



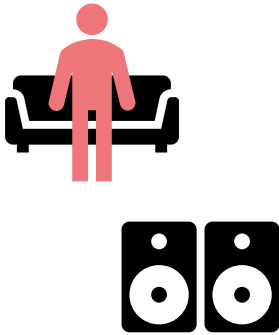
GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Kształtowanie atmosfery akustycznej pomieszczeń i sal koncertowych

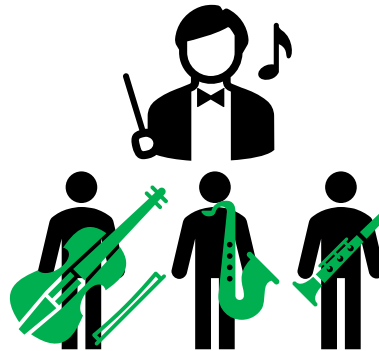
dr inż. Adam Kurowski



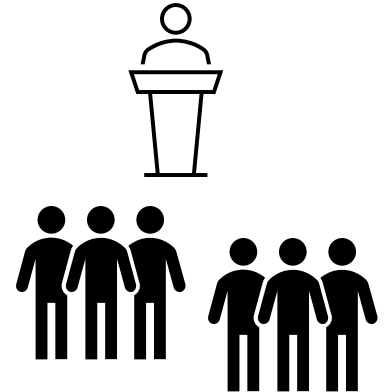
Istnieje wiele sytuacji, w których w centrum zainteresowania jej uczestników jest zjawisko o charakterze akustycznym.



Odsłuch nagrań
muzycznych lub innych
(np. audiobooków)



Słuchanie muzyki na
żywo



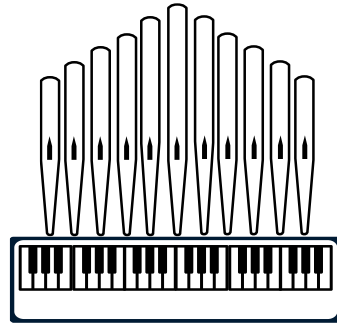
Słuchanie wykładów



Czym jest atmosfera akustyczna?

W zależności od sytuacji możemy preferować różne pomieszczenia dla różnych aktywności.

- długi czas pogłosu.
- uwypuklanie częstotliwości (wrażenie „ciepłego brzmienia”).
- wiele rozproszonych odbić fal akustycznych (wrażenie „otulenia dźwiękiem”).



Koncert organowy



Wykład

- krótki czas pogłosu.
- wierne przenoszenie (zwłaszcza) pasma mowy.
- niewiele odbić fal akustycznych.



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Czym jest atmosfera akustyczna?

Na potrzeby wykładu przyjmujemy następującą **definicję atmosfery akustycznej** pomieszczenia:

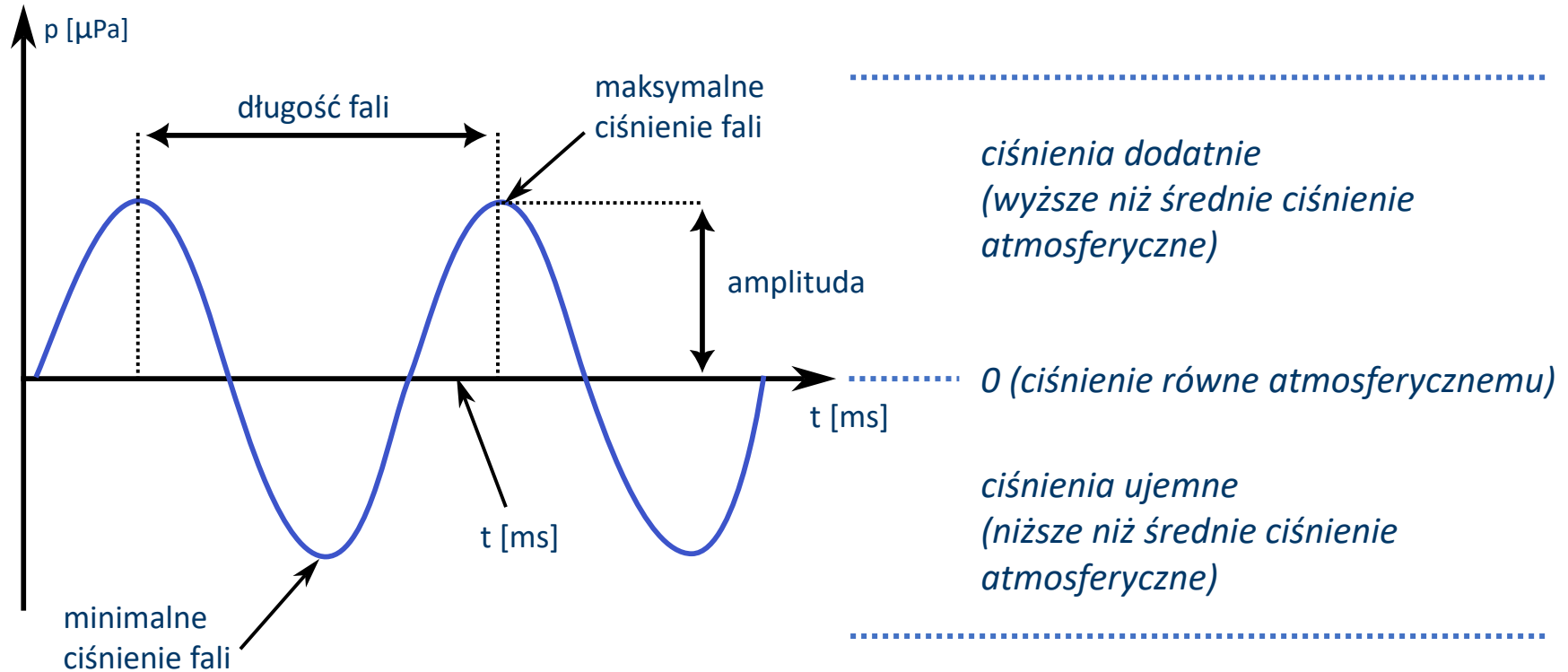
Atmosfera akustyczna pomieszczenia to wszystkie efekty, jakie pomieszczenie wywiera na propagującą się wewnątrz niego falę akustyczną, które są percypowalne (słyszalne jak i odczuwalne) przez osoby znajdujące się w tym pomieszczeniu.

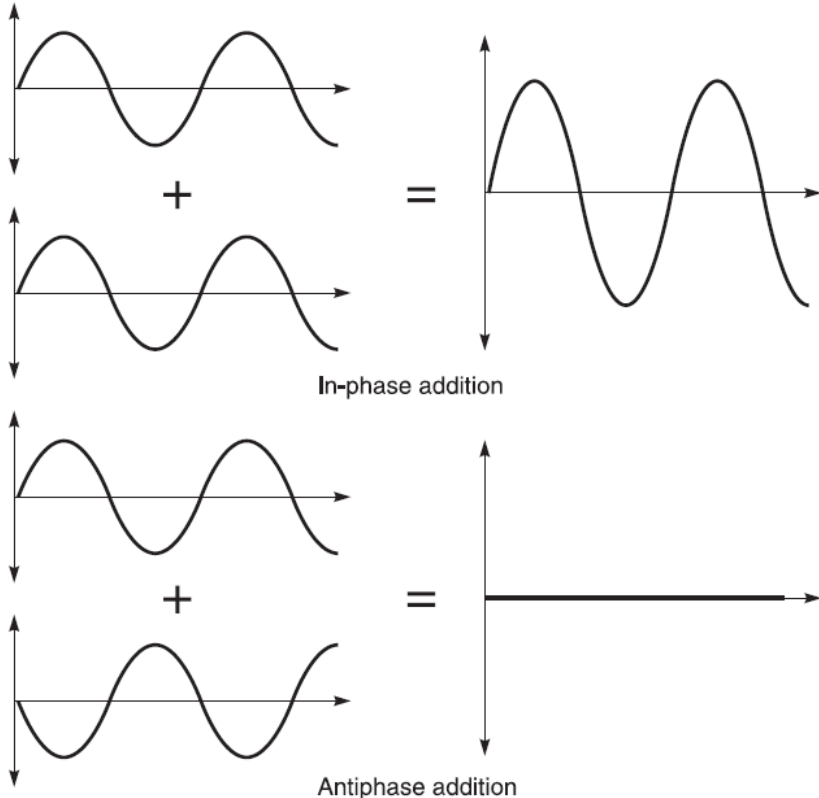


- **Każda z sytuacji w których dokonujemy odsłuchu** nagrania dźwiękowego, oglądamy film, słuchamy muzyki, wykładu, itp. **zawsze dzieje się w kontekście pomieszczenia**, w którym odsłuchu dokonujemy.
- **Geometria i materiały** z którego wykonane jest pomieszczenie zawsze do pewnego stopnia **wpływają na wrażenia słuchacza**.
- **W dobrym pomieszczeniu odsłuch muzyki albo wykładu może być łatwiejszy i przyjemniejszy**, a w złym pomieszczeniu sytuacja może być odwrotna.
- **Nie każde pomieszczenie nadaje się do wszystkich aktywności** związanych z wykorzystywaniem zmysłu słuchu.



Fala akustyczna w powietrzu



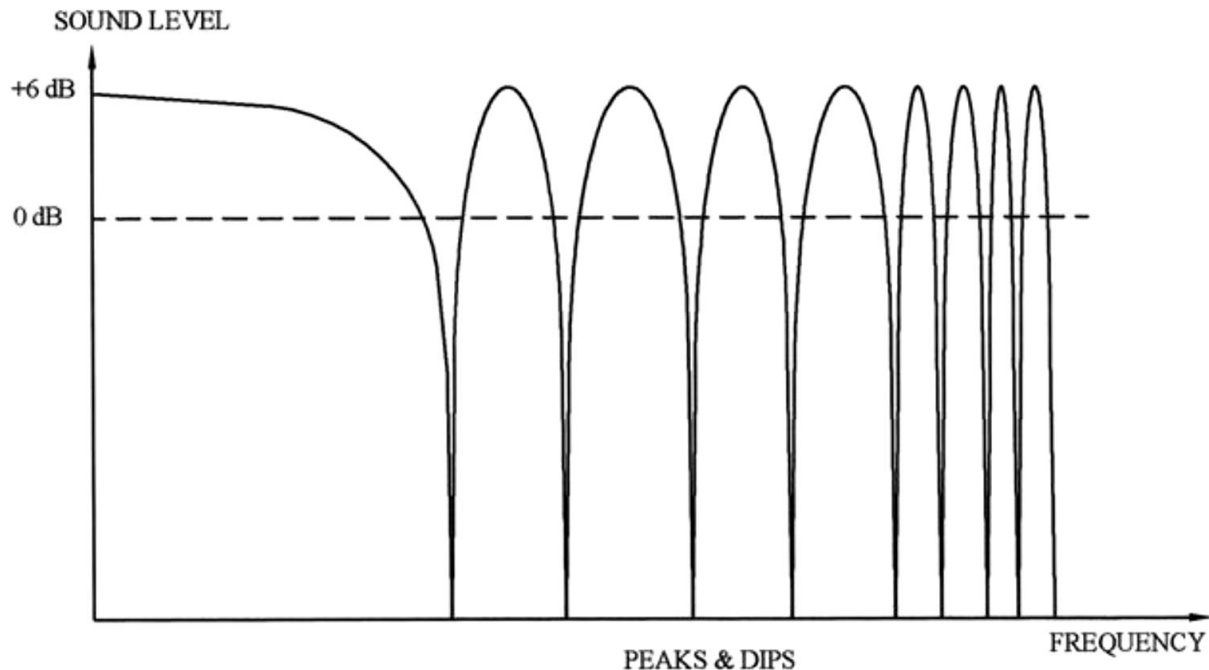


Interakcje fal akustycznych w pomieszczeniu

- W **zamkniętych przestrzeniach** w których istnieją **odbicia od ścian** (praktycznie wszystkie rzeczywiste pomieszczenia) zawsze będziemy mieli do czynienia ze zjawiskiem **interferencji**.
- W ramach **interferencji konstruktywnej** (ang. in-phase interference) niektóre częstotliwości zostają **wzmocnione**.
- W ramach **interferencji destruktywnej** (ang. antiphase interference) inne częstotliwości są **stłumione**.
- To **jakie częstotliwości zostaną wzmocnione lub stłumione zależy od miejsca w pomieszczeniu**.



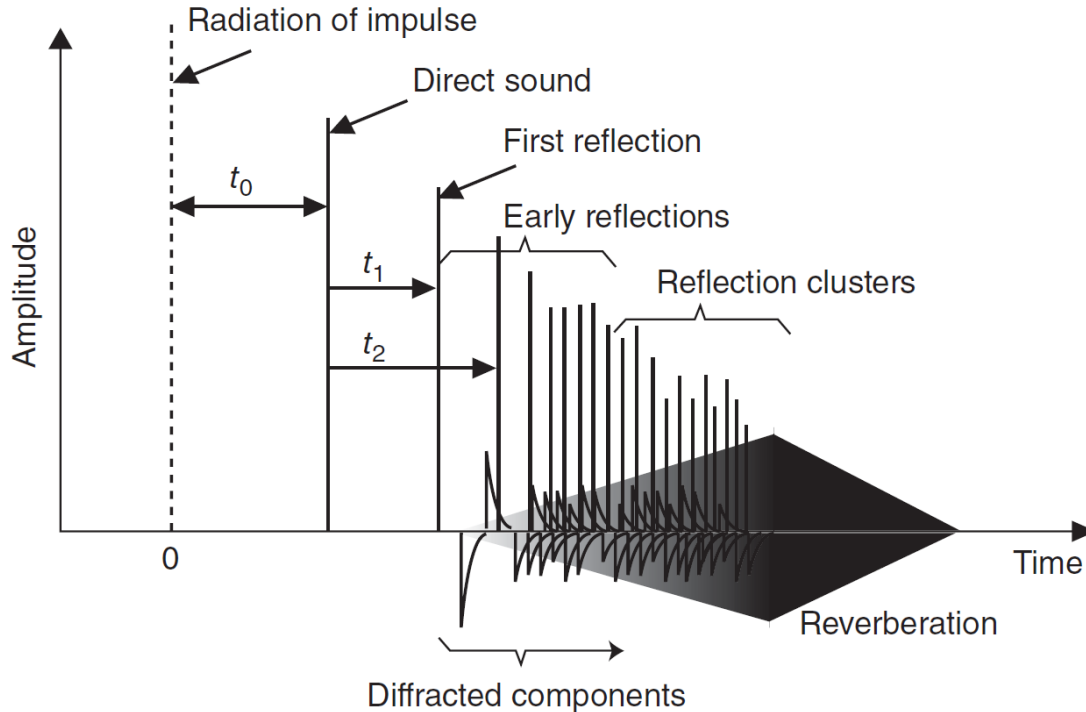
Filtracja grzebieniowa



- Przykład wpływu interferencji na charakterystykę częstotliwościową pokoju w punkcie odsłuchu (tzw. ***filtracja grzebieniowa***).
- **Maksima** charakterystyki odpowiadają falam **wzmocnionym** przez interferencję konstruktywną.
- Minima odpowiadają **falom słumionym** przez interferencję **destruktywną**.



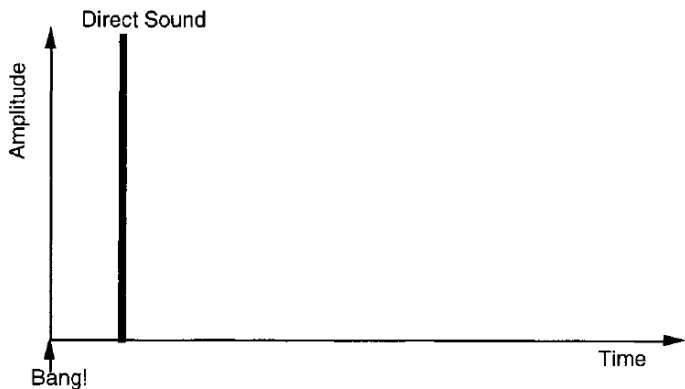
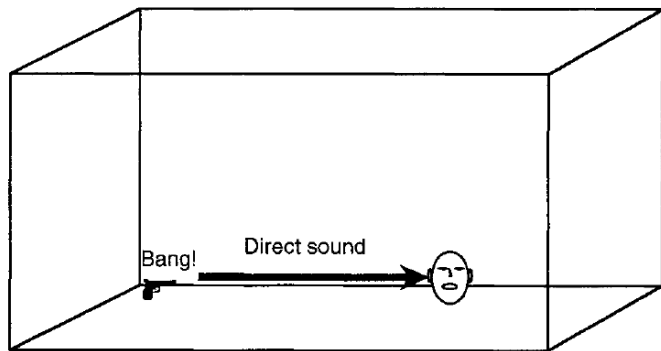
Odpowiedź impulsowa pomieszczenia



- Informację o tym jaki dokładnie wpływ pomieszczenie wywiera na charakter fali akustycznej w danym punkcie można ocenić poprzez **pomiar i analizę odpowiedzi impulsowej**.
- Odpowiedź impulsowa w pomieszczeniu zawiera **kilka typowych komponentów**, na podstawie których można przewidzieć własności akustyczne pomieszczenia.



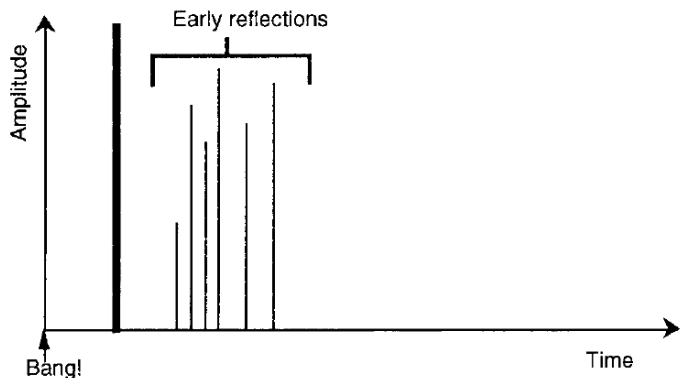
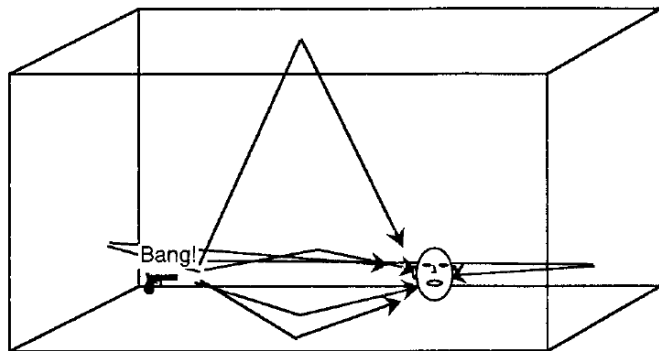
Komponenty odpowiedzi impulsowej pomieszczenia



- Pierwszym elementem odpowiedzi jest impuls odpowiadający dotarciu do miejsca pomiaru (np. mikrofonu lub ucha słuchacza) **bezpośredniego frontu falowego** (*ang. direct sound*) wygenerowanego przez źródło.
- Dzieje się tak dlatego, że **front ten porusza się najkrótszą trasą**, czyli po linii prostej od źródła do miejsca pomiaru (przy założeniu, że na tej linii nie ma przeszkód).
- Jest to kluczowy komponent jeśli chodzi o takie parametry pomieszczenia jak **zrozumiałość mowy**.



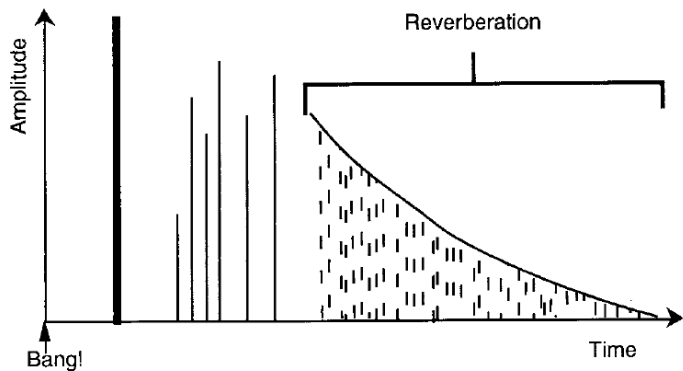
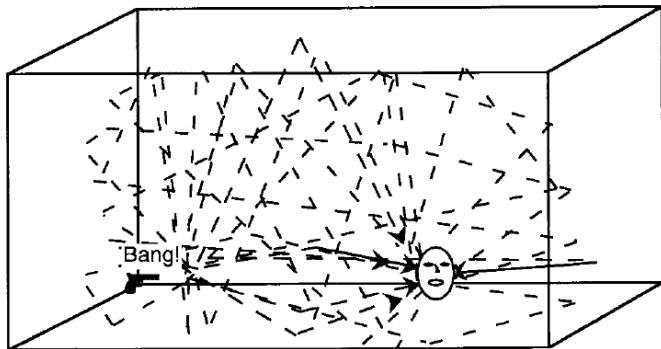
Komponenty odpowiedzi impulsowej pomieszczenia



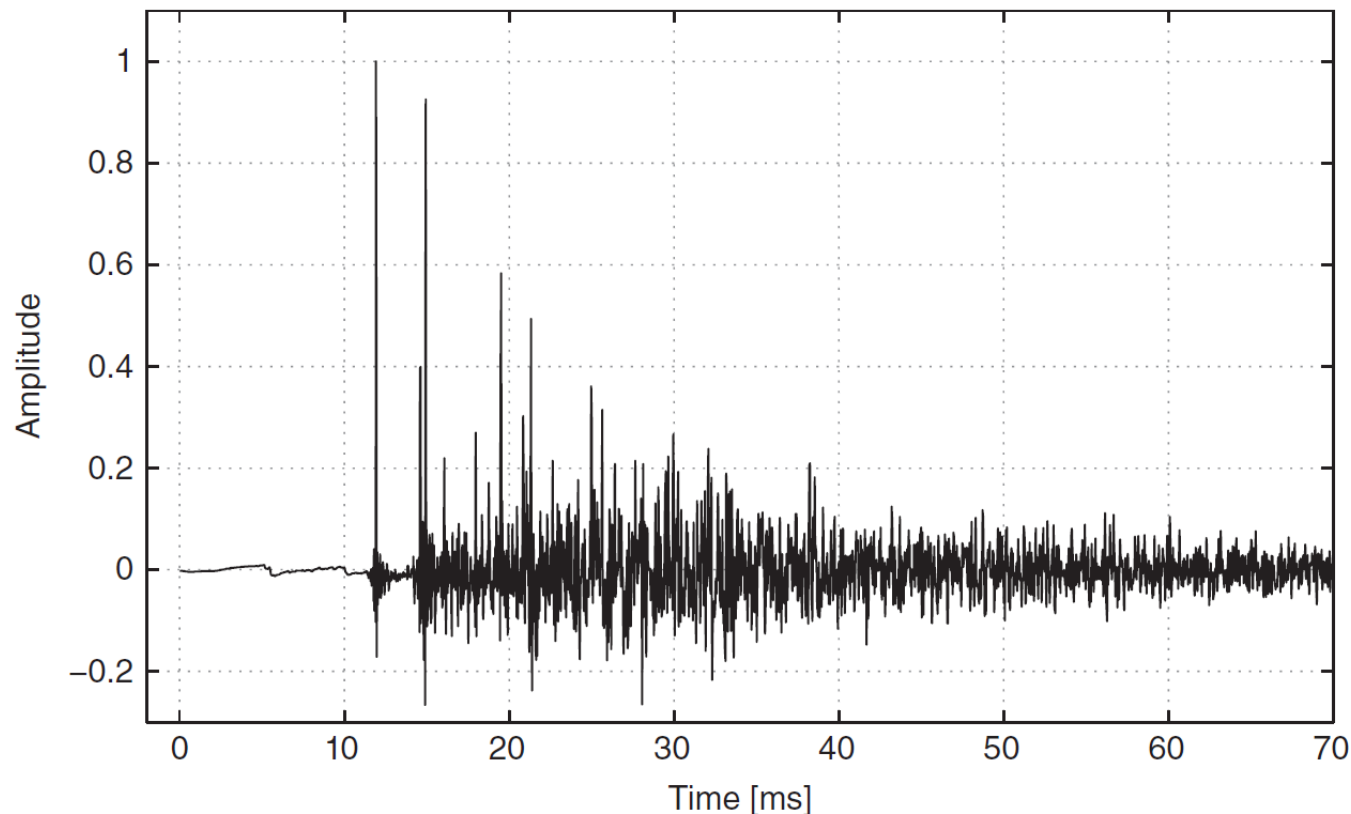
- Po bezpośrednim froncie falowym następuje w kolejności do miejsca pomiaru docierają tzw. **wczesne odbicia** (*ang. early reflections*) od ścian, podłogi, sufitu pomieszczenia oraz od obiektów, które się w nim znajdują.
- Odbicia te niosą ze sobą informację o **rozmiarze pomieszczenia** oraz o **pozycji źródła** w pomieszczeniu.
- Przyczyniają się one też do postawiania **interferencji i filtracji grzebieniowej**.

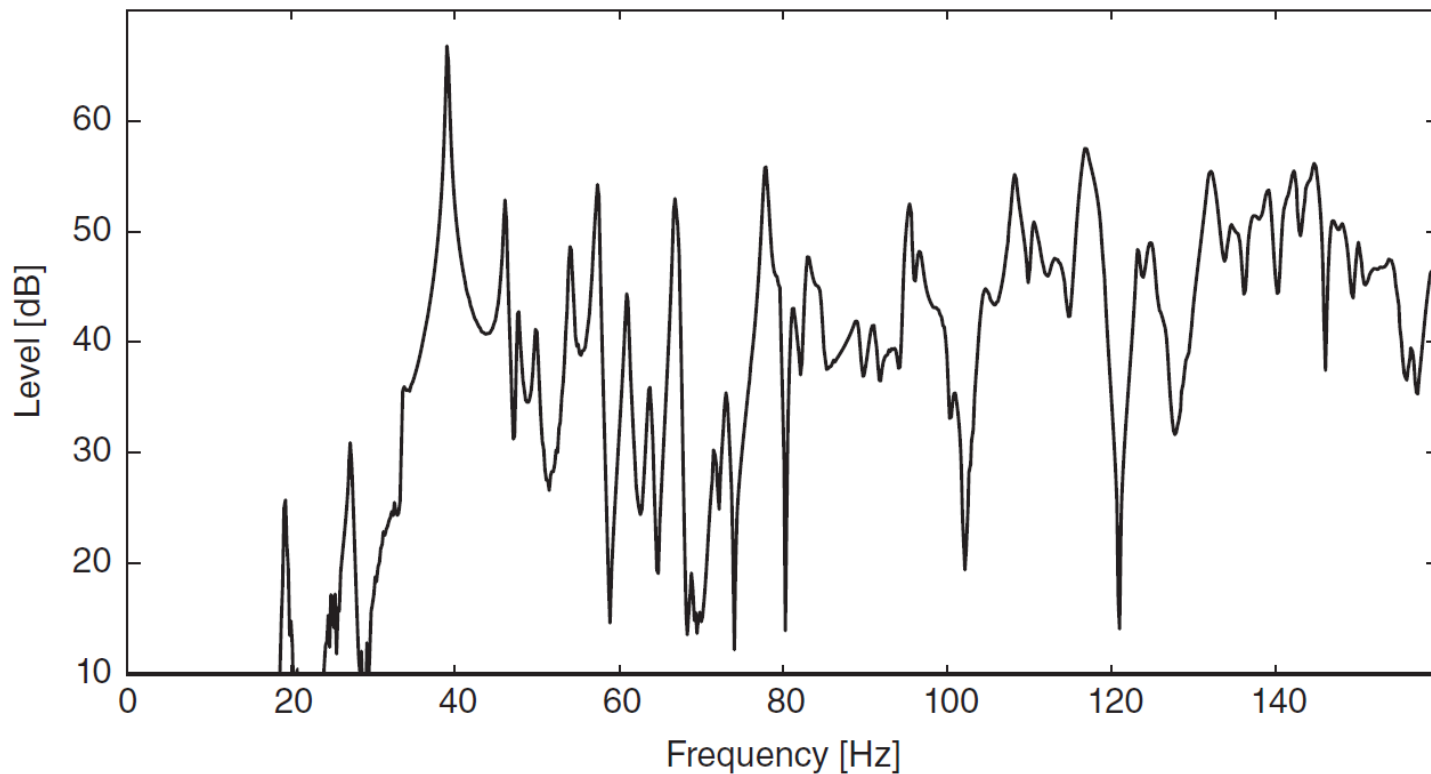


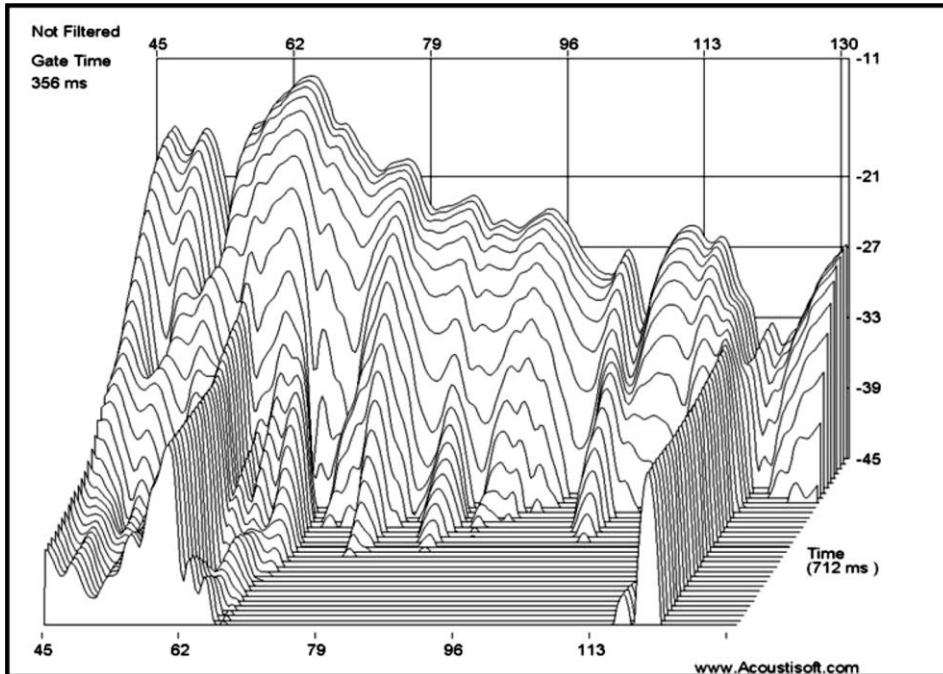
Komponenty odpowiedzi impulsowej pomieszczenia



- Po czasie liczba odbić zaczyna zwiększać się i tworzyć tzw. **ogon pogłosowy**.
- Na tym etapie **odbicia dochodzą do miejsca pomiaru/odstuchu z każdej strony**.
- Jest to w **znaczącej większości przypadków zjawisko pożądane**, pomieszczenia całkowicie pozbawione pogłosu są niekomfortowe zarówno dla słuchaczy jak i mówców/muzyków.
- Całkowita **likwidacja pogłosu** może być potrzebna w sytuacjach takich jak **pomiary akustyczne w warunkach tzw. bezechowych**.







- Pomieszczenie często **nie zmienia jedynie amplitud poszczególnych składowych częstotliwościowych**.
- Ze względu na zjawisko rezonansu często mamy do czynienia także z **wydłużonym wybrzmiewaniem składowych częstotliwościowych**, dla których w pomieszczeniu zachodzi rezonans.



Odpowiedź impulsową można mierzyć różnymi sposobami. Jednymi z bardziej popularnych są:

- **pomiar bezpośredni za pomocą pistoletu hukowego** (analogicznie jak w przykładzie przedstawionym we wcześniejszej części wykładu,
- **pomiar pośredni z wykorzystaniem sygnałów takich jak sekwencja o maksymalnej długości** (ang. maximum length sequence, **MLS**), czy **sygnał świergotowy** (ang. sweep signal).



Charakterystyczną cechą zarówno sygnału MLS jak i sygnału świergotowego jest fakt, że ich **funkcja autokorelacji ma postać impulsu**. Jeśli oznaczymy tego typu sygnał (dowolnie który) jako $S(t)$, to możemy zapisać, że:

$$S(t) * S(-t) \approx \delta(t)$$

gdzie przez $\delta(t)$ oznaczamy deltę Diraca.

Dokonując pomiaru odpowiedzi impulsowej nagrywamy w pomieszczeniu sygnał $S(t)$. Nagrany sygnał $R(t)$ stanowi następujący splot:

$$R(t) = S(t) * I(t)$$

gdzie $I(t)$ to interesująca nas odpowiedź impulsowa pomieszczenia.



Aby odzyskać odpowiedź impulsową pomieszczenia z sygnału nagranych $R(t)$ wystarczy dokonać **splotu sygnału $R(t)$ z sygnałem $S(-t)$** :

$$\begin{aligned} R(t) * S(-t) &= S(t) * I(t) * S(-t) \\ &\approx \delta(t) * I(t) \\ &= I(t) \end{aligned}$$

Zaletą tej metody jest możliwość wykorzystania **długiego sygnału MLS lub świergotowego zamiast bardzo głośnego impulsu** o krótkim czasie trwania.



GDYŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Wpływ geometrii pomieszczenia na atmosferę akustyczną

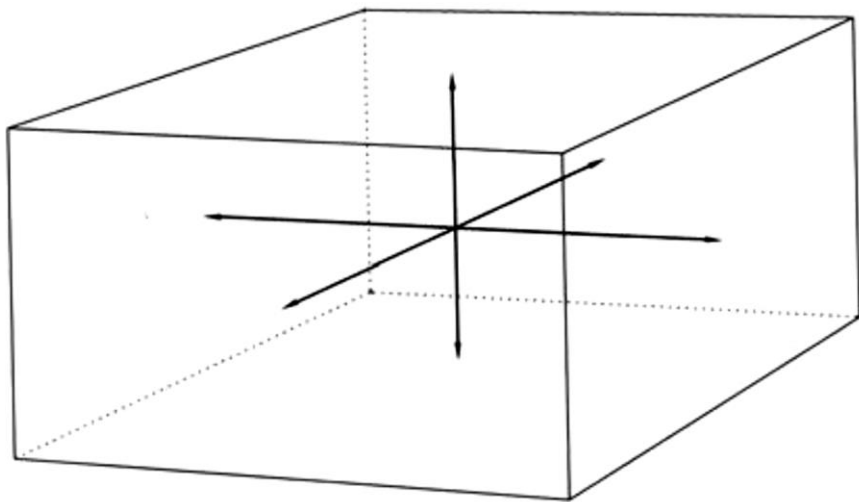
Zjawiska o których była mowa przy omawianiu odpowiedzi impulsowych w większości determinowane są przez **geometrię pomieszczenia** w którym propagują się fale akustyczne.

Wymiary pomieszczenia oraz ustawienie ścian determinują powstawanie tzw. **modów odpowiedzialnych za zjawiska filtracji grzebieniowej i rezonansów.**

Dodatkowo odbicia pomiędzy ścianami mogą prowadzić do **zjawiska echa trzepoczącego, rozmycia obrazu stereo** i innych podobnych niekorzystnych zjawisk.



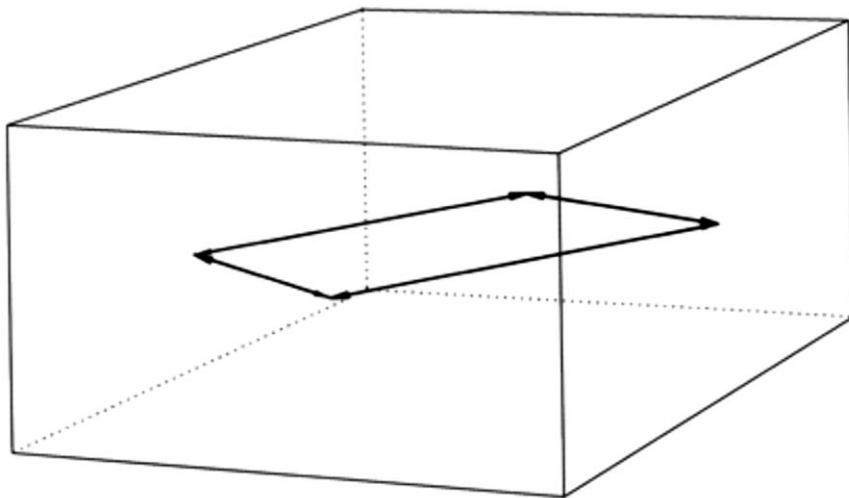
Mody osiowe pomieszczenia



- Najprostsze to scharakteryzowania są **mody osiowe (*ang. axial modes*) pomieszczenia**.
- Mody te występują **między równoległymi ścianami pomieszczenia** i są przyczyną powstawania **rezonansów** (fal stojących) oraz **zafalowań charakterystyki częstotliwościowej pomieszczenia**.
- **Eliminacja modów** osiowych jest jednym ze **sposobów na polepszenie atmosfery akustycznej pomieszczenia**.



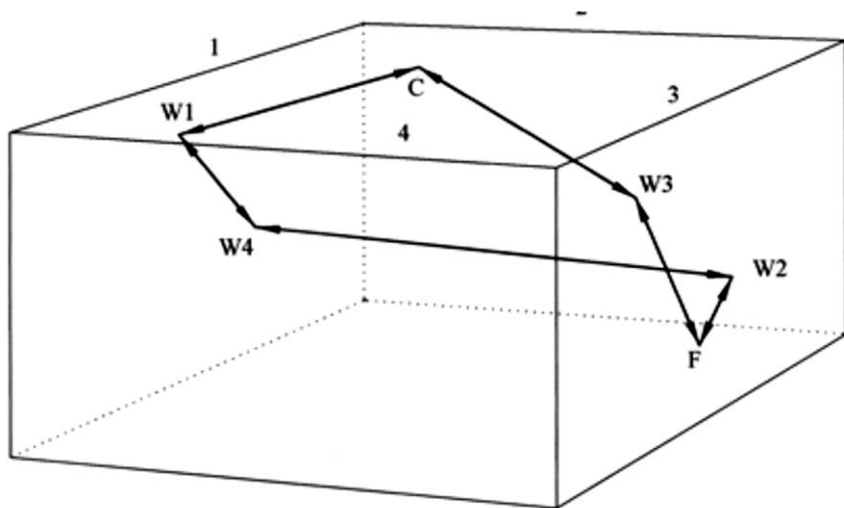
Mody styczne pomieszczenia



- **Mody styczne** (*ang. tangential modes*) pomieszczenia **oddziałują na charakterystykę częstotliwościową pomieszczenia w słabszy sposób** niż mody osiowe (około połowę słabszy).
- Ilustracja pokazuje mod styczny uformowany pomiędzy ścianami pomieszczenia, ale **możliwe są także mody uformowane między dwiema ścianami, podłogą i sufitem** pomieszczenia.



Mody skośne pomieszczenia



- Mody skośne (*ang. oblique modes*) są modami **najślabiej oddziałującymi** na charakterystykę pomieszczenia.
- Zwykle mod skośny **oddziałuje średnio 4 razy słabiej** na charakterystykę częstotliwościową pomieszczenia niż analogiczny mod osiowy.
- Często **wpływ modów skośnych na akustykę pomieszczenia jest tak mały, że może być pominięty** w analizach.



Minimalizacja modów występujących w pomieszczeniu jest możliwa poprzez **dobranie proporcji wymiarów pomieszczenia w taki sposób, aby utrudnić powstawanie silnych rezonansów**

Jest to **szczególnie istotne w przypadku niedużych pomieszczeń**, dla których problem rezonansów jest najsilniejszy. Przykładowe empiryczne proporcje przedstawione są poniżej.

Wysokość	Szerokość	Długość
1	1.14	1.39
1	1.28	1.54
1	1.60	2.33

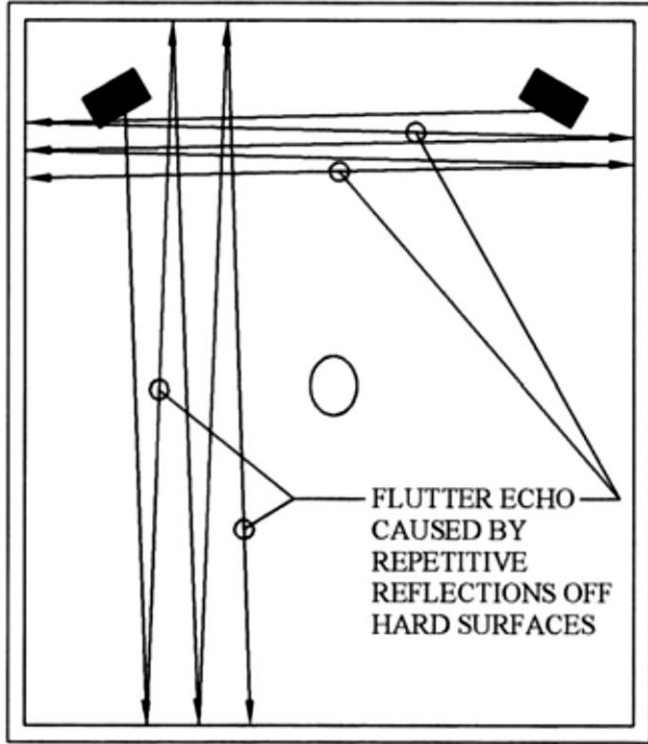
L. W. Sepmeyer

Wysokość	Szerokość	Długość
1	1.40	1.90
1	1.30	1.90
1	1.50	2.10

M. M. Loudon



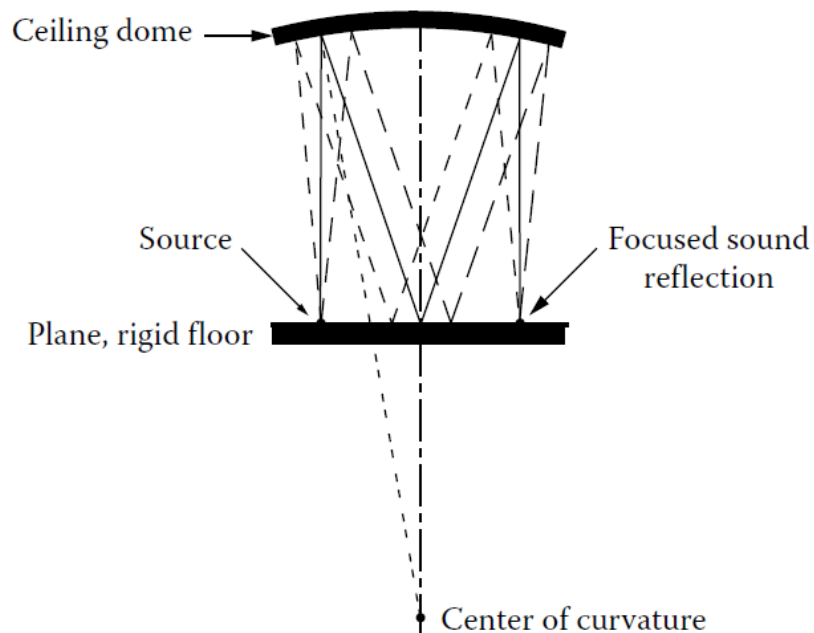
Echo trzepoczące



- Zjawisko **echa trzepoczącego** (*ang. flutter echo*) objawia się jako **metalicznie brzmiący efekt akustyczny** wynikający z odbijania się fal dźwiękowych pomiędzy dwiema ścianami pomieszczenia (jak na rysunku).
- Czasami możliwe jest wywołanie tego efektu, gdy **kłaśnie się w długim korytarzu lub gdy uczeni się to samo pod betonowym zadaszeniem**.
- Aby pozbyć się efektu echa trzepoczącego, można zbudować **ściany w pomieszczeniu w taki sposób, żeby nie były one względem siebie idealnie równoległe**.
- Alternatywnie, możliwe jest także pozbycie się echa trzepoczącego za pomocą **wytlumienia przynajmniej jednej ze ścian**, które powodują problem.



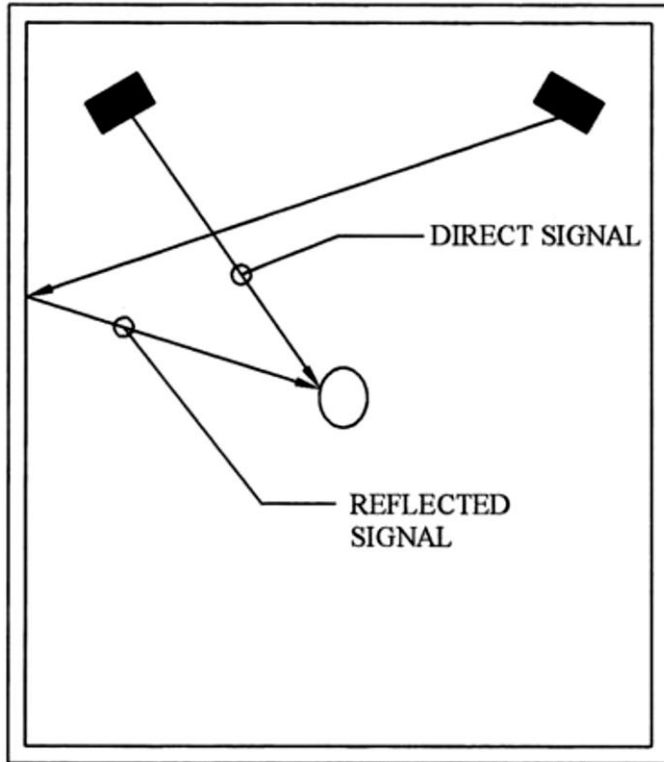
Wpływ kopuły



- Innym elementem czasami występującym w pomieszczeniach i powodującym kłopoty są **kopuły**.
- Kopuły **skupiają fale akustyczne w ognisku** i czasami przyczyniają się do pogorszenia jakości odsłuchu w pobliżu ogniska kopuły.
- Poradzenie sobie z tym problemem jest możliwe poprzez **zastosowanie urządzeń akustycznych np. w postaci siatek**, które rozpraszają i/lub fale akustyczne dostające się do i z kopuły.



Silne wczesne odbicia



- Silne wczesne odbicia posiadają potencjał do **degradacji obrazu stereo np. w nagraniu**.
- Jeśli do ucha słuchacza prawie **jednocześnie dobiegnie sygnał z głośnika (np. lewego głośnika jak na rysunku po lewej) i bardzo silne odbicie od ściany**, to istnieje taka możliwość, że zmysł słuchu słuchacza zinterpretuje taką sytuację jako dźwięk dobiegający ze źródła znajdującego się na ścianie a nie z lewego głośnika.
- Z tego względu konieczne jest upewnienie się, że w **pomieszczeniach służących do odsłuchu muzyki (np. w studiu nagraniowym) nie istnieją silne wczesne odbicia**, które mogą zakłócać postrzeganie obrazu przestrzennego w nagraniu.

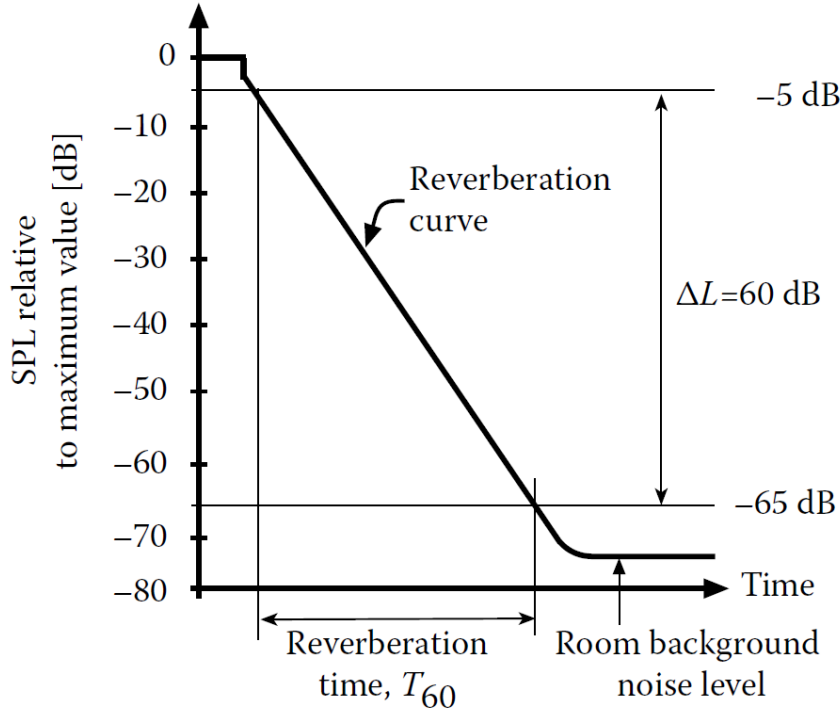


Analiza atmosfery akustycznej pomieszczeń oraz jej kształtowanie wymaga posługiwania się obiektywnymi miarami cech akustyki pomieszczenia. Przykładami miar (parametrów) tego typu są:

- czas pogłosu (*ang. reverberation time*),
- klarowność (*ang. clarity*),
- energia odbić bocznych (*ang. lateral energy fraction*),
- współczynnik basów (*ang. bass ratio*)
- współczynnik sopranów (*ang. treble ratio*).



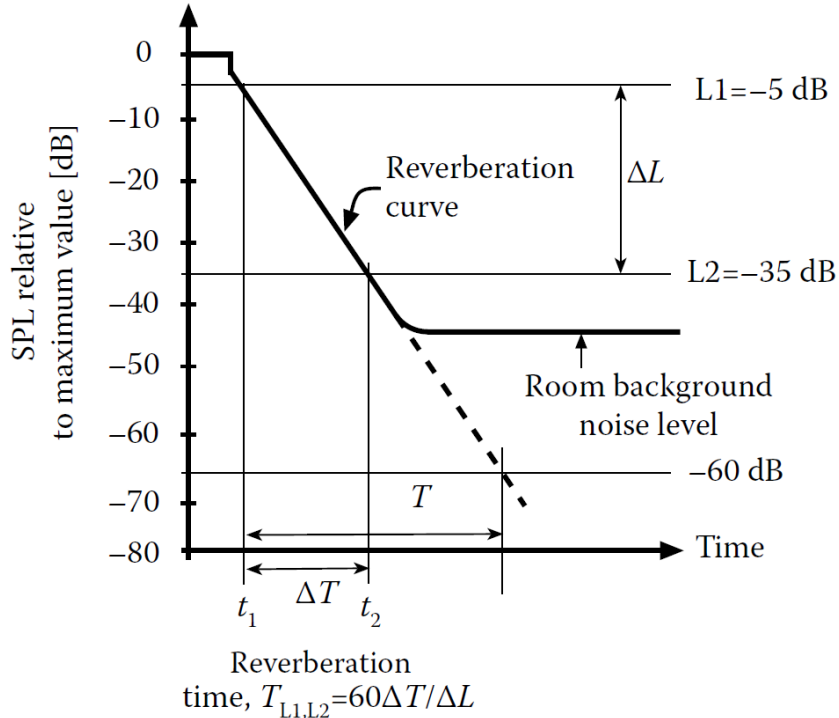
Czas pogłosu T_{60}



- Czas pogłosu T_{60} jest definiowany jako **czas**, który musi upłynąć aby poziom **ciśnienia SPL** (*ang. sound pressure level*) **spadł z wartości maksymalnej** (po ustaniu pobudzenia) o wartość o **60 dB** mniejszą niż wartość **początkowa**.
- Dla sytuacji z rysunku po lewej oznacza to czas, który musi upłynąć od momentu gdy SPL wynosi -5 dB to momentu w którym SPL wynosi -65 dB.



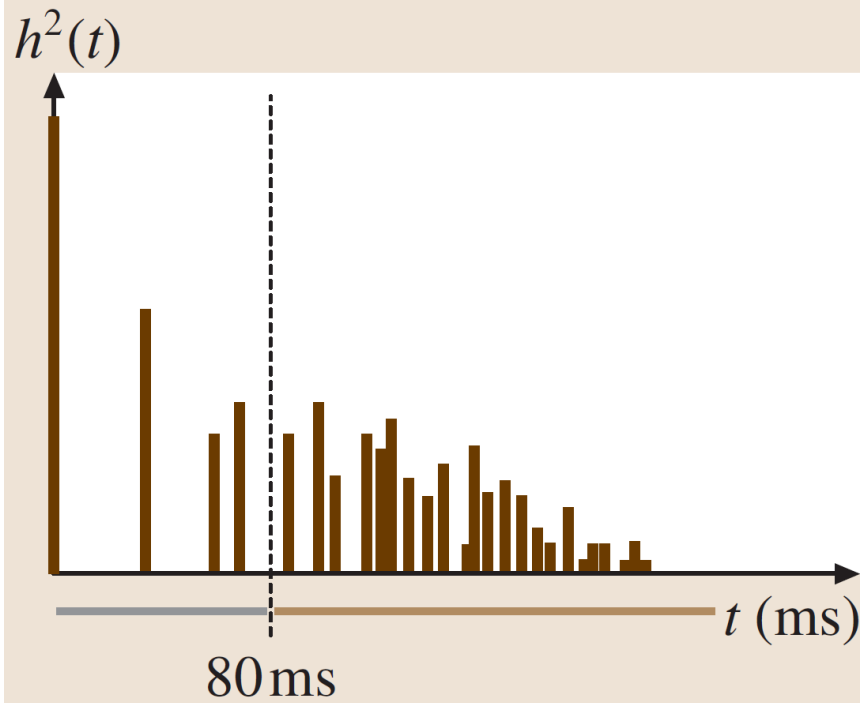
Czas pogłosu T_{60}



- Czasami poziom szumu w pomieszczeniu nie pozwala na zmierzenie czasu T_{60} wprost, ale jednocześnie widoczna jest na tyle duża część krzywej pogłosowej, że możliwe jest jej **przedłużenie**.
- W takim przypadku dokonuje się obliczenia parametru T_{60} przy wykorzystaniu widocznego odcinka krzywej pogłosowej wraz z dorysowanym przedłużeniem.
- Analogicznie do czasu pogłosu T_{60} możliwe jest też policzenie **czasu T_{30} dla którego obserwuje się czas spadku SPL o 30 dB**.



Klarowność



Klarowność C jest definiowana jako stosunek energii odbić, które dotarły do punktu pomiaru w czasie krótszym niż 80 ms do energii pozostałych odbić.

Obliczana jest ona ze wzoru:

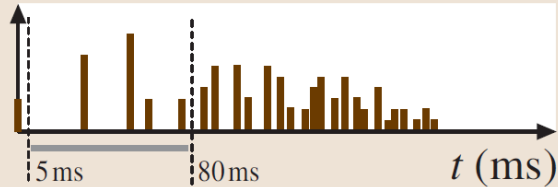
$$C = 10 \log_{10} \left[\int_0^{80 \text{ ms}} h^2(t) dt / \int_{80 \text{ ms}}^{\infty} h^2(t) dt \right]$$

Klarowność opisuje to jak dokładnie możliwe jest dosłyszenie detali koncertu, mowy, itp. i czy detale te nie są zagłuszone przez nadmiar późnych odbić.

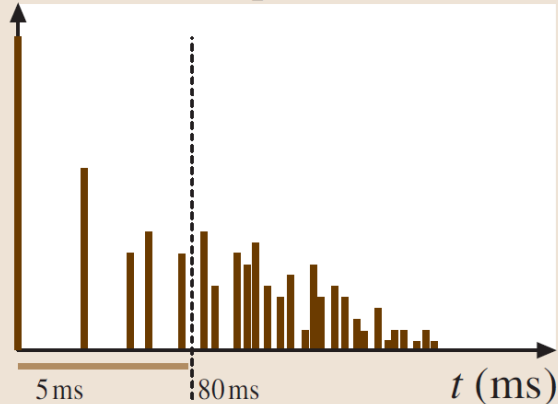


Energia odbić bocznych

$h^2(t)$ – fig. of eight microphone



$h^2(t)$ – Omni microphone



Energia odbić bocznych (*ang. lateral Energy fraction, LEF*) jest miarą przestrzenności dźwięku, czyli wrażenia że dochodzi on do słuchacza z wielu różnych stron. Obliczana jest ona ze wzoru

$$LEF = \int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_1^2(t) dt / \int_{80 \text{ ms}}^{\infty} h^2(t) dt,$$

gdzie

$h_1(t)$ jest odpowiedzią impulsową zmierzoną mikrofonem o charakterystyce ósemkowej (wychytującej tylko odbicia z boku),

$h(t)$ jest odpowiedzią impulsową zmierzoną mikrofonem o charakterze dookólnym (*ang. omni*)



Za pomocą parametrów obiektywnych możliwe jest też opisanie barwy dźwięku charakterystycznej dla danego wnętrza.

Przykładowo, można posłużyć się współczynnikiem basów (*ang. bass ratio, BR*) do określenia, jak bardzo bogata w basy jest atmosfera akustyczna danego pomieszczenia. Oblicza się go jako

$$BR = \frac{T_{125 \text{ Hz}} + T_{250 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}}}$$

gdzie T_f oznacza czas pogłosu dla pasma o szerokości oktawy o częstotliwości środkowej równej f (w przypadku współczynnika basów są to częstotliwości 125Hz, 250 Hz, 500 Hz i 1000 Hz).



Analogicznie do współczynnika można też zdefiniować współczynnik sopranów (ang. treble ratio, TR). Jest on obliczany ze wzoru

$$TR = \frac{T_{2000 \text{ Hz}} + T_{4000 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}}}$$

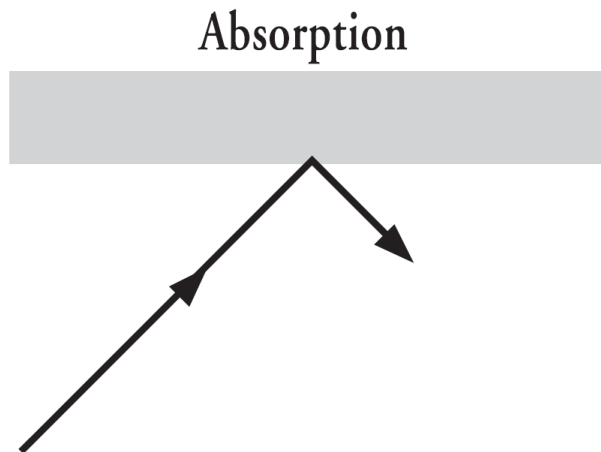
gdzie T_f oznacza czas pogłosu dla pasma o szerokości oktawy o częstotliwości środkowej równej f (w przypadku współczynnika basów są to częstotliwości 500 Hz i 1000 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz).



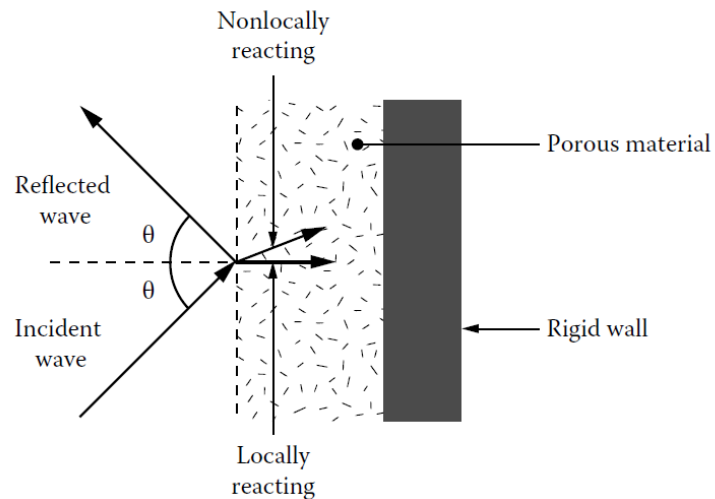
Istnieją dwa główne czynniki za pomocą których można wpływać na atmosferę akustyczną pomieszczeń (jest to tzw. proces adaptacji akustycznej pomieszczenia). Są to:

- wykorzystanie zjawiska **absorpcji (pochłaniania) fal akustycznych** przez ustroje akustyczne zwane **absorberami**,
- wykorzystanie zjawiska **rozproszenia fal akustycznych**, na którym opiera się zasada działania ustrojów akustycznych zwanych **dyfuzorami**.

Absorpcja pozwala np. pozbyć się niechcianych odbić, a dyfuzja (rozpraszanie) fal pozwala np. zlikwidować niechciane rezonanse pomieszczenia lub niechciane wczesne odbicia.



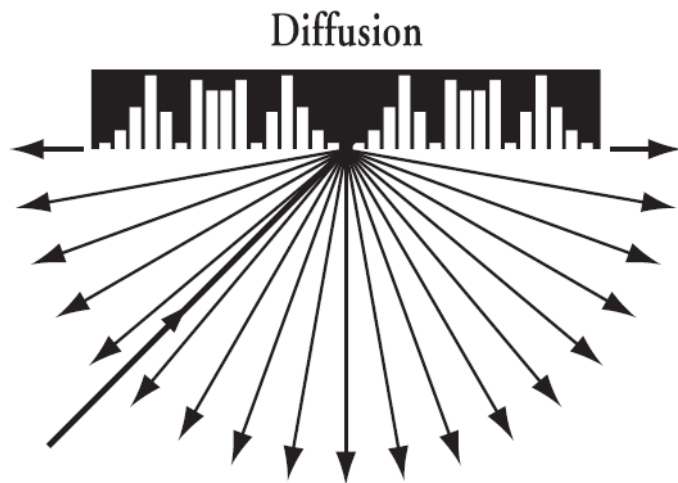
źródło: Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.



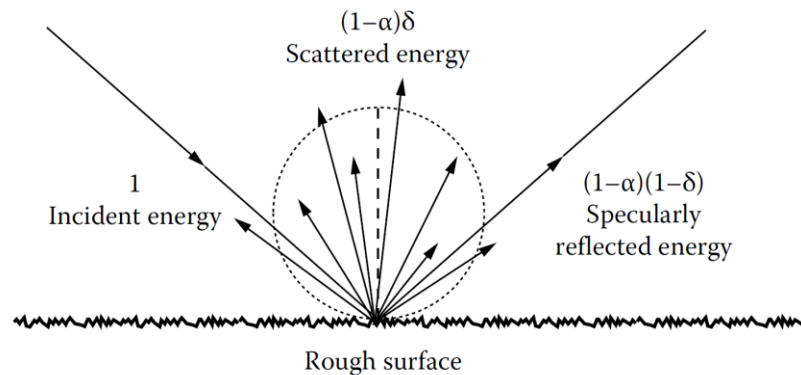
źródło: Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). *Acoustics of small rooms*. CRC Press.



Wizualizacja rozproszenia fali akustycznej



źródło: Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.



źródło: Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). *Acoustics of small rooms*. CRC Press.



Absorbery to ustroje akustyczne, których zadaniem jest pochłanianie padających na nie fal akustycznych.

Efekt ten można uzyskać na kilka sposobów. Do najczęściej wykorzystywanych zasad działania należą:

- pochłanianie na **materiałach porowatych**, które wprowadzają straty cieplne (ze względu na fakt, że powietrze posiada niezerową lepkość),
- absorbery działające na **zasadzie rezonansu** (w tym tzw. pułapki basowe),
- absorbery **aktywne** (wymagające zasilania, z wyglądu przypominające zestawy głośnikowe).



GD AŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Absorbery bazujące na materiałach porowatych



Przykład pomieszczenia do nauki gry na instrumencie, w którym ściany zaadaptowane są za pomocą porowatych absorberów działających na zasadzie pochłaniania przez straty ciepłe.

źródło: Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.



GDAA
GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Absorber bazujący na rezonatorze Helmholtza



źródło: Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.



GD AŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Absorber/dyfuzor aktywny

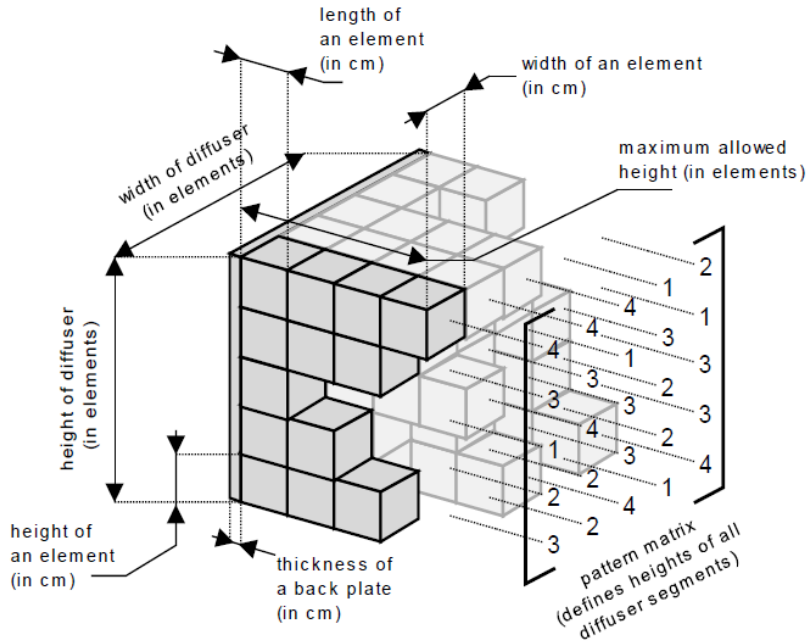




- Dyfuzory akustyczne często mają postać elementów wykonanych z drewna lub innego materiału stanowiącego przeszkodę dla fali akustycznej o **skomplikowanym kształcie**.
- Kształt ten jest optymalizowany pod kątem **rozbicia frontu falowego padającego na dyfuzor na jak najwięcej frontów pochodnych** (powstających w procesie odbicia od poszczególnych elementów dyfuzora).
- Jednym z popularnych typów dyfuzorów są tzw. **dyfuzory Schroedera** w których wysokość poszczególnych elementów dobiera się za pomocą sekwencji pseudolosowej.
- Innym przykładem dyfuzorów są np. dyfuzory bazujące na **fraktalach**.



Przykład: dyfuzory Schroedera



Dyfuzory Schroedera do określenia wysokości poszczególnych elementów mogą bazować na różnego rodzaju ciągach pseudolosowych jak na przykład

- sekwencja o **maksymalnej długości** (*ang. maximum length sequence, MLS*),
- sekwencja bazująca na **pierwiastkach pierwotnych** (*ang. primitive root sequence, PRD*),
- sekwencja bazująca na **rezyduum kwadratowym** (*ang. quadratic root residue, QRD*).

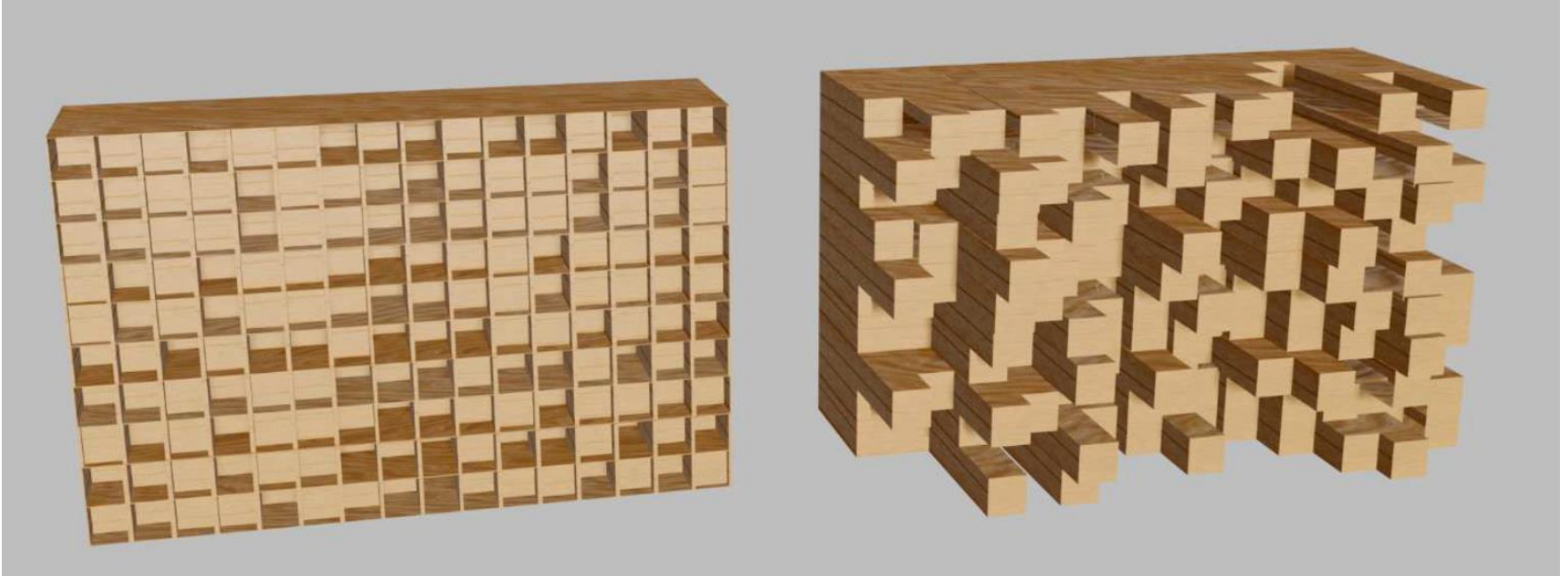


GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Dwuwymiarowe dyfuzory Schroedera



źródło: Kurowski, A. (2021). Designing acoustic scattering elements using machine learning methods, PhD Thesis, Gdańsk University of Technology.

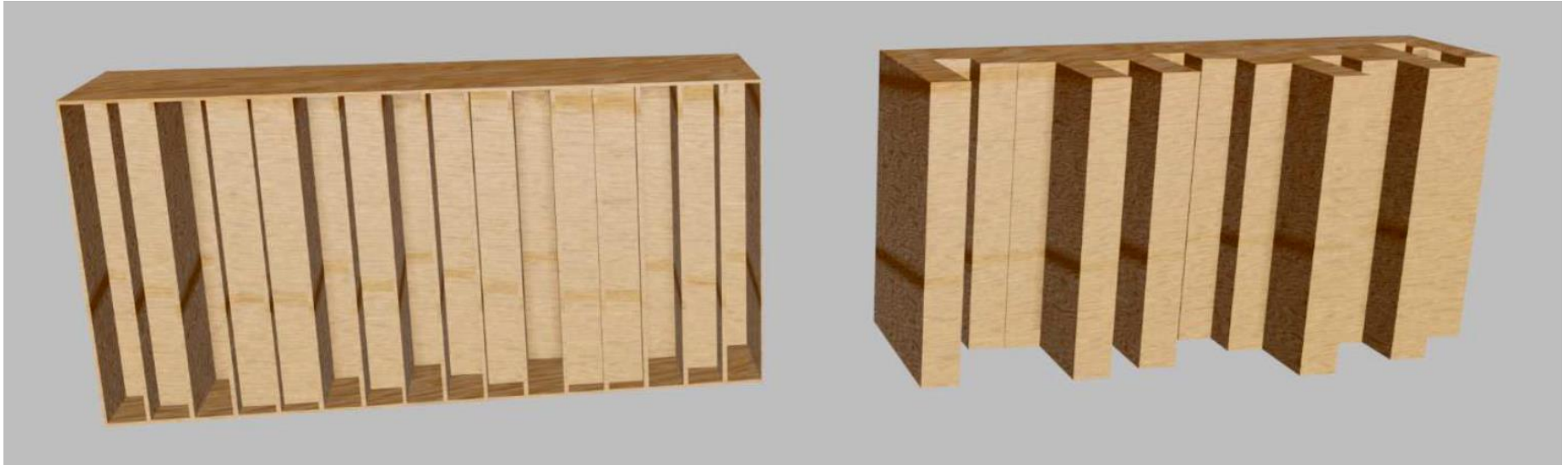


GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Jednowymiarowe dyfuzory Schroedera



źródło: Kurowski, A. (2021). Designing acoustic scattering elements using machine learning methods, PhD Thesis, Gdańsk University of Technology.



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Dyfuzory bazujący na fraktalach



źródło: Cox, Trevor & D'Antonio, Peter. (2005). Thirty years since "Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences": Where are we now?. Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acustics.



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Przykłady pomieszczeń



źródło: Ermann, M. (2015). *Architectural acoustics illustrated*. John Wiley & Sons.



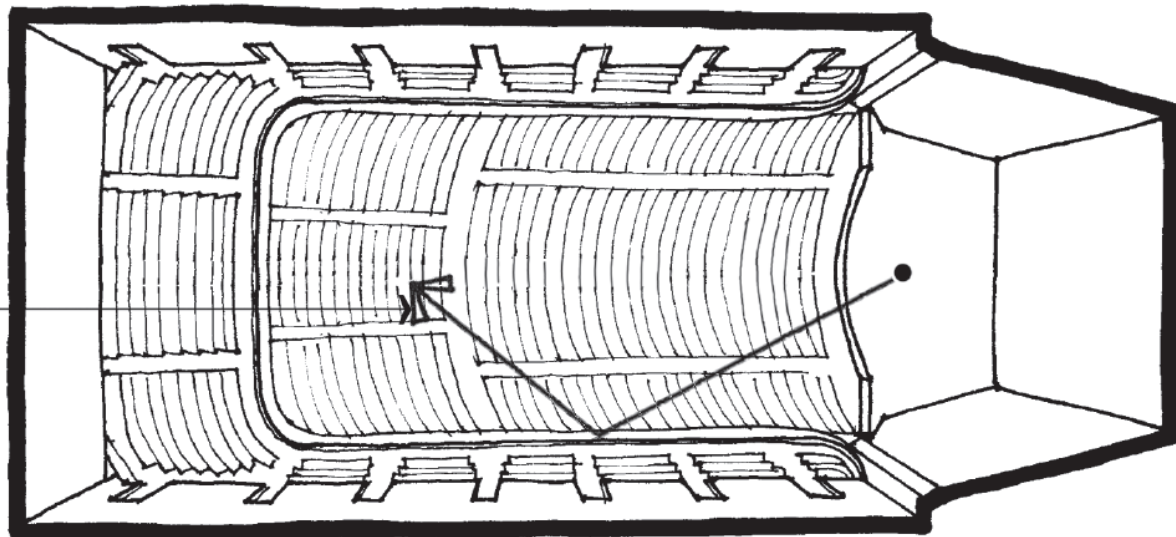
GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



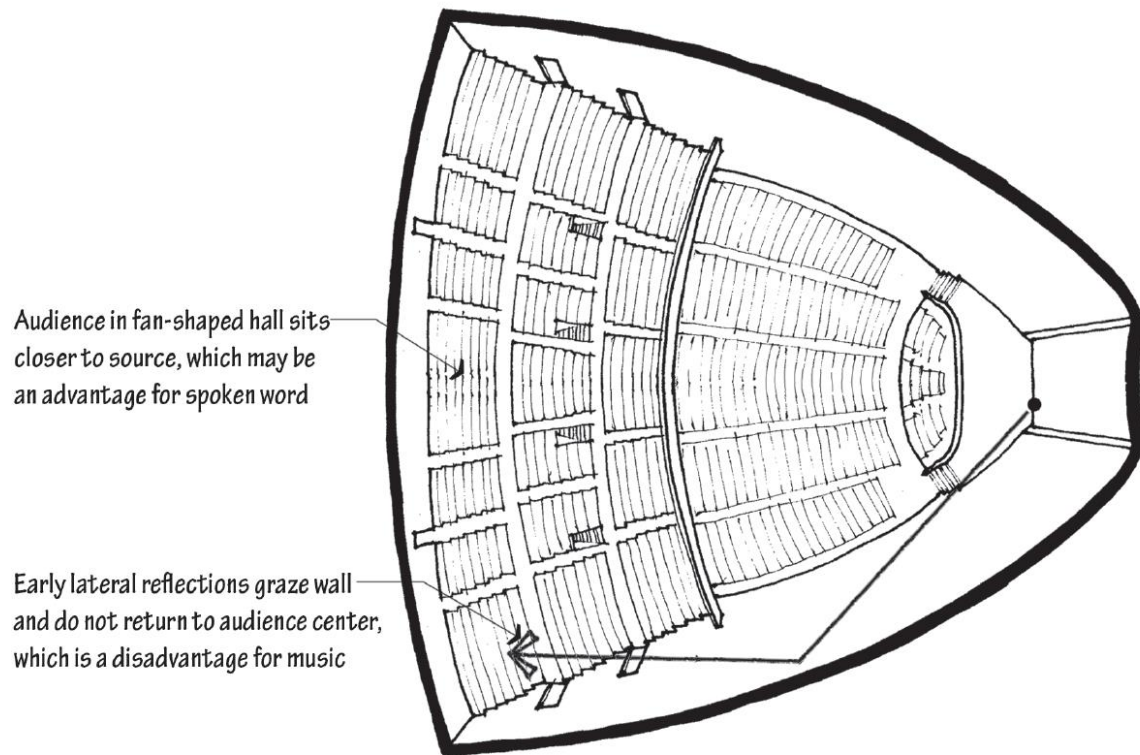
RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Sala koncertowa typu „pudełko do butów”

Early lateral reflections
arrive at audience



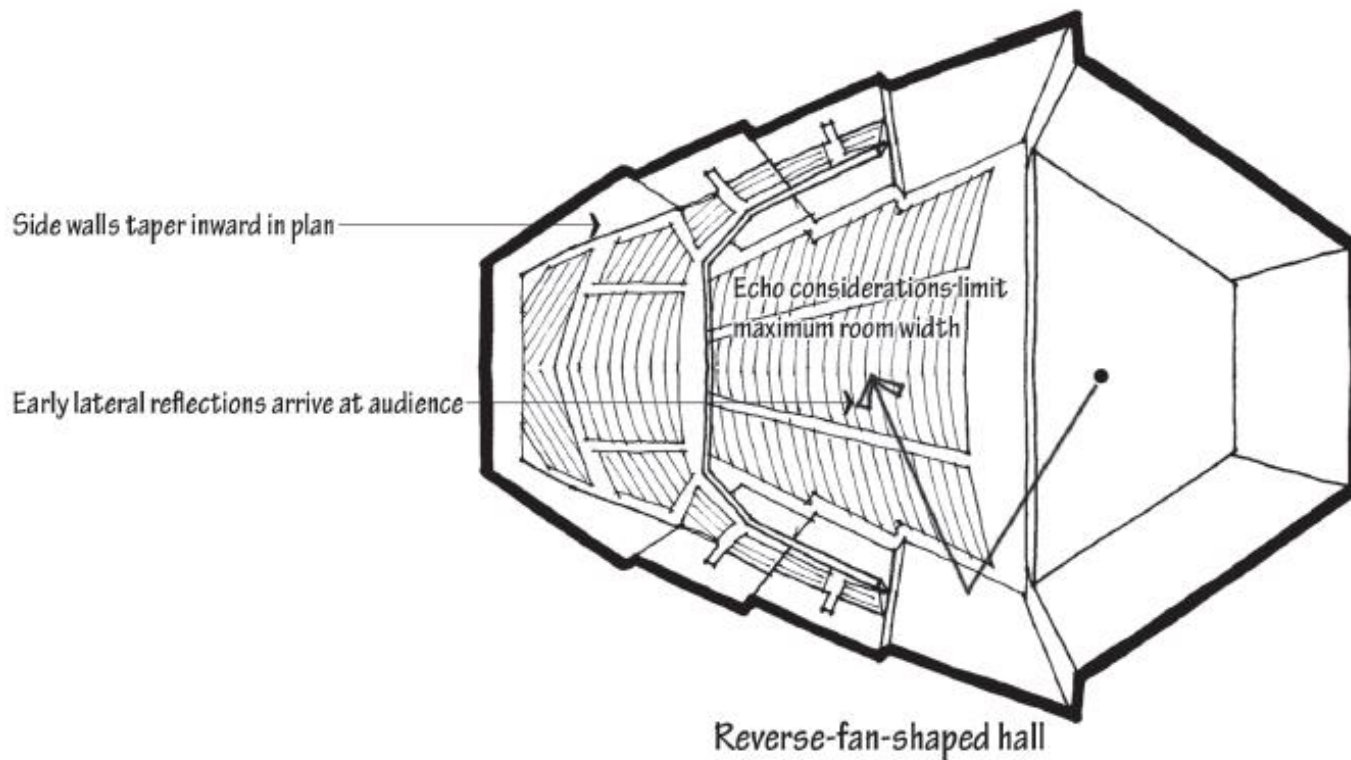
Shoebbox hall



Fan-shaped hall



Sala koncertowa typu odwrócony wachlarz



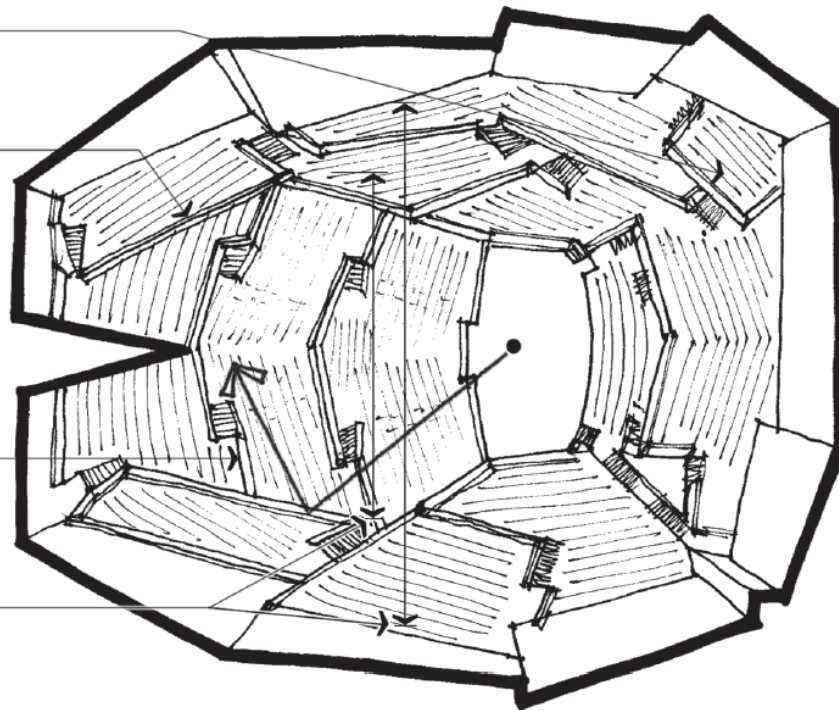


Surround audience is brought closer to the musicians by virtue of geometry

Though terrace faces provide for some lateral reflections, BQI for terraced surround halls are typically lower than for shoebox halls

Terrace faces separate audience sections and provide early lateral reflections

Careful placement of (absorptive) audience and (reflective) terrace faces limits the "acoustic" width of the room



Terraced surround hall



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Studio nagraniowe



źródło: Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). *Acoustics of small rooms*. CRC Press.



GDANSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Sala prób



źródło: Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). *Acoustics of small rooms*. CRC Press.



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

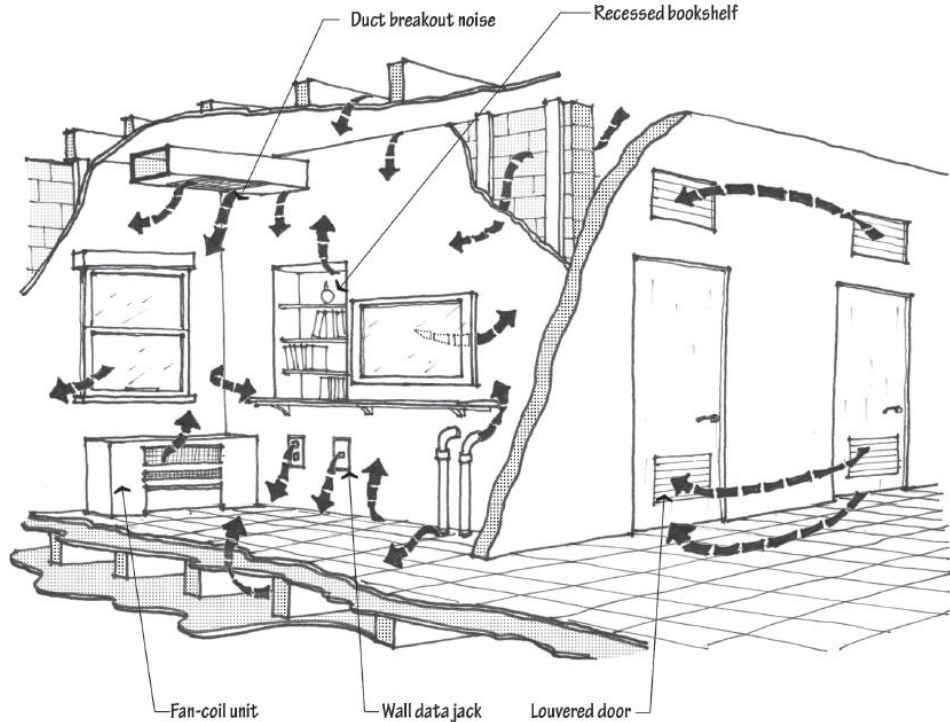


RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Sala do nauki gry na fortepianie



źródło: Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). *Acoustics of small rooms*. CRC Press.



Kształtowanie atmosfery akustycznej czasami ma na celu redukcję pogłosu i echa w przestrzeniach narażonych na powstawanie hałasu.

Jest to szczególnie ważne w przestrzeniach takich jak hale fabryczne, czy przestrzenie typu call center lub biura typu open space.

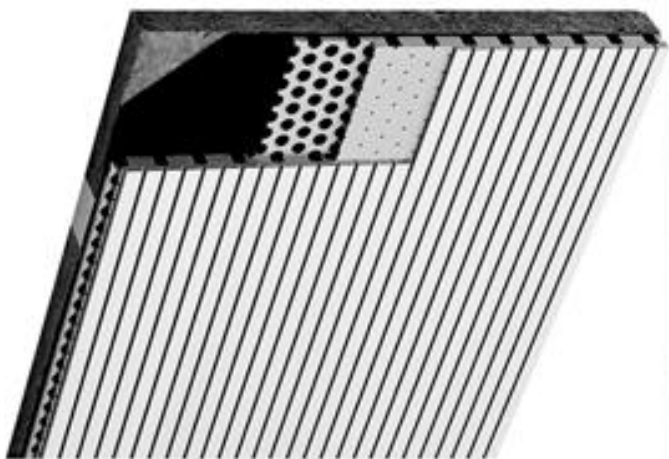


GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

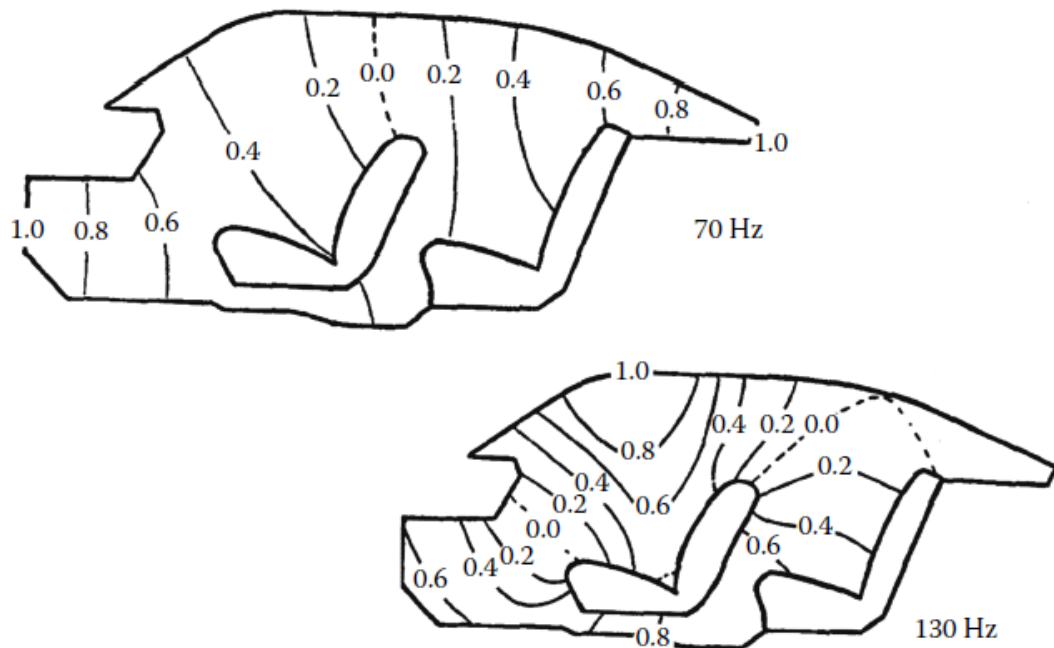


RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE

Pomieszczenia użytkowe

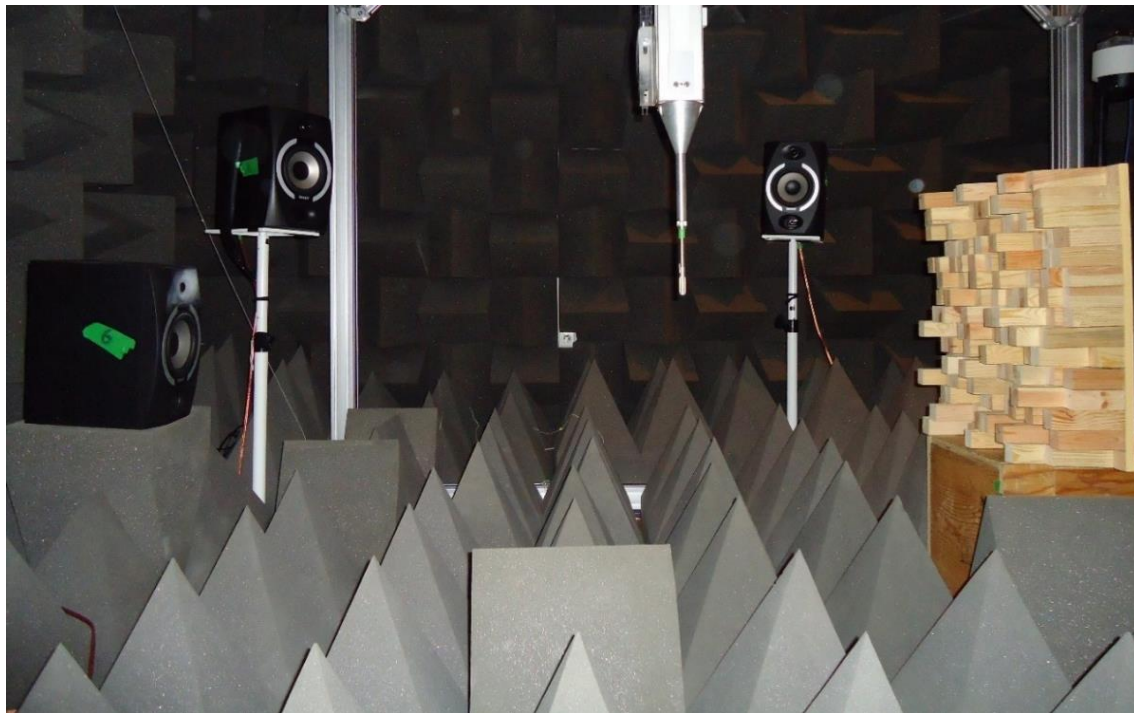


źródło: Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.



Innym przykładem przestrzeni, która może wymagać specjalnego traktowania jeśli chodzi o atmosferę akustyczną są wnętrza pojazdów.

Tutaj także wynika to z konieczności redukcji hałasu i podwyższenia komfortu użytkownika pojazdu.



Specyficznym typem przestrzeni są pomieszczenia przeznaczone do pomiarów akustycznych. Jest to jedno z nielicznych miejsc w których zależy nam na całkowitym wyeliminowaniu pogłosu.

źródło: Kurowski, A. (2021). Designing acoustic scattering elements using machine learning methods, PhD Thesis, Gdańsk University of Technology.



Projektowanie pomieszczeń o zadanej atmosferze akustycznej jest zadaniem trudnym. Z tego względu często wykorzystuje się w tym celu specjalne **symulatory**, które pozwalają przewidzieć własności akustyczne pomieszczenia zanim zostanie ono zbudowane lub zaadaptowane akustycznie.

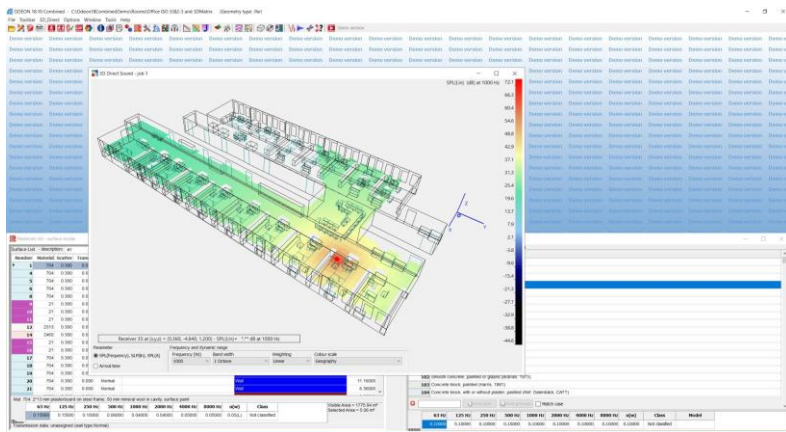
Istnieją dwie główne rodziny metod symulacji:

- **metody geometryczne** do których zalicza się metody źródeł pozornych, czy śledzenia promieni (raytracingu),
- **metody falowe** które bazują na bezpośrednim rozwiązywaniu **akustycznego równania falowego** metodą elementów skończonych, elementów brzegowych lub np. metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu.

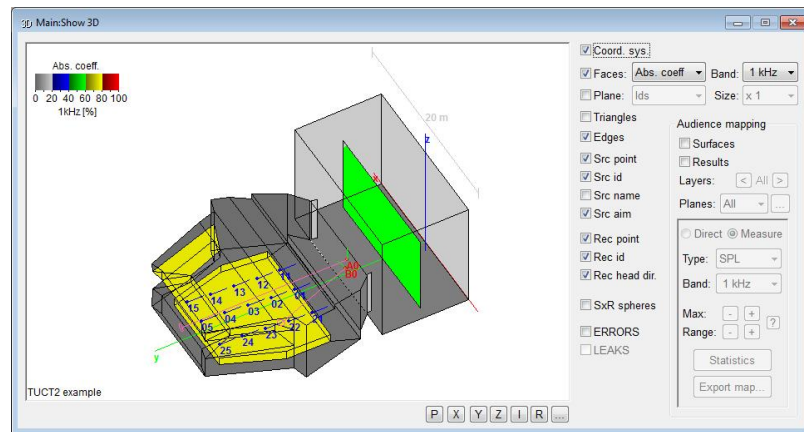


Pakiety oprogramowania do symulacji akustyki pomieszczeń

Większość popularnych metod symulacji jest już zaimplementowana w specjalnych pakietach oprogramowania. Do popularnych z nich należą:



ODEON
(url: <https://odeon.dk/>)



CATT Acoustic
(url: <https://www.catt.se/>)



- Charaktery atmosfery akustycznej pomieszczenia jest wynikiem wielu czynników wynikających z geometrii oraz materiałów z których dane pomieszczenie jest zbudowane.
- Atmosfera akustyczna możliwa jest do scharakteryzowania za pomocą odpowiedzi impulsowej pomieszczenia na bazie której możliwe jest policzenie szczegółowych parametrów pomieszczenia takich jak np. czas pogłosu.
- Możemy chcieć zmodyfikować atmosferę akustyczną w różny sposób w zależności od tego, do czego przeznaczone jest dane pomieszczenie. Możemy chcieć zwiększyć zrozumiałość mowy, lub np. zmniejszyć poziom hałasu w pomieszczeniu.



1. Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. CRC press.
2. Cox, T. & D'Antonio, P. (2005). Thirty years since "Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences": Where are we now?. Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acustics.
3. Gervais, R. (2006). Home Recording Studio: Build it Like the Pros. Thomson Course Technology.
4. Howard, D., & Angus, J. (2013). Acoustics and psychoacoustics. Routledge.
5. Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). Acoustics of small rooms. CRC Press.



6. Kurowski, A. (2021). Designing acoustic scattering elements using machine learning methods, PhD Thesis, Gdańsk University of Technology.
7. Pulkki, V., & Karjalainen, M. (2015). Communication acoustics: an introduction to speech, audio and psychoacoustics. John Wiley & Sons.
8. Rossing, T. (Ed.). (2007). Springer handbook of acoustics. Springer Science & Business Media.
9. Ermann, M. (2015). Architectural acoustics illustrated. John Wiley & Sons.

