Wrocław, marzec 2010

4SOUND

specyfikacja prac projektowych

4SOUND
ul. Klecińska 123
54-413 Wrocław

info@4sound.pl
www.4sound.pl

laboratorium akustyki

tel. +48 503 127 733
lub 071 79 85 746

NIP: 811-155-48-81
REGON: 020870205

Spis treści

1 Zakres prowadzonych działań w zakresie projektowania adaptacji akustycznych pomieszczeń....3
2 Inwentaryzacja stanu istniejącego....3
3 Pomiary akustyczne....4
4 Ustalenie koncepcji przedsięwzięcia....5
5 Projekt przegród o odpowiedniej izolacyjności....7
6 Projekt adaptacji akustycznej wnętrz....10
6.1 Obliczenia....10
6.1.1 Metoda falowa....10
6.1.2 Metoda statystyczna....13
6.1.3 Metoda geometryczna....14
6.2 Ustroje akustyczne....14
6.2.1 Dyfuzory Schroedera....14
6.2.2 Rezonansowe ustroje pochłaniające....16
7 Pomiary kontrolne....16
8 Wykorzystywana literatura fachowa....17
9 Wybrane realizacje....18
Załącznik 1 Przykładowa analiza odbić w pomieszczeniu....19
Załącznik 2 Przykładowy rzut pomieszczenia – pomieszczenie odsłuchowe / reżysernia....21
Załącznik 3 Przykładowy rzut pomieszczenia – reżysernia dźwięku....23

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

4SOUND to nowa, szybko rozwijająca się Polska firma, która zajmuje się szeroko pojętą akustyką. Firma skutecznie buduje swój wizerunek na rynku związanym z dźwiękiem. Projekty akustyczne są wykonywane fachowo i solidnie przez osoby, dla których akustyka jest pasją. 4SOUND potrafi wydobyć jak najwięcej detali z muzyki, jednocześnie udowadniając jak istotną sprawą jest akustyka pomieszczeń. W ramach oferty firmy można znaleźć usługi dotyczące akustyki wnętrz, akustyki budowlanej i środowiskowej oraz sprzedaży ustrojów akustycznych.

Firma 4SOUND jest uczestnikiem Regionalnego Programu Operacyjnego dla Województwa Dolnośląskiego na lata 2007 – 2013 (Priorytet 1, Działanie 1.1).

Firma 4SOUND tworzy projekty adaptacji akustycznych wnętrz, szukając najlepszego sposobu na rozwiązanie danego problemu. Wykonuje projekty w zakresie optymalizacji parametrów akustycznych pomieszczenia do założonych warunków oraz poprawy istniejącego stanu. W zakres usług wchodzą projekty związane z szeroko pojętą akustyką wnętrz (w tym także projekty ustrojów akustycznych) oraz akustyką budowlaną (przegrody o odpowiedniej izolacyjności, projekty związane z redukcją hałasu pogłosowego), zarówno dla Klientów indywidualnych, jak i firm prywatnych czy instytucji.

1 Zakres prowadzonych działań w zakresie projektowania adaptacji akustycznych pomieszczeń

- inwentaryzacja stanu istniejącego,
- pomiary akustyczne (dające bardziej szczegółowy obraz zastanej sytuacji),
- ustalenie koncepcji przedsięwzięcia (w zależności od potrzeb Klienta, ustalenie rozmieszczenia i proporcji pomieszczeń, itp.),
- wykonanie projektu przegród o odpowiedniej izolacyjności,
- wykonanie projektu adaptacji akustycznej wnętrz (na podstawie pomiarów parametrów akustycznych) – w tym także projekt ustrojów akustycznych dopasowanych do pomieszczeń,
- pomiary kontrolne (weryfikujące uzyskane na drodze obliczeniowej wartości).

2 Inwentaryzacja stanu istniejącego

W przypadku, gdy zadaniem jest adaptacja budynku już istniejącego, proces projektowy rozpoczyna się od inwentaryzacji, tj. pomiarów przeznaczonych do adaptacji przestrzeni i sporządzenia rysunków z użyciem oprogramowania typu CAD. Stworzone na tym etapie rysunki służą w dalszym postępowaniu jako baza do tworzenia bardziej szczegółowych – fragmentów projektu budowlanego i wykonawczego.

Jest to jeden z ważniejszych etapów projektu, zbierane są bowiem informacje dotyczące oczekiwań Klienta – zarówno tych finansowych jak i estetycznych i użytkowych.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

3 Pomiary akustyczne

Pomiary wykonywane są dla Klientów indywidualnych w prywatnych pomieszczeniach, jak i w budynkach użyteczności publicznej. Firma 4SOUND dysponuje innowacyjnym sprzętem pomiarowym najwyższej klasy dokładności. Asortyment będzie poszerzany o kolejne urządzenia wraz z rozwojem firmy. Pośród dostępnych urządzeń wymienić należy:

- komputer z oprogramowaniem DIRAC 4.0 do pomiarów parametrów pogłosowych pomieszczeń,
- karta dźwiękowa M-Audio Duo,
- aktywne urządzenie głośnikowe wysoko i średniotonowe,
- aktywne urządzenie głośnikowe niskotonowe,
- miernik Brüel & Kjær typ 2250 (wraz z oprogramowaniem),
- wzmacniacz Brüel & Kjær typ 2716,
- analizator Behringer 8024.

Wszelkie pomiary wykonywane są zgodnie z obowiązującymi normami. W poniższej tabeli zgromadzono zestawienie wykonywanych przez firmę 4SOUND pomiarów akustycznych związanych z projektowaniem adaptacji akustycznych i przegród o odpowiedniej izolacyjności oraz norm dotyczących ich wykonywania.

mierzony parametr	**opis**	**norma**
czas pogłosu	jeden z najistotniejszych parametrów pola akustycznego wpływający bezpośrednio na klimat akustyczny wnętrza; wpływa na zrozumiałość mowy, jakość odbioru muzyki, itp. parametr związany z hałasem pogłosowym	PN-EN ISO 3382-1:2009 PN-EN ISO 3382-2:2008
inne parametry związane z pomieszczeniem (C80, D50, BR)	obiektywne parametry opisujące charakter akustyczny wnętrza	PN-EN ISO 3382-1:2009 PN-EN ISO 3382-2:2008
rezonanse akustyczne pomieszczeń	rezonanse akustyczne mogą powodować zakolorowania dźwięku w najniższym zakresie częstotliwości (< 200 Hz)	nd.
izolacyjność przegród od dźwięków powietrznych oraz uderzeniowych	izolacyjność mówi o ilości energii dźwięku przenikającej przez przegrodę z jednego pomieszczenia do drugiego	PN-EN ISO 140-4:2000 PN-EN ISO 140-5:1999 PN-EN ISO 140-7:2000
zrozumiałość mowy	parametr szczególnie ważny w teatrach, salach konferencyjnych, hotelach, przestrzeniach biurowych, itp.	PN-EN 60268-16:2005

Pomiary czasu pogłosu wykonuje się w wybudowanych pomieszczeniach przeznaczonych do adaptacji. Ich celem jest uzyskanie wiedzy na temat pola akustycznego w pomieszczeniu. Dzięki zdobytej w ten sposób wiedzy można natomiast ustalić ilość oraz typ materiałów potrzebnych do otrzymania pożądanych i optymalnych warunków akustycznych. Wyniki pomiarów czasu pogłosu pozwalają na dokładniejsze wykonanie obliczeń wg teorii statystycznej, ponieważ nie dysponuje się współczynnikami pochłaniania dla dostępnych materiałów a faktycznymi wartościami pochłaniania wprowadzanymi przez elementy pomieszczenia.

Ogromnie ważną kwestią podczas powstawania studiów nagrań i pokojów odsłuchowych jest izolacyjność akustyczna przegród budowlanych otaczających pomieszczenia. W przypadku, gdy adaptowany bu-

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

dynek jest już wybudowany warto sprawdzić właściwości dźwiękoizolacyjne ścian i stropów i określić czy istnieje niebezpieczeństwo, że hałas przedostanie się przez nie do wnętrza pomieszczenia i zakłóci odbiór czy przeszkodzi w sesji nagraniowej.

Bardzo istotne jest także określenie rezonansów akustycznych wpływających bezpośrednio na pole akustyczne w miejscu odsłuchu i jego najbliższym otoczeniu. Korekcja umiejscowienia punktu optymalnego odsłuchu lub urządzeń głośnikowych oraz umieszczanie pułapek basowych w odpowiednich punktach pomieszczenia pozwala na skuteczną walkę z podbarwieniami dźwięku w najniższych zakresach częstotliwości.

W niektórych sytuacjach uzasadnione jest także przeprowadzenie pomiarów poziomu hałasu w środowisku czy sąsiadujących pomieszczeniach w celu określenia minimalnej izolacyjności akustycznej, jaką powinny charakteryzować się powinny przegrody adaptowanych pomieszczeń.

Pomiary zrozumiałości mowy dają obraz sytuacji, gdy mamy do czynienia z miejscami, gdzie bardzo istotną funkcję pełni przekaz słowny (słowo mówione) – czyli w przypadku sal teatralnych, konferencyjnych czy studiów lektorskich.

4 Ustalenie koncepcji przedsięwzięcia

Na tym etapie powstawania kompletnego projektu, znając już oczekiwania Klienta, usytuowanie budynku w przestrzeni (odległość od ruchliwych ulic, itp.) i wymiary dostępnych do adaptacji przestrzeni, można przystąpić do ustalania funkcji pomieszczeń i podziału tej przestrzeni. Na tym etapie przedsięwzięcia ustalane jest np. optymalne rozmieszczenie okien zapewniające kontakt wzrokowy wykonawców w studio z reżyserką dźwięku, rozmieszczenie pomieszczeń w taki sposób, by najkorzystniej wykorzystać przestrzeń i jednocześnie uzyskać funkcjonalny układ niezależny od zewnętrznych czynników (np. warto uniknąć sytuacji, w której studio nagrań sąsiaduje bezpośrednio z ruchliwą ulicą będącą źródłem hałasu).

Ogromne znaczenie dla pomieszczenia ma ustalenie odpowiednich proporcji pomieszczenia. Zazwyczaj korzysta się z tzw. „złotych proporcji" pomieszczeń, które zostały przebadane pod kątem rozkładu rezonansów akustycznych jak i subiektywnych wrażeń oceniających je ludzi. W poniższej tabeli przedstawiono kilka przykładowych optymalnych proporcji.

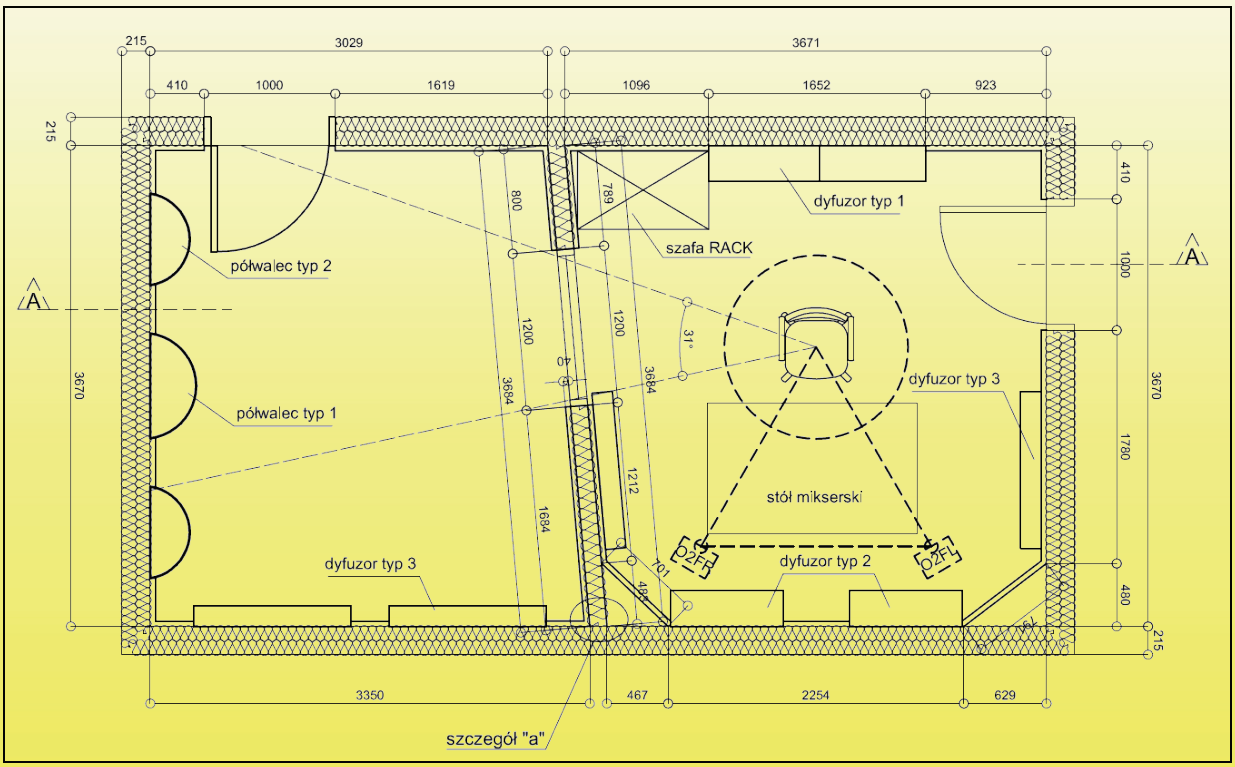
Tabela 4.1 Najlepsze proporcje pomieszczeń prostopadłościennych

autor proporcji	wysokość H	szerokość W	długość L
Sepmeyer (3 proporcje)	1,00	1,14	1,39
	1,00	1,28	1,54
	1,00	1,60	2,33
Louden (wybrane 3 najlepsze proporcje)	1,00	1,40	1,90
	1,00	1,30	1,90
	1,00	1,50	2,50
Volkmann (proporcje 2:3:5)	1,00	1,50	2,50
Bonner	1,00	1,26	1,59

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

Odpowiedni dobór proporcji ma największe znaczenie w zakresie niskich częstotliwości, wpływa bowiem na rozkład rezonansów akustycznych pomieszczenia. Problem ten szerzej opisano w **rozdziale 6.1.1**.

Przykładem może być mały kompleks reżyserni i studia nagrań zaprojektowany przez 4SOUND. Priorytetem było zapewnienie realizatorowi jak największego pola widzenia, przy zachowaniu dobrych właściwości dźwiękoizolacyjnych przegrody oraz pozostawienie odpowiedniej ilości miejsca na ustroje akustyczne (patrz: **rysunek 4.1**).



Rysunek 4.1 Fragment rysunku – projekt małego studia nagrań i reżyserni wykonany przez firmę 4SOUND

Jak widać na powyższym rysunku, podczas ustalania koncepcji całego przedsięwzięcia postanowiono pochylić jedną ze ścian pomieszczenia o kąt 5° do 10°. Jest to także jeden ze sposobów likwidowania zakolorowań dźwięku w pomieszczeniach o kształcie prostokątnym [7]. Wg opracowania taki zabieg wpływa korzystnie na rozkład rezonansów własnych w skali częstotliwości. W przypadku przestrzeni, które są dopiero na etapie projektowym zabieg taki może okazać się bardzo dobrym rozwiązaniem. Jednak w przypadku adaptacji istniejących już pomieszczeń może nie być uzasadniony ekonomicznie.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

5 Projekt przegród o odpowiedniej izolacyjności

Kiedy znane jest już ułożenie pomieszczeń można przystąpić do projektu przegród spełniających wymagania odnośnie dźwiękoizolacyjności. Ze względu na występowanie przenoszenia bocznego w budynku, to jego ściany wewnętrzne uzyskują przybliżoną izolacyjność akustyczną właściwą mniejszą od izolacyjności określonej w warunkach laboratoryjnych. W związku z tym przy doborze odpowiedniej przegrody (z wykorzystaniem jednoliczbowych wskaźników) kieruje się następującą zależnością [9]:

$$R_{A1R}(R_{A2R}) - K \geq R'_{A1}(R'_{A2})_{min}\ , \tag{5.1}$$

gdzie:

- $R'_{A1}(R'_{A2})_{min}$ - wymagana minimalna wartość wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej danej przegrody w budynku,
- $R_{A1R}(R_{A2R})$ - wartość projektowa wskaźnika oceny izolacyjności,
- K - wpływ bocznego przenoszenia dźwięku.

Warto zaznaczyć, że:

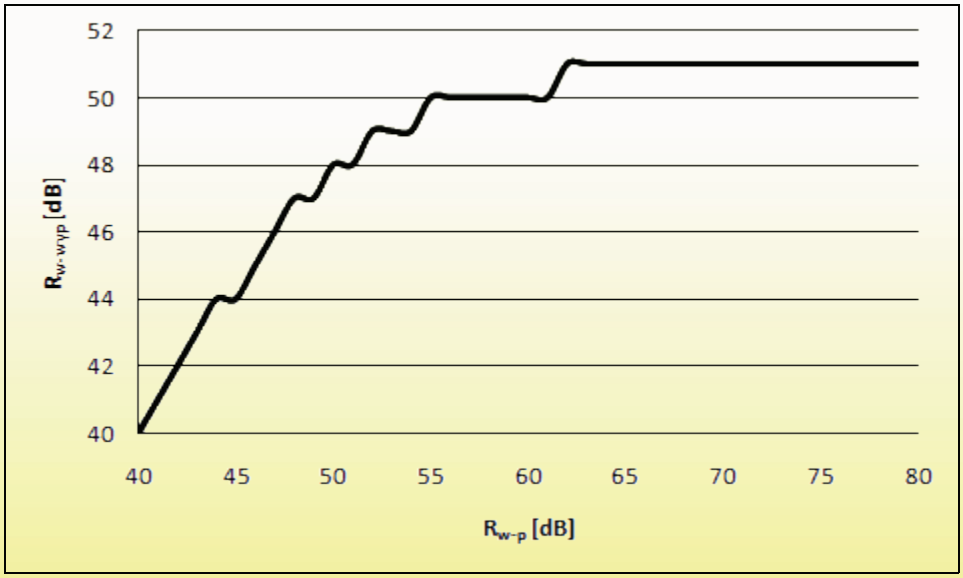
$$\begin{aligned} R_{A1R} &= R_w + C - K\ , \\ R_{A2R} &= R_w + C_{tr} - K\ , \end{aligned} \tag{5.2}$$

gdzie:

- R_w - wskaźnik ważony izolacyjności akustycznej właściwej (warunki laboratoryjne)
- C - widmowy wskaźnik adaptacyjny, o który korygowana jest wartość R_w, gdy mamy do czynienia z hałasem o wyrównanym widmie,
- C_{tr} - widmowy wskaźnik adaptacyjny, o który korygowana jest wartość R_w, gdy mamy do czynienia z hałasem niskoczęstotliwościowym,

Sprawdzane są wszystkie czynniki warunkujące izolacyjność przegrody – także wpływ okien i drzwi na jej wypadkową jakość. Ustalane są optymalne parametry przegród oraz wtrąceń, tzn. okien i drzwi. Przykładowy wykres zamieszczony poniżej pokazuje w jaki sposób przy założonym wskaźniku oceny izolacyjności akustycznej właściwej drzwi zmiana wskaźnika odnoszącego się do samej przegrody wpływa na izolacyjność wypadkową przegrody z drzwiami.

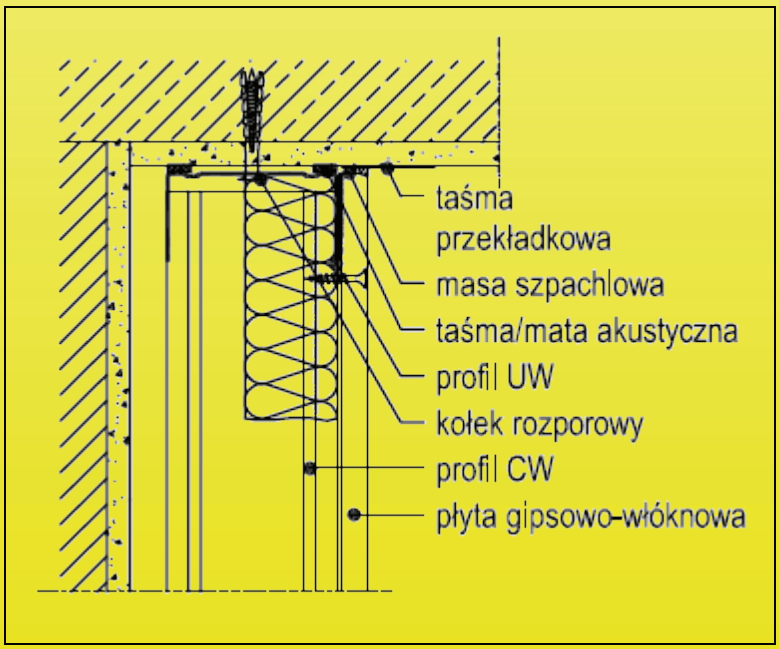
Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.



Rysunek 5.1 Wpływ izolacyjności przegrody bez drzwi na wypadkową izolacyjność przegrody z drzwiami [*projekt w prywatnym budynku mieszkalnym*]

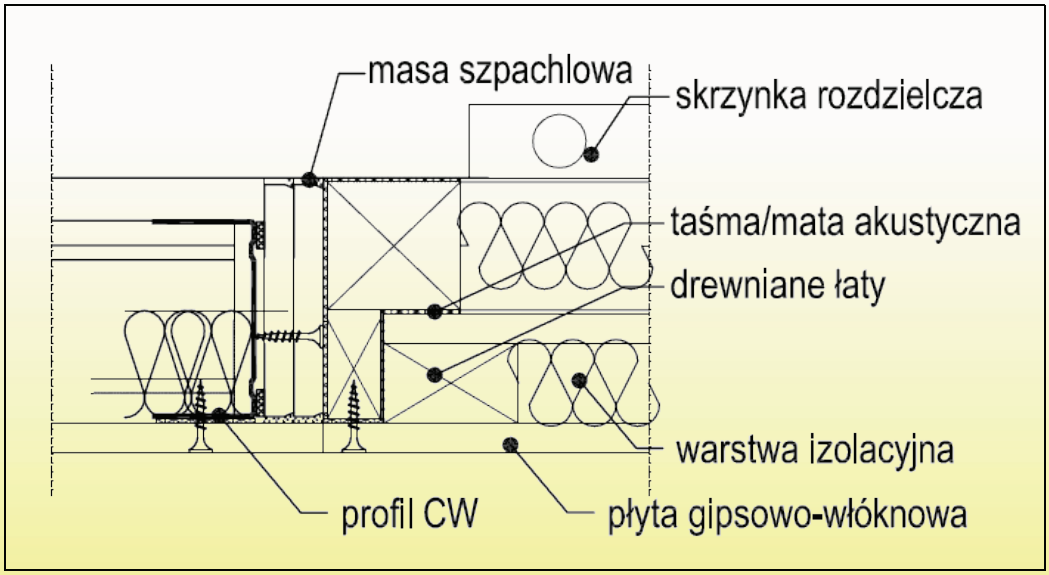
Widać, że zwiększanie izolacyjności powyżej 55 dB nie jest uzasadnione, gdyż potrzeba by ściany o izolacyjności > 60 dB. Rozwiązanie takie nie byłoby optymalne ze względu na koszty inwestycji.

Oprócz analizy rozwiązań technologicznych i doboru najbardziej odpowiedniego do danego przedsięwzięcia, w skład projektu przegród o odpowiedniej izolacyjności wchodzą rozrysowane detale konstrukcyjne wybranych, najbardziej newralgicznych punktów, których konstrukcja może odbiegać od standardowych rozwiązań wykorzystywanych przez budowlańców. Zostają wypunktowane szczegóły istotne podczas konstruowania przegród. Poniżej przedstawiono rysunki detali konstrukcyjnych dostarczone jako załączniki do jednego z projektów dla Klienta indywidualnego.



Rysunek 5.2 Sposób łączenia obudowy ściennej z sufitem lub podłogą – przekrój pionowy [*projekt w prywatnym budynku mieszkalnym*]

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.



Rysunek 5.3 Detal zabudowy skrzynki rozdzielczej – zaprojektowana klapa rewizyjna; przekrój poziomy [*projekt w prywatnym budynku mieszkalnym*]

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

6 Projekt adaptacji akustycznej wnętrz

6.1 Obliczenia

Obliczenia podczas wykonywania projektu adaptacji akustycznej wnętrza przeprowadzane są trzema metodami. Jest to spowodowane podziałem pasma akustycznego na trzy przedziały. W każdym z nich dominujące są różne zjawiska fizyczne. W związku z tym poza przedziałem stosowalności dla danej metody obliczenia obarczone są dużym błędem. Metody te to:

- metoda falowa,
- metoda statystyczna,
- metoda geometryczna.

6.1.1 Metoda falowa

W zakresie najniższych częstotliwości, w którym dominują zjawiska związane ze zmianami ciśnienia akustycznego sprawdza się teoria falowa. Dzięki niej obliczone mogą być rezonanse akustyczne w pomieszczeniach o prostopadłościennych kształtach. Podczas analizy dokonuje się zestawienia pierwszych rezonansów akustycznych oraz samych rezonansów osiowych.

Tabela 6.1 Przykładowe zestawienie 30 pierwszych rezonansów akustycznych pomieszczenia

numer	f [Hz]	oznaczenie modu	typ modu	numer	f [Hz]	oznaczenie modu	typ modu
1	1 0 0	46,9	osiowy	16	1 0 2	131,6	styczny
2	0 1 0	54,0	osiowy	17	1 2 1	132,8	skośny
3	0 0 1	61,5	osiowy	18	0 1 2	134,3	styczny
4	1 1 0	71,5	styczny	19	3 0 0	140,8	osiowy
5	1 0 1	77,4	styczny	**20**	**1 1 2**	**142,3**	**skośny**
6	0 1 1	81,8	styczny	**21**	**2 2 0**	**143,0**	**styczny**
7	**2 0 0**	**93,8**	**osiowy**	22	3 1 0	150,8	styczny
8	**1 1 1**	**94,3**	**skośny**	23	3 0 1	153,6	styczny
9	**0 2 0**	**108,0**	**osiowy**	**24**	**2 0 2**	**154,7**	**styczny**
10	**2 1 0**	**108,3**	**styczny**	**25**	**2 2 1**	**155,7**	**skośny**
11	2 0 1	112,2	styczny	**26**	**0 3 0**	**161,9**	**osiowy**
12	1 2 0	117,7	styczny	**27**	**3 1 1**	**162,8**	**skośny**
13	0 0 2	123,0	osiowy	**28**	**0 2 2**	**163,7**	**styczny**
14	**0 2 1**	**124,3**	**styczny**	**29**	**2 1 2**	**163,9**	**skośny**
15	**2 1 1**	**124,5**	**skośny**	30	1 3 0	168,6	styczny

W powyższej tabeli zaznaczono pary lub trójki rezonansów, które występują w bliskich odległościach (w skali częstotliwości). Dla tych częstotliwości mogą występować zakolorowania dźwięku. Dokładniejszy obraz sytuacji daje analiza samych rezonansów osiowych, ponieważ to one wywierają największy wpływ na

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

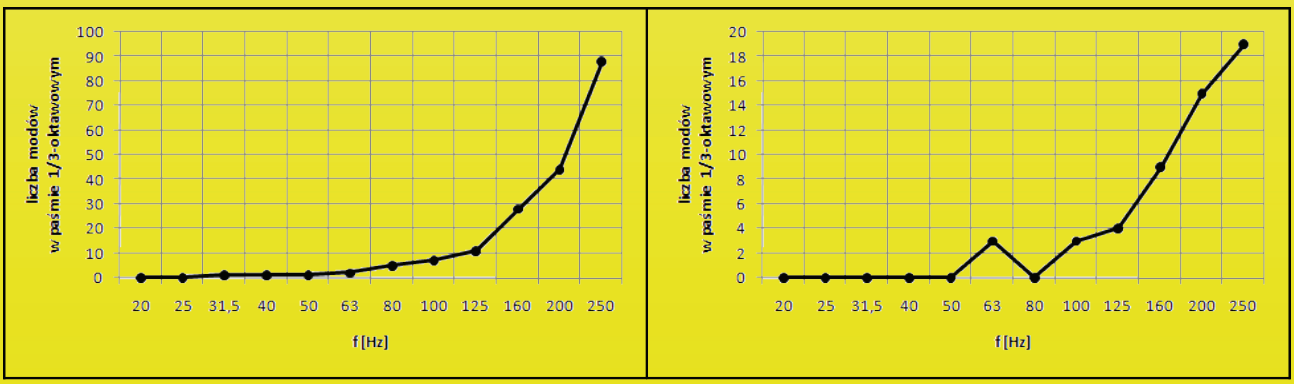
charakterystykę pomieszczenia. W tabeli przedstawiono rezonanse z przykładowego pomieszczenia i odstępy między nimi. Te częstotliwości, przy których mogą wystąpić problemy zaznaczono przez pogrubienie.

Tabela 6.2 Przykładowa analiza rezonansów osiowych - odstęp między rezonansami

rząd rezonansu	długość L	szerokość W	wysokość H	w kolejności rosnącej	różnica
1	29,6	43,1	68,9	29,6	
2	59,1	86,1	137,8	43,1	13,5
3	88,7	129,2	206,6	59,1	16,0
4	118,2	172,2	275,5	68,9	9,8
5	147,8	215,3		86,1	17,2
6	177,4	258,3		**88,7**	2,6
7	206,9	301,4		**118,2**	**29,5**
8	236,5			129,2	11,0
9	266,1			137,8	8,6
10	295,6			147,8	10,0
				172,2	24,4
				177,4	5,2
				206,6	**29,2**
				206,9	**0,3**
				215,3	8,4
				236,5	21,2
				258,3	21,8
				266,1	7,8
				275,5	9,4
				295,6	20,1
				301,4	5,8

odstęp średni	13,0 Hz
odstęp minimalny	0,3 Hz
odstęp maksymalny	29,5 Hz

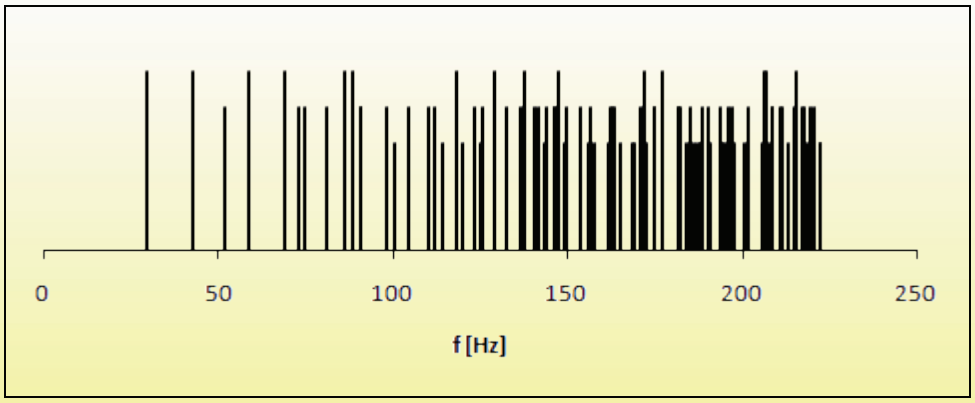
Możliwe jest określenie gęstości rozkładu rezonansów akustycznych, na podstawie której można odnaleźć częstotliwości, przy których prawdopodobne jest występowanie zakolorowań dźwięku. Oczywiście dobór optymalnych proporcji pomieszczenia na etapie koncepcyjnym pozwala na zminimalizowanie ryzyka występowania tego niekorzystnego z punktu widzenia neutralności odtwarzanego dźwięku zjawiska. Oceny takiej dokonuje się stosując dwa kryteria Bonello. Poniżej przedstawiono ilustrację graficzną pierwszego z kryteriów Bonello. Pokazano dwa wykresy ilości rezonansów akustycznych w pasmach 1/3-oktawowych. Rysunek po lewej stronie pokazuje korzystny rozkład rezonansów, dla którego ryzyko wystąpienia zakolorowań dźwięku jest stosunkowo nieduże. Rysunek po prawej pokazuje natomiast mało korzystny rozkład, dla którego pierwsze kryterium Bonello nie jest spełnione, tzn. ilość modów w pasmach 1/3 oktawowych nie rośnie monotonicznie. Najkorzystniej bowiem jest, gdy w każdym kolejnym pasmie ilość modów jest większa bądź równa niż w poprzednim.



Rysunek 6.1 I kryterium Bonello – ilustracja graficzna rozkładu gęstości rezonansów akustycznych

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

Na poniższym rysunku zaprezentowany został wykres rozkładu rezonansów akustycznych w skali częstotliwości. Słupkami od najwyższego do najniższego zaznaczono kolejno: mody osiowe, styczne i skośne. Wykres ten służy jako uzupełnienie do **tabel 6.1** oraz **6.2**.



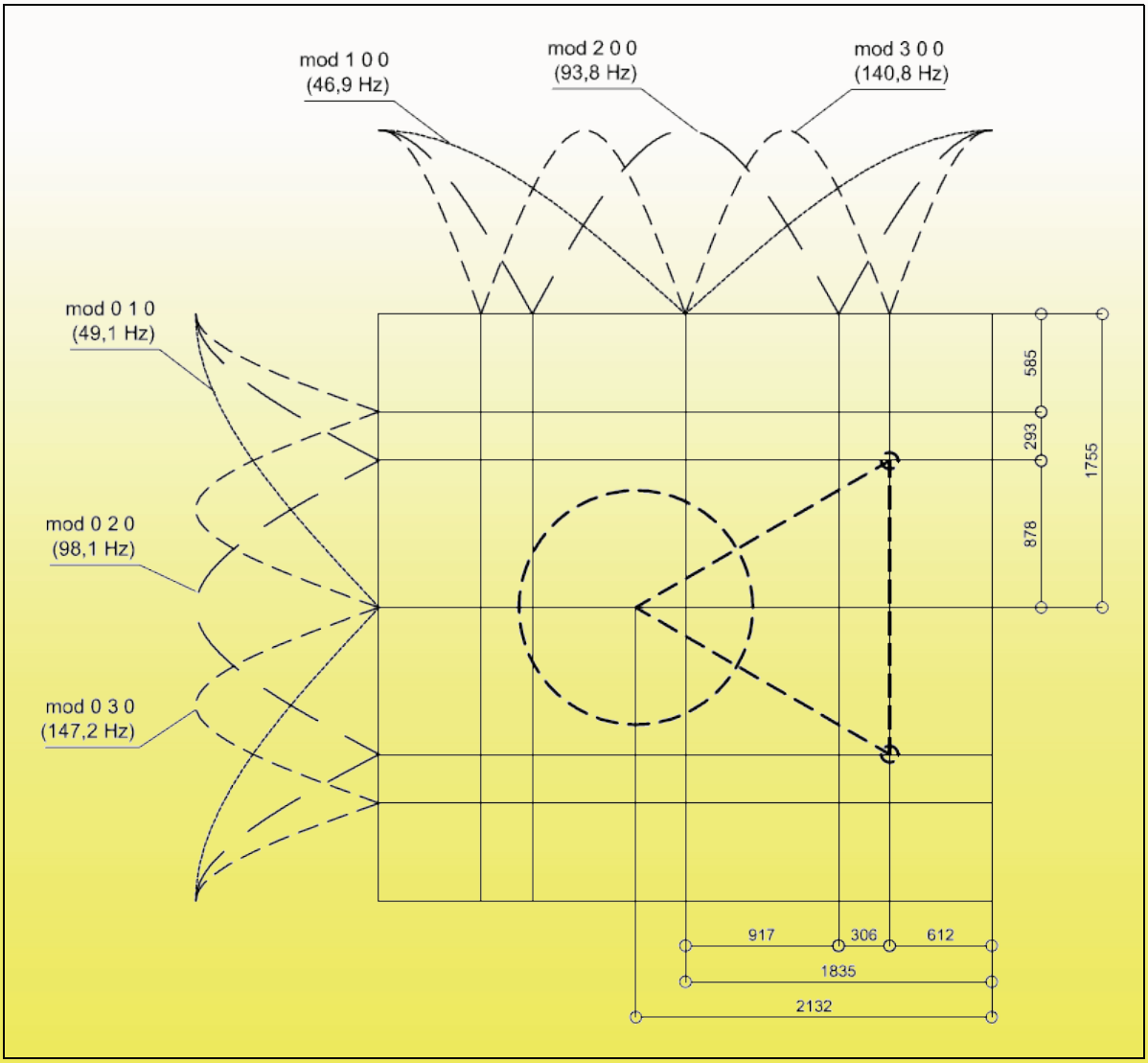
Rysunek 6.2 Rozkład modów na skali częstotliwości dla przykładowego pomieszczenia

Ustalenie optymalnego punktu odsłuchu wiąże się z analizą rezonansów osiowych wzbudzających się w danym pomieszczeniu. Jako, że niosą one ze sobą najwięcej energii akustycznej, mogą w największym stopniu wpływać na jakość dźwięku w pomieszczeniu. Konfiguracja przestrzenna punkt odsłuchu – urządzenia głośnikowe dobierana jest w taki sposób, by nie wzbudzać niekorzystnych rezonansów i żeby już wzbudzane rezonanse były jak najsłabiej słyszalne. Przykładowa analiza rezonansów osiowych 3 pierwszych rzędów przedstawiona jest na **rysunku 6.3**. Dzięki narysowanym krzywym łatwiejsze staje się określenie w których miejscach pomieszczenia wystąpi strzałka ciśnienia akustycznego danego rezonansu, a w którym węzeł.

Rzecz jasna samo ułożenie punktu odsłuchu i urządzeń głośnikowych dobierane jest na podstawie zaleceń EBU dotyczących profesjonalnych reżyserni nagrań i pokojów odsłuchowych (EBU Tech. 3276, *Listening Conditions for the assessment of sound programme material. Monophonic and two-channel stereophonic*, European Broadcasting Union, Genewa 1998).

Obliczenia związane z teorią falową oraz weryfikujące je pomiary rezonansów akustycznych pomieszczeń stanowią także podstawę do projektu dedykowanych do pomieszczenia pułapek basowych.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.



Rysunek 6.3 Przykład analizy osiowych rezonansów akustycznych w pomieszczeniu – rzut [*projekt w prywatnym budynku mieszkalnym*]

6.1.2 Metoda statystyczna

Pod pojęciem metody statystycznej kryje się obliczanie czasu pogłosu. Metoda statystyczna zakłada, że pole akustyczne w pomieszczeniu jest rozproszone. Dzieje się tak w zakresie średnich częstotliwości. Stąd też obliczenia czasu pogłosu przeprowadza się zazwyczaj dla pasm oktawowych o częstotliwościach środkowych z zakresu 125 Hz do 4 kHz. W przypadku gdy znane są współczynniki pochłaniania materiałów w poszerzonym zakresie, obliczenia przeprowadza się dla częstotliwości od 63 Hz do 8 kHz.

Metoda statystyczna analizy pola akustycznego zakłada stosowanie różnych metod obliczeniowych czasu pogłosu w zależności od rozmiarów pomieszczenia, rozmieszczenia w nim materiałów pochłaniających, itp. Zazwyczaj wykorzystywany jest wzór Eyringa, na podstawie którego obliczana jest charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu.

Oczywiście w poprawnie zaprojektowanych pomieszczeniach dąży się do tego, by charakterystyka była jak najbardziej zbliżona do poziomej linii prostej (w przypadku reżyserni dźwięku). Jednak w każdym pomieszczeniu nierównomierności tejże charakterystyki nie powinny przekraczać pewnych ustalonych granic

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

zależnych od zastosowania pomieszczenia. W przypadku pomieszczeń typu reżysernia dźwięku wykorzystywane są wytyczne podane w opracowaniach EBU [1].

6.1.3 Metoda geometryczna

Metoda geometryczna zakłada, że długości fali dźwiękowej są już na tyle małe, że jej bieg można przedstawić w postaci promienia dźwięku. Wówczas odbija się on od powierzchni zgodnie z zasadą odbicia, czyli – kąt odbicia równa się kątowi padania. Metoda geometryczna jest słuszna dla częstotliwości z wyższych zakresów. Analiza biegu promieni dźwiękowych prowadzi do ujawnienia miejsc, w których występują pierwsze odbicia od ścian, podłogi i sufitu. Jako, że droga tych odbitych promieni nie jest znacząco większa od drogi jaką pokonuje fala bezpośrednia (wyemitowana ze źródła dźwięku), więc i opóźnienia nie są za duże. W przypadku gdy amplituda fali odbitej jest bliska amplitudy fali bezpośredniej, a jej opóźnienie nie przekracza 15 ms, mamy do czynienia z wczesnym odbiciem. Zjawisko to jest niekorzystne i należy dążyć do jego minimalizacji. Stąd też w miejscach, gdzie potencjalnie będą występować wczesne odbicia stosuje się ustroje akustyczne pochłaniające bądź rozpraszające padające na nie fale dźwiękowe. Można więc powiedzieć, że analiza biegu promieni dźwiękowych prowadzi do wskazania konkretnych miejsc w pomieszczeniu, w których powinny znaleźć się optymalnie dobrane ustroje akustyczne.

Przykładową analizę przedstawiono w **załączniku 1** do niniejszej specyfikacji.

6.2 Ustroje akustyczne

Firma 4SOUND jest producentem ustrojów akustycznych własnego projektu. Są to ustroje takie jak:

- dyfuzory Schroedera 1D i 2D rozpraszające fale dźwiękowe,
- rezonansowe ustroje pochłaniające perforowane lub szczelinowe,
- półwalce – elementy pochłaniająco-rozpraszające,
- pułapki basowe – ustroje bazujące na działaniu rezonatorów Helmholtza stosowane by minimalizować wpływ rezonansów akustycznych pomieszczeń.

6.2.1 Dyfuzory Schroedera

Dyfuzory jako elementy rozpraszające znajdują szereg zastosowań związanych z akustyką pomieszczeń. Pośród nich warto wymienić następujące:

- eliminacja problemu wczesnych odbić od ścian pomieszczenia,
- polepszenie słyszalności między muzykami,
- poprawa zrozumiałości mowy (np. w obiektach sakralnych),
- poprawa obrazu dźwiękowego.

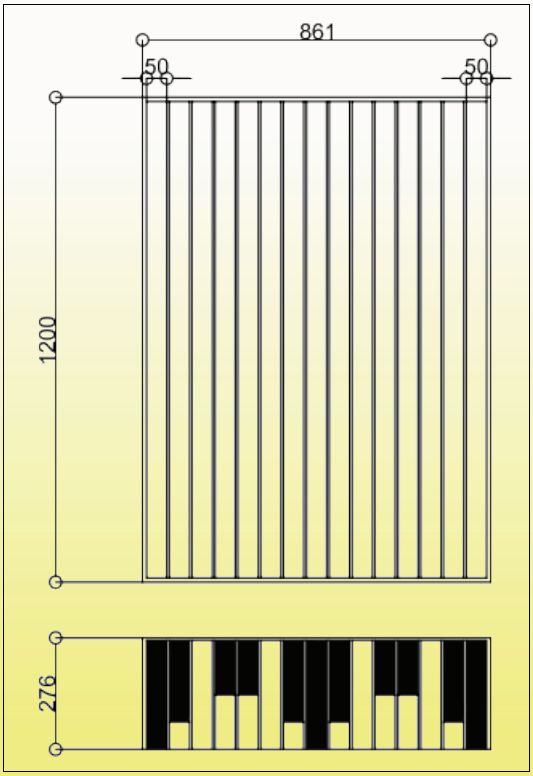
Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

Dyfuzor 1D:

Dyfuzor tego typu rozprasza fale dźwiękowe w jednej płaszczyźnie, w taki sposób, że fala wynikowa ma kształt półwalca. Konstrukcja dyfuzora bazuje na sekwencji residuum kwadratowego o okresie 7. Moduł składa się z określonej liczby studzienek (zależnie od szerokości całego ustroju) o zmiennej głębokości i stałej szerokości. Zakres częstotliwości, w którym dyfuzor działa efektywnie jest ściśle związany z wymiarami geometrycznymi jego studzienek.

Przykładowe rozwiązanie o szerokości studzienki 50 mm i maksymalnej głębokości 270 mm przedstawiono obok (**rysunek 6.6**). Ustrój charakteryzujący się powyższymi wymiarami efektywnie rozprasza fale dźwiękowe z zakresu 360 Hz do 3,4 kHz.

Technologia wykonania dyfuzora tego typu pozwala na skonstruowanie ustroju o wymiarach geometrycznych takich jak w **tabeli 6.3** (poniżej). Należy zaznaczyć, że wpływ na szerokość pasma dyfuzora wpływa szerokość studzienki oraz jej maksymalna głębokość. W ww. tabeli przedstawiono zakres wymiarów dyfuzora oraz związany z nim zakres częstotliwości.



Rysunek 6.4 Dyfuzor 1D – przykładowe wymiary ustroju

Tabela 6.3 Parametry geometryczne a zakres częstotliwości

wymiary geometryczne	zakres [mm]	f_{max} [Hz]	f_{min} [Hz]
wysokość	max 2300	-	-
szerokość studzienki	min 45	3800	-
głębokość maksymalna	max 270	-	360

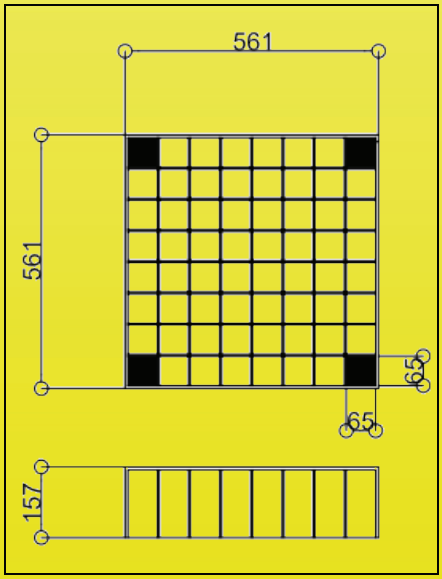
Istnieje także możliwość tworzenia dyfuzorów o większej ilości powtórzeń okresu.

Dyfuzor 2D:

Dyfuzor tego typu rozprasza fale dźwiękowe wszechkierunkowo. Konstrukcja dyfuzora bazuje na sekwencji residuum kwadratowego o okresie 7, przy czym jest ona rozwinięta w dwóch wymiarach. Moduł składa się z określonej liczby studzienek (zależnie od szerokości całego ustroju) o zmiennej głębokości i stałej szerokości. Zakres częstotliwości, w którym dyfuzor działa efektywnie jest ściśle związany z wymiarami geometrycznymi jego studzienek.

Przykładowe rozwiązanie o szerokości studzienki 65 mm i maksymalnej głębokości 150 mm przedstawiono obok (**rysunek 6.7**). Ustrój charakteryzujący się powyższymi wymiarami efektywnie rozprasza fale dźwiękowe z zakresu 980 Hz do 2650 Hz.

Technologia wykonania dyfuzora tego typu pozwala na skonstruowanie ustroju o wymiarach geometrycznych takich jak w **tabeli 6.4** (poniżej). Należy zaznaczyć, że wpływ na szerokość pasma dyfuzo-



Rysunek 6.5 Dyfuzor 2D – przykładowe wymiary ustroju

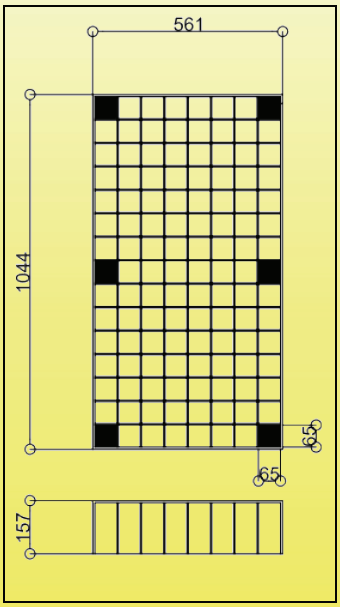
Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

ra wpływa szerokość studzienki oraz jej maksymalna głębokość. W ww. tabeli przedstawiono zakres wymiarów dyfuzora oraz związany z nim zakres częstotliwości.

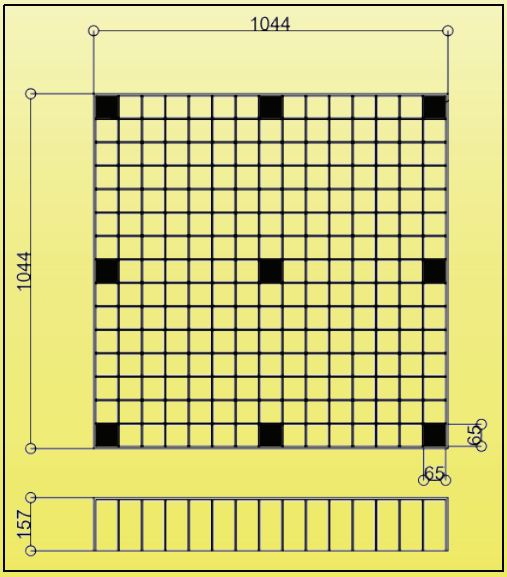
Tabela 6.4 Parametry geometryczne a zakres częstotliwości

wymiary geometryczne	zakres [mm]	f_{max} [Hz]	f_{min} [Hz]
szerokość studzienki	min 45	3800	-
głębokość maksymalna	max 150	-	980

Istnieje także możliwość tworzenia dyfuzorów o większej ilości powtórzeń okresu. Przykładowe rozwiązania zamieszczono na poniższych ilustracjach.



Rysunek 6.6 Dyfuzor 2D – rozszerzenie



Rysunek 6.7 Dyfuzor 2D – rozszerzenie

6.2.2 Rezonansowe ustroje pochłaniające

Do tej rodziny ustrojów zaliczają się perforowane płyty umieszczane w ramach lub projektowane w zależności od potrzeb ustroje szczelinowe.

Produkty tego typu redukują czas pogłosu w wybranym zakresie częstotliwości. Najczęściej stosuje się go dla niskich częstotliwości. Ustrój działa na zasadzie rezonatora Helmholtza, dzięki czemu nie istnieje potrzeba by jego grubość była nazbyt duża. Ustroje projektowane są w taki sposób by pochłaniały padające na nie fale dźwiękowe o zadanej częstotliwości. Wartości współczynnika pochłaniania są większe niż 50 % współczynnika dla częstotliwości rezonansowej w zakresie dwóch lub trzech oktaw.

Ustroje tego typu wykonane są z drewnianych desek o odpowiedniej szerokości i grubości. Użycie drewna jako głównego materiału konstrukcyjnego pozwala na stosowanie ustrojów poza pomieszczeniami, dla których jest przeznaczony (po zaimpregnowaniu desek).

7 Pomiary kontrolne

Pomiary kontrolne mają na celu weryfikację parametrów pola akustycznego po wykonaniu kompletnej adaptacji z wartościami projektowanymi. Wyniki dostarczane są w formie odrębnego opracowania.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

8 Wykorzystywana literatura fachowa

Pośród książek, z których wiedza jest wykorzystywana podczas wykonywania projektów wymienić należy:

[1] - EBU Tech. 3276, *Listening Conditions for the assessment of sound programme material. Monophonic and two-channel stereophonic*, European Broadcasting Union, Genewa 1998

[2] - Ballou R. H., *Handbook for sound engineers: the new audio cyclopedia*, Howard W. Sams & Co, USA 1991

[3] - Everest F. A., *The master handbook of acoustics*, McGraw-Hill, 2001

[4] - Sadowski J., *Akustyka architektoniczna*, PWN, Warszawa, 1976

[5] - Newell P., *Recording studio design*, Focal Press, 2004

[6] - Benson K.B., *Audio Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 1988

Wykorzystywana jest także udostępniona wiedza pracowników naukowych różnych uczelni oraz ITB:

[7] - Bolejko R., *Wpływ kształtu na pole akustyczne wewnątrz przestrzeni ograniczonej*, XLVIII OSA, Wrocław 2001

[8] - Szudrowicz B., *Metody obliczania izolacyjności akustycznej między pomieszczeniami w budynku według PN-EN 12354-1:2002 i PN-EN 12354-2:2002*, ITB Warszawa 2005

[9] - Szudrowicz B., Żuchowicz-Wodnikowska I., Tomczyk P., *Właściwości dźwiękoizolacyjne przegród budowlanych i ich elementów*, ITB Warszawa 2002

[10] - Szudrowicz B., *Projektowanie pod względem akustycznym przegród w budynkach*, ITB Warszawa 1990

[11] - Bolejko R., Mazurkiewicz M., *Studio nagrań Zakładu Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Ochrona przeciwdźwiękowa*, 2004

[12] - Bolejko R., Kozłowski P., *Studio nagrań dźwięku Zakładu Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Wybrane zagadnienia akustyki wnętrza*, 2004

[13] - Rudno-Rudziński K., *Tło akustyczne w studiach fonicznych: zalecenia i sposób obliczania*, V Sympozjum „Nowości w technice audio", 1998

[14] - Dobrucki A., Szmal C., Żółtogórski B., *Projektowanie małych studiów radiowych na przykładzie studia emisyjnego radia Eska Wrocław*, IV Sympozjum „Nowości w technice audio", 1997

[15] - Dobrucki A., *Projektowanie rezonansowych układów pochłaniających*, IV Sympozjum „Nowości w technice audio", 1997

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

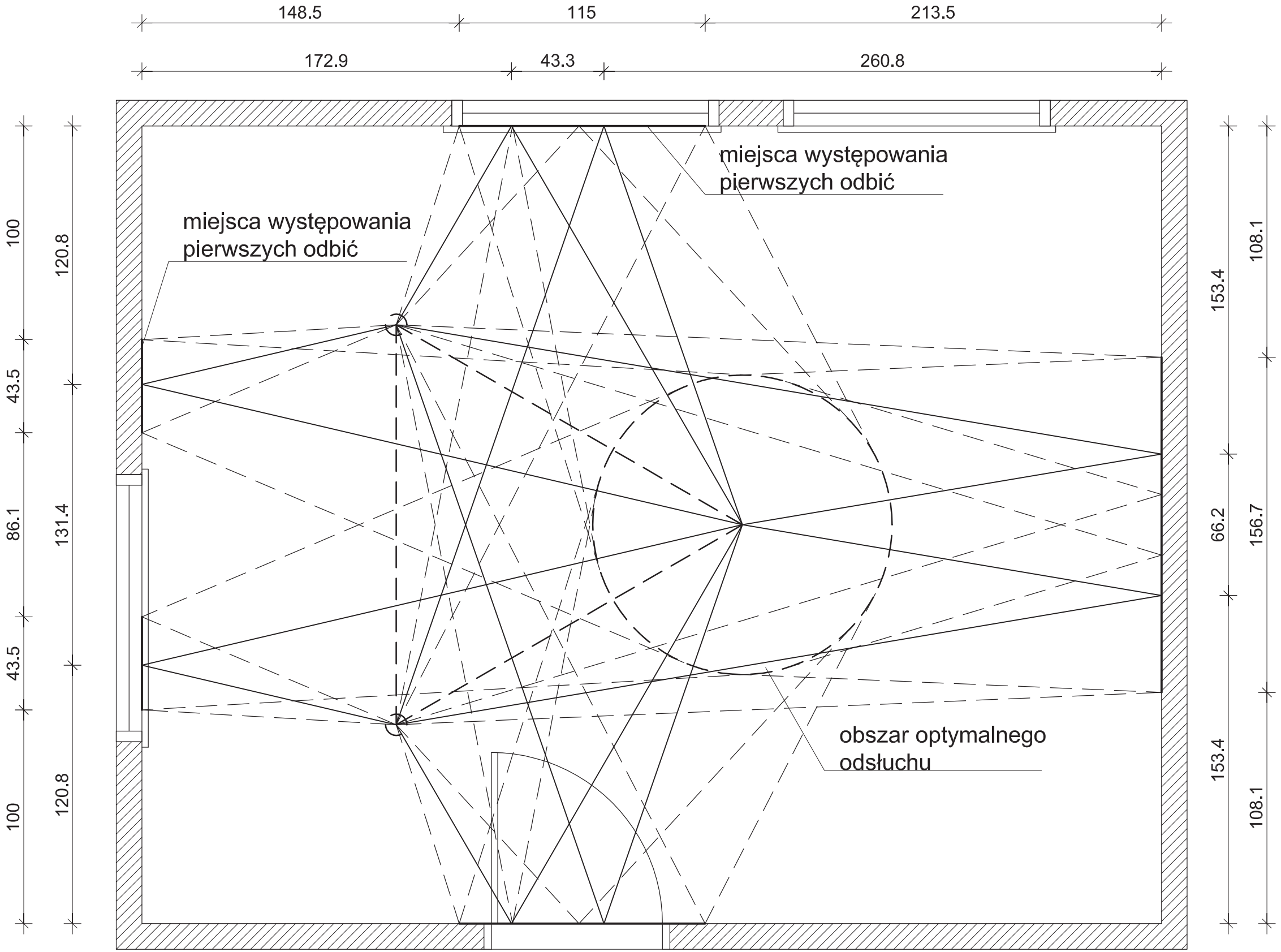
9 Wybrane realizacje

- Projekt adaptacji akustycznej pomieszczeń Laboratorium Hałasu i Wibracji w Stacji Sanitarno-Epidemiologicznej w Tarnobrzegu,
- adaptacja akustyczna sali wideokonferencyjnej (AVON Polska),
- projekt adaptacji akustycznej wielofunkcyjnej sali (kino, teatr, koncerty) w Miejskim Domu Kultury w Mławie,
- projekt adaptacji akustycznej studia nagrań i reżyserni dźwięku w Miejskim Domu Kultury w Mławie,
- adaptacja akustyczna pokoju odsłuchowego w salonie Hi-Fi Nautilus w Piasecznie,
- projekt adaptacji akustycznej wielofunkcyjnej sali w Gminnym Ośrodku Kultury w Kłomnicach,
- pomiary parametrów akustycznych studia sQuat w Chełmie,
- pomiary parametrów akustycznych studia nagrań i reżyserni dźwięku w wydawnictwie WAM w Krakowie,
- projekt akustyczny kabiny dźwiękoizolacyjnej,
- projekt adaptacji akustycznej sali prób orkiestry reprezentacyjnej KWK Adamów w Turku,
- adaptacja akustyczna studia nagrań oraz reżyserni dźwięku w Akademii Sztuk Pięknych we Wrocławiu,
- inne (pokoje odsłuchowe u klientów indywidualnych).

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

Załącznik 1 Przykładowa analiza odbić w pomieszczeniu

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.



METRYKA:

ANALIZA ODBIĆ DŹWIĘKU

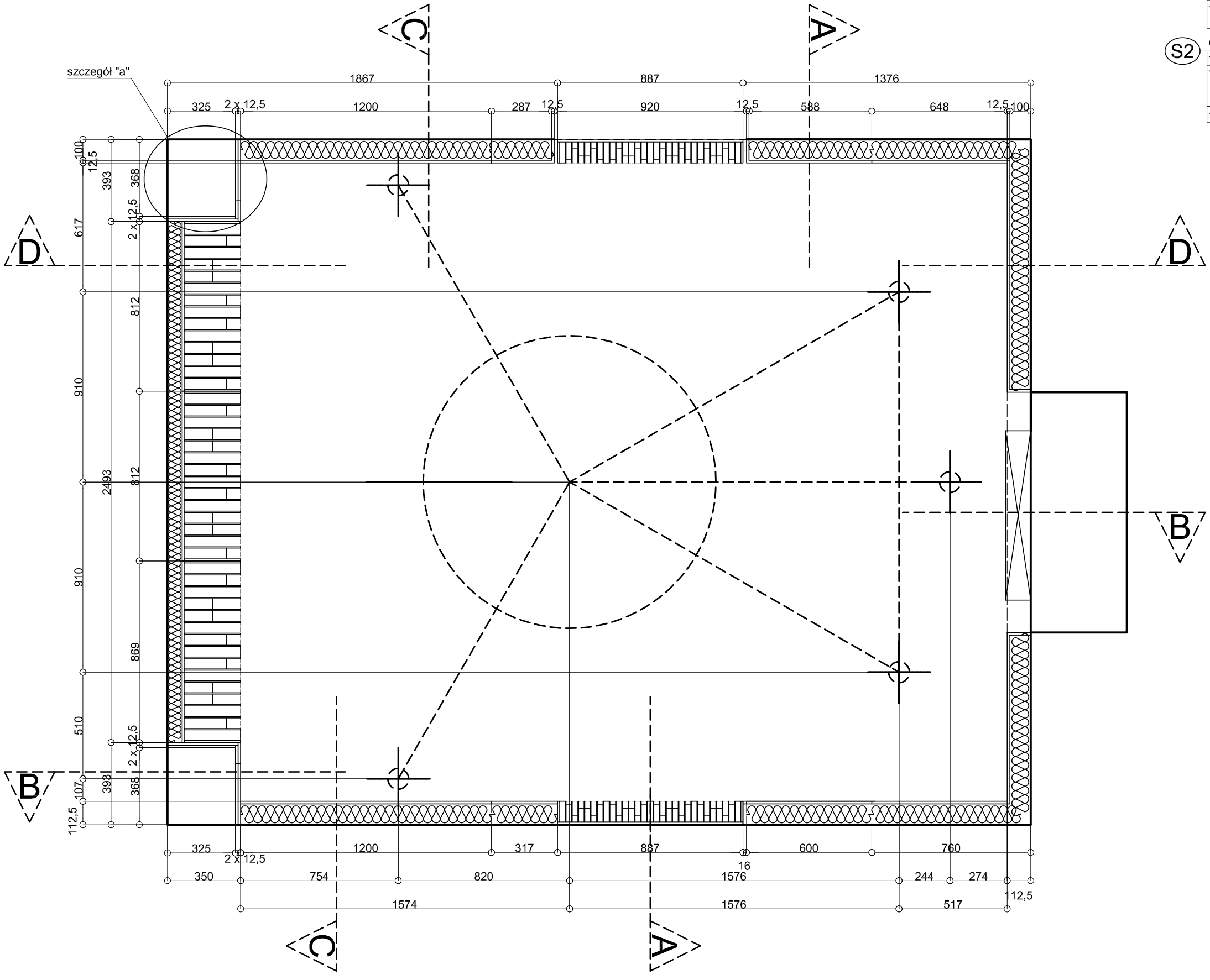
ANALIZA ODBIĆ DŹWIĘKU
SKALA 1:20

AUTOR:
4SOUND, WROCŁAW

WROCŁAW, LUTY'2010 RYS. NR O-1

Załącznik 2 Przykładowy rzut pomieszczenia – pomieszczenie odsłuchowe / reżysernia

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.



S1 OBUDOWA ŚCIENNA NIDA Sonic L5x80 n8

+ istniejąca przegroda
+ ruszt pionowy (metalowe profile CW o rozstawie 300 mm); w świetle rusztu wełna mineralna 80 mm w odległości 10 mm od płyty NIDA Sonic
+ płyta NIDA Sosnic L5x80 n8/GKB 12,5 mm (100 mm od ściany istniejącej)

S2 OBUDOWA ŚCIENNA NIDA Zwykła

+ istniejąca przegroda
+ ruszt pionowy (metalowe profile CW o rozstawie 300 mm); w świetle rusztu wełna mineralna 80 mm w odległości 10 mm od płyty NIDA Zwykła
+ płyta GKB 12,5 mm (100 mm od ściany istniejącej)

METRYKA:

PROJEKT ADAPTACJI AKUSTYCZNEJ
POMIESZCZENIA NA POTRZEBY
REŻYSERNI

RZUT POMIESZCZENIA
SKALA 1:20

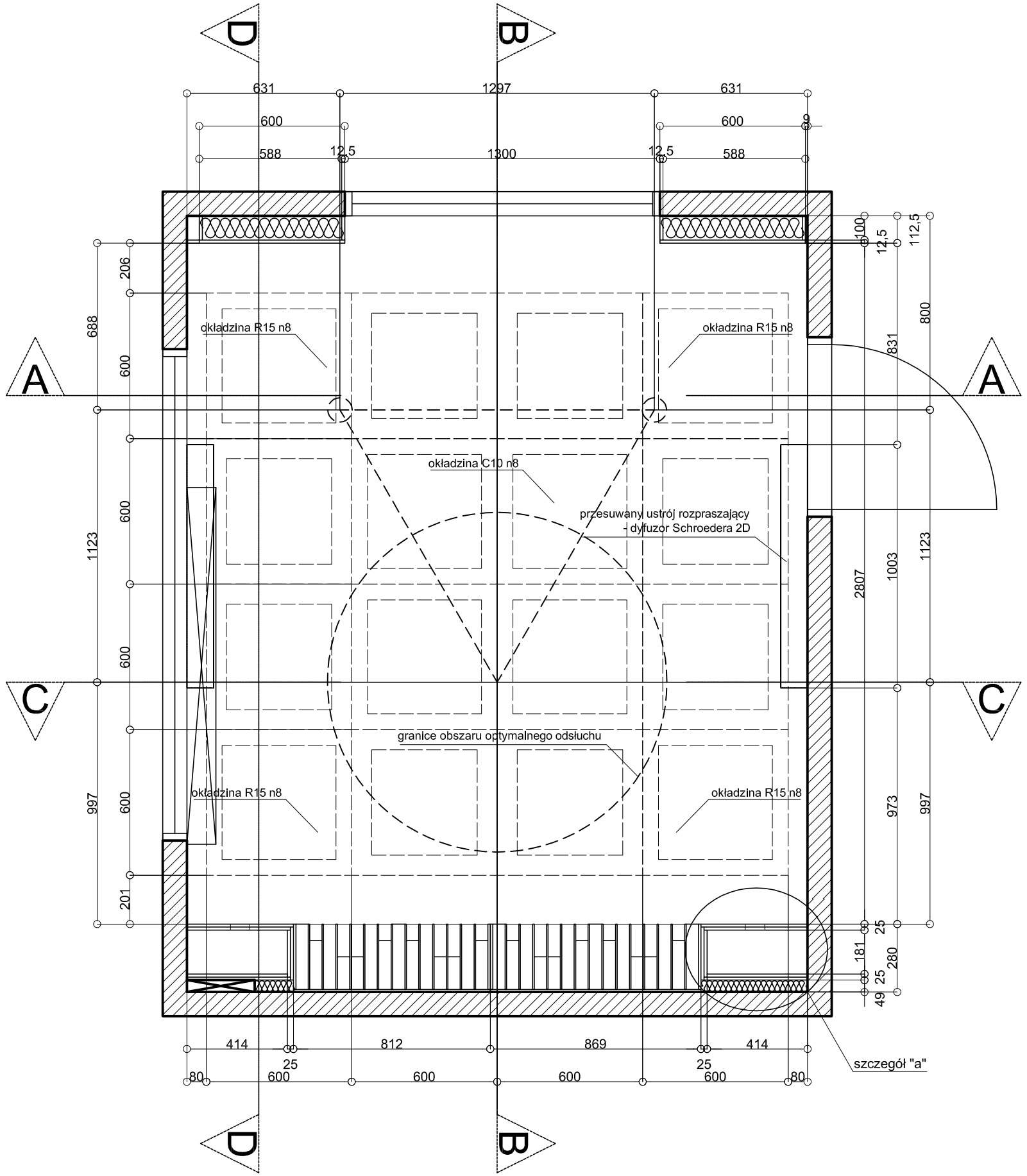
AUTOR:
4SOUND, WROCŁAW

WROCŁAW, CZERWIEC'2009 RYS. NR PR-1

Wszelkie prawa zastrzeżone dla 4SOUND. Niniejszy rysunek nie może być kopiowany, powielany lub publikowany w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.

Załącznik 3 Przykładowy rzut pomieszczenia – reżysernia dźwięku

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsze opracowanie nie może być kopiowane, powielane lub publikowane w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.



S1 OBUDOWA ŚCIENNA NIDA Sonic R15 n8

+ istniejąca przegroda
+ ruszt pionowy (metalowe profile CW o rozstawie 300 mm); w świetle rusztu wełna mineralna 80 mm 10 mm od płyty G-K NIDA Sonic
+ płyta NIDA Sosnic R15 n8/GKB 12,5 mm (100 mm od ściany istniejącej)

S2 OBUDOWA ŚCIENNA NIDA Sonic C10 n8

+ istniejąca przegroda
+ ruszt pionowy (metalowe profile CW o rozstawie 300 mm); w świetle rusztu wełna mineralna 80 mm 10 mm od płyty G-K NIDA Sonic
+ płyta NIDA Sosnic R15 n8/GKB 12,5 mm (100 mm od ściany istniejącej)

D1 SUFIT PODWIESZANY NIDA Sonic C10 n8

+ istniejąca przegroda
+ wieszaki; wełna mineralna 80 mm w odległości 10 mm od płyty G-K NIDA Sonic
+ płyta NIDA Sonic C10 n8 (100 mm od istniejącego sufitu)

D2 SUFIT PODWIESZANY NIDA Sonic R15 n8

+ istniejąca przegroda
+ wieszaki; wełna mineralna 80 mm w odległości 10 mm od płyty G-K NIDA Sonic
+ płyta NIDA Sonic R15 n8 (100 mm od istniejącego sufitu)

METRYKA:

PROJEKT ADAPTACJI AKUSTYCZNEJ
POMIESZCZENIA NA POTRZEBY
STUDIA NAGRAŃ I REŻYSERNI

RZUT REŻYSERNI
SKALA 1:20

AUTOR:
4SOUND, WROCŁAW

WROCŁAW, CZERWIEC'2009 RYS. NR PR-2

Wszelkie prawa zastrzeżone dla 4SOUND. Niniejszy rysunek nie może być kopiowany, powielany lub publikowany w całości ani w części bez pisemnej zgody autora.