Planung und Simulation von Beschallungsanlagen für Kirchengebäude

Prof. Dr. Anselm Goertz

Prof. Dr. Alfred Schmitz

Vortrag zum Media Systems Congress 2010

Übersicht

Planung und Simulation von Beschallungsanlagen für Kirchengebäude

Grundlagen

1. Anforderungen, Zielsetzungen und akustische Randbedingungen in einer Kirche
2. Messung der Nachhallzeit
3. Sprachverständlichkeit
4. Anforderungen an die Lautsprecher
5. Voraussetzungen für eine sinnvolle Simulation
6. Lautsprecherdaten für die Simulation

Planungsbeispiel

7. Raummodell
8. Lautsprecherkonzepte
    1. Passive Zeilen
    2. Aktive Zeilen
9. Simulationsergebnisse
10. Messergebnisse

Beispiele zu beschallender Räumlichkeiten

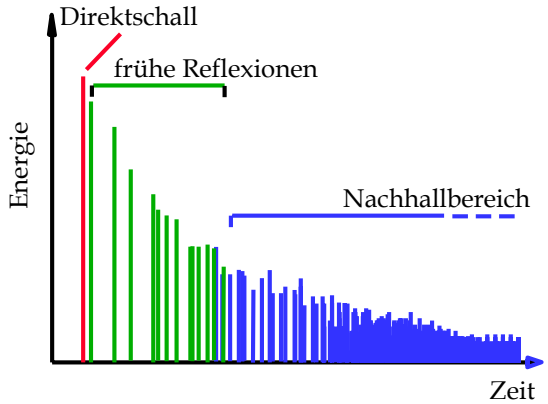
Akustische Randbedingungen

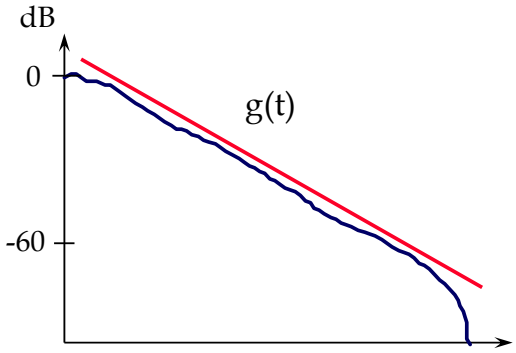
- Lange Nachhallzeiten (3 – 10 s) ← Wichtigste Randbedingung in Kirchen !
  - Zum Vergleich
    - Bahnhofshallen 2 – 10 s
    - Straßentunnel 10 – 30 s
    - Stadien 2 – 6 s
- Relativ wenig Störpegel (< 70 dBA)
  - Zum Vergleich
    - Bahnhöfe 85 dBA ⇒ Signalpegel bei Sprache min. 95 dBA
    - Straßentunnel 95 dBA ⇒ Signalpegel bei Sprache min. 105 dBA
    - Sportstätten 95 dBA ⇒ Signalpegel bei Sprache min. 105 dBA
- Zumeist niedrige Anforderungen an den Maximalpegel
- Keine Notfallwarnsysteme (Mindestwerte STI, SPL, Überwachung,...)
- Zuhörer meist in einer Ebene und in vorgegebenen Bereichen

Messung der Nachhallzeit

- Bestimmung der Nachhallzeit mit Schroeder´scher Rückwärtsintegration
  - Mittlung über mehrere Sender-Empfänger Positionen im Raum
  - keine Mittelung über mehrere Messungen an einem Ort erforderlich

$$\langle g^2(t) \rangle = \int_t^\infty [h(t')]^2 \, dt' = \int_0^\infty [h(t')]^2 \, dt' - \int_0^t [h(t')]^2 \, dt'$$





Messung nach der Schroeder Methode

- Anregung mit Impuls über eine geeignete Impulsquelle (Pistole, Luftballon, Papiertüte, Händeklatschen)
- Automatische Messfunktion des Schallpegelmessers
  - Messung der Impulsantwort mit Hilfe eines Schwellentriggers im Schallpegelmesser
  - Terz- oder Oktavfilterung
  - Berechnung der Abklingkurven nach der Schroeder Methode
  - Auswertung der frequenzabhängigen Nachhallzeit

Gehörschützer

Knallquelle

Handschallpegelmesser

Stativ

Anforderungen an eine (Kirchen)beschallung

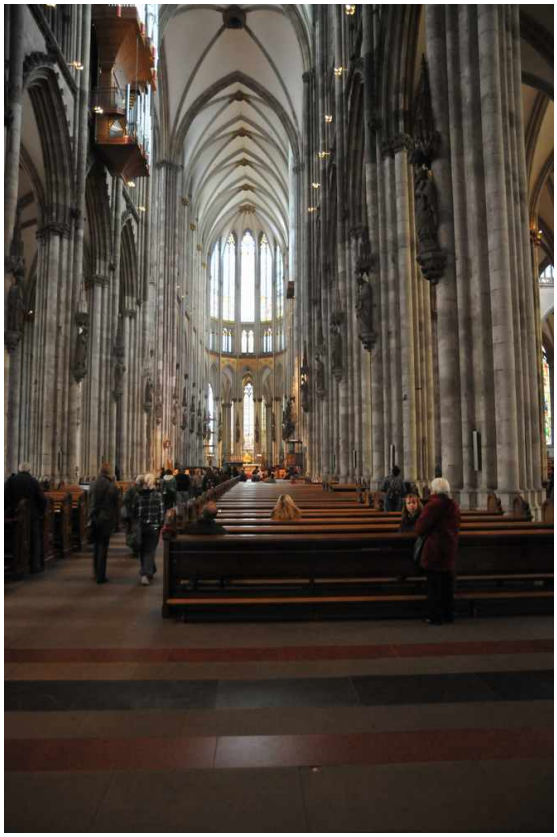
- Hinreichende Sprachverständlichkeit
- Unempfindlich gegen Rückkopplungen

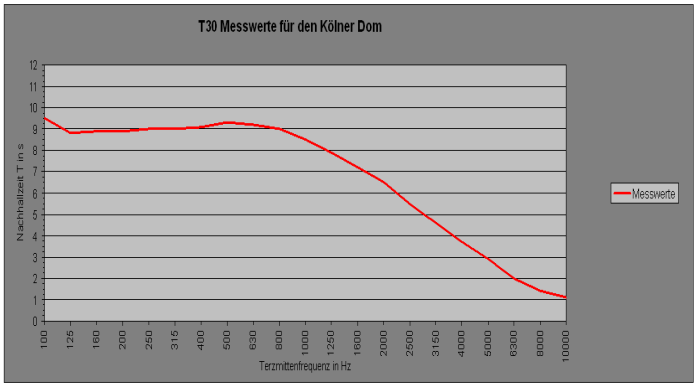
- Flexible Anpassung an den aktuellen Bedarf
- Einfache Bedienung !

- Belange des Denkmalschutzes sind zu beachten
- Wenig Installationsaufwand

- Musikübertragung sollte möglich sein
- Multimediale Fähigkeiten

Das Kernproblem: die lange Nachhallzeit





- Langer Nachhall (bei tiefen Frequenzen)
- Keine raumakustischen Maßnahmen

➔ Den Nachhall so wenig wie möglich anregen und so viel wie möglich Direktschall zu den Zuhörern bringen

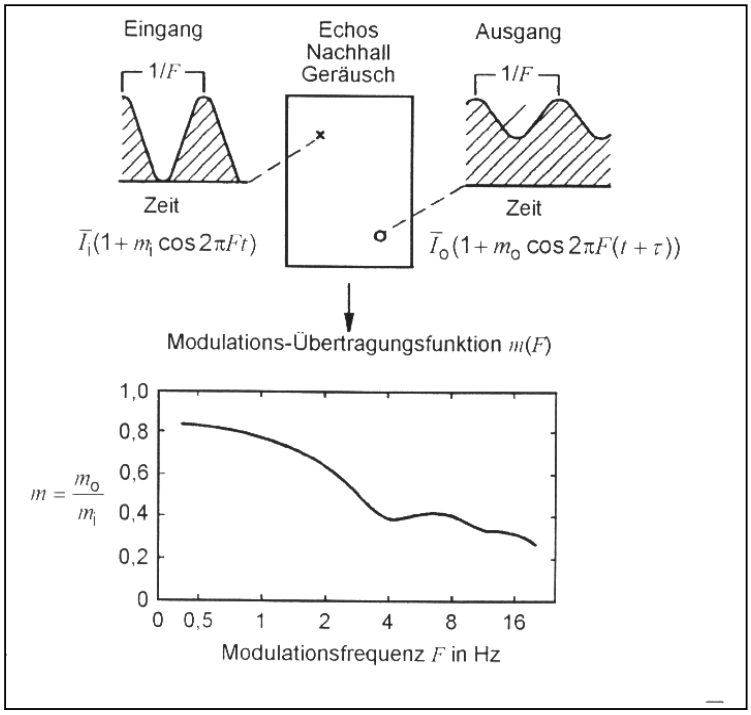
➔ Stark richtende Lautsprecher

Sprachverständlichkeit und Hall

- Warum wird die Sprachverständlichkeit durch Nachhall reduziert ?
  - ⇒ Sprache ist ein moduliertes Signal
  - ⇒ Der Informationsgehalt wird großteils über die Modulation transportiert
  - ⇒ Nachhall führt zum Verlust von Modulationstiefe im Signal und somit zum Informationsverlust
  - ⇒ Ebenso wie Echos oder Störgeräusche

- Hörbeispiele
  - ⇒ Deutlicher Sprecher im Original
  - ⇒ Impulsantwort des Raumes Messwert RT_{max} = 7s
  - ⇒ Sprecher in der Kirche
  - ⇒ Sprachverständlichkeit Messwert STI = 0,43

Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF)



Objektive messtechnische Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den STI (Speech Transmission Index)

Aus der Messung des Verlustes an Modulationstiefe in 98 Variationen wird der STI Wert berechnet.

Dabei werden berücksichtigt:

- **Nachhall**
- **Signal-/Störabstand**
- **Hörschwelle**
- **Maskierung**
- **div. Andere Effekte ...**

STI Wertebereich zwischen 0 und 1

Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den STI

STI-Wert	Einstufung nach EN 60268-16
0...0,3	schlecht
0,3..0,45	schwach
0,45..0,6 0,5	angemessen
0,6..0,75	gut
0,75..1	ausgezeichnet

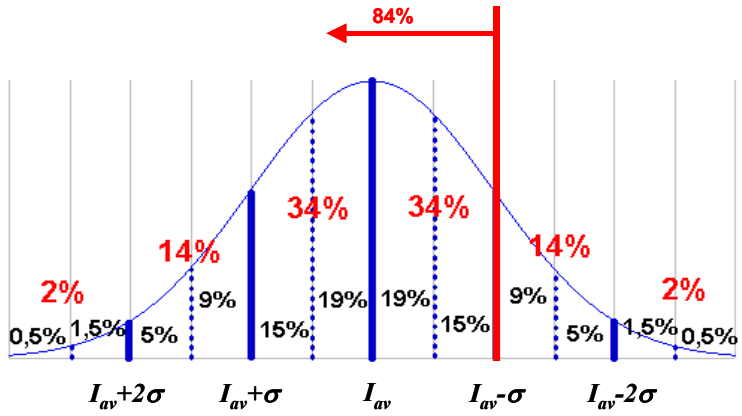
Der Mindestwert nach EN 60849 für Elektroakustische Notfallwarnsysteme muß bei 0,5 liegen.

Bestimmung des Mindestwertes nach EN 60849

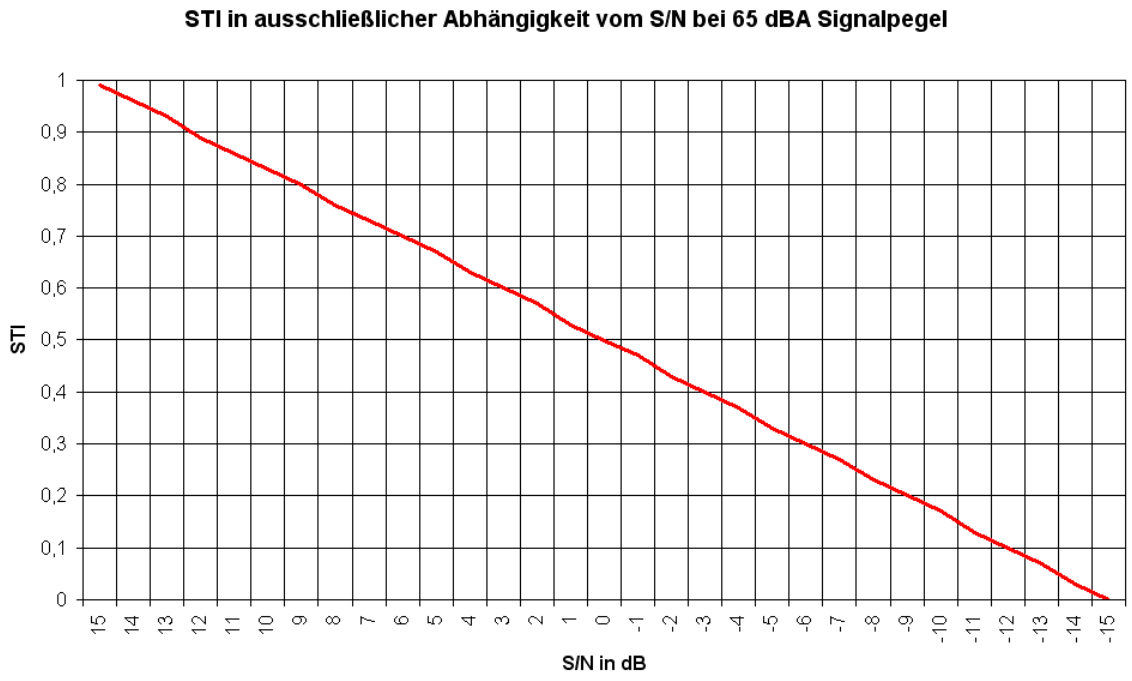
- Arithmetischer Mittelwert – Standardabweichung ≥ 0,5
- $I_{av} - \sigma \geq 0{,}5$
- Messraster: 6 m

$$I_{av} = \frac{1}{n}\left(a_1 + a_2 + \ldots\ldots + a_n\right)$$

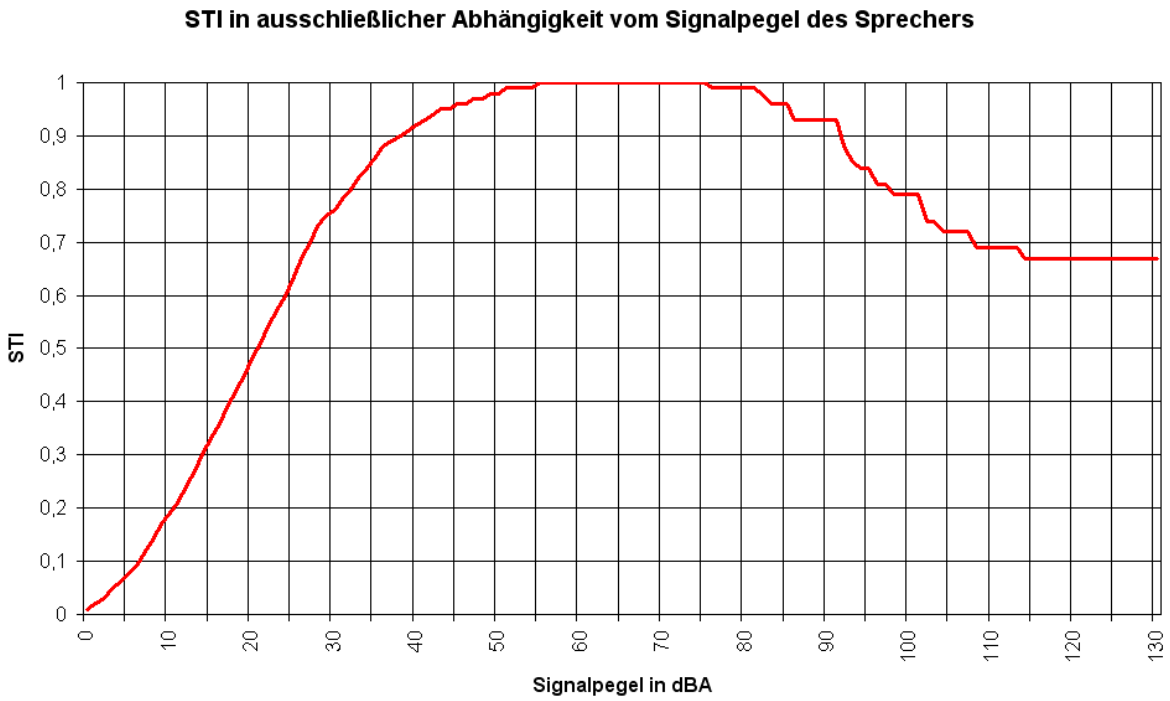
$$\sigma = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_1^n a^2 - \left(\sum_1^n a\right)^2}{n(n-1)}}$$



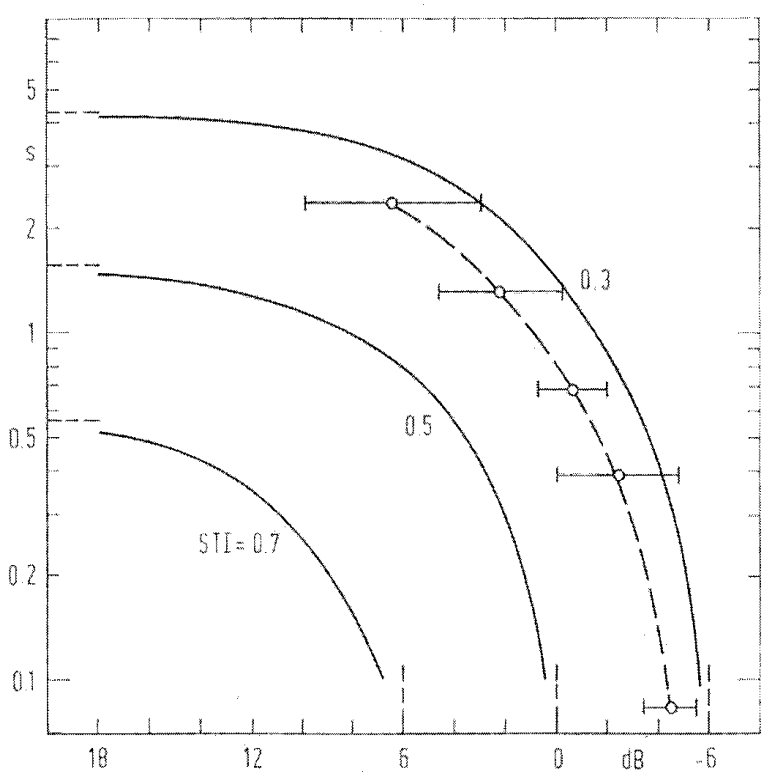
Signal- und Störpegel beim STI



Verdeckung und Hörschwelle beim STI



Abhängigkeit des STI von der Nachhallzeit und vom S/N



- Kurven für eine nicht gerichtet Quelle. z.B.:
- Deckenlautsprecher
- Einfache Breitbandsystem etc.
- Bei mehr als 1,5 s Nachhallzeit sind entweder raumakustische Maßnahmen oder speziell richtende Lautsprecher erforderlich

Zusammenhang des STI mit subjektiven Testmethoden

STI-Wert	CIS-Wert	Alcons in %	Einstufung EN 60268	Silbenverständ-lichkeit in %	Wortverständ-lichkeit in %	Satzverständ-lichkeit in %
0...0,3	0...0,48	100...36	schlecht	0...32	0...37	0...75
0,3...0,45	0,48...0,65	36...17	schwach	32...61	37...68	75...93
0,45...0,6	0,65...0,78	17...8	angemessen	61...85	68...88	93...98
0,6...0,75	0,78...0,87	8...3,6	gut	85...98	88...98	98...100
0,75...1	0,87...1	3,6...1	ausgezeichnet	98...100	98...100	100

Anforderungen an die Lautsprecher

- Starke Richtwirkung in der vertikalen Ebene
- Variables vertikales Abstrahlverhalten
  - Öffnungs- und Neigungswinkel einstellbar
  - Mehrere Beams zur Auswahl
- Breite Abstrahlung in der horizontalen Ebene
- Dezentrale Zonenbeschallung
- Unauffälliges Erscheinungsbild

➔ Lautsprecherzeilen (klassische 100V Technik)

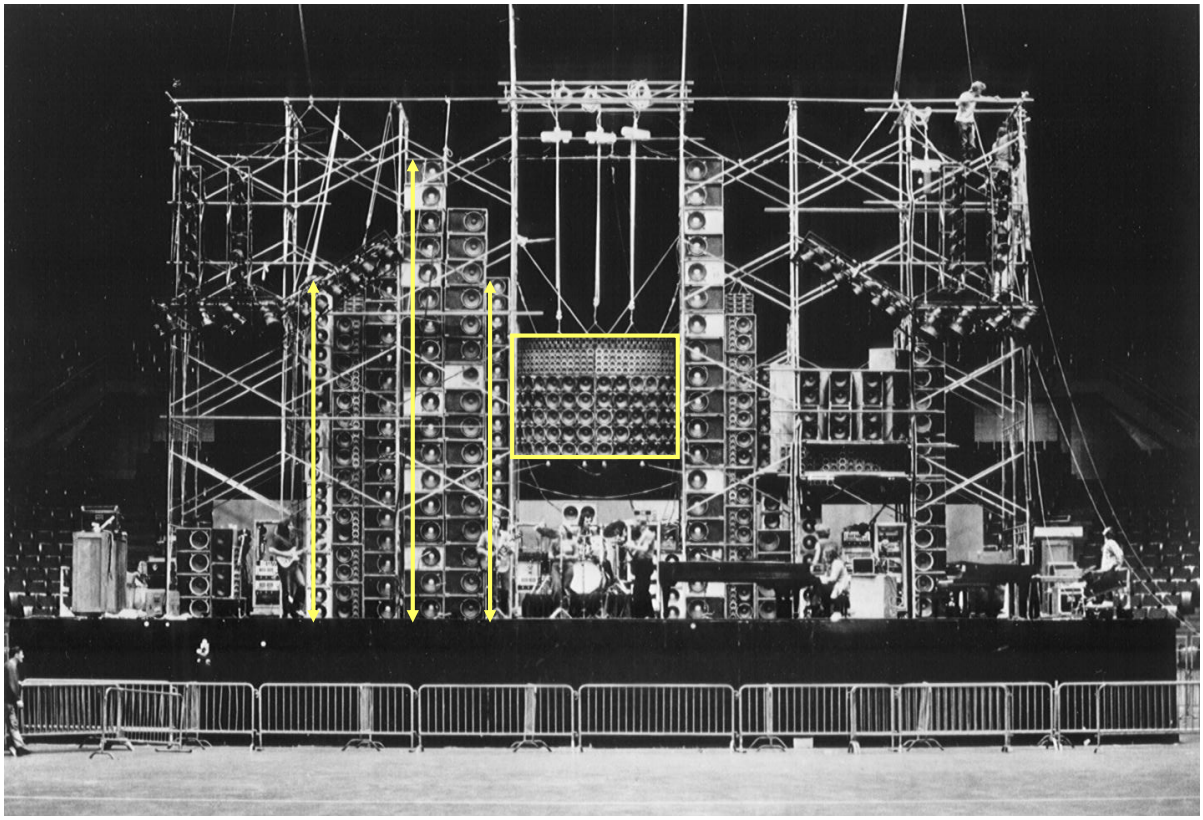
➔ Hörner (für Kirchen meist weniger geeignet)

➔ Line-Arrays (zu groß und auffällig und überdimensioniert)

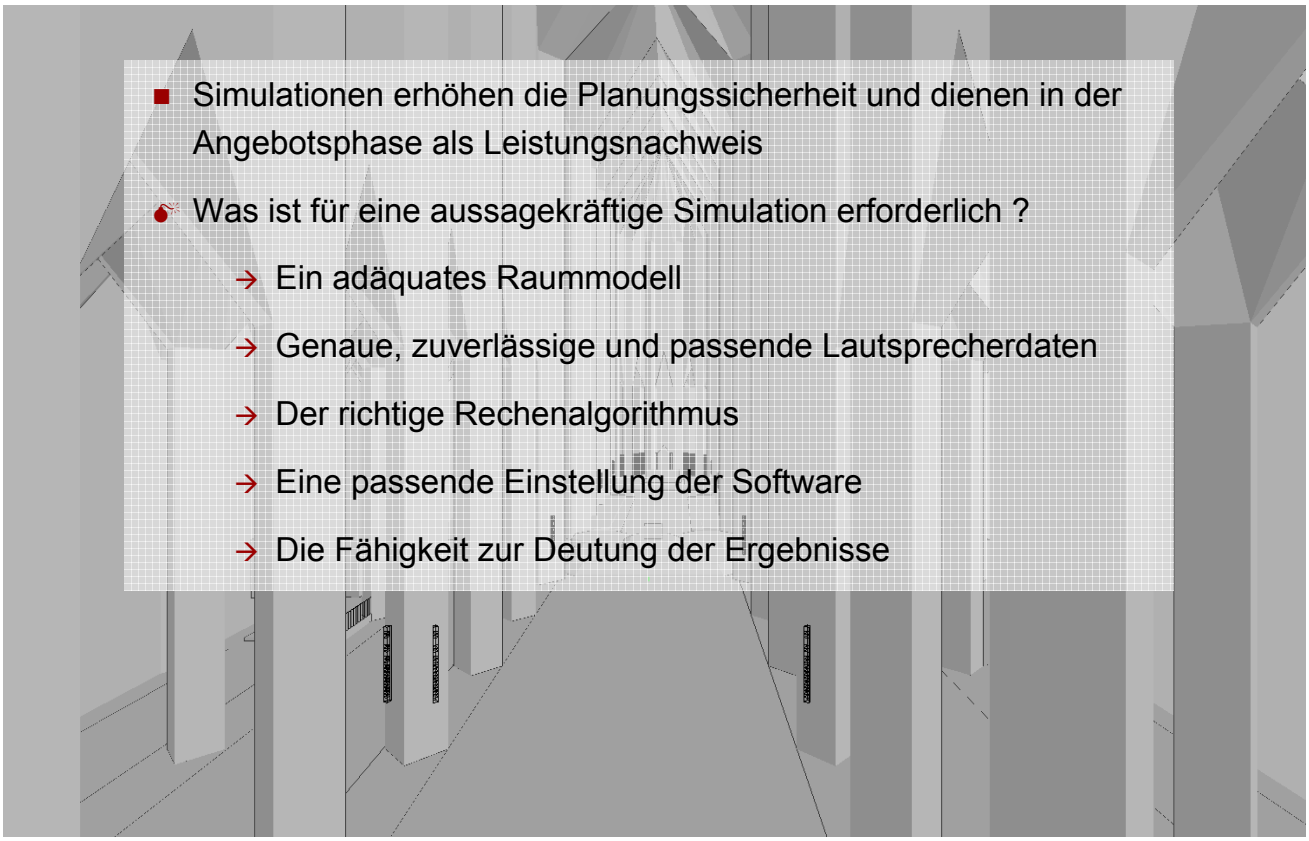
➔ DSP gesteuerte Zeilen (aktueller Stand der Technik)

➔ **Wie setzt man diese Lautsprecher richtig ein** ? ? ?

Strahlerzeilen in den 70er Jahren als PA



Simulationen



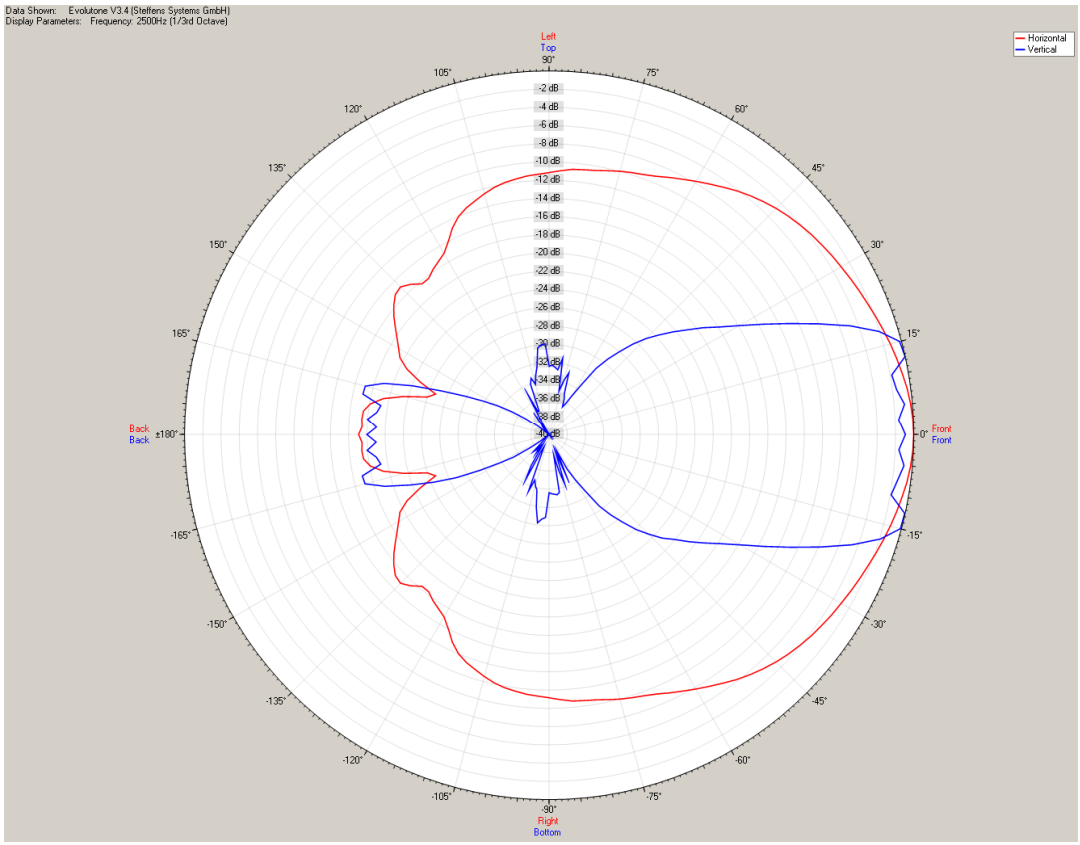
- Simulationen erhöhen die Planungssicherheit und dienen in der Angebotsphase als Leistungsnachweis
- Was ist für eine aussagekräftige Simulation erforderlich ?
  - → Ein adäquates Raummodell
  - → Genaue, zuverlässige und passende Lautsprecherdaten
  - → Der richtige Rechenalgorithmus
  - → Eine passende Einstellung der Software
  - → Die Fähigkeit zur Deutung der Ergebnisse

Simulationen

- Simulationsmodell nicht zu komplex bauen
- Nachhallzeit möglichst genau anpassen (Absorberdaten)
- Streugrade der Oberflächen beachten (stark frequenzabhängig)
- Lautsprecher richtig in die Simulation einbringen
  - Einfache Balloon Daten gelten nur im Fernfeld
  - Für Zeilen, Line-Arrays und andere ausgedehnte Anordnungen mit einem weit reichenden Nahfeld muß auch für die Simulation eine korrekte Nahfeld – Fernfeld Betrachtung erfolgen !
  - Das Richtverhalten dieser Lautsprecher ändert sich innerhalb der für den Einsatz relevanten Entfernungen
    - Das Nahfeld einer 3,72 m langen Zeile hat bei 2,5 kHz bereits eine Ausdehnung von 100 m !

$$r_{Fernfeld} = \frac{l^2 \cdot f}{340 \ m/s}$$

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

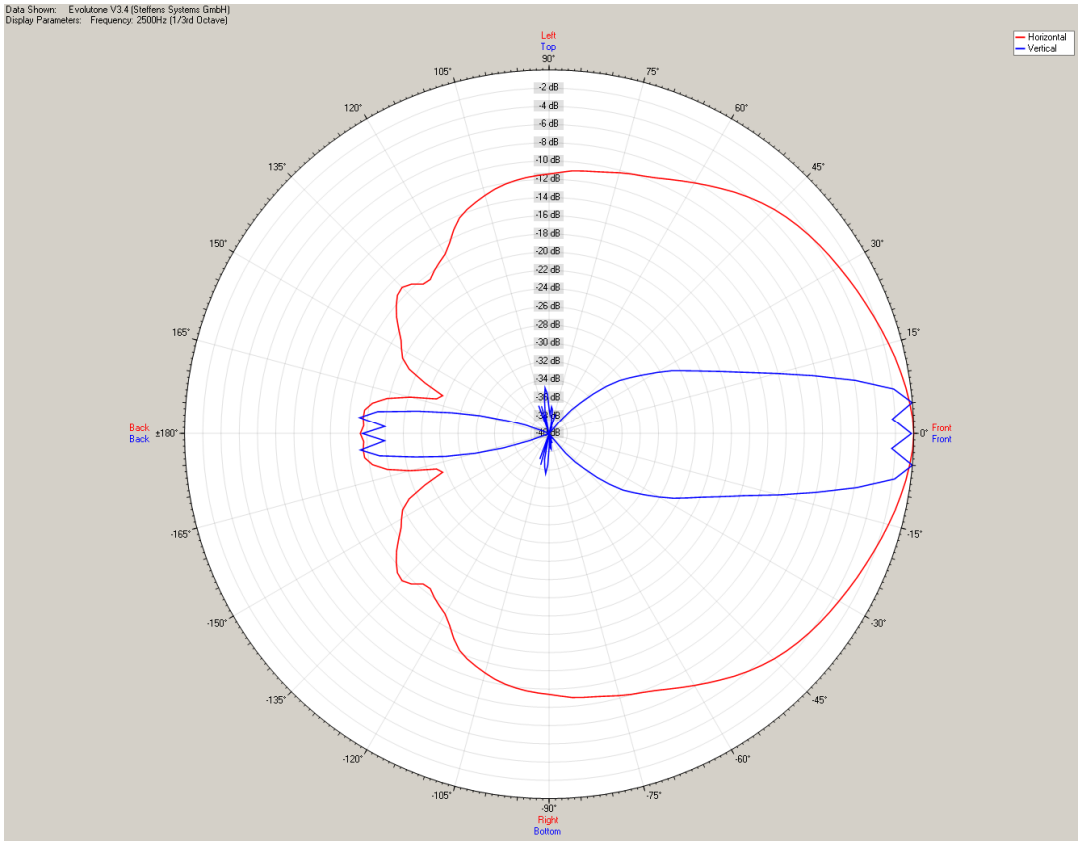
Messentfernung
d = 5 m

Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

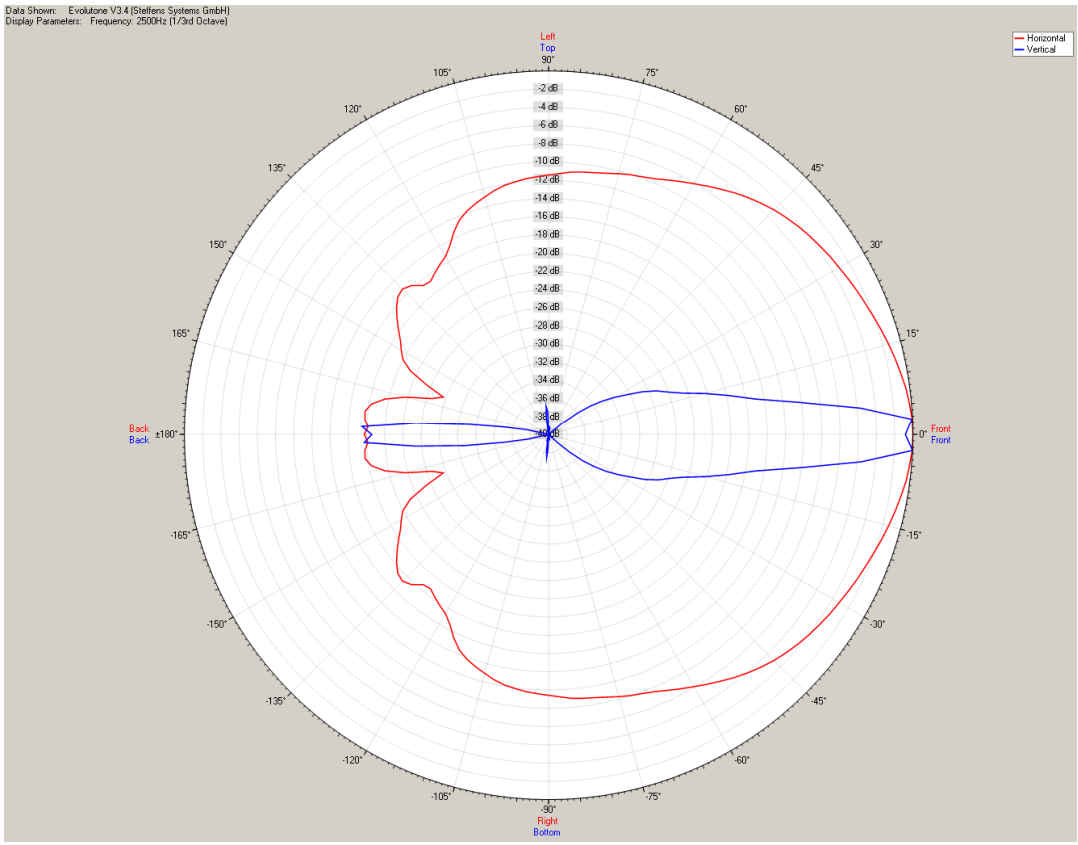
Messentfernung
d = 10 m

Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

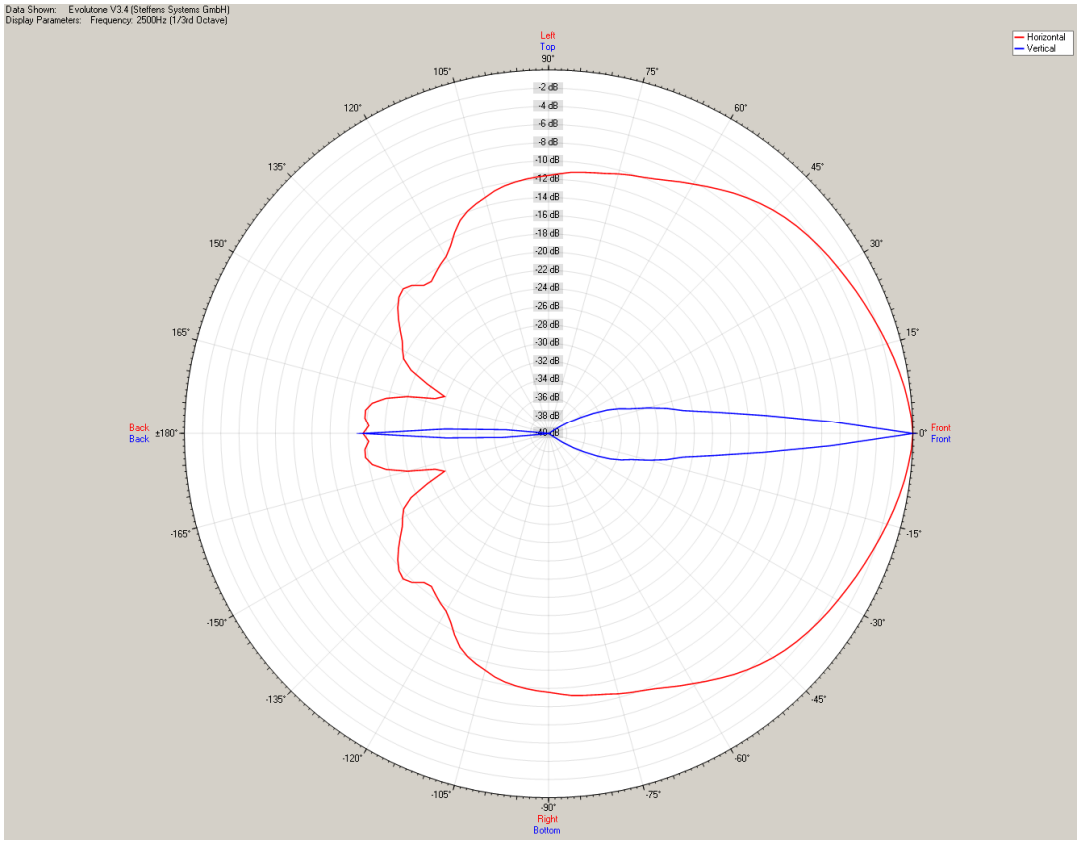
Messentfernung
d = 20 m

Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

Messentfernung
d = 50 m

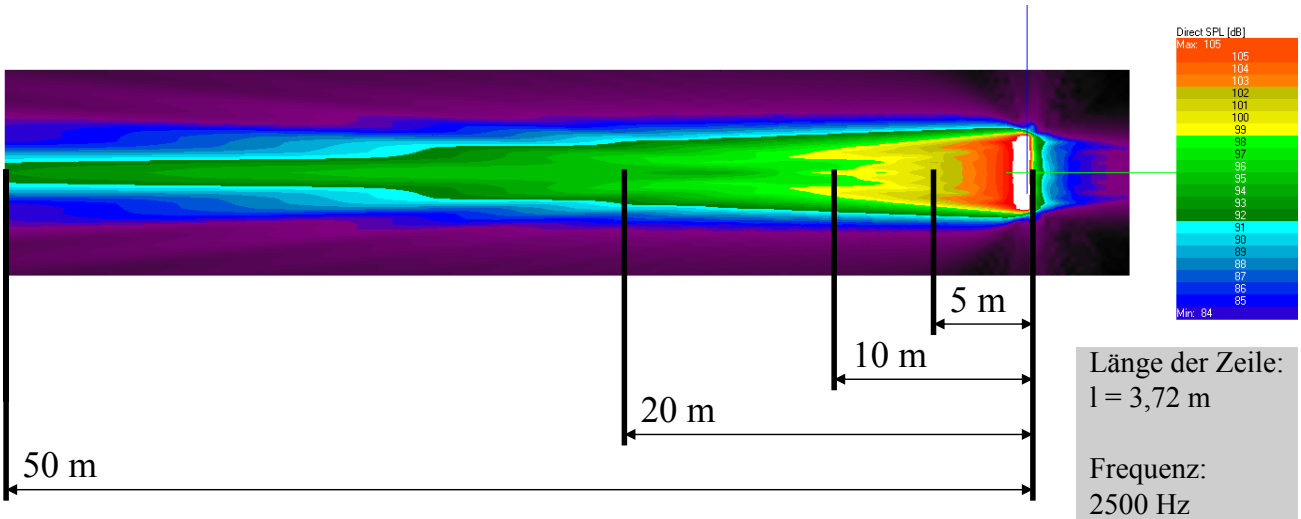
Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten

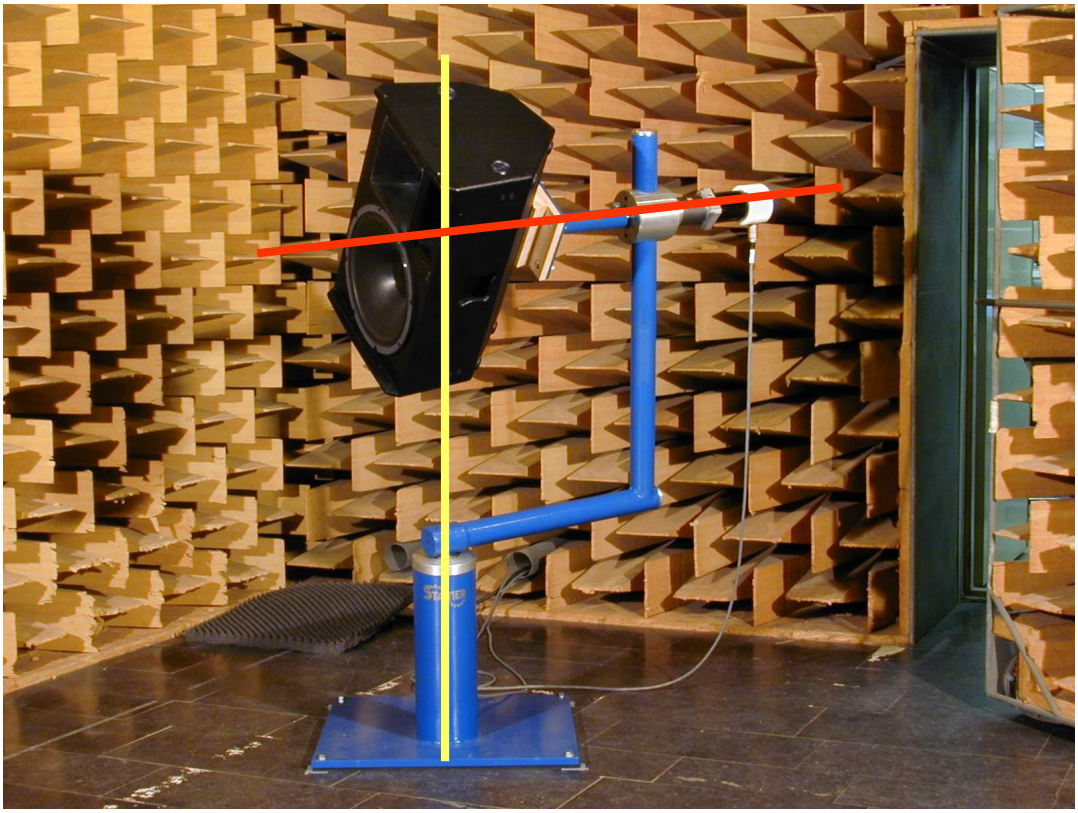
- Für die korrekte Berechnung der Nah- und Fernfeldes sind folgende Daten erforderlich:
  - Vollständiger Amplituden-Balloon
  - Vollständiger Phasen-Balloon
  - Beide Balloons mit hinreichender Winkelauflösung
    - Einzelquellen bis 0,1 m 10°
    - Einzelquellen bis 0,2 m 5
    - Einzelquellen bis 0,4 m 2°



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

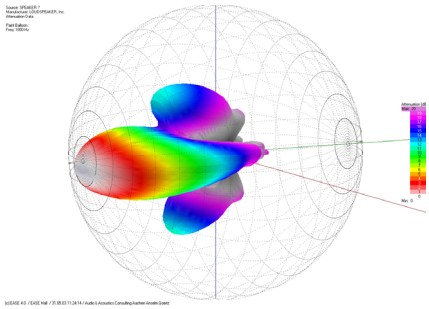
Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

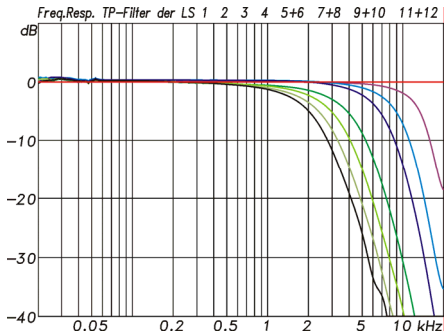
Messaufbau für Balloondaten



LS-Zeilen in der Simulation

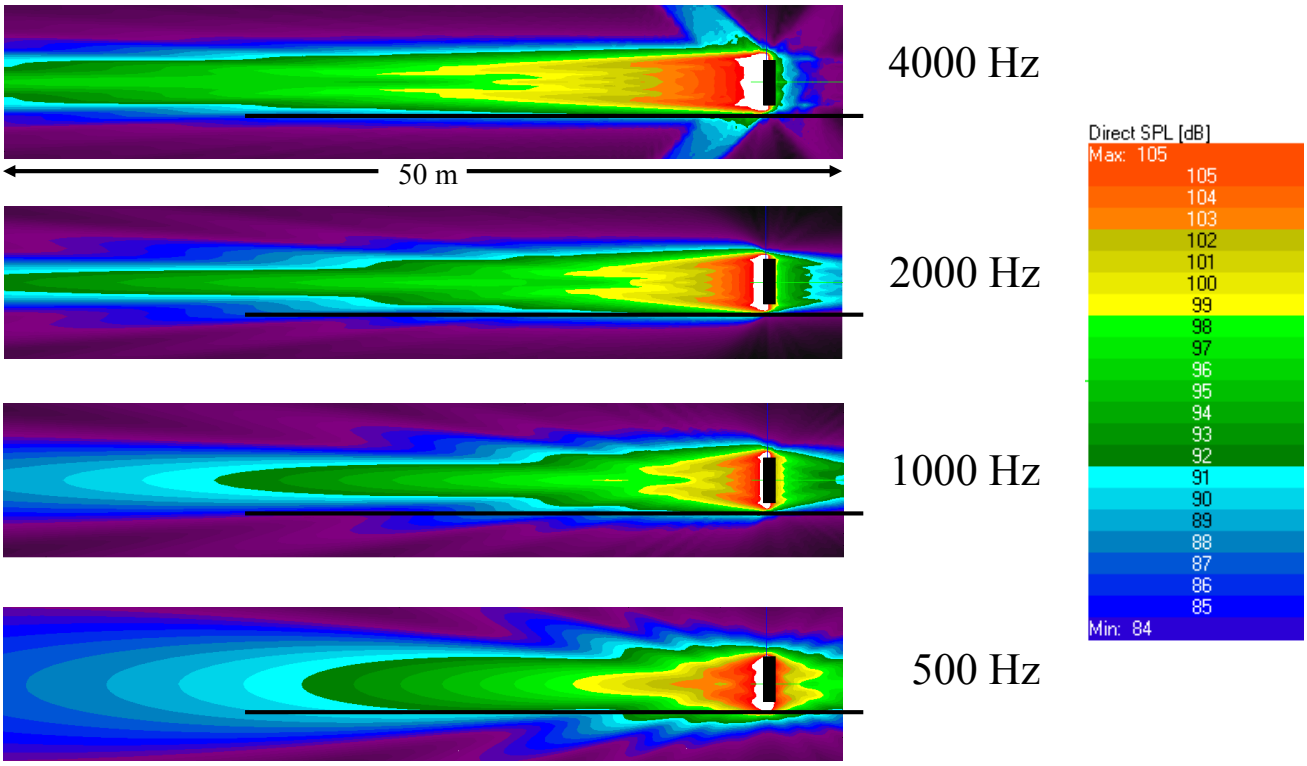
- Messung der einzelnen Quellen einer Zeile im Fernfeld mit möglichst hoher Auflösung (2°) und mit Phasendaten !
- Messung bzw. Berechnung der variablen Filter für alle Wege
- Die Software setzt daraus das Verhalten der gesamten Anordnung mit korrekter Nahfeld – Fernfeld Betrachtung zusammen



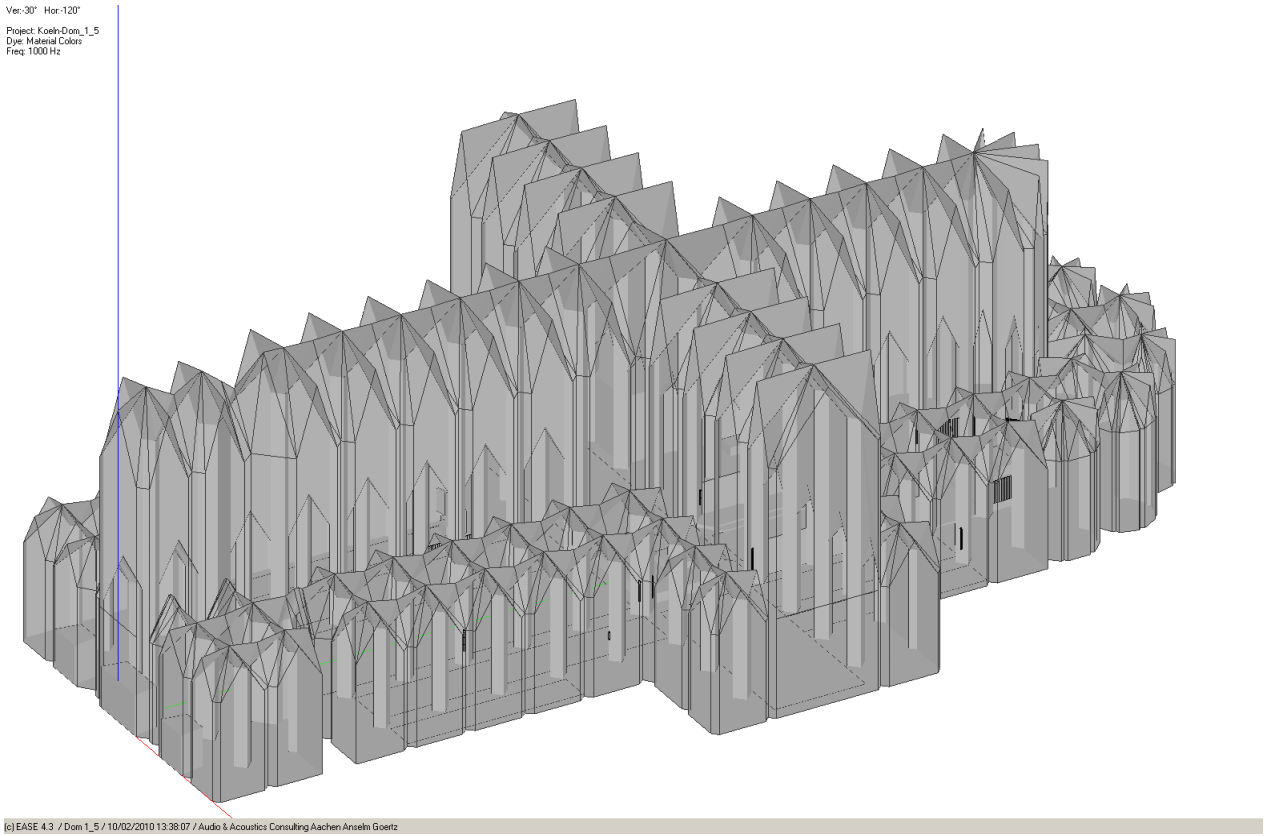


Berechnetes Richtverhalten einer Zeile

Zeile einer Länge von 3,72 m mit 32 Einzelquellen ohne Filterung.

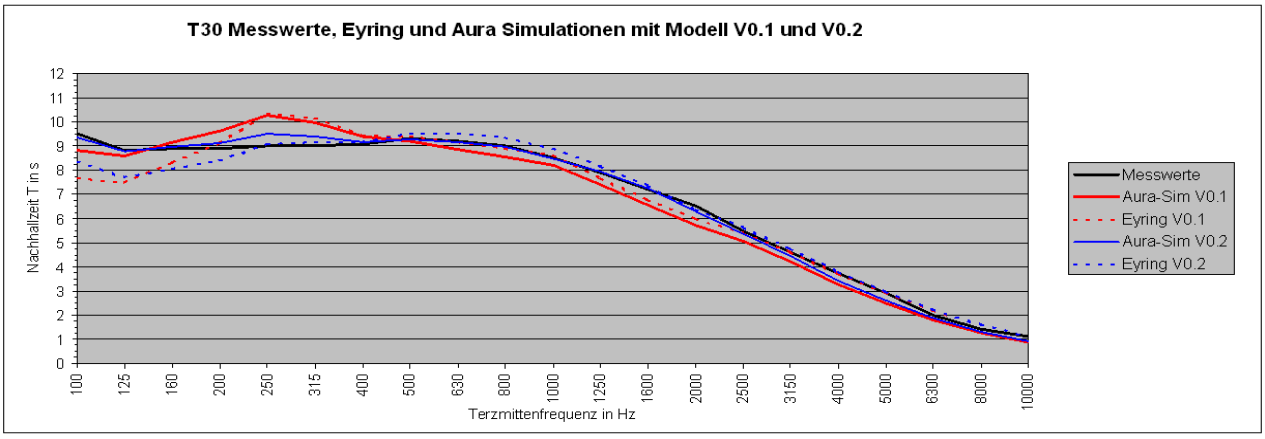


Beispiel einer großen Kirche

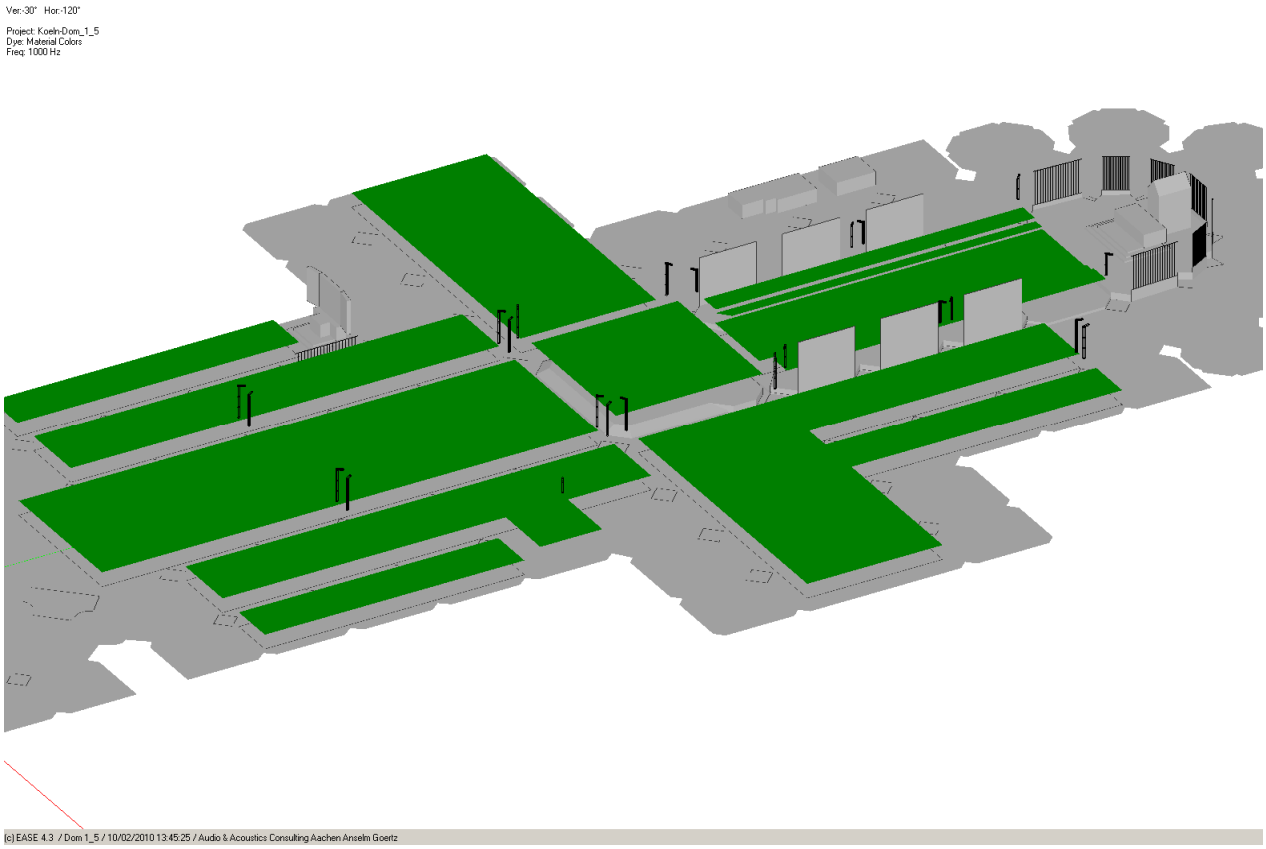


Anpassung des Modells an die Messwerte

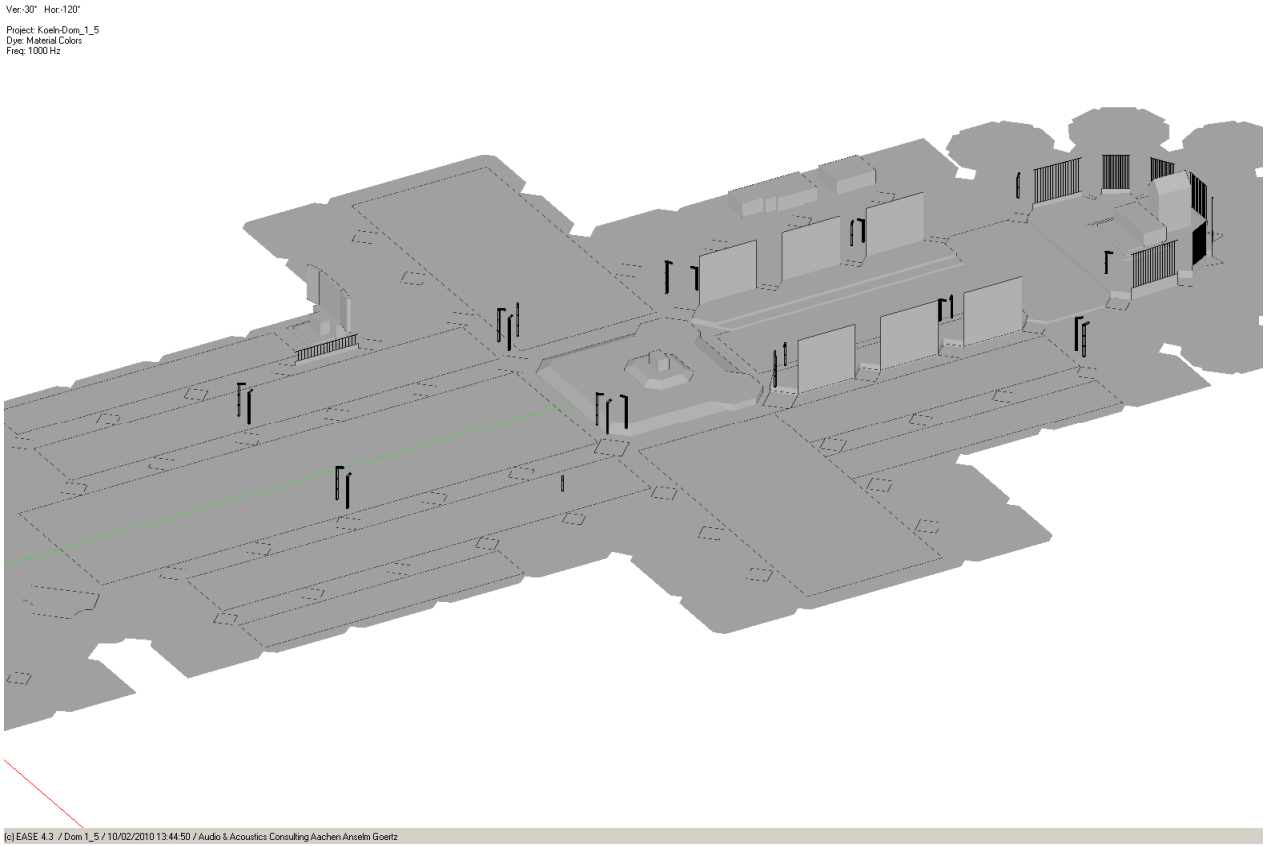
- Nachhallzeitmessung an vielen verschiedenen Positionen in der Kirche
- Materialauswahl im Modell anhand von Absorptionsgraden und Streugraden *(Streugrade müssen in der Regel geschätzt werden)*
- Abgleich des Modells nach Sabine oder Eyring
- Abgleich des Modells mittels Aura Berechnung



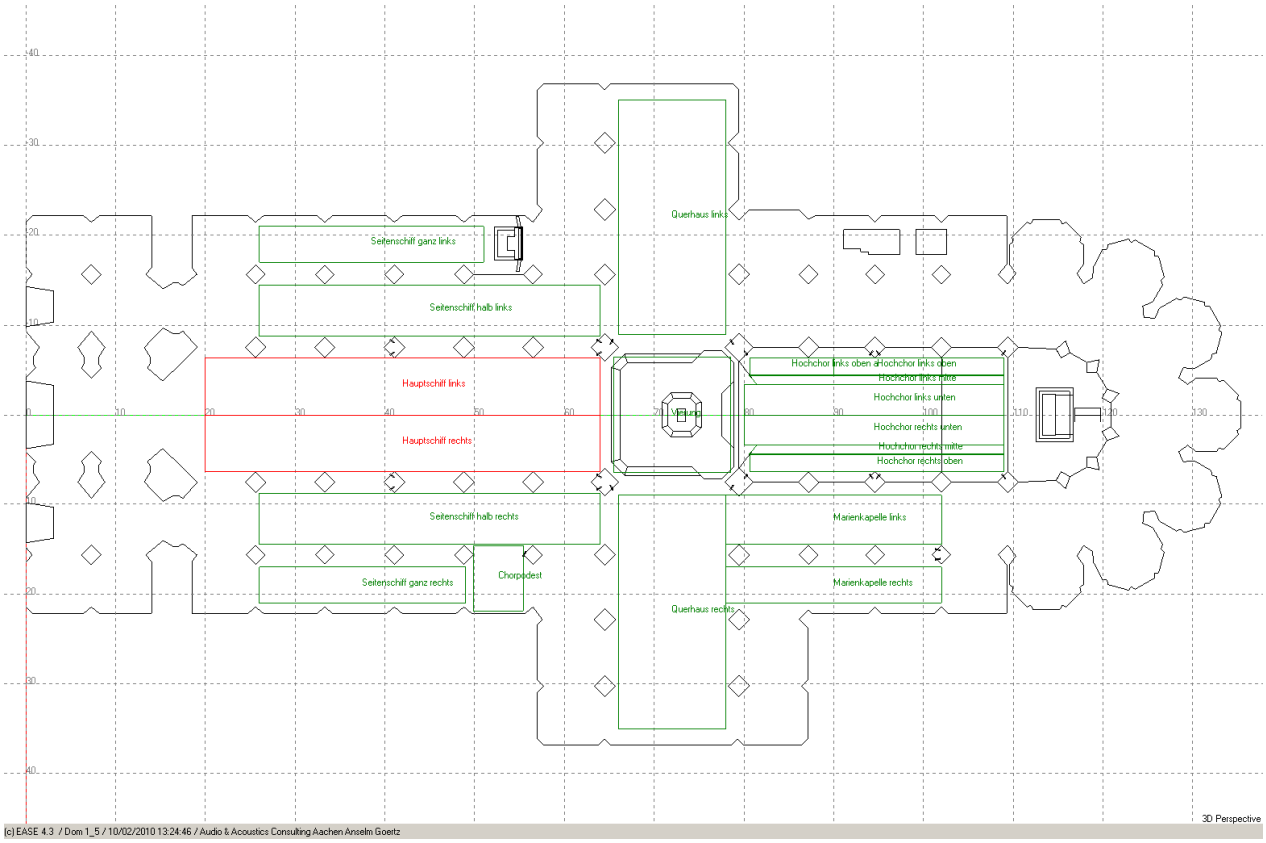
Lautsprecher und Hörerflächen



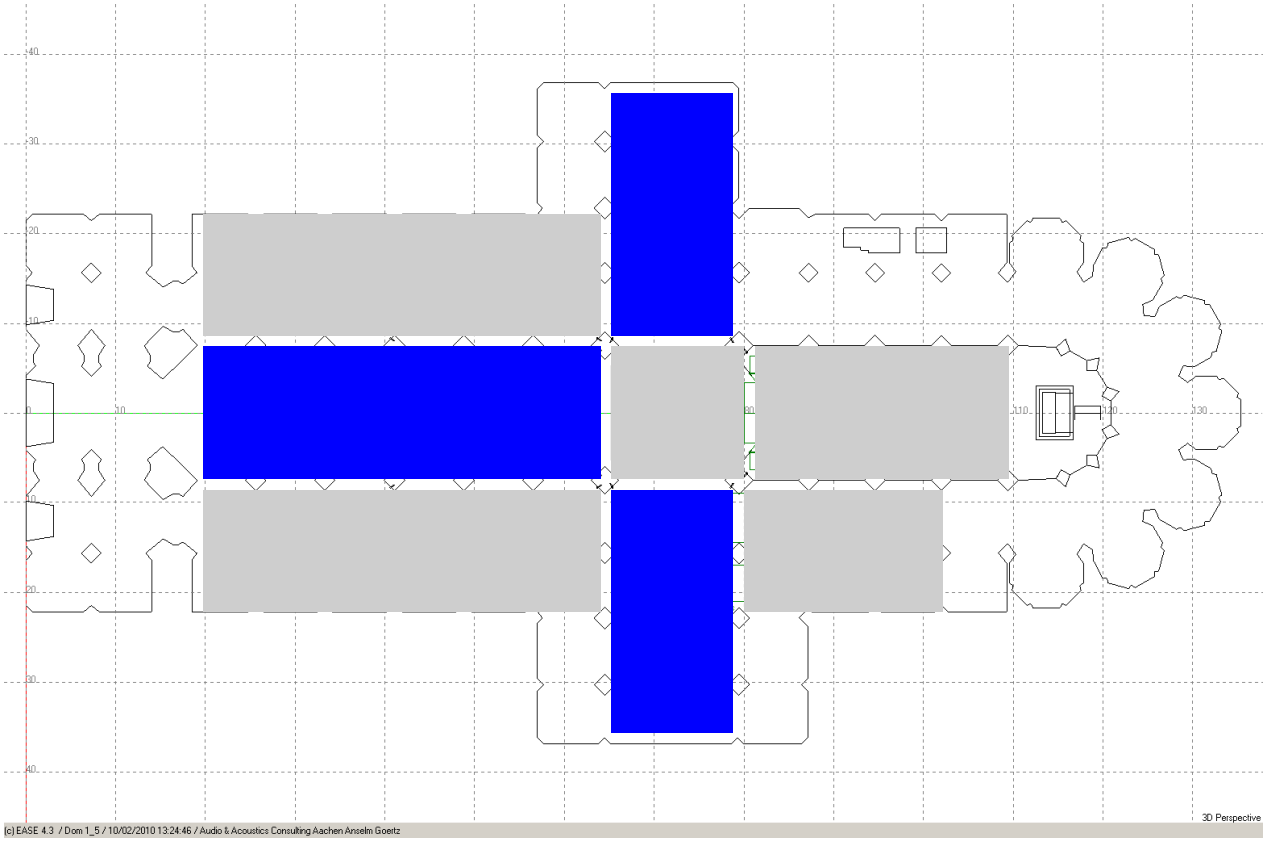
Lautsprecherpositionen



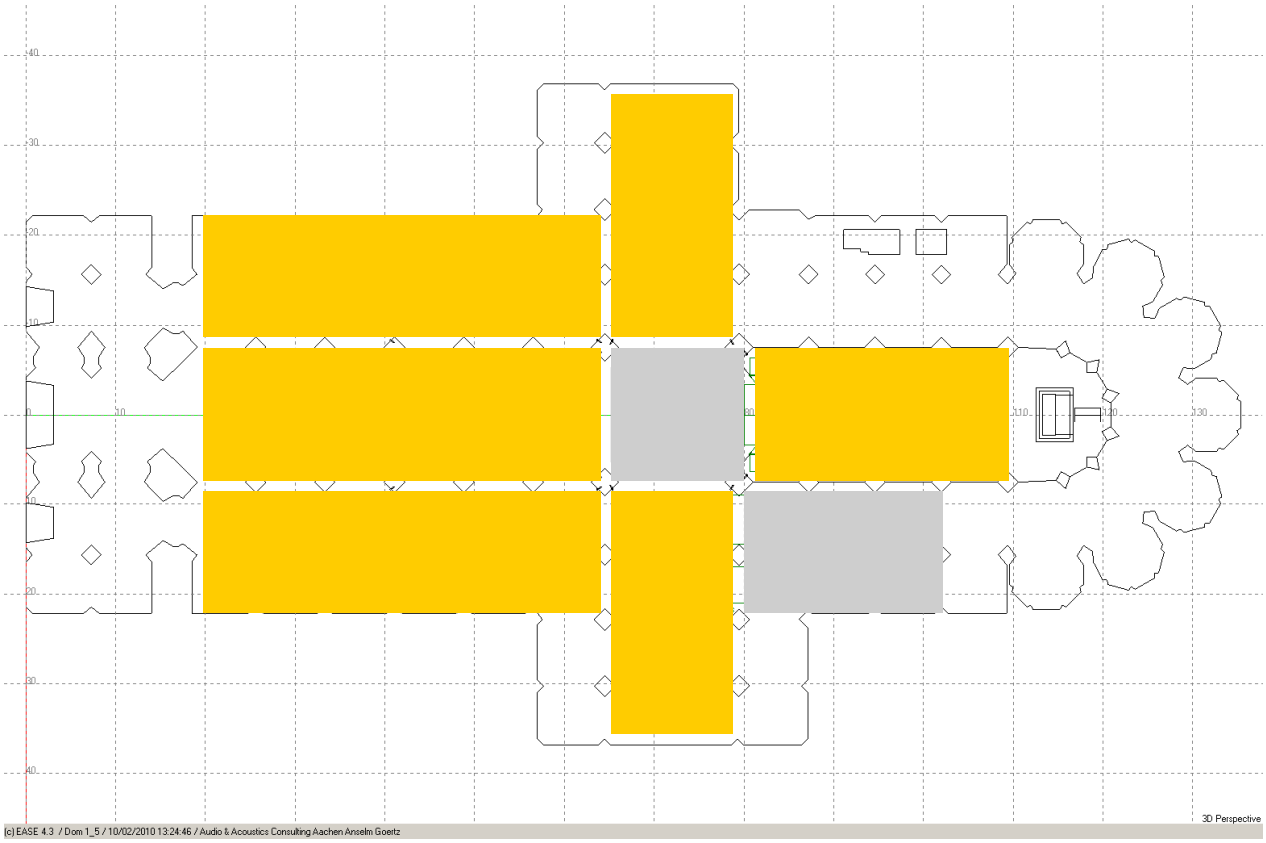
Nutzungsvarianten



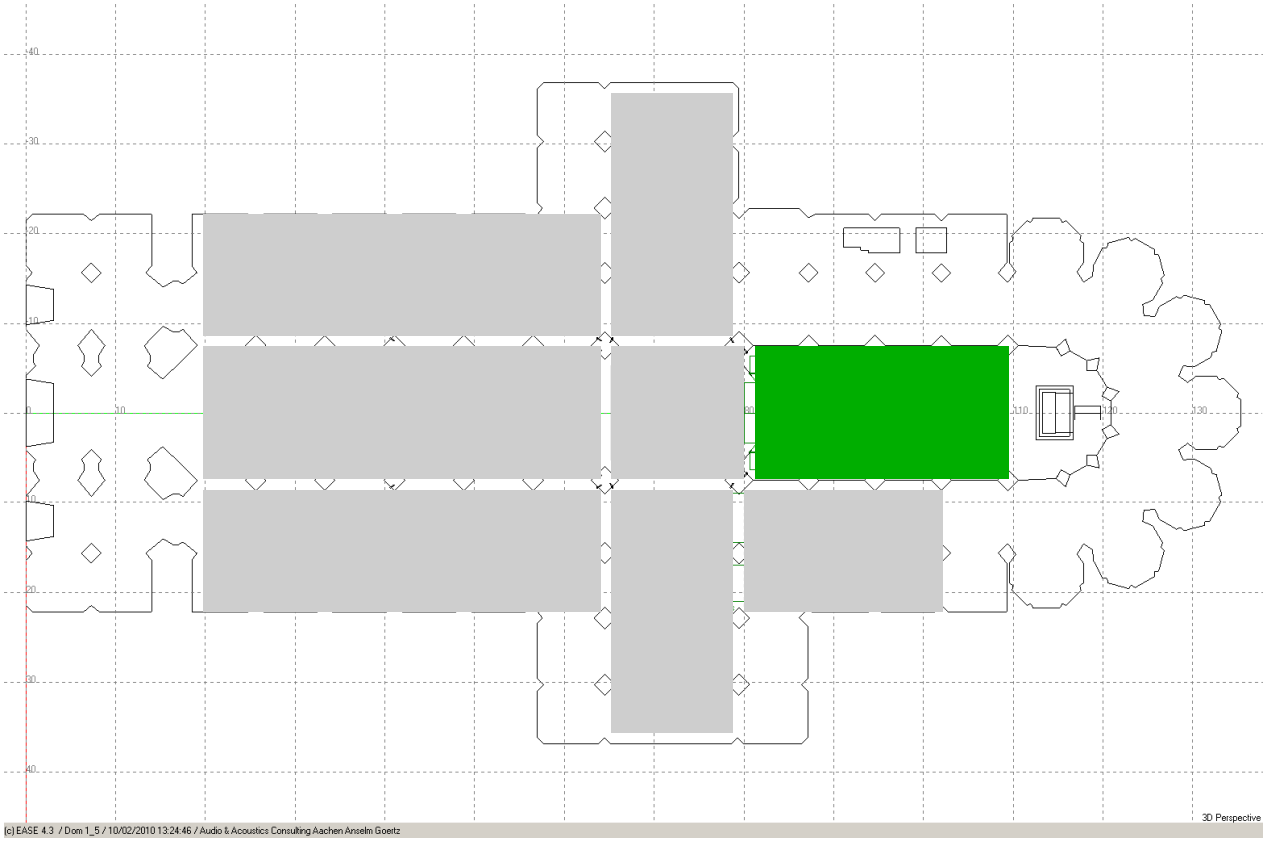
Normaler Sonntagsgottesdienst



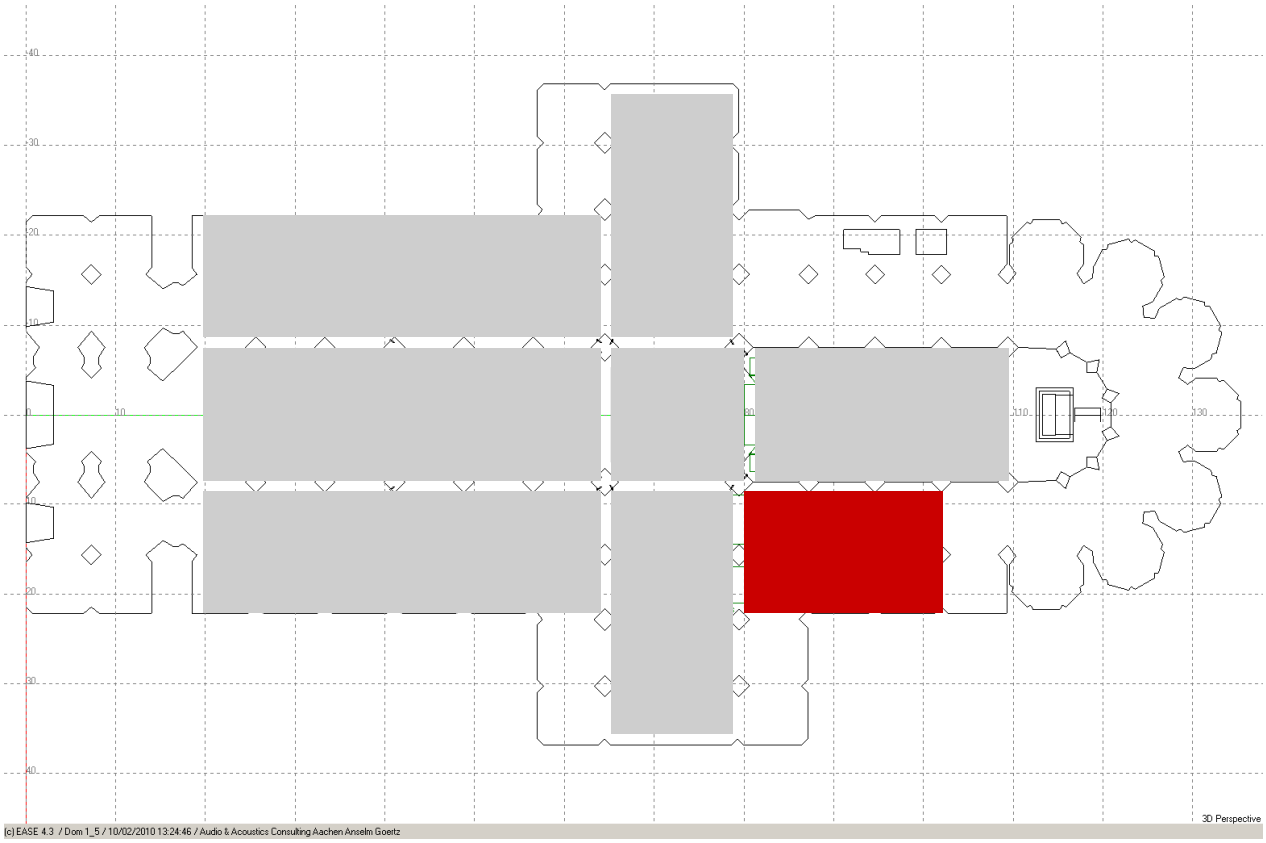
Festtagsgottesdienst



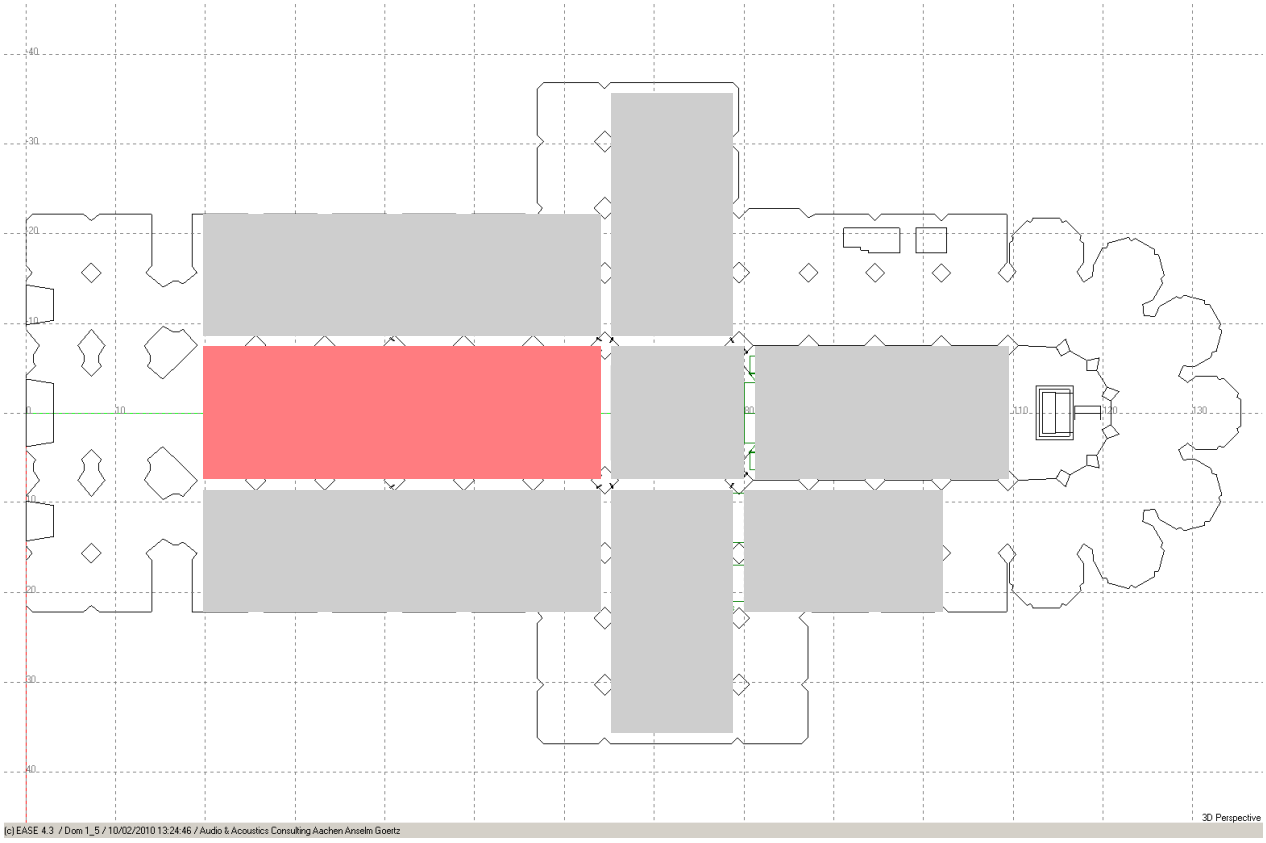
Sonderfall Gottesdienst vom Hochaltar



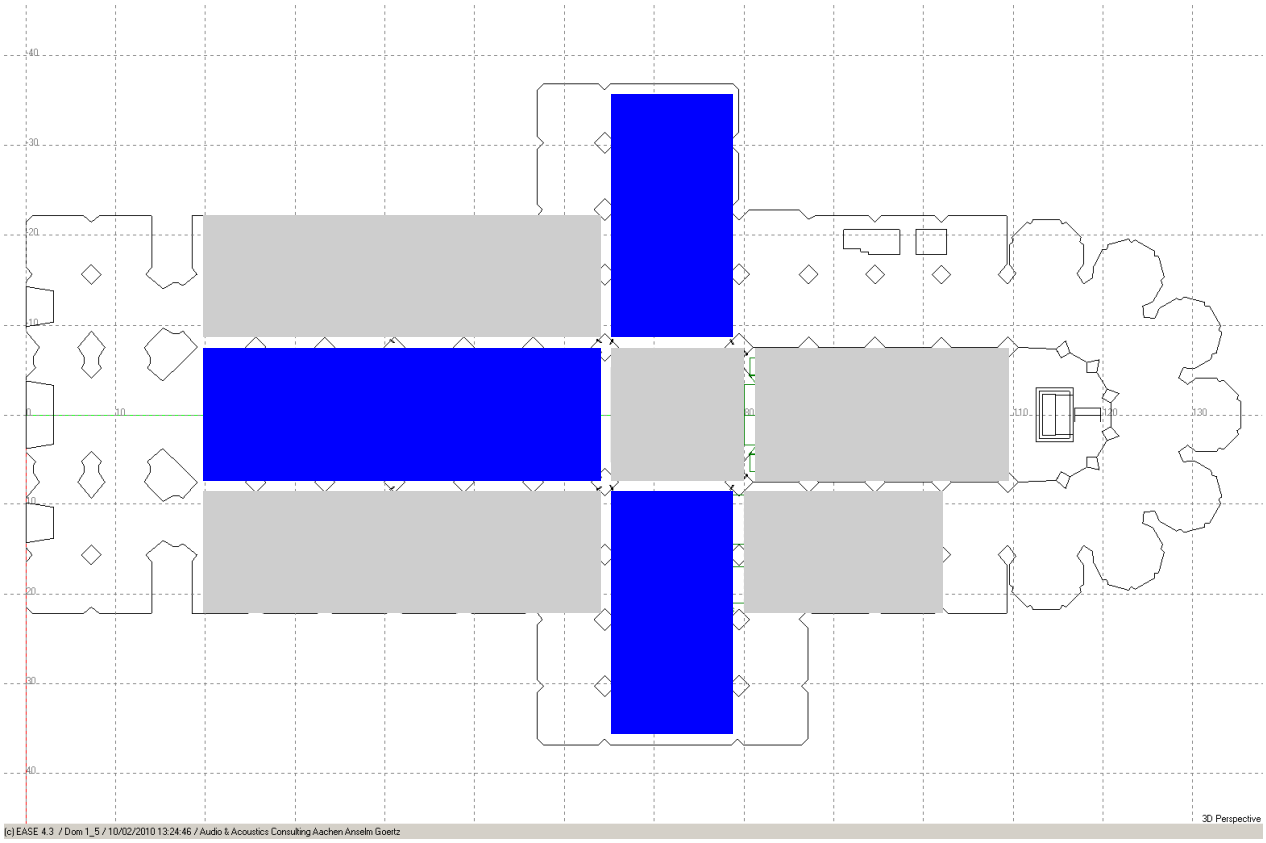
Sonderfall Gottesdienst in der Kapelle



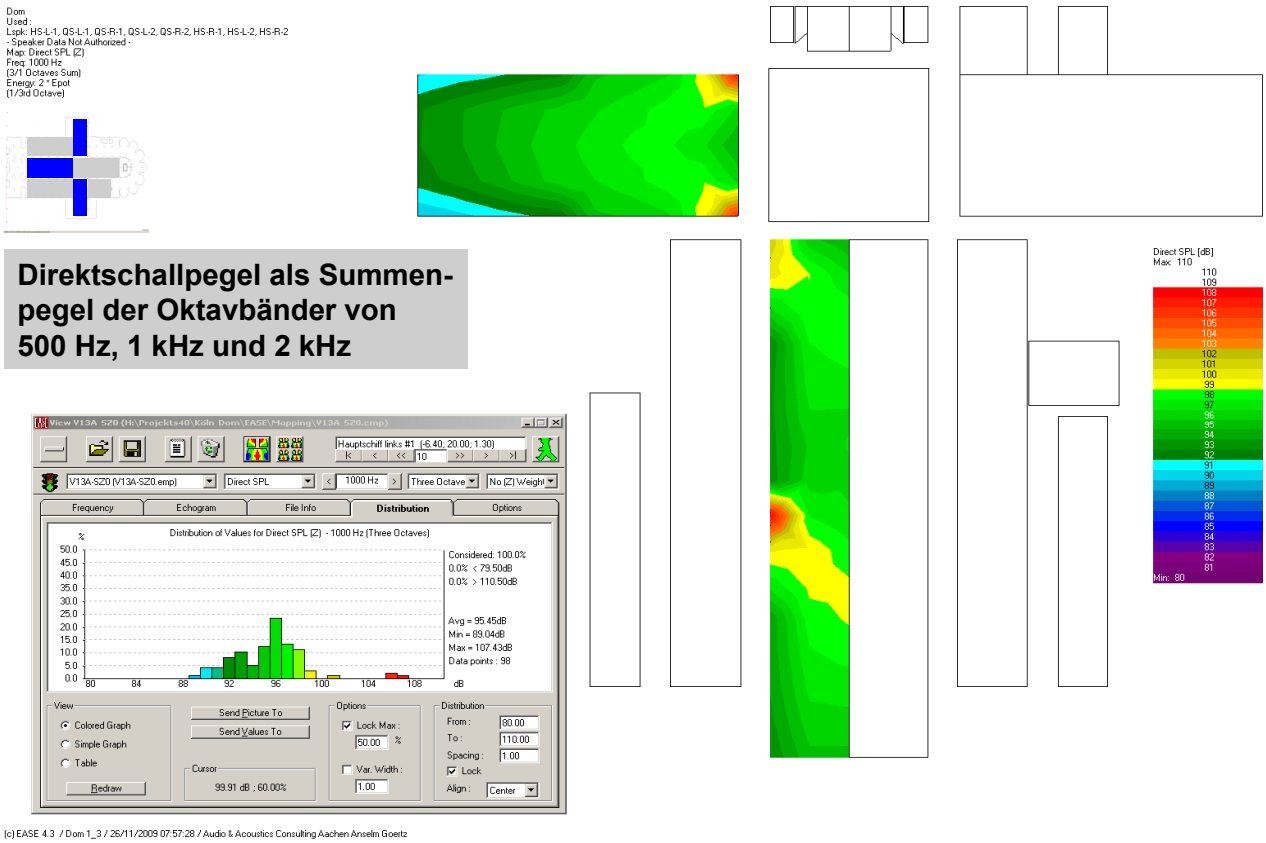
Probeaufbau nur im Hauptschiff



Ergebnisse normaler Sonntagsgottesdienst

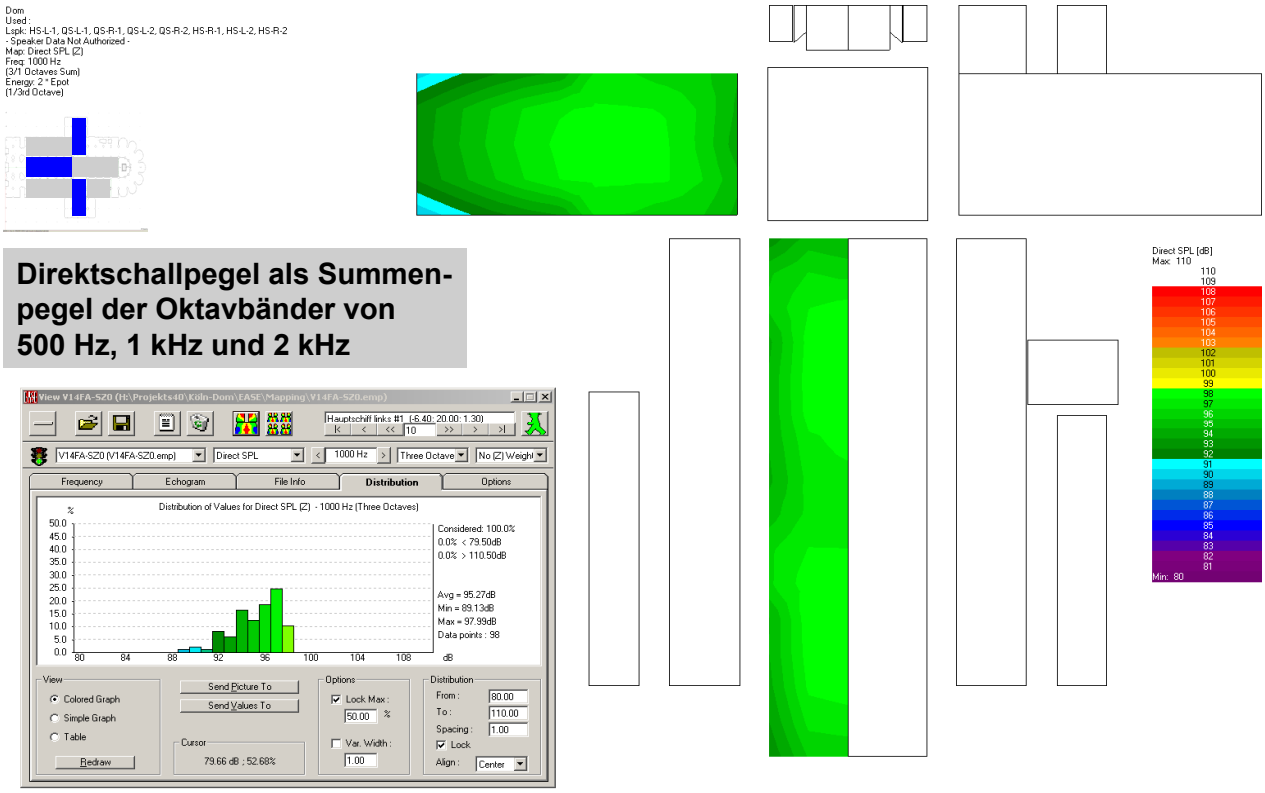


Direktschallverteilung mit passiven Zeilen



Direktschallpegel als Summenpegel der Oktavbänder von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz

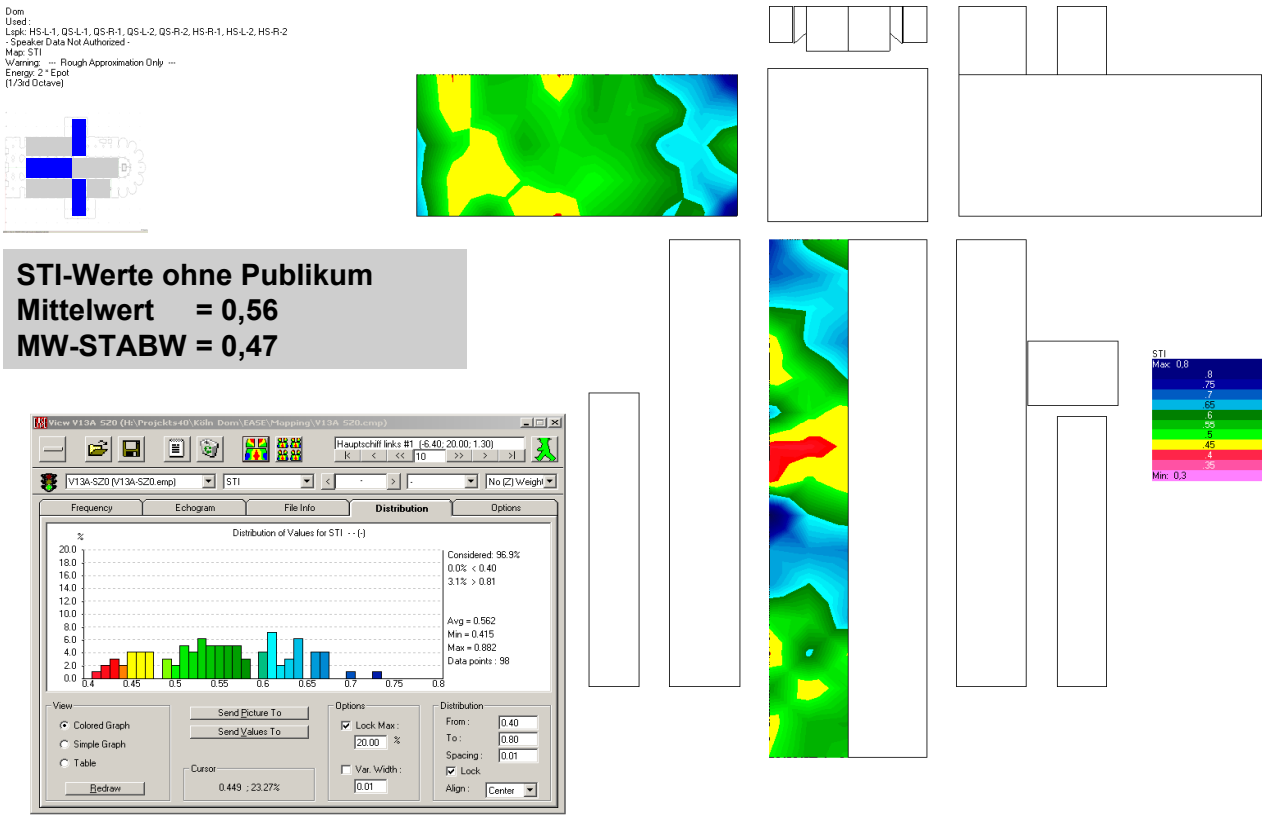
Direktschallverteilung mit DSP Zeilen



Direktschallpegel als Summenpegel der Oktavbänder von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz

(c) EASE 4.3 / Dom 1_5 / 25/11/2009 10:57:42 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

Sprachverständlichkeit mit passiven Zeilen



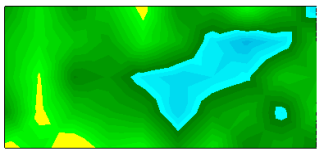
STI-Werte ohne Publikum
Mittelwert = 0,56
MW-STABW = 0,47

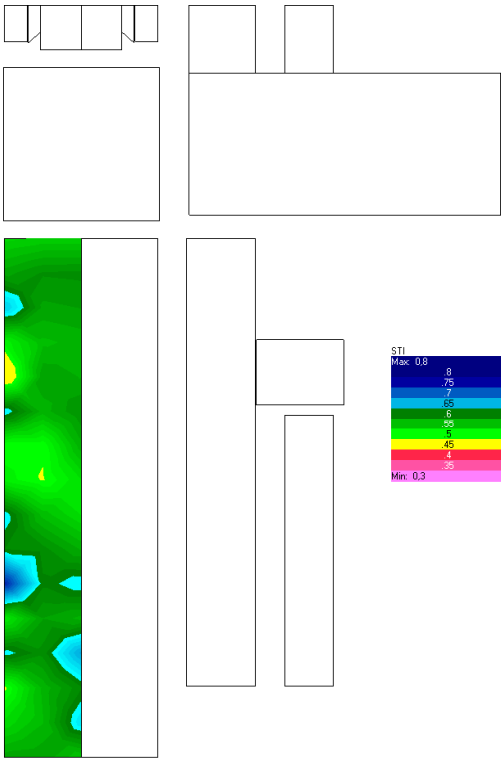
(c) EASE 4.3 / Dom 1_3 / 26/11/2009 08:01:21 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

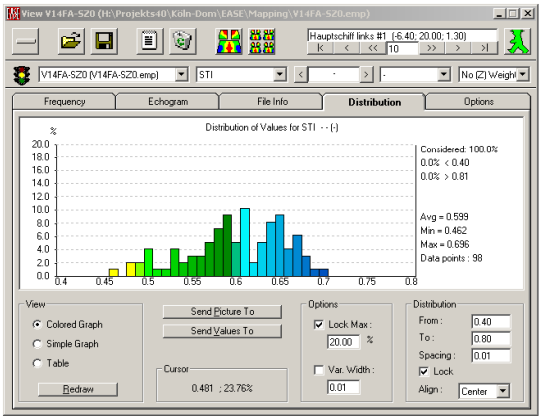
Sprachverständlichkeit mit DSP Zeilen

Dom
Used:
Lspk: HS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: STI
Warning: --- Rough Approximation Only ---
Energy: 2 * Epot
(1/3rd Octave)

STI-Werte ohne Publikum





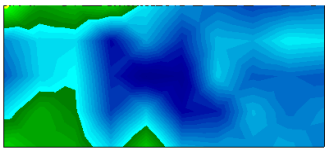


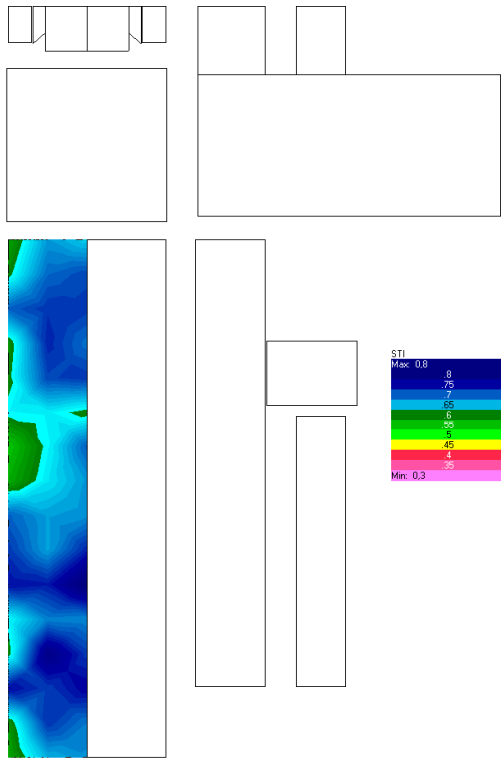
Mittelwert = 0,60
MW-STABW = 0,54

(c) EASE 4.3 / Dom 1_4 / 23/11/2009 21:00:34 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

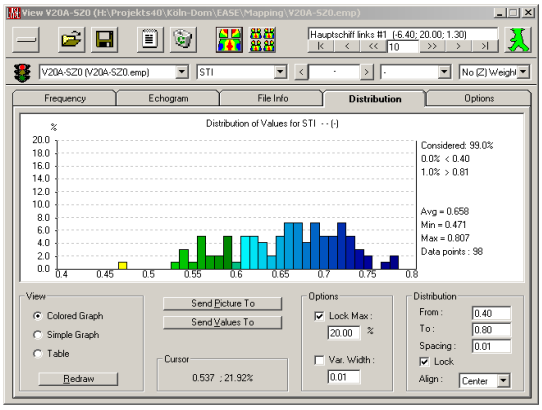
Sprachverständlichkeit mit DSP Zeilen

Dom
Used:
Lspk: HS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: STI
Warning: --- Rough Approximation Only ---
Energy: 2 * Epot
(1/3rd Octave)



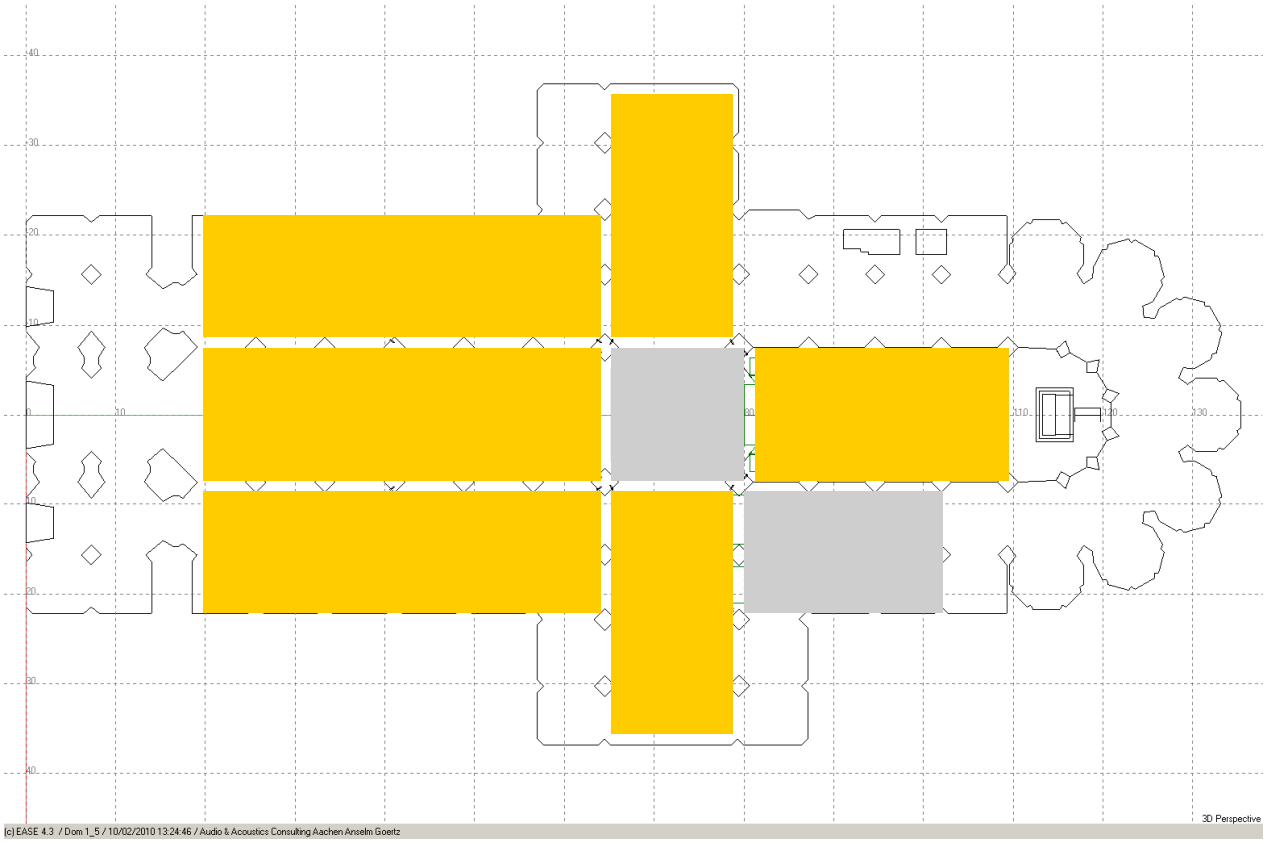


STI-Werte mit Publikum
Mittelwert = 0,66
MW-STABW = 0,59



(c) EASE 4.3 / Dom 1_5 / 25/11/2009 12:20:20 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

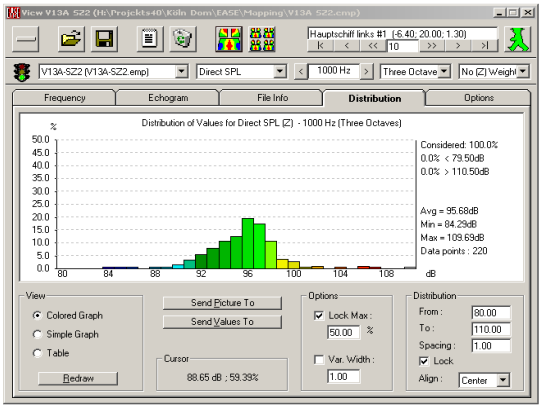
Ergebnisse Festtagsgottesdienst

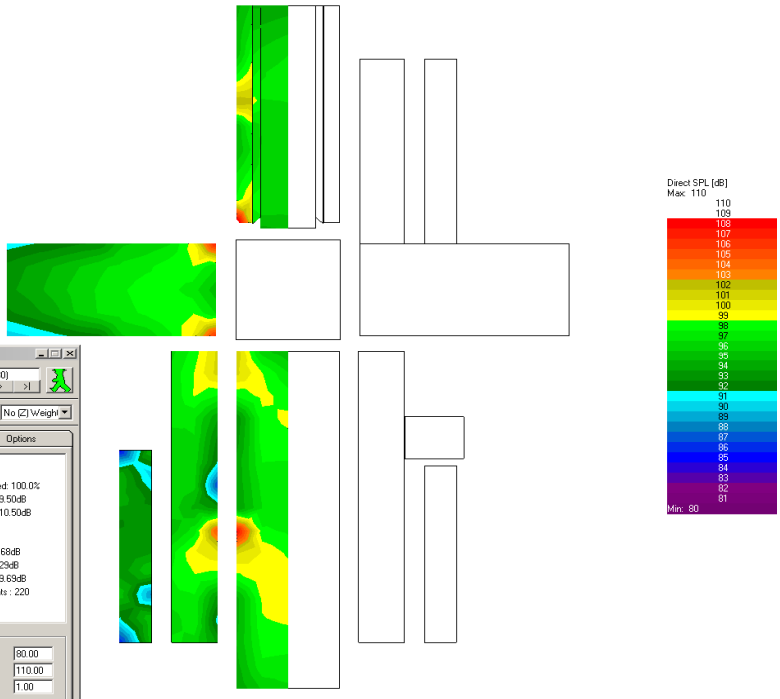


Direktschallverteilung mit passiven Zeilen

Dom
Used:
Lspk: HS-L-1, SS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, SS-R-1, SS-R-2, SS-L-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2, HC-L1, HC-R1, HC-L2, HC-R2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: Direct SPL (Z)
Freq: 1000 Hz
(3/1 Octaves Sum)
Energy: 2 * Epot
(1/3rd Octave)

Direktschallpegel als Summenpegel der Oktavbänder von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz



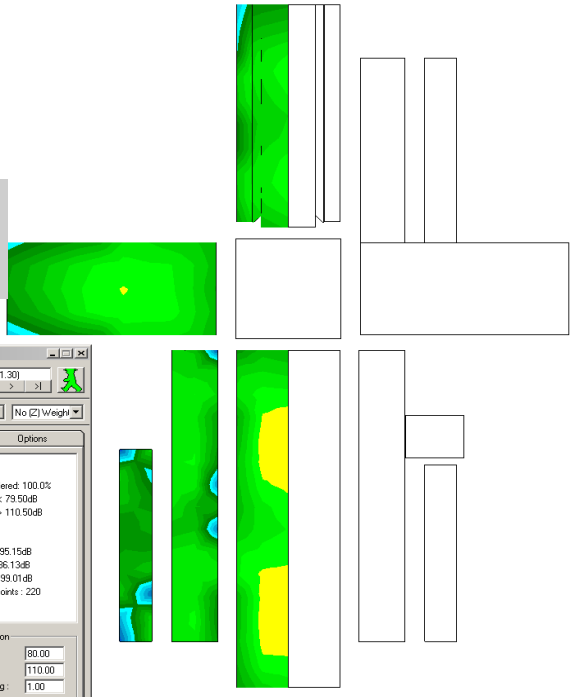


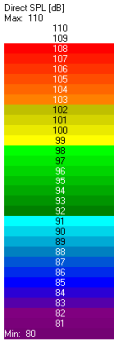
(c) EASE 4.3 / Dom 1_3 / 26/11/2009 07:56:06 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

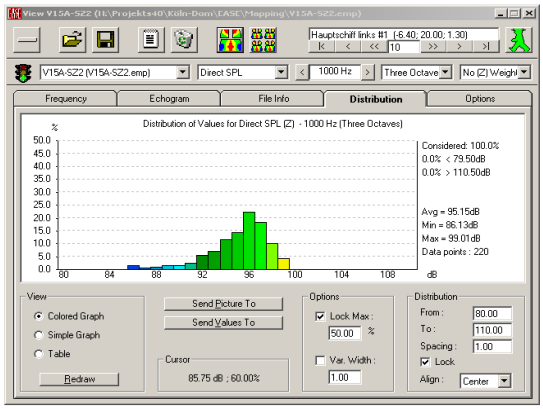
Direktschallverteilung mit DSP Zeilen

Dom
Used :
Lspk: HS-L-1, SS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, SS-R-1, SS-R-2, SS-L-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2, HC-L1a, HC-R1a, HC-L2, HC-R2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: Direct SPL [Z]
Freq: 1000 Hz
[3/1 Octaves Sum]
Energy: 2 * Epot
[1/3rd Octave]

Direktschallpegel als Summenpegel der Oktavbänder von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz





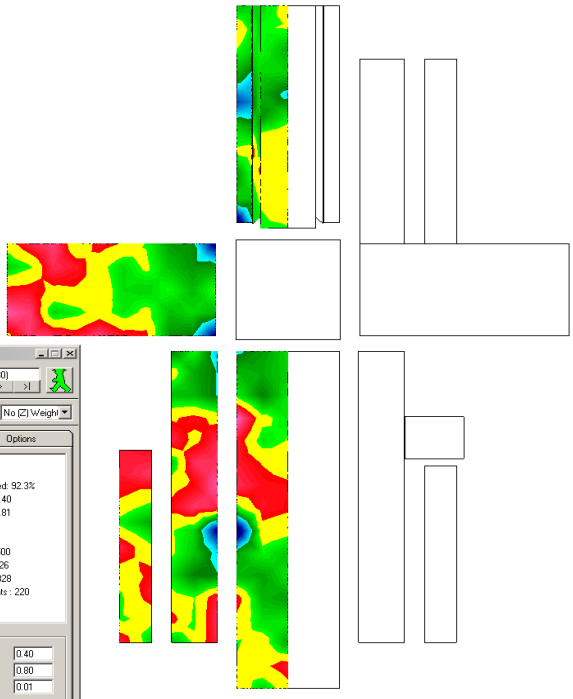


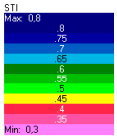
(c) EASE 4.3 / Dom 1_5 / 25/11/2009 10:58:43 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

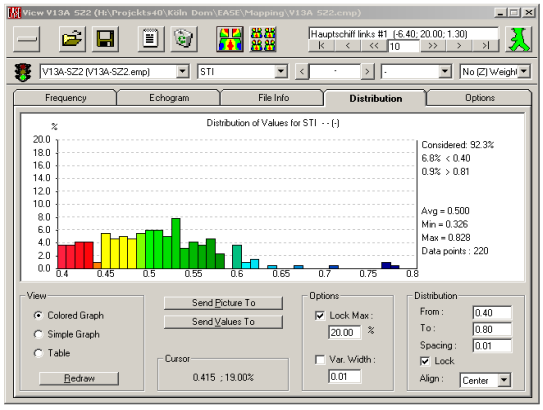
Sprachverständlichkeit mit passiven Zeilen

Dom
Used :
Lspk: HS-L-1, SS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, SS-R-1, SS-R-2, SS-L-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2, HC-L1, HC-R1, HC-L2, HC-R2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: STI
Warning: --- Rough Approximation Only ---
Energy: 2 * Epot
[1/3rd Octave]

STI-Werte ohne Publikum
Mittelwert = 0,5
MW-STABW = 0,42





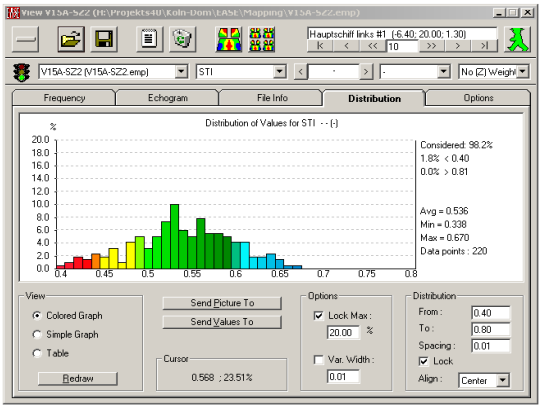


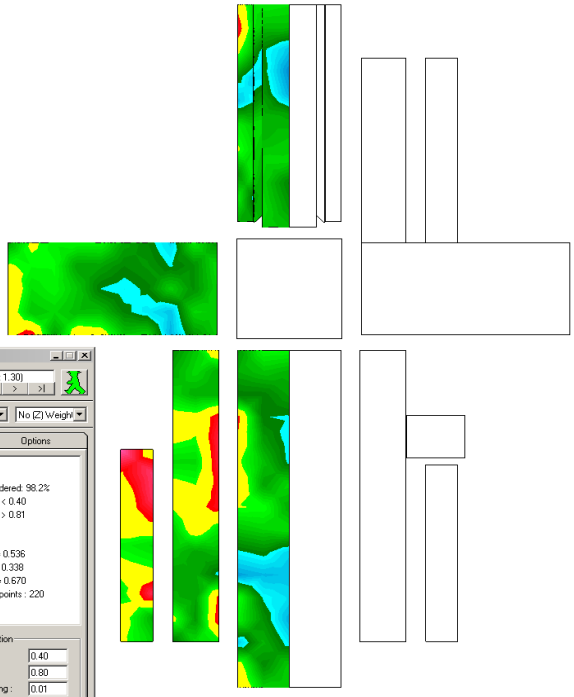
(c) EASE 4.3 / Dom 1_3 / 26/11/2009 08:03:42 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

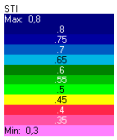
Sprachverständlichkeit mit DSP Zeilen

Dom
Used :
Lspk: HS-L-1, SS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, SS-R-1, SS-R-2, SS-L-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2, HC-L1a, HC-R1a, HC-L2, HC-R2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: STI
Warning: --- Rough Approximation Only ---
Energy: 2 * Epot
[1/3rd Octave]

STI-Werte ohne Publikum
Mittelwert = 0,54
MW-STABW = 0,48





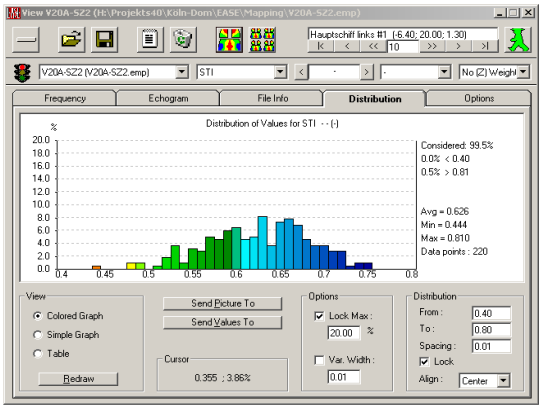


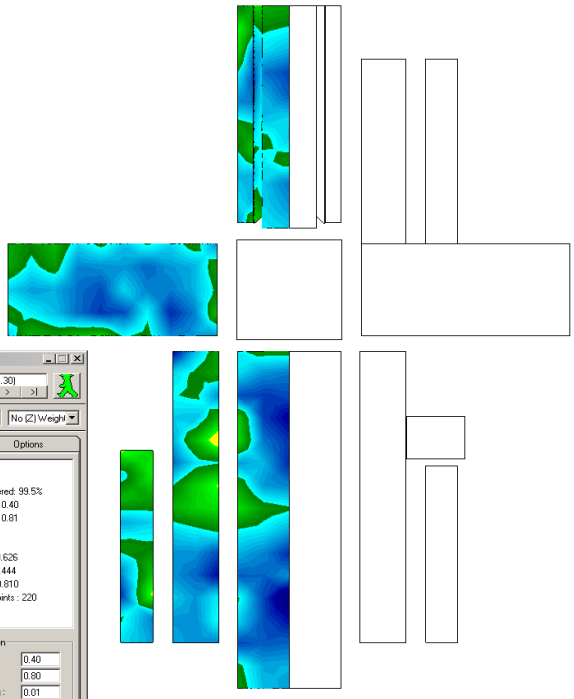
(c) EASE 4.3 / Dom 1_5 / 25/11/2009 10:43:32 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

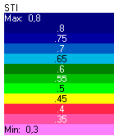
Sprachverständlichkeit mit DSP Zeilen

Dom
Used :
Lspk: HS-L-1, SS-L-1, QS-L-1, QS-R-1, QS-L-2, QS-R-2, SS-R-1, SS-R-2, SS-L-2, HS-R-1, HS-L-2, HS-R-2, HC-L1a, HC-R1a, HC-L2, HC-R2
- Speaker Data Not Authorized -
Map: STI
Warning: --- Rough Approximation Only ---
Energy: 2 * Epot
[1/3rd Octave]

STI-Werte mit Publikum
Mittelwert = 0,63
MW-STABW = 0,57

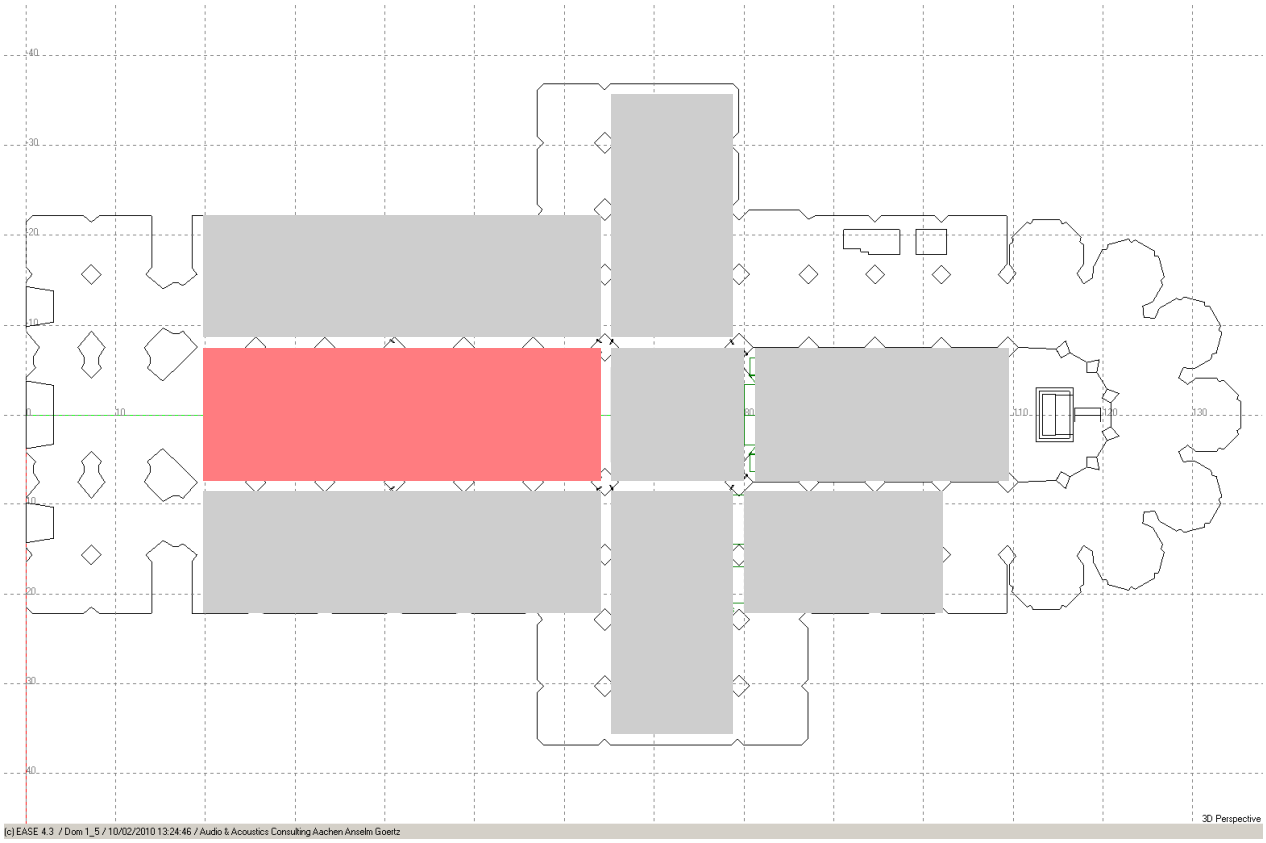




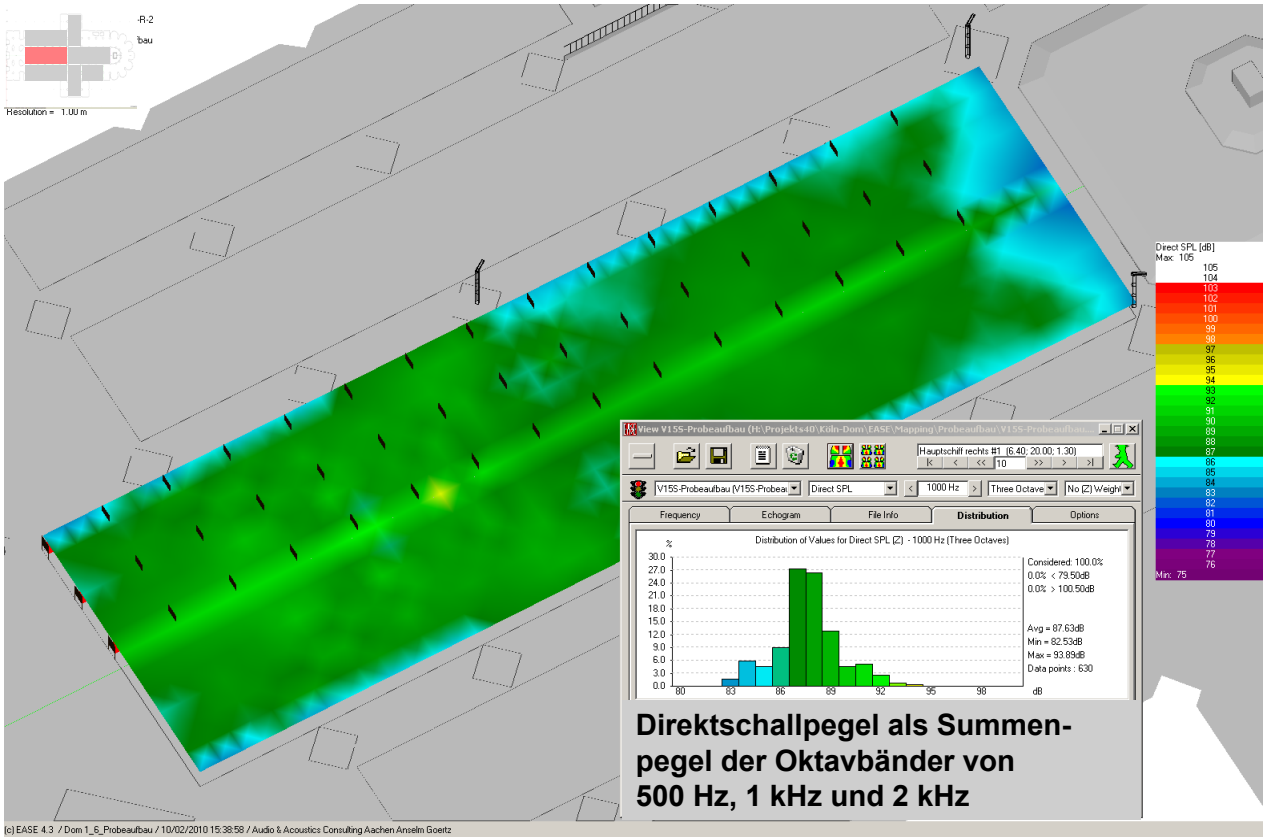


(c) EASE 4.3 / Dom 1_5 / 25/11/2009 12:13:32 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

Ergebnisse Probeaufbau nur im Hauptschiff

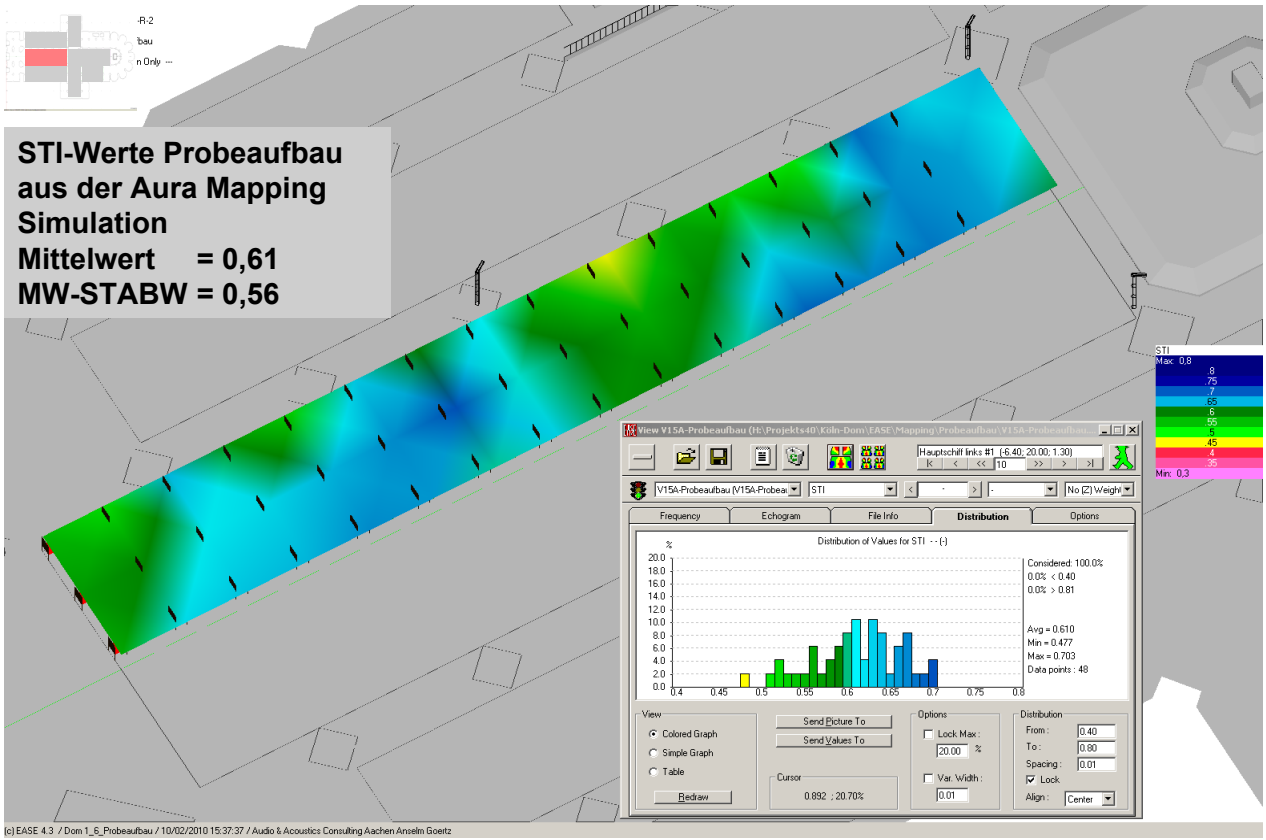


Direktschallverteilung Probeaufbau



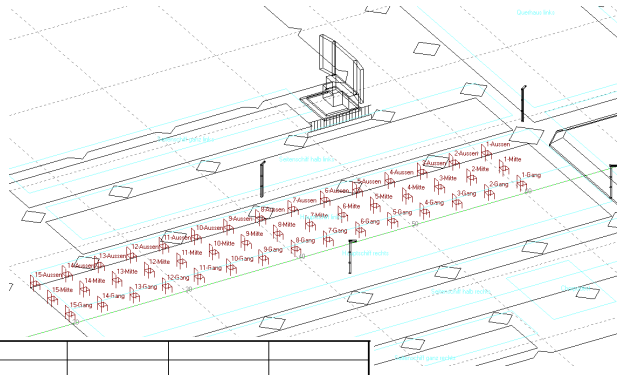
Direktschallpegel als Summenpegel der Oktavbänder von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz

Sprachverständlichkeit Probeaufbau



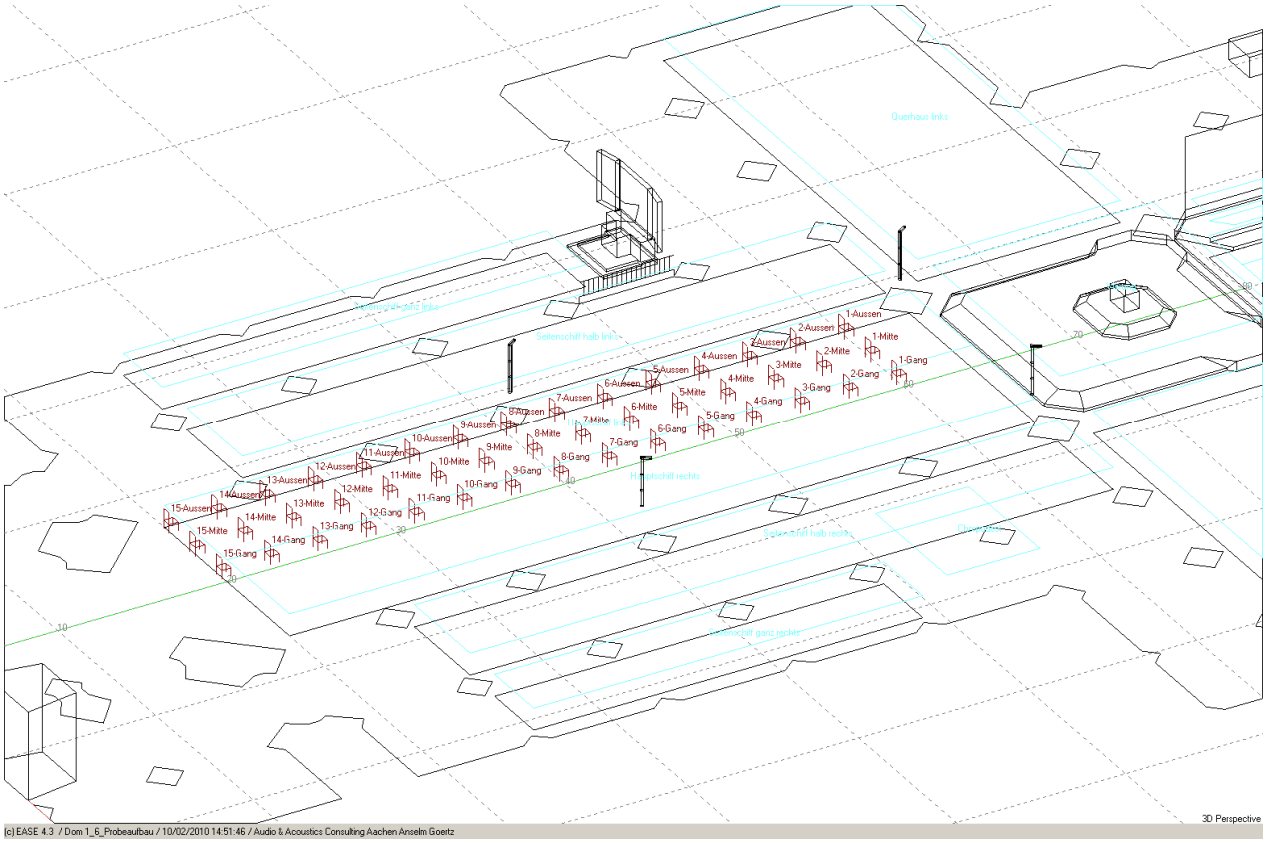
STI Messwerte Probeaufbau

STI-Werte Probeaufbau aus der Messung an 45 Positionen
Mittelwert = 0,68
MW-STABW = 0,65



Datum	26.1.10								
Bearbeiter	AG								
	Langschiff links sitzend 1,2 m					Langschiff links stehend 1,7 m			
Position	Gang	Mitte	Außen	alle		Gang	Mitte	Außen	alle
Mic Höhe	*1,2*	*1,2*	*1,2*	*1,2*		*1,7*	*1,7*	*1,7*	*1,7*
MW	0,69	0,69	0,66	0,68		0,71	0,70	0,68	0,70
STABW	*0,025*	*0,021*	*0,033*	*0,030*		*0,025*	*0,021*	*0,040*	*0,031*
MW-STABW	0,67	0,67	0,62	0,65		0,69	0,68	0,64	0,67
Reihe									
1	0,67	0,71	0,72			0,71	0,72	0,75	
2	0,71	0,68	0,67			0,72	0,72	0,71	
3	0,69	0,67	0,62			0,72	0,7	0,67	
4	0,66	0,67	0,64			0,72	0,71	0,66	
5	0,65	0,67	0,66			0,7	0,71	0,7	
6	0,68	0,69	0,66			0,7	0,69	0,67	
7	0,69	0,68	0,61			0,68	0,67	0,61	
8	0,69	0,69	0,64			0,67	0,66	0,63	
9	0,7	0,7	0,68			0,68	0,69	0,67	
10	0,73	0,71	0,67			0,68	0,7	0,71	
11	0,72	0,72	0,67			0,72	0,74	0,73	
12	0,71	0,71	0,71			0,74	0,72	0,73	
13	0,73	0,71	0,68			0,74	0,73	0,71	
14	0,68	0,67	0,63			0,75	0,7	0,66	
15	0,66	0,65	0,61			0,73	0,7	0,65	

Vergleich Messung - Simulation



Vergleich Messung - Simulation

	Messwerte sitzend 1,2 m								Aura Response Simulation sitzend 1,2 m						
Position	**Gang**		**Mitte**		**Außen**		**alle**		**Gang**		**Mitte**		**Außen**		**alle**
Mic Höhe	*1,2*		*1,2*		*1,2*		*1,2*		*1,2*		*1,2*		*1,2*		*1,2*
MW	0,69		0,69		0,66		0,68		0,62		0,60		0,57		0,60
STABW	*0,025*		*0,021*		*0,033*		*0,030*		*0,029*		*0,029*		*0,033*		*0,035*
MW-STABW	0,67		0,67		0,62		0,65		0,59		0,57		0,54		0,56
Reihe															
1	0,67		0,71		0,72				0,62		0,62		0,55		
2	0,71		0,68		0,67				0,61		0,62		0,61		
3	0,69		0,67		0,62				0,67		0,66		0,57		
4	0,66		0,67		0,64				0,63		0,63		0,59		
5	0,65		0,67		0,66				0,61		0,59		0,57		
6	0,68		0,69		0,66				0,57		0,59		0,52		
7	0,69		0,68		0,61				0,59		0,54		0,53		
8	0,69		0,69		0,64				0,58		0,61		0,63		
9	0,7		0,7		0,68				0,64		0,64		0,62		
10	0,73		0,71		0,67				0,64		0,6		0,6		
11	0,72		0,72		0,67				0,65		0,58		0,55		
12	0,71		0,71		0,71				0,65		0,59		0,57		
13	0,73		0,71		0,68				0,61		0,6		0,6		
14	0,68		0,67		0,63				0,59		0,58		0,56		
15	0,66		0,65		0,61				0,61		0,59		0,55		

Fazit

- Nachhallzeit Messung als erste Orientierung
- Simulationsmodell an die Nachhallzeitmessung anpassen
- Absorptionsverhalten und Streugrade im Modell anpassen
- Je schwieriger der Raum akustisch ist, desto besser muß das Richtverhalten der Lautsprecher im Hinblick auf eine gezielte Beschallung nur der Zuhörer sein.
- Lautsprecher mit korrekter Nahfeld-Fernfeld Abbildung berechnen
- Hörerflächen und Szenarien sinnvoll bestimmen
- Bei Bedarf auch auralisieren und einen Probeaufbau erstellen

Literatur

Einige der technischen Abbildungen sind den folgenden Büchern entnommen:

Fasold, W. / Veres, E.
Schallschutz +
Raumakustik
in der Praxis
Verlag für Bauwesen Berlin

enthält reichhaltige Literaturhinweisen

S. Weinzierl.
Handbuch der Audiotechnik
Springer Verlag