

dr inż. Dominik Mleczko¹⁾
ORCID: 0000-0003-4066-9713

The influence of diffuser configuration in a reverberation room on sound absorption coefficient measurements

Wpływ konfiguracji rozpraszaczy w komorze pogłosowej na wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku

DOI: 10.15199/33.2025.08.25

Abstract: The aim of the study was to evaluate the impact of diffuser arrangement in a reverberation room on the values of the sound absorption coefficient determined from reverberation time measurements in accordance with ISO 354. Measurements were carried out for four configurations, both with and without a sound-absorbing sample. The results showed that the diffuser layout can affect the outcomes, particularly at low frequencies, confirming the sensitivity of the measurements to acoustic field conditions.

Keywords: reverberation room; sound absorption coefficient; sound-absorbing materials; room acoustics; methods for testing acoustic properties.

Streszczenie: W artykule zaprezentowano ocenę wpływu rozmieszczenia rozpraszaczy w komorze pogłosowej na wartość współczynnika pochłaniania dźwięku wyznaczanego na podstawie czasu pogłosu zgodnie z ISO 354. Badania wykonano w czterech konfiguracjach, z materiałem pochłaniającym i bez. Wykazano, że układ rozpraszaczy może wpływać na uzyskiwane wyniki, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, co potwierdza wrażliwość pomiarów na warunki pola akustycznego.

Słowa kluczowe: komora pogłosowa; współczynnik pochłaniania dźwięku; materiały dźwiękochłonne; akustyka wnętrz; metodyka badania właściwości akustycznych.

Reverberation rooms are spaces used for laboratory testing of the acoustic properties of materials, including the sound absorption coefficient determined using the reverberation method. Measurements carried out under such conditions must comply with the requirements of the PN-EN ISO 354:2005 standard, which specifies the need to ensure an appropriately diffuse acoustic field. In practice, this means striving for the most uniform possible distribution of sound energy in space and an isotropic distribution of sound intensity, resulting from the interference of incident and reflected waves from various directions.

Since achieving a perfectly diffuse field under real conditions is not possible, ISO 354 [1] includes construction guidelines to approximate such conditions – e.g. a minimum volume of the room and the absence of parallel surfaces with low sound absorption. To further improve diffusion – especially in the low-frequency range – the use of suspended diffusing elements, so-called diffusers, is recommended [1, 2].

The sound absorption coefficient is a key parameter used in the design of room acoustic adaptations. It is important both in spaces with qualified acoustics (e.g. recording studios, concert halls) and in buildings where the goal is to reduce noise by limiting the energy of reflected sounds.

Studies have shown that the accuracy and repeatability of sound absorption coefficient measurements are strongly de-

komory pogłosowe są pomieszczeniami wykorzystywanymi do laboratoryjnych badań właściwości akustycznych materiałów, w tym współczynnika pochłaniania dźwięku wyznaczanego metodą pogłosową. Pomiaru wykonywane w takich warunkach muszą być zgodne z wymaganiami normy PN-EN ISO 354:2005, która określa konieczność zapewnienia odpowiednio rozproszonego pola akustycznego. W praktyce oznacza to dążenie do możliwie jednorodnego rozkładu energii dźwięku w przestrzeni oraz izotropowego rozkładu intensywności akustycznej, wynikających z interferencji fal padających i odbitych z różnych kierunków.

W związku z tym, że uzyskanie idealnie rozproszonego pola w rzeczywistych warunkach nie jest możliwe, norma ISO 354 [1] zawiera wytyczne konstrukcyjne umożliwiające jego przybliżenie, m.in. minimalną objętość komory, brak równoległych powierzchni o małej chłonności akustycznej. W celu dalszej poprawy rozproszenia, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości – zaleca się stosowanie zawieszanych elementów rozpraszających, tzw. rozpraszaczy [1, 2].

Współczynnik pochłaniania dźwięku jest kluczowym parametrem stosowanym przy projektowaniu adaptacji akustycznych pomieszczeń. Ma znaczenie zarówno w przestrzeniach o akustyce kwalifikowanej (np. studiach nagrań, salach koncertowych), jak i w obiektach budowlanych, w których celem jest redukcja hałasu przez ograniczenie energii odbitych dźwięków. Badania wykazały, że dokładność i powtarzalność pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku są silnie uzależnione od

¹⁾ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; dmleczko@agh.edu.pl

pendent on the degree of diffusion of the acoustic field [3÷5]. Significant discrepancies in results have been observed in inter-laboratory tests, despite meeting the standard's geometric and material criteria [6, 7]. These discrepancies mainly concern low frequencies and are associated with the presence of standing waves and insufficient diffusion of sound energy.

The role of diffusers is well known, but the influence of their layout – number, surface area, and location – on the measurement result of the absorption coefficient has not yet been sufficiently documented. This paper presents the results of experimental research aimed at evaluating the effect of diffuser configuration on the value of the sound absorption coefficient determined in a reverberation room in accordance with the standard. The analysis was conducted in the frequency range of 50 Hz to 5000 Hz.

Description of the research facility

For the purpose of the study, a reverberation room with a volume of 176.9 m³ was used, in accordance with the procedure described in [1]. The geometry of the room meets the requirements of the standard, including the minimum volume and the absence of parallel surfaces. The Schroeder frequency, calculated based on the room volume and the average reverberation time, is approximately 300 Hz. According to the standard, below this frequency the acoustic field may not be sufficiently diffuse. Therefore, sound absorption measurements in the 50 – 250 Hz range should be interpreted with caution, as modal effects and spatial variability may introduce significant uncertainty.

Additional diffusers made of polymethyl methacrylate (PMMA) were used during the study. Four diffuser configurations were tested, differing in total surface area, dimensions, and spatial arrangement.

All other features of the room, including the type of sound source, microphone setup, and measurement positions, were kept unchanged throughout the measurement campaign, and environmental conditions were monitored and remained stable during all measurements.

Measurement methodology

Measurements were conducted in accordance with the procedure described in ISO 354 [1], which involves measuring the reverberation time in two states: with the test sample of the material and in the empty room. The sound absorption coefficient is determined based on the difference in reverberation time between these two conditions.

The reverberation time T_{20} was measured using the interrupted noise method. The measurement microphone was mounted on a rotating arm with a radius of 1.3 m, which enabled signal recording in multiple positions (a total of 44 positions distributed on three horizontal planes at heights of 1.5, 2, and 2.5 m above the floor). For each diffuser configuration, measurements were performed for two different positions of the sound source, resulting in a total of 88 measurement points for each variant.

Temperature, humidity, and atmospheric pressure remained stable throughout the measurement period.

stopnia rozproszenia pola akustycznego [3÷5]. W pomiarach międzylaboratoryjnych odnotowano istotne rozbieżności wyników, mimo spełnienia normowych kryteriów geometrycznych i materiałowych [6, 7]. Rozbieżności te dotyczą przede wszystkim niskich częstotliwości i są związane z występowaniem fal stojących oraz niewystarczającym rozproszeniem energii dźwiękowej.

Rola rozpraszaczy jest dobrze znana, ale wpływ ich rozmieszczenia (liczby, powierzchni i położenia) na wynik pomiaru współczynnika pochłaniania wciąż nie został dostatecznie udokumentowany. W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych, których celem była ocena wpływu konfiguracji rozpraszaczy na wartość współczynnika pochłaniania dźwięku wyznaczanego w komorze pogłosowej zgodnie z normą. Analizę przeprowadzono w zakresie częstotliwości 50 Hz – 5000 Hz.

Opis obiektu badań

Na potrzeby badań wykorzystano komorę pogłosową o objętości 176,9 m³, zgodnie z procedurą opisaną w normie ISO 354 [1]. Geometria komory spełnia wymagania normy, w tym dotyczące minimalnej objętości oraz braku powierzchni równoległych. Częstotliwość Schroedera, obliczona na podstawie objętości komory i średniego czasu pogłosu, wynosi ok. 300 Hz. Zgodnie z normą, poniżej tej częstotliwości pole akustyczne może nie być wystarczająco rozproszone. W związku z tym pomiary współczynnika pochłaniania przy częstotliwości 50 – 250 Hz należy interpretować z ostrożnością, ponieważ efekty modalne i zmienność przestrzenna mogą wprowadzać istotną niepewność.

Podczas badań zastosowano dodatkowe rozpraszacze wykonane z polimetakrylanu metylu (PMMA). Przetestowano cztery konfiguracje rozpraszaczy, różniące się sumaryczną powierzchnią, wymiarami i rozmieszczeniem w pomieszczeniu. Wszystkie pozostałe cechy komory, w tym typ źródła dźwięku, układ mikrofonów i pozycje pomiarowe utrzymywano bez zmian przez cały czas trwania pomiarów, a warunki środowiskowe były monitorowane i pozostały stabilne we wszystkich pomiarach.

Metoda pomiarowa

Pomiary przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w normie ISO 354 [1], która polega na pomiarze czasu pogłosu w dwóch stanach: z próbką badanego materiału oraz w pustej komorze. Współczynnik pochłaniania wyznacza się na podstawie różnicy czasu pogłosu między tymi dwoma warunkami.

Czas pogłosu T_{20} mierzono metodą szumu przerwane. Mikrofon pomiarowy zamontowany na obrotowym ramieniu o promieniu 1,3 m umożliwił rejestrację sygnału w wielu pozycjach (łącznie 44 pozycje rozmieszczone na trzech poziomych płaszczyznach na wysokościach: 1,5; 2 i 2,5 m nad podłogą). W przypadku każdej konfiguracji rozpraszaczy wykonano pomiary w dwóch różnych położeniach źródła dźwięku, co dało łącznie 88 punktów pomiarowych dla każdego wariantu. Temperatura, wilgotność i ciśnienie atmosferyczne pozostawały stabilne przez cały czas trwania pomiarów.

Diffuser configurations and test sample. The four analysed diffuser configurations differed in terms of panel density and spatial arrangement. Variant V0 was the reference configuration, in which no additional diffusing elements were used. In configurations V1, V2, and V3 (figure 1), the number and total surface area of panels were gradually increased: 4 panels with a total surface area of 3.25 m² in V1; 6 panels (7.25 m²) in V2; and 9 panels (11.25 m²) in V3. This arrangement enabled the analysis of how increasing the degree of diffusion affects the reliability of sound absorption coefficient measurements. The total double-sided surface area of panels in variant V3 was 22.5 m², which corresponds to approximately 13% of the total surface area of the room (170 m²) and approaches the lower limit recommended in ISO 354.

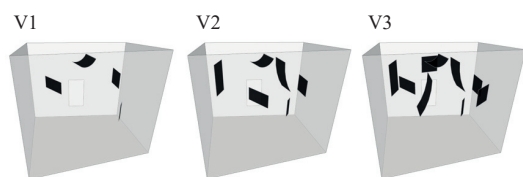


Fig. 1. Arrangement of diffusing elements in variants V1–V3
Rys. 1. Rozmieszczenie elementów rozpraszających w wariantach V1 – V3

The selection of diffuser configurations took into account the general recommendations included in Annex A of the ISO 354, which state that the total surface area of diffusing elements should be increased until the results stabilise in the frequency range 500 – 5000 Hz. In the study, three variants with different diffusing surface areas were used, increasing in steps (approximately 4–5 m²), which corresponds to the guideline of gradually increasing diffuser density. The use of specific, predefined layouts resulted from the adopted research concept, which focused on comparing a limited number of representative cases rather than continuously analysing the point of stabilisation. This approach remains consistent with the intention of the standard and allows for the assessment of the influence of geometry and density of diffusing elements on the acoustic field characteristics in the room.

The same test sample of material was used in all measurements. It was placed on the floor in the central part of the reverberation room, and its total surface area was 10 m², which meets the requirements of ISO 354 [1]. The shape and position of the sample remained unchanged in all diffuser configurations to ensure comparability of results.

Measurement uncertainty

The sound absorption coefficient determined in a reverberation room is a function of the reverberation times measured under two conditions: with the tested sample and without it. Therefore, the total uncertainty of the result is related to the uncertainty of these two measurements [8].

Assuming no correlation between the input quantities, the combined uncertainty can be determined based on the law of propagation of uncertainty [9]:

$$u = \sqrt{u_{T1}^2 + u_{T2}^2} \quad (1)$$

Konfiguracje rozpraszaczy i próbka testowa. Cztery analizowane konfiguracje rozpraszaczy różniły się stopniem zagęszczenia oraz rozmieszczeniem paneli. Wariant V0 stanowił konfigurację referencyjną, w której nie zastosowano żadnych dodatkowych elementów rozpraszających. W konfiguracjach V1, V2 i V3 (rysunek 1) sukcesywnie zwiększano liczbę oraz łączną powierzchnię paneli: odpowiednio 4 panele o łącznej powierzchni 3,25 m² w V1; 6 paneli (7,25 m²) w V2 oraz 9 paneli (11,25 m²) w V3. Taki układ umożliwił analizę wpływu narastającego stopnia rozproszenia na wiarygodność pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku. Łączna obustronna powierzchnia paneli w wariantcie V3 wynosiła 22,5 m², co stanowi ok. 13% całkowitej powierzchni komory (170 m²) i zbliża się do dolnej granicy zalecanej w normie ISO 354.

Dobór konfiguracji rozpraszaczy uwzględnił ogólne zalecenia zawarte w załączniku A normy ISO 354, zgodnie z którymi łączna powierzchnia elementów dyfuzyjnych powinna być zwiększana aż do uzyskania stabilizacji wyników w paśmie częstotliwości 500 – 5000 Hz. W badaniu przyjęto trzy warianty o zróżnicowanej powierzchni rozpraszającej, zwiększanej skokowo (w przybliżeniu co 4–5 m²), co odpowiada wskazówkom dotyczącym stopniowego zwiększania zagęszczenia rozpraszaczy. Zastosowanie konkretnych, z góry określonych, układów wynikało z przyjętej koncepcji badawczej, polegającej na porównaniu ograniczonej liczby reprezentatywnych przypadków, a nie na ciągłej analizie punktu stabilizacji. Przyjęte podejście pozostaje zgodne z intencją normy i umożliwia ocenę wpływu geometrii i zagęszczenia elementów rozpraszających na charakterystykę pola akustycznego w komorze.

Ta sama próbka testowa materiału była wykorzystywana we wszystkich pomiarach. Umieszczono ją na podłodze w centralnej części komory pogłosowej, a jej całkowita powierzchnia wynosiła 10 m², co spełnia wymagania normy ISO 354 [1]. Kształt i położenie próbki pozostawały niezmiennie we wszystkich konfiguracjach rozpraszaczy, aby zapewnić porównywalność wyników.

Niepewność pomiarowa

Współczynnik pochłaniania dźwięku wyznaczany w komorze pogłosowej jest funkcją czasów pogłosu zmierzonych w dwóch warunkach: z badaną próbką oraz bez niej. Całkowita niepewność wyniku jest zatem powiązana z niepewnościami tych dwóch pomiarów [8]. Zakładając brak korelacji między wielkościami wejściowymi, niepewność złożoną można wyznaczyć na podstawie prawa propagacji niepewności [9]:

$$u = \sqrt{u_{T1}^2 + u_{T2}^2} \quad (1)$$

gdzie u_{T1} oraz u_{T2} oznaczają standardowe niepewności czasów pogłosu zmierzonych odpowiednio w pustej komorze oraz z próbką. Wartości te obliczono na podstawie odchylenia standardowego wyników oraz rozkładu t-Studenta:

$$U_T = \frac{s_r}{\sqrt{n}} t_{(n-1; 0.975)} \quad (2)$$

where u_{T1} and u_{T2} represent the standard uncertainties of the reverberation times measured in the empty room and with the sample, respectively. These values were calculated based on the standard deviation of results and the Student's t-distribution:

$$U_T = \frac{s_T}{\sqrt{n}} t_{(n-1;0,975)} \quad (2)$$

Based on previous studies conducted in the same reverberation room and in accordance with the guidelines of ISO 354 [1], a value of ± 0.05 was adopted as a conservative estimate of the expanded uncertainty (for a coverage factor $k = 2$) of the sound absorption coefficient α . This value corresponds to the typical level of uncertainty obtained in measurements conducted in compliance with the standard and allows for a visual assessment of the significance of differences between diffuser configurations.

Other potential sources of uncertainty, such as measurement system calibration, repeatability of sample placement, and environmental conditions, were considered negligible. The influence of the room geometry and the accuracy of sample surface area determination were also omitted, as these values remained constant.

Measurement results

Based on the measurements, T_{20} reverberation times were obtained and used to calculate the sound absorption coefficients for the four diffuser configurations (V0–V3). To assess the significance of differences between configurations, the non-parametric Kruskal-Wallis test was applied [10]. Measurements were carried out both with and without the sample, in accordance with the standard procedure.

Reverberation time T_{20} . Figure 2 shows the standard deviation of T_{20} as a function of frequency for configurations with and without the sample.

The highest variability was observed in variant E_V0, especially below 315 Hz. In the frequency range up to approx. 250 Hz, the configuration without diffusers (V0) exhibited the largest standard deviations. The introduction of

Na podstawie wcześniejszych badań przeprowadzonych w tej samej komorze oraz zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie ISO 354 [1], przyjęto wartość $\pm 0,05$ jako konserwatywne oszacowanie niepewności rozszerzonej (w przypadku współczynnika rozszerzającego $k = 2$) współczynnika pochłaniania dźwięku α . Wartość ta odpowiada typowemu poziomowi niepewności uzyskiwanemu w pomiarach wykonywanych zgodnie z normą i umożliwia wizualną ocenę istotności różnicy pomiędzy konfiguracjami rozpraszaczy.

Pozostałe potencjalne źródła niepewności, takie jak kalibracja systemu pomiarowego, powtarzalność ułożenia próbki oraz wpływ warunków środowiskowych, uznano za pomijalne. Wpływ geometrii komory oraz dokładności wyznaczenia powierzchni próbki również pominięto, gdyż wartości te pozostawały stałe.

Wyniki pomiarów

Na podstawie pomiarów otrzymano wyniki czasu pogłosu T_{20} oraz obliczono na ich podstawie współczynniki pochłaniania dźwięku w przypadku czterech konfiguracji rozpraszaczy (V0–V3). Do oceny istotności różnic pomiędzy konfiguracjami zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa [10]. Pomiarów dokonano w konfiguracjach z próbką i bez niej, zgodnie z procedurą normową.

Czas pogłosu T_{20} . Na rysunku 2 przedstawiono odchylenie standardowe T_{20} w funkcji częstotliwości w przypadku wariantów z materiałem i bez. Zaobserwowano największą zmienność wariantu E_V0, szczególnie poniżej 315 Hz. W zakresie częstotliwości do ok. 250 Hz konfiguracja bez rozpraszaczy (V0) wykazywała największe odchylenie standardowe. Wprowadzenie rozpraszaczy wiązało się miejscami z niewielkim obniżeniem zmienności, ale efekt ten nie był jednoznaczny we wszystkich pasmach. W konfiguracjach z materiałem pochłaniającym zmienność była mniejsza i mniej wrażliwa na układ rozpraszaczy.

Test Kruskala-Wallisa wykazał istotne różnice w T_{20} do częstotliwości 315 Hz ($p < 0,05$), szczególnie w pasmach 100 Hz

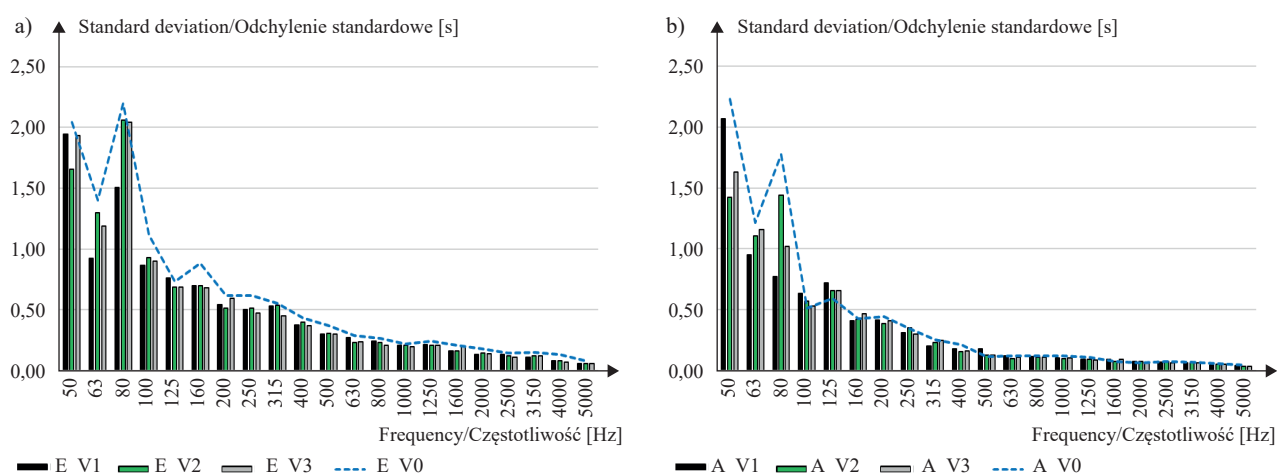


Fig. 2. Standard deviation values of T_{20} for configurations: a) without (E_V0–E_V1); b) with absorbing material (A_V0 – A_V1)
Rys. 2. Odchylenie standardowe T_{20} w przypadku konfiguracji: a) bez (E_V0 – E_V1); b) z materiałem pochłaniającym (A_V0 – A_V1)

diffusers was associated in some cases with a slight reduction in variability, but this effect was not consistent across all frequency bands. In the configurations with the absorbing material, variability was lower and less sensitive to the diffuser layout.

The Kruskal-Wallis test revealed significant differences in T20 up to a frequency of 315 Hz ($p < 0.05$), especially in the 100 Hz ($p = 0.0016$), 125 Hz ($p = 0.0008$), and 250 Hz ($p = 0.0007$) bands. For higher frequencies, the differences were not significant. For the configuration with the material, significant differences were also observed at low frequencies, including 80 Hz ($p = 2.8 \times 10^{-8}$), 100 Hz ($p = 1.7 \times 10^{-9}$), and 125 Hz ($p = 8.8 \times 10^{-4}$).

Sound absorption coefficient α To visually assess the impact of diffuser configuration on the measurement result, figure 3 presents the sound absorption coefficient α for configurations V1–V3 along with the reference curve for variant V0. The ± 0.05 interval marked around it (red bars) corresponds to the adopted expanded uncertainty.

For frequencies from 50 to 3150 Hz, the values of the sound absorption coefficient α for configurations V1–V3 fall within the adopted expanded uncertainty limits (± 0.05) relative to the reference configuration V0. Exceptions are the 4000 Hz and 5000 Hz bands, where α values for variants V1–V3 exceed the upper limit of this range, which may indicate an influence of diffuser layout on the measurement result at higher frequencies. This type of effect is consistent room with physical expectations, since at shorter wavelengths the diffusing elements are more effective at modifying the acoustic field distribution. In the 125–315 Hz band, some α values approach the limits of the adopted uncertainty but do not exceed them. These differences should be interpreted with caution, considering both the possible influence of the diffuser layout and the increased variability typical at lower frequencies, where the acoustic field in the room may not be fully diffuse. The table below presents values of the sound absorption coefficient α for the four diffuser configurations (V0–V3) along with the corresponding expanded uncertainties (U_c), estimated according to EA-4/02 [11].

Most often in the bands above 400 Hz, the obtained α values are high and close to 1.0, and the differences between the variants do not exceed the measurement uncertainty. This indicates good repeatability of the results and a minor influence of the diffuser configuration.

In the case of low frequencies (50 – 250 Hz), greater discrepancies between configurations are visible, as α values differ by up to 0.13 (e.g. 80 Hz: V2 – 0.14 vs V3 – 0.01). In several bands, these differences exceed the value of the expanded uncertainty, which may indicate a real influence of the diffuser arrangement on the homogeneity of the acoustic field and, consequently, on the measurement result.

($p = 0.0016$), 125 Hz ($p = 0.0008$) i 250 Hz ($p = 0.0007$). W przypadku wyższych częstotliwości różnice nie były istotne. W przypadku wariantu z materiałem uzyskano również istotne różnice w niskich częstotliwościach, m.in. 80 Hz ($p = 2.8 \times 10^{-8}$), 100 Hz ($p = 1.7 \times 10^{-9}$), 125 Hz ($p = 8.8 \times 10^{-4}$).

Współczynnik pochłaniania dźwięku α . W celu wizualnej oceny wpływu konfiguracji rozpraszaczy na wynik pomiaru, rysunek 3 przedstawia współczynnik pochłaniania dźwięku α w przypadku wariantów V1–V3 wraz z krzywą odniesienia wariantu V0. Zaznaczony wokół niej przedział ± 0.05 (czerwone słupki) odpowiada przyjętej niepewności rozszerzonej.

W przypadku częstotliwości 50 – 3150 Hz, wartości współczynnika pochłaniania dźwięku α dla konfiguracji V1–V3 mieszczą się w granicach przyjętej niepewności rozszerzonej (± 0.05) względem konfiguracji odniesienia V0. Wyjątek stanowią pasma 4000 i 5000 Hz, w których wartości α wariantów V1–V3 przekraczają górną granicę tego przedziału,

co może świadczyć o wpływie rozmieszczenia rozpraszaczy na wynik pomiaru w przypadku wyższych częstotliwości. Tego typu efekt jest zgodny z oczekiwaniami fizycznymi, ponieważ przy mniejszej długości fal elementy rozpraszające są bardziej efektywne w modyfikowaniu rozkładu pola akustycznego. W paśmie 125 – 315 Hz niektóre wartości α zbliżają się do granic przyjętej niepewności, lecz ich nie przekraczają. Różnice te należy interpretować ostrożnie, z uwzględnieniem zarówno możliwego

wpływu układu rozpraszaczy, jak i zwiększonej zmienności wyników, typowej przy niższej częstotliwości, w których pole akustyczne w komorze może nie być w pełni rozproszone. Tabela zawiera wartości współczynnika pochłaniania dźwięku α w przypadku czterech konfiguracji rozpraszaczy (V0–V3) oraz odpowiadające im niepewności rozszerzone (U_c), oszacowane zgodnie z przewodnikiem EA-4/02 [11].

Najczęściej w pasmach powyżej 400 Hz uzyskane wartości α są bliskie 1,0, a różnice między wariantami nie przekraczają niepewności pomiarowej. Wskazuje to na dobrą powtarzalność wyników oraz niewielki wpływ konfiguracji rozpraszaczy. W przypadku niskich częstotliwości (50 – 250 Hz) widoczne są większe rozbieżności pomiędzy konfiguracjami, gdyż wartości α różnią się nawet o 0,13 (np. 80 Hz: V2 – 0,14 vs. V3 – 0,01). W kilku pasmach różnice te przekraczają wartość niepewności rozszerzonej, co może świadczyć o rzeczywistym wpływie układu rozpraszaczy na jednorodność pola akustycznego i tym samym na wynik pomiaru.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono eksperymentalną ocenę wpływu rozmieszczenia rozpraszaczy na wyznaczone wartości współczynnika pochłaniania dźwięku metodą pogłosową. Przeanaliz-

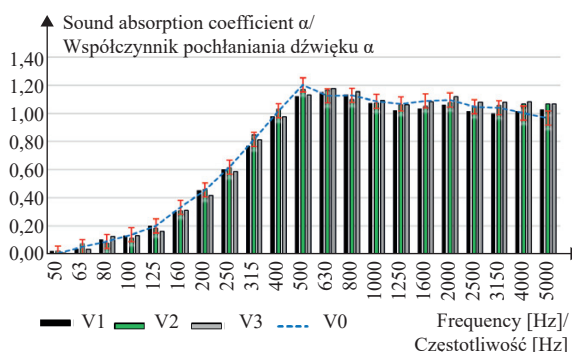


Fig. 3. Sound absorption coefficient α as a function of frequency for configurations V1–V3

Rys. 3. Współczynnik pochłaniania dźwięku α w funkcji częstotliwości w przypadku konfiguracji V1–V3

Values of the sound absorption coefficient α and the expanded uncertainty U_c ($k = 2$) for configuration V0–V3 as a function of frequency
Wartości współczynnika pochłaniania dźwięku α oraz niepewności rozszerzonej U_c ($k = 2$) w przypadku konfiguracji V0–V3 w funkcji częstotliwości

f [Hz]	V0		V1		V2		V3	
	α	U_c	α	U_c	α	U_c	α	U_c
50	0.01	0.42	0.02	0.40	0.03	0.36	0.01	0.40
63	0.05	0.25	0.04	0.21	0.08	0.28	0.04	0.25
80	0.09	0.42	0.10	0.32	0.08	0.45	0.13	0.42
100	0.14	0.23	0.13	0.19	0.11	0.19	0.13	0.21
125	0.20	0.15	0.20	0.17	0.18	0.15	0.16	0.15
160	0.33	0.19	0.30	0.13	0.31	0.17	0.31	0.15
200	0.46	0.13	0.45	0.11	0.46	0.11	0.42	0.13
250	0.62	0.13	0.60	0.11	0.61	0.11	0.59	0.11
315	0.82	0.13	0.77	0.11	0.85	0.11	0.81	0.11
400	1.02	0.08	0.98	0.08	1.03	0.08	0.98	0.08
500	1.20	0.08	1.12	0.06	1.17	0.06	1.13	0.06
630	1.12	0.06	1.15	0.06	1.16	0.04	1.18	0.04
800	1.13	0.06	1.13	0.04	1.10	0.04	1.15	0.04
1000	1.09	0.04	1.07	0.04	1.07	0.04	1.09	0.04
1250	1.07	0.04	1.02	0.04	1.06	0.04	1.06	0.04
1600	1.09	0.04	1.03	0.04	1.05	0.04	1.08	0.04
2000	1.09	0.04	1.06	0.02	1.08	0.02	1.12	0.02
2500	1.05	0.02	1.02	0.02	1.05	0.02	1.08	0.02
3150	1.04	0.04	1.00	0.02	1.06	0.02	1.08	0.02
4000	1.00	0.02	1.01	0.02	1.07	0.02	1.08	0.02
5000	0.97	0.02	1.03	0.02	1.07	0.02	1.07	0.02

Summary

The paper presents an experimental assessment of the impact of diffuser arrangement on the determined values of the sound absorption coefficient using the reverberation method. Four configurations of diffusing panels in the reverberation room were analysed, including a reference variant without panels and three setups with increasing surface area and complexity of element placement.

The analysis showed that the distribution of reverberation time T_{20} exhibited the greatest spatial variability in the reference variant (E_V0), particularly at low frequencies (below 315 Hz). The introduction of diffusers led to a gradual improvement in the homogeneity of the acoustic field, which was confirmed both by the reduction of standard deviation values and by the results of Kruskal-Wallis statistical tests. A comparison of the sound absorption coefficient α spectra for all configurations showed that for frequencies above 400 Hz the differences between variants were small and within the expanded uncertainty limits of ± 0.05 . In the 4000–5000 Hz bands, exceeding this threshold may suggest an influence of diffuser geometry. At lower frequencies (50–250 Hz), the differences between configurations were more pronounced. However, it should be noted that in this range, the acoustic field is not fully diffuse (below the Schroeder frequency), which results in greater dispersion of results and susceptibility to local wave effects.

zowano cztery konfiguracje paneli rozpraszających w komorze pogłosowej, obejmujące wariant referencyjny bez paneli oraz trzy układy o zwiększającej się powierzchni i złożoności rozmieszczenia elementów.

Analiza wykazała, że rozkład czasu pogłosu T_{20} cechuje się największą zmiennością przestrzenną w wariancie referencyjnym (E_V0), szczególnie w przypadku niskich częstotliwości (poniżej 315 Hz). Wprowadzenie rozpraszaczy prowadziło do stopniowej poprawy jednorodności pola akustycznego, co potwierdzono zarówno przez obniżenie wartości odchylenia standardowego, jak i wynikami testów statystycznych Kruskala-Wallisa. Porównanie widm współczynnika pochłaniania dźwięku α w przypadku wszystkich konfiguracji pokazało, że przy częstotliwości powyżej 400 Hz różnice pomiędzy wariantami były niewielkie i mieściły się w granicach niepewności rozszerzonej $\pm 0,05$. W pasmach 4000 – 5000 Hz przekroczenie tego progu może sugerować wpływ geometrii rozpraszaczy. W niższych częstotliwościach (50 – 250 Hz) różnice pomiędzy konfiguracjami były bardziej wyraźne. Należy jednak uwzględnić to, że pole akustyczne nie jest w tym zakresie w pełni rozproszone (poniżej częstotliwości Schroedera), co skutkuje większym rozrzutem wyników i podatnością na lokalne efekty falowe.

Rozmieszczenie rozpraszaczy miało ograniczony wpływ na wyniki pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku.

The diffuser arrangement had a limited impact on the measured values of the sound absorption coefficient. In the mid-frequency range (400–3150 Hz), differences between configurations were within the measurement uncertainty, indicating low sensitivity of the results to diffuser layout. At higher frequencies (4000–5000 Hz), individual exceedances of the uncertainty threshold were noted, hence further research is needed. At low frequencies (50–250 Hz), greater differences between configurations were observed, but these may result from both the effect of diffusers and the limited uniformity of the acoustic field. The results suggest that appropriately designed and arranged diffusers may help improve the stability of low-frequency measurement results, but their effectiveness depends on the specific geometric and acoustic conditions of the room.

W przypadku średnich częstotliwości (400 – 3150 Hz) różnice pomiędzy konfiguracjami mieściły się w granicach niepewności pomiarowej, co wskazuje na niewielką wrażliwość wyników na układ rozpraszaczy. Przy wyższych częstotliwościach (4000 – 5000 Hz) odnotowano pojedyncze przekroczenia progu niepewności, dlatego też niezbędne są dalsze badania. W zakresie niskich częstotliwości (50 – 250 Hz) zaobserwowano większe różnice pomiędzy konfiguracjami, jednak mogą one wynikać zarówno z wpływu rozpraszaczy, jak i z ograniczonej jednorodności pola akustycznego. Wyniki sugerują, że odpowiednio zaprojektowane i rozmieszczone rozpraszacze mogą przyczynić się do poprawy stabilności wyników pomiarów niskoczęstotliwościowych, ale ich skuteczność zależy od konkretnych warunków geometryczno-akustycznych komory.

The work was financed by a subsidy from the Ministry of Science and Higher Education (No. 16.16.130.942/kmiw).

Praca została sfinansowana z subwencji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr 16.16.130.942/kmiw).

Received: 05.03.2025
Revised: 02.05.2025
Published: 21.08.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 05.03.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.05.2025 r.
Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN ISO 354, „Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room”, 2005.
- [2] Toyoda E, Sakamoto S, Tachibana H. „Effects of room shape and diffusing treatment on the measurement of sound absorption coefficient in a reverberation room”, *Acoust Sci Technol*, t. 25, nr 4, s. 255–266, 2004, doi: 10.1250/ast.25.255.
- [3] Jeong C-H. „Kurtosis of room impulse responses as a diffuseness measure for reverberation chambers”, *J Acoust Soc Am*, t. 139, nr 5, s. 2833–2841, maj 2016, doi: 10.1121/1.4949365.
- [4] Lautenbach MR, Vercammen ML. „Can we use the standard deviation of the reverberation time to describe diffusion in a reverberation chamber? ”, 2013, s. 015054–015054. doi: 10.1121/1.4800319.
- [5] Zhang S, Lee J. „Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and Its Variation with Fine-Resolution Measurements”, *Buildings*, t. 11, nr 11, s. 519, lis. 2021, doi: 10.3390/buildings11110519.
- [6] Scrosati C i in. „Towards more reliable measurements of sound absorption coefficient in reverberation rooms: An Inter-Laboratory Test”, *Applied Acoustics*, t. 165, s. 107298, sie. 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107298.
- [7] Bradley DT, Müller-Trapet M, Adelgren J, Vorländer M. „Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers”, *J Acoust Soc Am*, t. 135, nr 4, s. 1898–1906, kwi. 2014, doi: 10.1121/1.4866291.
- [8] Mleczko D, Wszolek T. „Variability influence of input parameters on result of room acoustic calculation”, *Acta Phys Pol A*, t. 118, nr 1, 2010, doi: 10.12693/APhysPolA.118.128.
- [9] ISO/IEC Guide 98–3:2008 (JCGM/WG1/100), „Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement”, 2008
- [10] Kruskal WH, Wallis WA. „Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis”, *J Am Stat Assoc*, t. 47, nr 260, s. 583–621, grudz. 1952, doi: 10.1080/01621459.1952.10483441.
- [11] European co-operation for Accreditation, „Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, Paris, 2013.