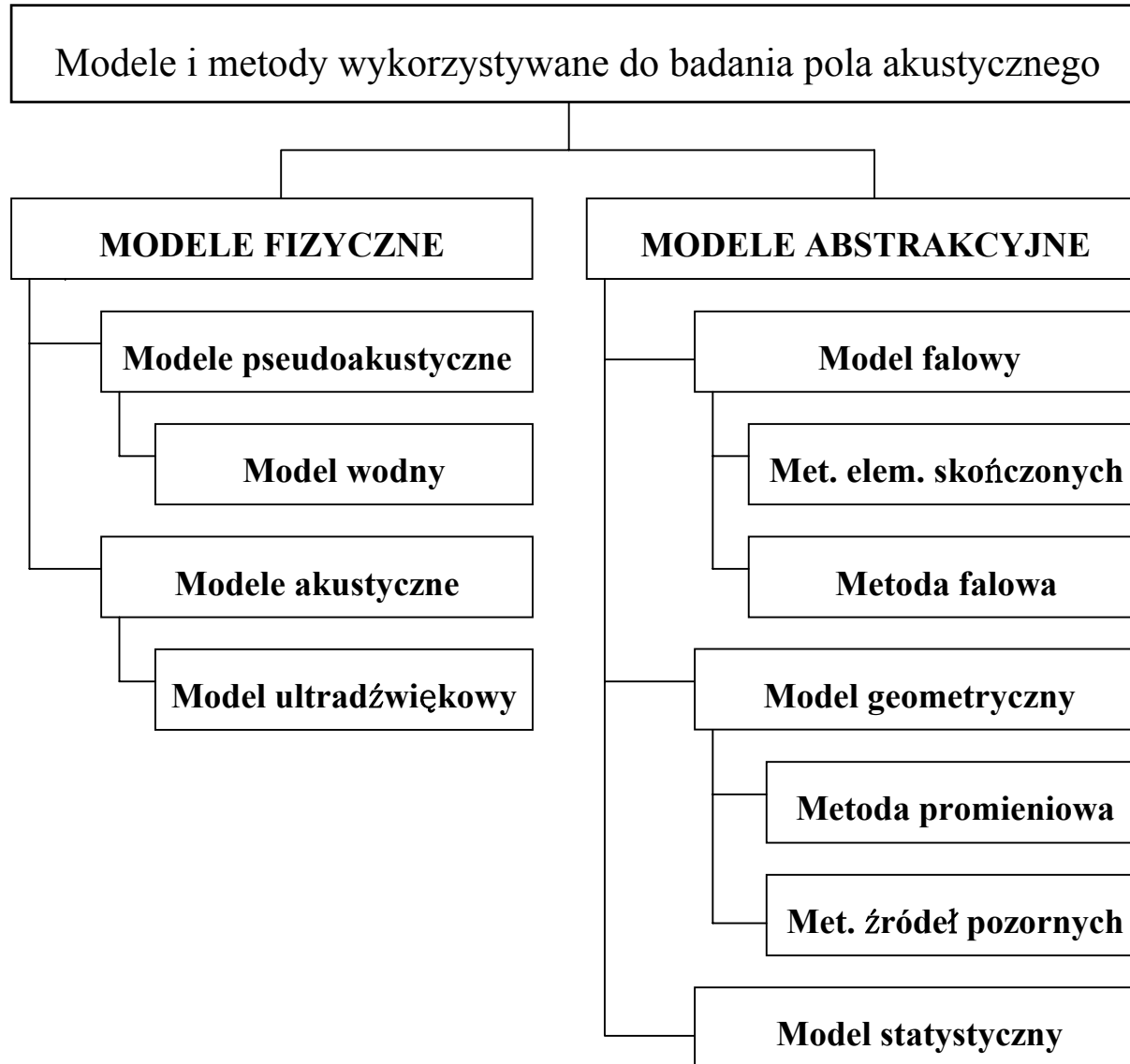


# Modelowanie pola akustycznego



Opracowała: prof. dr hab. inż. Bożena Kostek

# Klasyfikacje modeli do badania pola akustycznego



# Zastosowanie metod modelowych do badania pola akustycznego

Stosowanie modeli w celu badania pola akustycznego wynika z możliwości, jakie one dają. Są nimi:

- możliwość modelowania zarówno pomieszczeń już istniejących, jak i dopiero projektowanych (przypadek drugi umożliwia uzyskanie dużych oszczędności – nie ma potrzeby wprowadzania adaptacji akustycznej po wybudowaniu obiektu)
- możliwość dowolnej zmiany zarówno umiejscowienia, jak i charakterystyki źródeł dźwięku, materiałów pochłaniających, izolacyjnych oraz odbiorników na etapie projektu

# Modele abstrakcyjne

---

Do tej grupy należy zaliczyć wszystkie modele, które są pewną abstrakcją matematyczną opisującą rzeczywistość.

Wyróżnić można trzy postaci pola akustycznego, które determinują wybór metody modelowania:

<ul style="list-style-type: none"><li>• Pole akustyczne w pomieszczeniu falowo małym</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Metoda falowa i metoda elementów skończonych</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Pole akustyczne w pomieszczeniu falowo dużym o uporządkowanej strukturze frontów fal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Metody geometryczne</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Pole akustyczne w pomieszczeniu falowo dużym o nie uporządkowanej strukturze frontów fal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Metoda statystyczna</li></ul>

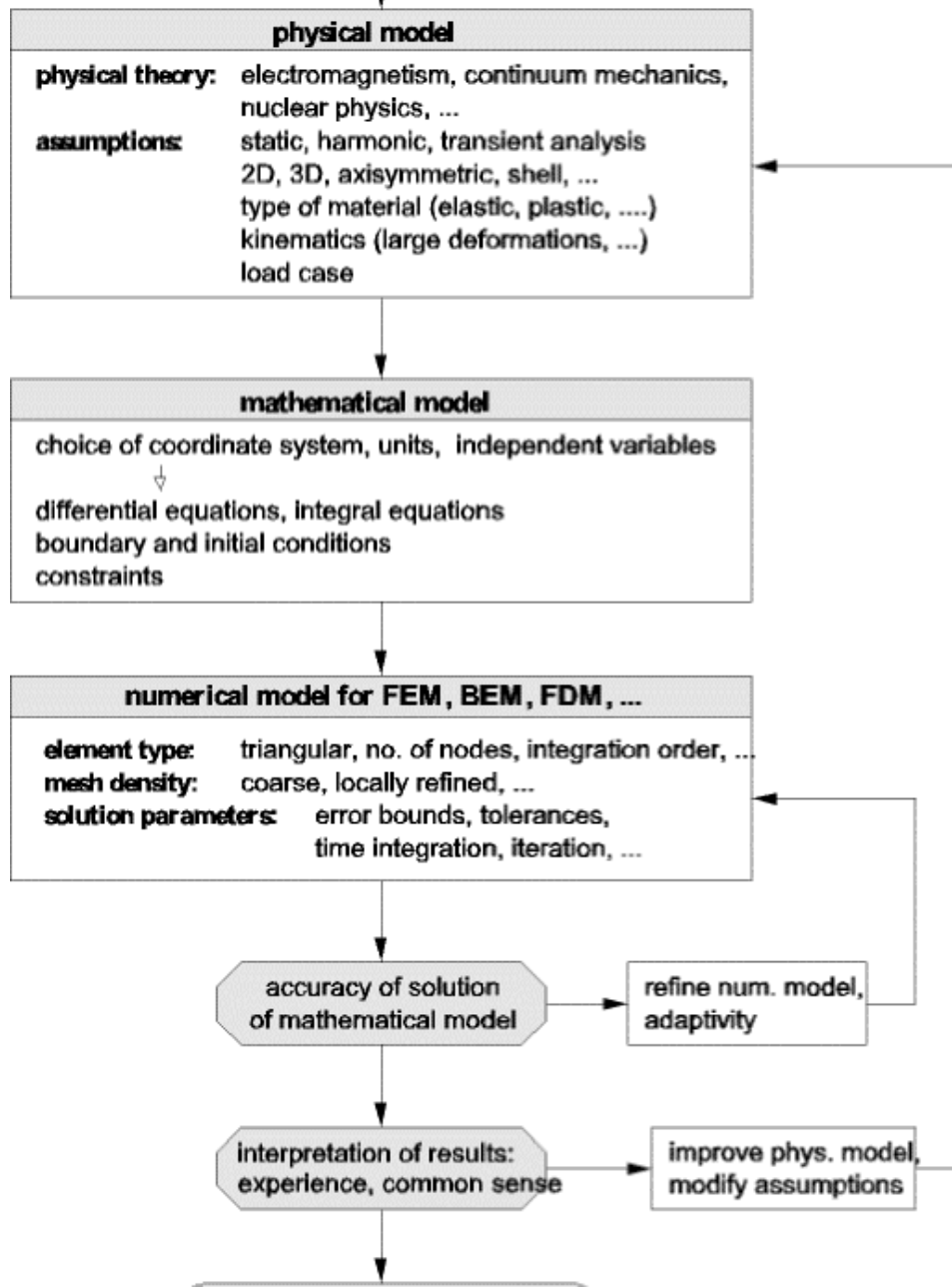
# Geometryczny model pola akustycznego

Opis pola metodą geometryczną polega na śledzeniu biegu czoła fali kulistej, rozchodzącej się w pomieszczeniu.

Wykreślna postać tej metody jest znana od dawna, była ona wykorzystywana już w starożytności przez budowniczych teatrów antycznych.

Założenia **modelu wykreślnego** są następujące:

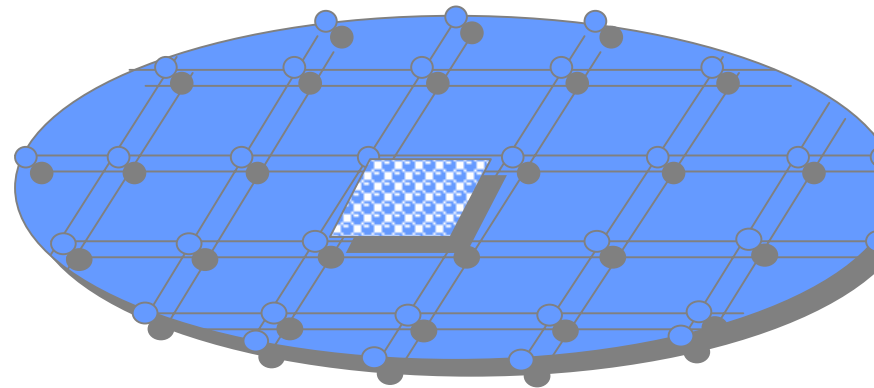
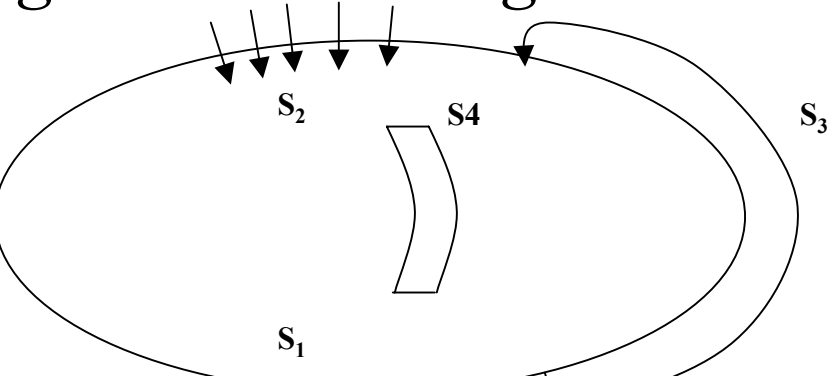
- odbicie fali jest zgodne z prawem Snella (kąt odbicia jest równy kątowi padania)
- droga fali między dwoma kolejnymi odbiciami jest odcinkiem linii prostej
- zaniedbane są zjawiska o charakterze falowym, tj. rozproszenie, ugięcie i nakładanie się fal



# Metody falowe

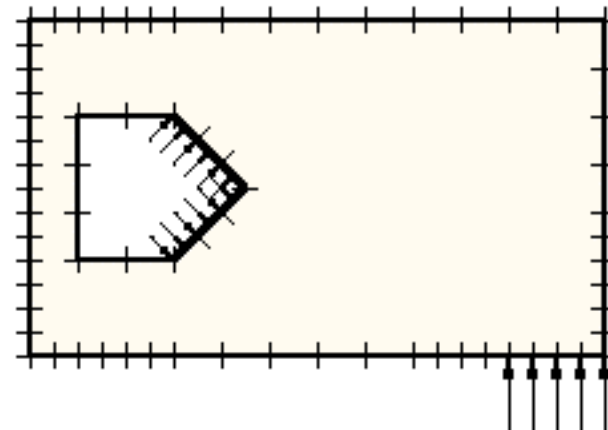
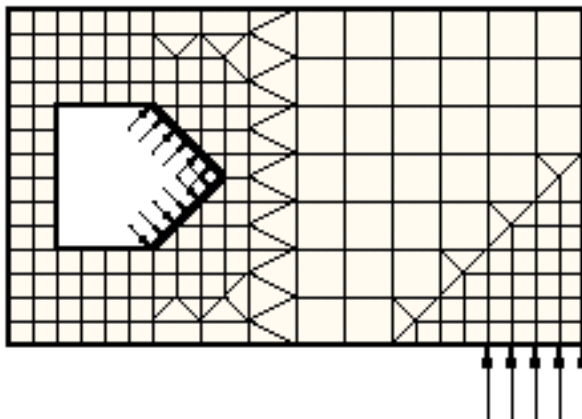
- Metody falowe
  - Metody elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*)
  - Metody elementów brzegowych (ang. *Boundary Element Method*)

Badany obszar akustyczny i  
jego warunki brzegowe



# Metody falowe

- Metody falowe
  - Metody elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*)
  - Metody elementów brzegowych (ang. *Boundary Element Method*)





# Geometryczny model pola akustycznego

Zastąpienie postępowania wykreślnego postępowaniem numerycznym umożliwia badanie rozchodzenia się fal w przestrzeni trójwymiarowej, zasadnicze zwiększenie dokładności odtworzenia kierunku biegu fal, jak również uwzględnienie znacznie większej liczby odbić.

Możliwe także stało się objęcie tą metodą zjawisk falowych zachodzących w pomieszczeniu, tj. rozproszonego odbicia fali, zmiany kierunku biegu fali wskutek ugięcia, a także interferencji fal.

# Geometryczny model pola

## akustycznego

### Założenia modelu :

- fale dźwiękowe biegnące z punktowego źródła dźwięku zastępuje się promieniami dźwiękowymi, które podlegają prawu zwierciadlanego odbicia od ścian (kąąt odbicia promienia od ściany jest równy kątowii padania i leży na płaszczyźnie zawierającej promień padający i prostą prostopadłą do ściany w punkcie przebicia jej przez promień)
- jedynym efektem interferencji sygnałów akustycznych docierających do punktu obserwacji jest dodawanie się energii fal ( uproszczenie spowodowane nie uwzględnieniem zależności fazowych - patrz założenie poprzednie )
- wymiary pomieszczenia są duże w porównaniu z długością fali (model zawodzi w przypadku fal o niskich częstotliwościach - długość fali porównywalna jest z wymiarami powierzchni odbijających i dla fal o częstotliwościach wysokich, gdy długość fali jest rzędu wymiaru struktur zewnętrznych powierzchni odbijającej),
- odbiorniki są sferami - wynika to z faktu, że prawdopodobieństwo trafienia promienia w punkt jest znikomo małe.

### Ograniczenia modelu :

- uwzględnienie tylko źródeł punktowych,
- uzależnienie długości modelowanej fali od wymiarów pomieszczenia, - pominięcie zależności fazowych.

# Metoda źródeł pozornych

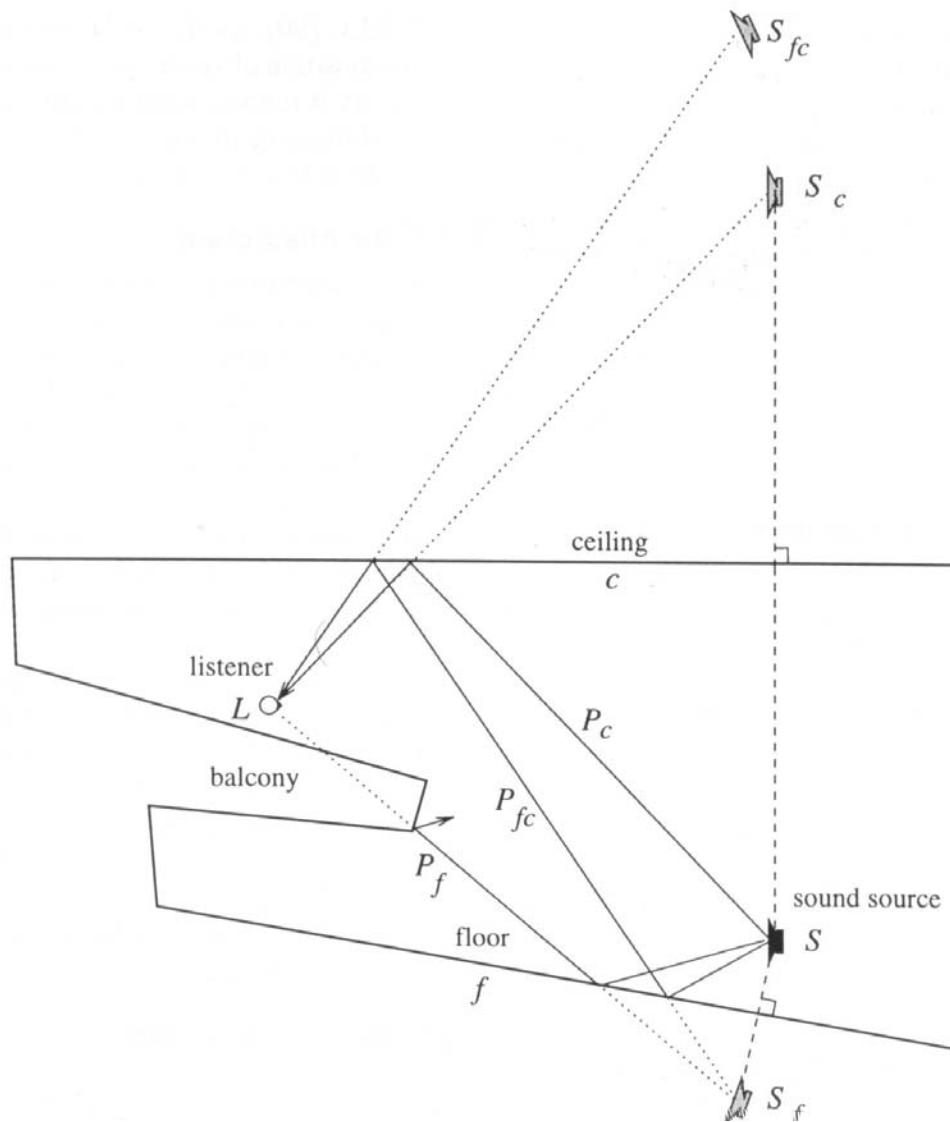
---

Metoda źródeł pozornych polega na zastąpieniu rzeczywistego źródła dźwięku oraz ścian pomieszczenia układem pozornych źródeł dźwięku, odpowiednio rozmieszczonych w przestrzeni. Zasady tworzenia tych źródeł pozostają w ścisłej analogii do zasad tworzenia obrazów pozornych, znanych w optyce geometrycznej

Przykładowy algorytm, pozwalający zrealizować metodę źródeł pozornych w postaci obliczeniowej, składa się z następujących elementów:

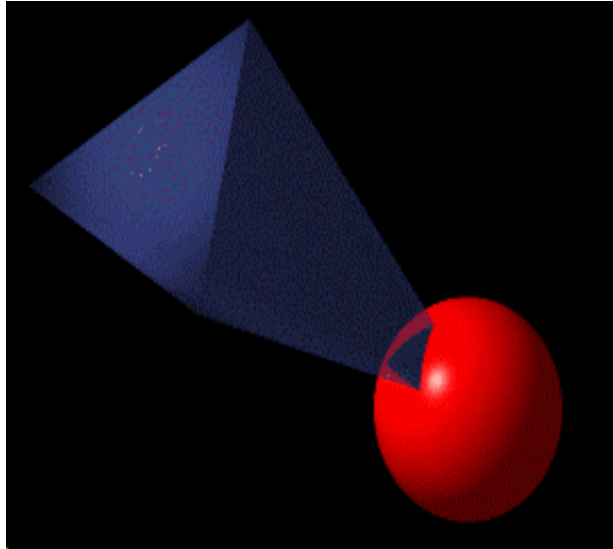
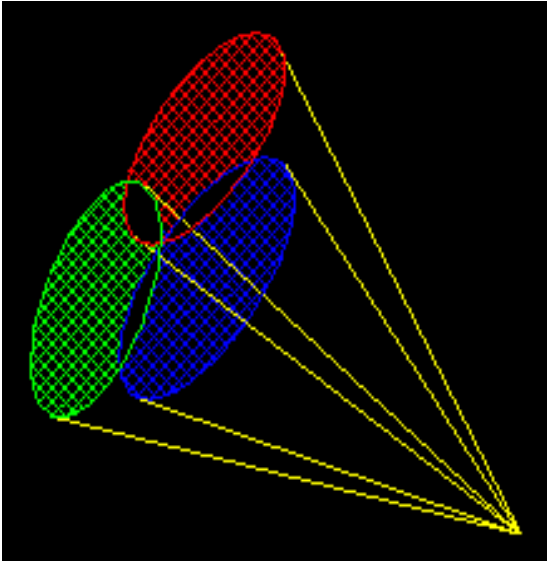
- ponumerowanie ścian pomieszczenia oraz przypisanie im pogłosowych współczynników pochłaniania dźwięku,
- utworzenie ciągów liczbowych, będących kombinacjami numerów poszczególnych ścian,
- obliczenie współrzędnych źródeł pozornych, reprezentujących poszczególne sekwencje odbić,
- obliczenie echogramu, tj. zależności energii akustycznej od czasu w zadanym punkcie przy pobudzeniu pomieszczenia im pulsem dźwiękowym.

# Metoda źródeł pozornych



# Metoda źródeł pozornych

---



# Metoda promieniowa

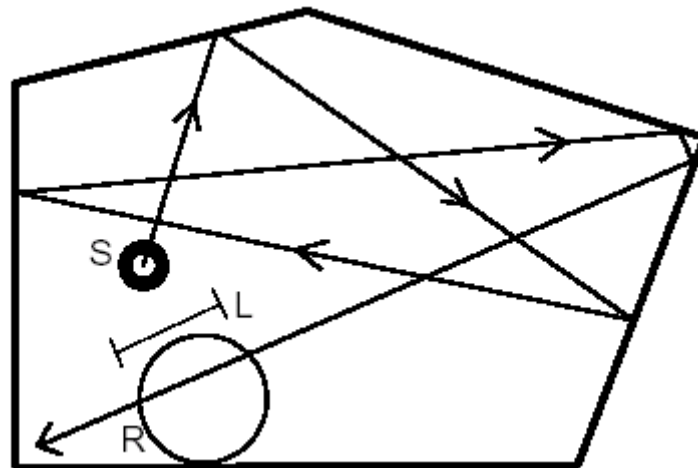
---

W metodzie promieniowej ciągłą falę akustyczną rozważa się jako dyskretny zbiór tzw. promieni dźwiękowych, rozprzestrzeniających się z prędkością propagacji dźwięku i niosących jednakową część energii emitowanej przez źródło. Energia ta jest tracona w kolejnych odbiciach, proporcjonalnie do współczynnika pochłaniania dźwięku danej powierzchni ograniczającej. Pojedynczy promień nie zmniejsza swej wartości energii wraz z kwadratem odległości. Spadek energii spowodowany odległością od źródła jest uwzględniony przez zmniejszenie się wraz ze wzrostem odległości liczby promieni docierających do odbiornika. Ponieważ prawdopodobieństwo trafienia w punkt jest znikomo małe, odbiornik zastępuje się sferą. Uśrednienia w obszarze obserwacji wszystkich danych związanych z energią poszczególnych promieni dźwiękowych prowadzi do powstania odpowiedzi impulsowej wnętrza w dziedzinie czasu

# Metoda promieniowa

---

Metoda promieniowa, tak jak i metoda źródeł pozornych, posługuje się geometrycznym modelem propagacji dźwięku. Niezbędne wobec tego jest opracowanie także geometrycznego modelu pomieszczenia, w którym rozchodzą się promienie dźwiękowe oraz modelu źródła dźwięku i odbiornika.



Klasyczna metoda promieniowa (ang. *Ray Tracing*)

# Metoda statystyczna

---

Warunek stosowalności Schroedera:

$$f = 4000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

$T$  – czas pogłosu

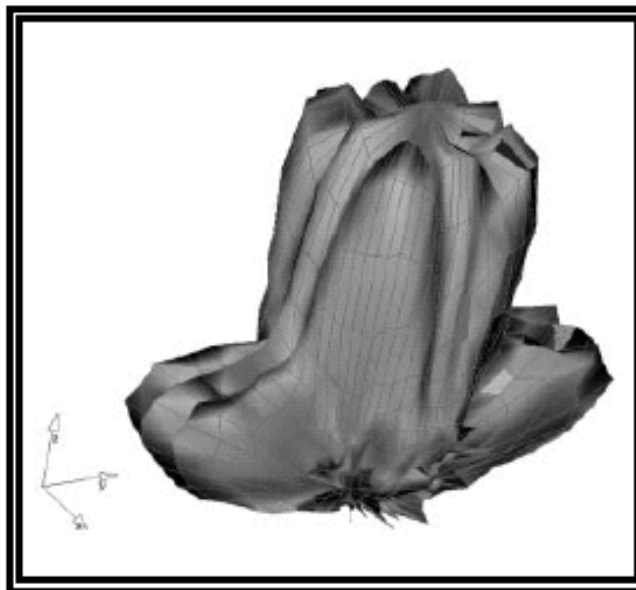
$V$  - objętość pomieszczenia



# Zjawisko rozproszenia

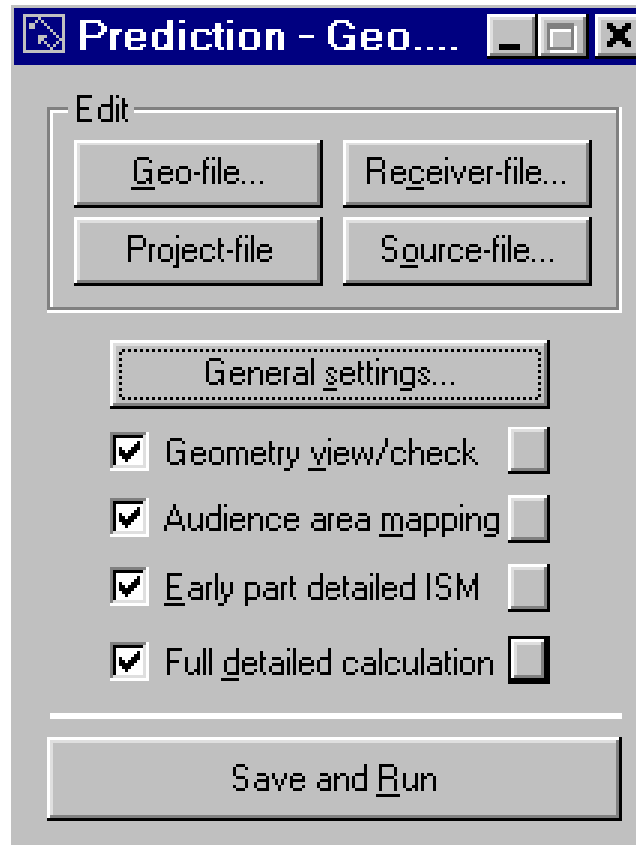
---

*„Współczynnik rozproszenia  $S$  danej powierzchni jest stosunkiem pomiędzy mocą dźwięku odbitego w sposób różny od lustrzanego odbicia oraz mocą całkowitą dźwięku odbitego.”*



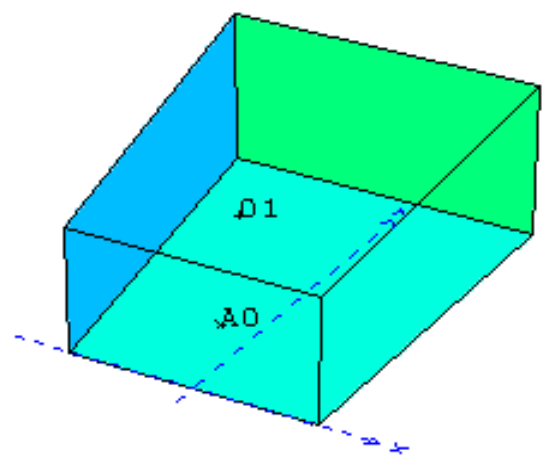
# Komputerowa symulacja akustyki (CATT Acoustic)

---





Plot-file viewer - SHADED.PLT



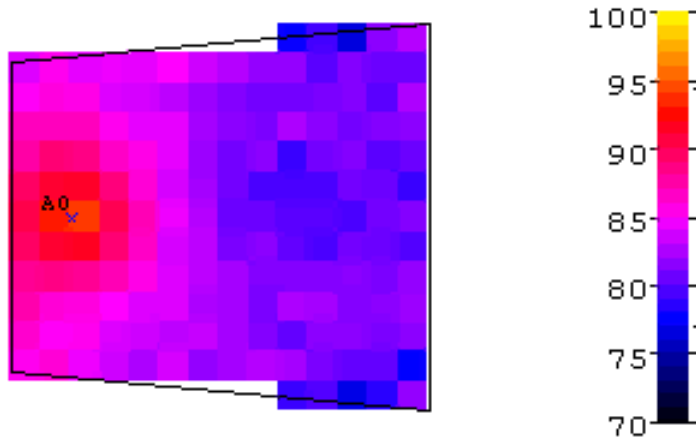
Plot-file cont...

Dist	Lens	Ste
▲	▲	▲
▼	▼	▼
Move	Rotate	
◄	◄	
►	►	
<input checked="" type="radio"/> Natural	Reset	
<input type="radio"/> Parallel		
<input type="radio"/> Camera	<input type="radio"/> Set	
Play WAV-file		
File	Frame	
<<	>>	<
		>

# Komputerowa symulacja akustyki – nierównomierność pola akustycznego

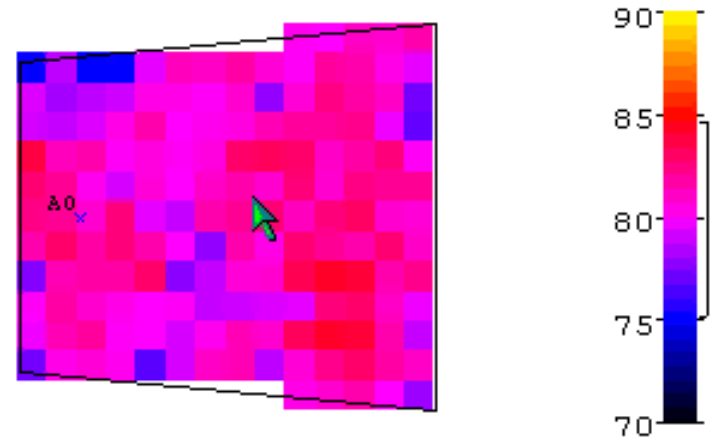
SPL [dB] 1 kHz

0,00 < t < 20,0 ms



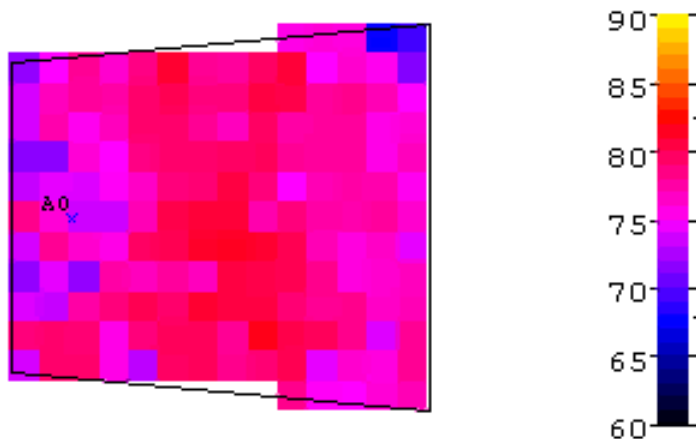
SPL [dB] 1 kHz

20,0 < t < 50,0 ms



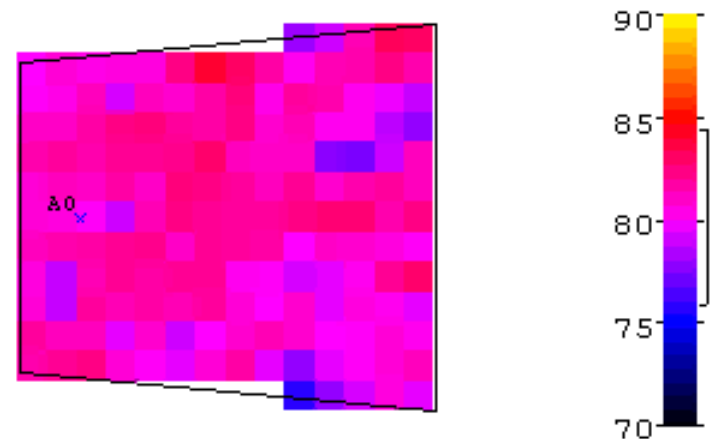
SPL [dB] 1 kHz

50,0 < t < 80,0 ms

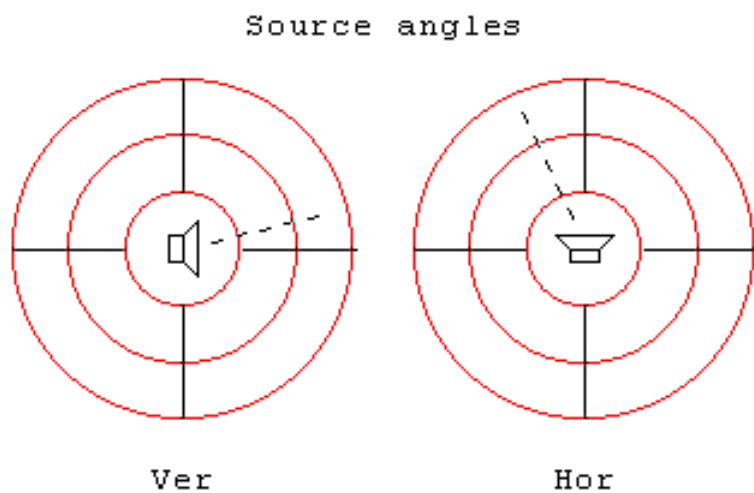
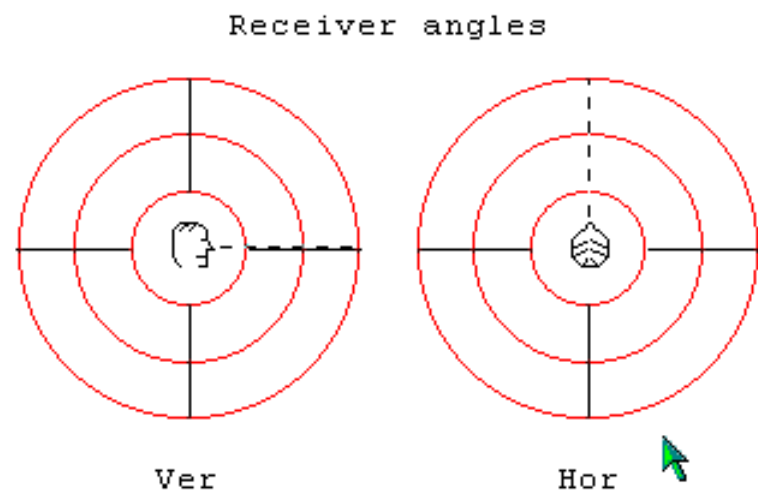
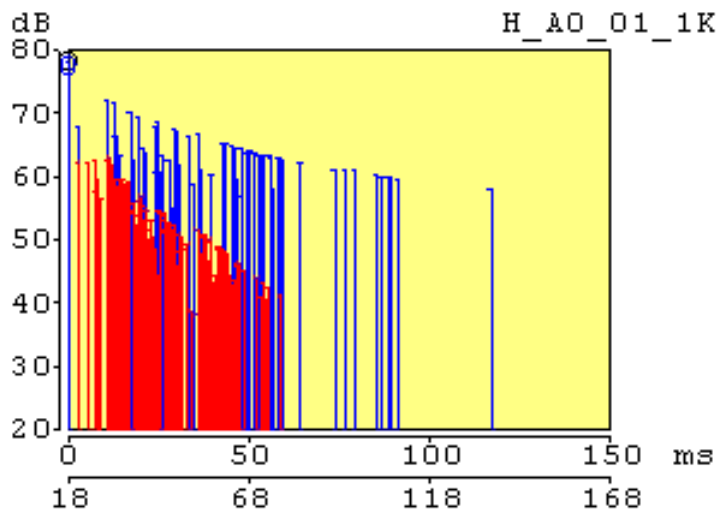


SPL [dB] 1 kHz

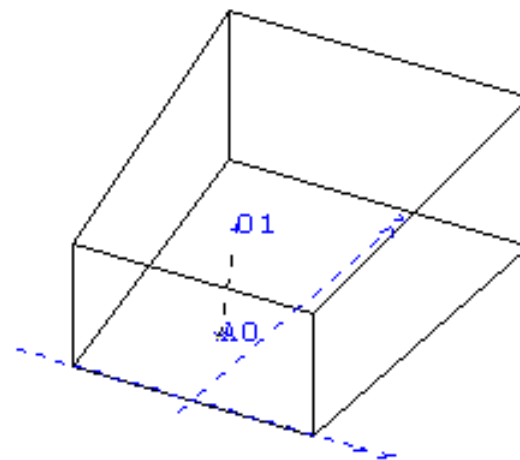
80,0 < t < 200,0 ms



# Komputerowa symulacja akustyki - odpowiedź impulsowa

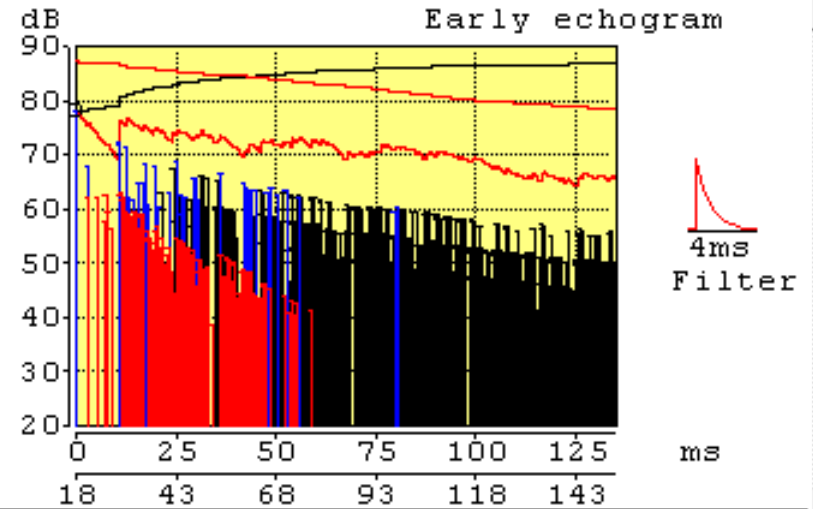
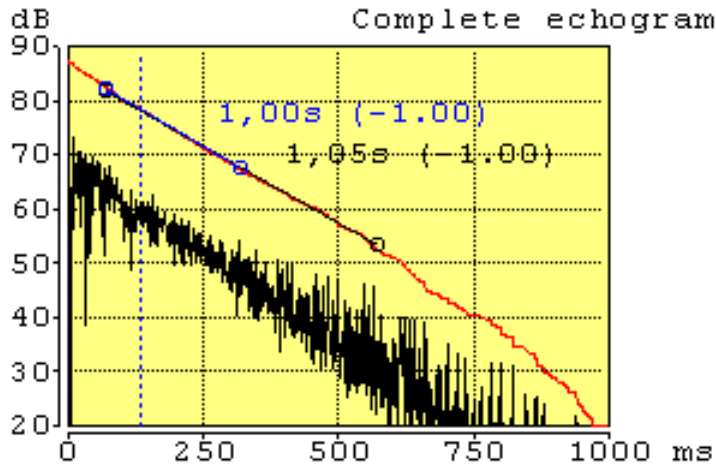


S-R

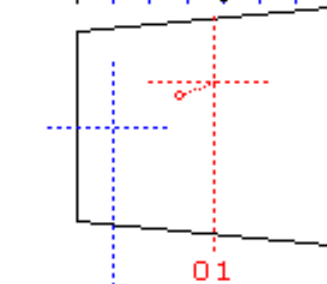


# Komputerowa symulacja akustyki – odpowiedź impulsowa

Plot-file viewer - E\_A0\_01\_1K.PLT

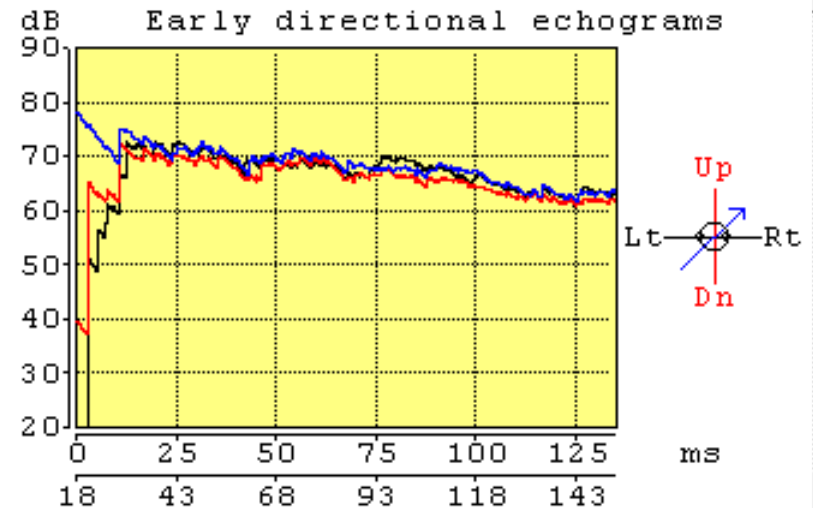


EDT	0,91 s
T-15	1,00 s
T-30	1,05 s
D-50	55,1 %
C-80	4,3 dB
LEF1	41,1 %
LEF2	28,3 %
Ts	62,1 ms
SPL	87,4 dB
G-10	13,4 dB



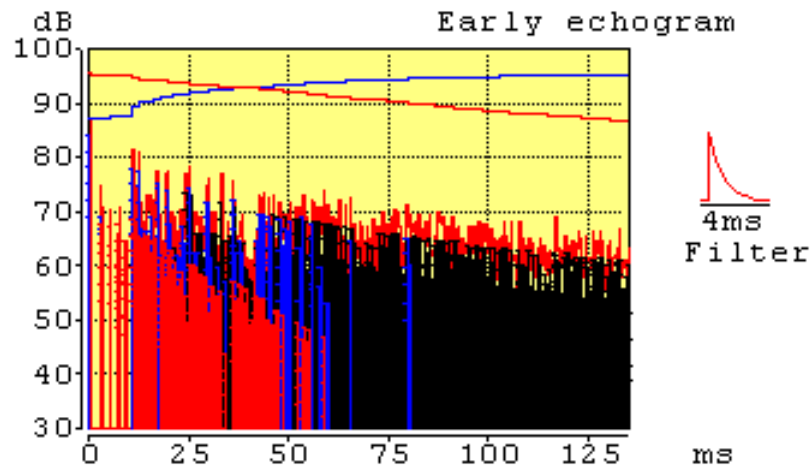
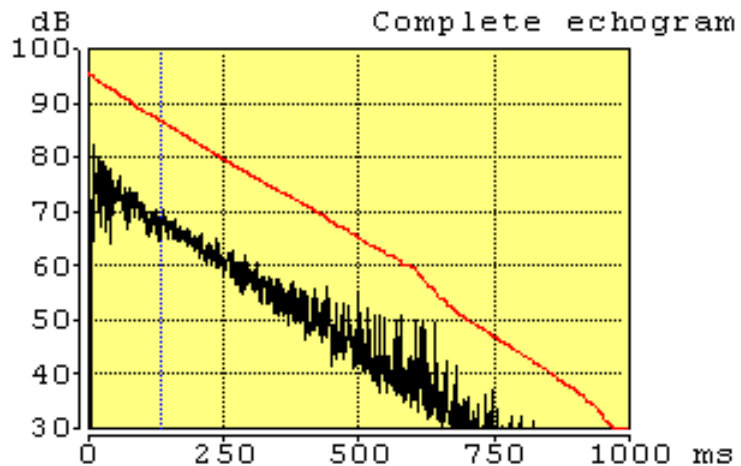
OMNI  
DI = 0 dB  
94.0 dB at 1 m  
1 kHz

2m

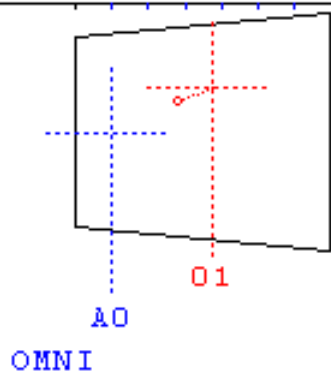


# Komputerowa symulacja akustyki

Plot-file viewer - E\_A0\_01\_SUM.PLT

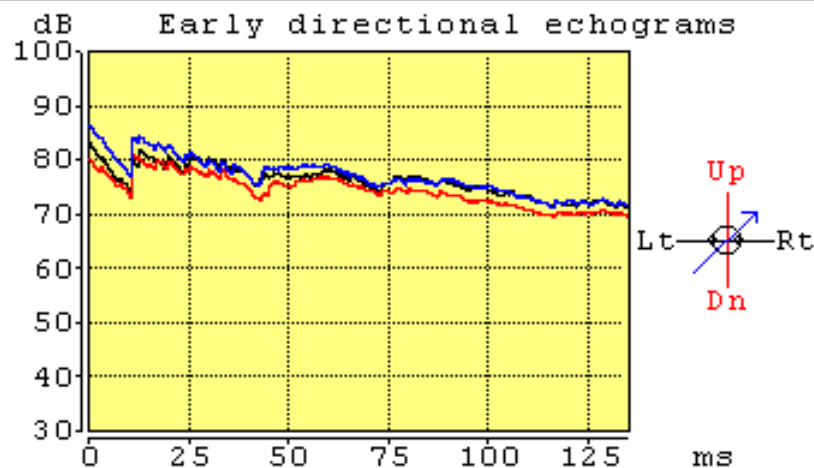


D-50	56,8	%
C-80	4,4	dB
LEF1	39,1	%
LEF2	26,6	%
Ts	60,5	ms
SPL	95,8	dB
G-10	13,0	dB

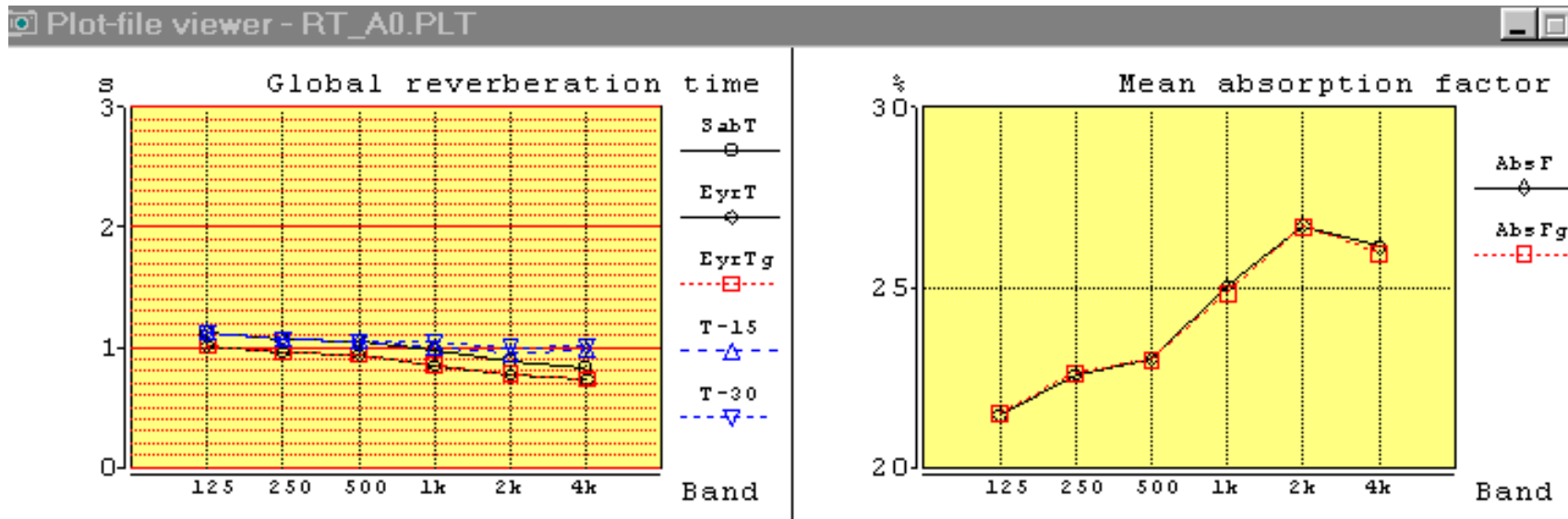


Sum 125-4k Hz

2m



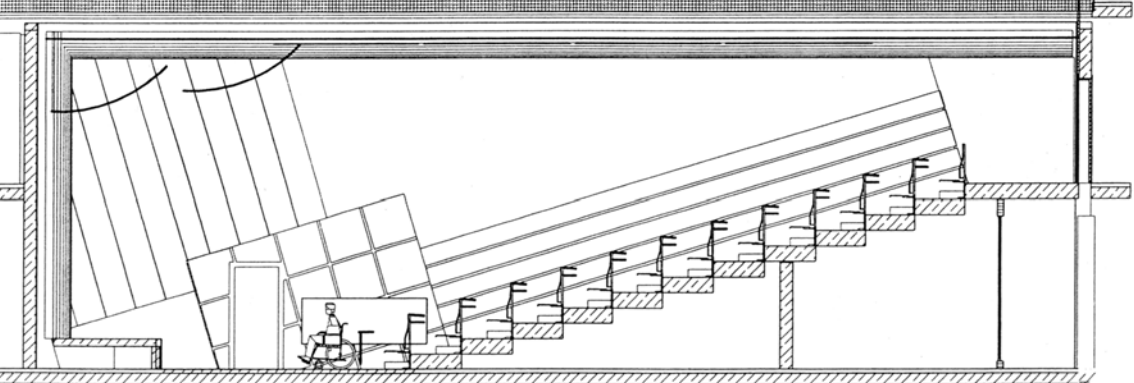
# Komputerowa symulacja akustyki - czas pogłosu



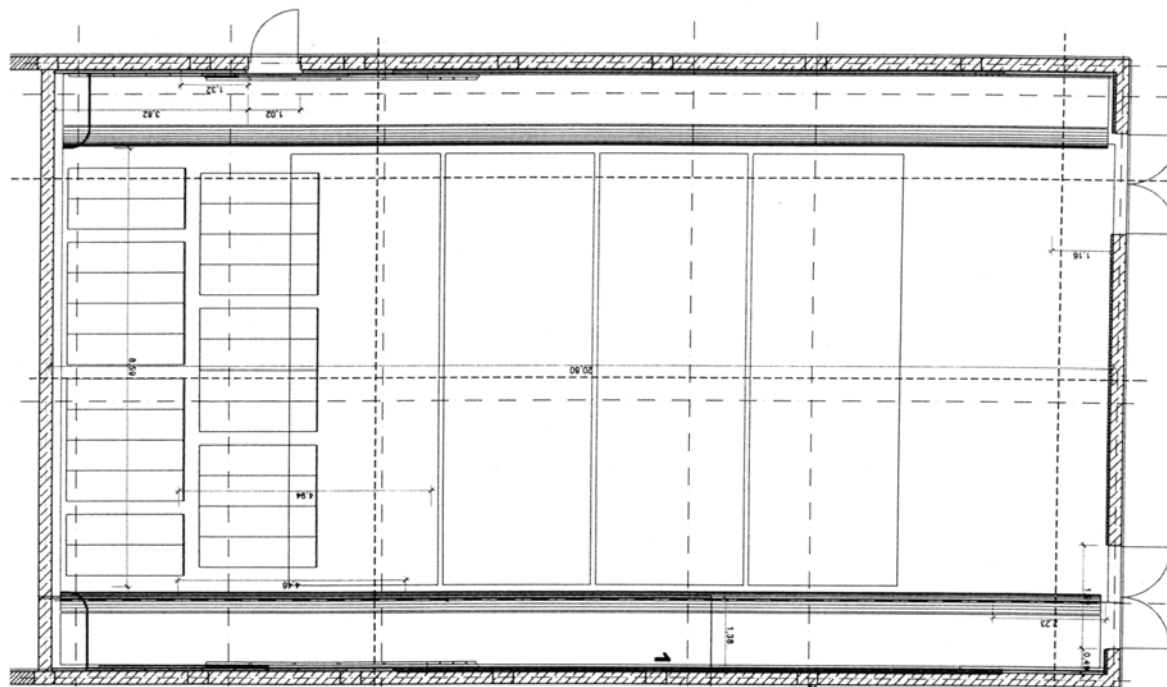
	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	1,01	0,96	0,93	0,84	0,77	0,73	s
EyrTg	1,01	0,95	0,93	0,85	0,77	0,73	s
SabT	1,12	1,07	1,05	0,96	0,88	0,83	s
T-15	1,13	1,07	1,05	1,00	0,95	0,98	s
T-30	1,12	1,06	1,04	1,05	1,00	1,00	s
AbsF	21,44	22,56	22,99	25,03	26,73	26,13	%
AbsFg	21,48	22,60	22,97	24,82	26,67	25,93	%
MFP	6,06	6,08	6,07	6,07	6,12	6,07	m
Diffs	29,66	32,27	34,33	36,73	39,43	41,77	%

Trunc 1000,0 ms  
 Rays 998 (used/oct)  
 0 (lost/oct)  
 0 (absorbed/oct)  
 Angle 6,43 degrees

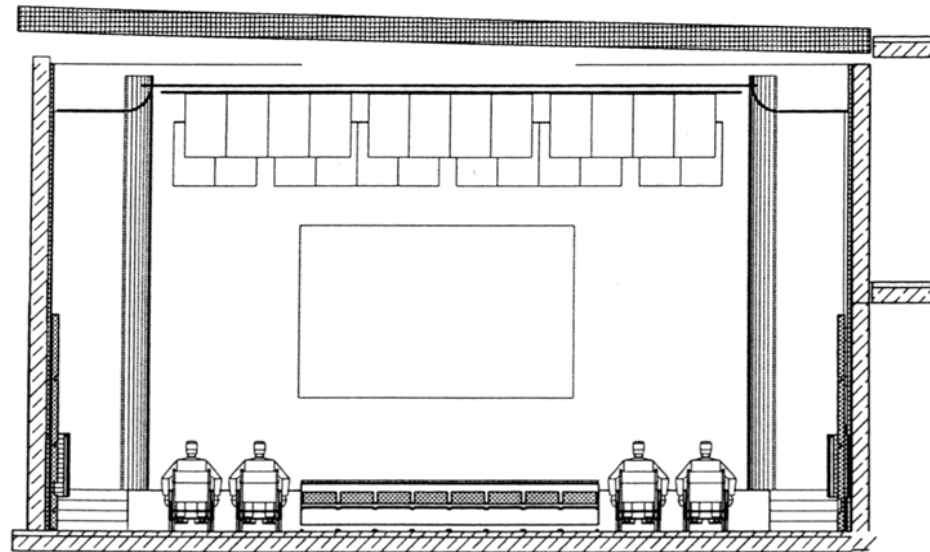
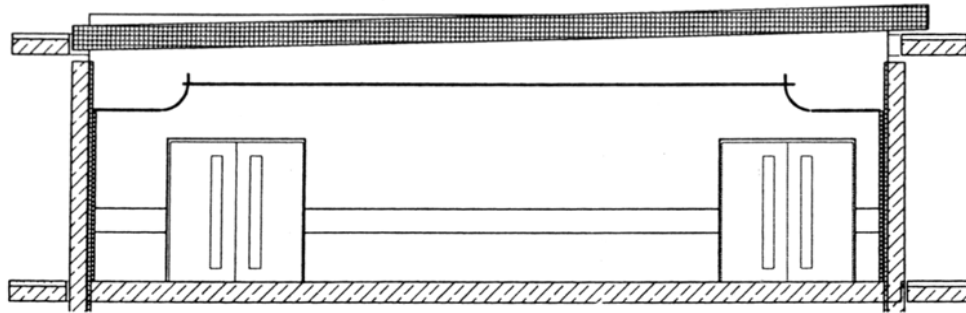


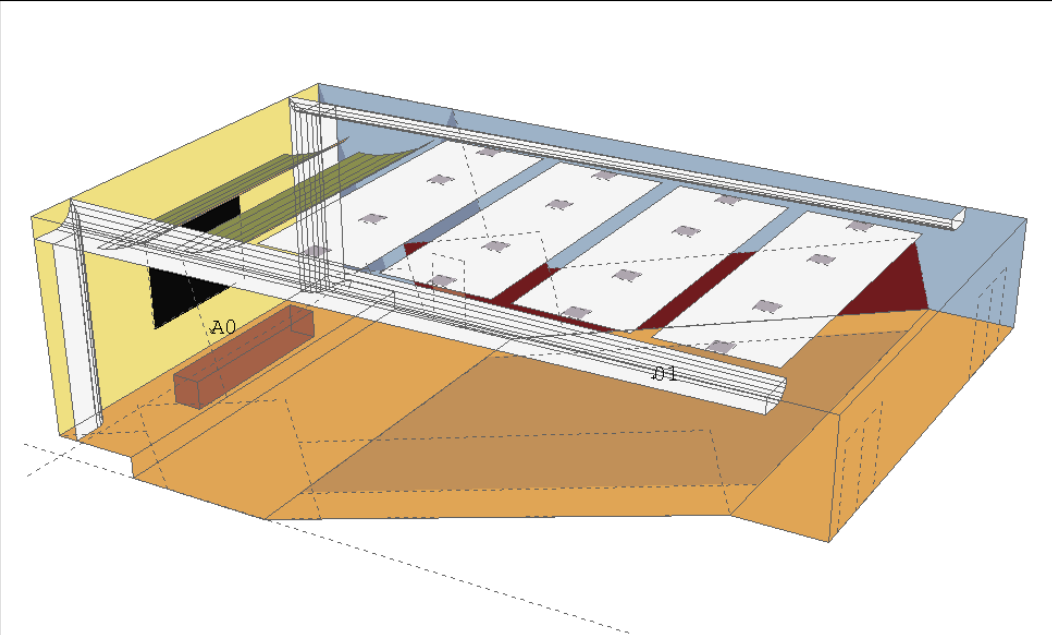


Przekrój podłużny sali audytorium – plan architektoniczny



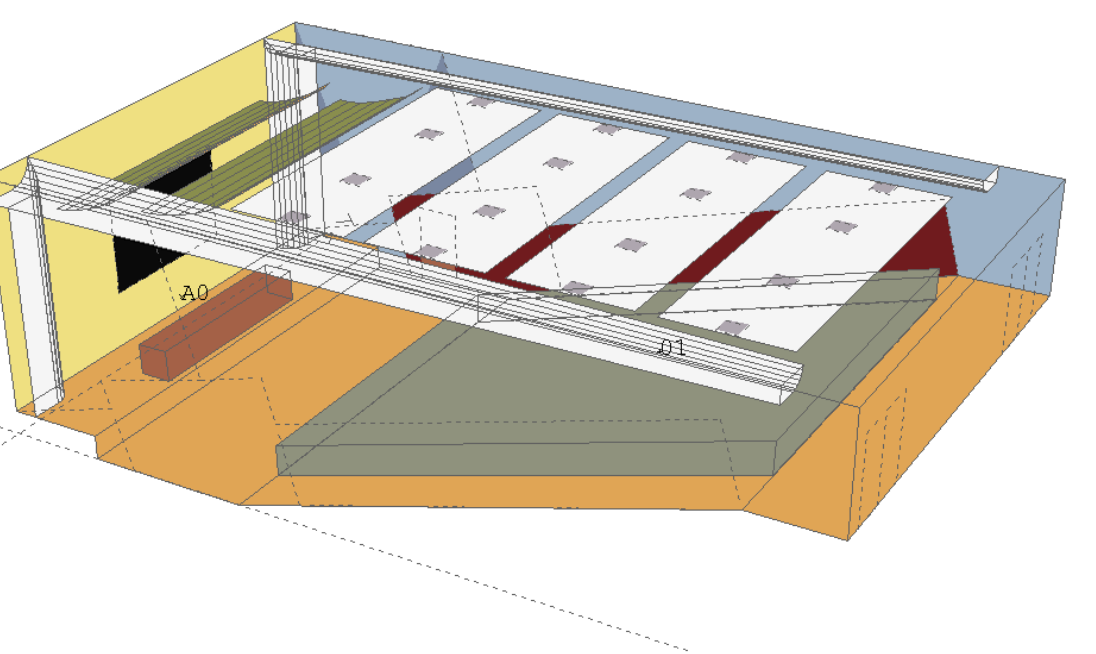
Przekroje poprzeczne sali audytorium – plan architektoniczny, od góry: widok ściany tylnej, widok ściany przedniej



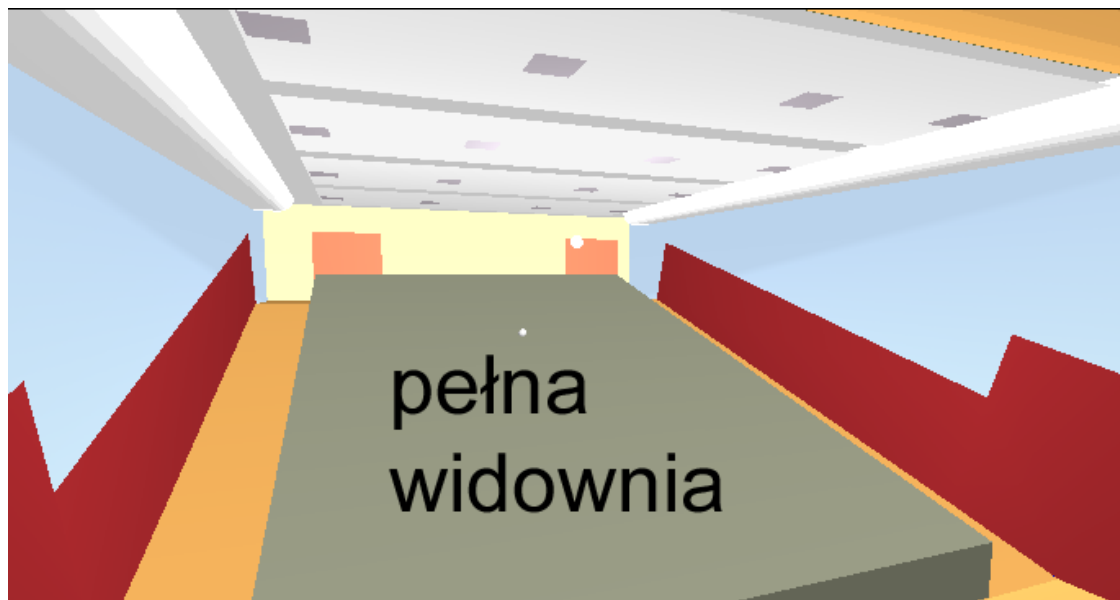


Plan sali audytoryjnej – efekt modelowania w programie CATT-Acoustic z uwzględnieniem pustych ławek.





Plan sali audytoryjnej – efekt modelowania w programie CATT-Acoustic z uwzględnieniem pełnej sali.



## Audience area mapping

Settings

Number of rays/oct:   Auto number:  Map step:  m

Ray truncation time:  ms  Auto time Map height above audience planes:  m

Add direct sound with phase  Animate rays

Plot-files

Select direct-sound only options (no rays cast)  Contours  -3 dB  -6 dB  -9 dB

Octave-bands

125  250  500  1k  2k  4k  8k  16k  surr  A-weighted

PAR1\_oct.PLT

PAR2\_oct.PLT

PAR3\_oct.PLT

RASTI  STIuser  Include source jd

Mapping in time intervals (relative first arrival)

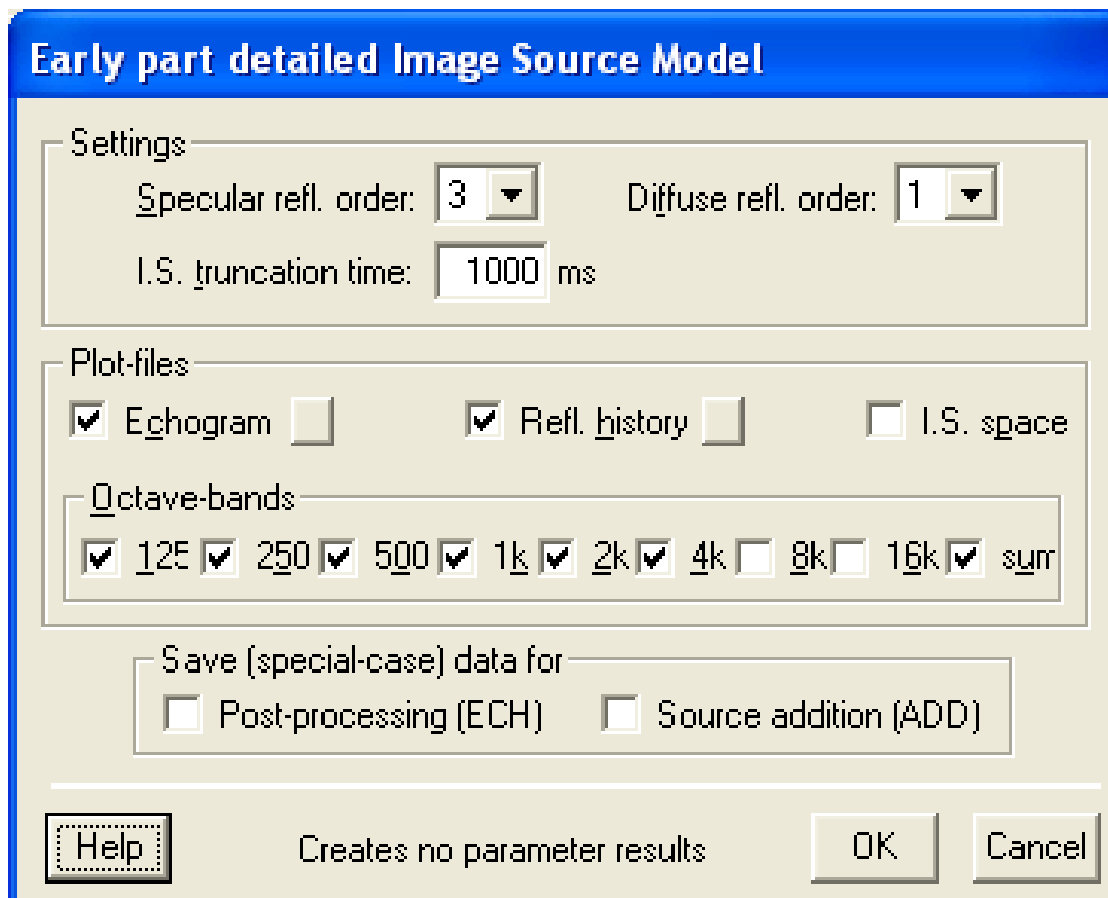
SPL Map 1:  ->  ms Map 2:  ->  ms

LF Map 3:  ->  ms Map 4:  ->  ms

Direct only

Help  OK Cancel

Ustawienia w sekcji Tworzenia map obszaru odsłuchu



Ustawienia w sekcji Modelowanie źródła

**Full detailed calculation**

Settings

Number of rays/octave:   Auto number

Ray truncation time:  ms  Auto time

Late part ray-trace (instead of RTC) for special cases  ?

Include parameters normalized with expected values

Create one text-file/receiver (E\_ss\_rr.TXT)  Animate rays

Plot-files

For each receiver

Echograms  Decays  Sound Roses  Vectorgram

Echogram smoothing filter:

Echogram/Sound Rose/Vectorgram bands

12E  25C  50C  1k  2k  4k  8k  16k  sum

Over all receivers

Parameter map

Parameter trend

Normalized trend

BASTI  STIuser

Global statistics

Absorption

Free paths

Wall hits

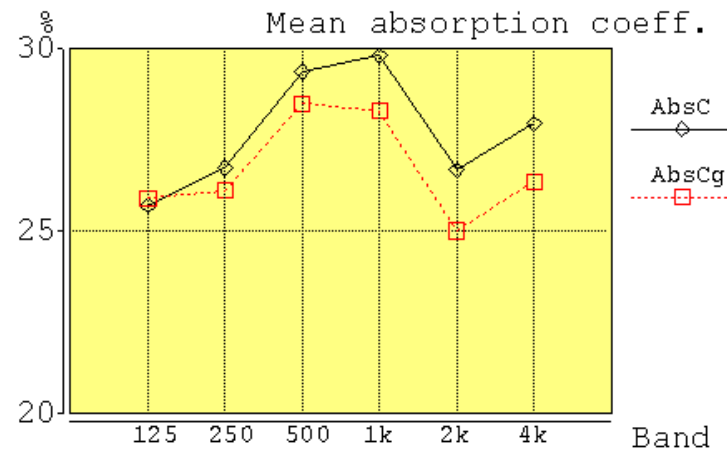
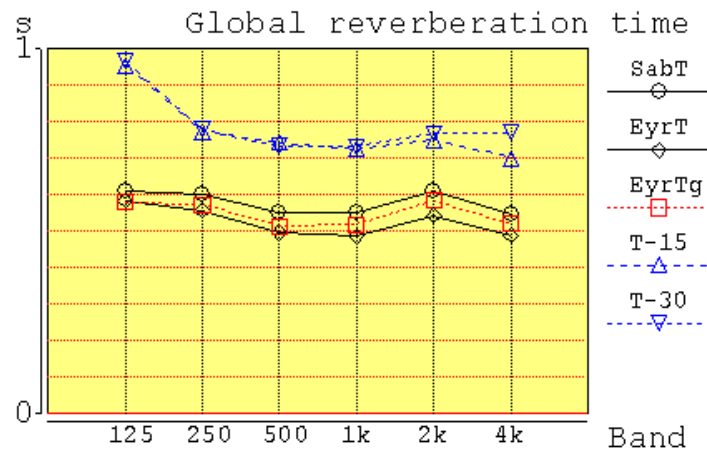
RT overview  Ref RT

Save data for

Post-processing (ECH)  Source addition (ADD)

PARAM\_ss.TXT  
always created

Ustawienia w sekcji *Szczegółowych obliczeń*



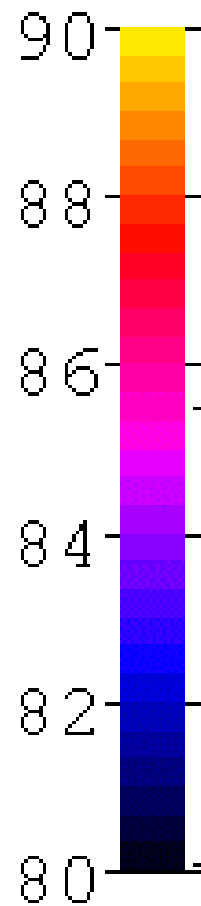
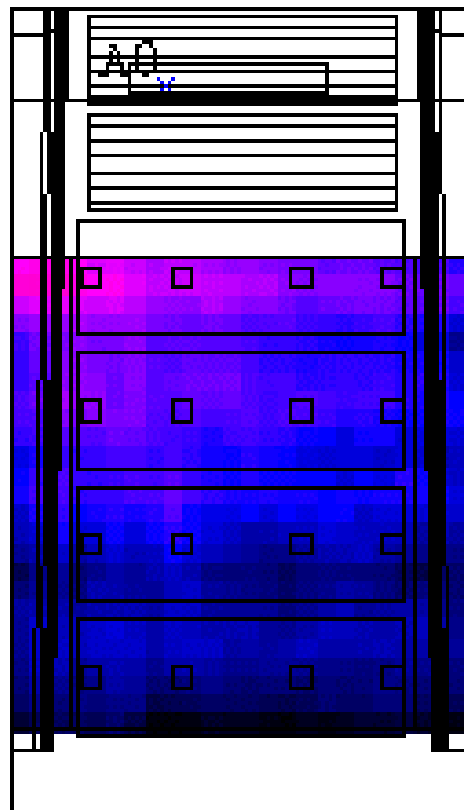
	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	0,58	0,56	0,50	0,49	0,54	0,49	s
EyrTg	0,58	0,57	0,51	0,52	0,58	0,52	s
SabT	0,61	0,60	0,55	0,55	0,61	0,54	s
T-15	0,95	0,77	0,74	0,72	0,75	0,70	s
T-30	0,97	0,78	0,73	0,73	0,77	0,77	s
AbsC	25,70	26,73	29,36	29,81	26,67	27,94	%
AbsCg	25,90	26,11	28,49	28,28	25,00	26,34	%
MFP	4,31	4,31	4,31	4,33	4,31	4,32	m
Diffss	10,10	10,13	10,11	10,11	10,10	10,11	%

Trunc 1000,0 ms  
 Rays 99822 (used/oct)  
 0 (lost/oct)  
 0 (absorbed/oct)  
 Angle 0,64 degrees

Czasy pogłosu i współczynniki całkowitej absorpcji w pustej sali

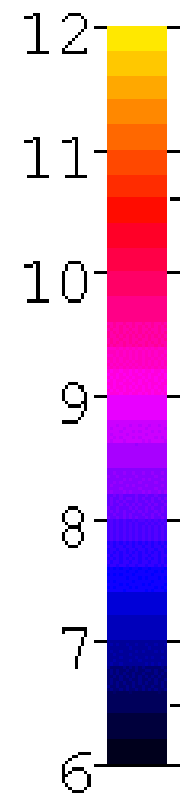
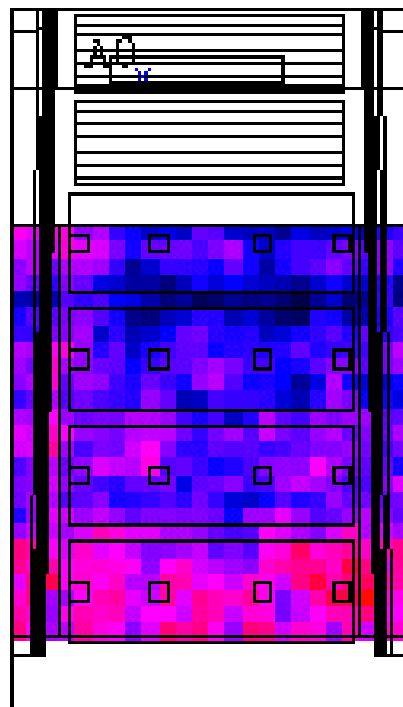


SPL [dB] 500 Hz



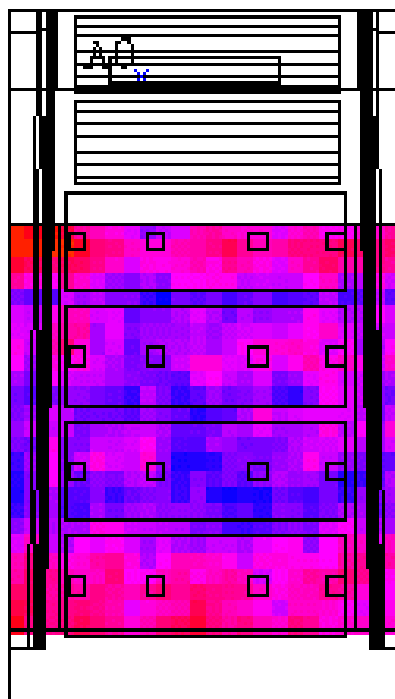
Rozkład parametru *SPL* dla częstotliwości 500Hz

C-80 [dB] 500 Hz



Rozkład parametru  $C_{80}$  dla częstotliwości 500Hz

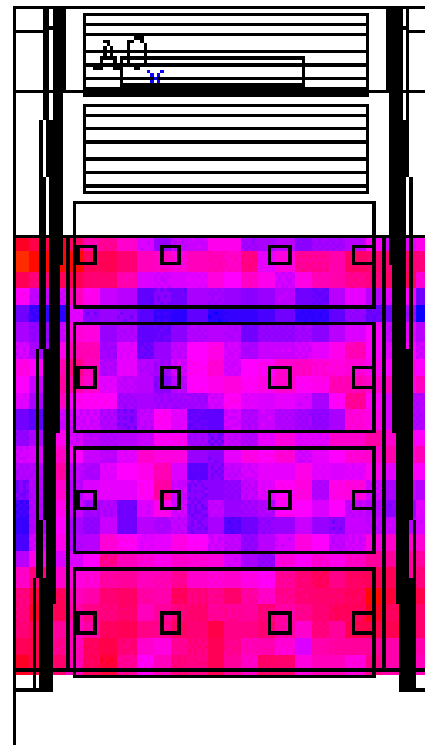
D-50 [%] 500 Hz



Rozkład parametru  $D_{50}$  dla częstotliwości 500Hz

RASTI [%]

without noise



79

77

75

73

71

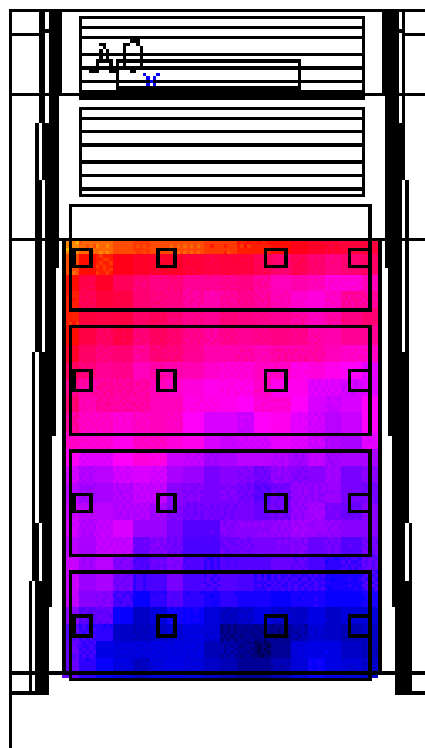
69

67

65

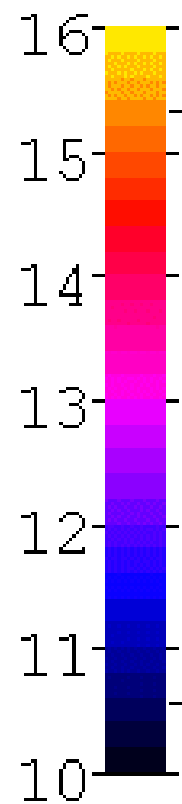
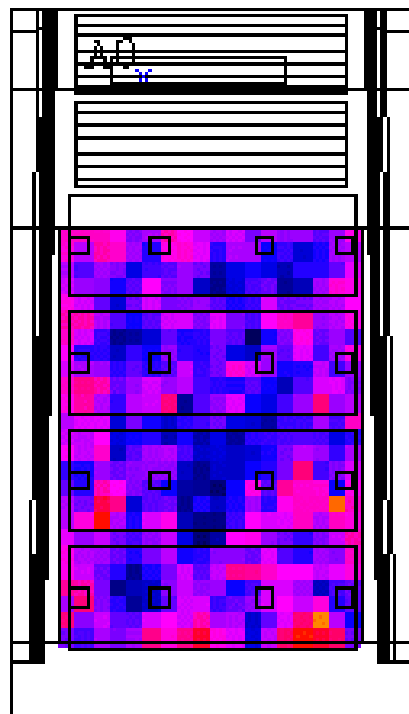
Rozkład parametru RASTI przy pustej widowni

SPL [dB] 500 Hz



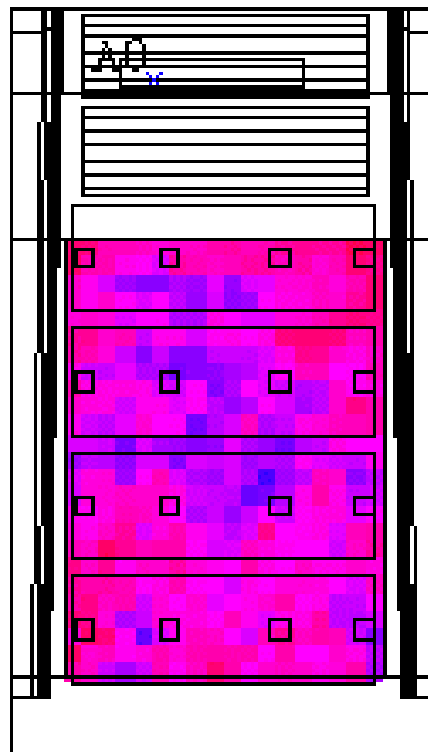
Rozkład parametru SPL przy zapełnionej widowni

C-80 [dB] 500 Hz

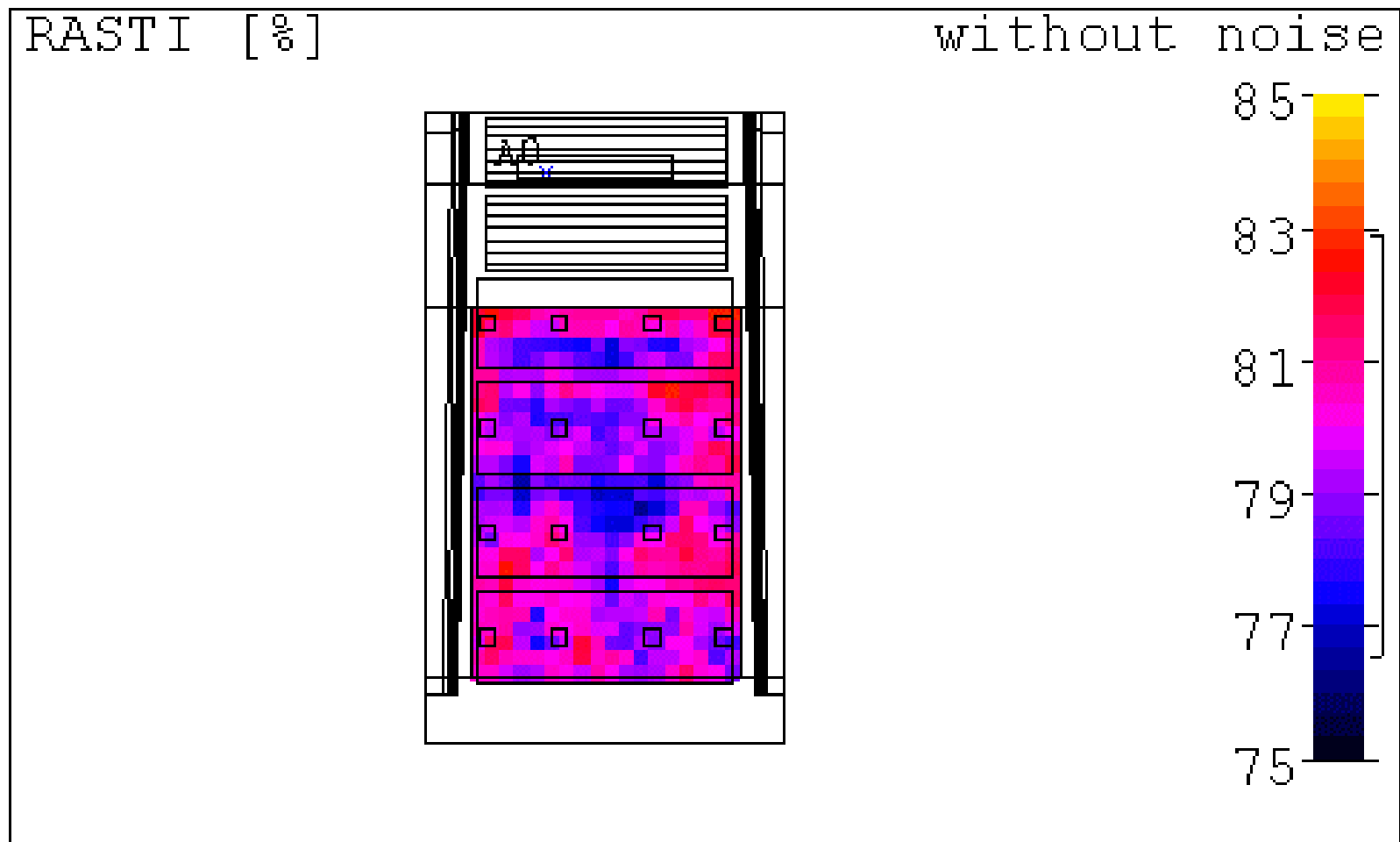


Rozkład parametru  $C_{80}$  dla częstotliwości 500Hz przy wypełnionej widowni

D-50 [%] 500 Hz



Rozkład parametru  $D_{50}$  dla częstotliwości 500Hz przy zapełnionej widowni



Rozkład parametru RASTI przy zapelnionej widowni