

The background image shows the interior of a large, ornate concert hall. In the foreground, rows of dark blue upholstered seats are visible, curving around the stage. The stage is elevated and features a large, complex organ with many pipes. An orchestra is seated on the stage, with various instruments like violins, cellos, and a harp. The hall has a high ceiling with decorative moldings and several large, ornate light fixtures with multiple bulbs. The overall atmosphere is formal and grand.

Wybrane metody korekty akustycznej wnętrza na przykładzie krakowskich sal koncertowych

TADEUSZ KAMISIŃSKI

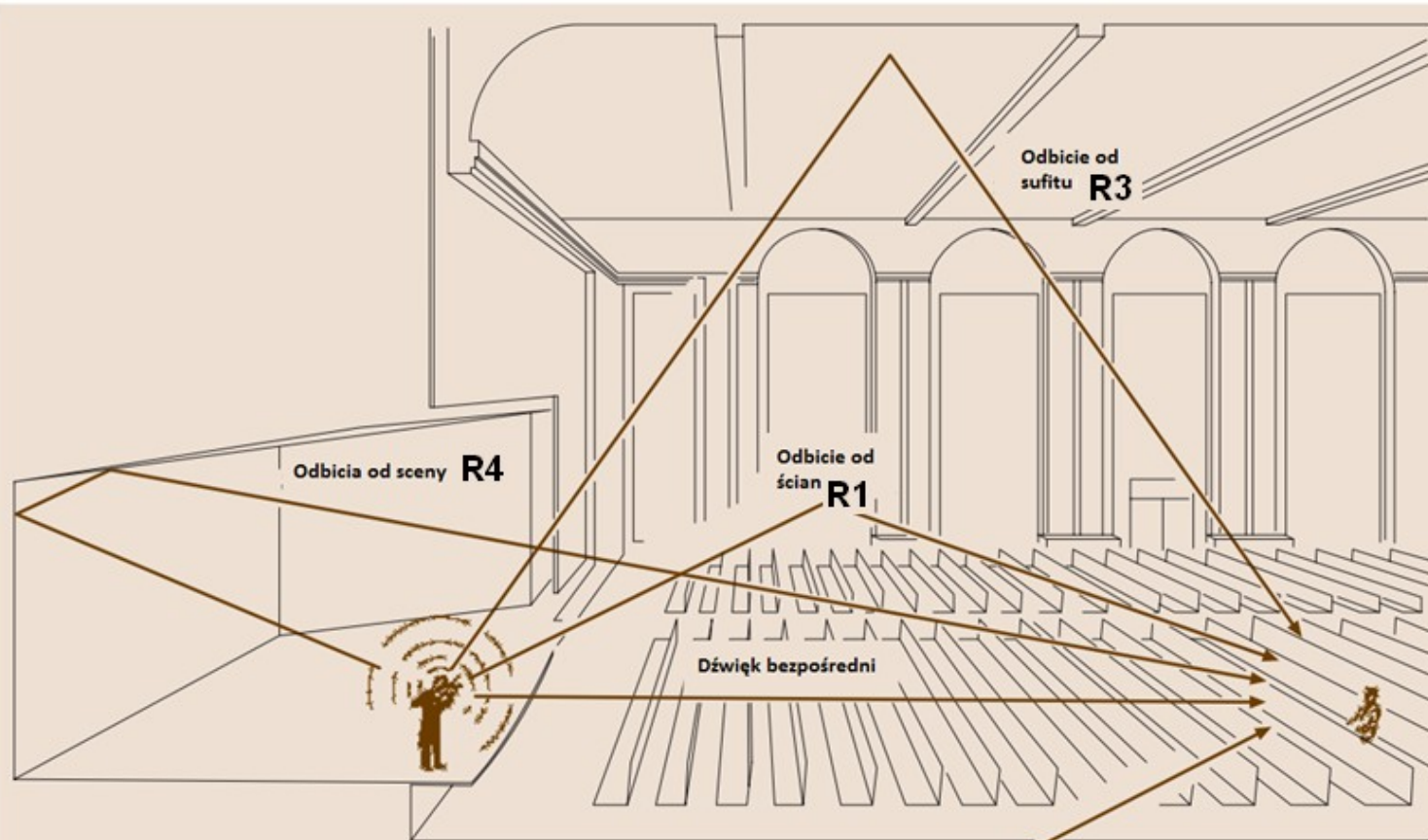
Symposium Akademii Inżynierskiej w Polsce
Kraków 11 marca 2025

Najczęściej występującymi wadami akustycznymi w obiektach teatralnych i muzycznych są usterki związane z **pierwszym odbiciem dźwięku**. Prace badawcze Zespołu Laboratorium Akustyki Technicznej AGH koncentrują się na nowych rozwiązaniach dla ograniczenia tych problemów.

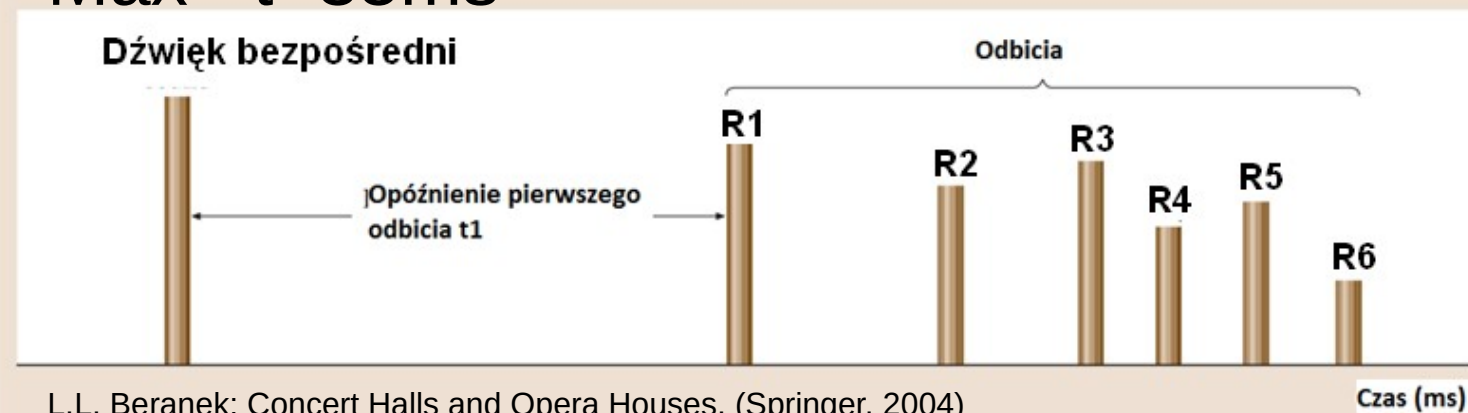
W Krakowie od roku **2016** wydano na cele obiektów teatralno-muzycznych kwotę **189.007.103 zł** w tym

121.373.328 zł w roku 2024.

- Infrastruktura dla Teatru Groteska
- Modernizacja widowni i systemu oświetleniowego Krakowskiego Teatru Scena STU
- Przebudowa Teatru Bagatela
- Przebudowa części piwnic w budynku Teatru Bagatela na funkcje sali teatralnej
- Modernizacja Teatru "Łaźnia Nowa"
- Modernizacja Sceny Pod Ratuszem Teatru Ludowego - etap III
- Budowa budynku usługowego "Krakowskie Centrum Muzyki" przy ul. Piastowskiej w Krakowie



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

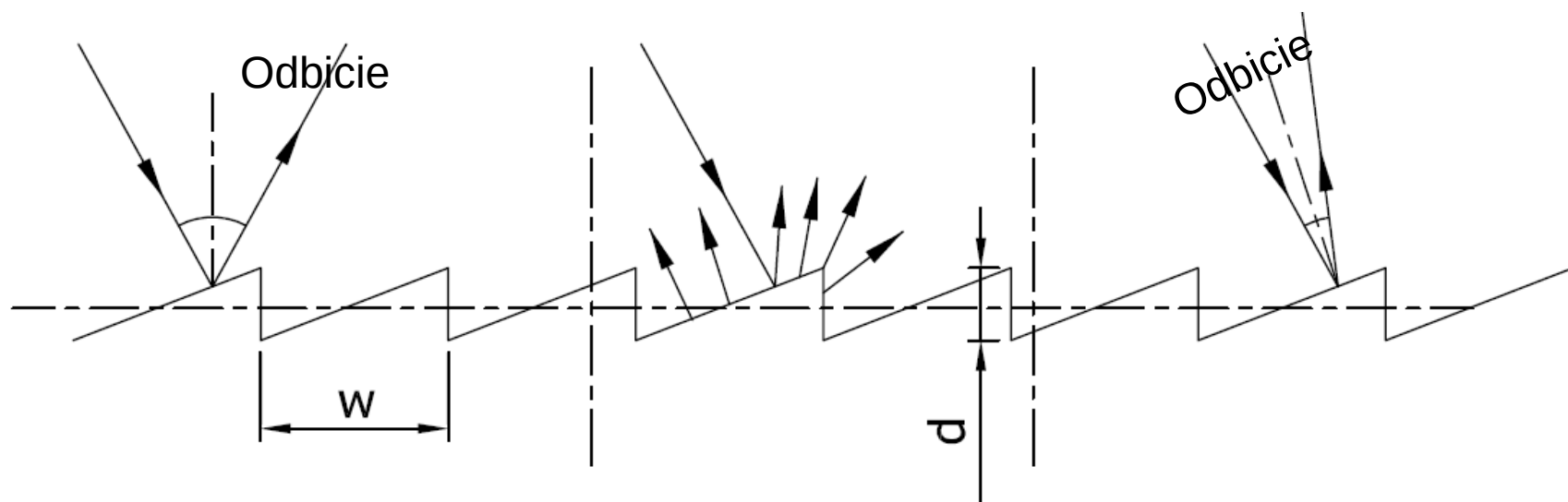


L.L. Beranek: Concert Halls and Opera Houses, (Springer, 2004)

Czas (ms)

Odbicie i rozproszenie fal

Rozproszenie



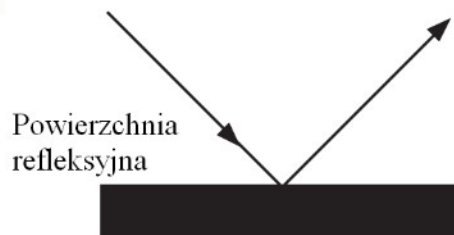
$$\lambda \gg W/2 \text{ lub } d/2$$

$$\lambda = W/2 \text{ lub } d/2$$

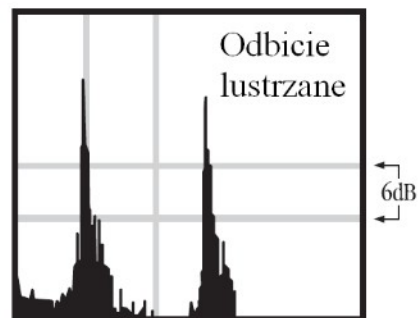
$$\lambda \ll W/2 \text{ lub } d/2$$

Ustroje akustyczne

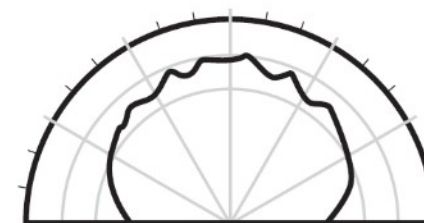
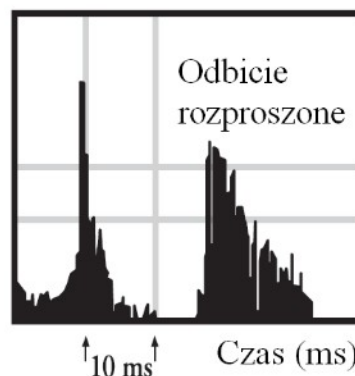
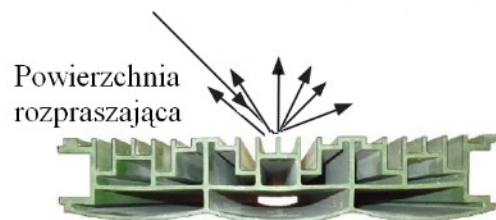
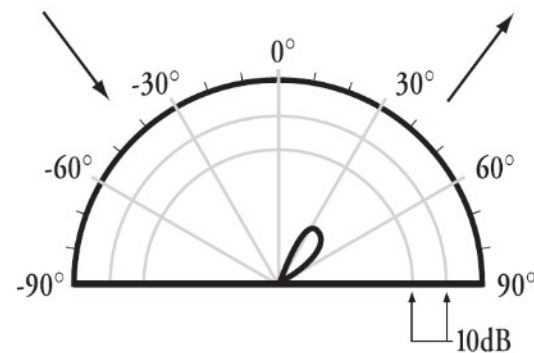
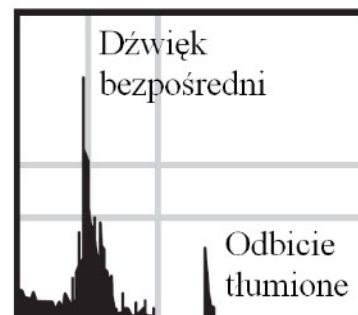
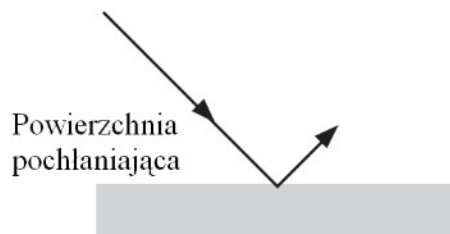
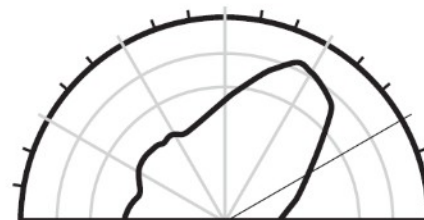
Rodzaj ustroju akustycznego



Przebieg czasowy odpowiedzi impulsowej



Charakterystyka kierunkowości odbicia



10 ms Czas (ms)



Filharmonia Krakowska

SALA ŻŁOTA (750 m³)

Budowa 1931, modernizacja 2024

Zastosowanie rozpraszaczy OptiDi



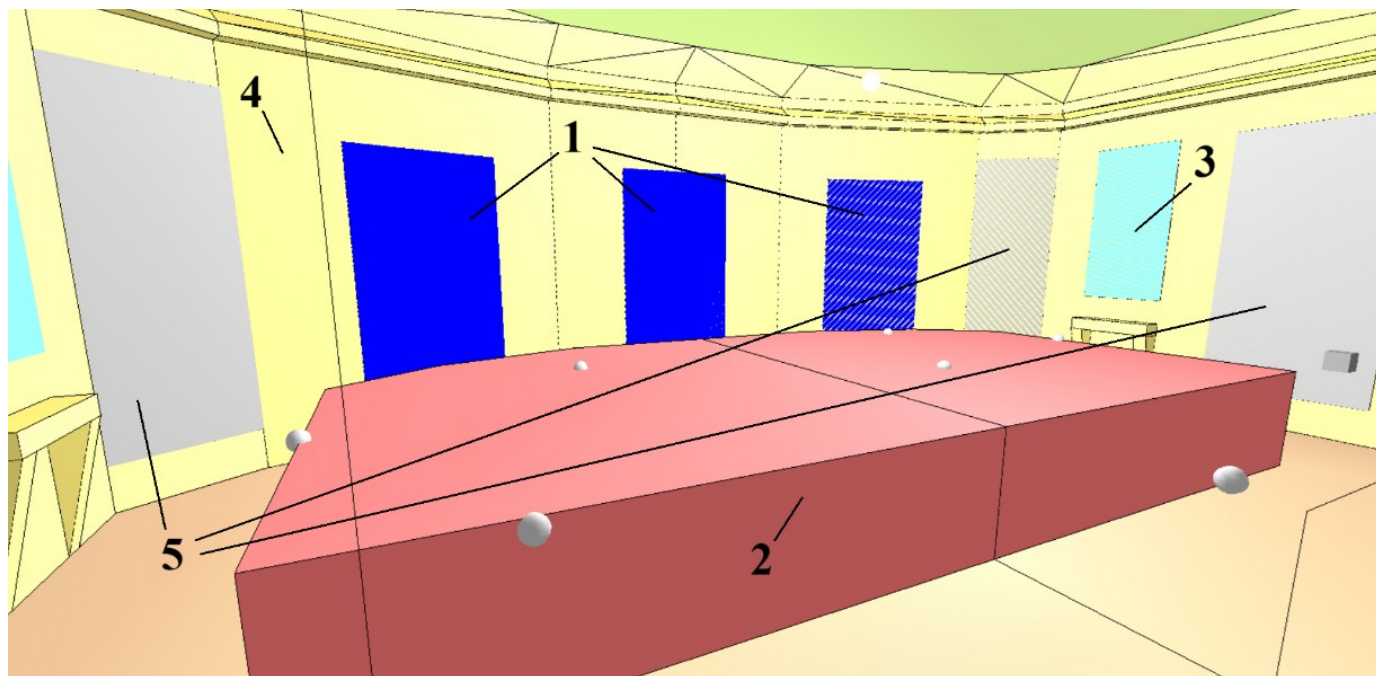
Filharmonia Krakowska

SALA ZŁOTA

modernizacja 2024

Wystrój wnętrza wg modelu Catt-acoustic

1. Okno
2. Widownia ok. 80 krzeseł tapicerowanych
3. Lustro
4. Tynk wapienny
5. **Optymalizowany ustrój rozpraszający dźwięk OptiDi**

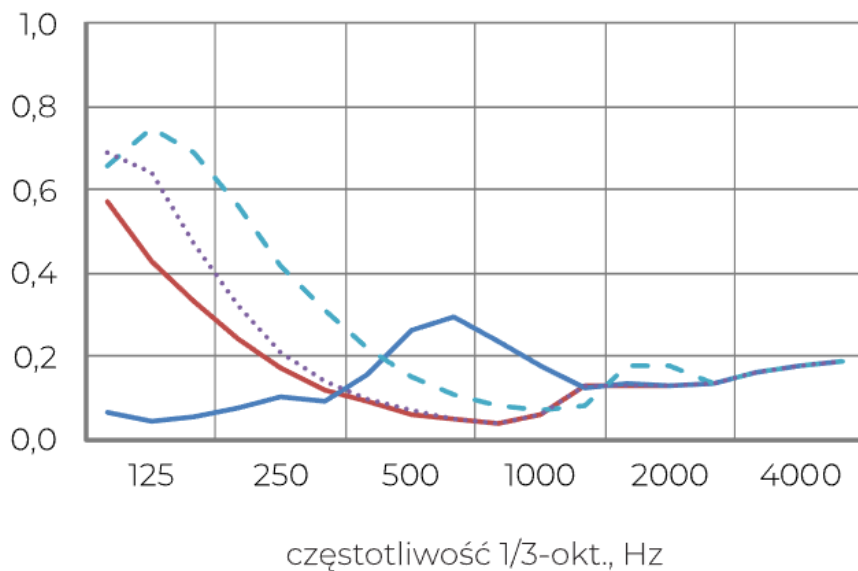




Optymalizowany ustrój rozpraszający dźwięk OptiDi

w technologii wyciskania AL
Patent - EUIPO 004417723-0002

współczynnik pochłaniania dźwięku α ,



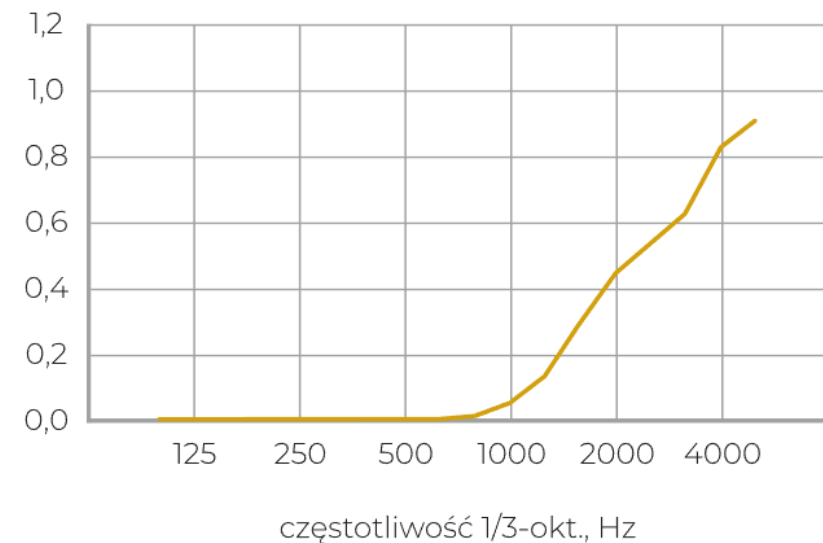
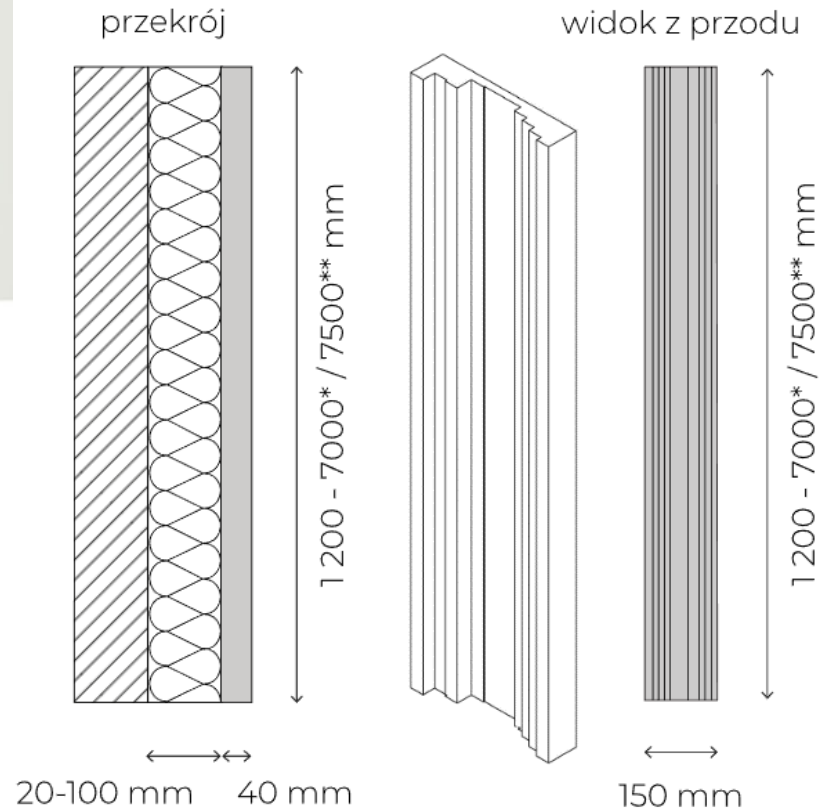
A-40: montaż bezpośredni, c.w.k. 40 mm*

C-50: szczelina 1 mm + wełna mineralna 50 mm (35 kg/m^3), c.w.k. 90 mm*

C-60: szczelina 3 mm + wełna mineralna 60 mm (35 kg/m^3), c.w.k. 100 mm*

C-100: szczelina 1 mm + wełna mineralna 100 mm (35 kg/m^3), c.w.k. 140 mm*

współczynnik rozproszenia dźwięku s

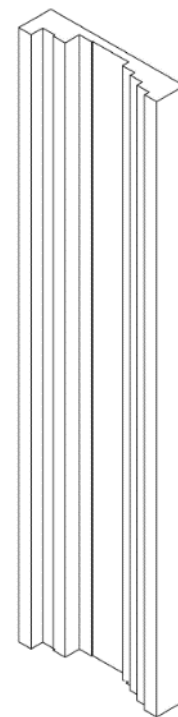
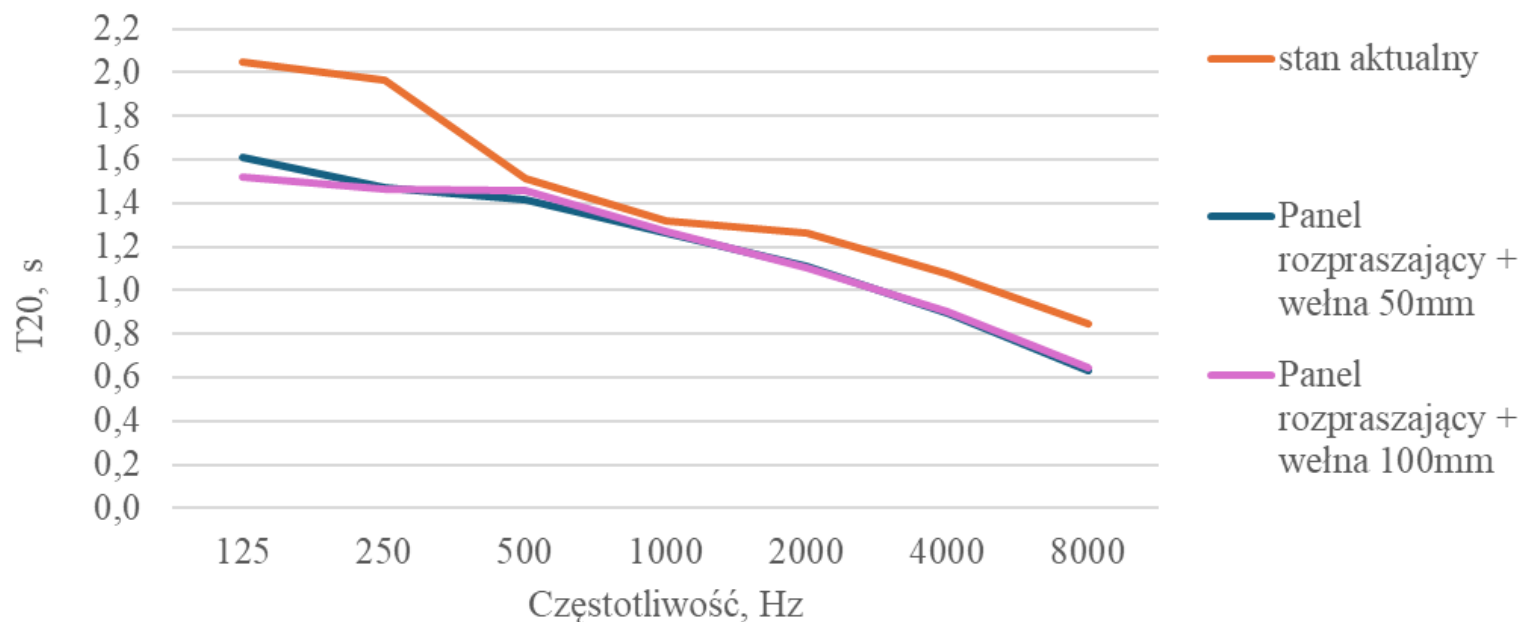


Funkcja: sala prób chóru, koncerty kameralne

kubatura ok. 750 m³,

liczba miejsc na widowni: 80 ,

kubatura na osobę (8 m³/os.);



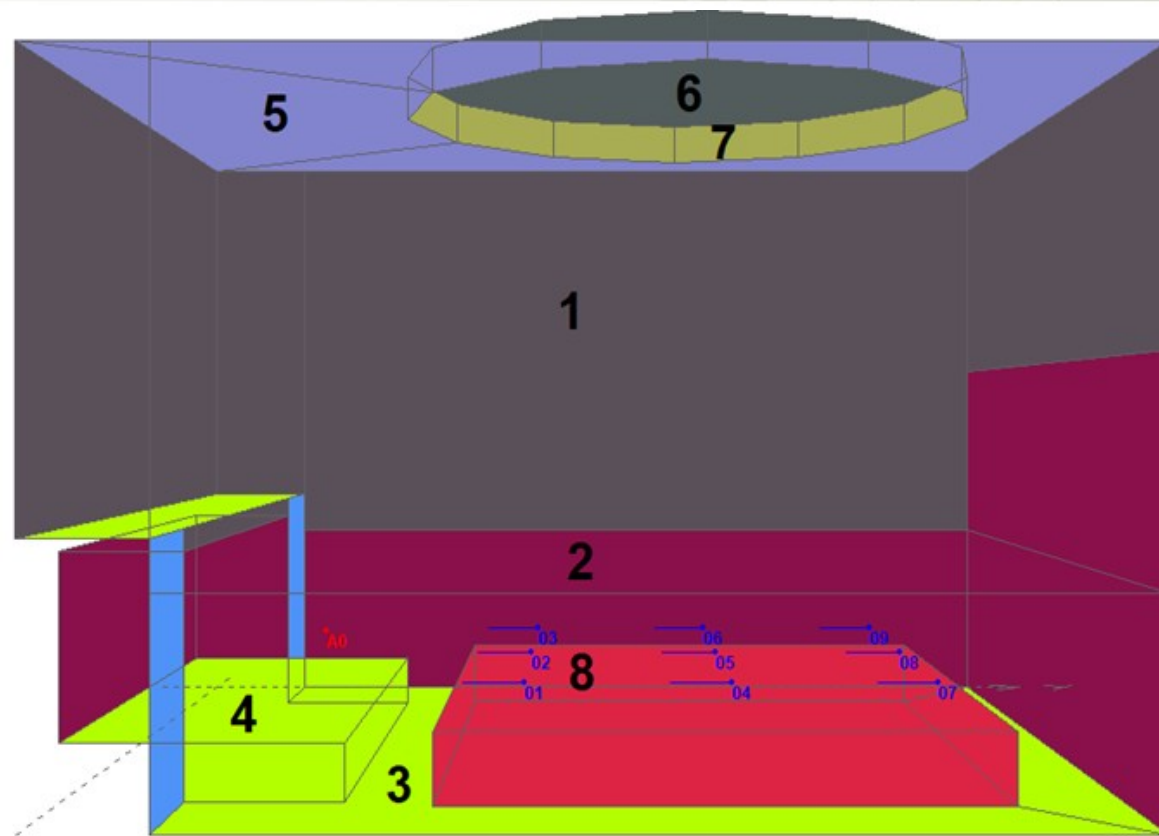
Teatr KTO

SALA WIDOWISKOWA

Budowa 2021

Wystrój wnętrza wg modelu Catt-acoustic

1. Płyta MDF 20, wełna 80
2. Okładzina szczelinowa
3. Podłoga podniesiona
4. Scena MDF
5. Sufit wełna min. 100
6. Światlik z diafragmą
7. Okładzina z wełny min. 100
8. Fotele lekko tapicerowane

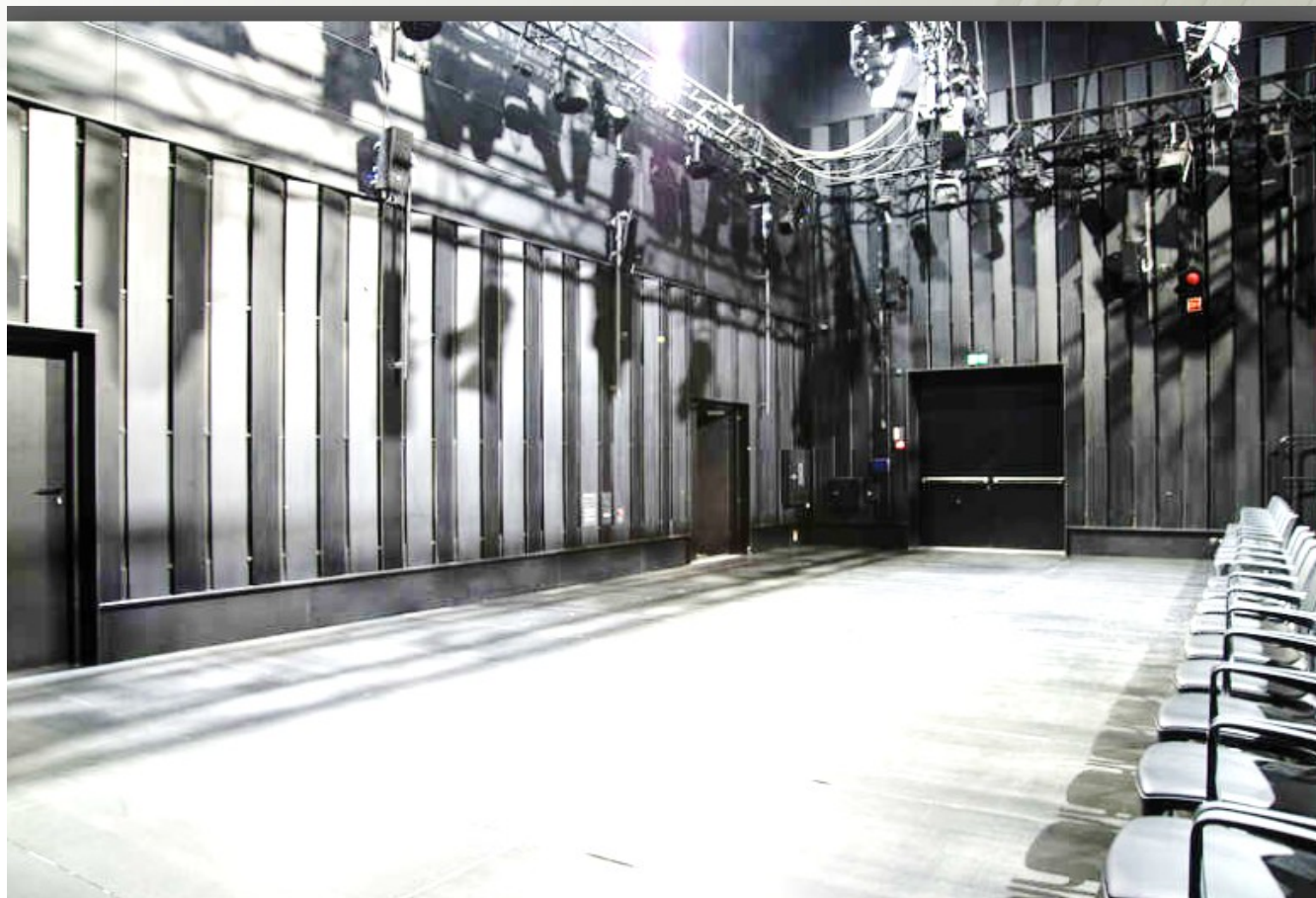
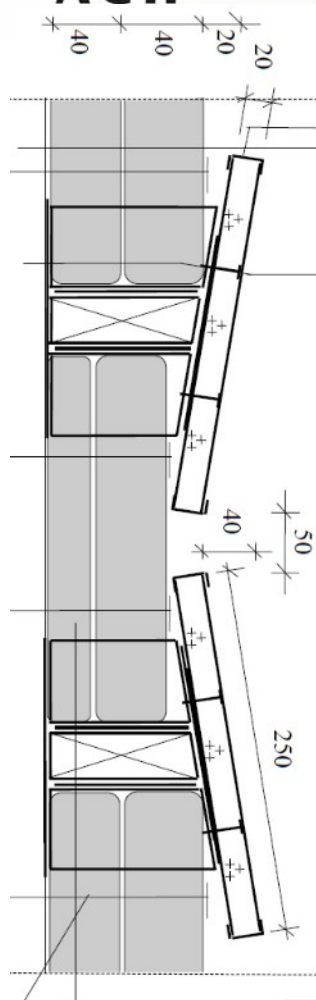


Wyznaczono rozkłady parametrów akustycznych w sali dla przewidywanych 13 wariantów aranżacji układu widownia-scena

Teatr KTO

SALA WIDOWISKOWA

Budowa 2021



https://teatrkto.pl/nowa-siedziba-teatru-kto-galeria_2/

Ustrój szczelinowy – sposób montażu

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α [-]	0,68	0,52	0,40	0,30	0,14	0,17

Teatr KTO

SALA WIDOWISKOWA

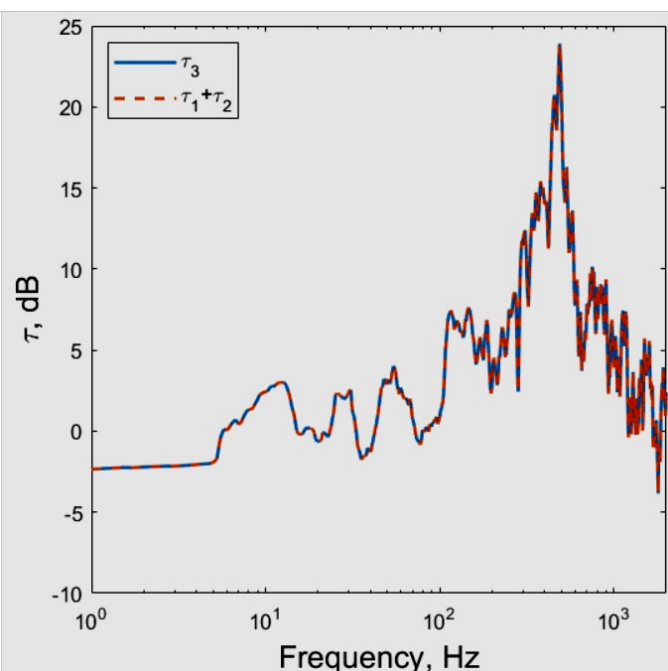
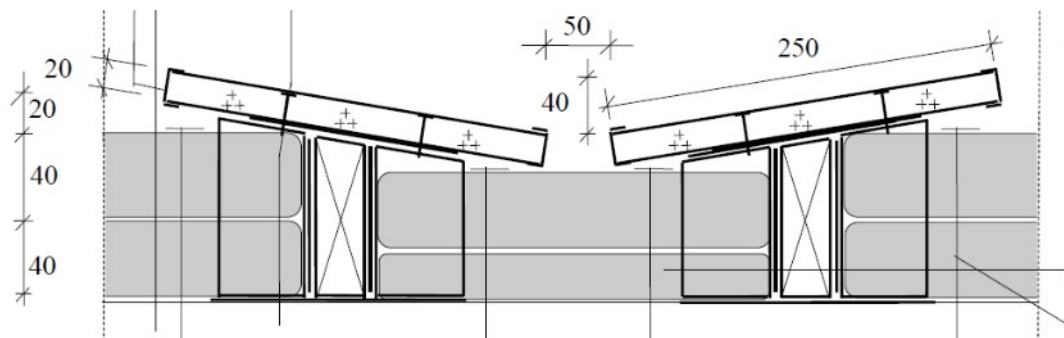
Budowa 2021



Teatr KTO

SALA WIDOWISKOWA

Badania laboratoryjne okładziny szczelinowej pod kątem transmisji dźwięków materiałowych

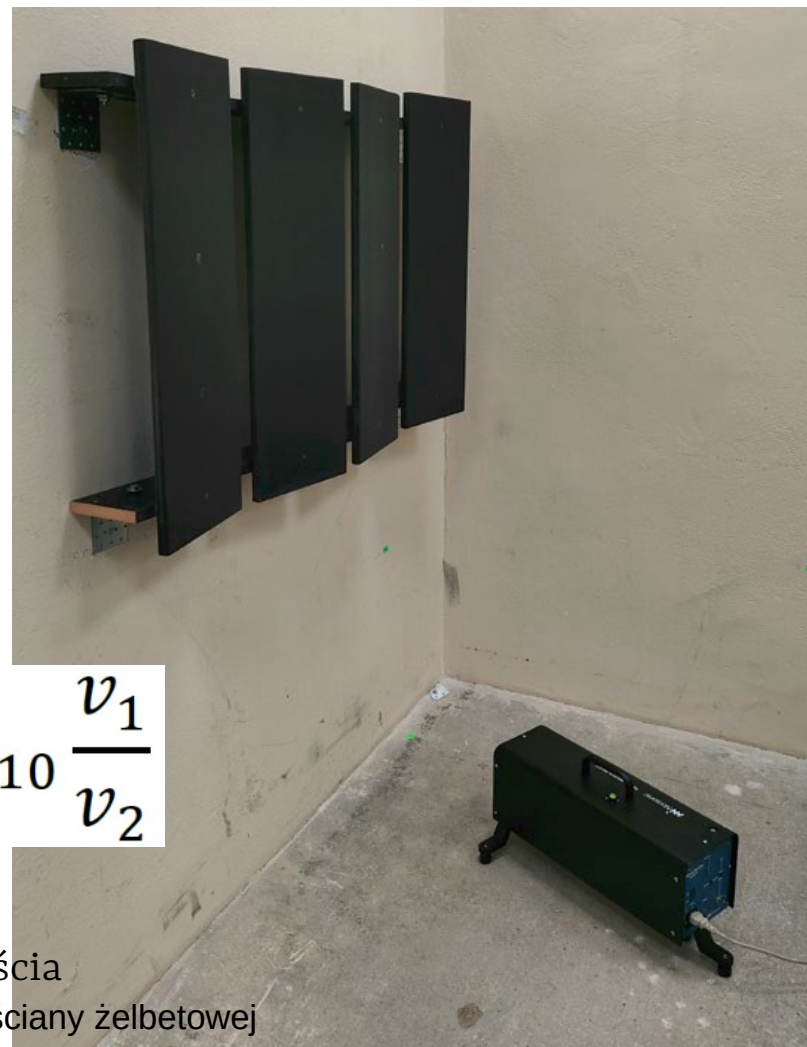


$$\tau_i = 20 \log_{10} \frac{v_1}{v_2}$$

τ_i – funkcja przejścia

V1 - Prędkość drgań ściany żelbetowej

V2 - Prędkość drgań panelu



Drogi transmisji mogą być określane przez funkcje przejścia



Filharmonia Krakowska

Budowa 1931, modernizacja 2021





Filharmonia Krakowska

modernizacja 2021

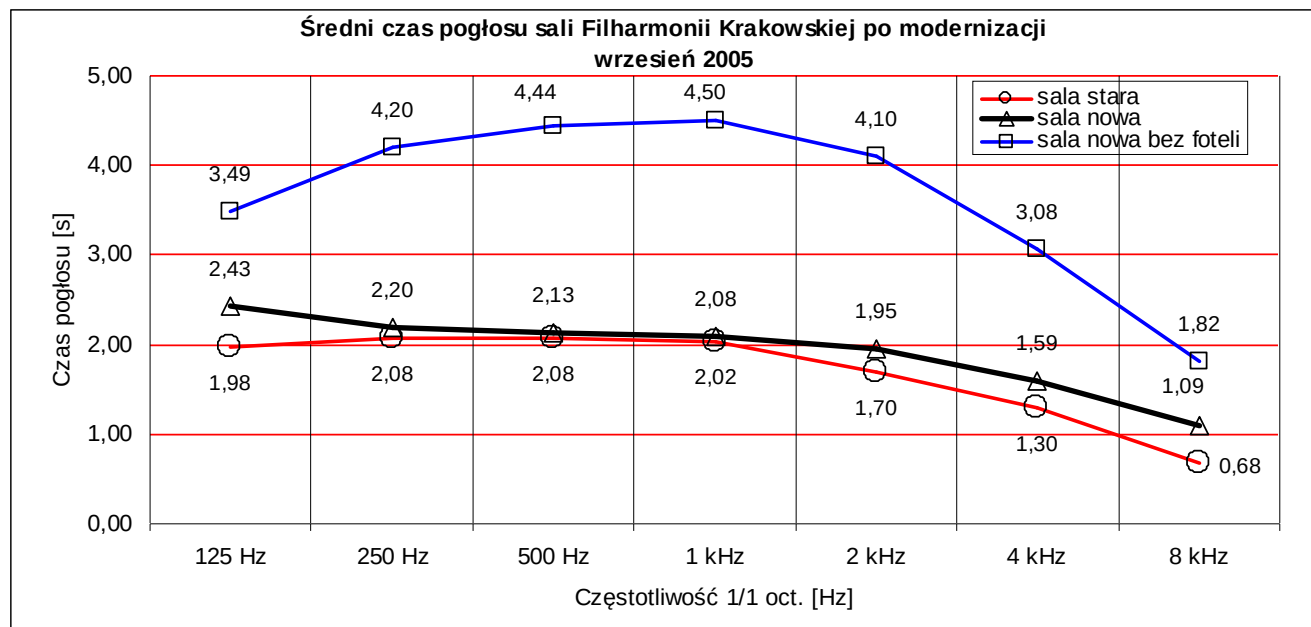
Poprawa parametrów akustycznych wnętrza

Panele refleksyjne nadsceniczne ze szkła płaskiego oraz ze szkła profilowanego na ścianach bocznych zapewniły poprawę wzajemnego słyszenia się muzyków.

Wprowadzenie przewyżki podbalkonowych rzędów foteli zapewniło poprawę jakości akustycznej i wizualnej dla tych miejsc.

Przebudowa lekkich ścianek GK w okolicach sceny miała korzystny wpływ na zwiększenie czasu pogłosu w niskich częstotliwościach.

Kubatura:
6 600 m³, (9 m³/os.),
Widownia:
721 os. (529/192),
Wymiary:
20 x 33 x 11 m;



Teatr Variete w Krakowie

Przebudowa 2015

Wdrożenie nadsцениcznego panelu refleksyjnego

Patent nr P.407925.



16 paneli refleksyjnych usytuowano na wysokości 6.8 m nad sceną i widownią

Teatr Variete w Krakowie

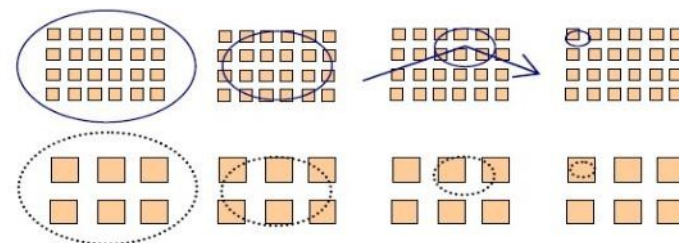
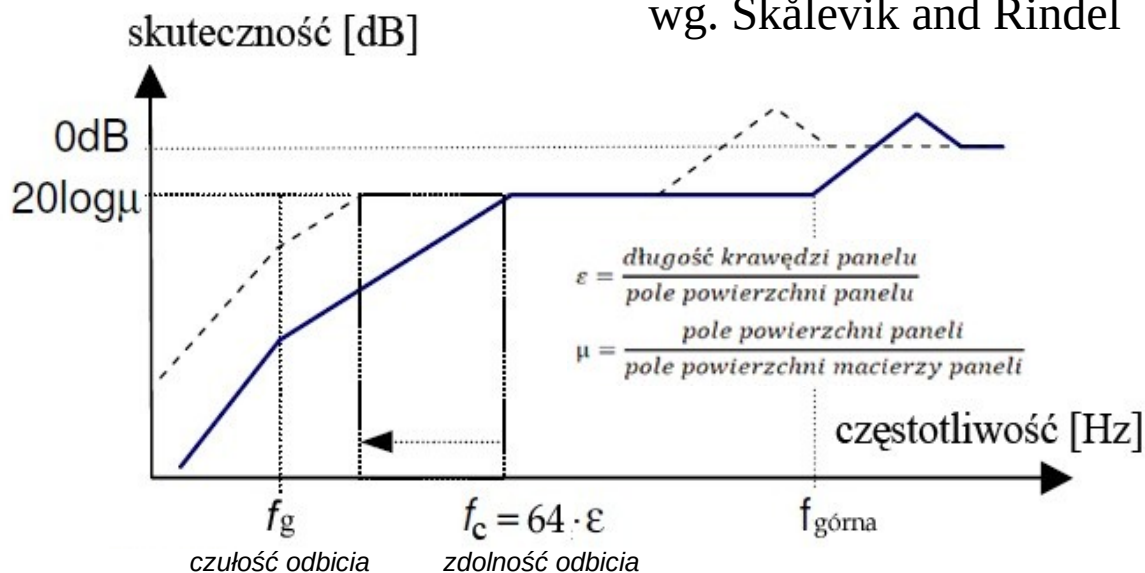
Panel refleksyjny zintegrowany z rozpraszaczem Schroedera charakteryzuje się rozszerzonym zakresem częstotliwości dźwięku odbitego.



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

Skuteczność odbicia fali dźwiękowej w funkcji częstotliwości

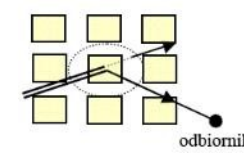
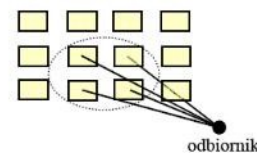
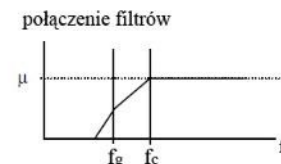
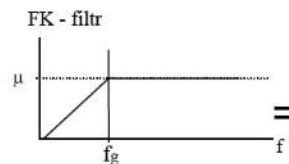
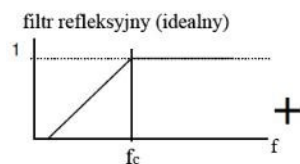
wg. Skålevik and Rindel



Strefa Fresnela maleje wraz ze wzrostem częstotliwości padającej fali akustycznej.

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

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



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



Projektowanie panelu dyfuzyjnego

działającego na zasadzie zmiany fazy odbicia

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 (liczy pierwsze).

Głębokości studzienek d_n ustroju

podaje zależność :

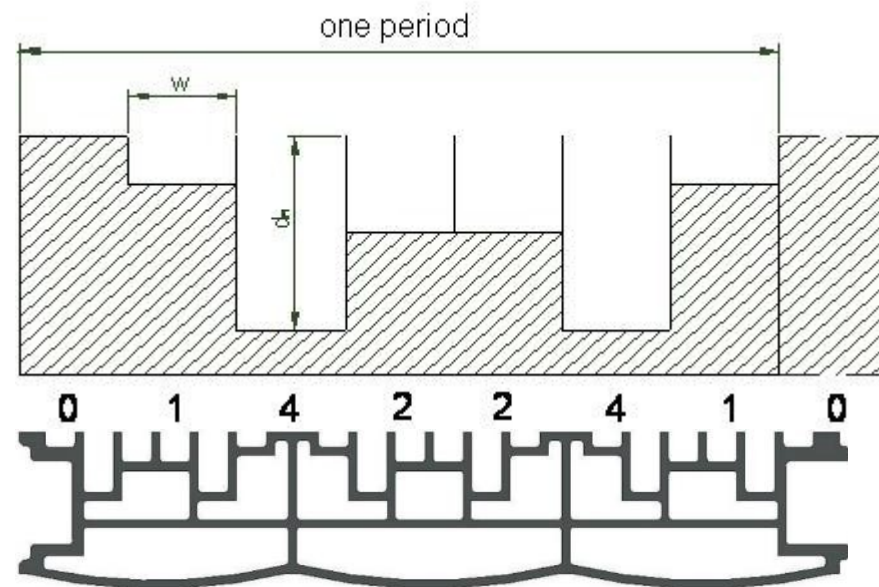
$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N}$$

gdzie:

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

Od maksymalnej głębokości studzienek ustroju zależy dolna częstotliwość graniczna f_0 . Górna granica pasma f_g jest natomiast uzależniona od szerokości studzienek, którą wyznacza się na podstawie zależności:

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



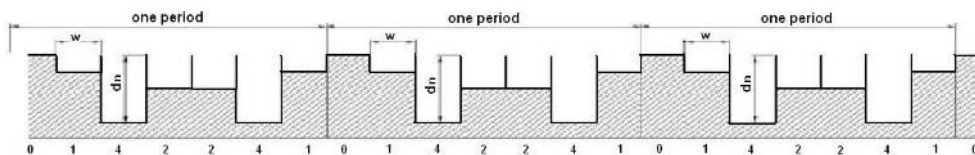
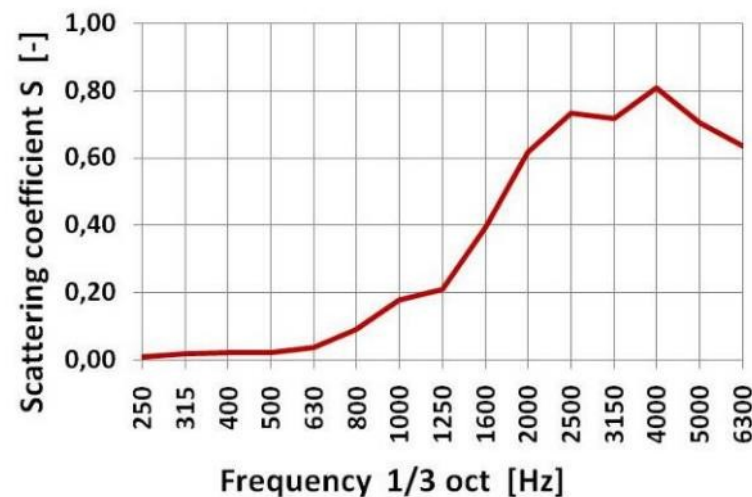
Panel dyfuzyjny

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



Opera Krakowska

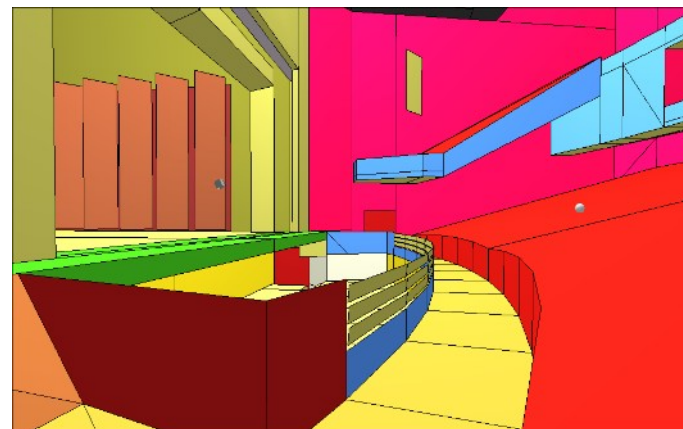
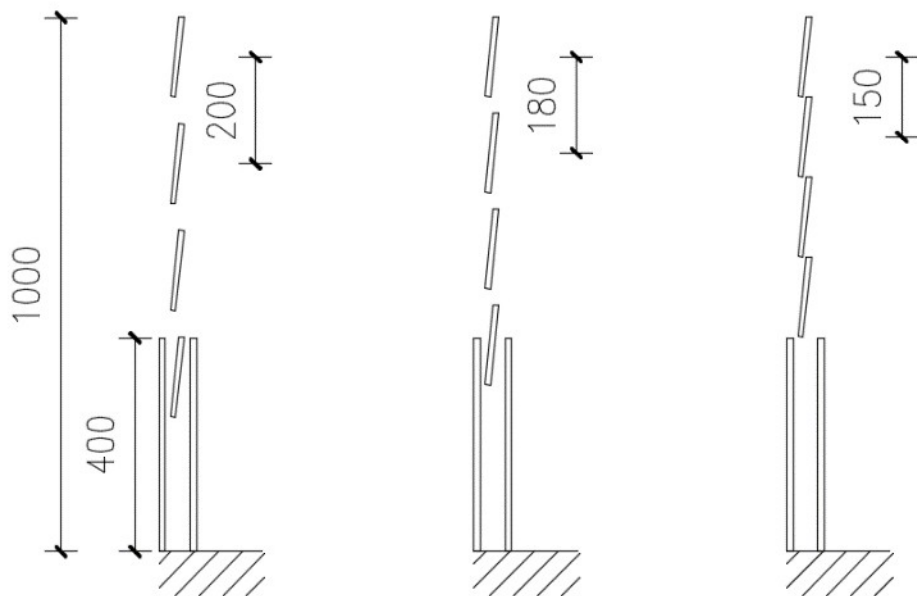
Ścianka czołowa orkiestronu o regulowanej geometrii
patent nr P.425769

Wdrożono w Operze Krakowskiej (2019)

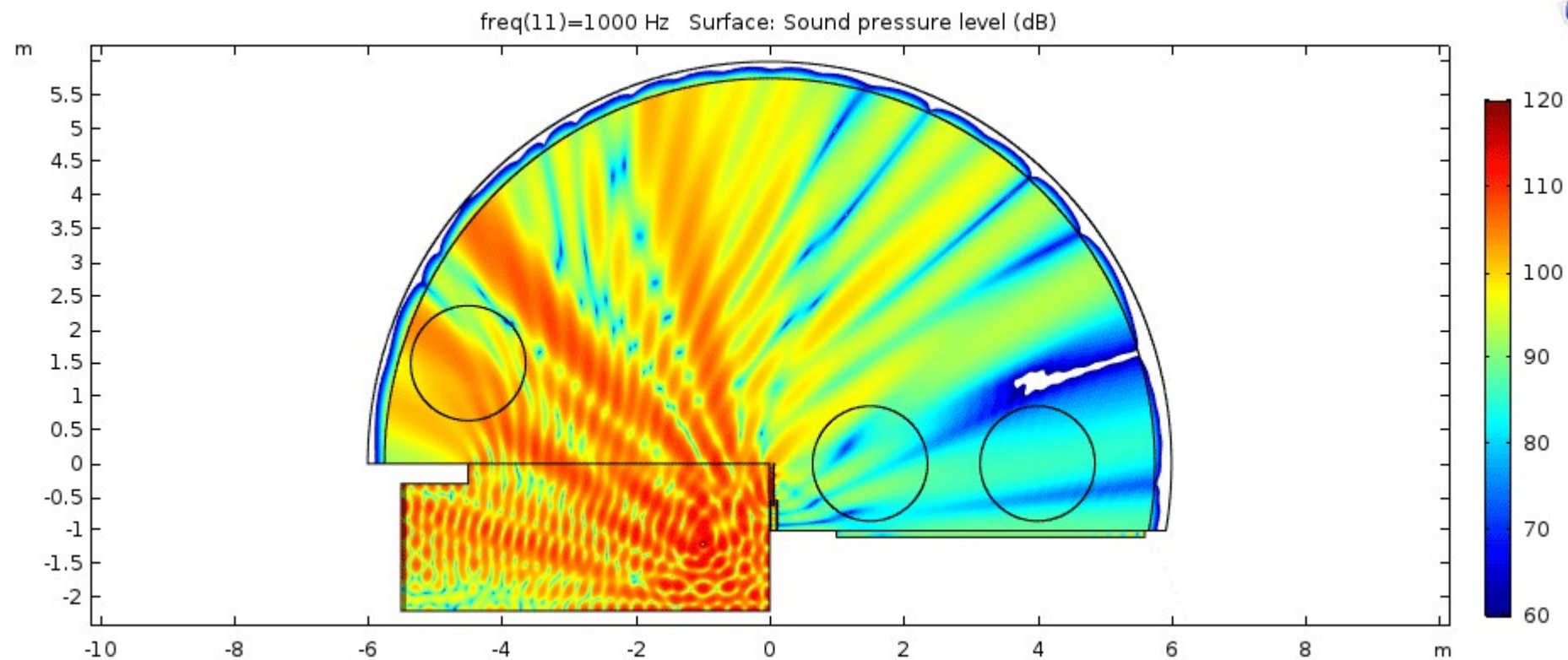


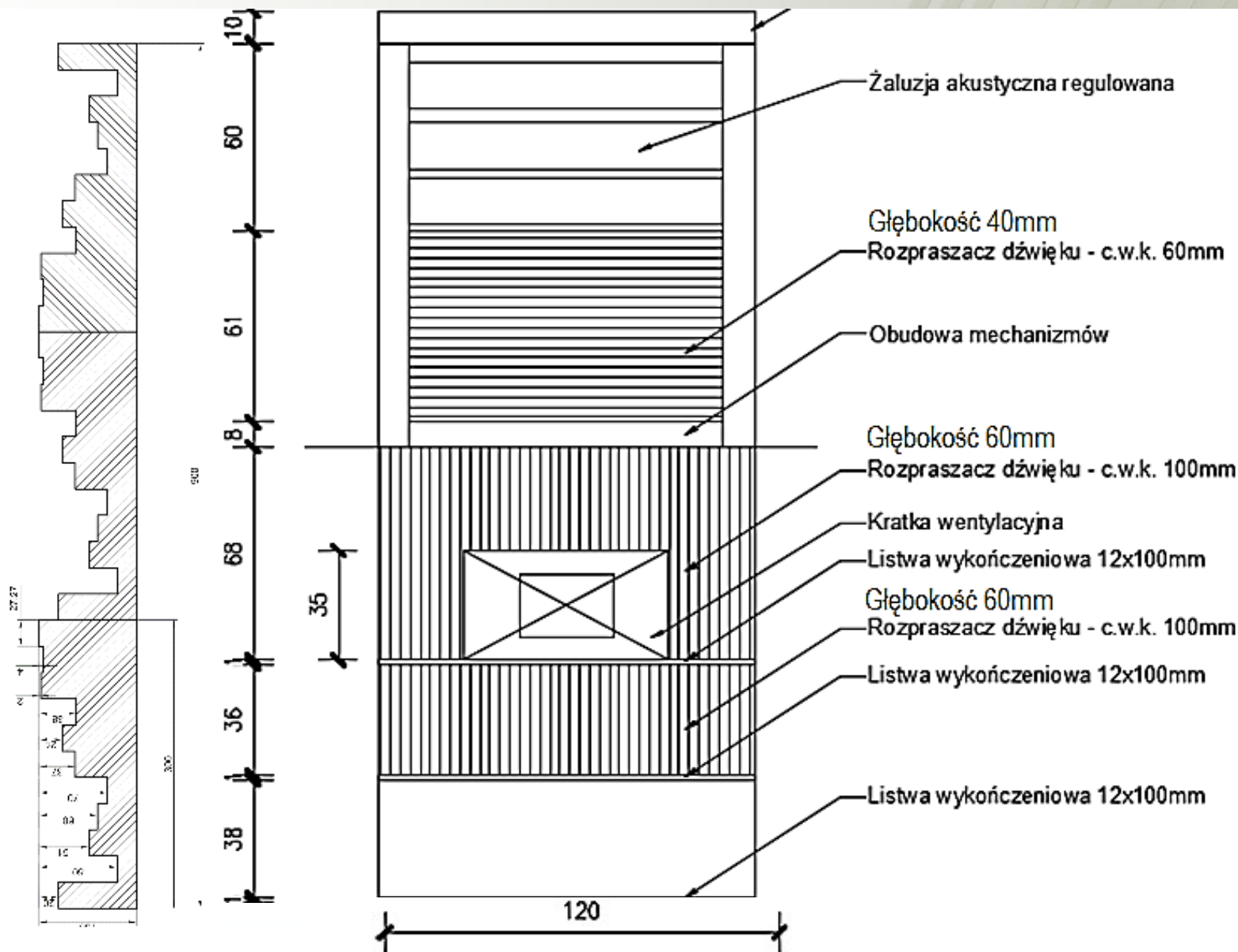
Bariera orkiestronu - nowe rozwiązanie

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



Bariera orkiestronu - nowe rozwiązanie

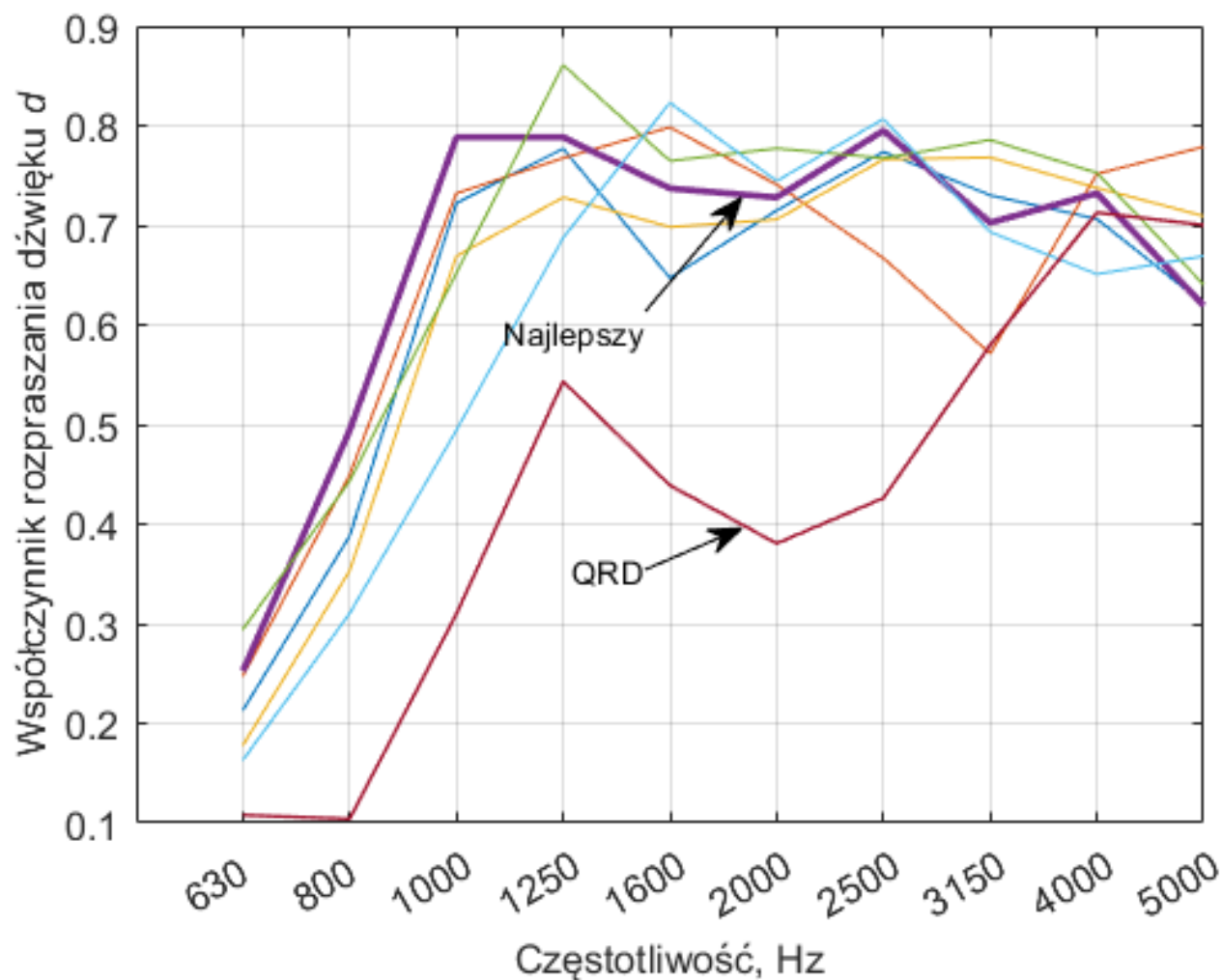


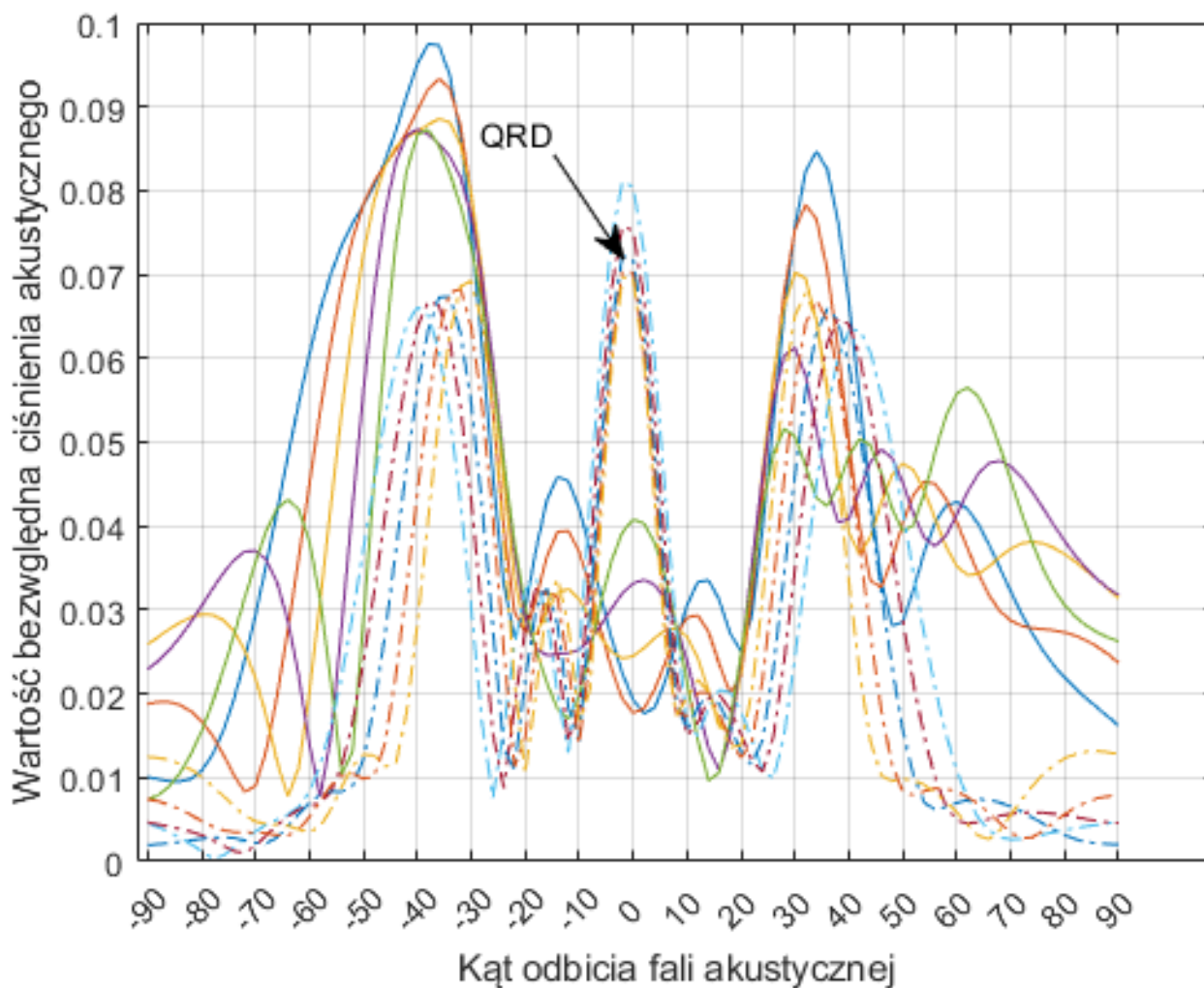


Parametry optymalizacji

- Wielokryterialny algorytm ewolucji różnicowej (MODE)
- Liczba zmiennych
- studzienek rozpraszaczy: 11
- Liczba iteracji: 25
- Wielkość populacji: 500
- Zakres parametrów wejściowych: 0 – 8 cm

Rozpraszanie dźwięku ustroje optymalizowane vs QRD





Opera Krakowska

Kompleks budynków ukończony w 2008r.

Remont holu wejściowego 2025

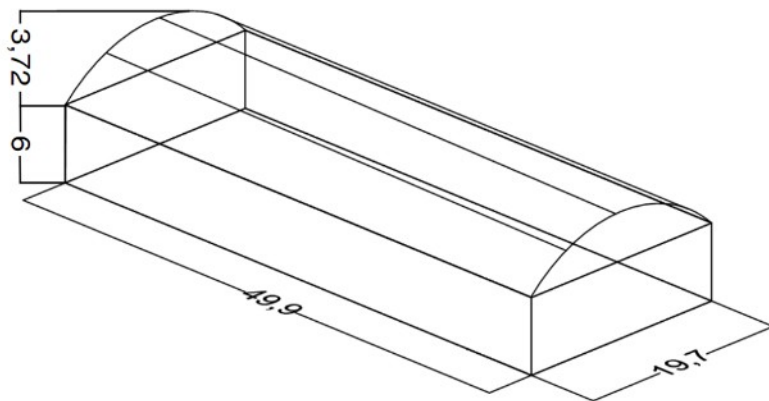


Budynek D - Hol wejściowy

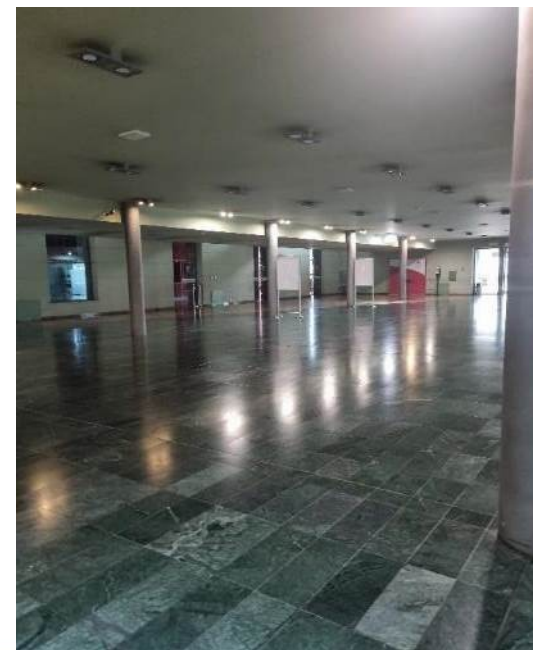


Hol wejściowy

Opis pomieszczenia

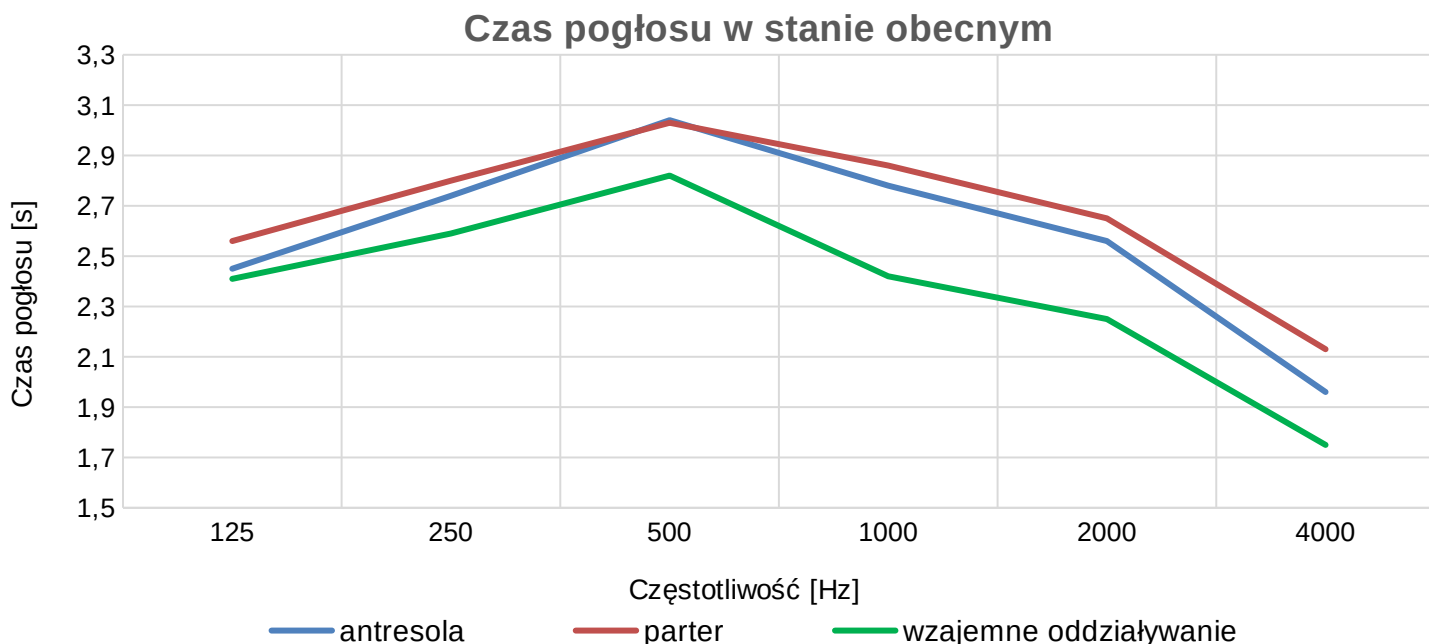


- Budynek na planie prostokąta
- Objętość budynku 8400
- Sklepienie o konstrukcji łukowej o promieniu 14,4m
- Antresola i parter połączone przestrzeniami po bokach



Pomiar czasu pogłosu

Analiza parametrów akustycznych sali wielofunkcyjnej

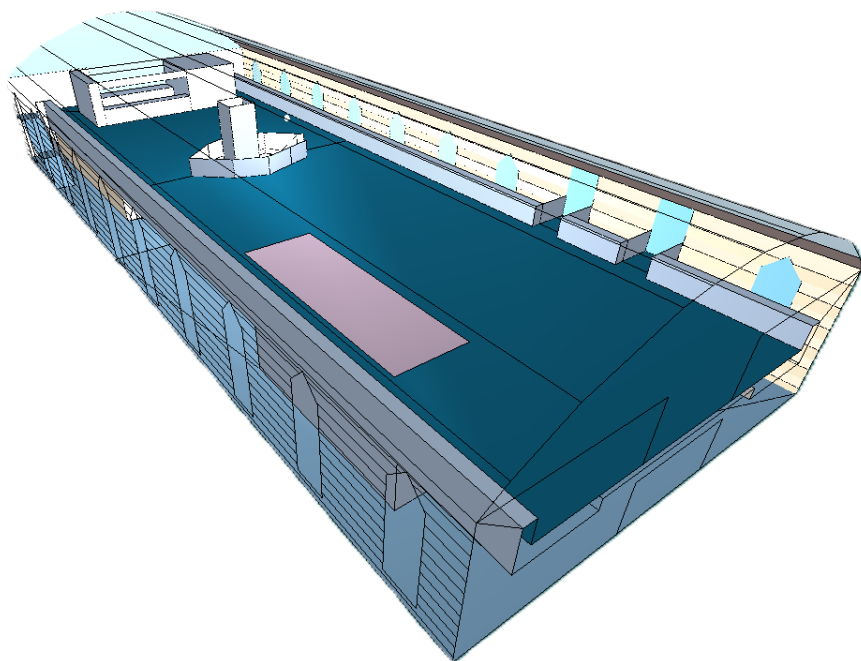


Częstotliwość [Hz] / Czas pogłosu [s]	125	250	500	1000	2000	4000
antresola [s]	2,45	2,74	3,04	2,78	2,56	1,96
parter [s]	2,56	2,80	3,03	2,86	2,65	2,13
wzajemne oddziaływanie [s]	2,41	2,59	2,82	2,42	2,25	1,75

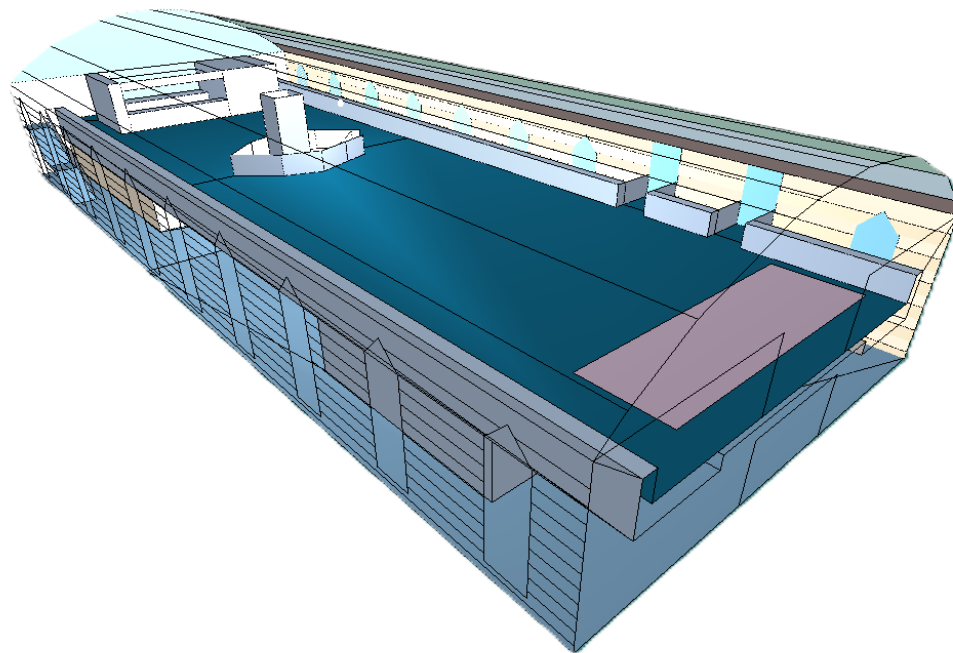
Parametr	Piętro	Wartość
STI	antresola	0,46
	parter	0,55
C₈₀ [dB]	antresola	-1,6
	parter	2,2
G₅₀₀₋₁₀₀₀ [dB]	antresola	12,9
	parter	12,2

Docelowe funkcje pomieszczenia

Położenie podestu scenicznego w zależności od pełnionej funkcji



Sala koncertowa / sala prób



Sala audytoryjna

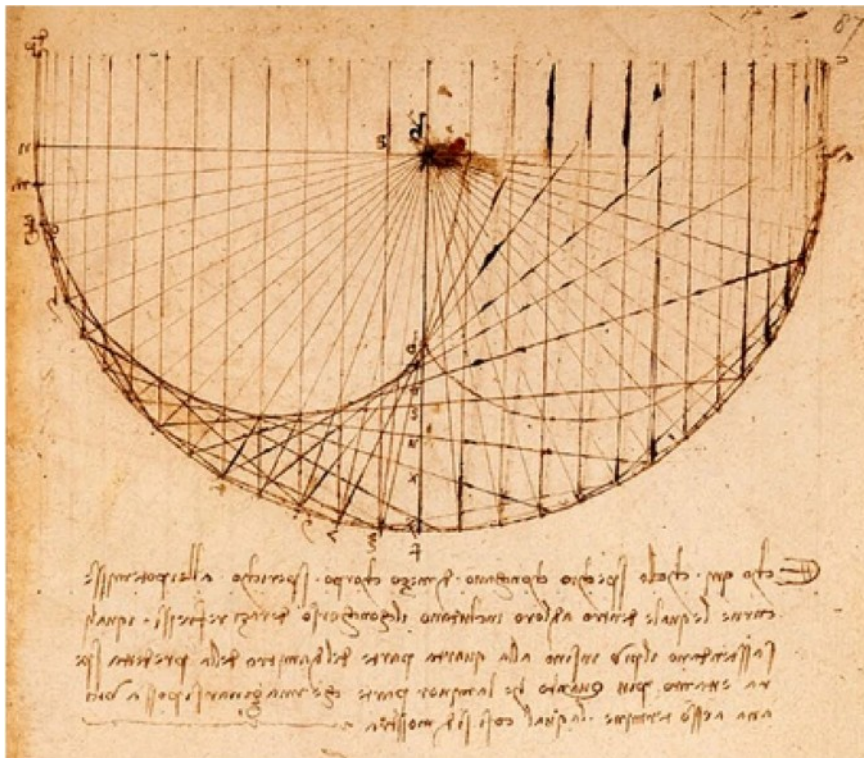
Koncepcja adaptacji akustycznej hali

Ogniskowanie dźwięku

Usytuowanie materiału dźwiękochłonnego

Zgodnie z teorią zwierciadła sferycznego, tylko niewielka część centralna bierze udział w tworzeniu ogniska, a pozostała część buduje tzw. kaustykę o pomijalnej wartości energetycznej.

Zatem, aby zredukować efekt ogniskowania dźwięku, materiał należy umieścić w części centralnej.



Rysunek kaustyki z notatnika Leonarda da Vinci

Pływalnia AGH – podwodna sala koncertowa

Przykładem ciekawego eksperymentu było wykorzystanie basenu do podwodnego odsłuchu muzyki

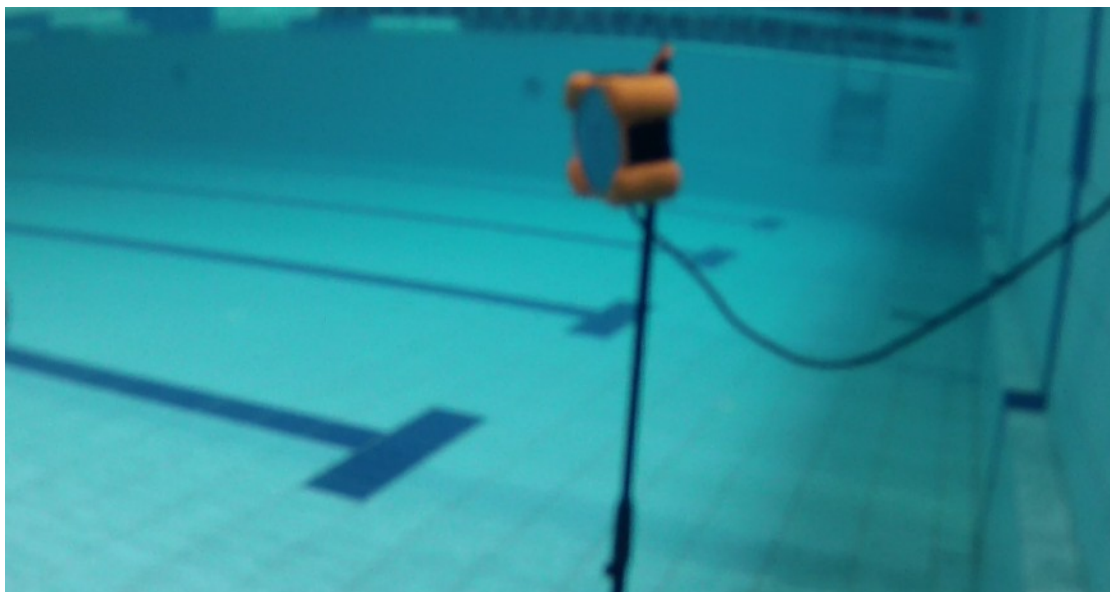




Pływalnia AGH – podwodna sala koncertowa

Zespół kameralny grał muzykę rozrywkową w pomieszczeniu ratownika, następnie wzmocniony sygnał przekazywano do specjalnych głośników umieszczonych na dnie basenu





Prędkość dźwięku
w powietrzu 340 m/s
w wodzie 1500 m/s



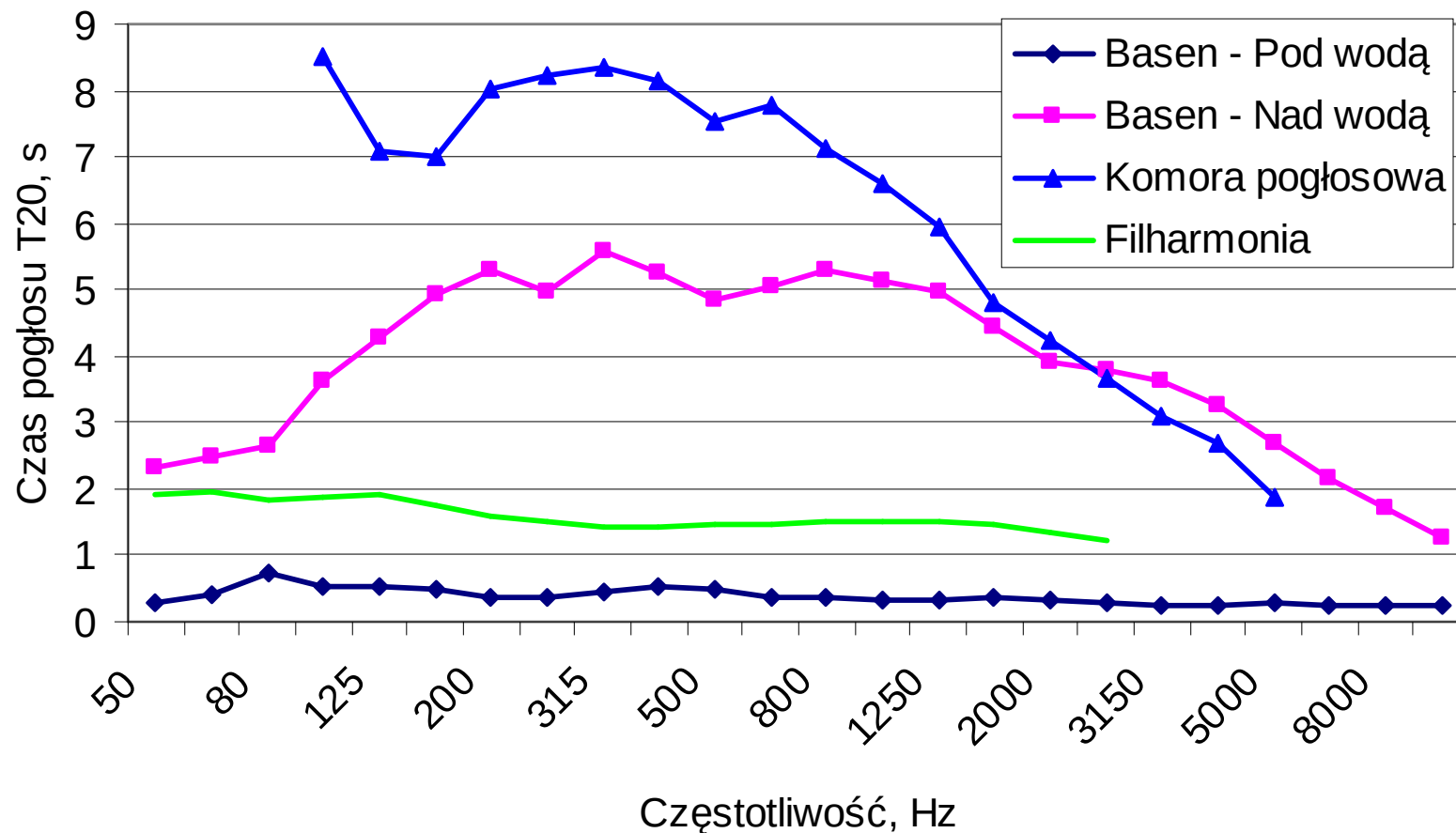


Pływalnia AGH

Publiczność słuchała muzyki zanurzając uszy pod powierzchnię wody i niezależnie na trybunach ludzie słyszeli efekty podwodnych dźwięków w słuchawkach

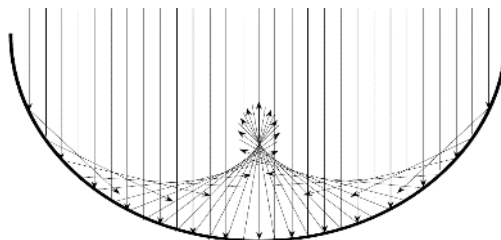
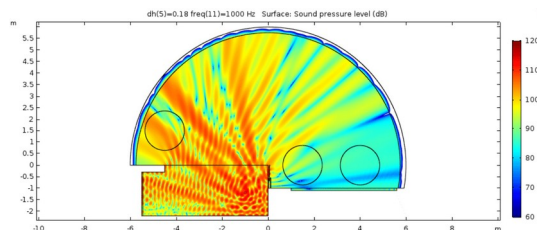
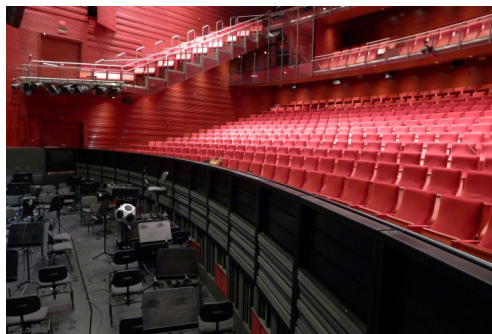
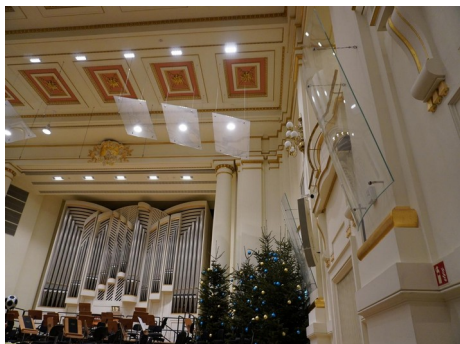


Porównanie czasu pogłosu wyznaczonego w różnych warunkach akustycznych



- Akustyka sal teatralnych i muzycznych jest przypisana do odpowiedniej funkcji, gdzie podstawą kwalifikacji jest czas pogłosu.
- Największą wartość w kształtowaniu akustyki sali posiadają właściwie dobrane powierzchnie refleksyjne.
- Optymalizowane struktury rozpraszające dźwięk, panele refleksyjne z modyfikacją obramowania oraz metamateriały akustyczne posiadają znaczący potencjał do tworzenia systemów kształtowania akustyki wewnątrz o najwyższych wymaganiach.

Wybrane metody korekty akustycznej wnętrz na przykładzie krakowskich sal koncertowych



Tadeusz KAMISIŃSKI

**Seminarium Akademii Inżynierskiej w Polsce
Kraków 11 marca 2025**