

# Parametry oceny akustyki wnętrz

Opracowała: prof. dr hab. inż. Bożena Kostek

# Parametry oceny akustyki wnętrz

Ocena akustyki pomieszczeń wymaga zdefiniowania zestawu parametrów, umożliwiających porównanie ich wartości dla różnych wnętrz. Ogólnie parametry oceny akustyki pomieszczeń można podzielić na parametry obiektywne i subiektywne.

Parametry obiektywne są zdefiniowane wzorami i przyjmują konkretne wartości liczbowe lub można je wyznaczyć na drodze pomiarowej.

Parametry subiektywne związane są z subiektywną oceną właściwości akustycznych pomieszczenia i wyrażane są przez nadanie odpowiednich określeń danemu parametrowi, które charakteryzują daną właściwość akustyczną.

# Parametry obiektywne

- $L_p$  – poziom ciśnienia akustycznego  
(SPL, *Sound Pressure Level*) [dB]

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

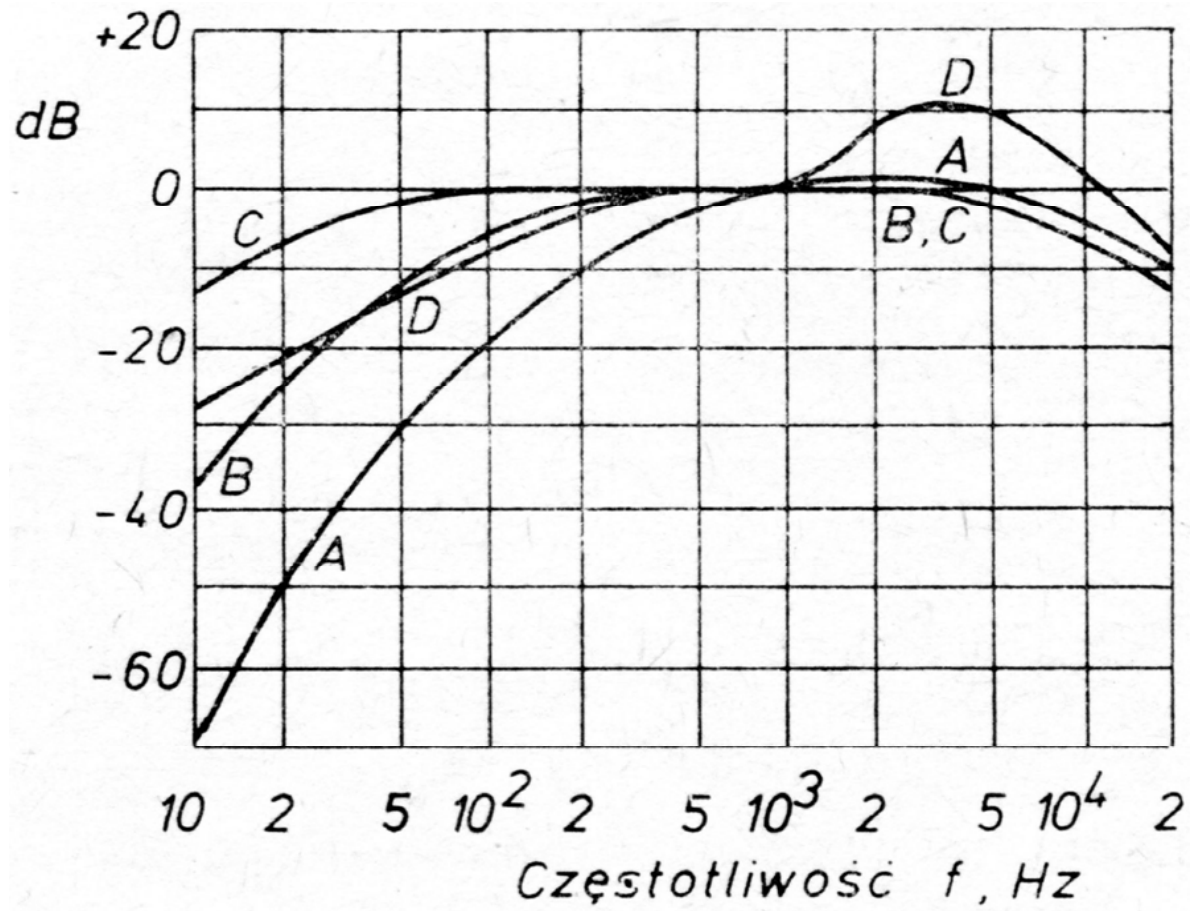
# Parametry obiektywne

Wartość odniesienia  $p_0$  wynosi  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Jest to wartość progowa percepcji słuchowej człowieka. Dla takiej wartości skutecznej ciśnienia akustycznego  $p$  poziom ciśnienia akustycznego  $L_p$  wynosi 0 dB. W praktyce parametr ten jest mierzony z odpowiednią korekcją, która ma na celu przybliżenie wyniku pomiaru do faktycznie odbieranego wrażenia słuchowego. Wiąże się to z różną wrażliwością narządu słuchu człowieka na sygnały dźwiękowe przy różnych poziomach ciśnienia akustycznego.

Dla różnych wartości poziomu dźwięku używa się następujących krzywych korekcyjnych:

- 0-55 dB – krzywa korekcyjna A,
- 55-85 dB – krzywa korekcyjna B,
- powyżej 85 dB – krzywa korekcyjna C.

Krzywą korekcyjną D stosuje się w pomiarach dźwięków impulsowych.



# Parametry obiektywne

– T60 – czas pogłosu [s]

Zdefiniowany jest jako czas mierzony od momentu wyłączenia źródła dźwięku w pomieszczeniu, po którym poziom natężenia tego sygnału maleje o 60 dB w stosunku do poziomu wyjściowego. Istnieje wiele wzorów, które pozwalają obliczyć czas pogłosu. Zostały one zoptymalizowane do wykorzystania w przypadku wnętrza o różnej objętości i chłonności akustycznej. W większości pomieszczeń poprawne rezultaty daje użycie wzoru Sabine'a:

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A}$$

gdzie:

$V$  – objętość wnętrza [m<sup>3</sup>],

$A$  – chłonność akustyczna wnętrza.

# Parametry obiektywne

–  $T_{60}$  – czas pogłosu [s]

Chłonność akustyczna  $A$  reprezentuje chłonność całego pomieszczenia i jest obliczana ze wzoru:

$$A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i \quad [\text{m}^2]$$

gdzie:

$S_i$  – powierzchnia  $i$ -tej płaszczyzny ograniczającej wnętrze

$\alpha_i$  – współczynnik pochłaniania  $i$ -tej płaszczyzny (bezwymiarowy).

# Parametry obiektywne

MEAN FREE PATH [m] – średnia ścieżka swobodna  
(średnia odl. pomiędzy powierzchniami)

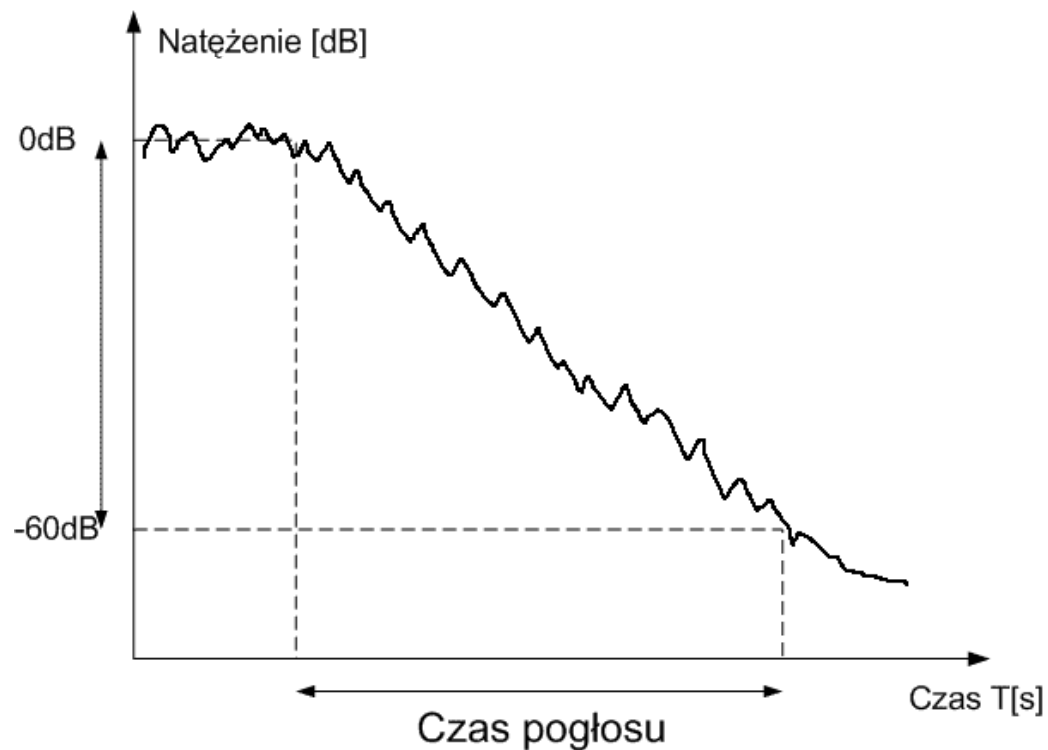
$$MPF=4V/S$$

gdzie: V- objętość [m<sup>3</sup>], S – powierzchnia [m<sup>2</sup>]

T=4V/Sc (c- prędkość rozchodzenia się dźwięku)



# Parametry obiektywne



Krzywa zaniku poziomu natężenia dźwięku po wyłączeniu źródła

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

# Parametry obiektywne

–  $T_{60}$  – czas pogłosu [s]

Wzór zaproponowany przez Sabine'a ma pewne ograniczenia. Powinien być stosowany w przypadku dość dużych pomieszczeń o równomiernej i małej chłonności akustycznej ( $\alpha_{\acute{s}r} < 0,2$ ). W przypadku wnętrz silnie wytłumionych, o małym czasie pogłosu, powinno się stosować wzór Eyringa:

$$T_{60} = \frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\acute{s}r})}$$

gdzie:

$S$  – całkowita powierzchnia wnętrza [m<sup>2</sup>],

$V$  – objętość wnętrza [m<sup>3</sup>],

$\alpha_{\acute{s}r}$  – średni współczynnik pochłaniania (bezwymiarowy).

# Parametry obiektywne

Średni współczynnik pochłaniania  $\alpha_{\acute{s}r}$  jest obliczany ze wzoru:

$$\alpha_{\acute{s}r} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \cdot \alpha_i$$

gdzie:

$S$  – całkowita powierzchnia wnętrza [m<sup>2</sup>],

$S_i$  – powierzchnia  $i$ -tej płaszczyzny ograniczającej wnętrze [m<sup>2</sup>],

$\alpha_i$  – współczynnik pochłaniania  $i$ -tej płaszczyzny (bezwymiarowy).

# Parametry obiektywne

–  $T_{60}$  – czas pogłosu [s]

W przypadku wnętrza o nietypowej wilgotności względnej i objętości większej od 1000 m<sup>3</sup> należy stosować wzór:

$$T_{60} = \frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\acute{s}r}) + 4mV}$$

gdzie:

$S$  – całkowita powierzchnia wnętrza [m<sup>2</sup>],

$V$  – objętość wnętrza [m<sup>3</sup>],

$\alpha_{\acute{s}r}$  – średni współczynnik pochłaniania (bezwymiarowy),

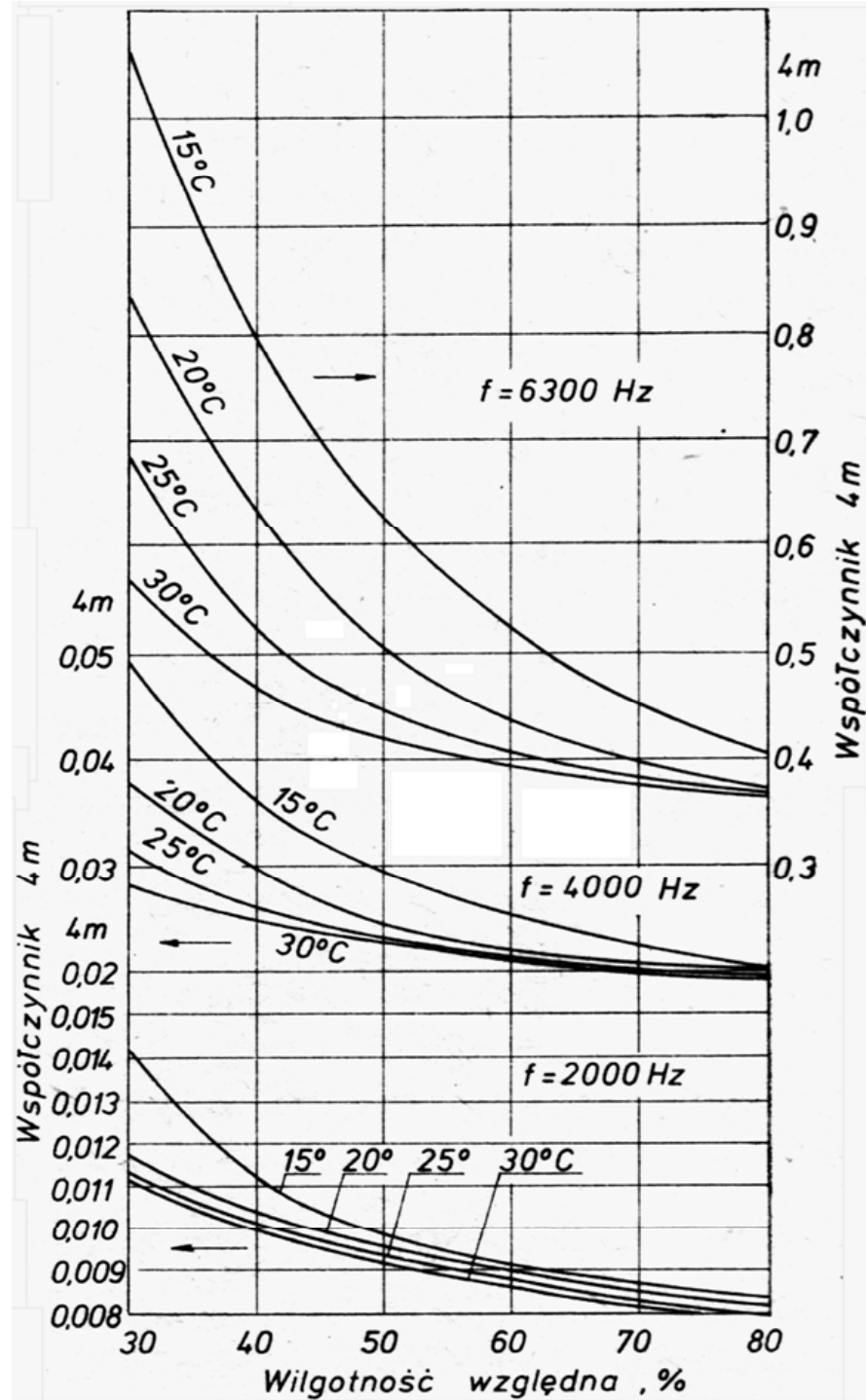
$4m$  – współczynnik zależny od wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu.

# Parametry obiektywne

Wzór Millington-Sette'a

$$T_{60} = \frac{0.16 V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

*Dla  $\alpha_i \ll 1$  wzór przybiera postać wzoru to Sabine'a z  $\alpha_i = \alpha_{(\text{Eyring})i}$ .*



# Parametry obiektywne

–  $T_{60}$  – czas pogłosu [s]

Wszystkie powyższe wzory znajdują zastosowanie w przypadku pomieszczeń, w których chłonności przeciwległych par płaszczyzn ograniczających wewnątrz są w przybliżeniu równe. Oznacza to, że konieczny jest równomierny rozkład i zbliżone właściwości akustyczne elementów kształtujących akustykę wnętrza. Jeżeli w danej sytuacji tak nie jest (np. w przypadku, gdy panele pochłaniające są zgrupowane tylko na jednej ze ścian), należy korzystać ze wzoru Fitzroy'a:

$$T_{60} = \frac{S_x}{S} \left[ \frac{0,161V}{S \ln(1 - \alpha_x)} \right] + \frac{S_y}{S} \left[ \frac{0,161V}{S \ln(1 - \alpha_y)} \right] + \frac{S_z}{S} \left[ \frac{0,161V}{S \ln(1 - \alpha_z)} \right]$$

# Czas pogłosu

---

- **Stosowane w praktyce wzory powinny ponadto pozwolić na określenie czasu pogłosu w przypadku sal wypełnionych publicznością (zbyt duże różnice występujące przy określeniu czasu pogłosu). Opracowanie takich wzorów jest szczególnie oczekiwane przez projektantów akustyki wnętrz.**



# Czas pogłosu

---

**Formuły obliczania czasu pogłosu znane dotychczas nie są w stanie określić trafnie przewidywanego czasu pogłosu w najczęściej w praktyce spotykanych przypadkach, czyli w salach prostopadłościennych o niedyfuzyjnym (nierozproszonym) polu akustycznym.**

**Dla takich przypadków, celem uzyskania wglądu w proces projektowania właściwości akustycznych pomieszczenia, niezbędne jest posługiwanie się przy obliczeniach czasu pogłosu wartościami chłonności dokładniejszymi niż uśrednione.**

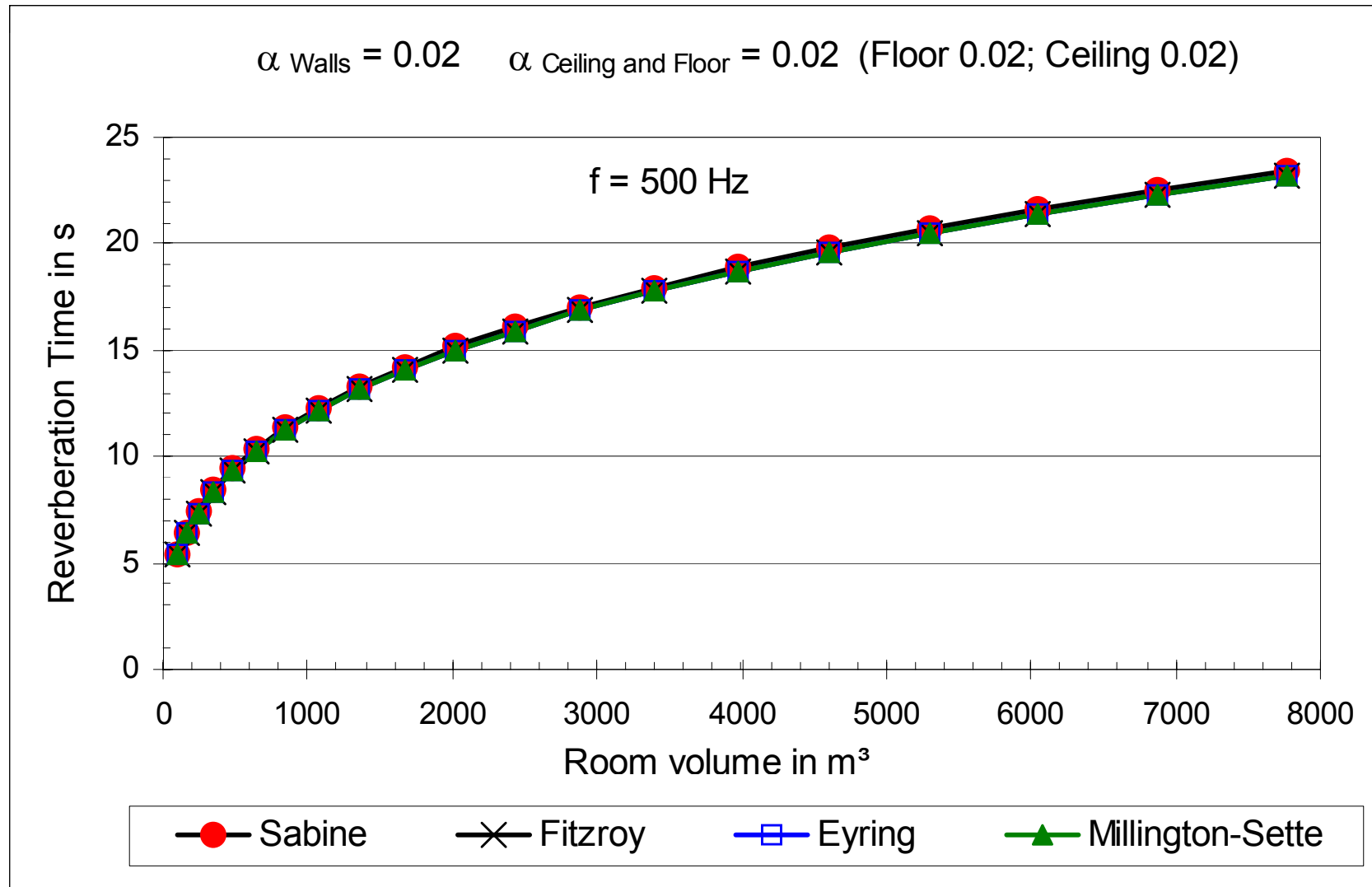
# Analiza czasu pogłosu

**Celem zilustrowania wpływu rozmieszczenia współczynnika pochłaniania w pomieszczeniu prostopadłościennym na wartość czasu pogłosu wyniki obliczeń uzyskanych przy użyciu różnych wzorów zestawiono na rysunkach.**

**Do obliczeń przyjęto najczęściej stosowane wzory na czas pogłosu: Sabine'a, Eyring'a, Millington-Sette'a, Fitzroy'a, Nilssona (norma prEN 12354-6)**

# Analiza czasu pogłosu

## Przypadek I: mała wartość współczynnika pochłaniania



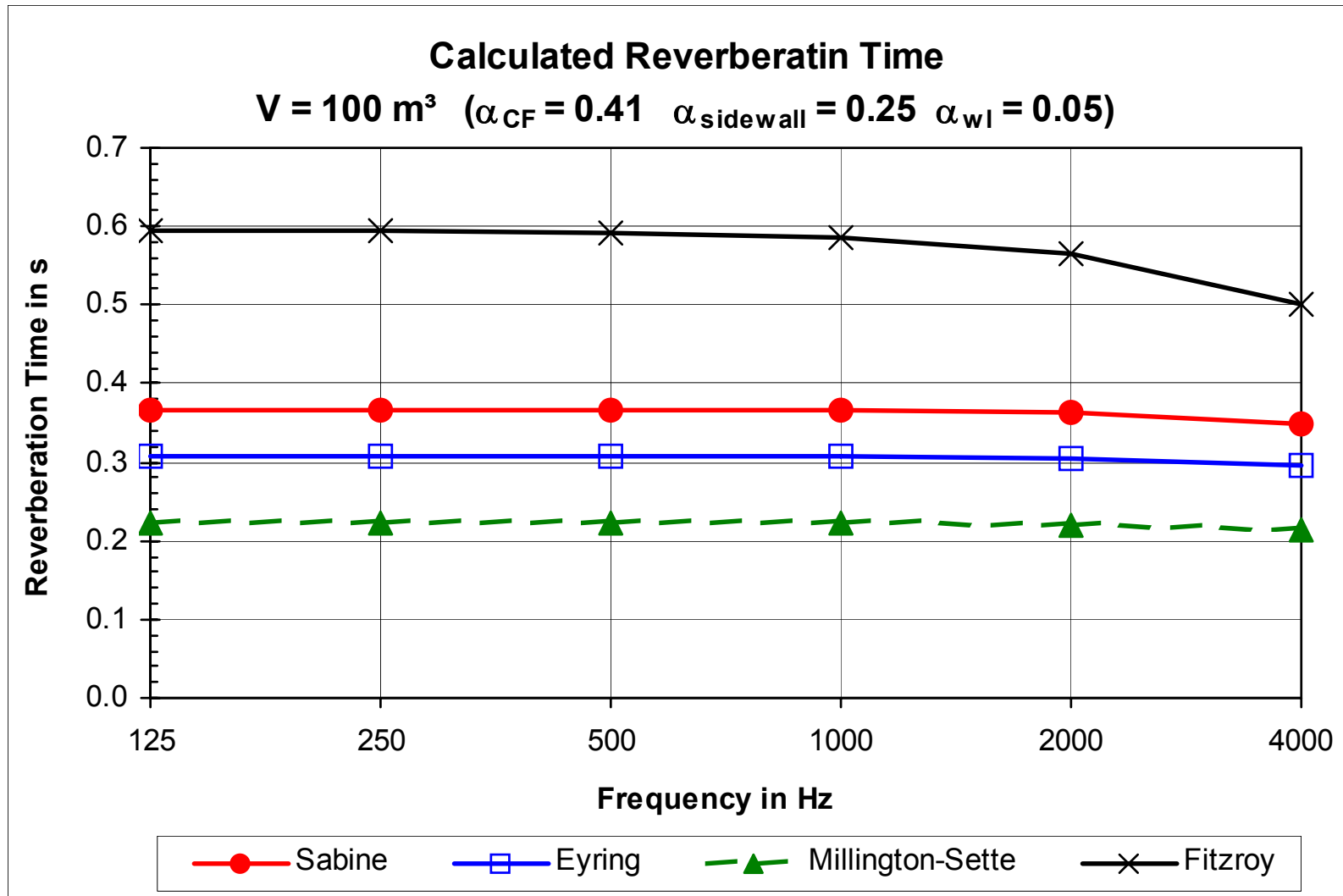
# **Analiza czasu pogłosu**

---

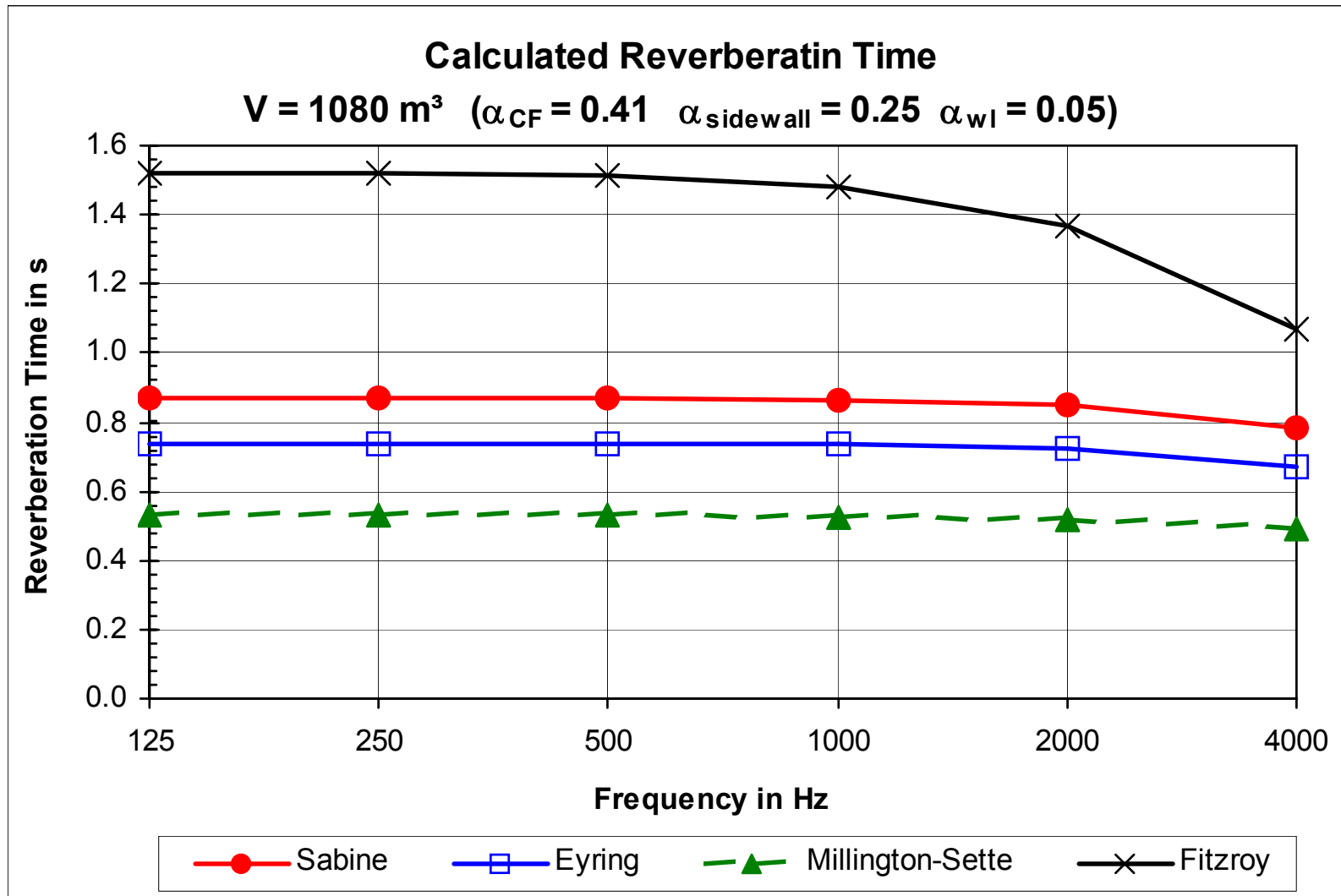
**Jak można zaobserwować, nie ma znaczących różnic pomiędzy otrzymanymi wynikami czasu pogłosu w przypadku małej chłonności akustycznej w pomieszczeniu.**

**Kolejny wykres przedstawia porównanie wyników w przypadku nierównomiernie rozłożonej chłonności akustycznej**

# Analiza czasu pogłosu (małe pomieszczenie)

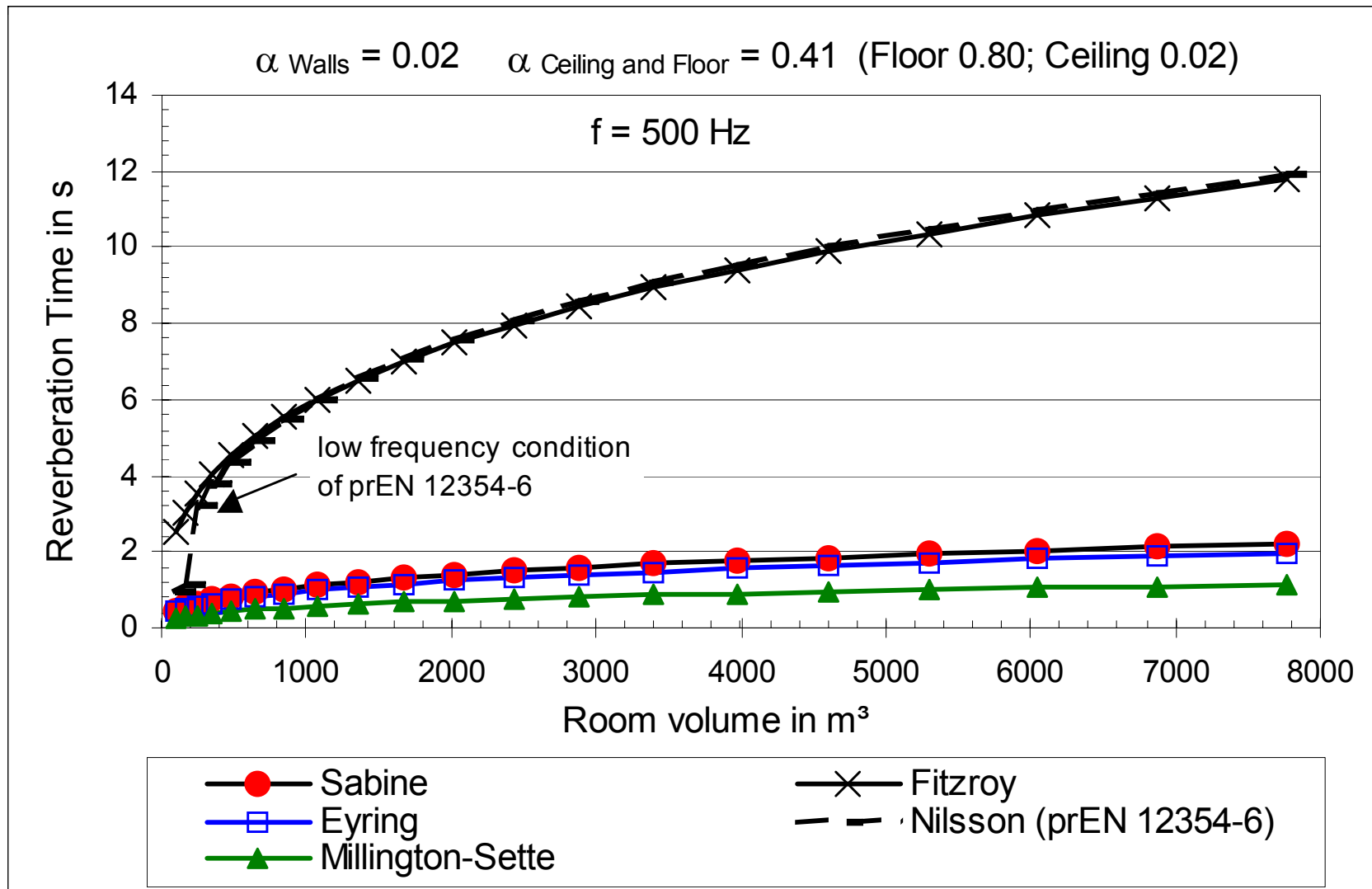


# Analiza czasu pogłosu (duże pomieszczenie)



# Analiza czasu pogłosu

## Przypadek II: nierównomierne rozłożenie chłonności akustycznej



# **Analiza czasu pogłosu**

---

**Jak można zaobserwować w przypadku, gdy współczynnik pochłaniania dla podłogi jest dużo większy niż dla pozostałych powierzchni, to istnieją znaczne rozbieżności w uzyskiwanych wynikach.**

**W szczególności wartości czasu pogłosu obliczane za pomocą wzorów Fitzroy'a i Nilssona wyraźnie odbiegają od pozostałych wyników.**



# **Analiza czasu pogłosu**

---

**Należy przy tym zauważyć, że wzory Fitzroy'a and Nilssona wprowadzono w celu poprawy dokładności obliczeń czasu pogłosu w warunkach nierównomiernego rozmieszczenia chłonności akustycznej.**

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a

---

Biorąc pod uwagę okoliczność, że w rzeczywistych pomieszczeniach istotna część chłonności usytuowana jest na podłodze, albo na suficie lub na obydwu powierzchniach, R. Neubauer zaproponował modyfikację równania Fitzroy'a przy pomocy członu korekcyjnego Kuttruffa, odpowiednio podzielonego w tym celu.

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a

---

- Dzieląc człon korekcyjny Kuttruffa na dwie części, jedną - odzwierciedlającą korektę wpływu powierzchni sufit-podłoga, i drugą - wpływu pozostałych ścian, otrzymuje się zmodyfikowaną formułę Fitzroy'a.
- Dodatkowo uwzględniono fakt, iż wartości współczynników pochłaniania uzyskane w wyniku pomiarów w komorze pogłosowej są często zawyżone.

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a

---

Zaproponowany wzór pozwala obliczyć czas pogłosu jako sumę dwóch procesów pogłosowych wybrzmiewających niezależnie wzdłuż głównych osi pomieszczenia

$$T_{60} = \left( \frac{0.32 V}{S^2} \right) \left( \frac{h(l+w)}{\bar{\alpha}_{ww}^*} + \frac{lw}{\bar{\alpha}_{CF}^*} \right) \quad (1)$$

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Uśredniony współczynnik pochłaniania

---

W proponowanym modelu uwzględniono podział pola akustycznego na dwie części traktując obliczane współczynniki pochłaniania jako poprawkę do wzoru Eyringa.

$$\bar{\alpha}_{ww}^* = -\ln(1 - \bar{\alpha}) + \left[ \frac{\sum_i \rho_{wi} (\rho_{wi} - \bar{\rho}_{ww}) S_{wi}^2}{(\bar{\rho}_{ww} S_{ww})^2} \right]$$

$$\bar{\alpha}_{CF}^* = -\ln(1 - \bar{\alpha}) + \left[ \frac{\rho_C (\rho_C - \bar{\rho}_{CF}) S_C^2 + \rho_F (\rho_F - \bar{\rho}_{CF}) S_F^2}{(\bar{\rho}_{CF} S_{CF})^2} \right]$$

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a

---

gdzie:

$V, S$  - objętość w  $m^3$ , powierzchnia całkowita w  $m^2$

$h, w, l$  - odpowiednio: wysokość, szerokość, długość w m

$\rho = (1-\alpha)$  - współczynnik odbicia

$\bar{\rho}$

- współczynnik odbicia (średnia arytmetyczna)

$\bar{\alpha}$

- współczynnik pochłaniania (średnia arytmetyczna)

$\alpha_{ww}^*$ ,  $\alpha_{CF}^*$

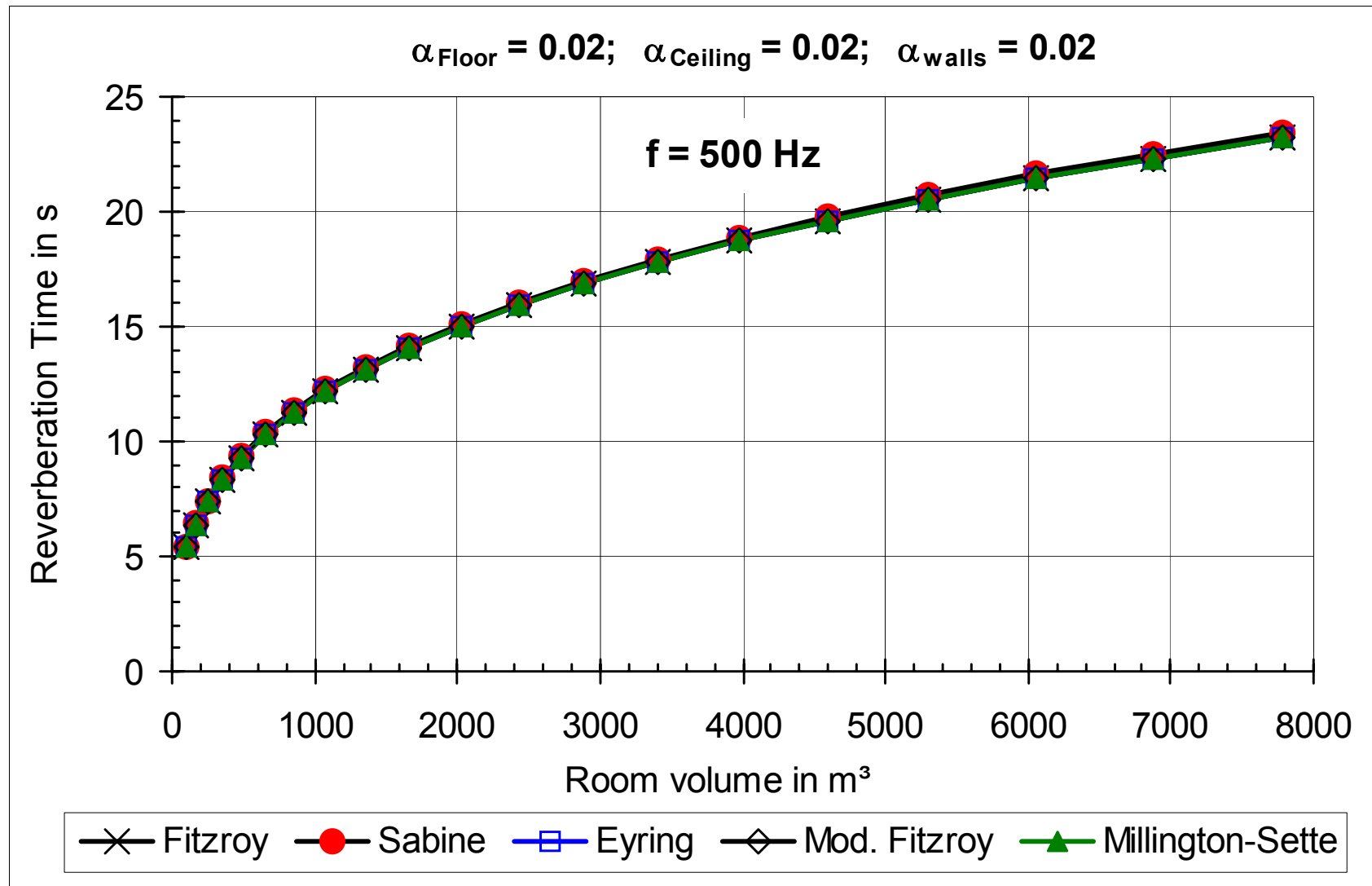
- efektywne współczynniki pochłaniania ścian, sufitu i podłogi

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja

---

W celu weryfikacji zaproponowanego wzoru porównano rezultaty otrzymane z obliczeń predykcyjnych czasu pogłosu przy użyciu różnych formuł w przypadku małej chłonności akustycznej (wartość współczynnika pochłaniania wynosi 0,02). Pokazane wartości czasu pogłosu odnoszą się do pomieszczeń o objętości w zakresie **50 m<sup>3</sup>** do ok. **8000 m<sup>3</sup>**.

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja





# **Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja**

---

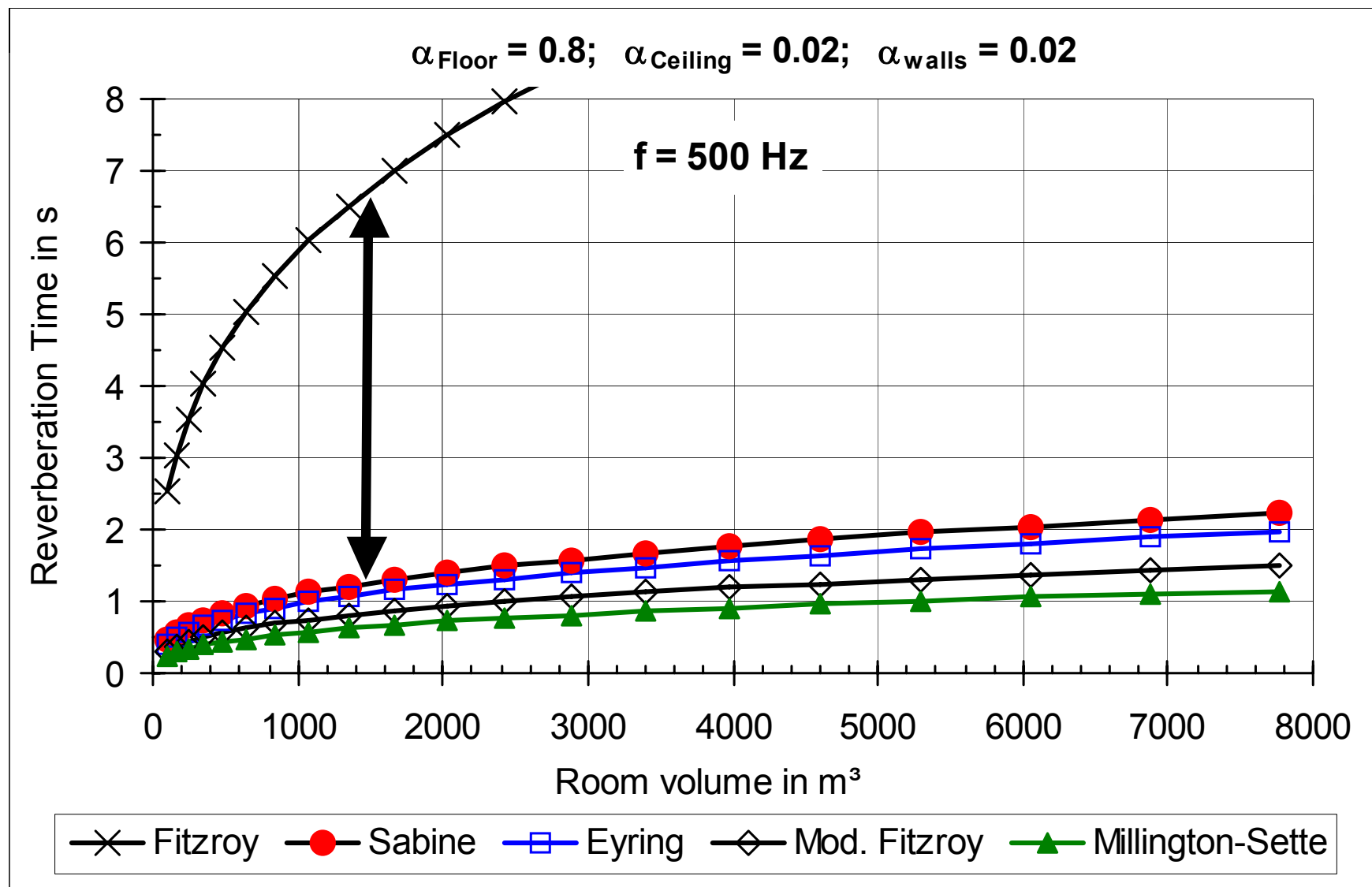
**Jak można zaobserwować nie ma  
rozbieżności pomiędzy otrzymanymi wynikami  
czasu pogłosu w przypadku małej chłonności  
akustycznej w pomieszczeniu.**

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja

---

Kolejny wykres dotyczy przypadku nierównomiernie rozłożonej chłonności akustycznej (wartość współczynnika pochłaniania wynosi 0,8 dla podłogi). Pokazane wartości czasu pogłosu odnoszą się do pomieszczeń o objętości w zakresie **50 m<sup>3</sup>** do ok. **8000 m<sup>3</sup>**.

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja



# **Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja**

---

**Jak można zaobserwować w przypadku, gdy współczynnik pochłaniania dla podłogi jest dużo większy niż dla pozostałych powierzchni, to istnieją znaczne rozbieżności w uzyskiwanych wynikach.**

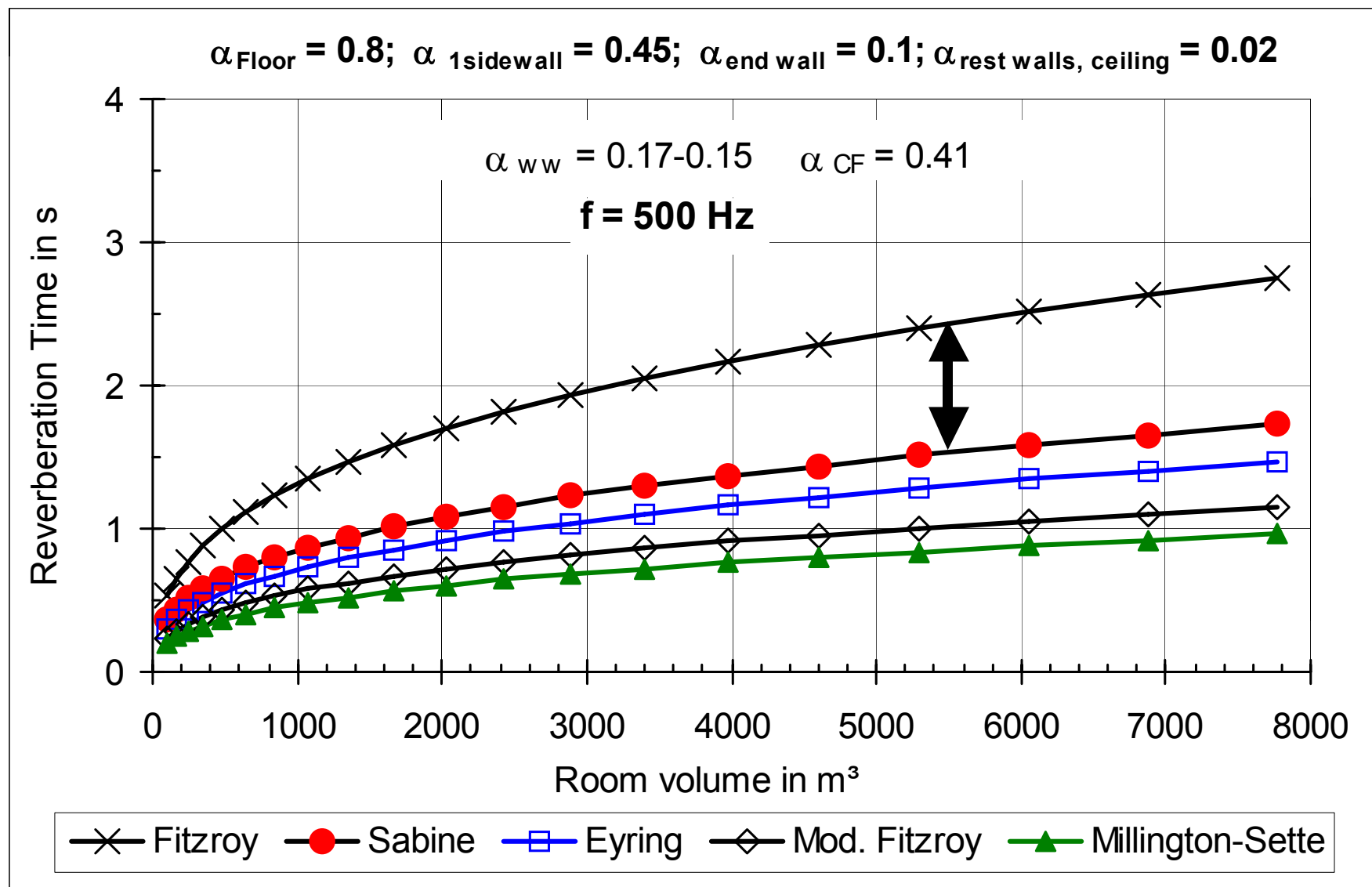
**W szczególności wartości czasu pogłosu obliczane za pomocą wzoru Fitzroy'a wyraźnie odbiegają od pozostałych wyników.**

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja

---

**W przypadku, nierównomiernie rozłożonej chłonności akustycznej i dużej wartości poszczególnych współczynników pochłaniania, rozbieżności w predykcji są jeszcze łatwiejsze do zaobserwowania.**

# Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja



# **Modyfikacja wzoru Fitzroy'a - Weryfikacja**

---

**Można zaobserwować, że w przedstawionym przypadku rozbieżności w wynikach wzrastają wraz ze wzrostem objętości pomieszczenia.**

**Można przyjąć, że pomierzone wartości czasu pogłosu znajdują się pomiędzy wartościami czasu pogłosu obliczonymi ze wzoru Sabine'a i Fitzroy'a.**

# Formuła R. Neubauera (nowa formuła)

---

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmodyfikowana formuła Fitzroy'a wykazuje stałe w przybliżeniu odchyłki względne (28%) w stosunku do wyników symulacji komputerowej. Posługując się uśrednioną wartością ogólnej odchyłki zmodyfikowano równanie (1) w celu ulepszenia zmodyfikowanej formuły Fitzroy'a tak, aby zredukować wartość wykładnika pochłaniania stosownie do ogólnej odchyłki.



# Nowa formuła

---

Po wprowadzeniu tej korekty zmodyfikowaną formułę Fitzroy'a można więc teraz przedstawić jako nową formułę (Neubauer):

$$T_{60} = \left( \frac{0.45V}{S^2} \right) \left( \frac{h(l+w)}{\bar{\alpha}_{ww}^*} + \frac{lw}{\bar{\alpha}_{CF}^*} \right)$$

# Weryfikacja pomiarowa

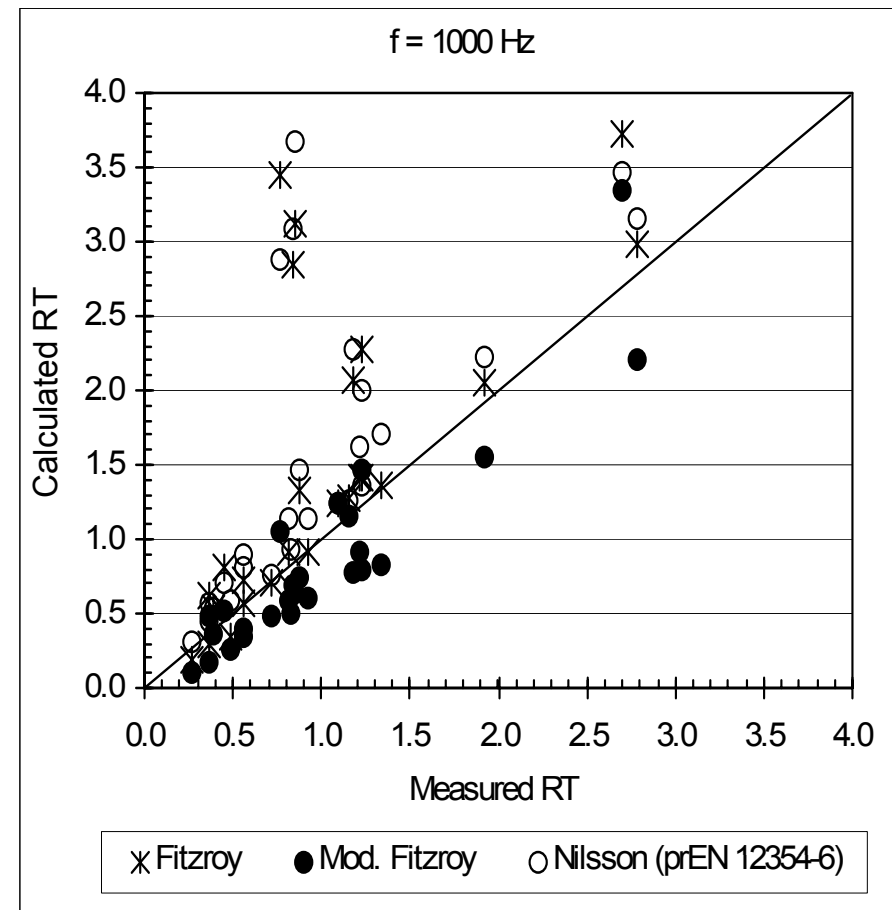
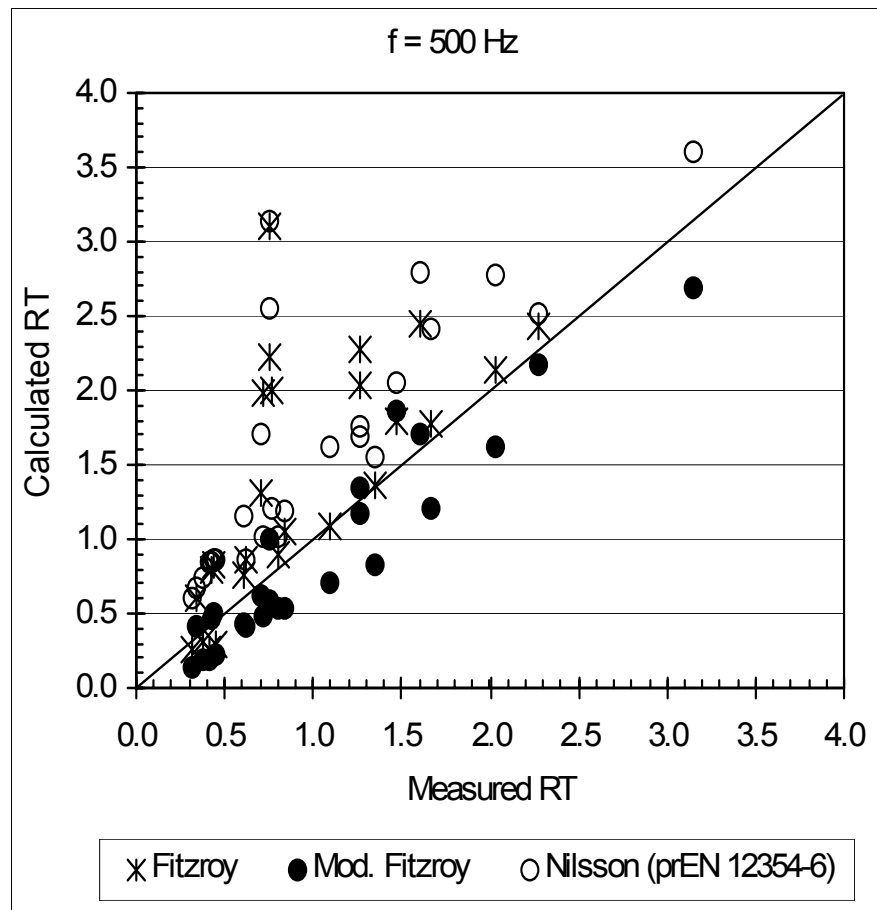
---

**Porównanie wartości czasu pogłosu: obliczonych i pomierzonych zostały pokazane na przykładzie wzorów, które zostały zaproponowane dla predykcji czasu pogłosu w przypadku nierównomiernie rozłożonej chłonności akustycznej (wzór Fitzroy'a, zmodyfikowany wzór Fitzroy'a i model Nilssona (norma europejska - prEN 12354-6))**

# Weryfikacja pomiarowa

## Zmodyfikowany wzór Fitzroy'a - wartości pomiarowe

$V = 52 \text{ m}^3 - 1900 \text{ m}^3$



# **Weryfikacja pomiarowa**

## **Zmodyfikowany wzór Fitzroy'a - wartości pomiarowe**

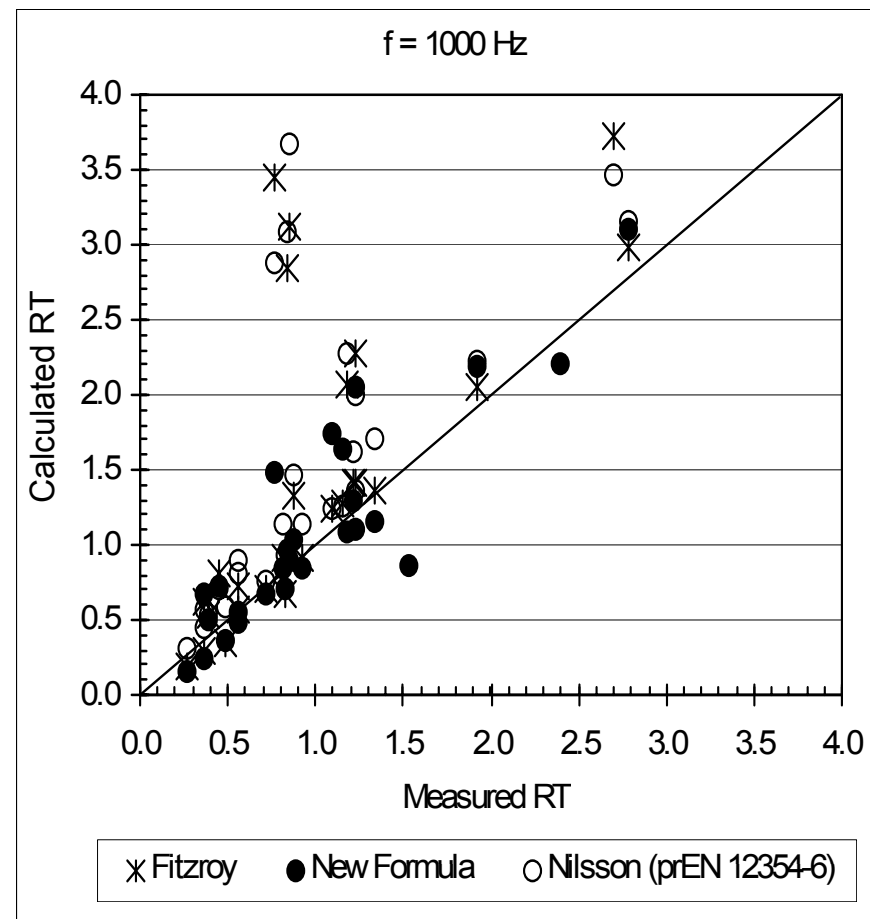
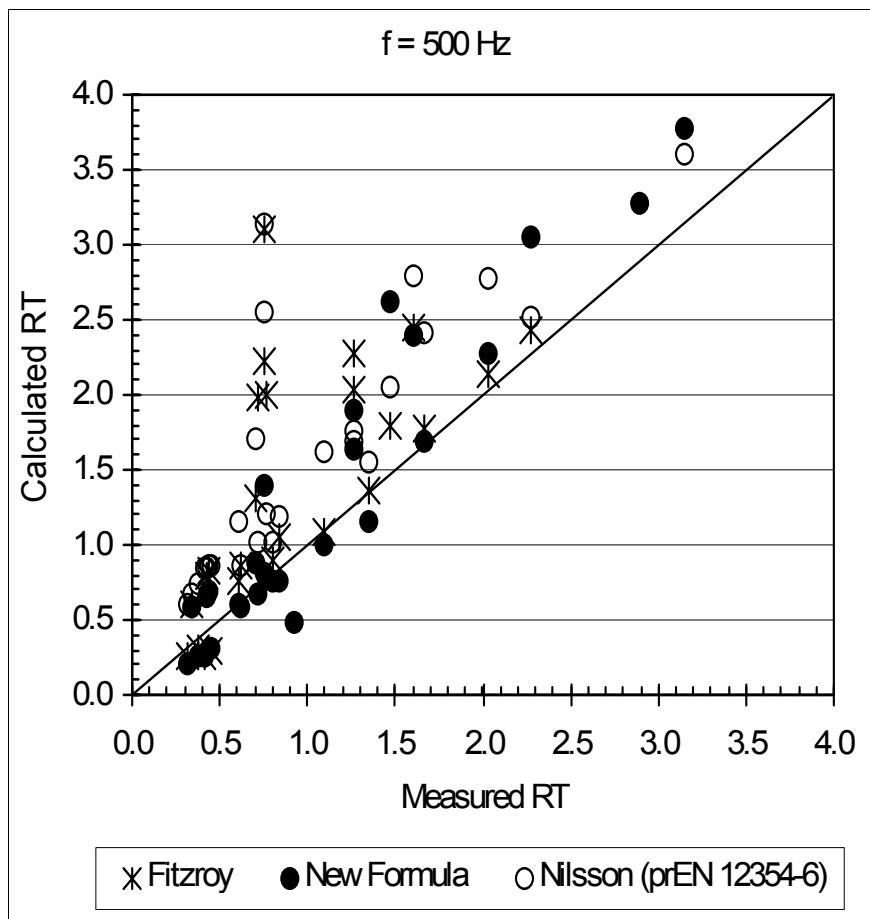
---

**Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że wartości czasu pogłosu obliczone za pomocą zmodyfikowanego wzoru Fitzroy'a są znacznie mniejsze niż w przypadku predykcji za pomocą wzoru Fitzroy'a i modelu Nilssona oraz zbliżone do wartości pomiarowych.**

# Weryfikacja pomiarowa

## Nowa formuła - wartości pomiarowe

$V = 52 \text{ m}^3 - 1900 \text{ m}^3$



# **Weryfikacja pomiarowa**

## **Nowa formuła - wartości pomiarowe**

---

**Na podstawie wykresu można zauważyć, że wartości czasu pogłosu obliczone za pomocą nowej formuły są znacznie bardziej zbliżone do wartości pomiarowych niż w przypadku predykcji za pomocą wzoru Fitzroy'a i modelu Nilssona.**

# **Weryfikacja pomiarowa**

## **Nowa formuła - wartości pomiarowe**

---

**Względna odchyłka uśredniona dla  
częstotliwości z zakresu 125 Hz do 4 kHz  
wynosi odpowiednio:**

**Nowa formuła: 24.9 %**

**wzór Fitzroy'a: 45.6 %**

**model Nilssona : 52.3 %**

# **Weryfikacja - symulacje komputerowe**

---

**Celem weryfikacji komputerowej było określenie, w jakim stopniu nowa formuła pozwala na odwzorowanie warunków pogłosowych w pomieszczeniu. Symulacje przeprowadzono dla pomieszczeń w zakresie od 100 m<sup>3</sup> do 8750 m<sup>3</sup>.**

## **Przypadek 1**

**- duża wartość współczynnika pochłaniania związana z wytłumieniem sufitu**

## **Przypadek 2**

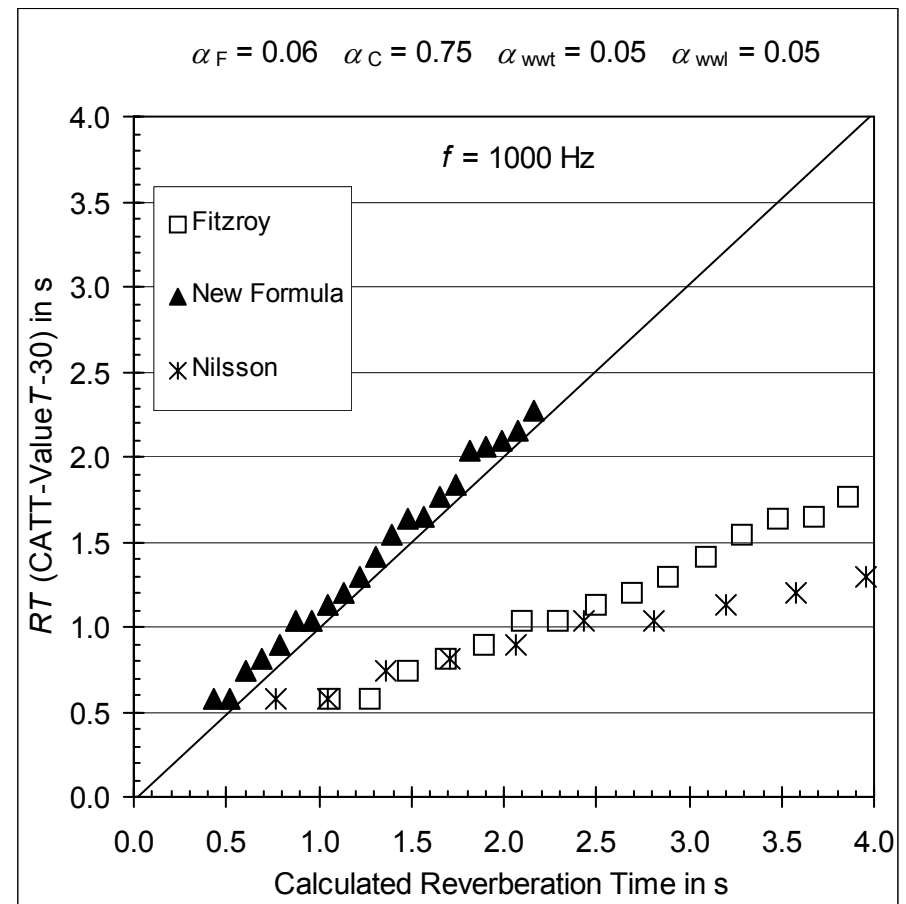
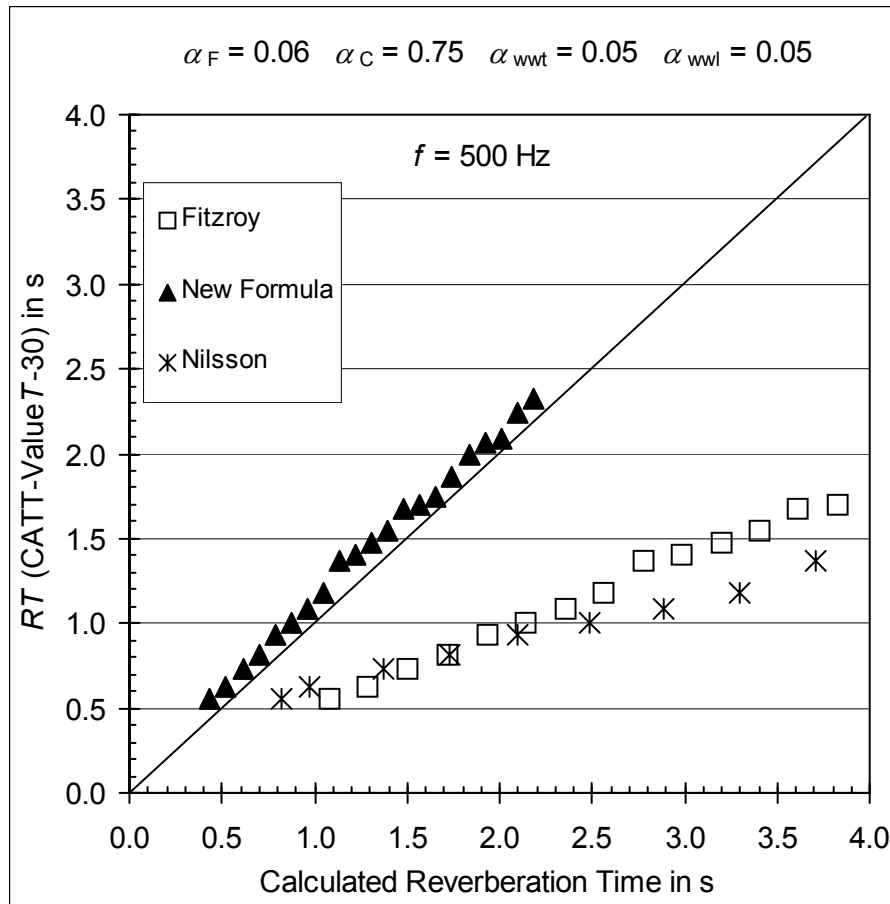
**- duża wartość współczynnika pochłaniania związana z sufitem i jedną ze ścian bocznych**



# Weryfikacja

## Przypadek 1 - Symulacje komputerowe

$$V = 100 \text{ m}^3 - 8750 \text{ m}^3$$



# Weryfikacja

## Symulacje komputerowe

---

**Dla przypadku 1 (duża wartość współczynnika pochłaniania związana z wytłumieniem sufitu) zaobserwowana względna odchyłka wynosi odpowiednio:**

**$f = 500 \text{ Hz}$**

- Nowa formuła: 11.2 %
- wzór Fitzroy'a: 116.8 %
- model Nilssona: 188.9 %

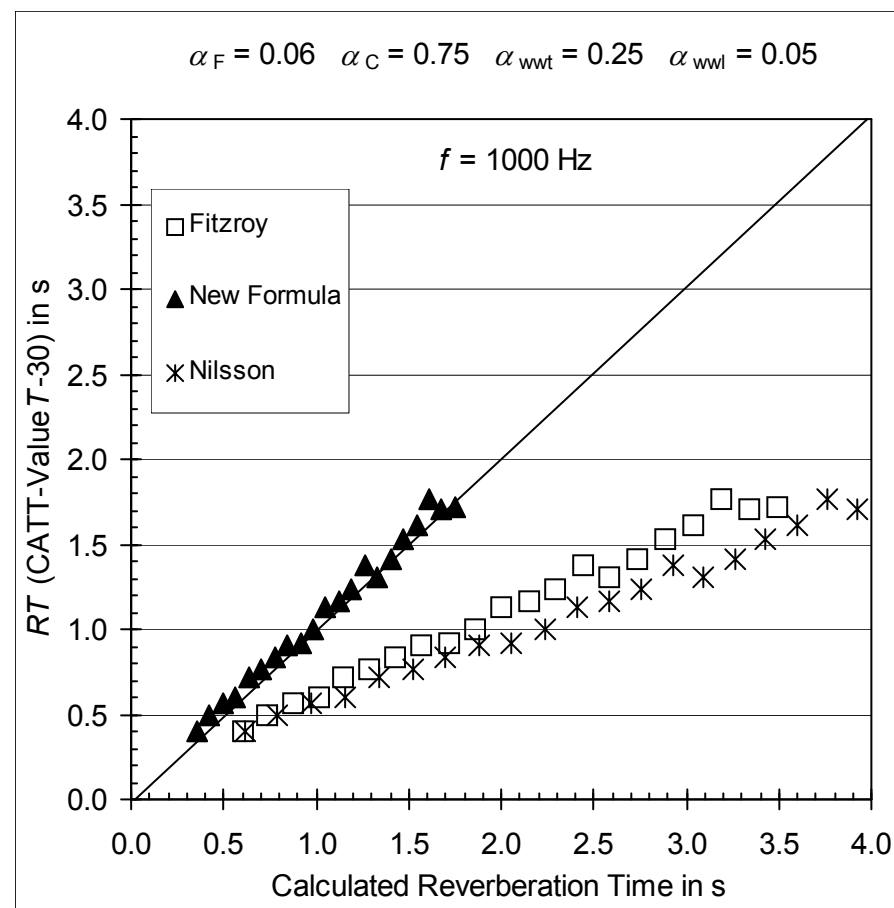
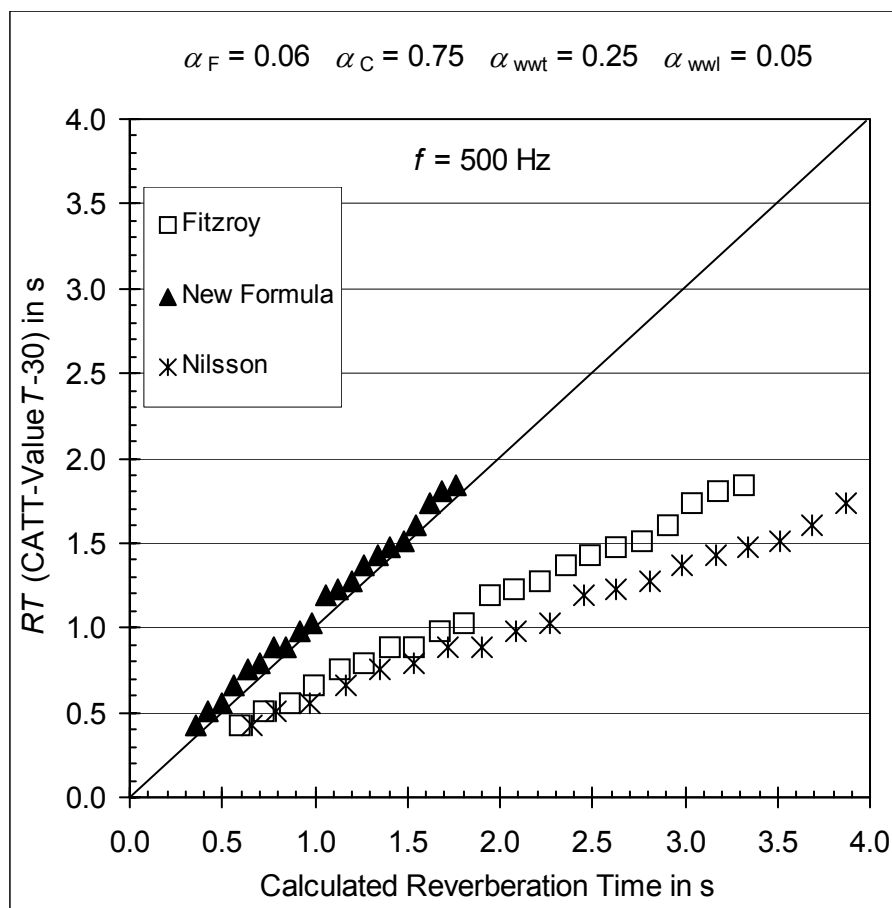
**$f = 1000 \text{ Hz}$**

- Nowa formuła: 9.4 %
- wzór Fitzroy'a: 114.7 %
- model Nilssona: 181.4 %

# Weryfikacja

## Przypadek 2 - symulacje komputerowe

$V = 100 \text{ m}^3 - 8750 \text{ m}^3$



# Weryfikacja

## Symulacje komputerowe

---

Dla przypadku 2 (duża wartość współczynnika pochłaniania związana z sufitem i jedną ze ścian bocznych) zaobserwowana względna odchyłka wynosi odpowiednio:

**f = 500 Hz**

- Nowa formuła: 8.7 %
- wzór Fitzroy'a: 66.7 %
- model Nilssona: 105.7 %

**f = 1000 Hz**

- Nowa formuła: 6.0 %
- wzór Fitzroy'a: 78.2 %
- model Nilssona: 108.9 %

# Weryfikacja

## Symulacje komputerowe

---

**Względna odchyłka uśredniona dla  
częstotliwości z zakresu 125 Hz do 4 kHz  
wynosi odpowiednio:**

### Przypadek 1:

- Nowa formuła: 9.3 %
- wzór Fitzroy'a: 104.9 %
- model Nilssona: 139.9 %

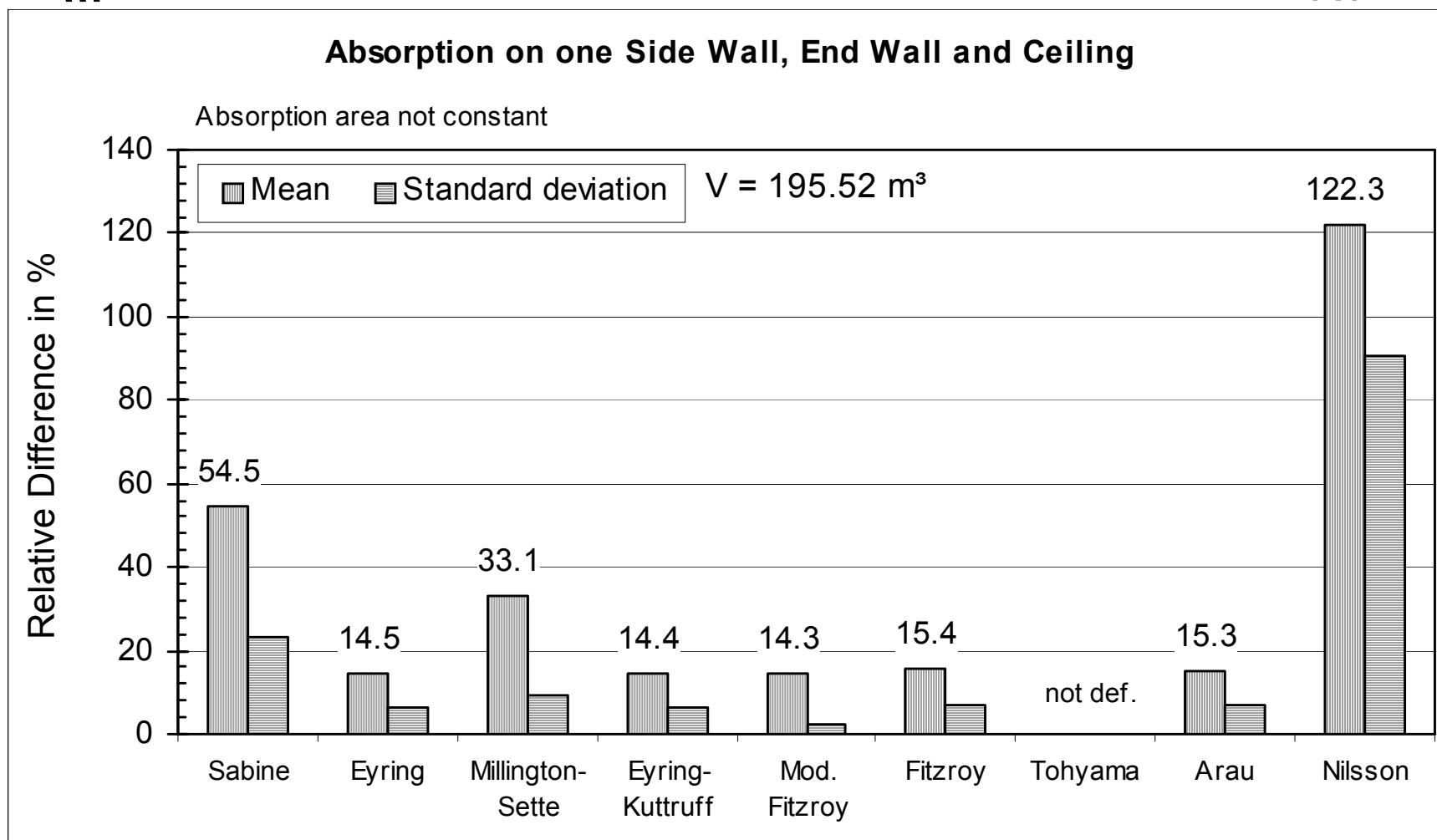
### Przypadek 2:

- Nowa formuła: 8.8 %
- wzór Fitzroy'a: 80.5 %
- model Nilssona: 104.1 %

# Weryfikacja Symulacje komputerowe

$$\alpha_m = 0.38$$

Graph,  
RT



# Weryfikacja

---

**Jak widać z przeprowadzonych symulacji komputerowych nowa formuła czasu pogłosu pozwala na uzyskanie znacząco lepszych rezultatów niż w przypadku wzoru Fitzroy'a czy modelu Nilssona w stosunku do wyników symulacji komputerowych.**

# Wnioski

---

- **Wprowadzenie nowej formuły (Neubauera) obliczania czasu pogłosu pozwala na poprawne zaprojektowanie wartości czasu pogłosu dla pomieszczeń o nierównomiernie rozłożonej chłonności akustycznej i pozwala na uzyskanie wartości zbliżonych w granicach błędu (11%) do wartości uzyskanych na drodze symulacji komputerowych i pomierzonych wartości czasu pogłosu, co jest z punktu widzenia praktyki akustycznej dokładnością wystarczającą.**
- **Nowa formuła daje bardziej szczegółowe informacje na temat rozkładu absorpcji dźwięku w pomieszczeniu, co jest bardzo istotne w przypadku pomieszczeń o nierównomiernie rozłożonej chłonności akustycznej**

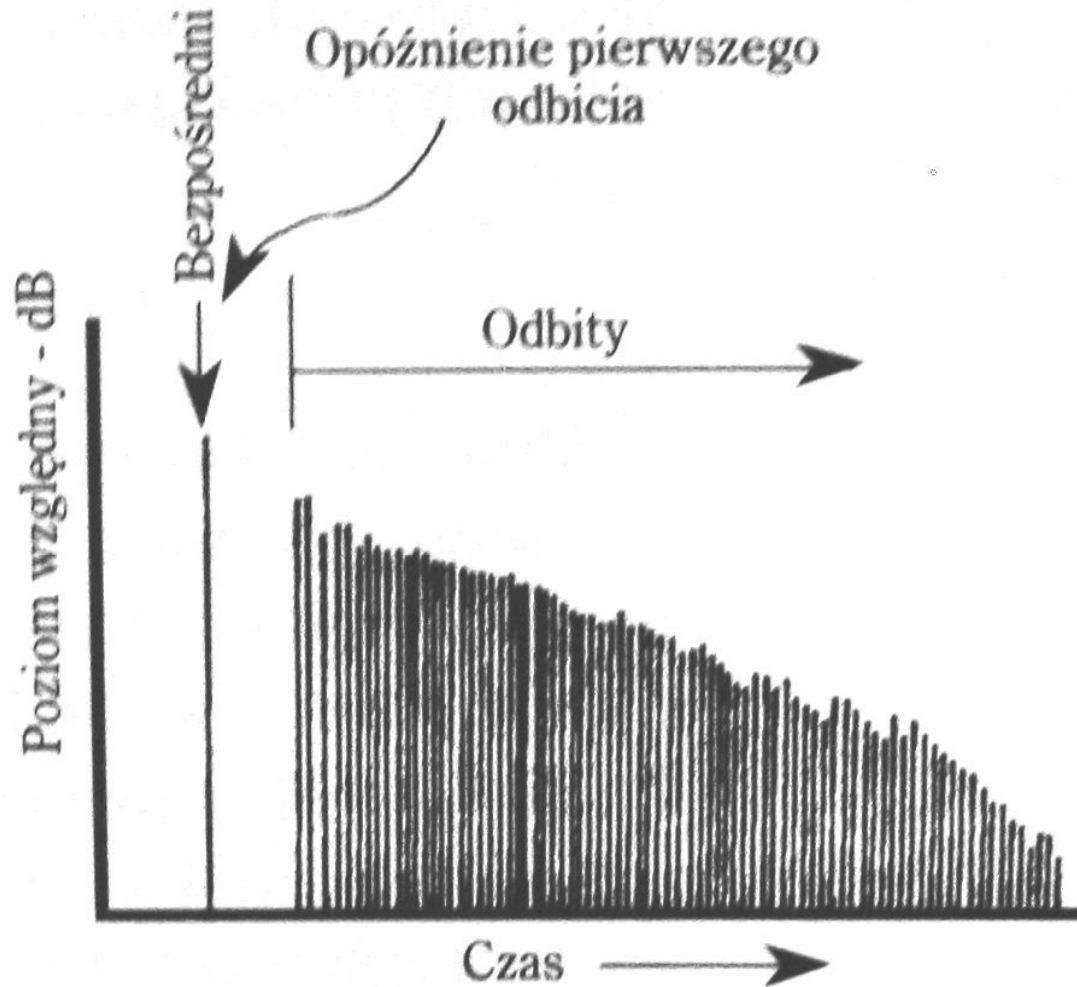


# Parametry obiektywne

– **EDT** (*Early Decay Time*) –  
wczesny czas zaniku

Parametr ten jest zdefiniowany jako czas mierzony od momentu wyłączenia źródła sygnału akustycznego w pomieszczeniu, po którym poziom natężenia tego sygnału maleje o 10 dB w stosunku do poziomu wyjściowego.

# Parametry obiektywne



# Parametry obiektywne

## – $C_{80}$ – współczynnik klarowności [dB]

Parametr ten odpowiada subiektywnemu parametrowi przejrzystości, określającemu możliwość rozróżnienia poszczególnych dźwięków i ich źródeł. Zdefiniowany jest jako stosunek energii wczesnej (do czasu 80 ms liczonego od momentu wyłączenia źródła dźwięku) do energii późnej procesu zaniku dźwięku. Granica całkowania odpowiada przypadkowi sygnału muzycznego.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

gdzie:

$p(t)$  – ciśnienie akustyczne w punkcie pomiaru [Pa].

# Parametry obiektywne

–  $H(C_{50})$  – odstęp pogłosu [dB]

Jest to parametr bliźniaczy w stosunku do współczynnika klarowności. Różnicą jest zmiana granicy całkowania z 80 ms na 50 ms. Wyraża ona zmianę czasu trwania wczesnej fazy zaniku dźwięku. Parametr ten jest definiowany dla przypadku sygnału mowy.

# Parametry obiektywne

- D – wyrazistość (ang. *Definition*) [dB]

Wyrazistość zdefiniowana jest jako stosunek energii akustycznej wczesnej (energii w czasie do 50 ms od momentu wyłączenia źródła dźwięku) do energii akustycznej całkowitej:

$$D = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

# Parametry obiektywne

- $D$  – wyrazistość (ang. *Definition*) [dB]

Parametr ten charakteryzuje możliwość rozróżnienia kolejno następujących po sobie dźwięków. Im większa część energii jest skumulowana w czasie do 50 ms od momentu wyłączenia źródła (w praktyce nadania sygnału dźwiękowego), tym rozróżnienie kolejnych dochodzących dźwięków jest łatwiejsze. Jeżeli  $D > 0,5$ , to pomieszczenie charakteryzuje się zrozumiałością sylabową mowy powyżej 85%.

# Parametry obiektywne

–  $T_c$  – czas centralny [s]

Czas centralny jest zdefiniowany jako środek ciężkości energii akustycznej. Parametr ten ma sens czasu kumulowania się energii akustycznej.

$$T_c = \frac{\int_{0ms}^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

# Parametry obiektywne

- ITDG – opóźnienie dojścia pierwszego odbicia (ang. *Initial Time Delay Gap*) [s]

Parametr ten zdefiniowany jest jako różnica między czasem dojścia dźwięku bezpośredniego i czasem dojścia pierwszego odbicia.



# Parametry obiektywne

- IACF – funkcja międzyusznej korelacji skróśnej (ang. *Interaural Cross-Correlation Function*)

Jest to zbiór funkcji określających korelację skróśną między sygnałem odbieranym przez lewe i prawe ucho.

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2 dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2 dt}}$$

# Parametry obiektywne

Ciśnienie  $p_L$  jest to ciśnienie, które dociera do lewego ucha. Analogicznie, ciśnienie  $p_R$  jest to ciśnienie, które dociera do prawego ucha. W związku z tym, że pokonanie przez dźwięk drogi od jednego ucha do drugiego zajmuje w przybliżeniu 1 ms, zazwyczaj wartość  $\tau$  dobiera się z zakresu od -1 do 1 ms. Bezpośrednio powiązany z funkcją IACF parametrem jest współczynnik międzyusznej korelacji skrośnej IACC (ang. *Interaural Cross-Correlation Coefficient*), który jest wartością maksymalną funkcji IACF:

$$IACC = |IACF(\tau)|_{\max}$$

# Parametry obiektywne

- IACC – współczynnik międzyusznej korelacji skróśnej (ang. *Interaural Cross-Correlation Function*)

W zależności od przyjętych granic całkowania parametr IACC ma sens pozornej szerokości źródła dźwięku (ASW, *Apparent Source Width*) lub obwiedni słuchacza (LEV, *Listener's Envelopment*). Dla parametru ASW przyjęte zostały granice całkowania  $t_1=0$ ,  $t_2=80$  ms ( $IACC_E$ ), natomiast dla LEV  $t_1=80$  ms,  $t_2=1$  s ( $IACC_L$ ).

# Parametry obiektywne

- LEF – współczynnik odbić bocznych (ang. *Lateral Early Fraction*)

Parametr ten jest zdefiniowany jako stosunek energii odbić bocznych do energii docierającej ze wszystkich kierunków. Wartość parametru LEF wpływa na przestrzenność dźwięku. Im jego wartość jest większa, tym dźwięk brzmi bardziej przestrzennie.

$$LEF = \frac{\int_{25ms}^{80ms} E_{\infty}(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} E_o(t) dt}$$

# Parametry obiektywne

- LEF – współczynnik odbić bocznych (ang. *Lateral Early Fraction*)

gdzie:

$E_{\infty}$  – energia odbić bocznych (pomierzona mikrofonem o charakterystyce ósemkowej),  
 $E_0$  – energia ze wszystkich kierunków (pomierzona mikrofonem o charakterystyce dookólnej).

# Parametry obiektywne

## – $G$ – siła źródła [dB]

Siła źródła  $G$  określa stosunek poziomu ciśnienia akustycznego w punkcie wewnątrz pomieszczenia, w obecności dookólnego źródła dźwięku, do poziomu ciśnienia akustycznego zmierzonego w polu swobodnym w odległości 10 m od tego samego źródła dźwięku, działającego z tą samą mocą. W praktyce pomiar ciśnienia akustycznego dla pola swobodnego przeprowadza się w komorze bezechowej.

# Parametry obiektywne

–  $G$  – siła źródła [dB]

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{t_2} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{t_1} p_A^2(t) dt}$$

gdzie:

$p(t)$  – ciśnienie akustyczne w punkcie wewnątrz pomieszczenia [Pa],

$p_A(t)$  – ciśnienie akustyczne w polu swobodnym w odległości 10 m od źródła dźwięku [Pa].

# Parametry obiektywne

- Reflective energy cumulative curve

$$RECC(T) = 10 \log \left( \int_{0.005}^T p^2(t) dt \right)$$



# Parametry obiektywne

## – BR – stosunek basów (*Bass Ratio*)

Ten bezwymiarowy parametr jest określony jako stosunek czasów pogłosu dla niskich i średnich częstotliwości. Obliczany jest ze wzoru:

$$BR = \frac{T_{60(125)} + T_{60(250)}}{T_{60(500)} + T_{60(1000)}}$$

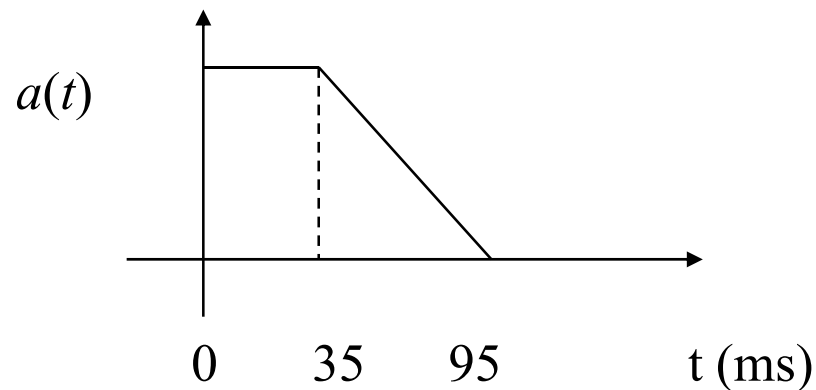
gdzie:

$T_{60}(f)$  – czas pogłosu [s] dla sygnału o częstotliwości  $f$  [Hz].

# Parametry obiektywne

- S/N– stosunek sygnału do szumu (Lochner i Burger, 1964 r.)

$$\frac{S}{N_{effective}} = \frac{\int_0^{95ms} p^2(t)a(t)dt}{\int_{95ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$



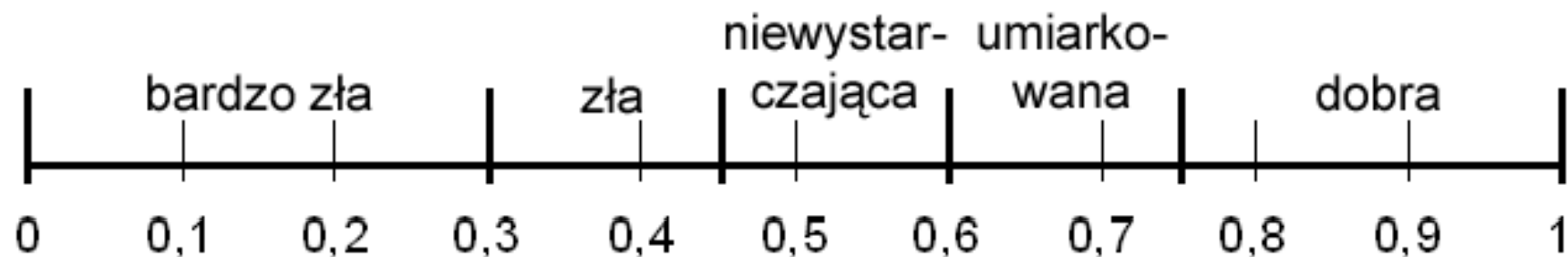
# Parametry obiektywne

**STI** – jest to parametr określający w sposób obiektywny, zrozumiałość mowy. Mieści się w przedziale  $(0,1)$ . Pomiar odbywa się w określonych pasmach oktawowych, do tego celu wykorzystuje się złożony układ modulacji.

**RASTI (ang. Rapid Speech Transmission Index)** – określa zrozumiałość mowy, słów. Jest on uproszczoną wersją wskaźnika *STI*. Wyznacza się go na podstawie funkcji *MTF* mierzonej w dwóch pasmach oktawowych 500 Hz i 2 kHz.

# Parametry obiektywne

**Wskaźnik zrozumiałości mowy RASTI** - Parametr mierzony jest na podstawie zniekształceń obwiedni standardowego sygnału pomiarowego. Wyrazistość mowy określa zrozumiałość wypowiedzi i jest bezpośrednio związana z czasem pogłosu i z poziomem tła akustycznego w pomieszczeniu. Może być ona podana w wartościach RASTI (*ang. Rapid Speech Transmission Index*) w przedziale od 0 (najgorzej) do 1 (najlepiej). Rysunek ilustruje porównanie wartości RASTI ze skalą subiektywnej wyrazistości mowy.



# Parametry obiektywne

Oba parametry *STI* oraz *RASTI* opierają się na funkcji *MTF* (ang. *Modulation Transfer Function*). Początkowo stosowana była ona jedynie w optyce, ale Houtgast i Steeneken zaadoptowali ją do określania zrozumiałości w kanałach transmisji mowy. Techniki oparte na *MTF* polegają na modulowaniu szumu o paśmie zbliżonym do pasma mowy ludzkiej częstotliwościami zbliżonymi do tych, które występują w naturalnej mowie. Następnie bada się zmiany głębokości modulacji na wyjściu systemu spowodowane zakłóceniami występującymi w kanale. Funkcja ta ma następującą postać:

$$m(F) = \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

# Parametry obiektywne

**%ALCONS** (ang. *Articulation Loss of Consonants*) – określa zrozumiałość mowy na podstawie liczby poprawnie zrozumianych spółgłosek w testach składających się z odpowiednich wyrazów monosylabicznych. Parametr ten wprowadził Peutz po przeprowadzeniu licznych badań w wielu różnych pomieszczeniach. Na ich podstawie określił wzór empiryczny na *%ALcons*:

$$\%AL_{cons} = \frac{200D^2T^2}{V}$$

gdzie:

$D$  - odległość słuchacz – źródło

$T$  – czas pogłosu

$V$  – objętość pomieszczenia

# Parametry obiektywne

Przy czym jest on jedynie prawdziwy w polu bezpośrednim, natomiast w polu pogłosowym przyjmuje postać  $\%AL_{cons}=9T$ , bowiem  $\%AL_{cons}$  w tym przypadku nie zależy od odległości źródło – słuchacz. Formuła Peutza została następnie zmodyfikowana przez Kleina z uwzględnieniem kierunkowości źródła  $Q$ . Przyjmuje on postać:

<http://www.mcsquared.com/ssdesign.htm>

$$\%AL_{cons} = \frac{200D^2T^2}{QV}$$

gdzie:  $Q$  - kierunkowość źródła

# Parametry obiektywne

Wartości *%ALcons* określające zrozumiałość

mowy:

bardzo zła – (30;20)

zła – (20;15)

umiarkowana – (15;10)

dobra – (10;5)

bardzo dobra – (5;0)



# Parametry obiektywne

ST – Support („wspomaganie wnętrza”  
EEL (Early Ensemble Level) - zespołowość

Based on questionnaires and interviews among musicians as well as laboratory experiments, Gade proposed objective measures for “support” and “ensemble” on stage (Gade [6], [16]). “Support” is associated with how much the hall is supporting the sound of ones own instrument, while “ensemble” is associated with the ability to perceive the fellow musicians. ST (Support) measures the level of early reflections received 1 metre from the source. This energy is seen in relation to the emitted sound energy: the direct sound (including and floor reflection) at 1 metre from the source. EEL (Early Ensemble Level) measures the presence of the direct sound and early reflections. This energy is measured with a second microphone positioned somewhere else on stage, for instance at another instrument group position, see Figure 7. Also this energy sum is seen in relation to emitted sound energy from the source (direct sound and floor reflection at 1 metre).

[http://www.akutek.info/Papers/JJD\\_stage\\_acoustics.pdf](http://www.akutek.info/Papers/JJD_stage_acoustics.pdf)

# Parametry obiektywne

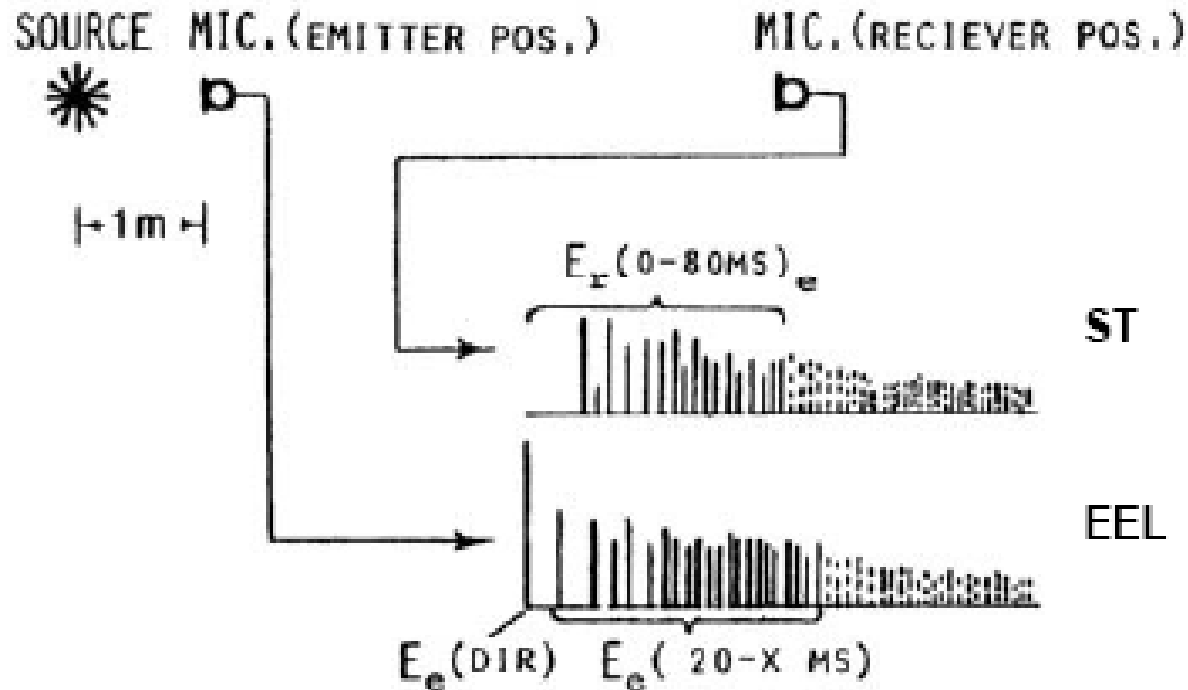


Figure 7: Principles for measuring ST and EEL. From [Gade, 16].

[http://www.akutek.info/Papers/JJD\\_stage\\_acoustics.pdf](http://www.akutek.info/Papers/JJD_stage_acoustics.pdf)

# Parametry obiektywne

For ST,  $t = 0$  ms represents the arrival of the direct sound, while for EEL  $t = 0$  ms represents the time of emission from the source. The motivation for the latter was to measure the negative effect of the delayed direct sound at the receiver position (based on Gade's findings of preferred arrival of the direct sound within 20 ms delay [17]). While the time limits for the summing of received energy can vary for ST, it is fixed at 0 – 80 ms for EEL.

These two parameters are defined as:

$$ST = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{E_e(t_1 - t_2 \text{ ms})}{E_e(\text{DIR})} \right) \quad \text{dB} \quad (1)$$

$$EEL = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{E_r(0 - 80 \text{ ms})_e}{E_e(\text{DIR})} \right) \quad \text{dB} \quad (2)$$

$E_e(\text{DIR})$  is measured over the period 0 to 10 ms. Arithmetical averages are taken for the octave bands 0.25 – 2 kHz for ST and for the octave bands 0.5 – 2 kHz for EEL.

[http://www.akutek.info/Papers/JJD\\_stage\\_acoustics.pdf](http://www.akutek.info/Papers/JJD_stage_acoustics.pdf)

# Parametry obiektywne

ST is represented in three different forms (with different values of  $t_1$  and  $t_2$ ):  $ST_{\text{early}}$  describing “ensemble”, integrates the sound in the time interval of 20 – 100 ms (relative to the direct sound).  $ST_{\text{late}}$  representing impression of reverberation integrates the sound arriving between 100 – 1000 ms while  $ST_{\text{total}}$  has  $t_1 - t_2 = 20 - 1000$  ms and represents “support”. The time limits are illustrated in Figure 6. (Previous versions, ST1 and ST2, are no longer used.) Stage occupancy is important for the measurement according to Gade [20]. An empty stage will represent the situation for a small ensemble, while chairs and music stands should be included when measuring for the orchestra situation. See the section below for more details on how to measure these parameters.

Only the ST parameter which takes the early reflections returning to the musician into account (not the direct sound transmission) has been shown to be well correlated with subjective evaluation (Gade [17]). ST was found to correlate well with the judgment of “support” and quite well with judgments of “ensemble”. Since EEL was not found to correlate well with subjective data, it has not been much used recently.

[http://www.akutek.info/Papers/JJD\\_stage\\_acoustics.pdf](http://www.akutek.info/Papers/JJD_stage_acoustics.pdf)

# Parametry obiektywne

## 6.1 How to measure ST and EEL

Gade has listed recommendations for measuring ST [20]:

- the platform should be occupied with chairs and music stands
- all objects in a 2 metre radius from the transducers should be removed
- the transducers must be placed at least 4 metres from reflecting stage surfaces to make sure these surfaces are include beyond the 20 ms integration limit
- on smaller stages the 20 ms limit must be reduced and all furniture removed (since many reflections will arrive before 20 ms)
- distance from sound source to microphone set to 1 metre and the height of both set to 1 metre above the stage floor
- calibration is needed for the frequency bands where the sound source is not adequately omni directional (see [20] for more details)

Jeon and Barron [39] confirmed these guidelines with scale modelling experiments for a particular hall in Seoul, South Korea.

[http://www.akutek.info/Papers/JJD\\_stage\\_acoustics.pdf](http://www.akutek.info/Papers/JJD_stage_acoustics.pdf)

# Parametry subiektywne

Parametry subiektywne oceny akustyki pomieszczeń oparte są na subiektywnej ocenie wykonawców i słuchaczy. Są one bardzo ważne w ocenie właściwości akustycznych, lecz dla danego wnętrza mogą się różnić między sobą w zależności od indywidualnych preferencji osoby dokonującej oceny. Dlatego też subiektywna ocena akustyki pomieszczenia może mieć jakąkolwiek wartość jedynie wówczas, gdy jest dokonywana przez tę samą, reprezentatywną grupę osób. Zazwyczaj dany parametr subiektywnej oceny akustyki wiąże się w pewien sposób z pewnym parametrem obiektywnej oceny akustyki.

# Parametry subiektywne

– Intymność – jest to parametr związany z wrażeniem wielkości wnętrza. Wartość tego parametru nie ma bezpośredniego przełożenia na kubaturę wnętrza: duże pomieszczenie o odpowiedniej akustyce może charakteryzować się większą intymnością niż mniejsze pomieszczenie. Parametr ten wiąże się z różnicą czasu dotarcia dźwięku bezpośredniego i odbitego, a więc z obiektywnym parametrem ITDG. Wpływ na subiektywne odczucie intymności dźwięku w pomieszczeniu ma też poziom głośności dźwięku — a więc wartość obiektywnego parametru  $L_p$ .

# Parametry subiektywne

– **Żywość** – parametr ten jest również określany jako pogłosowość. Jest on ściśle związany z czasem pogłosu. Pomieszczenie jest żywe, jeśli czas pogłosu jest wystarczająco duży. Parametr ten ma wielkie znaczenie w przypadku muzyki, która w pomieszczeniu martwym będzie brzmiała sucho, mało dynamicznie.



# Parametry subiektywne

– **Przestrzenność** – parametr ten ma sens wrażenia przestrzenności dźwięku generowanego w pomieszczeniu. Na wrażenie przestrzenności składa się kilka omówionych wcześniej parametrów: pozorna szerokość źródła dźwięku ASW, obwiednia słuchacza LEV, współczynnik odbić bocznych LEF. Parametr ASW dotyczy dźwięku wczesnego — a więc bezpośredniego i wczesnych odbić, natomiast parametr LEV jest określony przez dźwięk pogłosowy.

# Parametry subiektywne

– Klarowność – jest to parametr, który określa możliwość rozróżnienia następujących po sobie dźwięków. Wiąże się on z wieloma parametrami obiektywnymi: czasem pogłosu  $T_{60}$ , współczynnikiem klarowności  $C$ , odstępem pogłosu  $H$  czy też z wyrazistością  $D$ .

# Parametry subiektywne

– **Ciepłość** – ten parametr związany jest z zawartością dźwięków o niskich częstotliwościach — z zakresu 75-350 Hz — w charakterystyce pogłosowej pomieszczenia. Odpowiednio duża ciepłość jest niezbędna do osiągnięcia wrażenia pełnego brzmienia. Zbyt duża ciepłość wnętrza zmniejsza natomiast klarowność i jasność jego akustyki. Z parametrem tym wiąże się obiektywny parametr: stosunek basów BR.

# Parametry subiektywne

– Dyfuzyjność – określa równomierność rozproszenia energii akustycznej w pomieszczeniu. Jeżeli wewnątrz oznacza się dużą dyfuzyjnością, to znaczy że energia akustyczna jest równomiernie rozproszona w całym pomieszczeniu.

# Skala Beranka

<b>ocena</b>	<b>Określenie</b>	<b>liczba punktów</b>
A+	Doskonale	90-100
A	Bardzo dobre do doskonałych	80-90
B+	Dobry do bardzo dobrych	70-80
B	Dostateczne do dobrych	60-70
C+	Dostateczne	50-60
---	Ze względu na bardzo złą akustykę nie powinno się w pomieszczeniu wykonywać muzyki	mniej niż 50

# Skala Beranka

Parametr	Opis
Intymność (ang. <i>Intimacy</i> )	<p>Opisuje wrażenia dotyczące wielkości pomieszczenia. Wielkość fizyczna z nią związana to różnica czasu dojścia dźwięku bezpośredniego i pierwszego odbicia. Ocena różnicy czasów jest następująca:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>A+ 8-21 ms</li><li>A 22-24 ms</li><li>B+ 35-46 ms</li><li>B 47-58 ms</li></ul> <p>Powyżej czasu 49 ms akustyka jest niezadowalająca</p>

# Skala Beranka

<p>Żywość (ang. <i>Liveness</i> )</p>	<p>Jest związana ze wzmocnieniem tonów średnich i wysokich. Aby ją określić wykorzystuje się czas pogłosu dla częstotliwości z zakresu 500-1000Hz.</p> <p>Optymalne wartości żywości są osiągnięte przy następujących czasach pogłosu:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>2,1-2,3 s -dla muzyki romantycznej</li><li>1,8-2,0 s -dla muzyki symfonicznej</li><li>1,4-1,8 s -dla muzyki barokowej i klasycznej</li><li>1,3-1,8 s -dla opery</li></ul> <p>gdy czas pogłosu z zakresu 500-1000Hz jest mniejszy od 1,4 s sala nazywana jest „martwą”</p>
---	--

# Skala Beranka

Ciepło brzmienia <i>(ang. Warmth)</i>	Pełnia brzmienia basów. Wynika z czasu pogłosu dla niskich częstotliwości (poniżej 250Hz). Czas pogłosu powinien być dłuższy od czasu pogłosu dla żywości
Głośność dźwięku bezpośredniego <i>(ang. Loudness)</i>	Ilość energii akustycznej dochodzącej bezpośrednio do słuchacza zależna od odległości odbiorcy od źródła.
Równowaga akustyczna <i>(ang. Balance)</i>	Opisuje wyważenie sekcji orkiestry między sobą oraz między orkiestrą a solistami



# Skala Beranka

Zespołowość (ang. <i>Ensemble</i> )	Odpowiada zdolności wzajemnego słyszenia się wykonawców w orkiestrze. Zależy również od umiejętności muzyków i dyrygenta
Rozproszenie (ang. <i>Diffusion</i> )	Wiąże się z natężeniem dźwięku i kierunkiem, z którego dochodzi do słuchacza. Jest spowodowane istnieniem nieregularnych powierzchni w pomieszczeniu.

# Skala Beranka

- Oprócz wymienionych powyżej parametrów pozytywnych wyróżniono w skali Beranka parametry niezależne negatywne. Są to własności niepożądane, które przeszkadzają w odbiorze muzyki. Składają się na nie: echo, hałas, zakłócenia dźwiękowe oraz nierównomierność nagłośnienia. Jednak podstawą skali są parametry pozytywne i jeśli negatywne nie występują w znaczącym nasileniu nie są brane pod uwagę.

# Skala Beranka

Parametr	Opis
<i>Definicja, wyrazistość (ang. Clarity)</i>	<p>Jest informacją na temat tego czy fragmenty utworu lub grupy instrumentów mogą być rozróżnione przez słuchacza. W skład definicji wchodzi:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- żywość</li><li>- głośność dźwięku bezpośredniego do odbitego</li></ul> <p>Definicja może być uznana za dobrą, jeżeli jej składowe spełniają warunki opisane w skali parametrów niezależnych. Parametrem negatywnym, który wyklucza istnienie dobrej definicji jest echo.</p>

# Skala Beranka

<p><i>Jaskrawość</i> (ang. <i>Brilliance</i>)</p>	<p>Mówi o jasności brzmienia bogatego w tony harmoniczne. Zależy od:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- czasu opóźnienia pierwszego odbicia</li><li>- stosunku czasu pogłosu dal częstotliwości wysokich do czasu pogłosu dal częstotliwości średnich</li><li>- odległości pomiędzy słuchaczem a źródłem dźwięku</li></ul>
---	---

# Skala Beranka

<p><i>Bezwłoczność odzewu</i> (ang. <i>Attack</i>)</p>	<p>Parametr odpowiadający za wrażenie wykonawców dotyczące odpowiedzi pomieszczenia na wyartykułowany dźwięk. Wiąże w sobie takie parametry, jak:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- żywość</li><li>- intymność</li><li>- rozproszenie</li><li>- zespołowość</li><li>- echo</li></ul>
--	--

# Skala Beranka

<i>Obraz przestrzenny</i> (ang. <i>Texture</i> )	Jest odpowiedzialny za odczucia słuchaczy wytworzone na skutek różnicy czasu dochodzenia dźwięków z różnych kierunków.
<i>Zakres dynamiki</i> (ang. <i>Dynamic range</i> )	Jest to parametr pokazujący różnice pomiędzy dźwiękami najgłośniejszymi wytworzonymi przez orkiestrę i wzmocnionymi przez układ, jakim jest pomieszczenie a dźwiękami najcichszymi, którymi są zazwyczaj zakłócenia dochodzące z zewnątrz pomieszczenia. Zakres dynamiki maleje wraz ze wzrostem hałasu i zakłóceń.

# Skala Beranka

- W opisanej skali oceny największe znaczenie mają dwie wielkości akustyczne.
- Opóźnienie pierwszego odbicia: jako czas, który mówi o opóźnieniu dźwięku odbitego w stosunku do dźwięku bezpośredniego. Jest to wielkość pochodząca od odpowiedzi impulsowej pomieszczenia.
- Czas pogłosu: rozumiany jako czas, w którym energia zawarta w stanie ustalonym w pomieszczeniu maleje po wyłączeniu źródła o 60dB.

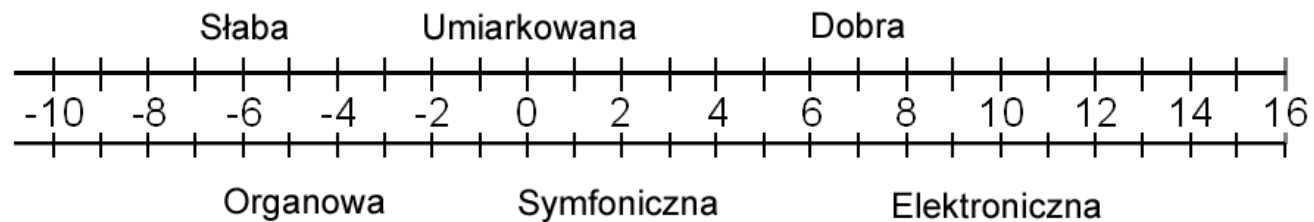
- ***Iloraz energii wczesnej do późnej  $C_t$***  - stosunek energii docierającej w czasie pierwszych kilkudziesięciu ms do energii docierającej po upływie tego czasu (parametr lokalny).

$$C_t = \frac{\text{energia} \mapsto \text{wczesna}(0 - 50,80\text{ms})}{\text{energia} \mapsto \text{późna}(50,80 - \infty)}$$

- ***Wskaźnik klarowności  $C_{50}$***  dla mowy i  ***$C_{80}$***  dla muzyki.



Mowa  $C_{50}$



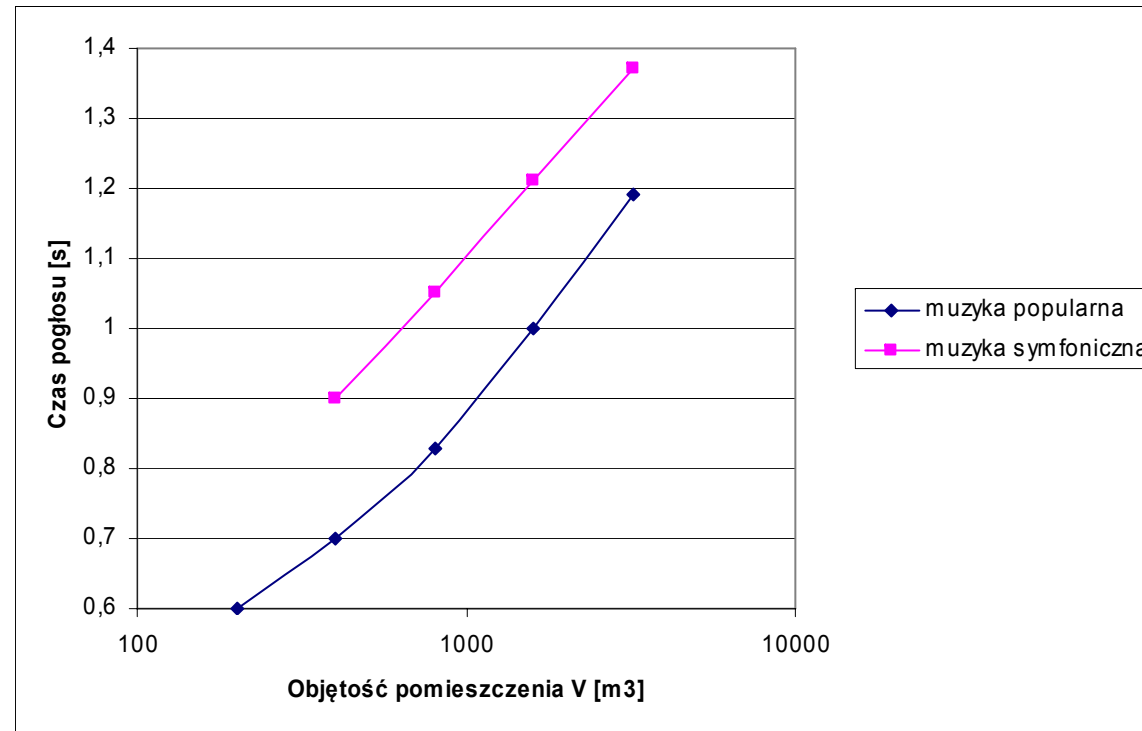
Muzyka  $C_{80}$

- Wskaźniki klarowności dla mowy  $C_{50}$  i muzyki  $C_{80}$  w decybelach

# Dodatkowe parametry

Przeznaczenie pomieszczenia	Liczba m <sup>3</sup> na 1 słuchacza
Pomieszczenia do słuchania mowy i lekkiej muzyki jak: teatry, sale chóru, audytoria, sale konferencyjne	4 – 7
Sale koncertowe (muzyka symfoniczna)	7 – 10
Sale kinowe	3 – 4

# Dodatkowe parametry



Optymalne czasy pogłosu dla  $f=512\text{Hz}$  od objętości pomieszczenia oraz rodzaju muzyki i mowy (muzyka symfoniczna i popularna)

# Dodatkowe parametry

Zrozumiałość mowy w zależności od przeznaczenia pomieszczeń

Rodzaj pomieszczenia	Zrozumiałość sylabowa %	Stopień zrozumiałości
Teatry dramatyczne (najlepsze miejsca), studia do odtwarzania mowy, audytoria, opery, operetki	95 – 85	Bardzo dobry
Teatry, opery, operetki, teatr dramatyczny (gorsze miejsca), sale konferencyjne, kina	85 – 75	Dobry