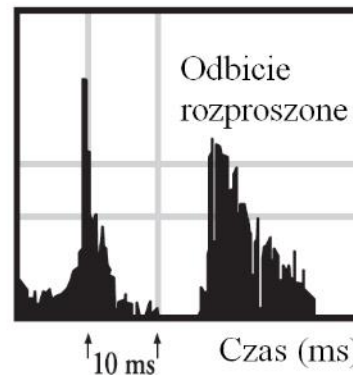
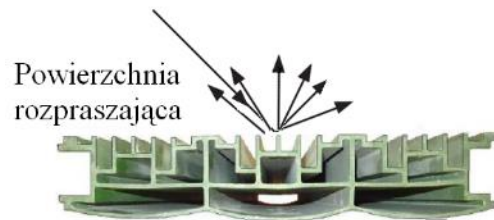
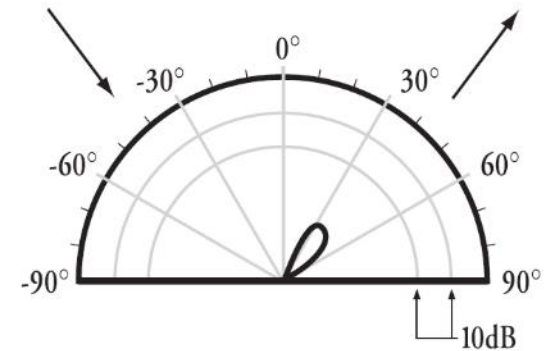
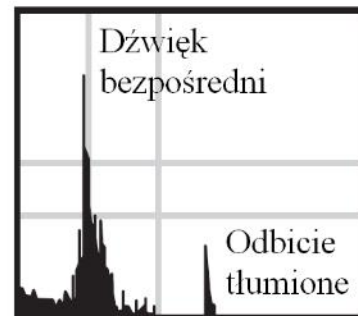
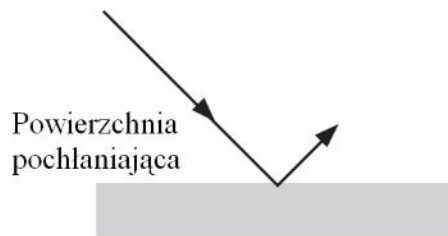
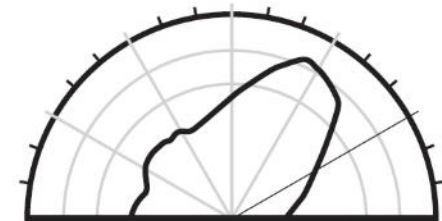
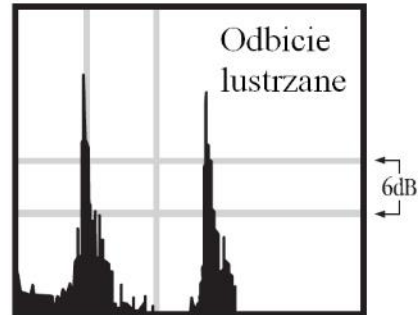
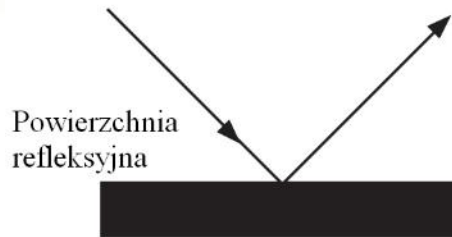
Funkcja pomieszczenia	Czas pogłosu [s]	
	zakres	wartość zalecana
sale chóru	1,0 do 1,3	1,2
teatry dramatyczne	1,2 do 1,5	1,4
teatry wielofunkcyjne	1,3 do 1,6	1,5
teatry operowe	1,4 do 1,7	1,6
sale koncertowe	1,7 do 2,0	1,9

Ustroje akustyczne

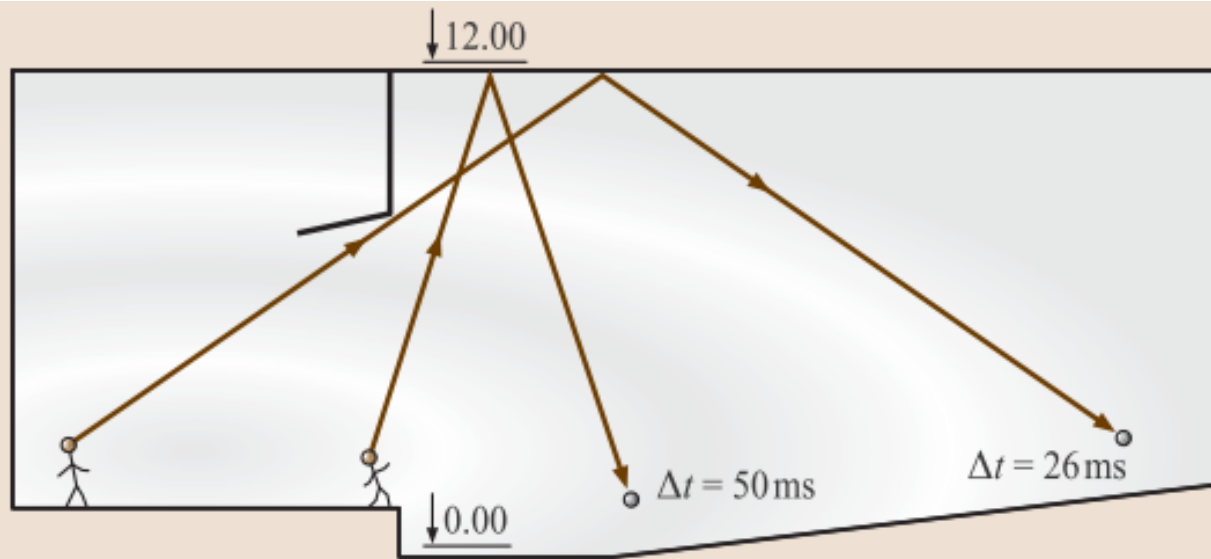
Rodzaj ustroju akustycznego

Przebieg czasowy odpowiedzi impulsowej

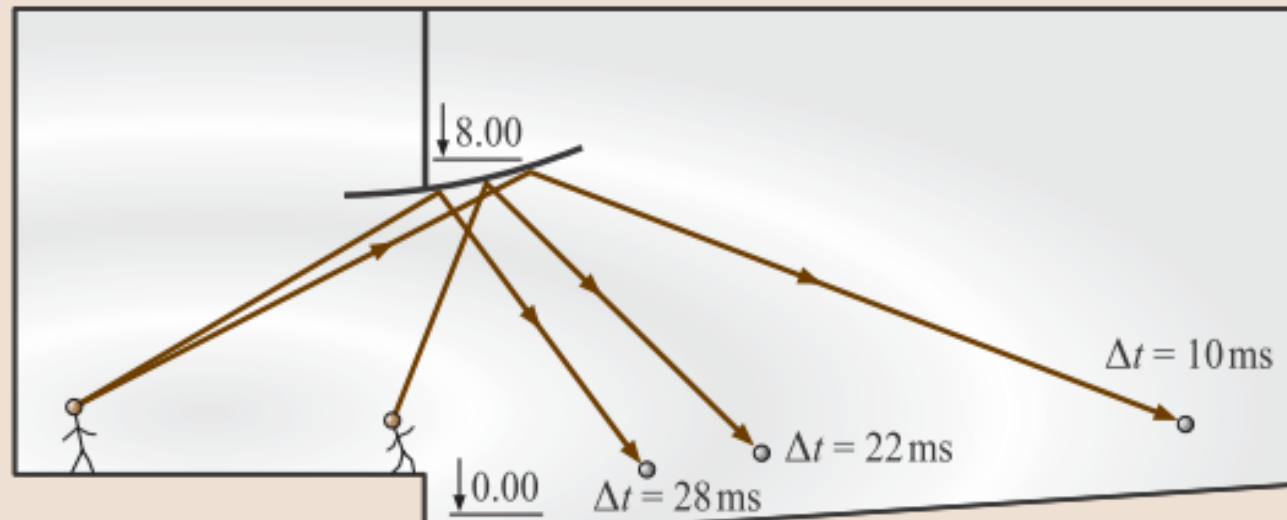
Charakterystyka kierunkowości odbicia



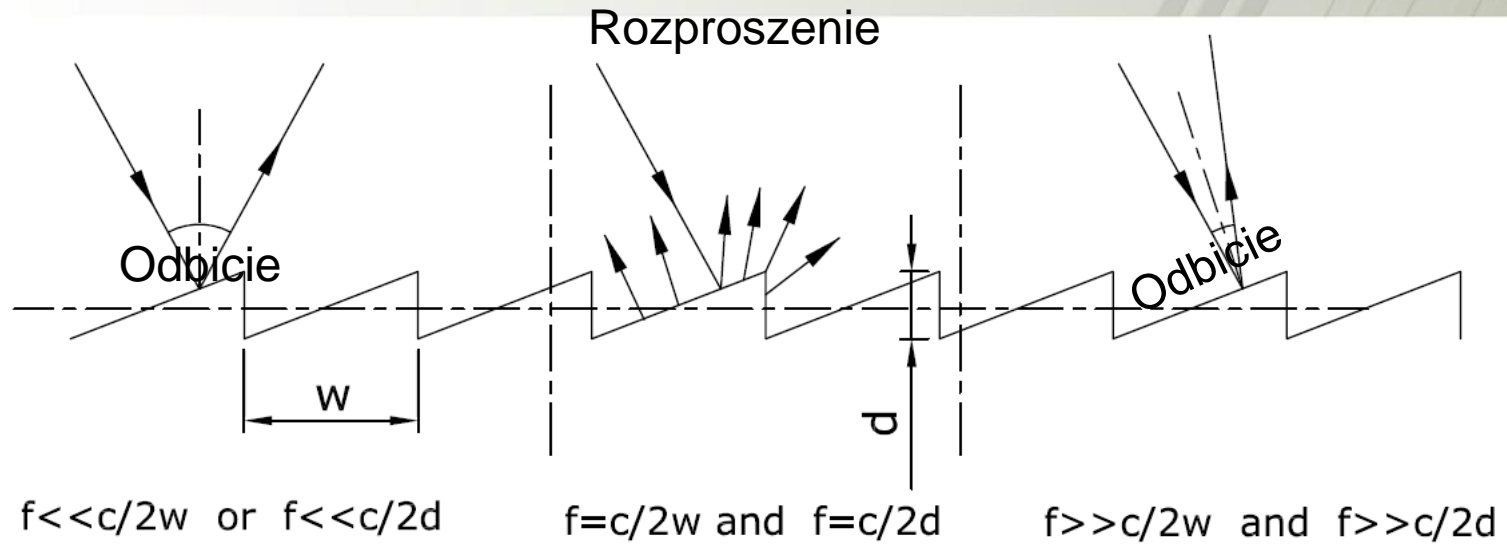
Opóźnienie pierwszego odbicia



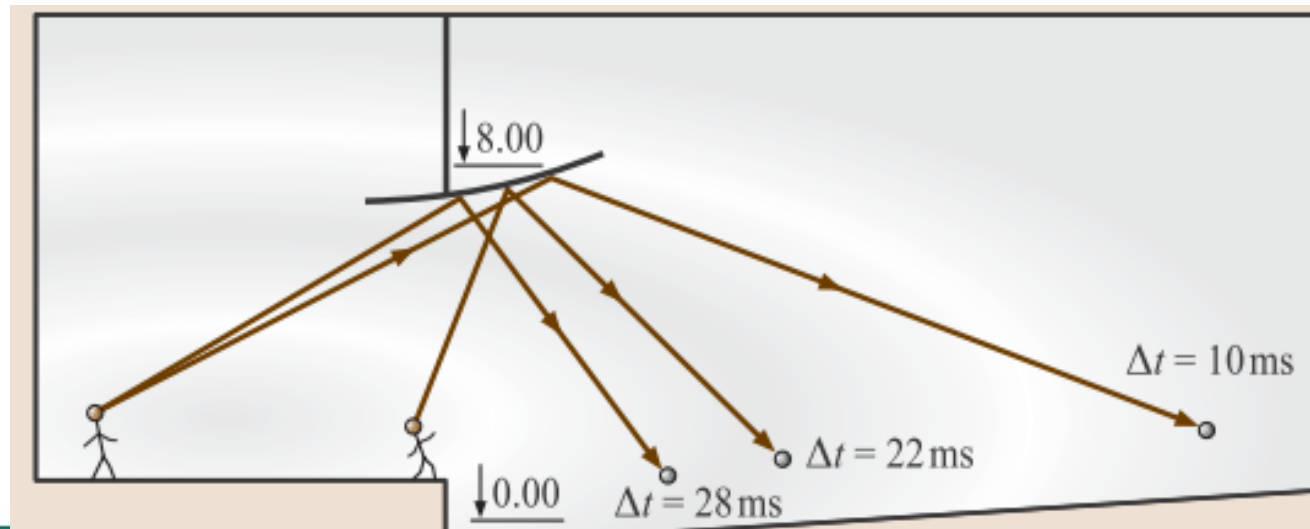
Max $\Delta t = 35 \text{ ms}$



Odbicie i rozproszenie fal

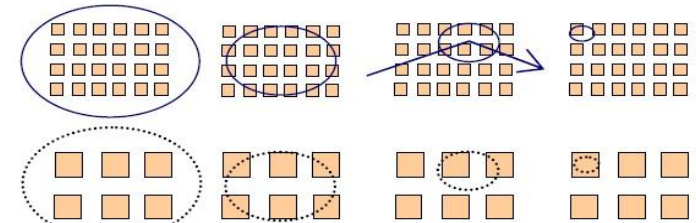
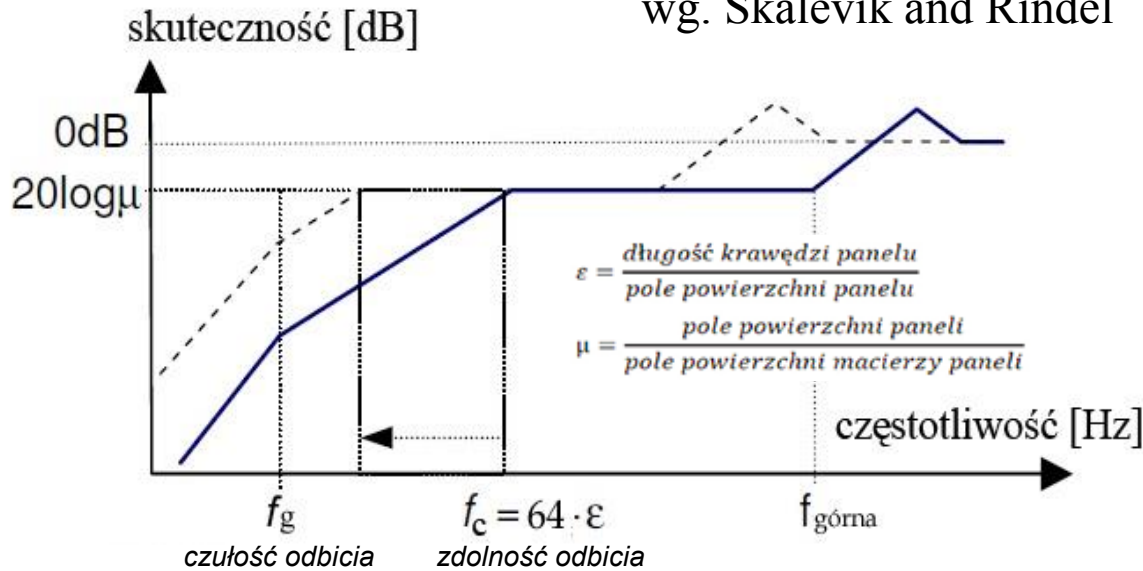


Max $\Delta t = 35\text{ms}$



Zakres częstotliwości fali odbitej

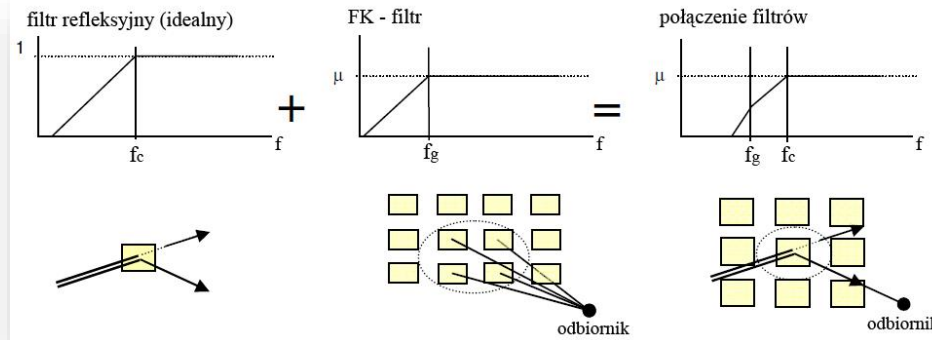
wg. Skålevik and Rindel



Strefa Fresnela maleje wraz ze wzrostem częstotliwości padające fali akustycznej.

$$f_g = \frac{ca^*}{2S_{macierz/panel} \cos \Theta}$$

$$a^* = \frac{2a_1 a_2}{a_1 + a_2}$$



c – prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w powietrzu
 a^* – odległość charakterystyczna
 $S_{macierz}$ – pole powierzchni całej macierzy paneli refleksyjnych
 Θ – kąt padania fali akustycznej na macierz paneli refleksyjnych

Nadsceniczny panel refleksyjny

laboratoryjne badania doświadczalne



Teatr Variete w Krakowie

Nadsceniczny panel refleksyjny.

Patent nr P.407925.

Wdrożony w teatrze Variete Krakowie (2015)



Teatr Variete w Krakowie

Panel refleksyjny zintegrowany z rozpraszaczem Schroedera charakteryzuje się rozszerzonym zakresem częstotliwości dźwięku odbitego.

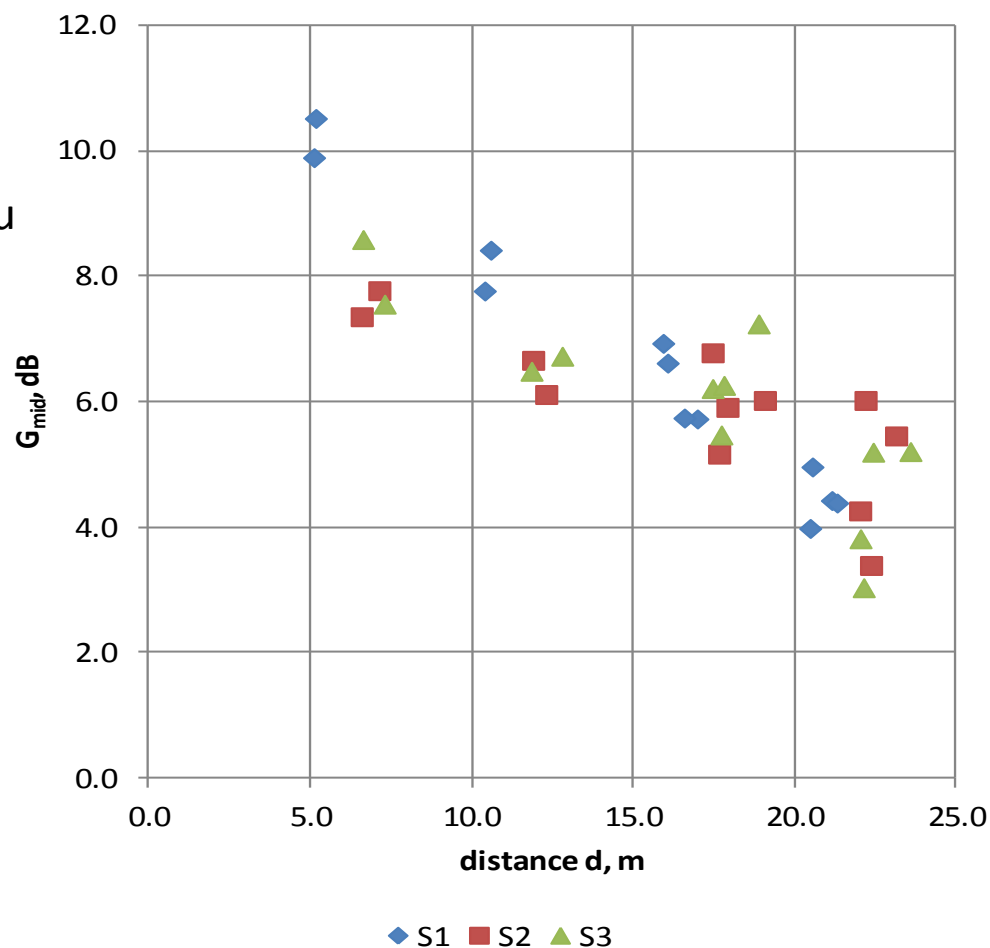


parametr $ST_{early} = -11,7$ dB
W zakresie 250 Hz do 4 kHz (+/_ 2 dB)

Pomiary powykonawcze w Teatrze Variete w Krakowie

Siła dźwięku (G)

W wyniku działania paneli nadscenicznych, przesuając źródło dźwięku w kierunku tyłu sceny wartości parametru G rosną w środkowej i tylnej części widowni.



Pozycja źródła dźwięku: S1 – przód sceny, S2 – środek, S3 – tył sceny



Opera we Lwowie

Kubatura widowni: 4374 m³, fosa ork.: 175 m³.

Ilość miejsc: 998.

Czas pogłosu: pustej sali 1,15 s (pomiar), z ludźmi 1,10 s (obl.),
zalecany 1,26 s.

Rok budowy: 1900

Podstawowe

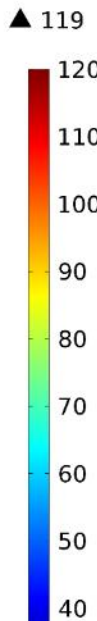
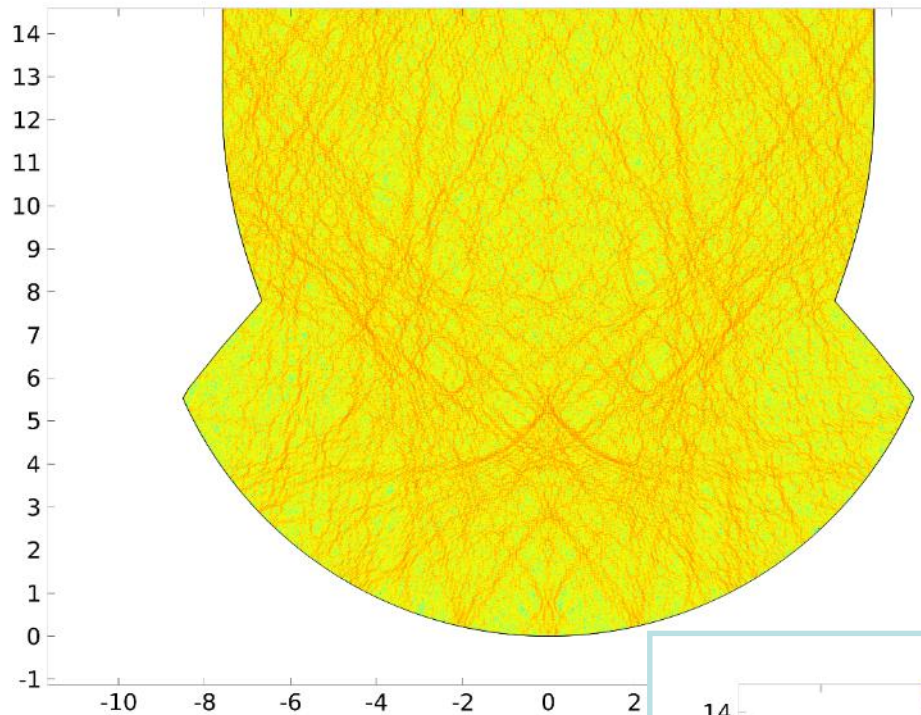
funkcje sali:

muzyka operowa,

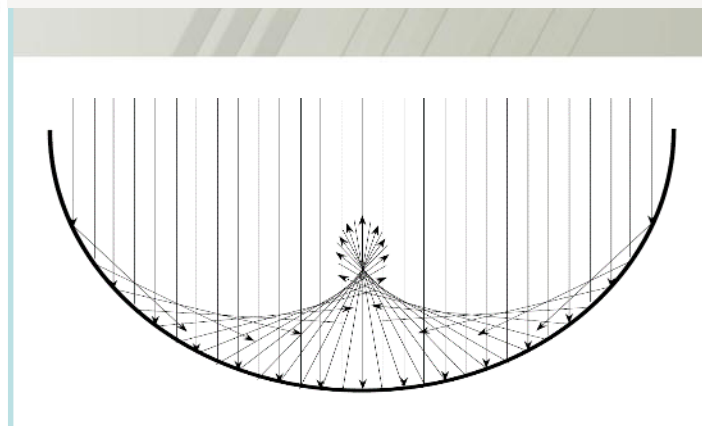
teatr dramatyczny



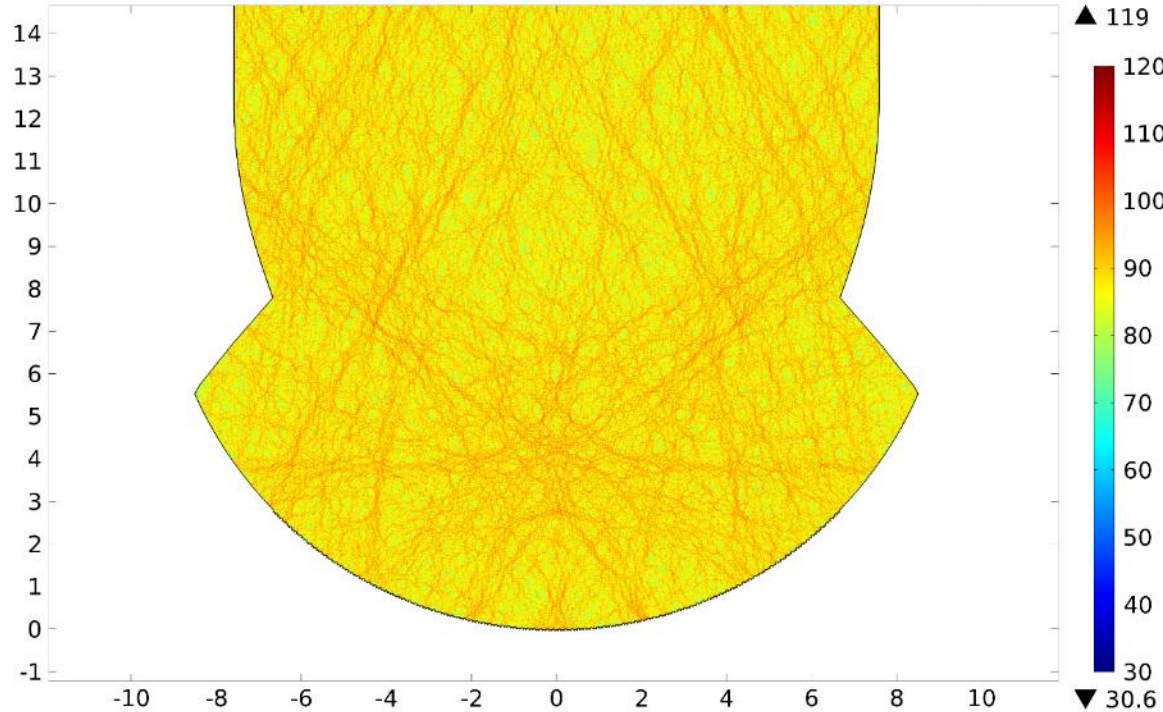
freq(7)=4000 Surface: Sound pressure level (dB)



a) Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego przed modernizacją (bez QRD) Comsol software



freq(7)=4000 Surface: Sound pressure level (dB)



b) Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego po modernizacji (z QRD) Comsol software



AGH

Opera we Lwowie

Modernizacja ściany tylnej 2012



Przed instalacją



Po instalacji na tylnej ścianie rozpraszacza Schroedera o powierzchni 12.6 x 1.8 m

BADANIA LABORATORYJNE PANELU DYFUZYJNEGO

Współczynnik rozproszenia dźwięku s (scattering coefficient)
wg ISO 17497-1 Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces – Part 1

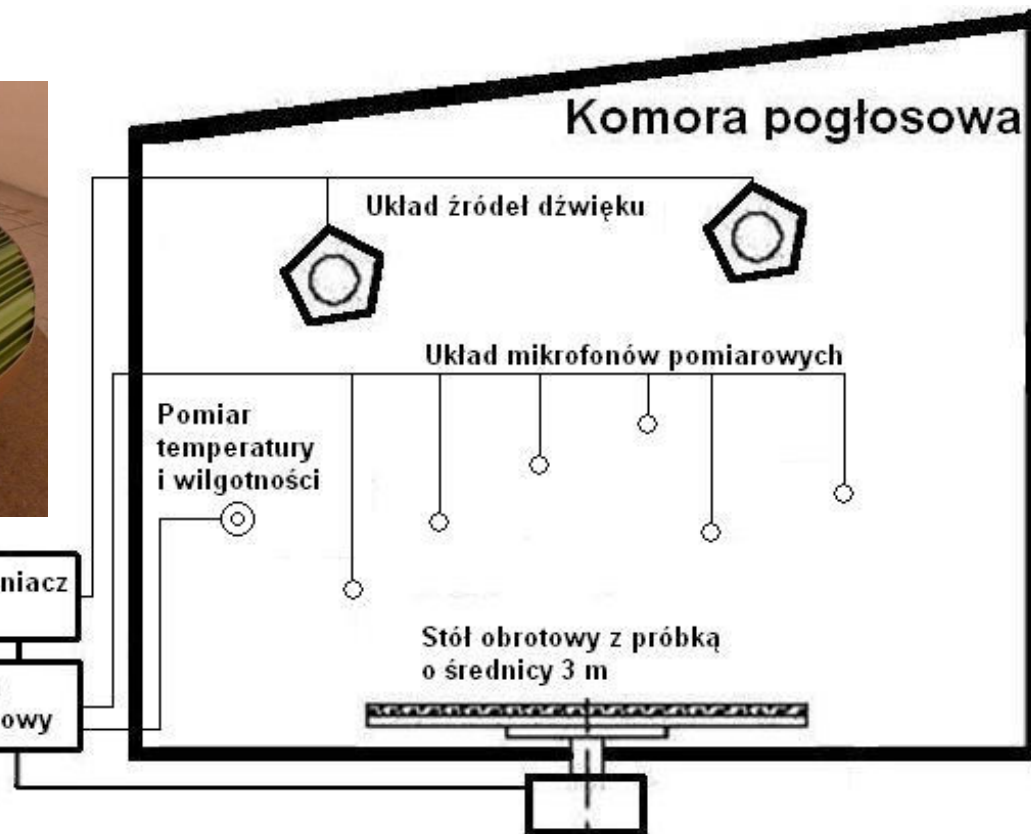
$$s = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{tot}}}$$

E_{spec} – energia odbita lustrzanie
 E_{tot} – energia odbita całkowita



Wzmacniacz
mocy

System
pomiarowy



Projektowanie panelu dyfuzyjnego

Panel dyfuzyjny został zaprojektowany w oparciu o sekwencję residuum kwadratowego o długości okresu $N=7$. Wyrazy ciągu s_n wyznaczono na podstawie zależności:

$$s_n = n^2 \bmod N$$

gdzie:

n – całkowite liczby nieujemne ($0, 1, \dots, n-1$),
 N – długość okresu.

Głębokości studzienek d_n ustroju podaje zależność :

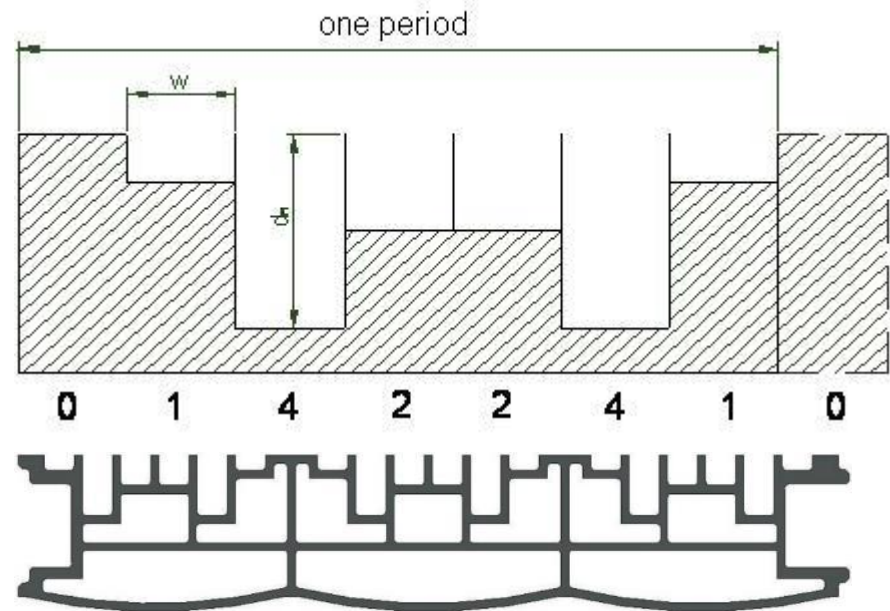
$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N}$$

gdzie:

λ_0 – długość fali odpowiadająca dolnej granicy pasma f_0 , w którym zachodzi rozproszenie dźwięku

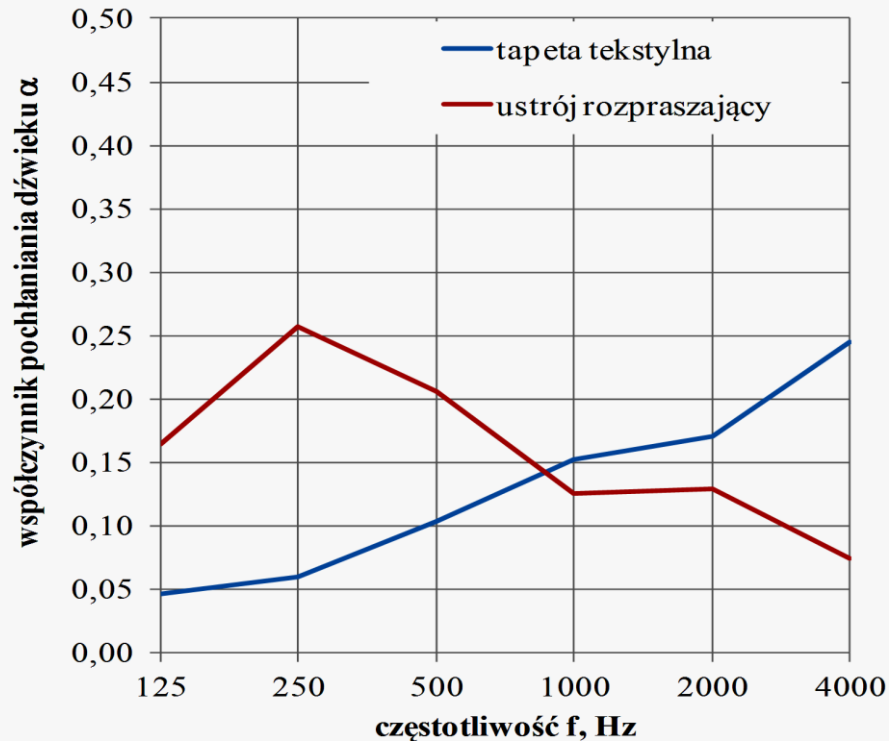
Od częstotliwości f_0 zależy maksymalna głębokość ustroju. Górna granica pasma f_g jest natomiast uzależniona od szerokości studzienek, którą wyznacza się na podstawie zależności:

$$w = \frac{\lambda_{\min}}{2}$$



Badania laboratoryjne panelu dyfuzyjnego oraz tapety

Współczynnik pochłaniania dźwięku



Współczynnik pochłaniania dźwięku
tapety tekstylnej oraz panelu dyfuzyjnego



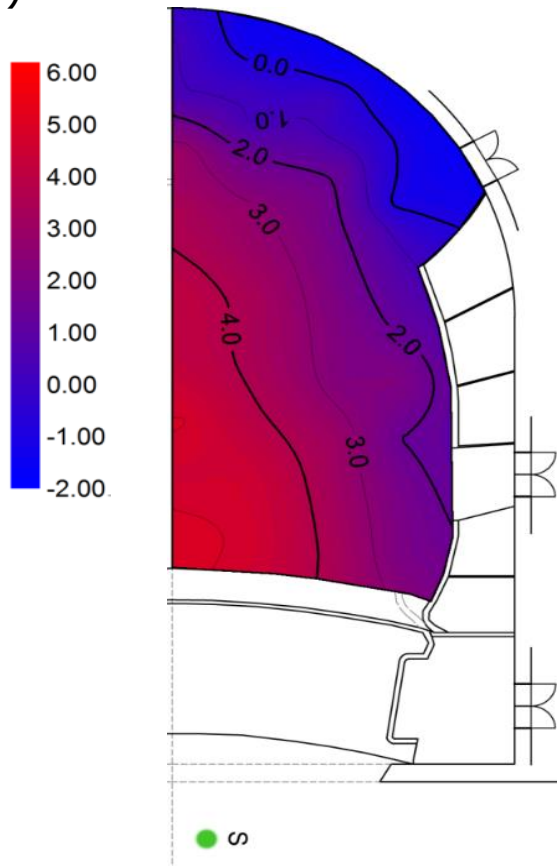
Próbka tapety
tekstylnej



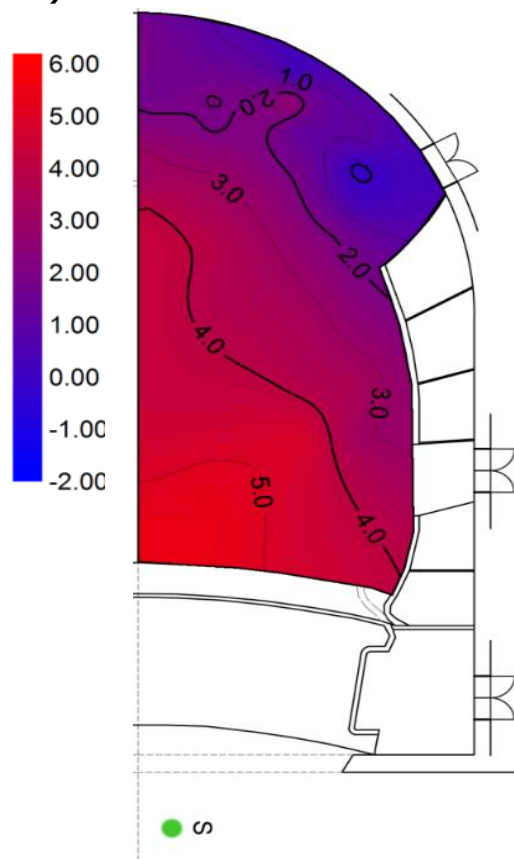
Próbka panelu dyfuzyjnego

Pomiar siły dźwięku G_{4k}

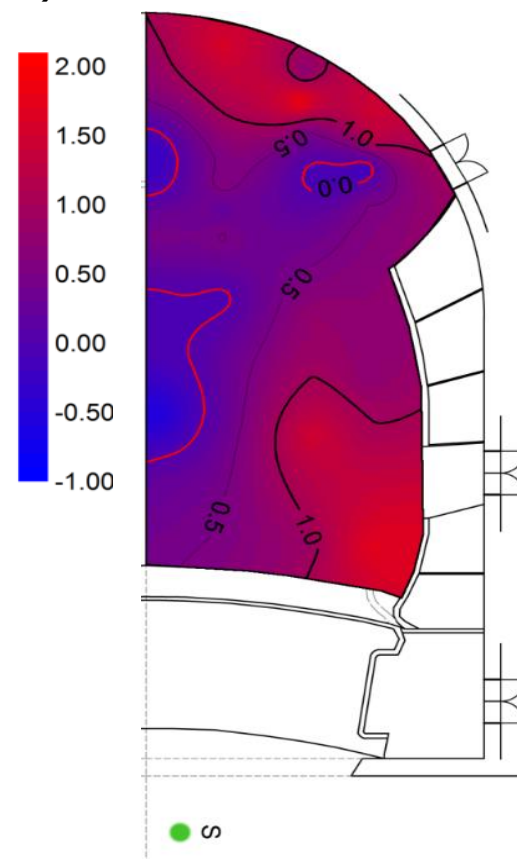
a)



b)



c)

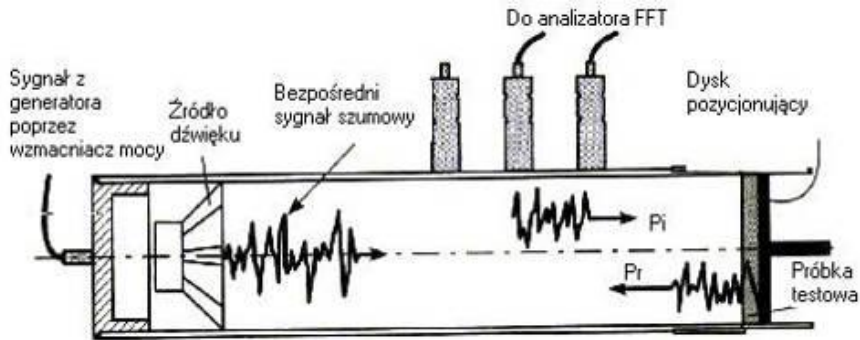


a) tapeta dźwiękochłonna, b) dyfuzor Schroedera,

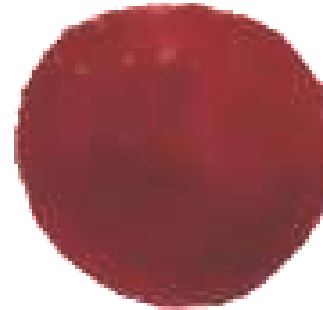
c) różnica

Badanie elementów wystroju wnętrza

Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku α



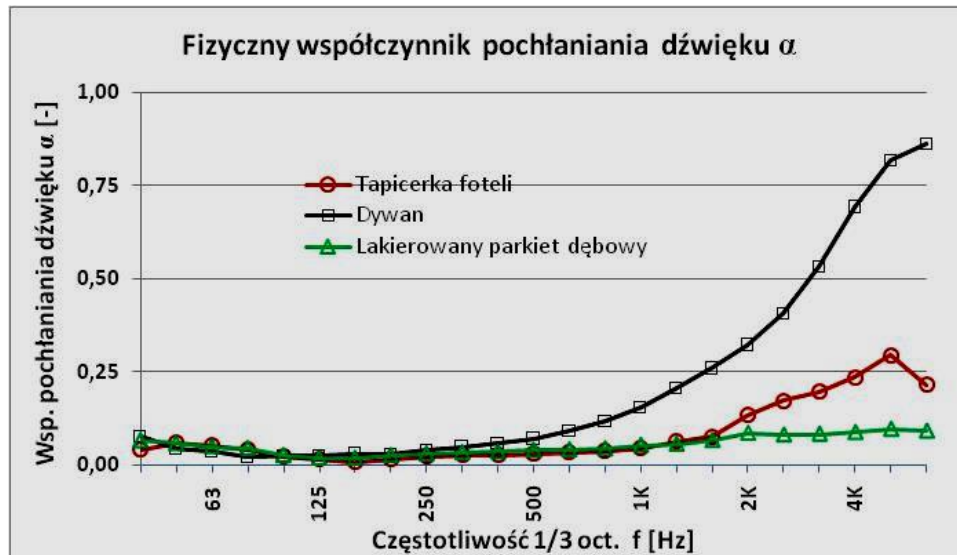
Schemat funkcjonalny dwumikrofonowego falowodu pomiarowego.



Próbka tapicerki

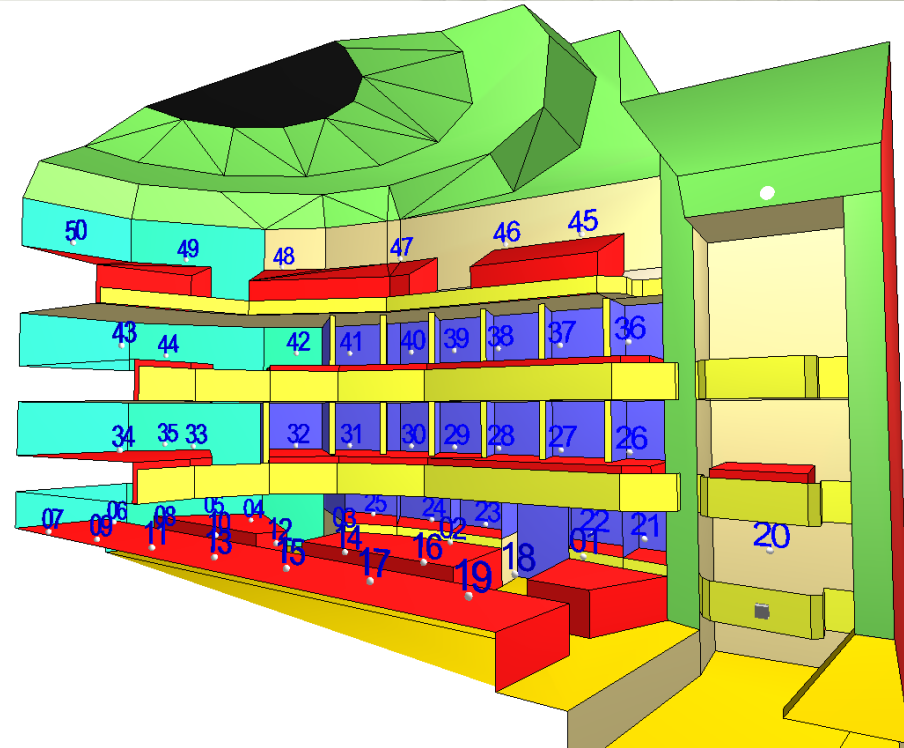
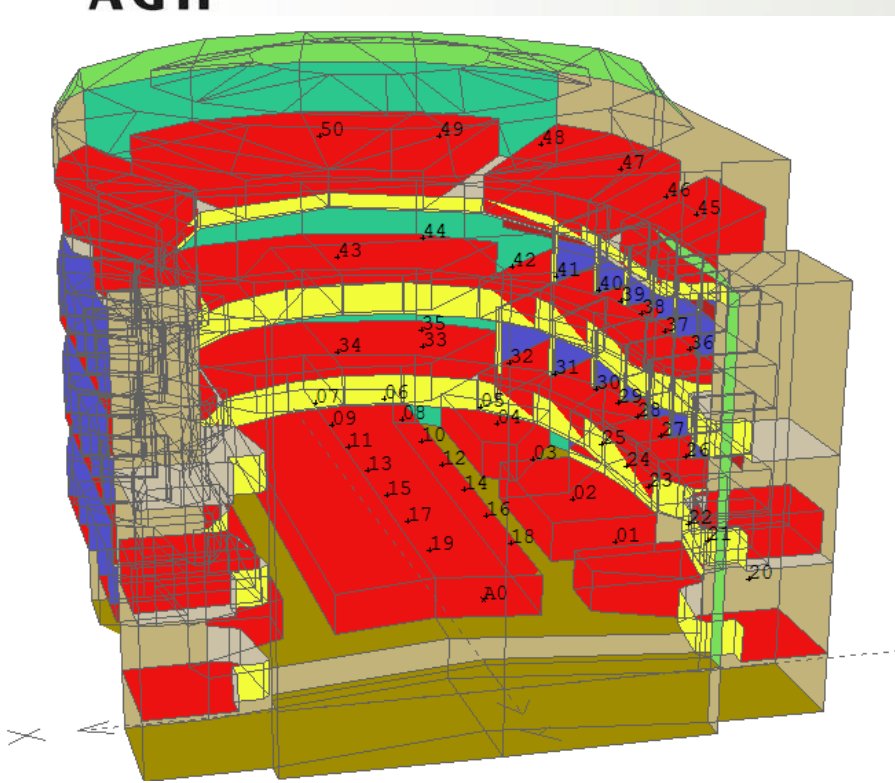


Próbka dywanu



Próbki podłogi lakierowanej

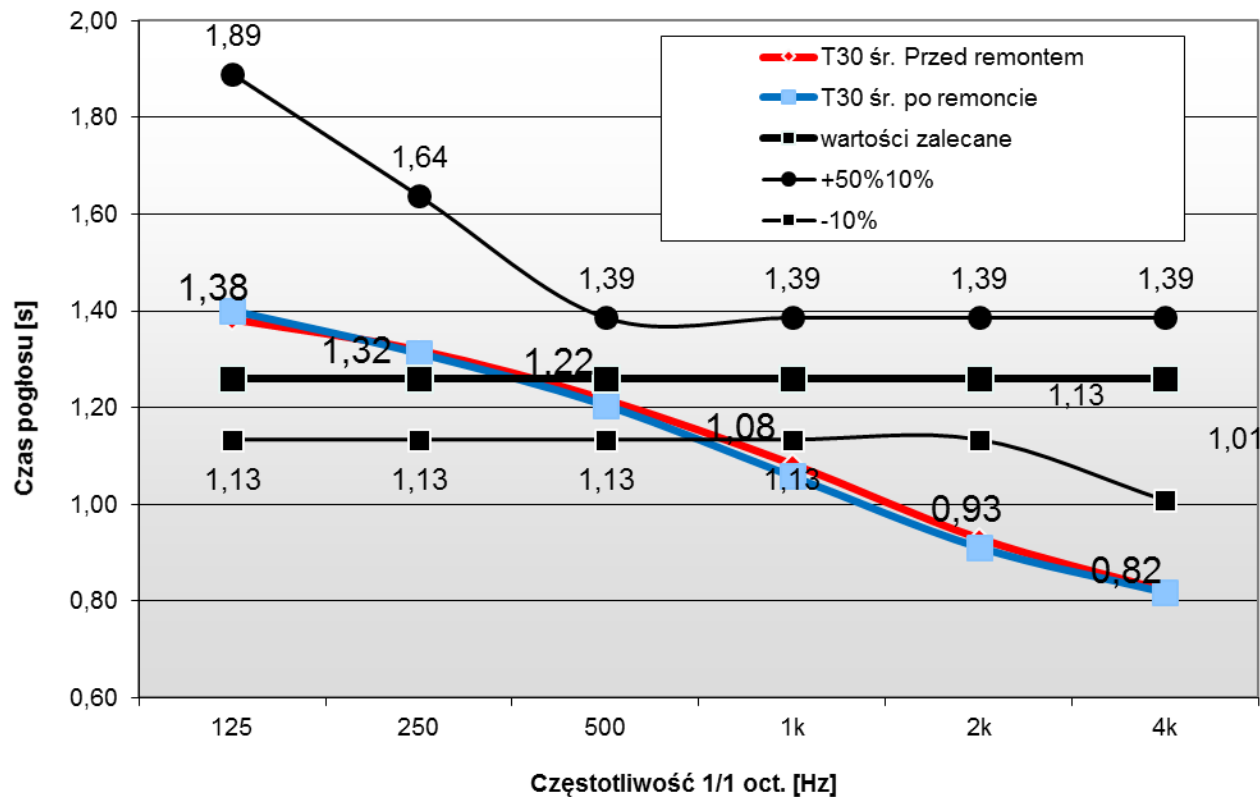
Model obliczeniowy sali Opery we Lwowie



Model sali i rozmieszczenie punktów pomiarowych i symulacyjnych

Opera we Lwowie

Czas pogłosu zmierzony w sali
OPERY WE LWOWIE



Średni czas pogłosu w funkcji częstotliwości, zmierzony przed modernizacją oraz po zakończeniu remontu.

Opera Krakowska

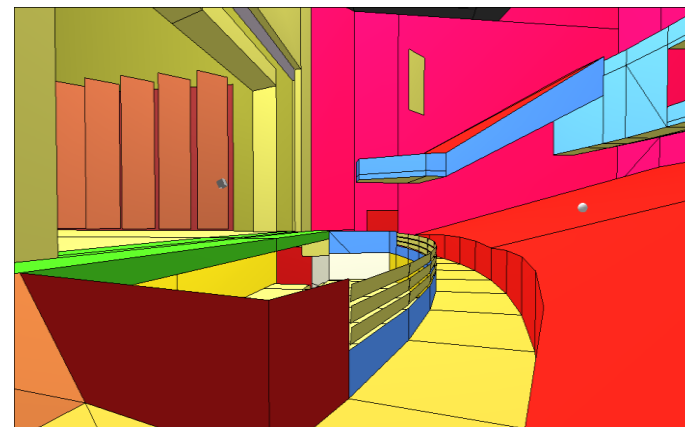
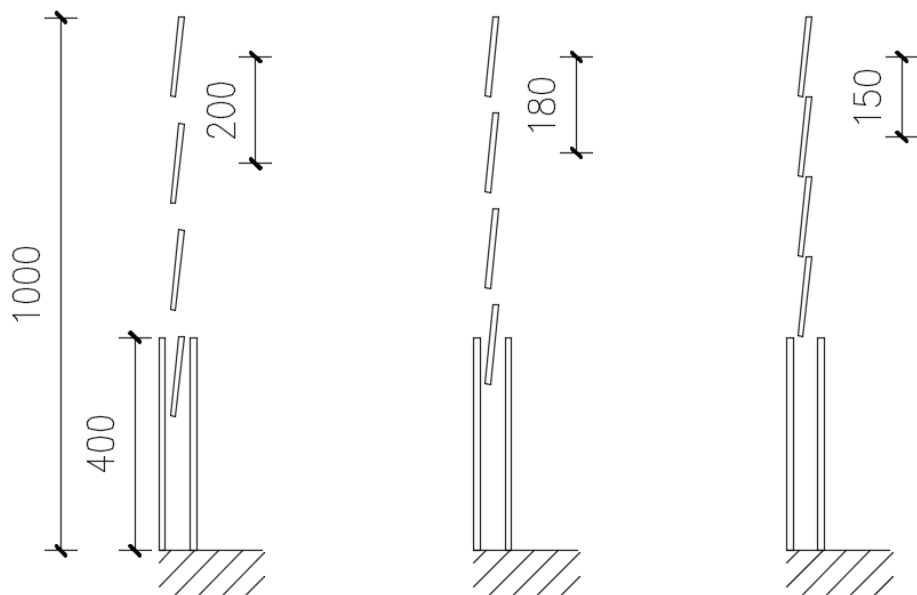
Ścianka czołowa orkiestronu o regulowanej geometrii
patent nr P.425769

Wdrożono w Operze Krakowskiej (2019)



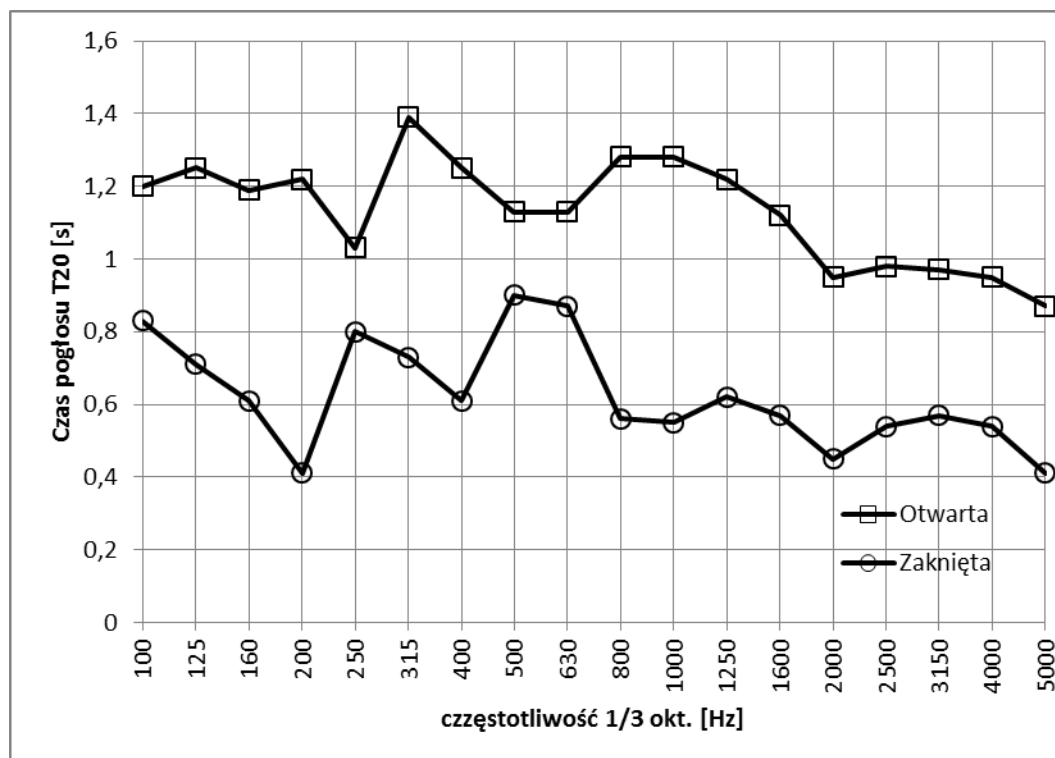
Bariera orkiestronu – nowe rozwiązanie

- Zrównoważenie dźwięku docierającego z fosy orkiestrowej na scenę oraz na widownię
- zapewnia lepsze słyszenie muzyki i poszerza możliwości artystycznej ekspresji



Pomiary akustyczne w orkiestronie

czas wczesnego zaniku dźwięku EDT

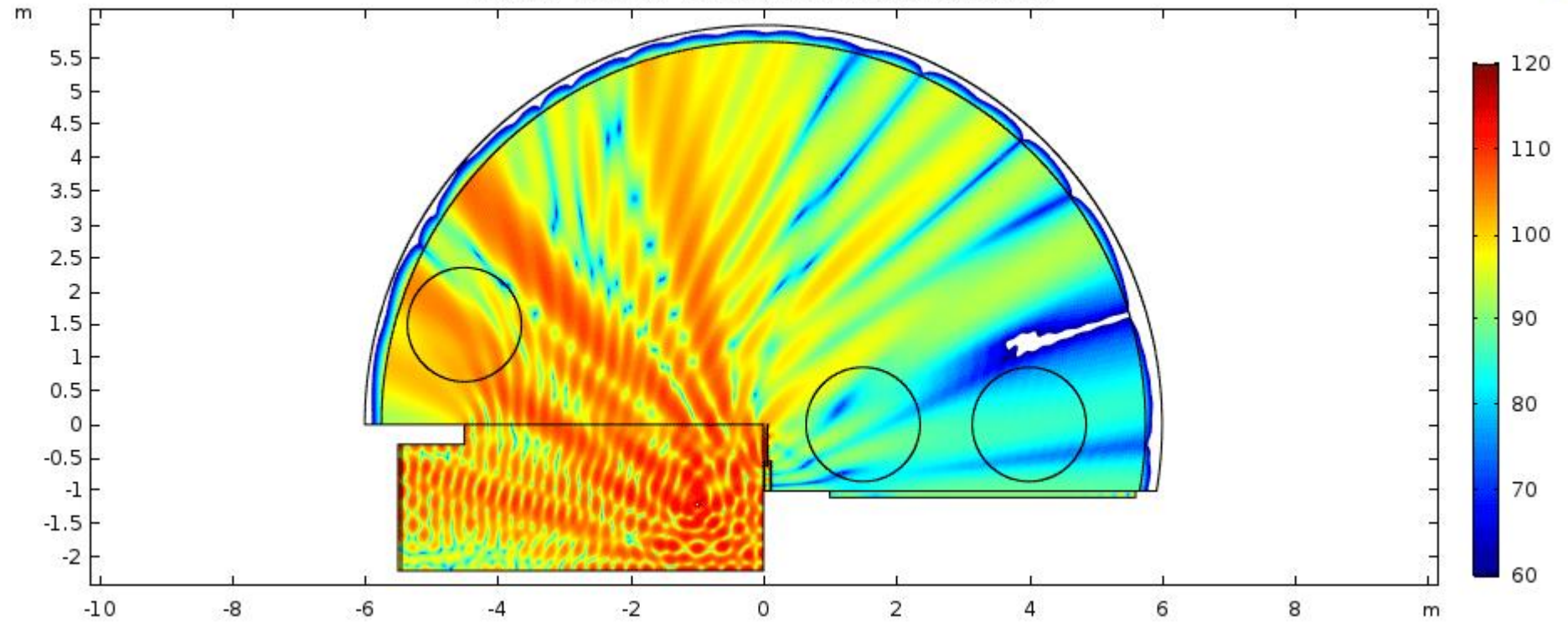


EDT [s]	1/1 okt. [Hz]						$T_{500\text{Hz}-1000\text{Hz}}$
	125	250	500	1000	2000	4000	
Otwarta	1,21	1,21	1,17	1,26	1,02	0,93	1,22
Zaknięta	0,72	0,65	0,79	0,58	0,52	0,51	0,69

Średni czas wczesnego zaniku dźwięku EDT zmierzony w orkiestronie przy otwartych i zamkniętych żaluzjach bariery.

Bariera orkiestronu – nowe rozwiązanie

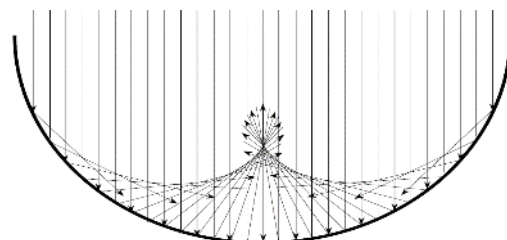
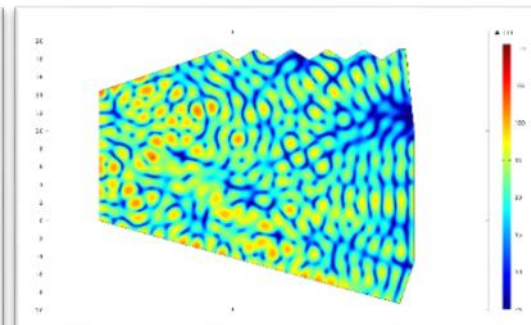
freq(11)=1000 Hz Surface: Sound pressure level (dB)



Podsumowanie

- Akustyka sal koncertowych (widowiskowych) jest przypisana do odpowiedniej funkcji, gdzie podstawą oceny jest czas pogłosu
- Największą wartość w kształtowaniu akustyki sali posiadają właściwie dobrane powierzchnie refleksyjne.
- Sala operowa jako najbardziej złożone wnętrza odsłuchowe powinny zapewnić właściwą interakcję orkiestronu ze sceną i widownią.

WYBRANE ASPEKTY AKUSTYKI SAL KONCERTOWYCH



Tadeusz KAMISIŃSKI