



Architecture
and town planning
Quarterly

Kwartalnik architektury
i urbanistyki



Architecture
and town planning
Quarterly
Kwartalnik architektury
i urbanistyki

2/2025
t. LXX
ISSN 1738-8444
ISSN e012-9846



Jan Słyk, Jakub Hlebowicz, *Projekt sali koncertowej w adaptowanym elewatorze płockim. Optymalizacja cyfrowa jako autorska metoda poszukiwania formy wnętrza*, „Kwartalnik Architektury i Urbanistyki”, t. LXX, 2025, z. 2, s. 4–19

Jan Słyk, Jakub Hlebowicz, *Designing a Concert Hall in a Repurposed Grain Elevator in Płock: A Digital Optimization Approach to Interior Form-Finding*, "Architecture and Town Planning Quarterly", vol. LXX, 2025, no. 2, pp. 4–32 [English version pp. 20–32]

DOI: 10.17388/WUT.2025.0051.ARCH

Artykuł dostępny na licencji Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0

This article is available under a Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 license

Projekt sali koncertowej w adaptowanym elewatorze płockim. Optymalizacja cyfrowa jako autorska metoda poszukiwania formy wnętrza

Jan Słyk, prof. dr hab. inż. arch.

Wydział Architektury
Politechnika Warszawska

Jakub Hlebowicz, mgr inż. arch.

Szkoła Doktorska
Politechniki Warszawskiej

Jan Słyk, Prof. Arch.

Faculty of Architecture
Warsaw University of Technology

Jakub Hlebowicz, MSc Arch.

Doctoral School of the
Warsaw University of Technology

Streszczenie

Badanie przedstawione w artykule przeprowadzono w celu weryfikacji skuteczności indywidualnie opracowanej metody optymalizacji akustycznej. Wykorzystano dokumentację i pomiary własne istniejącego obiektu poprzemysłowego – elewatora zbożowego w Płocku. Do zaprojektowania wpisanej w jego strukturę sali koncertowej wykorzystano metodę iteracyjnych poszukiwań formy geometrycznej wnętrza. Kryteriami oceny jakości generowanych rozwiązań były uzyskiwane parametry akustyczne (pogłos, czas wstępnego opóźnienia, równomierne pokrycie widowni dźwiękiem odbitym, iloraz kubatury i liczby miejsc na widowni). Rezultatem optymalizacji były warianty ukształtowania wnętrza sali. Poddano je ocenie zestawiając z referencyjnymi realizacjami architektonicznymi. Wyniki badania pozwoliły autorom potwierdzić skuteczność metody (wyniki optymalizacyjne były w wielu punktach zgodne z referencyjnymi salami). Dały również obraz istniejących ograniczeń, będąc przesłanką dla kolejnych udoskonaleń metody. Autorzy zamierzają wykorzystać wyniki w dalszych pracach nad parametryzacją modeli architektonicznych oraz nad wykorzystaniem silników generatywnych w optymalizacji. W dalszej perspektywie, po udoskonaleniu, istnieje szansa wykorzystywania metody w realnych działaniach twórczych.

Słowa kluczowe

optymalizacja akustyczna | modelowanie
parametryczne | procesy generatywne | projektowanie
sal koncertowych | akustyka architektoniczna |
warianty przestrzenne

1. Wprowadzenie

Projektowanie wnętrz o kontrolowanej akustyce w praktyce architektonicznej związane jest z realizacją sal koncertowych, audytoryjnych, kameralnych, teatralnych, wielofunkcyjnych czy kinowych. Znajdują się one często w obiektach o złożonej formie i funkcji, użytkowanych przez dużą liczbę osób. Kwestie estetyki, ekonomiki oraz specyficznych wymogów nowych typów wykonań i inscenizacji, szczególnie w przypadku adaptacji istniejących budynków, dodatkowo zwiększają komplikację zadania

projektowego. Spełnienie wszystkich wymagań oznacza często wypracowanie ostatecznego rozwiązania w procesie kompromisów, optymalizacji i analizy wariantów.

Istniejące opisy metodyki projektowania wnętrz o kontrolowanej akustyce poruszają przede wszystkim problem uwzględnianych parametrów propagacji dźwięku i narzędzi wspomagających proces projektowy. Opierają się one na analizach porównawczych (do zrealizowanych obiektów referencyjnych) oraz modelach symulacyjnych (w wersji fizycznej i cyfrowej). Modele cyfrowe wraz z rozwojem technologii CAD stały się przystępnym, szybkim i relatywnie tanim środkiem symulacji warunków akustycznych. Dostępne oprogramowanie¹ posiada moduły umożliwiające badanie izolacyjności akustycznej oraz kontroli parametrów akustycznych we wnętrzach. Metodyka pracy w środowisku tych narzędzi ma charakter liniowy: po wprowadzeniu trójwymiarowego modelu geometrycznego dokonywana jest analiza akustyczna wraz z wyliczeniem niezbędnych wskaźników. Prowadzi to do powstania odrębnej ścieżki branżowej z własnym modelem, który wymaga koordynacji i uaktualniania. W praktyce projektowania architektonicznego rozwój koncepcji na równoległych modelach dyscyplinarnych zwiększa ryzyko kolizji, a wymiana danych między modelami wydłuża proces projektowy i ogranicza możliwość dynamicznej zmiany projektowanej przestrzeni. Brakuje narzędzi oferujących funkcje symulacyjne wprost, w modelu bazowym, oraz takich, które generując warianty pokrewne wyjściowemu modelowi pozwalają doskonalić rozwiązanie.

W artykule opisano eksperymentalne badanie przeprowadzone przez autorów w trakcie projektowania sali koncertowej. Wyróżnia się ono geometryczną parametryzacją modelu cyfrowego oraz pracą na rodzinach wariantów przestrzennych, prowadzącą do optymalizacji parametrów akustycznych. Weryfikacja modelu została przeprowadzona dzięki wyodrębnieniu modułów korespondujących z parametrami akustycznymi. Walidacja polegała na porównaniu uzyskiwanych wyników do wartości zmierzonych w zrealizowanych wnętrzach o zweryfikowanej akustyce referencyjnej oraz na wskazaniu zależności ukształtowania geometrycznego i wartości uzyskiwanych parametrów akustycznych. Sposoby i zakres aplikacji metodyki przedstawione zostały na przykładzie projektu adaptacji wnętrza elewatora zbożowego w Płocku na salę koncertową.

2. Tło badań

Eksperyment oparto na założeniu, że główną przesłanką osiągnięcia doskonałości akustycznej jest geometryczna forma sali koncertowej. Inne czynniki kształtowania klimatu akustycznego (np. materiały wykończeniowe) celowo odsunięto na dalszy plan, planując ich badanie w kolejnej fazie studium. Metodą eksperymentu jest testowanie wielu algorytmicznie generowanych układów geometrycznych, których ocenę oparto na wynikach symulacji akustycznej.

¹ Przykłady istniejącego oprogramowania: *ODEON Room Acoustic Software*, <https://odeon.dk/> (dostęp 19.06.2025); *EASE 5 Third Edition | Ahnert Feistel Media Group*, <https://shorturl.at/yyWXA> (dostęp 19.06.2025); *CATT-Acoustic / The FIRReverb Suite / ReflPhinder / GratisVolver Pro*, <https://www.catt.se> (dostęp 19.06.2025).

2.1. Projektowanie oparte na parametrach użytkowych (Performance-Based Design)

Przedstawione badanie korzysta z metod skupionych na ocenie parametrów wydajności użytkowej obiektu, w tym przypadku parametrów jakości akustycznej, mierzących komfort słuchaczy i wykonawców w sali filharmonicznej.

Projektowanie oparte na parametrach użytkowych (ang. Performance-Based Design, PBD) to podejście, w którym kluczowym czynnikiem kształtującym proces projektowy jest wydajność budynku². Jego cel to zapewnienie długoterminowej efektywności użytkowej projektowanych obiektów³. Metoda polega na zastąpieniu działań normatywnych wymaganiami funkcjonalnymi, dopuszczającymi alternatywne rozwiązania⁴. Początki idei PBD można odnaleźć już w I wieku p.n.e. u Witruwiusza, który wskazywał użyteczność jako fundamentalną cechę dobrej architektury⁵. Współczesne podejście do PBD formalizuje te założenia, przekształcając je w potrzeby użytkownika oraz wymagania funkcjonalne. Proces zakłada identyfikację potrzeb, a następnie przypisanie im konkretnych wymogów funkcjonalnych – zarówno dla budynku jako całości, jak i jego poszczególnych części. Choć zasady stojące za tą metodą są znane od wieków, ich systematyczna implementacja możliwa stała się dopiero dzięki rozwojowi technologii cyfrowych⁶.

Zastosowanie PBD oznacza przesunięcie akcentu z projektowania w duchu „tworzenia formy” na projektowanie w duchu „odnajdywania formy”⁷. Zalety projektowania opartego na parametrach użytkowych to m.in. lepsza kontrola nad wydajnością budynku już na etapie koncepcji, wyższa jakość rozwiązań, bardziej efektywny proces projektowy⁸, integracja wiedzy specjalistycznej architektów i inżynierów⁹. Projektowanie oparte na parametrach użytkowych znajduje coraz szersze zastosowanie m.in. w projektach energooszczędnych oraz przestrzeniach o kontrolowanej akustyce, potwierdzając swój potencjał w doskonaleniu zarówno procesu projektowego, jak i jakości realizacji¹⁰.

2.2. Techniki generatywne CAD

Do efektywnego badania parametrów na podstawie PBD niezbędne są prototypy rozwiązań. Zamiast prototypów 1:1 w badaniu zastosowano rodziny automatycznie generowanych modeli cyfrowych, służących jako środowisko symulacyjne.

² R. Oxman, *Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues*, „International Journal of Architectural Computing”, 2008, t. 6, z. 1, s. 2–4.

³ R. Becker, *Fundamentals of Performance-Based Building Design*, „Building Simulation”, 2008, t. 1, z. 4, s. 1.

⁴ N. Jung et al., *Extending Capabilities BIM to Support Performance Based Design*, „Journal of Information Technology in Construction”, 2018, t. 23, z. 2, s. 17; Norma ISO 6707–1:2020, Buildings and civil engineering works – Vocabulary Part 1: General terms.

⁵ V. Pollio, *The Ten Books on Architecture: De Architectura*, tłum. na jęz. angielski M. Morgan, Scotts Valley 2018; R. Becker, op. cit., s. 2.

⁶ R. Becker, op. cit., s. 15; E. Badino et al., *Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice*, „Acoustics”, 2020, t. 2, z. 2, s. 247.

⁷ R. Oxman, *Performance-Based Design...*, op. cit., s. 3.

⁸ E. Badino et al., op. cit., s. 247.

⁹ I.G. Dino, *Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture*, „METU Journal of the Faculty of Architecture”, 2012, t. 29, z. 1, s. 213.

¹⁰ E. Badino et al., op. cit., s. 246.

Techniki generatywne w środowisku CAD do projektowania architektury spopularyzowane zostały w ostatnich dwóch dekadach¹¹. Stanowią część oferty popularnych platform projektowania CAD jak Autodesk¹². Forma subskrypcji pakietu oprogramowania sprawia, że generatywne narzędzia jak Autodesk Forma¹³, Autodesk Revit Generative Design¹⁴, Dynamo for Revit¹⁵ są dostępne dla większości pracowni architektonicznych. Oprogramowanie to umożliwia wykorzystanie procesów projektowanych i modyfikowanych przez projektanta, w środowisku modelu parametrycznego¹⁶. Celem jest zwiększenie analizowanej przestrzeni rozwiązań i automatyzacja procesów projektowych, co przekłada się na efektywność analizy wariantów, optymalizację, redukcję kosztów i precyzję¹⁷.

Oprócz komercyjnych rozwiązań przeznaczonych do ogólnych zastosowań istnieją opracowania bliższe tematyce niniejszej pracy. Vishal Singh i Ning Gu zaproponowali uniwersalny system projektowania generatywnego¹⁸. Przytoczyli opisane wcześniej w literaturze procesy: automatów komórkowych¹⁹, gramatyki kształtów²⁰, system Lindenmayera²¹, inteligencji rozproszonej²² i algorytmów genetycznych²³.

Przedstawiona metoda czerpie z logiki systemów inteligencji rozproszonej (struktura modelu) oraz algorytmów genetycznych (optymalizacja i generowanie wariantów). Przestrzenna forma rozwiązań, dążąca do spełniania założeń efektywności wspomaga kreatywny proces projektowy dzięki emergencji opisanej przez

¹¹ S. Krish, *A Practical Generative Design Method*, „Computer-Aided Design”, 2011, t. 43, z. 1, s. 88.

¹² Autodesk, <https://www.autodesk.com/pl> (dostęp: 20.06.2025).

¹³ Autodesk Forma, <https://www.autodesk.com/pl/products/forma/overview> (dostęp: 20.06.2025).

¹⁴ *Generative design for architecture, engineering & construction* | Autodesk, <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction> (dostęp: 20.06.2025).

¹⁵ *Dynamo BIM Software*, <https://dynamobim.org/> (dostęp: 20.06.2025).

¹⁶ S. Krish, op. cit., s. 90.

¹⁷ V. Singh, N. Gu, *Towards an Integrated Generative Design Framework*, „Design Studies”, 2012, t. 33, z. 2, s. 185.

¹⁸ Ibidem.

¹⁹ J. von Neumann, *The General and Logical Theory of Automata*, w: *Systems research for behavioral science*, (b.m.) 2017, s. 97–107; S. Wolfram, M. Gad-el-Hak, *A New Kind of Science*, „Applied Mechanics Reviews”, 2003, t. 56, z. 2, s. B18–B19.

²⁰ G. Stiny, W.J. Mitchell, *The Grammar of Paradise: On the Generation of Mughul Gardens*, „Environment and Planning B: Planning and Design”, 1980, t. 7, z. 2, s. 209–226; G. Stiny, *Introduction to shape and shape grammars*, „Environment and Planning B: Planning and Design”, 1980, t. 7, nr 3.

²¹ A. Lindenmayer, G. Rozenberg, *Developmental Systems and Languages*, „Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Theory of computing – STOC ’72”, Denver, Colorado, United States, 1972, s. 214–221; A. Lindenmayer, *Mathematical Models for Cellular Interactions in Development I. Filaments with One-Sided Inputs*, „Journal of Theoretical Biology”, 1968, t. 18, z. 3, s. 280–299.

²² J. Kennedy, *Swarm intelligence*, w: *Handbook of nature-inspired and innovative computing: integrating classical models with emerging technologies*, Sydney 2006, s. 187–219.

²³ M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge MA-London 1998; *Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers*, red. L. Chambers, Boca Raton 2019; J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, Cambridge MA 1992.

Rivkę Oxman²⁴. Podobny kierunek działania zaproponowali Shuai Lu et al.²⁵ opisując cyfrowy proces kształtowania modeli symulacyjnych sal koncertowych oraz Shinichi Sato et al.²⁶, przedstawiając metodę generowania wariantów uproszczonego wnętrza sali koncertowej.

2.3. Optymalizacja akustyczna sal koncertowych

Rozważania na temat optymalizacji akustycznej można podzielić na trzy nurty: projektowanie przez naśladowanie obiektów referencyjnych, symulacje z wykorzystaniem modeli fizycznych oraz symulacje z wykorzystaniem modeli cyfrowych.

Świadomie kreowane podobieństwo przestrzeni dedykowanych muzyce zauważyli Leo Beranek²⁷, Michael Barron²⁸, Marshall Long²⁹. Istniejące wnętrza o zadowalających parametrach akustycznych stanowiły wzór dla nowych realizacji. Dokładne odwzorowanie geometrii, kubatury, sposobu użytkowania, materiałów i faktur powierzchni zwiększało szansę sukcesu.

Niezależnie od przyjętej geometrii, warunki akustyczne symulowane są z użyciem modeli fizycznych, których skuteczność podkreślają Beranek³⁰, Barron³¹ i Raf Orlowski³².

Teoretyczne podstawy obliczeń matematycznych i metod symulacji warunków akustycznych zostały opisane przed powszechnym wykorzystaniem komputerów do projektowania. Wallace Clement Sabine w 1895 r. udowodnił zależność charakterystyki akustycznej pomieszczenia od kubatury i wykończenia, umożliwiając aplikację nowych metod projektowych³³. Nowe rozwiązania nie musiały powielać sprawdzonych rozwiązań przestrzennych, lecz spełniać określone zależności opisane przy pomocy funkcji matematycznych. Techniki CAD znacząco wspomogły ten proces.

Istnieje oprogramowanie do symulowania warunków akustycznych. Odeon³⁴, CATT-Acoustic³⁵, Pachyderm Acoustics³⁶ należą do najpopularniejszych.

²⁴ R. Oxman, *The Thinking Eye: Visual Re-Cognition in Design Emergence*, „Design Studies”, 2002, t. 23, z. 2, s. 135–164; eadem, *Performance-Based Design...*, op. cit., s. 10.

²⁵ S. Lu et al., *Improving Auditorium Designs with Rapid Feedback by Integrating Parametric Models and Acoustic Simulation*, „Building Simulation”, 2016, t. 9, z. 3, s. 235–250.

²⁶ S. Sato et al., *Applying Genetic Algorithms to the Optimum Design of a Concert Hall*, „Journal of Sound and Vibration”, 2002, t. 258, z. 3, s. 517–526.

²⁷ L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004, s. 545.

²⁸ M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, New York 2009, s. 451.

²⁹ M. Long, *Architectural Acoustics*, Burlington, San Diego, London 2005, s. 781.

³⁰ L. Beranek, op. cit., s. 548–549.

³¹ M. Long, op. cit., s. 781–786.

³² R. Orlowski, *The historical use of models in the acoustic design of buildings*, w: *Physical Models Their Historical and Current Use in Civil and Building Engineering Design*, Berlin 2020, s. 762–792.

³³ L. Beranek, op. cit., s. 492.

³⁴ ODEON Room Acoustics Software..., op. cit.

³⁵ CATT-Acoustic / The FIRverb Suite / ReflPhinder / GratisVolver Pro..., op. cit.

³⁶ Pachyderm Acoustic Simulation, <https://www.orase.org/pachyderm> (dostęp: 20.06.2025).

Analiza akustyczna w wymienionych programach wykorzystuje metody ray-tracingu³⁷, image source³⁸ i procesy hybrydowe. Różnice oprogramowania dotyczą interfejsu, licencjonowania i symulowanych parametrów. Pachyderm Acoustics stanowi rozszerzenie środowiska do programowania Grasshopper³⁹, co pozwala na integrację analizy akustycznej w proces algorytmiczny, będący podstawą opisanej metodyki. Przykładem działań łączących proceduralne przekształcenia przestrzeni i analizę akustyczną jest praca S. Sato⁴⁰ z zespołem z uniwersytetu w Kobe, dotycząca optymalizacji kształtu wnętrza sali koncertowej algorytmem genetycznym⁴¹.

3. Optymalizacja sali koncertowej dla rewitalizowanego obiektu elewatora w Płocku

Architektonicznym tłem badania przedstawionego w artykule jest projekt adaptacji, który został przedstawiony jako praca magisterska⁴² na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej. Na podstawie tego projektu autorzy rozwinęli studium metodyczne dotyczące metod projektowania sal o kontrolowanej akustyce, które jest obecnie kontynuowane i poszerzane. Środowiskiem działań projektowych jest cyfrowy model wnętrza sali koncertowej.

3.1 Projekt adaptacji elewatora zbożowego w Płocku

Budynek elewatora został wybrany do projektu adaptacji ze względu na lokalizację odpowiednią dla nowej funkcji kultury, niezbędną minimalną kubaturę jednoprzestrzennego wnętrza oraz możliwość rozbudowy o niezbędny program funkcjonalny. Obiekt znajduje się przy dawnym porcie rzeczny lewobrzeżnej dzielnicy Płocka – Radziwia. Teren już przed I wojną światową przeznaczony był pod wzniesienie budynku łączącego funkcję młyńska i magazynu zboża. Dostarczane Wisłą towary miały być przetwarzane lub składowane w wysokim budynku opisanym w projekcie architektonicznym z 1913 roku. Możliwość zrealizowania projektu nadeszła dopiero w roku 1953⁴³. Minione lata wojny, jak i dostępne w latach 50. fundusze Zakładów Zbożowo-Młynarskich w Płocku, sprzyjały inwestycji. Posadowiony na ruszcie palowym budynek ma żelbetową konstrukcję słupową podtrzymującą stropy oparte belkach i ramach. Elewacje wykonano z czerwonej cegły ceramicznej⁴⁴.

³⁷ M. Long, op. cit., s. 787–795; A. Krokstad et al., *Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique*, „Journal of Sound and Vibration”, 1968, t. 8, z. 1, s. 118–125.

³⁸ J.B. Allen, D.A. Berkley, *Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics*, „The Journal of the Acoustical Society of America”, 1979, t. 65, z. 4, s. 943–950.

³⁹ *Grasshopper*, <https://www.grasshopper3d.com/> (dostęp: 20.06.2025).

⁴⁰ S. Sato et al., op. cit., s. 517–526.

⁴¹ M. Mitchell, op. cit.

⁴² J. Hlebowicz, *Zastosowanie algorytmów genetycznych przy projektowaniu sal koncertowych w istniejących kubaturach. Adaptacja Elewatora Zbożowego w Płocku na salę koncertową*, praca magisterska wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. arch. Jana Słyka na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej (WAPW), Warszawa 2024, mps w zbiorach biblioteki WAPW.

⁴³ M. Orłowska, *Rekordowe 13 pięter... Tajemnice najwyższego budynku i najstarszej windy*, „Gazeta Wyborcza – Tygodnik Płock”, 04.02.2016.

⁴⁴ W. Serafimowicz, *Z dziejów budownictwa w Płocku: inwestorzy, projektanci, wykonawcy*, Płock 2008, s. 101.

Powierzchnia zabudowy obiektu wynosi 1480 m². Wysokość mierzona w kalenicy to 50 m. Trzynaście kondygnacji o wysokości 4 metry brutto zajmują głównie pomieszczenia młyna i techniczne. Sala magazynowa to wysoka przestrzeń bez oświetlenia dziennego. Zajmuje kondygnacje od drugiej do dziesiątej w północno-zachodniej części bryły. Budynek dostępny jest od strony ulicy Portowej. Przyziemie zdominowane jest przez dodatkowe zabudowania gospodarcze i zadaszenia.

Projekt wymagał określenia głównych stref funkcjonalnych budynku – widza oraz artysty. Wynikająca ze strefowania lokalizacja sceny, wejścia do sali oraz krzywizna widowni stanowiły niezmiennie dane wejściowe do budowy modelu wnętrza sali. Ze względu na konieczność izolacji akustycznej dostępna maksymalna kubatura wnętrza została pomniejszona o wymiary niezbędne do zrealizowania technologii „box in the box”⁴⁵. Oznacza to odseparowanie zewnętrznej przegrody wnętrza od przegrody wewnętrznej w taki sposób, aby nie następowało przenoszenie dźwięku oraz wibracji między nimi. Zapewnienie funkcjonalnej relacji wnętrza sali z pozostałymi częściami budynku nastąpiło niezależnie od części badawczej pracy.

3.2. Kształtowanie wnętrza sali koncertowej z użyciem narzędzi optymalizacji akustycznej

Zgodnie z teorią PBD za wiodącą potrzebę przyjęto doskonałość akustyczną, a kształt geometrii wnętrza uznano za podstawowy czynnik na nią wpływający. Z parametrów akustycznych wskazanych przez Leo Beranka⁴⁶ badanie uwzględnia cztery. Wybrano parametry dotyczące zjawisk, których symulacja przebiegać może na cyfrowym modelu architektonicznym i które opisują ogólny charakter akustyczny wnętrza.

Czas pogłosu (RT)

Czas pogłosu / rewerberacji jest to czas, w którym dźwięk zanika w sali po ustaniu źródła. Preferowany czas pogłosu różni się w zależności od rodzaju wykonywanej muzyki, będąc krótszym w operach (około 1,2 sekundy) i dłuższym w salach koncertowych dla muzyki symfonicznej (idealnie 1,8 do 2,1 sekundy).

Czas początkowego opóźnienia (ITDG)

Czas pomiędzy dotarciem do słuchacza dźwięku bezpośredniego a pierwszym odbiciem. Krótszy czas ITDG (preferowane 20 ms w najlepszych obiektach) przyczynia się do poczucia bliskości z wykonawcą. Sale bardzo szerokie lub z wysokimi stropami mogą charakteryzować się długim ITDG.

Równomierne pokrycie podłogi widowni dźwiękiem odbitym

Odnosi się to do tego, jak równomiernie wczesne odbicia dźwięku docierają do wszystkich miejsc na widowni. Dobre pokrycie i odpowiednia liczba równomiernie rozmieszczonych odbić wczesnych (w ciągu pierwszych 80 ms) jest kluczowa dla dobrej „tekstury” dźwięku i wrażenia przestrzenności. Kształt elementów

⁴⁵ G.P. Wilson, *Structure Borne Noise and Vibration Control in Performing Arts Facilities*, „International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE”, 2012, s. 5–6; S. Jouan, A. Randrianoelina, *LG Arts Centre, Seoul, South Korea Conception of a Performing Art Centre in South Korea and Cultural Differences*, „Proceedings of the Institute of Acoustics”, 2018, s. 579.

⁴⁶ L. Beranek, op. cit., s. 20–35.

architektonicznych, takich jak ściany boczne, strop i fronty balkonów, ma zasadnicze znaczenie dla kierowania tych odbić, a powierzchnie rozpraszające pomagają w równomiernym rozproszeniu dźwięku.

Kubatura wnętrza na osobę (V/n)

Parametr określa stosunek kubatury sali do liczby osób na widowni. Zliczone zostają metry sześciennie wydzielone przegrodami izolującymi akustycznie.

3.3. Parametry optymalizacji algorytmem genetycznym

W badaniu zastosowano proces optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, zgodny z dominującym schematem⁴⁷, dlatego w niniejszym artykule przedstawiono jedynie główne założenia procesu generatywnego. Integracja z parametrycznym modelem pozwoliła na generowanie wariantów przestrzennych i symulację parametrów akustycznych. Rolą algorytmu genetycznego był zautomatyzowany przegląd i ocena rozwiązań (unikatowych układów segmentów wykończenia wnętrza sali) mieszczących się w przestrzeni rozwiązań generowanej przez parametryczny model. Dobór najlepszych rozwiązań następował w generacjach, ocenianych wartością funkcji fitness⁴⁸. Rozwiązania o najmniejszej wartości funkcji fitness w procesach reprodukcji i mutacji tworzyły następne generacje rozwiązań o podobnych cechach. Istotą procesu była stopniowa poprawa parametrów akustycznych wnętrza przez wybór cech rozwiązań przestrzennych, które osiągały dobre wyniki w procesie symulacji. Optymalizację przeprowadzono przy parametrach: prawdopodobieństwo reprodukcji 0,5, prawdopodobieństwo mutacji $1/(30)^{49}$, współczynnik reprodukcji 20, współczynnik mutacji 20. Analizowano 50 generacji po 200 wariantów, dalsza optymalizacja nie przynosiła znaczących korzyści poprawy parametrów akustycznych.

3.4. Warianty rozwiązań architektonicznych

Geometrycznym wynikiem optymalizacji były segmenty ustroju akustycznego wnętrza. Warianty różniły się wyrazem architektury wnętrza i zachowywały zbliżone parametry akustyczne ze względu na wysoką rozdzielczość modelu – niewielkie odległości między segmentami (parametr zmienny w modelu). Przy zachowaniu tych samych parametrów akustycznych materiałów wykończeniowych, detale architektoniczne dostosowano do potrzeb projektanta. Ostateczna geometria została wykreślona algorytmicznie. Wybrane zostały dwie kategorie przekształceń, dające zróżnicowane efekty wizualne. Teselacja, podział na drobniejsze elementy, skutkował dużą ilością kontrastowych detali podziałów i łączeń. Interpolacja punktów kreśliła krzywizny o ciągłym charakterze (il. 1).

⁴⁷ S. Sato et al., op. cit., s. 517–526.

⁴⁸ M. Mitchell, op. cit., s. 9.

⁴⁹ $1/n$, gdzie n to liczba parametrów zmiennych w modelu według zaleceń: K. Deb et al., *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*, „Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. 6th International Conference, Paris, France, September 18-20 2000 Proceedings”, red. M. Schoenauer et al., Berlin, Heidelberg 2000, s. 849–858.



1.

1. Wizualizacje wariantów przestrzennych wnętrza sali koncertowej, generowane w procesie optymalizacji. Opracowanie autorów, 2024

1. Visualizations of spatial variants of the concert hall interior, generated during the optimization process. Authors' study, 2024

3.5. Wykorzystane oprogramowanie

Wybrano oprogramowanie dostępne i łatwe w edycji algorytmicznego procesu. Forma geometryczna modelu powstała w Rhinoceros⁷⁵⁰, popularnym w branży AEC, z integracją Grasshoppera (graficzny edytor kodu). Oprogramowanie oprócz szerokiego pakietu algorytmicznych funkcji umożliwia wykorzystanie własnych modułów oprogramowania w języku Python lub C#, które wykorzystano do budowy parametrycznego modelu wnętrza. Do przeszukania spektrum rozwiązań użyto modułu WallaceiX⁵¹, oferującego interfejs do optymalizacji algorytmem genetycznym i wizualizacji wyników. Zoptymalizowana forma geometryczna może być eksportowana do powszechnych formatów, z metadanymi (rodzaj materiału, współczynniki pochłaniania, itp.).

4. Wyniki

Oceniono zdolność modelu do generowania wnętrza sali koncertowej, uznając za pozytywny wynik podobieństwo do zrealizowanych, cenionych wnętrz do wykonanych muzycznych pod kątem osiąganych parametrów akustycznych i geometrii wnętrza. Badania ilościowe polegały na porównaniu symulowanych wartości parametrów akustycznych ze zmierzonymi w istniejących salach. Badania jakościowe oparto na porównaniu zauważonych trendów rozwiązań do istniejących wnętrz (przekroje, materiały). Eksperymenty przeprowadzono opierając się na projekcie adaptacji elewatora zbożowego w Płocku, z tymi samymi parametrami geometrii początkowej, opisując dwie próby (Eksperyment I i II).

4.1. Wyniki badań ilościowych

Generowane warianty oceniono w zakresie (RT), uśrednionego (ITDG), (V/n) oraz równomiernego rozłożenia pierwszych odbić na podłodze widowni. Walidacja modelu odbyła się poprzez porównanie do istniejących wnętrz (referencje

⁵⁰ Rhinoceros 3D, <https://www.rhino3d.com/en/emea/> (dostęp: 20.06.2025).

⁵¹ Evolutionary Engine for Grasshopper3D, <https://www.wallacei.com> (dostęp: 20.06.2025).

Leo Beranka z ponad stu obiektów, Tabele 1, 2, 3)⁵². Symulowano również parametry wnętrza bez interwencji architektonicznej. Przyjęto wartości parametrów pochłaniania i rozpraszania akustycznego materiałów według przykładowych rozwiązań⁵³.

Wartości parametrów akustycznych zmierzonych w salach koncertowych o wysokiej ocenie słuchaczy		
RT	ITDG	V/n
1,8–2 sekundy	≤ 25 ms	8–10 m ³

Tabela 1. Wartości referencyjne parametrów akustycznych. Źródło danych: L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004

Stan przed adaptacją wnętrza – hala magazynowa elewatora zbożowego w Płocku						
Kubatura	Kubatura / osobę widowni (700)	Materiał wykończeniowy wnętrza	Wymiary (szerokość × długość × wysokość)	Symulowane RT	Symulowane średnie ITDG	Symulowane rozłożenie pierwszych odbić na podłodze widowni
16 359 m ³	23,37 m ³	Żelbet	19 × 41 × 21 m	4,01 s	100,7 ms	

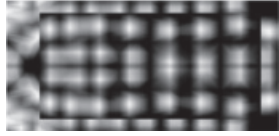
Tabela 2. Symulowane parametry akustyczne wnętrza elewatora przed adaptacją. Opracowanie autorów

Współczynniki pochłaniania (absorption coefficients)							
	(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Ściany boczne i sufit							
Sklejka drewniana 9 mm na drewnie litym 5 cm (zróżnicowana geometria dyfuzora)							
Żelbet nieszlifowany							
Podłoga widowni							
Parkiet dębowy klejony do żelbetu							
Widownia z obecną publicznością							

Tabela 3. Przyjęte wartości parametrów pochłaniania i rozpraszania akustycznego materiałów wykończeniowych. Źródło danych: L.L. Beranek, T. Hidaka, *Sound Absorption in Concert Halls by Seats, Occupied and Unoccupied, and by the Hall's Interior Surfaces*, „The Journal of the Acoustical Society of America”, 1998, t. 104, z. 6, s. 3176

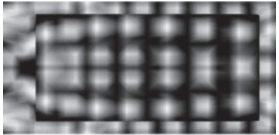
⁵² L. Beranek, op. cit.

⁵³ L.L. Beranek, T. Hidaka, *Sound Absorption in Concert Halls by Seats, Occupied and Unoccupied, and by the Hall's Interior Surfaces*, „The Journal of the Acoustical Society of America”, 1998, t. 104, z. 6, s. 3176.

Eksperyment I						
Kubatura	Kubatura / osobę widowni (700)	Materiał wykończeniowy wnętrza	Wymiary max. (szerokość × długość × wysokość)	Symulowane RT	Symulowane średnie ITDG	Symulowane rozłożenie pierwszych odbić na podłodze widowni
6 200 m ³	8,85 m ³	Sklejka drewniana 9 mm na drewnie litym 5 cm	18,3 × 34 × 12,2 m	1,8 s	19 ms	
-62%	-62%	nd.	nd.	-55%	-81%	nd.

Δ

Tabela 4. Symulowane parametry akustyczne wnętrza po adaptacji – eksperyment I. Opracowanie autorów

Eksperyment II						
Kubatura	Kubatura / osobę widowni (700)	Materiał wykończeniowy wnętrza	Wymiary max. (szerokość × długość × wysokość)	Symulowane RT	Symulowane średnie ITDG	Symulowane rozłożenie pierwszych odbić na podłodze widowni
7 574 m ³	10,82 m ³	Sklejka drewniana 9 mm na drewnie litym 5 cm	18,3 × 34 × 19,2 m	2,02 s	27 ms	
-54%	-54%	nd.	nd.	-50%	-73%	nd.

Δ

Tabela 5. Symulowane parametry akustyczne wnętrza po adaptacji – eksperyment II. Opracowanie autorów

Porównanie wartości parametrów osiągniętych i referencyjnych			
–	Zakres referencyjny	Eksperyment I	Eksperyment II
RT	1,8 – 2 s	1,8 s	2,02 s
Średnie ITDG	≤ 25 ms	19 ms	27 ms
V/n	8 – 10 m ³	8,85 m ³	10,82 m ³

Tabela 6. Porównanie symulowanych wartości parametrów akustycznych z wartościami referencyjnymi. Opracowanie autorów

Eksperyment I zakładał nieograniczoną możliwość przemieszczeń segmentów sufitu względem istniejącego stropu budynku. Tabela 4 przedstawia symulowane wartości parametrów wnętrza oraz procentową zmianę względem sytuacji bez interwencji architektonicznej.

Eksperyment II wykluczał możliwość przemieszczeń segmentów sufitu względem istniejącego stropu budynku. Tabela 5 przedstawia symulowane wartości parametrów wnętrza oraz procentową zmianę względem sytuacji bez interwencji architektonicznej.

Symulowane na modelu wartości parametrów akustycznych porównano z przyjętymi zakresami referencyjnymi (Tabela 6).

Model skutecznie generował wnętrza, których symulowane parametry mieściły się w zakresach referencyjnych. Eksperyment I (większa swoboda kształtowania) osiągnął lepszy wynik średniego ITDG. Eksperyment II (ograniczenia sufitu) charakteryzował się większą kubaturą, dłuższym ITDG i RT, choć nadal mieścił się w zakresach referencyjnych (nieznaczne przekroczenia). Obie próby wykazały zdolność modelu do równomiernego rozkładu pierwszych odbić.

4.2. Wyniki badań jakościowych

Wygenerowany układ geometryczny wnętrza porównano do istniejących sal koncertowych, szukając podobieństw w przekrojach i materiałach wykończenia (Tabele 7 i 8).

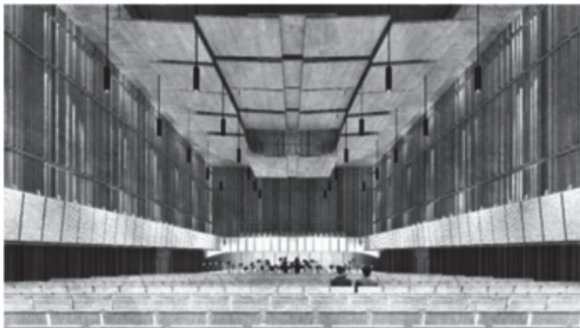
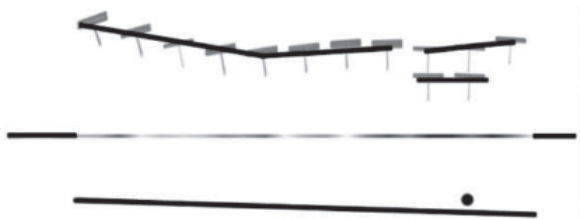
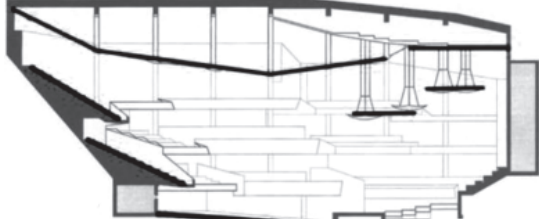
Eksperyment I – porównanie z istniejącą salą koncertową	
Wygenerowana geometria	Zrealizowany budynek referencyjny
Wynik optymalizacji	Bridgewater Hall – Manchester
Wizualizacja wnętrza	Fotografia wnętrza
	
Przekrój podłużny	Przekrój podłużny
	
Materiały wykończeniowe	Materiały wykończeniowe
Sklejka drewniana 9 mm na drewnie litym 5 cm, dębowa posadzka	Panele akustyczne szklane, prefabrykowane betonowe panele akustyczne, tynk, dębowa posadzka

Tabela 7. Porównanie jakościowe wnętrz sali projektowanej i zrealizowanej – eksperyment I. Opracowanie autorów. Źródło materiałów dot. sali zrealizowanej: L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004

Eksperyment II – porównanie z istniejącą salą koncertową

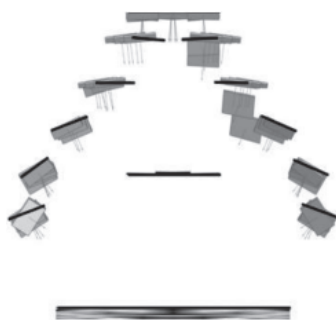
Wygenerowana geometria

Wynik optymalizacji

Wizualizacja wnętrza



Przekrój poprzeczny



Materiały wykończeniowe

Sklejka drewniana 9 mm na drewnie litym 5 cm, dębowa posadzka

Zrealizowany budynek referencyjny

Tokyo Opera City – Tokyo

Fotografia wnętrza



Przekrój poprzeczny



Materiały wykończeniowe

Płyty gipsowe wzmocnione włóknem szklanym, sklejka drewniana 9 mm na drewnie litym 2 cm, tynk na płytach gipsowych, drewniana posadzka

Tabela 8. Porównanie jakościowe wnętrz sali projektowanej i zrealizowanej – eksperyment II. Opracowanie autorów. Źródło materiałów dot. sali zrealizowanej: L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004

Generowany przez model układ geometryczny wnętrza przyjmował przekroje podobne do opisanych zrealizowanych przestrzeni. Powtarzające się układy ścian i sufitów wynikały z podobnych strategii zapewnienia dogodnej akustyki wnętrza. Wyniki badań ilościowych i jakościowych wykazały poprawną budowę modelu. Symulowane wartości parametrów akustycznych mieściły się w zakresach referencyjnych. Kreślona przestrzenna geometria powielała zrealizowane układy, które wyznaczono innymi metodami projektowymi, a poprawność tworzonych warunków akustycznych potwierdzono pomiarami.

4.3. Ograniczenia metody

Model modyfikuje układ geometryczny, generuje warianty, symuluje warunki akustyczne i optymalizuje. Ograniczenia występują w każdej z tych kategorii. Model symulował cztery kluczowe parametry, podczas gdy Leo Beranek wskazał 21 dodatkowych⁵⁴. Dalszy rozwój modelu powinien uwzględniać dokładniejszą analizę, zachowując responsywność umożliwiającą interakcję w czasie rzeczywistym. Modułowość modelu i sposób wprowadzania parametrów wejściowych pozwala na eksperymentalne integracje innych sposobów optymalizacji. Badanie wydaje się szczególnie ciekawe w przypadku porównania osiągniętych wyników z użyciem różnorodnych sposobów optymalizacji.

4.4. Zastosowania metody w działaniach twórczych

Model zbudowano z myślą o wykorzystaniu w projektowaniu architektonicznym. Jego atuty to modułowość, wykorzystanie dostępnych narzędzi, responsywność symulacji oraz wbudowane narzędzia wizualizacji parametrów akustycznych, co ułatwia zastosowanie metody na każdym etapie projektu. Sposób wprowadzania geometrii i generowania rozwiązań na podstawie parametrów akustycznych umożliwia wykorzystanie modelu w projektowaniu różnorodnych przestrzeni (teatralnych, koncertowych, wielofunkcyjnych, foyer). Generowana geometria (płaszczyzny z wektorem normalnym i materiałem) pozwala na interpretację architektoniczną. Model generuje warianty o podobnych, optymalnych parametrach akustycznych, a wybór końcowy może zależeć od ekonomiki lub estetyki, bez wpływu na jakość dźwięku. Możliwa jest analiza części istniejącego pomieszczenia w celu identyfikacji problemów z dźwiękiem odbitym i jego rozkładem. Metodykę można stosować do niewielkich korekt akustycznych wewnątrz. Wysoka responsywność i wizualizacja parametrów akustycznych w czasie rzeczywistym wspierają rozwój koncepcji, umożliwiając podejmowanie decyzji na podstawie danych.

5. Podsumowanie

Przedstawione badania wskazują na możliwość zastosowania autorskiej metody jako narzędzia projektowego w generowaniu geometrycznej formy wnętrza sal koncertowych o pożądanych właściwościach akustycznych. Wyniki eksperymentów potwierdziły możliwość osiągnięcia referencyjnych wartości parametrów akustycznych (czas pogłosu, ITDG, V/n, równomierne rozłożenie odbić), nawet przy adaptacji istniejącego obiektu. Porównania wygenerowanych rozwiązań do uznanych wnętrza koncertowych wykazały formalne analogie w zakresie układów przestrzennych oraz strategii kształtowania odbić dźwięku. Zidentyfikowano ograniczenia metody (np. zawężony zakres analizowanych wskaźników) wskazując kierunki rozwoju. Metoda ma potencjał zastosowania w rzeczywistych procesach twórczych, wspierając świadome kształtowanie wnętrza z zadanymi kryteriami jakości akustycznej.

⁵⁴ L. Beranek, op. cit., s. 20–35.

Bibliografia

- Allen J.B., Berkley D.A., *Image method for efficiently simulating small-room acoustics*, „The Journal of the Acoustical Society of America”, 1979, t. 65, z. 4, DOI: 10.1121/1.382599
- Badino E., Shtrepi L., Astolfi A., *Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice*, „Acoustics”, 2020, t. 2, z. 2, DOI: 10.3390/acoustics2020016
- Barron M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, New York 2009, DOI: 10.4324/9780203874226
- Becker R., *Fundamentals of performance-based building design*, „Building Simulation”, 2008, t. 1, z. 4, DOI: 10.1007/s12273-008-8527-8
- Beranek L., *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004
- Beranek L.L., Hidaka T., *Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces*, „The Journal of the Acoustical Society of America”, 1998, t. 104, z. 6, DOI: 10.1121/1.423957
- Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T., *A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II*, „Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. 6th International Conference, Paris, France, September 18-20 2000 Proceedings”, red. M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J.J. Merelo, H.P. Schwefel, Berlin, Heidelberg, 2000 DOI: 10.1007/3-540-45356-3_83
- Dino I.G., *Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture*, „METU Journal of the Faculty of Architecture”, 2012, t. 29, z. 1, DOI: 10.4305/METU.JFA.2012.1.12
- Hlebowicz J., *Zastosowanie algorytmów genetycznych przy projektowaniu sal koncertowych w istniejących kubaturach. Adaptacja Elewatora Zbożowego w Płocku na salę koncertową*, praca magisterska wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. arch. Jana Słyka na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej (WAPW), Warszawa 2024, mps w zbiorach biblioteki WAPW
- Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, Cambridge MA 1992
- Jouan S., Randrianoelina A., *LG Arts Centre, Seoul, South Korea Conception of a Performing Art Centre in South Korea and Cultural Differences*, „Proceedings of the Institute of Acoustics”, 2018
- Jung N., Hakkinen T., Rekola M., *Extending Capabilities Bim to Support Performance Based Design*, „Journal of Information Technology in Construction”, 2018, t. 23, z. 2
- Kennedy J., *Swarm intelligence*, w: *Handbook of nature-inspired and innovative computing: integrating classical models with emerging technologies*, Sydney 2006
- Krish S., *A practical generative design method*, „Computer-Aided Design”, 2011, t. 43, z. 1, DOI: 10.1016/j.cad.2010.09.009
- Krokstad A., Strom S., Sørsdal S., *Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique*, „Journal of Sound and Vibration”, 1968, t. 8, z. 1, DOI: 10.1016/0022-460X(68)90198-3
- Lindenmayer A., *Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs*, „Journal of Theoretical Biology”, 1968, t. 18, z. 3, DOI: 10.1016/0022-5193(68)90079-9
- Lindenmayer A., Rozenberg G., *Developmental systems and languages*, „Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Theory of computing - STOC '72”, Denver, Colorado, United States, 1972, DOI: 10.1145/800152.804917.
- Long M., *Architectural Acoustics*, Burlington, San Diego, London 2005
- Lu S., Yan X., Xu W., Chen Y., Liu J., *Improving auditorium designs with rapid feedback by integrating parametric models and acoustic simulation*, „Building Simulation”, 2016, t. 9, z. 3, DOI: 10.1007/s12273-015-0268-x
- Mitchell M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge MA-London 1998, DOI: 10.7551/MITPRESS/3927.001.0001
- Neumann von J., *The general and logical theory of automata*, w: *Systems research for behavioral science*, (b.m.) 2017

Orlowski R., *The historical use of models in the acoustic design of buildings*, w: *Physical Models Their Historical and Current Use in Civil and Building Engineering Design*, Berlin 2020, DOI: 10.1002/9783433609613.ch26

Orłowska M., *Rekordowe 13 pięter... Tajemnice najwyższego budynku i najstarszej windy*, „Gazeta Wyborcza - Tygodnik Płock”, 04.02.2016

Oxman R., *Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues*, „International Journal of Architectural Computing”, 2008, t. 6, z. 1, DOI: 10.1260/147807708784640090

Oxman R., *The thinking eye: visual re-cognition in design emergence*, „Design Studies”, 2002, t. 23, z. 2, DOI: 10.1016/S0142-694X(01)00026-6

Pollio V., *The Ten Books on Architecture: De Architectura*, tłum. na jęz. angielski M. Morgan, Scotts Valley 2018

Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, red. Chambers L., Boca Raton 2019, DOI: 10.1201/9780429128332

Sato S., Otori K., Takizawa A., Sakai H., Ando Y., Kawamura H., *Applying Genetic Algorithms to the Optimum Design of a Concert Hall*, „Journal of Sound and Vibration”, 2002, t. 258, z. 3, DOI: 10.1006/jsvi.2002.5273

Serafimowicz W., *Z dziejów budownictwa w Płocku: inwestorzy, projektanci, wykonawcy*, Płock 2008

Singh V., Gu N., *Towards an integrated generative design framework*, „Design Studies”, 2012, t. 33, z. 2, DOI: 10.1016/j.destud.2011.06.001

Stiny G., Mitchell W.J., *The grammar of paradise: on the generation of Mughul gardens*, „Environment and Planning B: Planning and Design”, 1980, t. 7, z. 2, DOI: 10.1068/b070209

Wilson G.P., *Structure Borne Noise and Vibration Control in Performing Arts Facilities*, „International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE”, 2012

Wolfram S., Gad-el-Hak M., *A New Kind of Science*, „Applied Mechanics Reviews”, 2003, t. 56, z. 2, DOI: 10.1115/1.1553433

Źródła internetowe

Autodesk, <https://www.autodesk.com/pl>

Autodesk Forma, <https://www.autodesk.com/pl/products/forma/overview>

Norma ISO 6707–1:2020, *Buildings and civil engineering works — Vocabulary Part 1: General terms*

CATT-Acoustic / The FIRverb Suite / ReFlPhinder / GratisVolver Pro, <https://www.catt.se/>

Dynamo BIM Software, <https://dynamobim.org/>

EASE 5 Third Edition | Ahnert Feistel Media Group, <https://shorturl.at/yyWXA>

Evolutionary Engine for Grasshopper3D, <https://www.wallacei.com>

Generative design for architecture, engineering & construction | Autodesk, <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction>

Grasshopper, <https://www.grasshopper3d.com/>

ODEON Room Acoustics Software, <https://odeon.dk/>

Pachyderm Acoustic Simulation, <https://www.orase.org/pachyderm>

Rhinoceros 3D, <https://www.rhino3d.com/en/emea/>

Designing a Concert Hall in a Repurposed Grain Elevator in Płock. A Digital Optimization Approach to Interior Form-Finding

Abstract

The study presented in this paper was carried out to verify the effectiveness of the individually developed acoustic optimisation method. Documentation and own measurements of an existing post-industrial building – a grain elevator in Płock – were used. The method of iterative search for the geometric form of the interior was used to design a concert hall inscribed in its structure. The criteria for assessing the quality of the generated solutions were the acoustic parameters obtained (reverberation, initial time delay gap, uniform coverage of the auditorium with reflected sound, and the quotient of the hall volume and the number of seats in the auditorium). As a result of the optimisation, variants of the auditorium's interior design were created. These were evaluated against reference architectural realisations. The results of the study allowed the authors to confirm the effectiveness of the method (the optimisation results were in line with the reference halls in many points). They also provided a picture of the existing limitations, being a premise for further improvements to the method. The authors intend to use the results in further work on parameterisation of architectural models and on the use of generative engines in optimisation. In the longer term, after refinement, there is a chance to use the method in real creative activities.

Keywords acoustic optimisation | parametric modelling | generative processes | concert hall design | architectural acoustics | spatial variants iterations

1. Introduction

The design of interiors with controlled acoustics in architectural practice is associated with the realisation of facilities for concert halls, auditoriums, chamber halls, theatres, multifunctional halls or cinemas. They are often located in buildings with a complex form and function, used by a large number of people. The issues of aesthetics, economics and the specific requirements of new types of performance and staging, especially in the case of adaptations to existing buildings, further add to the complexity of the design task. Meeting all requirements often means arriving at a final solution through a process of trade-offs, optimisation and analysis of options.

Existing descriptions of methodologies for the design of acoustically controlled interiors mainly address the problem of considered sound propagation parameters and tools to support the design process. They are generally based on comparative analyses (to realised reference objects) and simulation models (physical and digital versions). Digital models, with the development of CAD methodologies, have become an affordable, fast and relatively cheap means of simulating acoustic conditions. The available software,¹ has modules for testing sound insulation as well as controlling acoustic performance in interiors. The working methodology within these tools is linear: once the three-dimensional

¹ Examples of existing software: *ODEON Room Acoustics Software*, <https://odeon.dk/> (accessed: 19.06.2025); *EASE 5 Third Edition* | Ahnert Feistel Media Group, <https://shorturl.at/yyWXA> (accessed: 19.06.2025); *CATT-Acoustic / The FIREverb Suite / ReflPhinder / GratisVolver Pro*, <https://www.catt.se/> (accessed: 19.06.2025).

geometrical model is entered, an acoustic analysis is carried out along with the calculation of the necessary indices. This leads to a separate industry path with its own model that needs to be coordinated and updated. In architectural design practice, the development of concepts on parallel disciplinary models increases the risk of collisions and the exchange of data between models prolongs the design process and limits the possibility to dynamically change the designed space. There is a lack of tools that offer simulation functions directly, in the base model and those that, by generating solution variants related to the initial model, allow the solution to be refined.

This paper describes an experimental study carried out by the authors during the design of a concert hall. It is distinguished by geometrically parameterising the digital model and working on families of spatial variants leading to the optimisation of acoustic parameters. Validation of the model was carried out by extracting modules that correspond to the acoustic parameters. The validation consisted in comparing the results obtained to the values measured in realised interiors with verified reference acoustics and indicating the relation between the geometrical shape and the values of obtained acoustic parameters. The methods and scope of application of the methodology were presented based on the example of a project to adapt the interior of a granary in Płock to a concert hall.

2. Research background

The experiment assumed that the geometric form of the concert hall is the main factor in achieving acoustic perfection. Other acoustic climate shaping factors (e.g. finishing materials) were deliberately relegated to the background, planning to investigate them in a later phase of the study. The experimental method is to test a number of algorithmically generated geometric layouts, the evaluation of which is based on the results of the acoustic simulation.

2.1. Performance-Based Design

The study presented here uses methods focused on assessing the performance parameters of a venue, in this case acoustic quality parameters measuring the comfort of listeners and performers in a philharmonic hall.

Performance-Based Design (PBD) is an approach in which the performance of the building becomes a key factor shaping the design process.² It aims to ensure the long-term performance of designed facilities.³ The method involves replacing prescriptive measures with functional requirements that allow for alternative solutions.⁴ The origins of the idea of PBD can be traced as far back as the 1st century BC with Vitruvius, who identified utility as a fundamental characteristic of good architecture.⁵ The modern approach to PBD formalises these assumptions by transforming them into user needs and functional requirements. The PBD process involves identifying needs and then assigning specific functional requirements to them – both for the building as a whole and its individual parts. Although the principles behind this method have been known for centuries, their systematic implementation has only become possible with the development of digital technologies.⁶

The use of PBD means a shift in emphasis from designing in the spirit of ‘creating form’ to designing in the spirit of ‘finding form’.⁷

² R. Oxman, *Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues*, “International Journal of Architectural Computing”, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 2–4.

³ R. Becker, *Fundamentals of Performance-Based Building Design*, “Building Simulation”, 2008, vol. 1, no. 4, p. 1.

⁴ N. Jung et al., *Extending Capabilities Bim to Support Performance Based Design*, “Journal of Information Technology in Construction”, 2018, vol. 23, no. 2, p. 17; Norm ISO 6707–1:2020, *Buildings and civil engineering works - Vocabulary Part 1: General terms*.

⁵ V. Pollio, *The Ten Books on Architecture: De Architectura*, translation into English M. Morgan, Scotts Valley 2018; R. Becker, op. cit., p. 2.

⁶ R. Becker, op. cit., p. 15; E. Badino et al., *Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice*, „Acoustics”, 2020, vol. 2, no. 2, p. 247.

⁷ R. Oxman, *Performance-Based Design...*, op. cit., p. 3.

Advantages of performance-based design include better control over building performance at the concept stage, higher quality solutions and a more efficient design process,⁸ integration of architects' and engineers' expertise.⁹ Performance-based design is finding increasing application in energy-efficient designs and acoustically controlled spaces, among others, confirming its potential to improve both the design process and the quality of implementation.¹⁰

2.2. CAD generative techniques

For an effective PBD-based parameter study, prototypes of solutions are required. Instead of 1:1 prototype, the study used families of automatically generated digital models to serve as the simulation environment.

Generative techniques in CAD environments for architectural design have been popularised in the last two decades.¹¹ They are part of the offerings of popular CAD design platforms like Autodesk.¹² The subscription form of the software package makes generative tools like Autodesk Forma,¹³ Autodesk Revit Generative Design,¹⁴ Dynamo for Revit¹⁵ available to most architectural studios. This software enables the use of processes designed and modified by the designer, in a parametric model environment.¹⁶ The aim is to increase the analysed solution space and automate

design processes, resulting in efficiency of options analysis, optimisation, cost reduction and precision.¹⁷

In addition to commercial solutions dedicated to general applications, there are studies closer to the subject of this thesis. Singh and Gu proposed a universal generative design system.¹⁸ They cited processes previously described in the literature: cellular automata,¹⁹ shape grammars,²⁰ Lindenmayer system,²¹ swarm intelligence²² and genetic algorithms.²³

The method presented draws on the logic of distributed intelligence systems (model structure) and genetic algorithms (optimisation and variant generation). The spatial form of solutions striving to meet efficiency assumptions supports the creative design process through emergence as described by Oxman.²⁴ A similar direction was

⁸ E. Badino et al., op. cit., p. 247.

⁹ I.G. Dino, *Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture*, „METU Journal of the Faculty of Architecture”, 2012, vol. 29, no. 1, p. 213.

¹⁰ E. Badino et al., op. cit., p. 246.

¹¹ S. Krish, *A Practical Generative Design Method*, „Computer-Aided Design”, 2011, vol. 43, no. 1, p. 88.

¹² Autodesk, <https://www.autodesk.com/pl> (accessed: 20.06.2025).

¹³ Autodesk Forma, <https://www.autodesk.com/pl/products/forma/overview> (accessed: 20.06.2025).

¹⁴ *Generative design for architecture, engineering & construction* | Autodesk, <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction> (accessed: 20.06.2025).

¹⁵ *Dynamo BIM Software*, <https://dynamobim.org/> (accessed: 20.06.2025).

¹⁶ S. Krish, op. cit., p. 90.

¹⁷ V. Singh, N. Gu, *Towards an Integrated Generative Design Framework*, „Design Studies”, 2012, vol. 33, no. 2, p. 185.

¹⁸ Ibidem.

¹⁹ J. von Neumann, *The General and Logical Theory of Automata*, in: *Systems research for behavioral science*, (n/a) 2017, pp. 97–107; S. Wolfram, M. Gad-el-Hak, *A New Kind of Science*, „Applied Mechanics Reviews”, 2003, vol. 56, no. 2, p. B18–B19.

²⁰ G. Stiny, W.J. Mitchell, *The Grammar of Paradise: On the Generation of Mughul Gardens*, „Environment and Planning B: Planning and Design”, 1980, vol. 7, no. 2, pp. 209–226; G. Stiny, *Introduction to shape and shape grammars*, „Environment and Planning B: Planning and Design”, 1980, vol. 7, no. 3.

²¹ A. Lindenmayer, G. Rozenberg, *Developmental Systems and Languages*, „Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Theory of computing - STOC '72”, Denver, Colorado, United States, 1972, pp. 214–221; A. Lindenmayer, *Mathematical Models for Cellular Interactions in Development I. Filaments with One-Sided Inputs*, „Journal of Theoretical Biology”, 1968, vol. 18, no. 3, pp. 280–299.

²² J. Kennedy, *Swarm intelligence*, in: *Handbook of nature-inspired and innovative computing: integrating classical models with emerging technologies*, Sydney 2006, pp. 187–219.

²³ M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge MA-London 1998; *Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers*, ed. L. Chambers, Boca Raton 2019; J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, Cambridge MA 1992.

²⁴ R. Oxman, *The Thinking Eye: Visual Re-Cognition in Design Emergence*, „Design Studies”, 2002, vol. 23, no. 2, pp. 135–164; eadem, *Performance-Based Design...*, op. cit., p. 10.

proposed by Lu et al.²⁵ describing a digital process for shaping simulation models of concert halls, and Sato et al.,²⁶ presenting a method for generating variants of a simplified concert hall interior.

2.3. Acoustic optimisation of concert halls

Acoustic optimisation considerations can be divided into three strands: design by mimicking reference objects, simulations using physical models and simulations using digital models.

The consciously created similarity of spaces dedicated to music was noted by Beranek,²⁷ Barron,²⁸ Long.²⁹ Existing interiors with satisfactory acoustic parameters provided a model for new developments. Accurate reproduction of geometry, volume, use, materials and surface textures increased the chances of success.

Regardless of the geometry adopted, acoustic conditions are simulated using physical models, the effectiveness of which is highlighted by Beranek,³⁰ Barron,³¹ and Orlowski.³²

The theoretical foundations of mathematical calculations and methods for simulating acoustic conditions were described before the widespread use of computers for design. Wallace Clement Sabine (1895) proved the dependence of a room's acoustic characteristics on volume and finish, enabling the application of new

design methods.³³ The new solutions did not have to replicate proven spatial solutions, but to satisfy specific relationships described by mathematical functions. CAD techniques significantly aided this process.

There is software available that can simulate acoustic conditions. Odeon,³⁴ CATT-Acoustic,³⁵ Pachyderm Acoustics³⁶ are among the most popular. The acoustic analysis in the aforementioned software uses the ray-tracing method,³⁷ image-source method³⁸ and hybrid models. The differences in the software relate to the interface, licensing and simulated parameters. Pachyderm Acoustics is an extension of the Grasshopper programming environment,³⁹ which has allowed acoustic analysis to be integrated into the algorithmic process underlying the methodology described. An example of an activity combining procedural space transformations and acoustic analysis is the work of S. Sato⁴⁰ with a team from Kobe University on optimising the shape of the interior of a concert hall with a genetic algorithm.⁴¹

3. Optimisation of the concert hall for the revitalised grain elevator in Płock

The architectural background of the study presented in this paper is the adaptation project

²⁵ S. Lu et al., *Improving Auditorium Designs with Rapid Feedback by Integrating Parametric Models and Acoustic Simulation*, "Building Simulation", 2016, vol. 9, no. 3, pp. 235–250.

²⁶ S. Sato et al., *Applying Genetic Algorithms to the Optimum Design of a Concert Hall*, "Journal of Sound and Vibration", 2002, vol. 258, no. 3, pp. 517–526.

²⁷ L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York, 2004, p. 545.

²⁸ M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, New York 2009, p. 451.

²⁹ M. Long, *Architectural Acoustics*, Burlington, San Diego, London 2005, p. 781.

³⁰ L. Beranek, op. cit., pp. 548–549.

³¹ M. Long, op. cit., pp. 781–786.

³² R. Orlowski, *The historical use of models in the acoustic design of buildings*, in: *Physical Models Their Historical and Current Use in Civil and Building Engineering Design*, Berlin 2020, pp. 762–792.

³³ L. Beranek, op. cit., p. 492.

³⁴ ODEON Room Acoustics Software..., op. cit.

³⁵ CATT-Acoustic / The FIRverb Suite / ReflPhinder / Gratis-Volver Pro..., op. cit.

³⁶ Pachyderm Acoustic Simulation, <https://www.orase.org/pachyderm> (accessed: 20.06.2025).

³⁷ M. Long, op. cit., p. 787–795; A. Krokstad et al., *Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique*, "Journal of Sound and Vibration", 1968, vol. 8, no. 1, pp. 118–125.

³⁸ J.B. Allen, D.A. Berkley, *Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics*, "The Journal of the Acoustical Society of America", 1979, vol. 65, no. 4, pp. 943–950.

³⁹ Grasshopper, <https://www.grasshopper3d.com/> (accessed: 20.06.2025).

⁴⁰ S. Sato et al., op. cit., pp. 517–526.

⁴¹ M. Mitchell, op. cit.

that was presented as a Master's thesis⁴² at the Faculty of Architecture of the Warsaw University of Technology. On the basis of this project, the authors developed a methodological study on methods of designing halls with controlled acoustics, which is currently being continued and expanded. The environment for the design activities is a digital model of the concert hall interior.

3.1. Project for the adaptation of a grain elevator in Płock

The granary building was selected for the adaptation project due to its location suitable for the new cultural function, the necessary minimum volume of the single-space interior and the possibility of expanding with the necessary functional programme. The building is located by the former river port of Płock's left-bank district of Radziwie. Already before World War I, the area was intended for the construction of a building combining the function of a mill and grain warehouse. Goods delivered by the Vistula were to be processed or stored in the tall building described in the architectural design of 1913. The possibility of realising the project did not come until 1953.⁴³ The past years of the war and the funds available in the 1950s for the Zakłady Zbożowo-Młynarskie in Płock were conducive to the investment. Founded on a pile grid, the building has a reinforced concrete column structure supporting column-and-beam floors. The facades are made of red ceramic brick.⁴⁴

The built-up area of the building is 1480 m². The height measured at the ridge is 50m. Thirteen floors with a gross height of 4m are mainly occupied by the mill and technical rooms. The storage room is a high space without daylight. It occupies floors two to ten in the north-western part of the block. The building is accessible from Portowa Street. The ground floor is dominated by additional outbuildings and canopies.

The project required the definition of the main functional zones of the building – the spectator zone and the artist zone. The location of the stage, the entrance to the auditorium and the curvature of the auditorium, resulting from the zoning, provided invariable input data for the construction of a model of the auditorium interior. Due to the need for acoustic insulation, the available maximum volume of the interior was reduced by the dimensions necessary to realise the 'box in the box'⁴⁵ technology. This means separating the external partition of the interior from the internal partition in such a way that there is no sound or vibration transfer between them. Ensuring a functional relationship between the interior of the room and the rest of the building was done separately from the research part of the work.

3.2. Interior design of a concert hall using acoustic optimisation tools

According to PBD theory, acoustic excellence was taken as the leading need, and the shape of the interior geometry was the primary factor influencing it. Of the acoustic parameters identified by Leo Beranek,⁴⁶ the study considers four. Parameters were selected that relate to phenomena that can be simulated on a digital architectural model and describe the general acoustic character of an interior.

⁴² J. Hlebowicz, *Zastosowanie algorytmów genetycznych przy projektowaniu sal koncertowych w istniejących kubaturach. Adaptacja Elewatora Zbożowego w Płocku na salę koncertową* [Application of genetic algorithms in the design of concert halls in existing volumes. Adaptation of the Grain Elevator in Płock to a concert hall], Master's thesis prepared under the supervision of Prof. Jan Słyk at the Faculty of Architecture, Warsaw University of Technology (WAPW), Warszawa 2024, manuscript in the collection of the WAPW library.

⁴³ M. Orłowska, *Rekordowe 13 piętér... Tajemnice najwyższego budynku i najstarszej windy*, „Gazeta Wyborcza – Tygodnik Płock”, 04.02.2016.

⁴⁴ W. Serafimowicz, *Z dziejów budownictwa w Płocku: inwestorzy, projektanci, wykonawcy*, Płock 2008, p. 101.

⁴⁵ G.P. Wilson, *Structure Borne Noise and Vibration Control in Performing Arts Facilities*, “International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE”, 2012, pp. 5–6; S. Jouan, A. Randrianoelina, *LG Arts Centre, Seoul, South Korea Conception of a Performing Art Centre in South Korea and Cultural Differences*, “Proceedings of the Institute of Acoustics”, 2018, p. 579.

⁴⁶ L. Beranek, op. cit., pp. 20–35.

Reverberation time (RT)

The reverberation time is the time it takes for sound to fade into the room after the source has ceased. The preferred reverberation time varies according to the type of music being performed, being shorter in operas (around 1.2 seconds) and longer in concert halls for symphonic music (ideally 1.8 to 2.1 seconds).

Initial time delay gap (ITDG)

The time between the direct sound reaching the listener and the first reflection. A shorter ITDG time (20 ms preferred in the best venues) contributes to a sense of proximity to the performer. Halls that are very wide or with high ceilings may have a long ITDG.

Uniform coverage of the auditorium floor with reflected sound

This refers to how evenly early sound reflections reach all places in the audience. Good coverage and a sufficient number of evenly distributed early reflections (within the first 80 ms) is crucial for good sound 'texture' and spatial impression. The shape of architectural elements such as sidewalls, ceiling and balcony fronts is crucial to directing these reflections, and diffusing surfaces help to disperse sound evenly.

Interior volume per person (V/n)

This parameter determines the ratio of the auditorium volume to the number of people in the auditorium. The cubic metres separated by acoustically insulating partitions are counted.

3.3. Genetic algorithm optimisation parameters

The study used an optimisation process using a genetic algorithm, in line with the dominant scheme,⁴⁷ so only the main assumptions of the generative process are presented in this paper. Integration with the parametric model allowed the generation of spatial variants and the simulation of acoustic parameters. The role of the generative algorithm was to automate the review and evaluation of solutions (unique arrangements of

segments of room interior finishes) falling within the solution space generated by the parametric model. Selection of the best solutions occurred in generations, evaluated by the value of the fitness function.⁴⁸ Solutions with the smallest fitness function value in the processes of reproduction and mutation formed the next generations of solutions with similar characteristics. The essence of the process was to gradually improve the acoustic parameters of the interior by selecting features of spatial solutions that performed well in the simulation process. Optimisation was carried out with the following parameters: reproduction probability 0.5, mutation probability $1/(30)$,⁴⁹ reproduction factor 20, mutation factor 20. Fifty generations of 200 variants were analysed, further optimisation did not bring significant benefits in improving the acoustic parameters.

3.4. Options for architectural solutions

The geometric results of the optimisation were segments of the interior acoustic system. The variants differed in the expression of the interior architecture and maintained similar acoustic parameters due to the high resolution of the model – small distances (variable depending on the user) between segments. While maintaining the same acoustic parameters for the finishing materials, the architectural details were adapted to the designer's needs. The final geometry was plotted algorithmically. Two categories of transformations were chosen, giving varying visual effects. Tessellation, a subdivision into finer elements, resulted in a large number of contrasting details of divisions and joints. Point interpolation drew curves of a continuous nature (Fig. 1).

⁴⁸ M. Mitchell, op. cit., p. 9.

⁴⁹ $1/n$, where n is the number of variable parameters in the model as recommended: K. Deb et al., *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*, "Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. 6th International Conference, Paris, France, September 18-20 2000 Proceedings", ed. M. Schoenauer et al., Berlin, Heidelberg, 2000, pp. 849–858.

⁴⁷ S. Sato et al., op. cit., p. 517–526.

Measured acoustic parameters values in high-rating concert halls		
RT	ITDG	V/n
1.8–2 seconds	≤ 25 ms	8–10 m ³

Table 1. Reference values for acoustic parameters. Data source: L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004

Acoustic parameters before interior adaptation – grain elevator warehouse in Płock						
Interior volume	Interior volume per audience seat (700)	Interior finishing material	Dimensions (width × length × height)	Simulated RT	Simulated avg. ITDG	Simulated distribution of the first sound reflections on the auditorium floor
16 359 m ³	23.37 m ³	Reinforced concrete unpolished	19 × 41 × 21 m	4.01 s	100.7 ms	

Table 2. Simulated acoustic parameters of the grain elevator interior before adaptation. Authors’ study

3.5. Software used

The software chosen was accessible and easy to edit the algorithmic process. The spatial geometry of the model was created in Rhinoceros 7,⁵⁰ a popular AEC in the industry, with integration of Grasshopper (a graphical code editor). In addition to an extensive suite of algorithmic functions, the software allows the use of custom software modules in Python or C#, which were used to build the parametric interior model. The WallaceiX module,⁵¹ which offers an interface for optimising with a genetic algorithm and visualising the results, was used to search the spectrum of solutions. The optimised geometry can be exported to common formats, with metadata (material type, absorption coefficients, etc.).

4. Results

The model’s ability to generate concert hall interiors was assessed, with a positive finding

of similarity to realised, respected music performance interiors in terms of achieved acoustic parameters as well as interior geometry. The quantitative research was based on a comparison of simulated acoustic parameter values with measured values in existing halls. Qualitative research was based on a comparison of noted trends in solutions to existing interiors (sections, materials). Experiments were carried out based on the grain elevator adaptation project in Płock, with the same initial geometry parameters, describing two trials (Experiment I and II).

4.1. Results of quantitative research

The generated variants were evaluated in terms of (RT), averaged (ITDG), (V/n) and uniform distribution of first reflections on the auditorium floor. Validation of the model was done by comparison to existing interiors (Leo Beranek references from over a hundred venues, Tables 1, 2, 3).⁵² Interior parameters without architectural intervention were also simulated. The acoustic absorption and scattering coefficients of the

⁵⁰ *Rhinoceros 3D*, <https://www.rhino3d.com/en/emea/> (accessed: 20.06.2025).
⁵¹ *Evolutionary Engine for Grasshopper3D*, <https://www.wallacei.com> (accessed: 20.06.2025).

⁵² L. Beranek, op. cit.

Absorption coefficients							
	(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
9 mm plywood over 5 cm solid hardwood		0.28	0.22	0.19	0.13	0.08	0.06
Oak parquet flooring over concrete		0.09	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
Rough reinforced concrete		0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
Scattering coefficients							
Side walls and ceilings							
9 mm plywood over 5 cm solid hardwood (varied diffuser geometry)							0.5
Rough reinforced concrete							0.15
Audience floor							
Oak parquet flooring over concrete							0.05
Audience (occupied hall)							0.6

Table 3. The coefficients for the sound absorption and scattering parameters of finishing materials were assumed. Data source: L.L. Beranek, T. Hidaka, *Sound Absorption in Concert Halls by Seats, Occupied and Unoccupied, and by the Hall's Interior Surfaces*, "The Journal of the Acoustical Society of America", 1998, vol. 104, no. 6, p. 3176

Experiment I							
Interior volume	Interior volume per audience seat (700)	Interior finishing material	Dimensions (width × length × height)	Simulated RT	Simulated avg. ITDG	Simulated distribution of the first sound reflections on the auditorium floor	
6 200 m ³	8.85 m ³	9 mm plywood over 5 cm solid hardwood (varied diffuser geometry)	18,3 × 34 × 12.2 m	1.8 s	19 ms		
-62%	-62%	nd.	nd.	-55%	-81%	nd.	Δ

Table 4. Simulated acoustic parameters of the interior after adaptation – experiment I. Authors' study

materials were assumed according to the sample solutions.⁵³

Experiment I assumed unlimited displacement of the ceiling segments relative to the existing building floor. The Table 4 shows the

simulated values of the interior parameters and the percentage change relative to the situation without architectural intervention.

Experiment II excluded the possibility of displacement of the ceiling segments relative to the existing building ceiling. The Table 5 shows the simulated values of the interior parameters and the percentage change relative to the situation without architectural intervention.

⁵³ L.L. Beranek, T. Hidaka, *Sound Absorption in Concert Halls by Seats, Occupied and Unoccupied, and by the Hall's Interior Surfaces*, "The Journal of the Acoustical Society of America", 1998, vol. 104, no. 6, p. 3176.

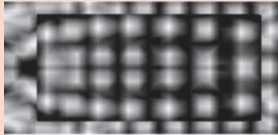
Experiment II							
Interior volume	Interior volume per audience seat (700)	Interior finishing material	Dimensions (width × length × height)	Simulated RT	Simulated avg. ITDG	Simulated distribution of the first sound reflections on the auditorium floor	
7 574 m ³	10.82 m ³	9 mm plywood over 5 cm solid hardwood (varied diffuser geometry)	18,3 × 34 × 19.2 m	2.02 s	27 ms		
-54%	-54%	nd.	nd.	-50%	-73%	nd.	Δ

Table 5. Simulated acoustic parameters of the interior after adaptation – experiment II. Authors’ study

Comparison of achieved and reference parameter values			
–	Reference range	Experiment I	Experiment II
RT	1.8 – 2 s	1.8 s	2.02 s
Średnie ITDG	≤ 25 ms	19 ms	27 ms
V/n	8–10 m ³	8.85 m ³	10.82 m ³

Table 6. Comparison of simulated acoustic parameter values with reference values. Authors’ study

The acoustic parameter values simulated on the model were compared with the adopted reference ranges (Table 6).

The model successfully generated interiors whose simulated parameters were within the reference ranges. Experiment I (greater design freedom) achieved a better average ITDG. Experiment II (ceiling constraints) had a larger volume, longer ITDG and RT, although still within the reference ranges (slight exceedances). Both trials demonstrated the ability of the model to distribute first reflections evenly.

4.2. Results of qualitative research

The generated interior geometry was compared to existing concert halls, looking for similarities in cross-sections and finish materials (Tables 7, 8).

The interior form generated by the model adopted cross-sections similar to the realised spaces described. Repeated wall and ceiling layouts resulted from similar strategies to ensure convenient

interior acoustics. The results of the quantitative and qualitative tests showed the correct construction of the model. The simulated acoustic parameter values were within the reference ranges. The drawn spatial geometry duplicated the realised systems, which were determined using other design methods, and the correctness of the created acoustic conditions was confirmed by measurements.

4.3. Limitations of the method

The model modifies the form, generates variants, simulates acoustic conditions and optimises. Constraints exist in each of these categories. The model simulated four key parameters, while Leo Beranek identified 21 additional.⁵⁴ Further development of the model should include more accurate analyses, while maintaining responsiveness to allow real-time interaction. The modularity of the model and the way input parameters are entered

⁵⁴ L. Beranek, op. cit., pp. 20–35.

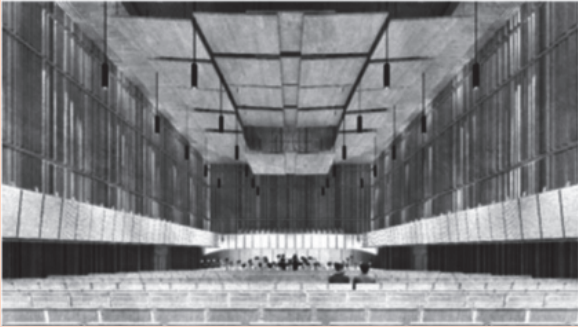
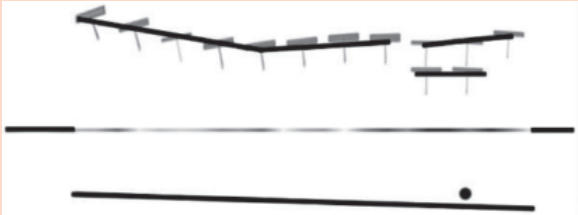
Experiment I – comparison with an existing concert hall	
Generated form	Reference building
Optimisation result	Bridgewater Hall – Manchester
Interior visualisation	Interior photography
	
Longitudinal section	Longitudinal section
	
Interior finishing materials	Interior finishing materials
9 mm plywood over 5 cm solid hardwood (varied diffuser geometry), oak flooring	Acoustic glass panels, prefabricated concrete acoustic panels, plaster, oak flooring

Table 7. Qualitative comparison of the interior design of the rooms before and after completion – Experiment I. Authors’ study. Source of materials concerning the completed room: L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004

allows for experimental integration of other optimisation approaches. The study seems particularly interesting when comparing the results obtained using a variety of optimisation approaches.

4.4. Applications of the method in creative activities

The model was built with usability in architectural design in mind. Its strengths are its modularity, the use of available tools, the responsiveness of the simulation and the built-in tools for visualising acoustic parameters, which makes it easy to use at any stage of the project.

The way in which the geometry is entered and the solutions generated based on the acoustic parameters enables the model to be used in the design of a wide variety of spaces (theatres, concerts, multi-purpose rooms, foyers). The generated geometry (planes with normal vector and material) allows for architectural interpretation. The model generates variants with similar optimum acoustic parameters, and the final choice can depend on economics or aesthetics, without affecting sound quality. It is possible to analyse parts of an existing room to identify problems with reflected sound and its distribution. The methodology can

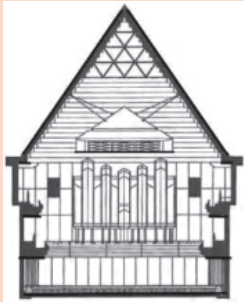
Experiment II – comparison with an existing concert hall	
Generated form	Reference building
Optimisation result	Tokyo Opera City - Tokyo
Interior visualisation	Interior photography
	
Cross section	Cross section
	
Interior finishing materials	Interior finishing materials
9 mm plywood over 5 cm solid hardwood (varied diffuser geometry), oak flooring	Glass fiber reinforced gypsum boards, 9 mm plywood on 2 cm solid wood, plaster on gypsum boards, wooden flooring

Table 8. Qualitative comparison of the interior design of the rooms before and after completion – Experiment II. Authors’ study. Source of materials concerning the completed room: L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004

be used for minor interior acoustic adjustments. High responsiveness and real-time visualisation of acoustic parameters support the development of concepts, enabling data-driven decision-making.

5. Summary

The research presented here demonstrates the feasibility of using the author’s method as a design tool in generating concert hall interior geometries with the desired acoustic properties. Experimental results confirmed the possibility of

achieving reference values of acoustic parameters (RT, ITDG, V/n, uniform reflection distribution), even when adapting an existing building. Comparisons of the realised geometries to established concert interiors showed formal analogies in terms of spatial arrangements and sound reflection shaping strategies. Limitations of the method (e.g. narrow range of analysed indicators) were identified, indicating directions for development. The method has the potential to be applied in real creative processes, supporting the conscious shaping of interiors with preset acoustic quality criteria.

Bibliography

- Allen J.B., Berkley D.A., *Image method for efficiently simulating small-room acoustics*, "The Journal of the Acoustical Society of America", 1979, vol. 65, no. 4, DOI: 10.1121/1.382599
- Badino E., Shtrepi L., Astolfi A., *Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice*, "Acoustics", 2020, vol. 2, no. 2, DOI: 10.3390/acoustics2020016
- Barron M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, New York 2009, DOI: 10.4324/9780203874226
- Becker R., *Fundamentals of performance-based building design*, "Building Simulation", 2008, vol. 1, no. 4, DOI: 10.1007/s12273-008-8527-8
- Beranek L., *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, New York 2004
- Beranek L.L., Hidaka T., *Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces*, "The Journal of the Acoustical Society of America", 1998, vol. 104, no. 6, DOI: 10.1121/1.423957
- Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T., *A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II*, "Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. 6th International Conference, Paris, France, September 18-20 2000 Proceedings", ed. M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J.J. Merelo, H.P. Schwefel, Berlin, Heidelberg, 2000 DOI: 10.1007/3-540-45356-3_83
- Dino I.G., *Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture*, "METU Journal of the Faculty of Architecture", 2012, vol. 29, no. 1, DOI: 10.4305/METU.JFA.2012.1.12
- Hlebowicz J., *Zastosowanie algorytmów genetycznych przy projektowaniu sal koncertowych w istniejących kubaturach. Adaptacja Elewatora Zbożowego w Płocku na salę koncertową*, Master's thesis prepared under the supervision of Prof. Jan Styk at the Faculty of Architecture, Warsaw University of Technology (WAPW), Warszawa 2024, manuscript in the collection of the WAPW library
- Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, Cambridge MA 1992
- Jouan S., Randrianoelina A., *LG Arts Centre, Seoul, South Korea Conception of a Performing Art Centre in South Korea and Cultural Differences*, "Proceedings of the Institute of Acoustics", 2018
- Jung N., Hakkinen T., Rekola M., *Extending Capabilities Bim to Support Performance Based Design*, "Journal of Information Technology in Construction", 2018, vol. 23, no. 2
- Kennedy J., *Swarm intelligence*, in: *Handbook of nature-inspired and innovative computing: integrating classical models with emerging technologies*, Sydney 2006
- Krish S., *A practical generative design method*, "Computer-Aided Design", 2011, vol. 43, no. 1, DOI: 10.1016/j.cad.2010.09.009
- Krokstad A., Strom S., Sørsdal S., *Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique*, "Journal of Sound and Vibration", 1968, vol. 8, no. 1, DOI: 10.1016/0022-460X(68)90198-3
- Lindenmayer A., *Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs*, "Journal of Theoretical Biology", 1968, vol. 18, no. 3, DOI: 10.1016/0022-5193(68)90079-9
- Lindenmayer A., Rozenberg G., *Developmental systems and languages*, "Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Theory of computing - STOC '72", Denver, Colorado, United States, 1972, DOI: 10.1145/800152.804917.
- Long M., *Architectural Acoustics*, Burlington, San Diego, London 2005
- Lu S., Yan X., Xu W., Chen Y., Liu J., *Improving auditorium designs with rapid feedback by integrating parametric models and acoustic simulation*, "Building Simulation", 2016, vol. 9, no. 3, DOI: 10.1007/s12273-015-0268-x
- Mitchell M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge MA-London 1998, DOI: 10.7551/MITPRESS/3927.001.0001
- Neumann von J., *The general and logical theory of automata*, in: *Systems research for behavioral science*, (n/a) 2017
- Orłowski R., *The historical use of models in the acoustic design of buildings*, in: *Physical Models Their Historical and Current Use in Civil and Building Engineering Design*, Berlin 2020, DOI: 10.1002/9783433609613.ch26
- Orłowska M., *Rekordowe 13 pięter... Tajemnice najwyższego budynku i najstarszej windy*, „Gazeta Wyborcza – Tygodnik Płock”, 04.02.2016
- Oxman R., *Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues*, "International Journal of Architectural Computing", 2008, vol. 6, no. 1, DOI: 10.1260/147807708784640090

Oxman R., *The thinking eye: visual re-cognition in design emergence*, "Design Studies", 2002, vol. 23, no. 2, DOI: 10.1016/S0142-694X(01)00026-6

Pollio V., *The Ten Books on Architecture: De Architectura*, translation into English M. Morgan, Scotts Valley 2018

Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, ed. Chambers L., Boca Raton 2019, DOI: 10.1201/9780429128332

Sato S., Otori K., Takizawa A., Sakai H., Ando Y., Kawamura H., *Applying Genetic Algorithms to the Optimum Design of a Concert Hall*, "Journal of Sound and Vibration", 2002, vol. 258, no. 3, DOI: 10.1006/jsvi.2002.5273

Serafimowicz W., *Z dziejów budownictwa w Płocku: inwestorzy, projektanci, wykonawcy*, Płock 2008

Singh V., Gu N., *Towards an integrated generative design framework*, "Design Studies", 2012, vol. 33, no. 2, DOI: 10.1016/j.destud.2011.06.001

Stiny G., Mitchell W.J., *The grammar of paradise: on the generation of Mughul gardens*, "Environment and Planning B: Planning and Design", 1980, vol. 7, no. 2, DOI: 10.1068/b070209

Wilson G.P., *Structure Borne Noise and Vibration Control in Performing Arts Facilities*, "International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE", 2012

Wolfram S., Gad-el-Hak M., *A New Kind of Science*, "Applied Mechanics Reviews", 2003, vol. 56, no. 2, DOI: 10.1115/1.1553433

Internet sources

Autodesk, <https://www.autodesk.com/pl>

Autodesk Forma, <https://www.autodesk.com/pl/products/forma/overview>

Norm ISO 6707-1:2020, *Buildings and civil engineering works — Vocabulary Part 1: General terms*

CATT-Acoustic / The FIRverb Suite / ReFlPhinder / GratisVolver Pro, <https://www.catt.se/>

Dynamo BIM Software, <https://dynamobim.org/>

EASE 5 Third Edition | Ahnert Feistel Media Group, <https://shorturl.at/yyWXA>

Evolutionary Engine for Grasshopper3D, <https://www.wallacei.com>

Generative design for architecture, engineering & construction | Autodesk, <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction>

Grasshopper, <https://www.grasshopper3d.com/>

ODEON Room Acoustics Software, <https://odeon.dk/>

Pachyderm Acoustic Simulation, <https://www.orase.org/pachyderm>

Rhinoceros 3D, <https://www.rhino3d.com/en/emea/>