

# Zur Planung von Beschallungsanlagen für große Sportstadien

## Prolight + Sound Media Systems Congress 2009

Anselm Goertz, Alfred Schmitz  
IFAA (*Institut für Akustik und Audiotechnik*)

### Übersicht zum Vortrag

- Einleitung
- Planungsansatz
  - Raumakustik
  - Auswahl der Lautsprecher
- Simulationen
  - Ausgangswerte
    - Modellbau
    - Materialdaten
    - Lautsprecherdaten
  - Ergebnisse
    - Raumakustische Parameter
    - Direktschallverteilung
    - Weitergehende Werte wie Sprachverständlichkeit etc.
    - Auralisationen
- Auswertung, Darstellung und Bewertung der Simulationsdaten
  - Parameter der Berechnung
  - Statistische Auswertung nach VDE 0828
  - Besetzungsdichte des Stadions
  - Nachträgliche bauliche Änderungen
  - Berücksichtigung von Störgeräuschen
  - Berücksichtigung der Selbstmaskierung von Sprache nach VDE 0833
- Fazit

# Beispiel eines Sportstadions

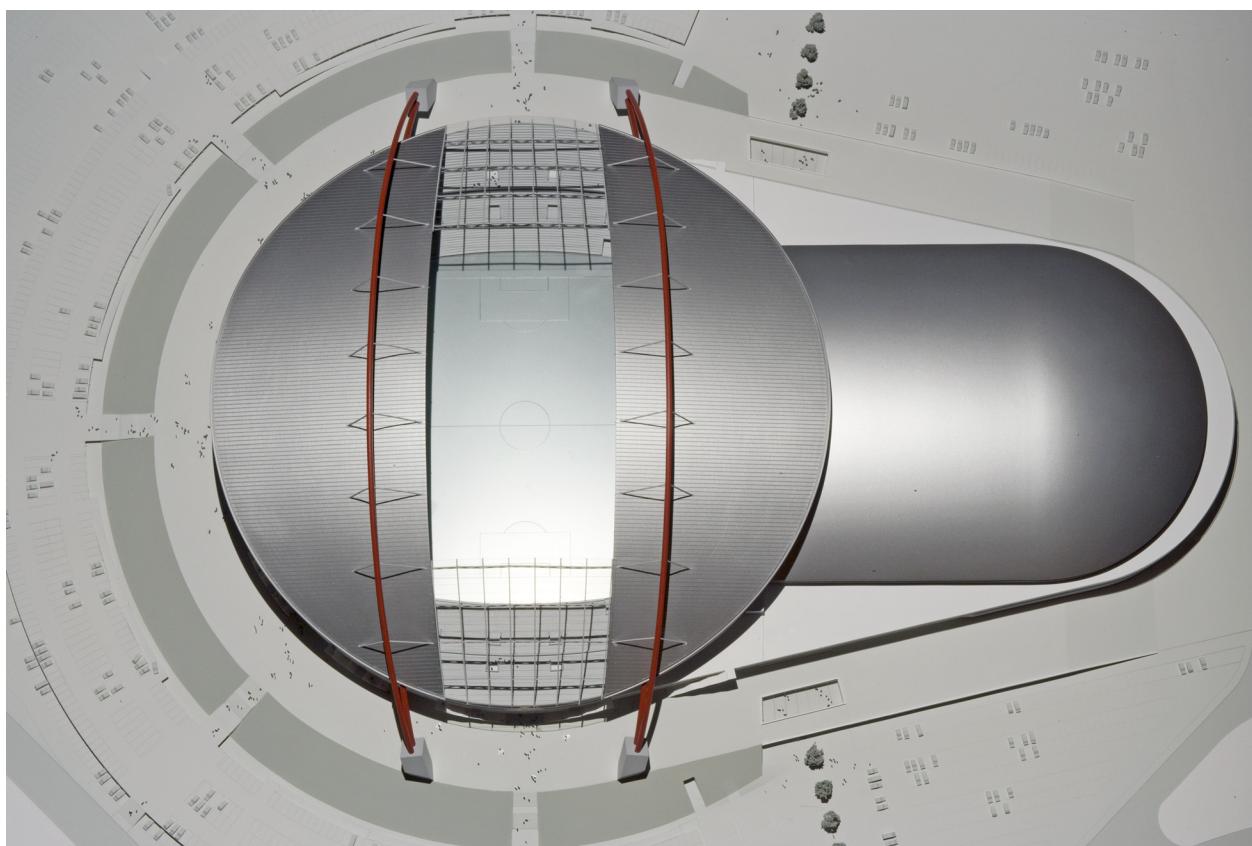


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

3

## Blick von oben

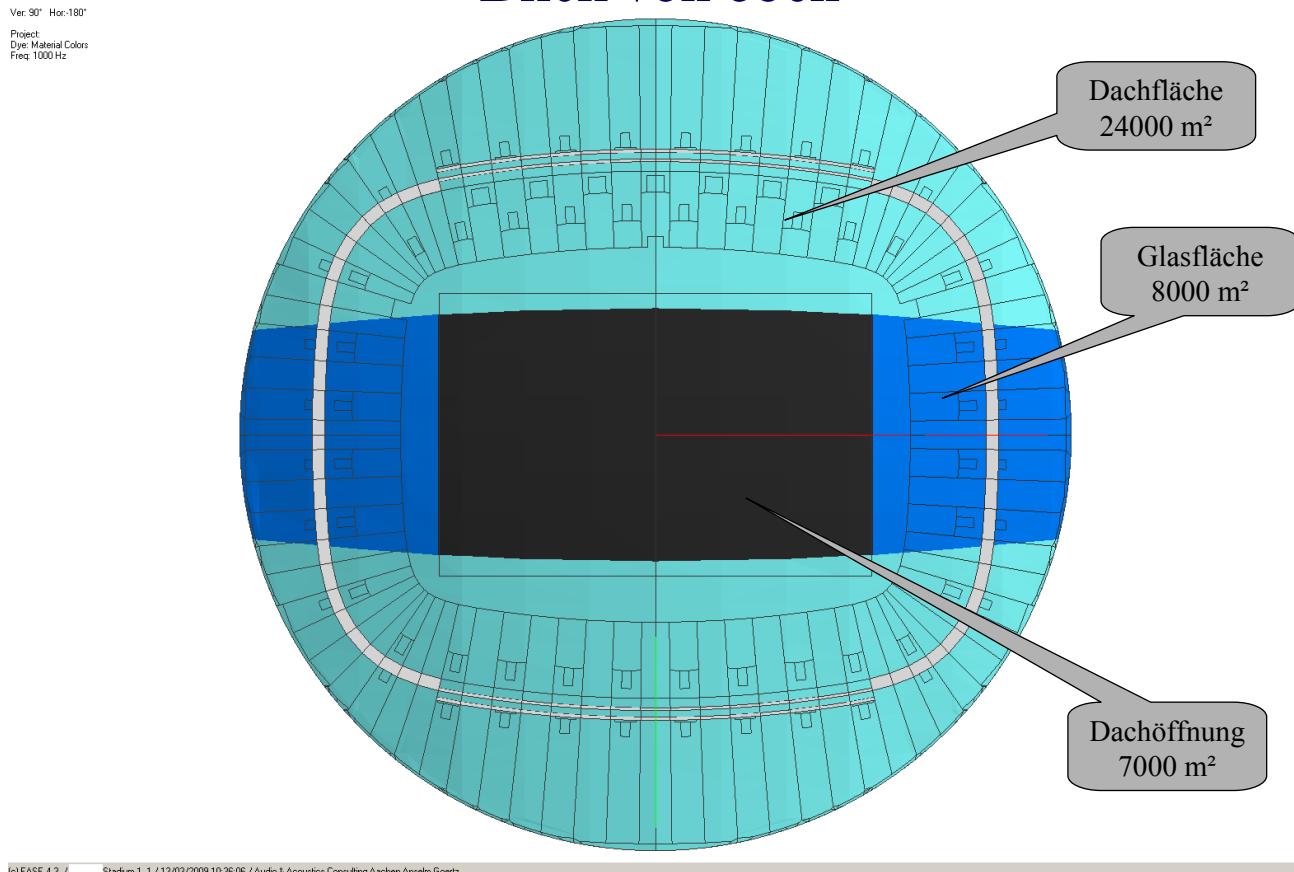


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

4

# Blick von oben

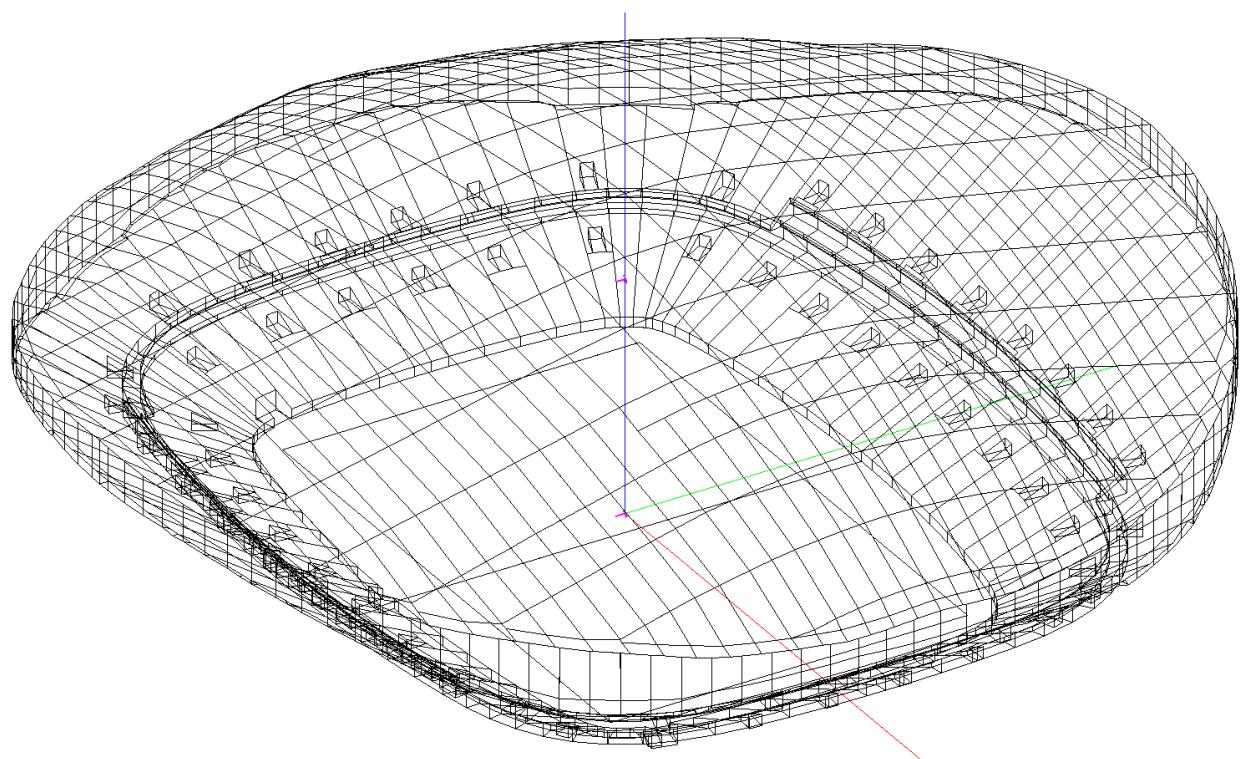


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

5

# Drahtgittermodell in EASE

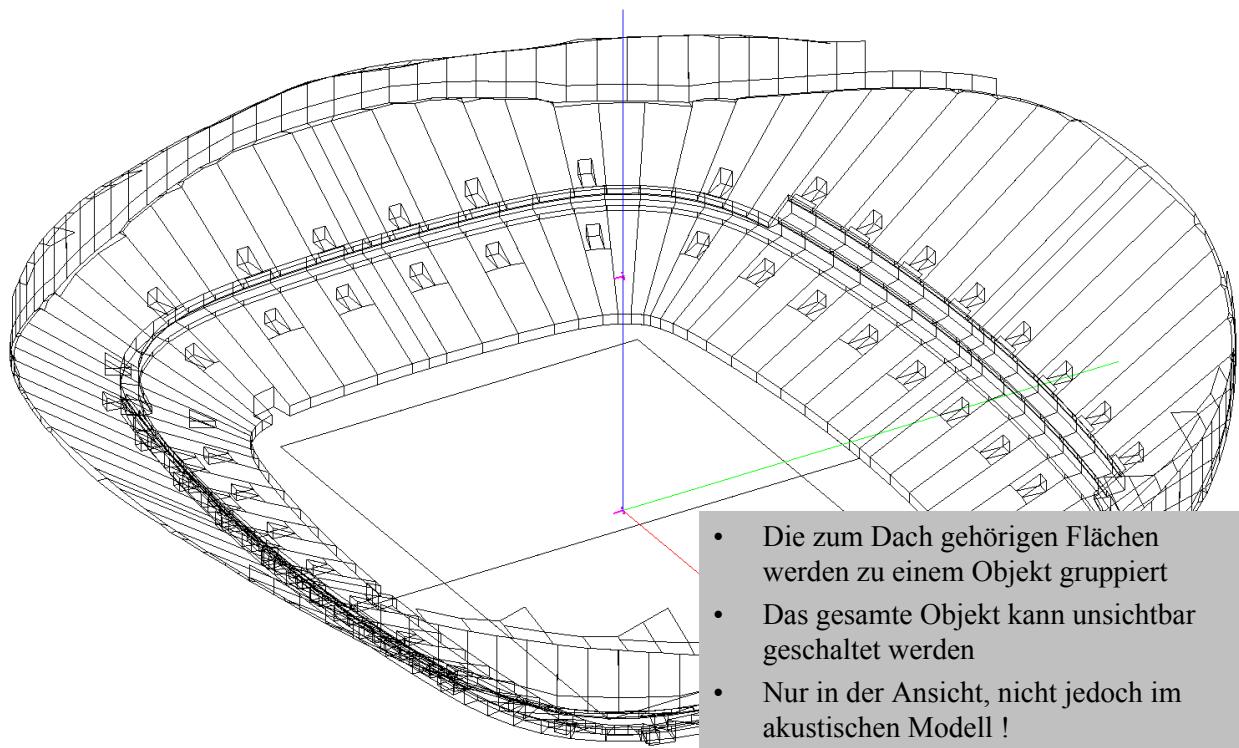


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

6

# Drahtgittermodell in EASE ohne Dach



(c) EASE 4.3

Stadium\_1\_1 / 13/03/2009 10:25:41 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

3D Perspective

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

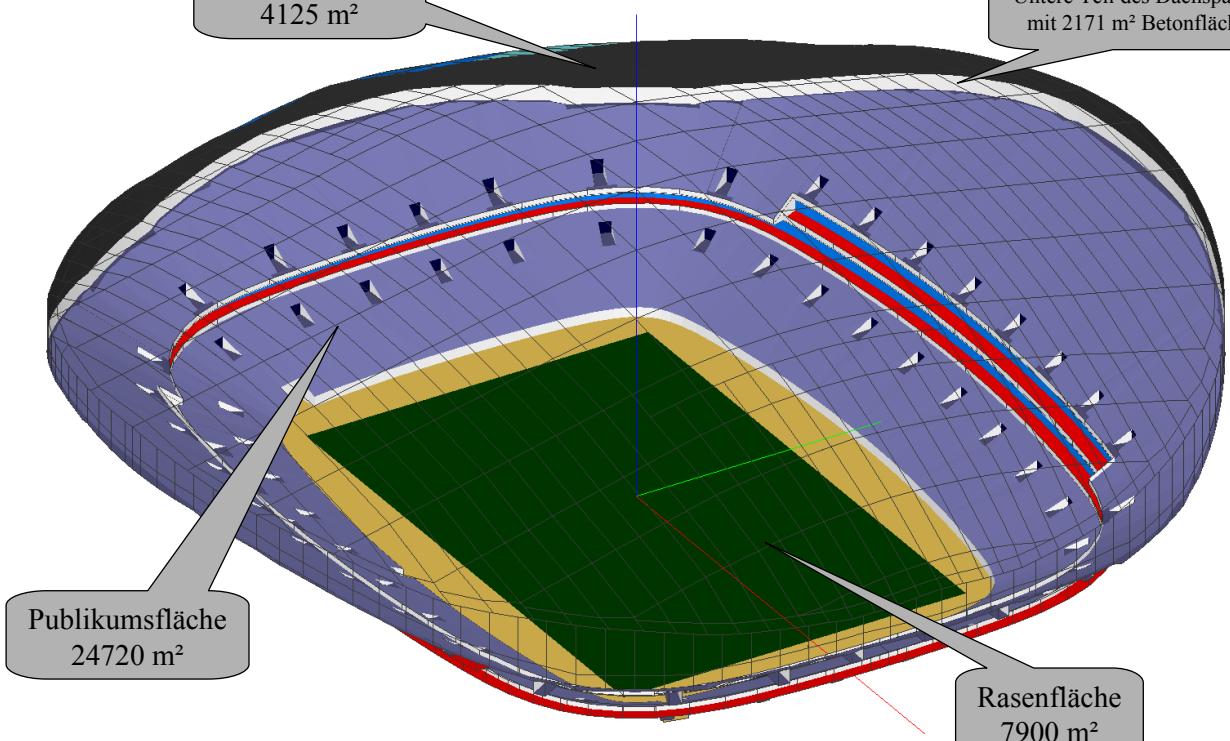
7

## Modell mit Oberflächenmaterialien ( $\Sigma = 92.270 \text{ m}^2$ )

Ver.:30° Hor.:121°  
Project: stadium\_1\_1  
Dye: Material Colors  
Freq: 1000 Hz

Dachspalt offen  
4125 m<sup>2</sup>

Untere Teil des Dachspaltes  
mit 2171 m<sup>2</sup> Betonfläche



(c) EASE 4.3 /

Stadium\_1\_1 / 13/03/2009 10:30:24 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

8

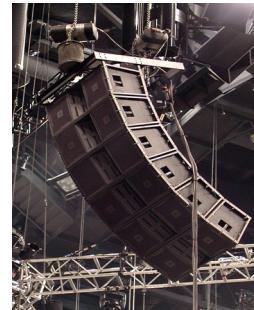
# Auswahl der Lautsprecher

- Klassische Hornsysteme
  - reichhaltiges Angebot
  - günstig in der Anschaffung
  - relativ leicht
  - hohe Sensitivity
    - wenig Verstärkerleistung
    - evtl. 100V tauglich
  - keine scharfe Directivity
  - meist noch zusätzliche Subwoofer erforderlich



Randbereiche werden meist über dezentrale 100V Systeme versorgt.

- Line-Arrays
  - sehr präzises und leicht einstellbares Richtverhalten
  - hohe Flexibilität
  - Fullrange tauglich
  - niedrigere Sensitivity
    - hohe Verstärkerleistung
    - kein 100V Betrieb möglich
    - schwer



## Ausgangswerte für die Simulation

- Modellbau
  - Akustisch wichtige Details einarbeiten
    - Schallharte Flächen: Glas, Beton, Metall, ...
  - Aber nicht zu viele Einzelflächen mit Rücksicht auf die Rechenzeit
    - Beispielstadion hat 1079 Flächen
  - Materialdaten
    - Absorption (Werte auf Plausibilität prüfen !)
    - Streuung (Sinnvolle Werte ergänzen)
    - z.B. Stuhlreihe mit 30-50% ansetzen
    - Publikumsflächen beachten (große Flächen mit hoher Absorption)

- Lautsprecherdaten
  - Nur hoch aufgelöste Balloon-Daten mit min. 5° Winkelauflösung und Phaseninformationen verwenden
  - Horn-Cluster auch immer als Cluster und nicht als Einzellautsprecher rechnen
  - Line-Arrays nur mit DLL oder GLL berechnen (wg. Nahfeld-/Fernfeldproblematik)

- Ausrichtung der Lautsprecher
  - Möglichst nur auf gut absorbierende Flächen: Publikum !
  - Kritische Bereich aussparen: Glas- und Betonflächen, Dachspalte,...
  - Immissionsschutz für die Umgebung beachten

# Ergebnisse der Simulationen

## • Erste Schritte

- Raumakustische Parameter aus der statistischen Berechnung
  - Nachhallzeit nach Eyring oder Sabine
  - Abgleich mit möglichen Messwerten der Nachhallzeit
- Direktschallverteilung der Lautsprecher
  - Auch mit hoher Auflösung schnell zu berechnen
  - Bei Linearrays mögliche Hilfsmittel für eine passenden Anfangskonfiguration einsetzen
  - Betrachtung von zu beschallenden und nicht zu beschallenden Flächen
  - gleichmäßige Direktschallpegelverteilung über einen weiten Frequenzbereich anstreben

## • Weitergehende Simulationen

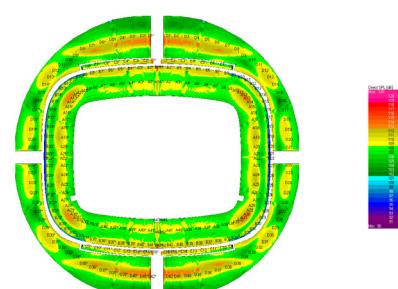
- Spiegelquellen und Strahlenverfolgung (Aura in EASE)
- Präzise Nachhallzeitberechnung mit Hilfe von Kugelquellen im Modell
- Weitergehend Parameter:
  - Sprachverständlichkeit
  - Gesamtschallpegel
  - Echokriterium
  - ...
- Auralisationen
- Sinnvolle Parameter auswählen:
  - Länge der berechneten Impulsantworten min. 50% der Nachhallzeit
  - Möglichst hohe Teilchenzahl
  - Wizard der Software beachten !

# Auswertung, Darstellung und Bewertung der Simulationsdaten

- Alle Parameter der Berechnung angeben
  - Verwendete Anzahl Schallteilchen
  - Länge der berechneten Impulsantworten
  - Auflösung des Mappings
  - Bei STI Berücksichtigung von:
    - Hörschwelle
    - Maskierung
    - Signal-/Noise
    - Berechnung des Mittelwertes
  - Für das Modell
    - Angenommene Publikumsdichte
    - Angenommener Störpegel
    - Einstellung der Lautsprecher
    - Mögliche bauliche Veränderungen

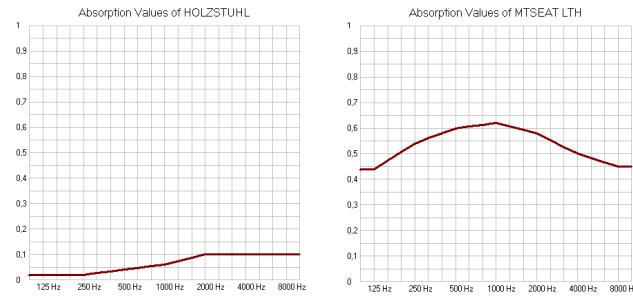
## • Beispielstadion

- Anzahl Schallteilchen pro Lautsprecher: 1.640.000
- Länge der Impulsantworten: 5s bei einer zu erwartenden Nachhallzeit von max. 7s
- Raster: max. 5m entsprechend 2552 Punkten auf der Publikumsfläche von 24.720m<sup>2</sup>
  - Berechnung in Teilbereichen unter Ausnutzung von Symmetrien

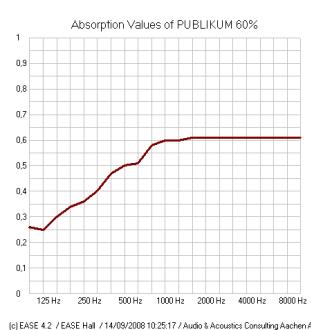


# Materialdaten im Modell

- Bestuhlung, Publikum, Glas, Dachspalt, ...



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 15/03/2009 11:28:59 / Audio & Acoustics Consulting Aachen AG

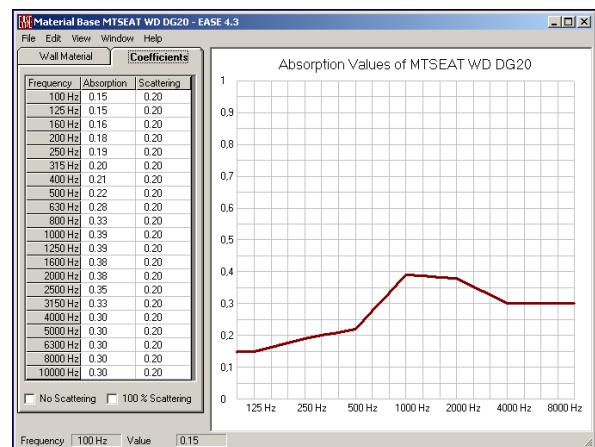


(c) EASE 4.2 / EASE Hall / 14/03/2008 10:25:17 / Audio & Acoustics Consulting Aachen AG

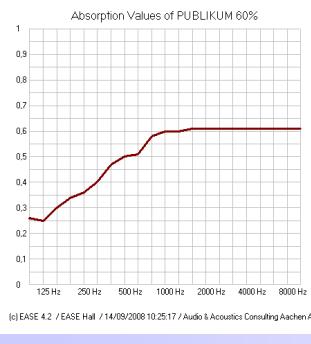
A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

13



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 15/03/2009 11:27:14 / Audio & Acoustics Consulting Aachen AG



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 15/03/2009 11:29:55 / Audio & Acoustics Consulting Aachen AG

(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 13/03/2009 10:48:22 / Audio & Acoustics Consulting Aachen AG

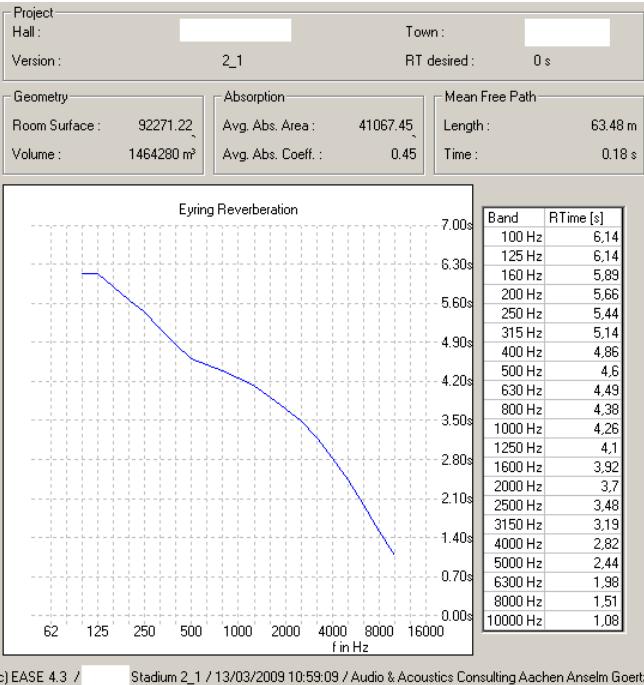
## Nachhallzeiten ohne/mit Publikum

### Stadion ohne Publikum



(c) EASE 4.3 / Stadium 1\_1 / 13/03/2009 10:33:55 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

### Stadion voll besetzt



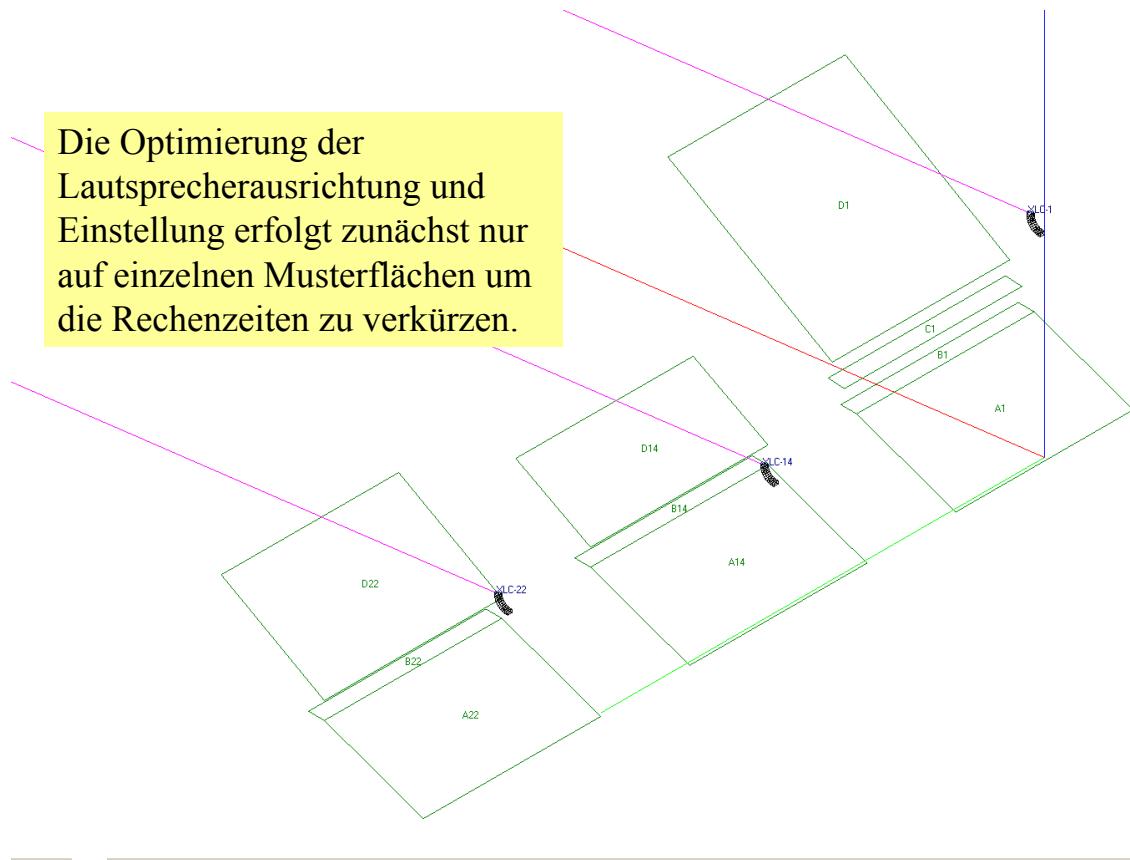
(c) EASE 4.3 / Stadium 2\_1 / 13/03/2009 10:59:09 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

14

# Ausrichtung der Lautsprecher (Line-Arrays)



(c)EASE 4.3 / Stadion 1\_1 / 13/03/2009 11:19:24 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

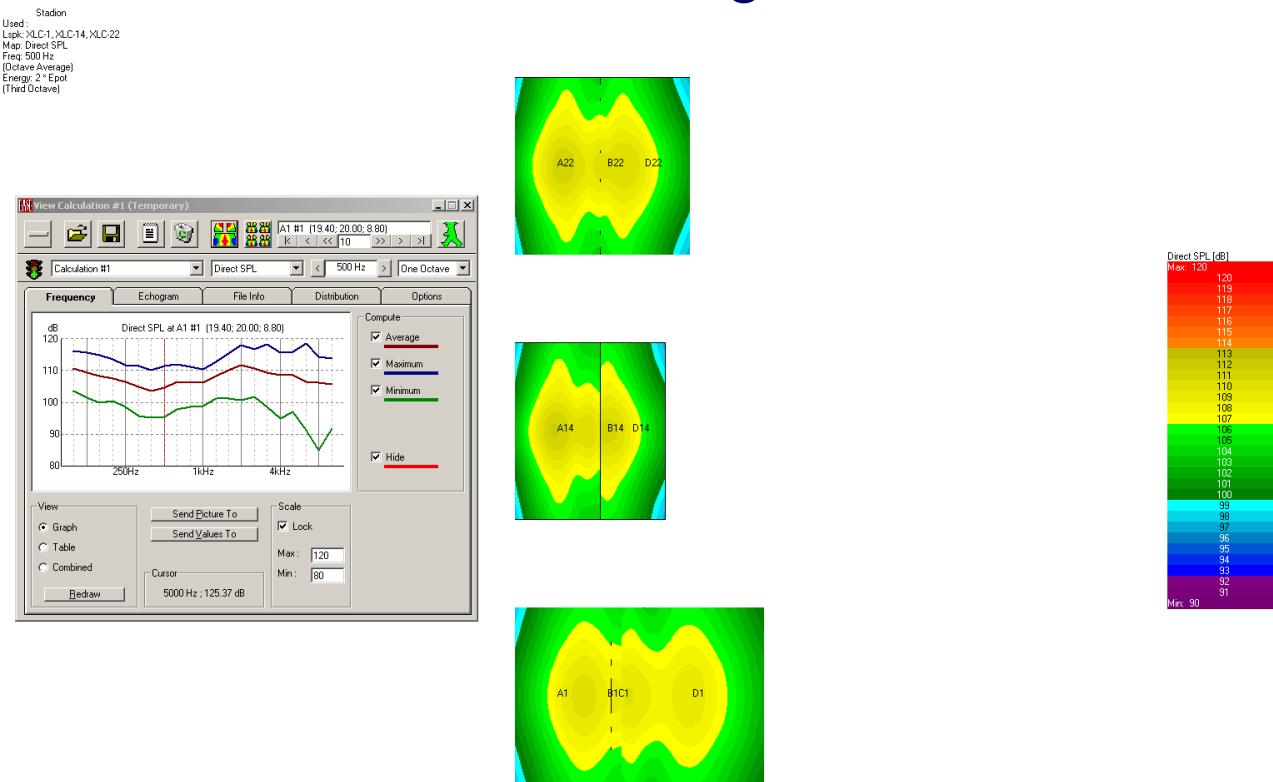
3D Perspective

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

15

## Direktschallverteilung bei 500 Hz



(c)EASE 4.3 / Stadion 1\_1 / 13/03/2009 11:15:21 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

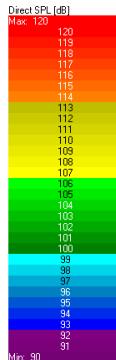
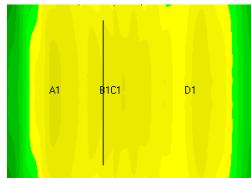
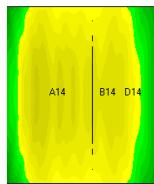
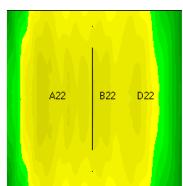
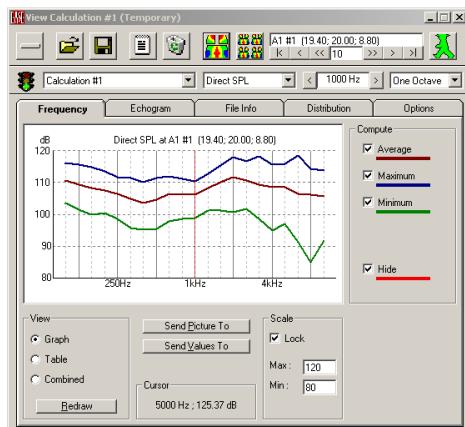
A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

16

# Direktschallverteilung bei 1000 Hz

Stadion  
Used:  
Lokk: XLC1,XLC14,XLC22  
Map: Direct SPL  
Freq: 1000 Hz  
[Octave Average]  
Energy: A-Epot  
[Third Octave]



(c) EASE 4.3 / Stadion 1\_1 / 13/03/2009 11:16:15 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

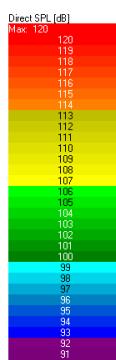
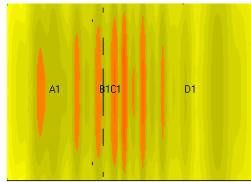
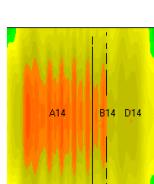
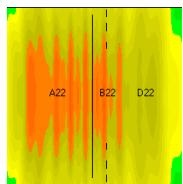
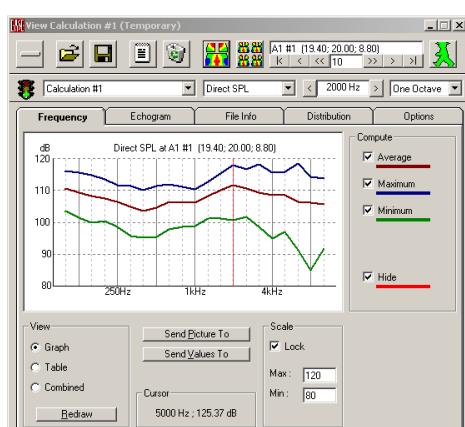
A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

17

# Direktschallverteilung bei 2000 Hz

Stadion  
Used:  
Lokk: XLC1,XLC14,XLC22  
Map: Direct SPL  
Freq: 2000 Hz  
[Octave Average]  
Energy: A-Epot  
[Third Octave]



(c) EASE 4.3 / Stadion 1\_1 / 13/03/2009 11:17:03 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

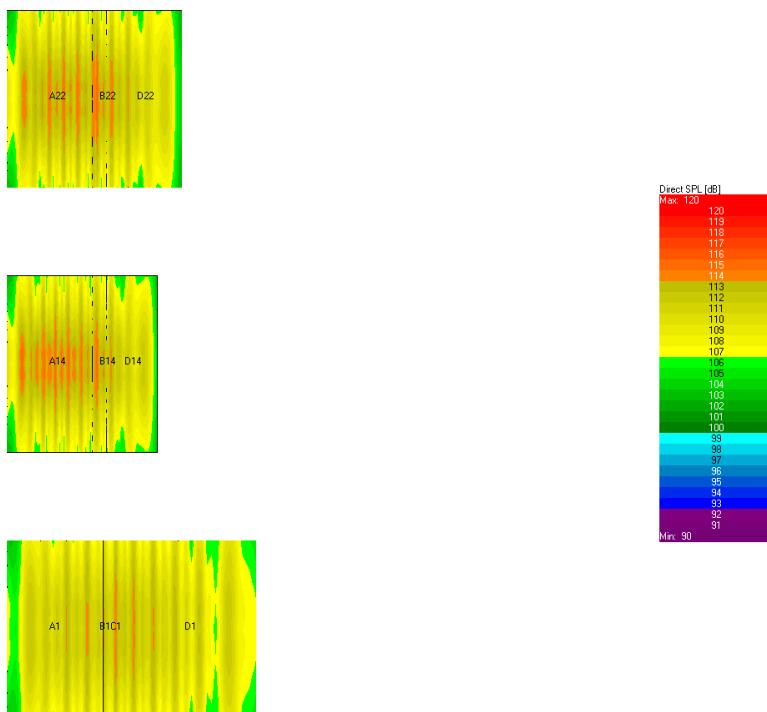
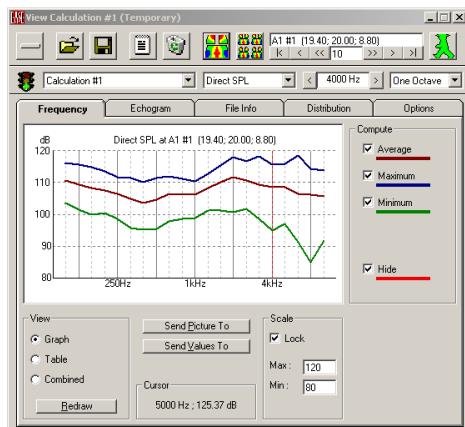
A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

18

# Direktschallverteilung bei 4000 Hz

Stadion  
Used:  
Link: XLC1-XLC14-XLC22  
Map: Direct SPL  
Freq: 4000 Hz  
[Octave Average]  
Energy A-Epot  
[Third Octave]



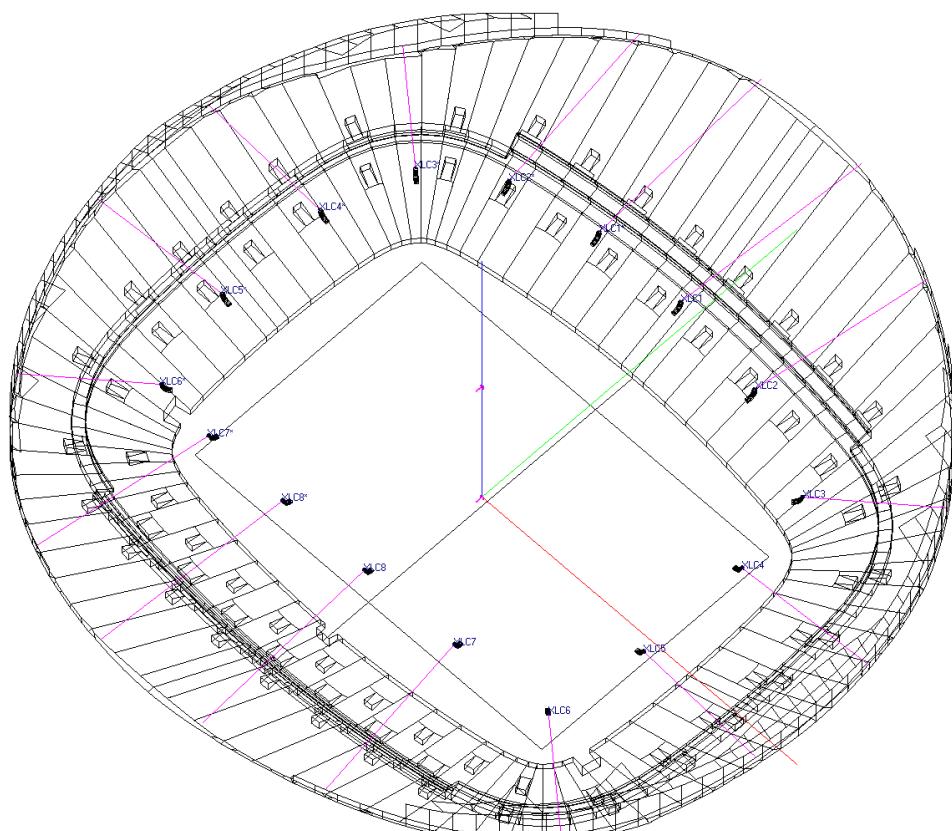
(c) EASE 4.3 / Stadion 1\_1 / 13/03/2009 11:18:00 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

19

## Lautsprecheranordnung mit Line-Arrays



(c) EASE 4.3 / Stadium 1\_1 / 15/03/2009 12:13:05 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

3D Perspective

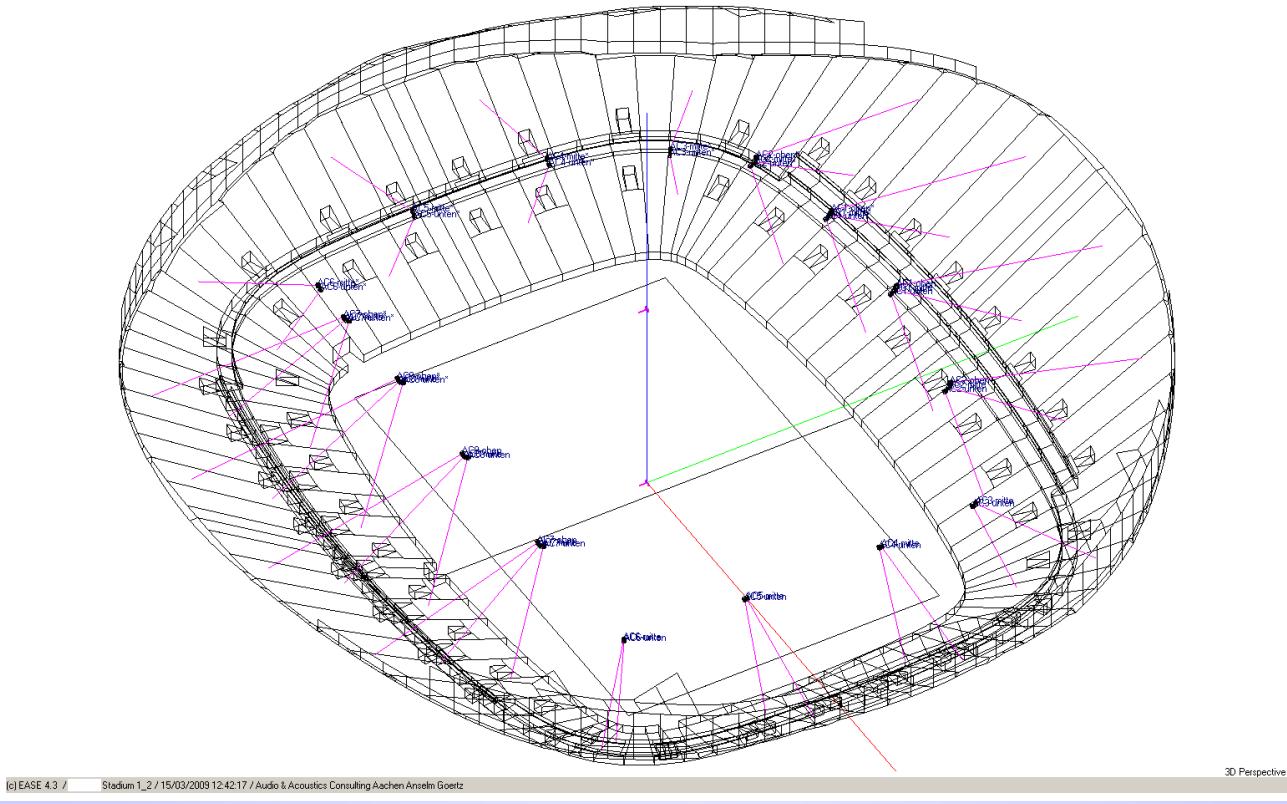
A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

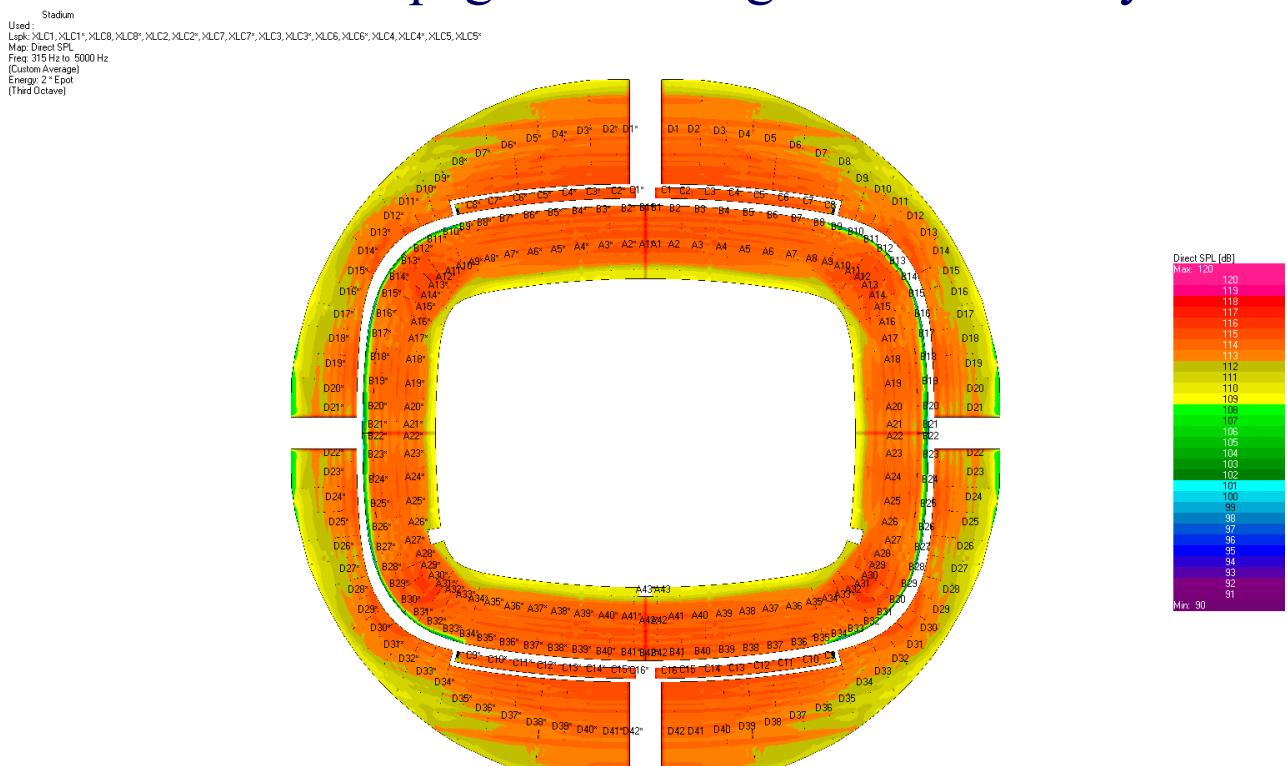
20

10

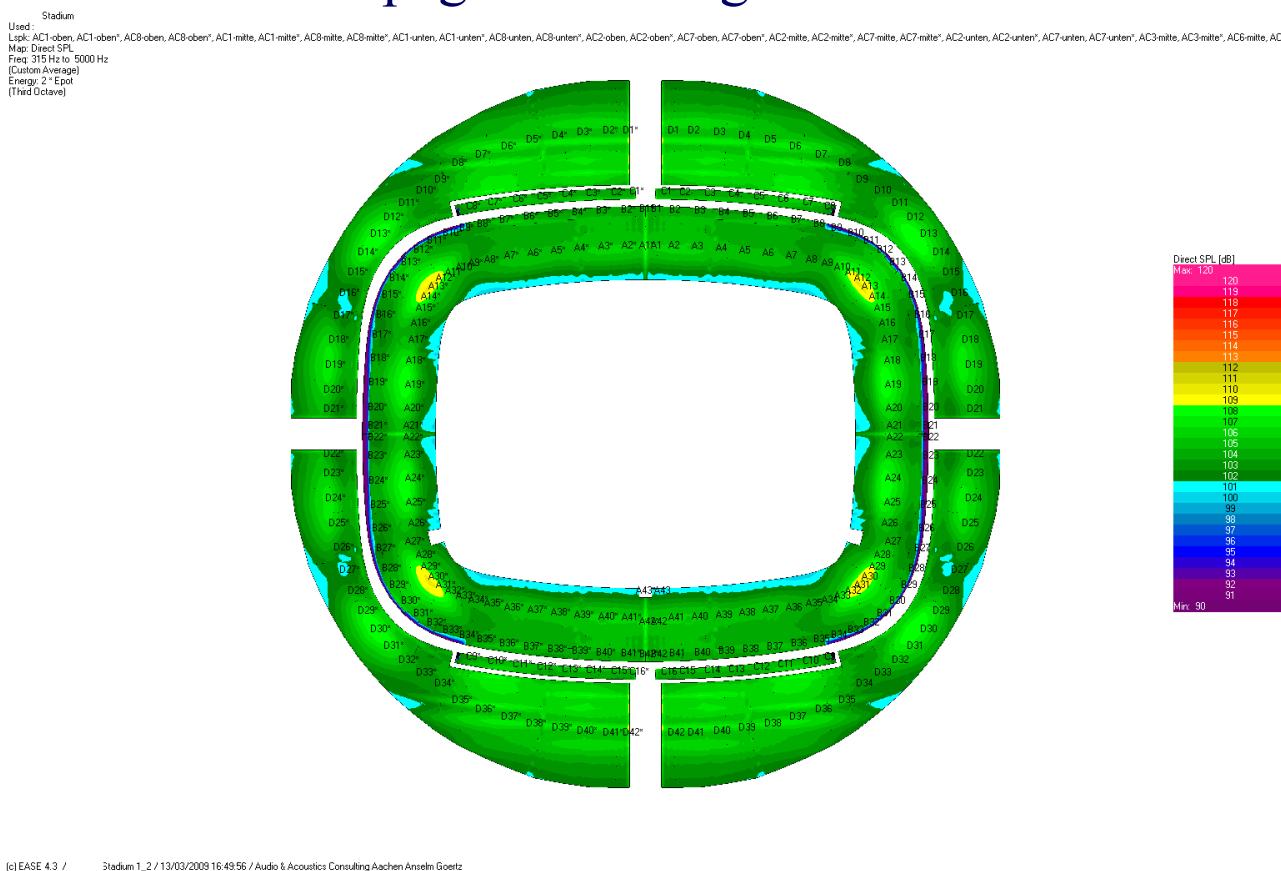
# Lautsprecheranordnung mit Horn-Clustern



# Direktschallpegelverteilung mit Line-Arrays



# Direktschallpegelverteilung mit Horn-Clustern

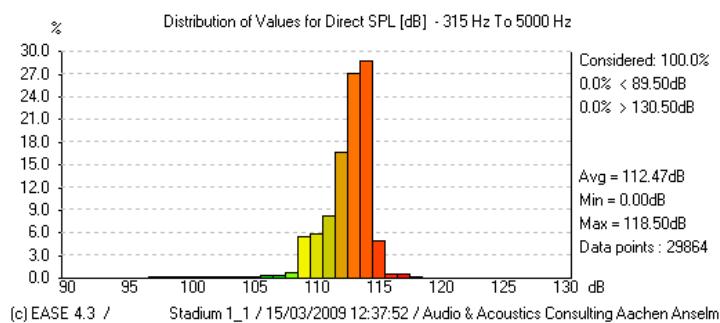


(c) EASE 4.3 / Stadium 1\_2 / 13/03/2009 16:49:56 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

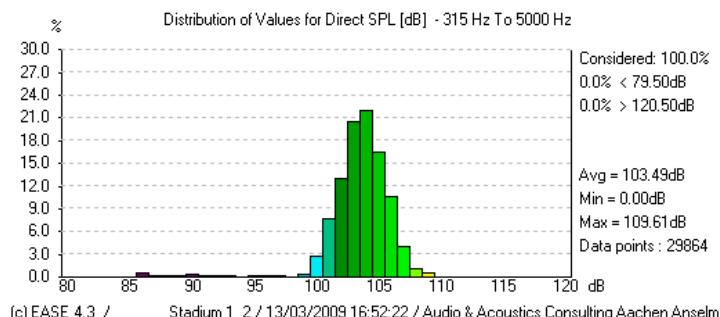
Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

23

## Vergleich der DSPL Verteilungen im Publikum



(c) EASE 4.3 / Stadium 1 1 / 15/03/2009 12:37:52 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm



(c) EASE 4.3 / Stadium 1\_2 / 13/03/2009 16:52:22 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm

## Line-Arrays:

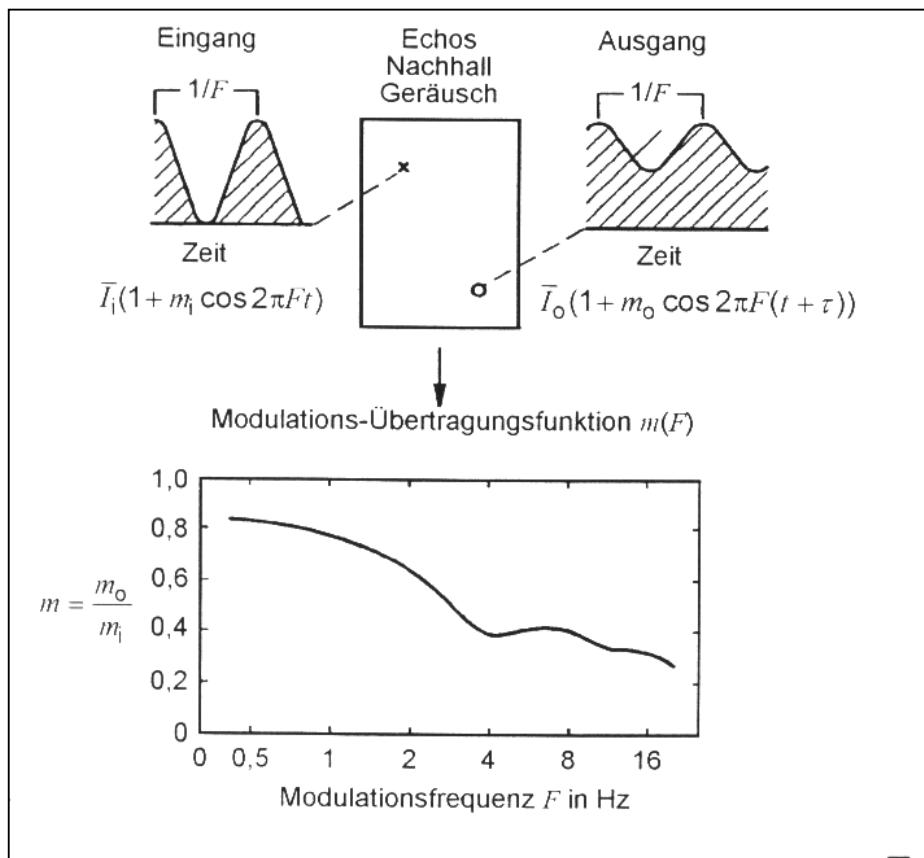
112 dB DSPL als  
Mittelwert für die  
Oktavbänder von  
500 Hz bis 4 kHz

## Horn-Cluster:

103 dB DSPL als  
Mittelwert für die  
Oktavbänder von  
500 Hz bis 4 kHz

Nicht näher definierter zu erwartender Störpegel: 95 dBA

## Berechnung der Sprachverständlichkeit über die MTF



## STI Werte und deren Einstufung

- STI berücksichtigt:
  - Nachhall
  - Störgeräusche
  - Signalpegel
  - Verdeckung
  - Hörschwelle
  - Echos
  - Frequenzgang

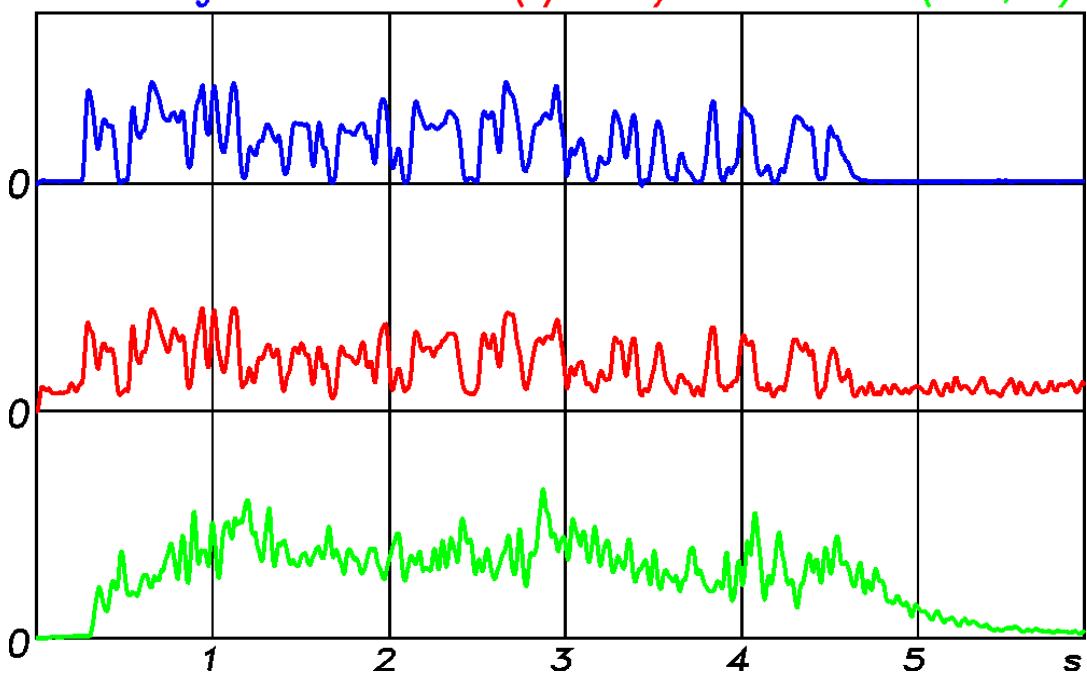
- Die einzelnen Einflussgrößen finden sich im STI mehr oder weniger gut wieder

- Ergebnis:
  - Ein Einzahlparameter
  - Bereich 0 bis 1
  - Einfach zu messen
  - Einfach zu bewerten

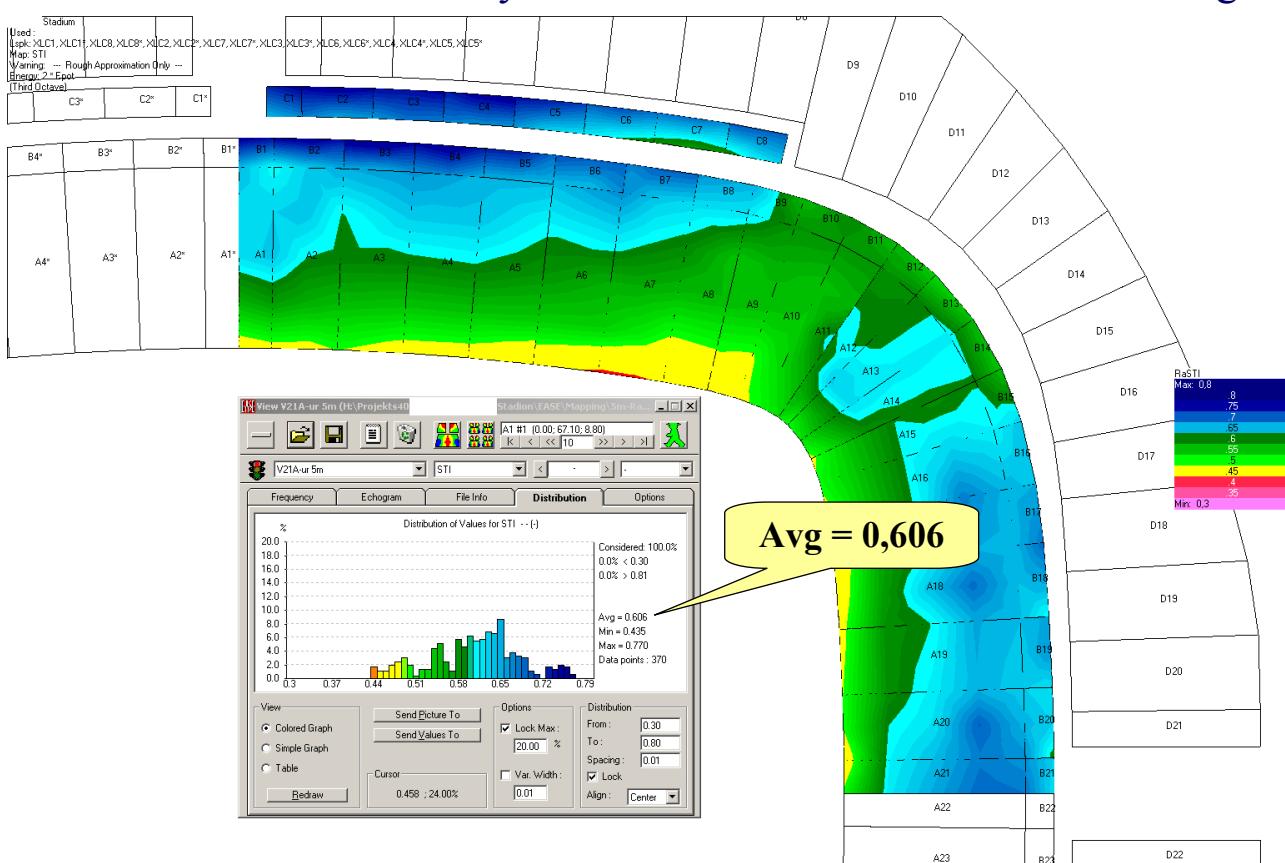
| STI-Wertebereiche | Einstufung nach EN 60268-16 |
|-------------------|-----------------------------|
| 0...0,3           | schlecht                    |
| 0,3..0,45         | schwach                     |
| 0,45..0,6         | angemessen                  |
| 0,6..0,75         | gut               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

# Verlust der Modulationstiefe durch Störgeräusche und/oder Nachhall

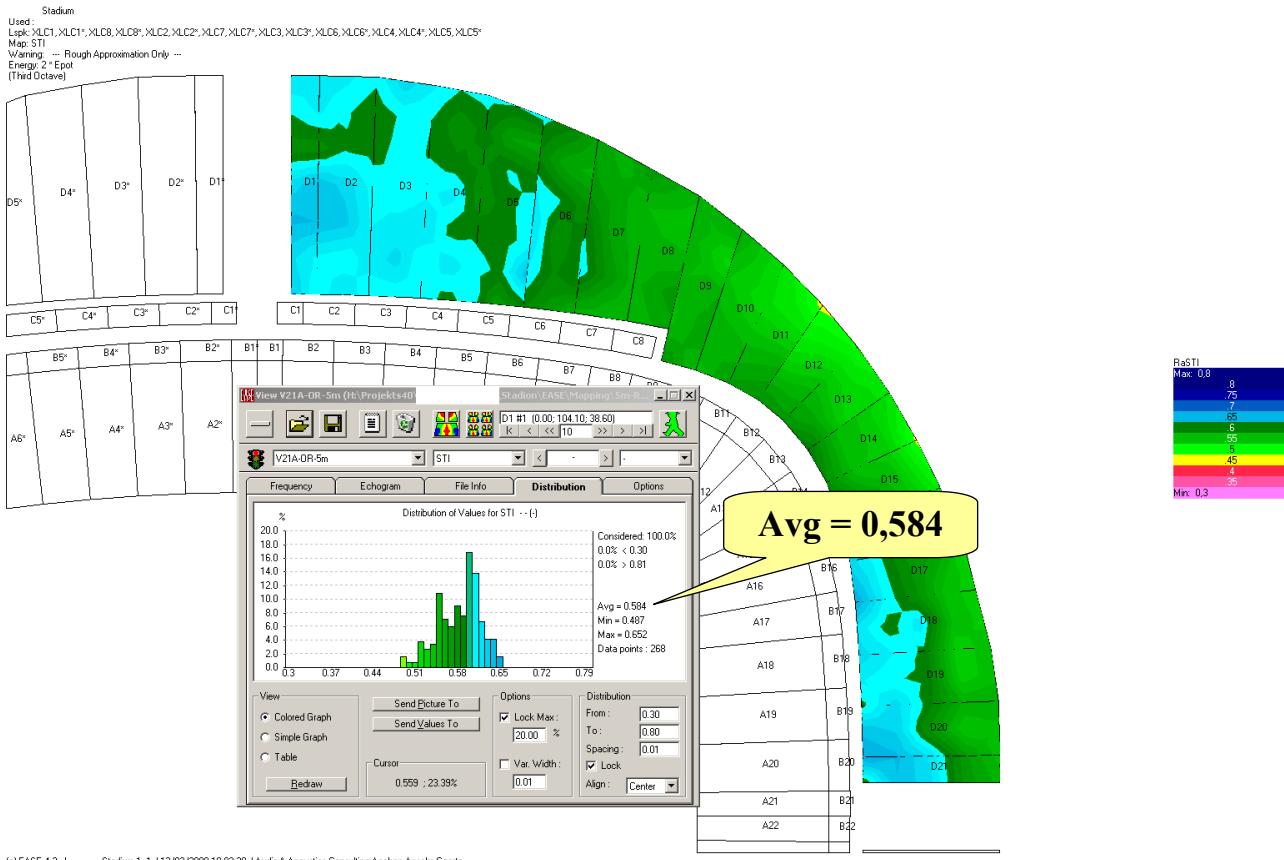
Ch0: HK org. Ch1: HK mit Noise (S/N 6dB) Ch2 HK mit RIA (RT 3, 4s)



## STI Werte mit Line-Arrays und 100% Publikum für den Unterrang



# STI Werte mit Line-Arrays und 100% Publikum für den Oberrang



A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

29

## Bewertung des STI

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

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

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

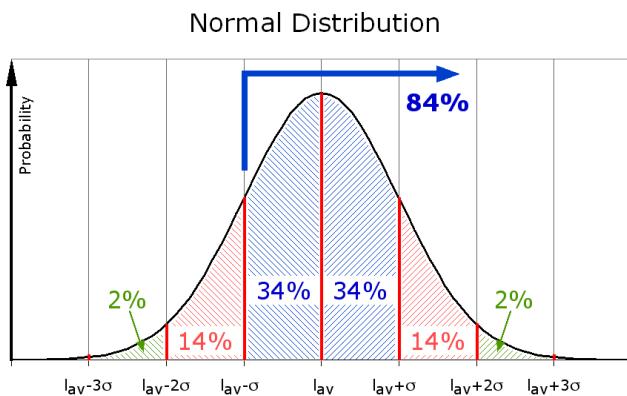
30

# Berechnung des Mindestwert nach EN 60849

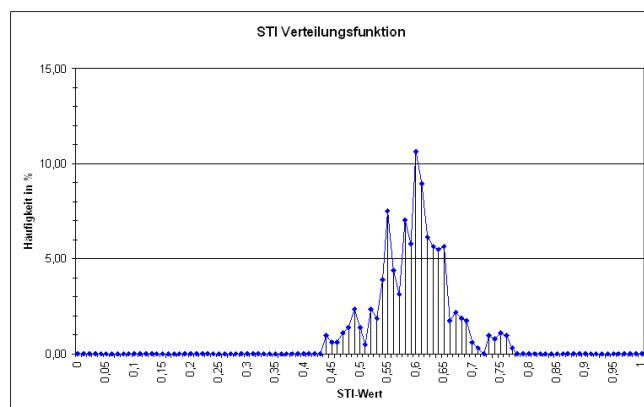
- Messpunkte in einem angemessenen Raster (typisch: 6 x 6 m)
- Arithmetischer Mittelwert – Standardabweichung  $\geq 0,5$
- $I_{av} - \sigma \geq 0,5$

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

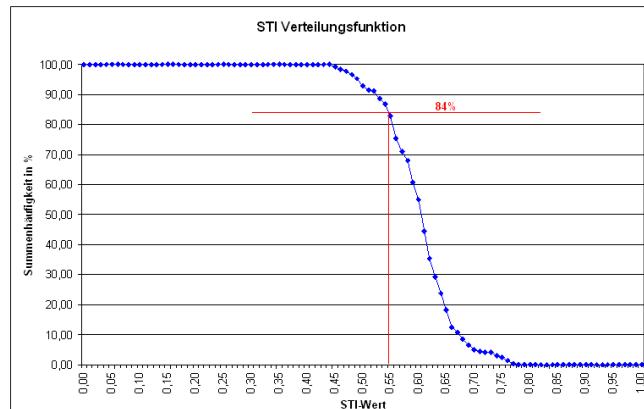
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{(n-1)}}$$



## STI Verteilungsfunktionen für UR und OR



- STI Werte für die Version Line-Array mit 100% Publikum:
  - MW = 0,597
  - STABW = 0,062
  - MW-STABW = 0,535



- STI Werte für die Version Horn-Cluster mit 100% Publikum:
  - MW = 0,594
  - STABW = 0,059
  - MW-STABW = 0,535

## Für welche Besetzungsdichte muß der Wert eingehalten werden ?

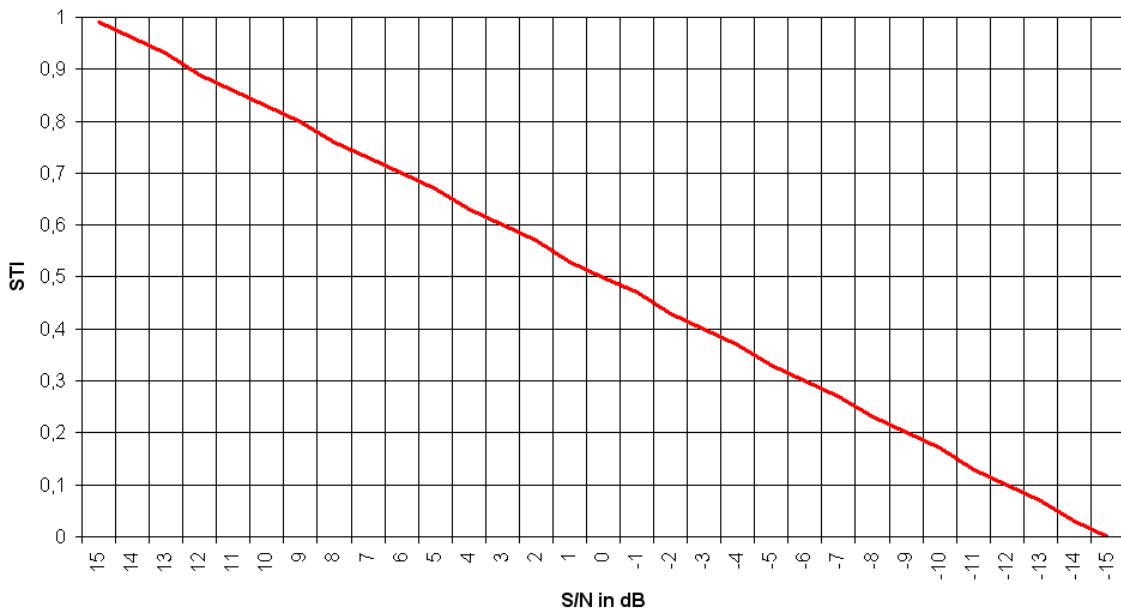
- Simulierter MW-STABW für die Line-Array Version
  - 100% Besetzung
    - 0,535 ok
  - 60% Besetzung
    - 0,504 ok
  - ohne Publikum
    - **0,468 < 0,5**
- Simulierter MW-STABW für die Horn-Cluster Version
  - 100% Besetzung
    - 0,535 ok
  - ohne Publikum
    - **0,449 < 0,5**
- Nachträgliche bauliche Änderungen
  - Der obere Teil des Dachspaltes ( $4125\text{m}^2$ ) soll mit Glas verschlossen werden
    - bei 100% Besetzung
      - 0,513 ok
  - ... und die Positionen der Lautsprecher sollen geringfügig abgeändert werden (Hängepunkte am Catwalk)
    - bei 100% Besetzung
      - 0,500 ok

## Zwischenergebnisse

- Die gewünschte Bauform des Stadions mit geschlossenem anstatt offenem Luftspalt und Lautsprechern am Catwalk anstelle der akustisch optimalen Positionen erreicht bei 100% Besetzungsgrad einen STI als MW-STABW von:  
**0,500**
  - **Aber !!!!!!!**
  - Noch kein Signal/Noise berücksichtigt
  - Noch keine Maskierung berücksichtigt
  - Ausgangswerte:
    - 95 dBA Noise als TSPL
    - bei Bedarf bis zu 112 dB DSPL mit Sprachsignal
- Pegelreserven sind genug vorhanden

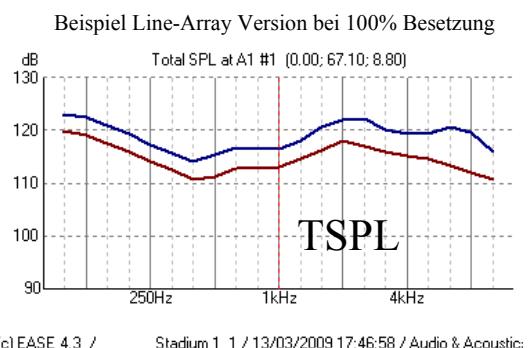
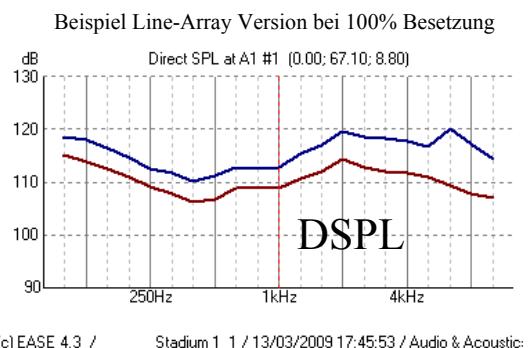
# Auswirkung von Signal- und Störpegel

STI in ausschließlicher Abhängigkeit vom S/N bei 65 dBA Signalpegel

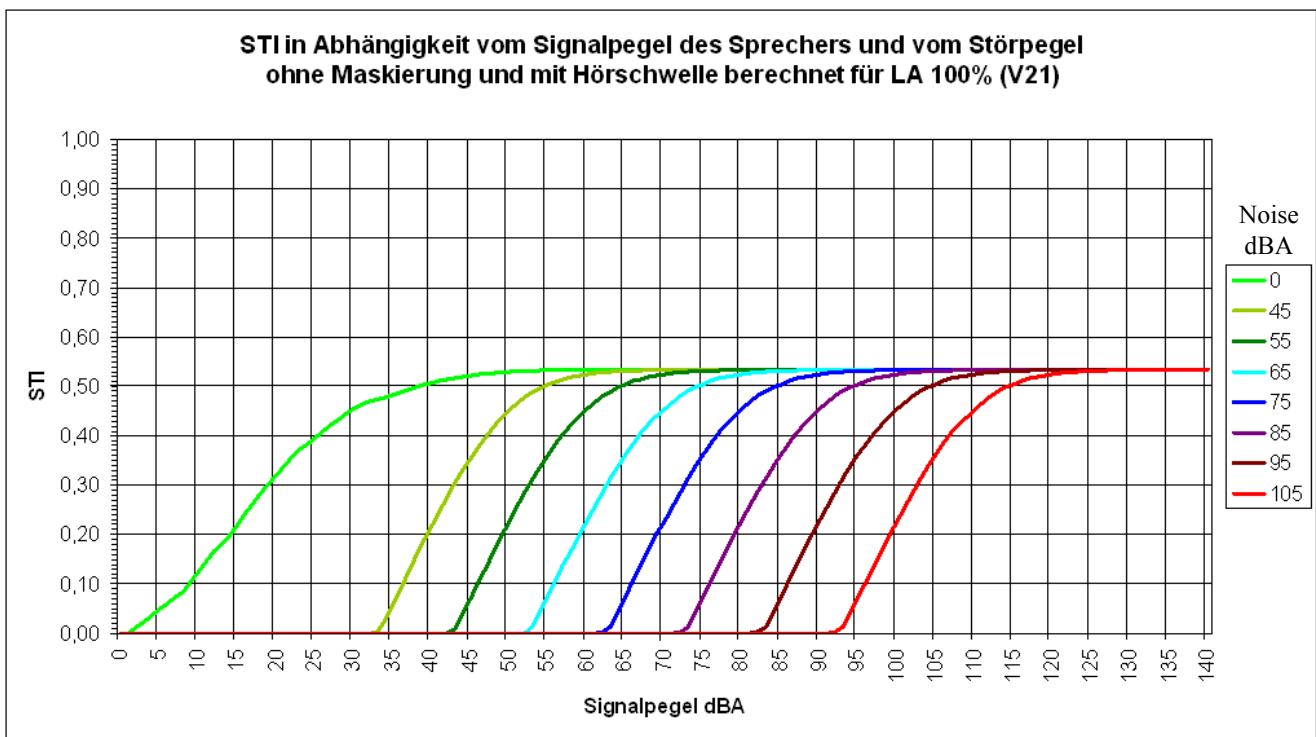


## Bestimmung von Stör- und Nutzsignalpegel

- Störpegel: 95 dBA
  - Als Gesamtschallpegel (TSPL)
  - Keine spektrale Bewertung angegeben
  - Vereinfachende Annahme: Verteilung ähnlich der menschlichen Stimme
- Nutzsignalpegel liegt vor als:
  - Direktschallpegel (DSPL) und
  - Gesamtschallpegel (TSPL)
  - Hier TSPL +3...6 dB gegenüber DSPL durch das Diffusfeld im Raum
  - Mit spektraler Verteilung in Terz- und Oktavbändern
- Wunsch: S/N > 10...15 dB

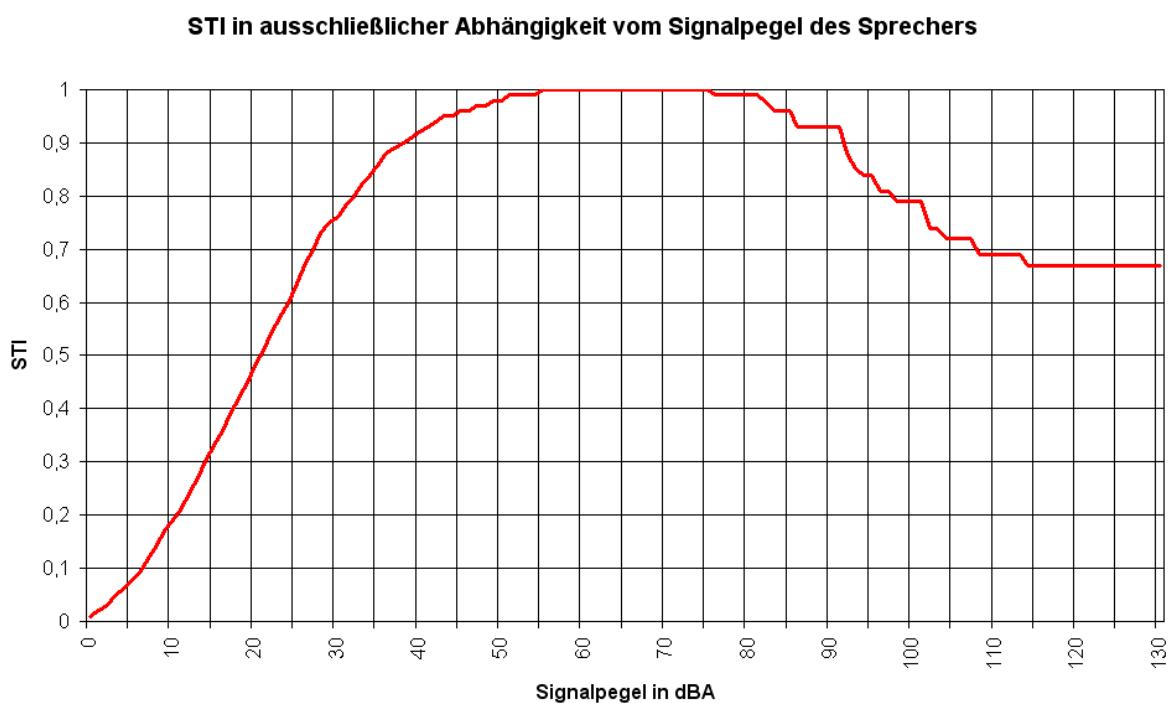


# Nur S/N angewandt auf das Beispielstadion

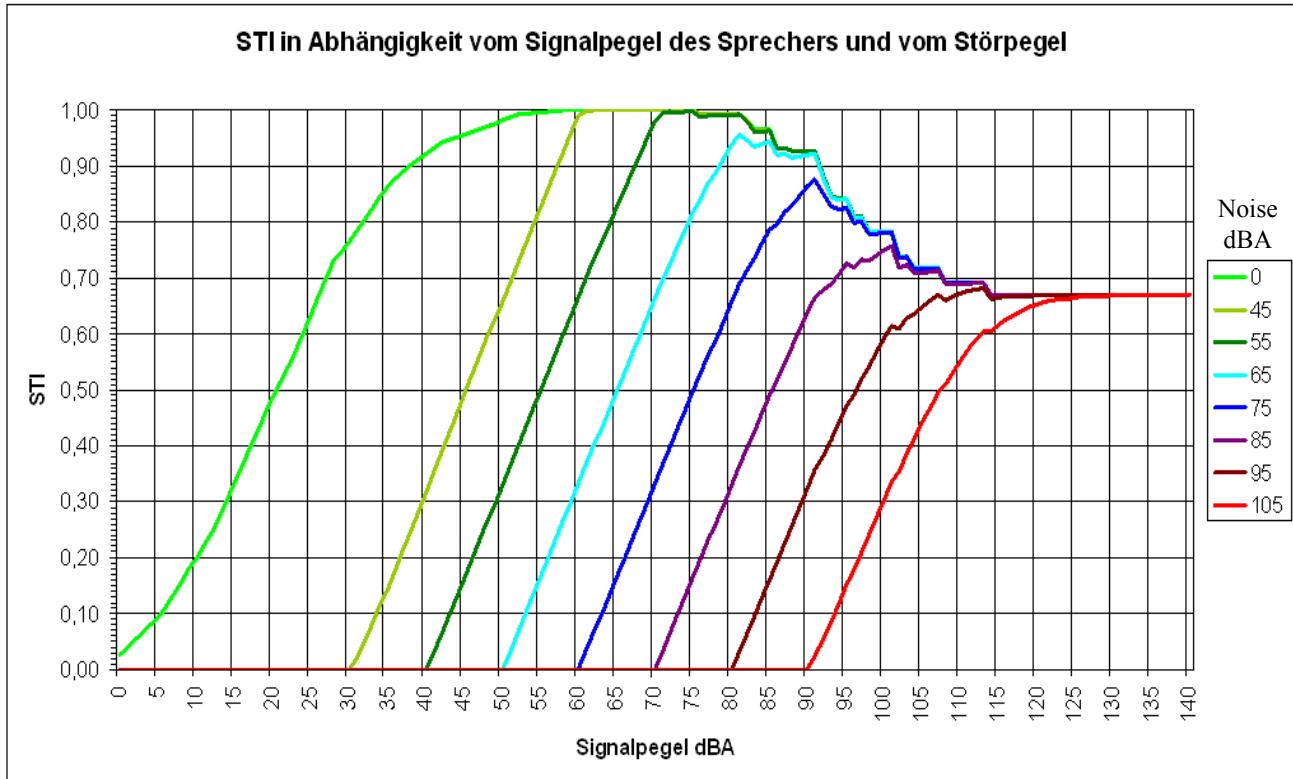


Mit nur hinreichend viel Signalpegel wäre zu erreichen,  
dass alle bisher berechneten Werte Bestand haben !

## Auswirkung von Verdeckung und Hörschwelle



# Verdeckung und Hörschwelle im Zusammenhang mit dem Signal zu Störpegel (S/N)

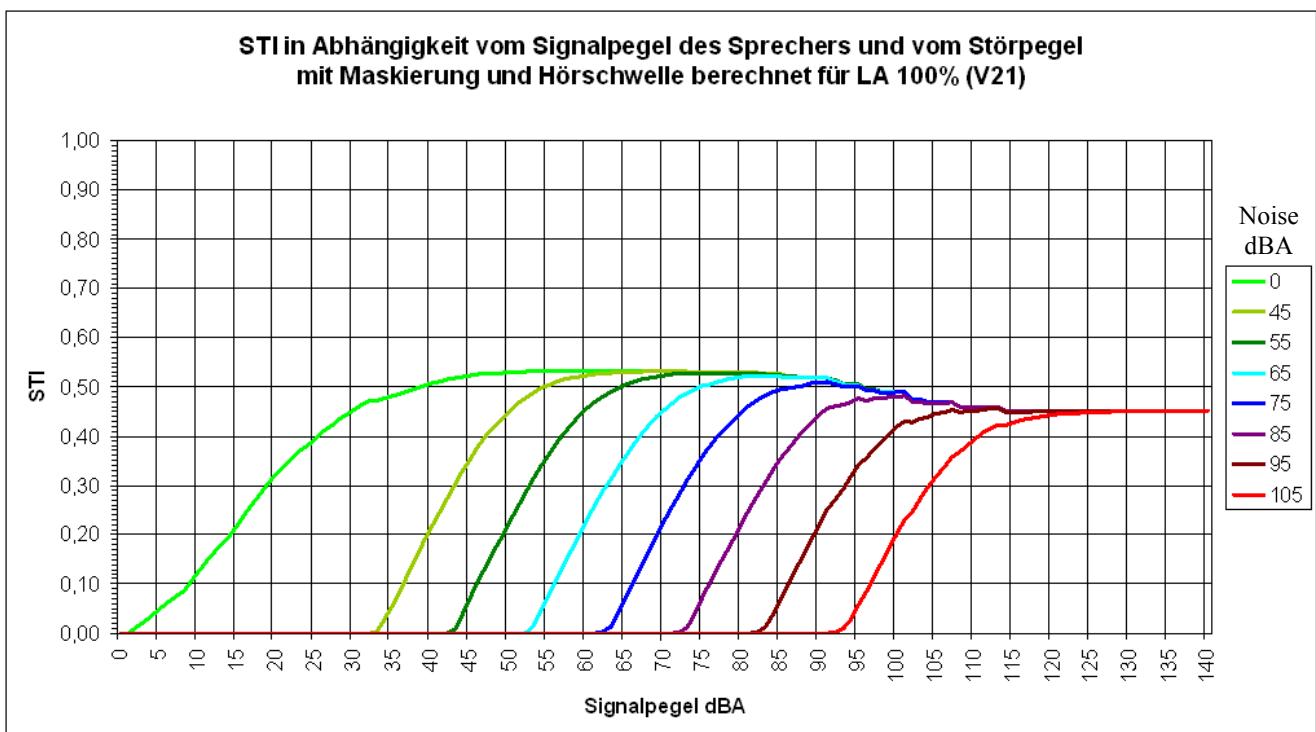


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

39

## S/N und Maskierung angewandt auf das Beispielstadion



Mit Berücksichtigung der Maskierung gibt es fast keine Möglichkeit mehr in einem heute üblichen Stadion den Grenzwert 0,5 bei 95 dBA Störpegel noch einzuhalten !

A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

40

# Normen über Sprachverständlichkeit

datierter  
Verweis



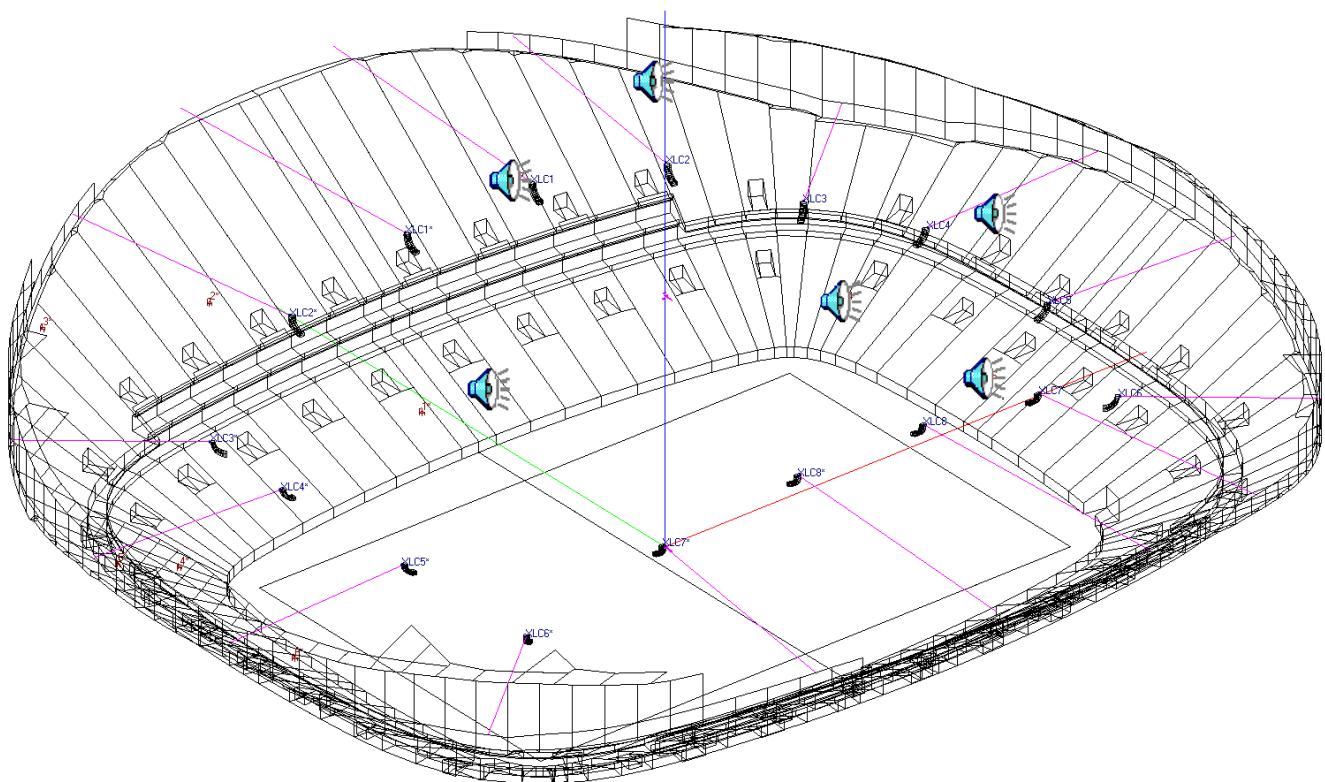
- **DIN EN 60849 (VDE 0828)**, Ausgabe:1999-05  
Elektroakustische Notfallwarnsysteme (IEC 60849:1998); Deutsche Fassung EN 60849:1998
- **DIN EN 60268-16, Ausgabe: 1998**  
Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (ohne Berücksichtigung des Verdeckungseffektes)

undaterierter  
Verweis

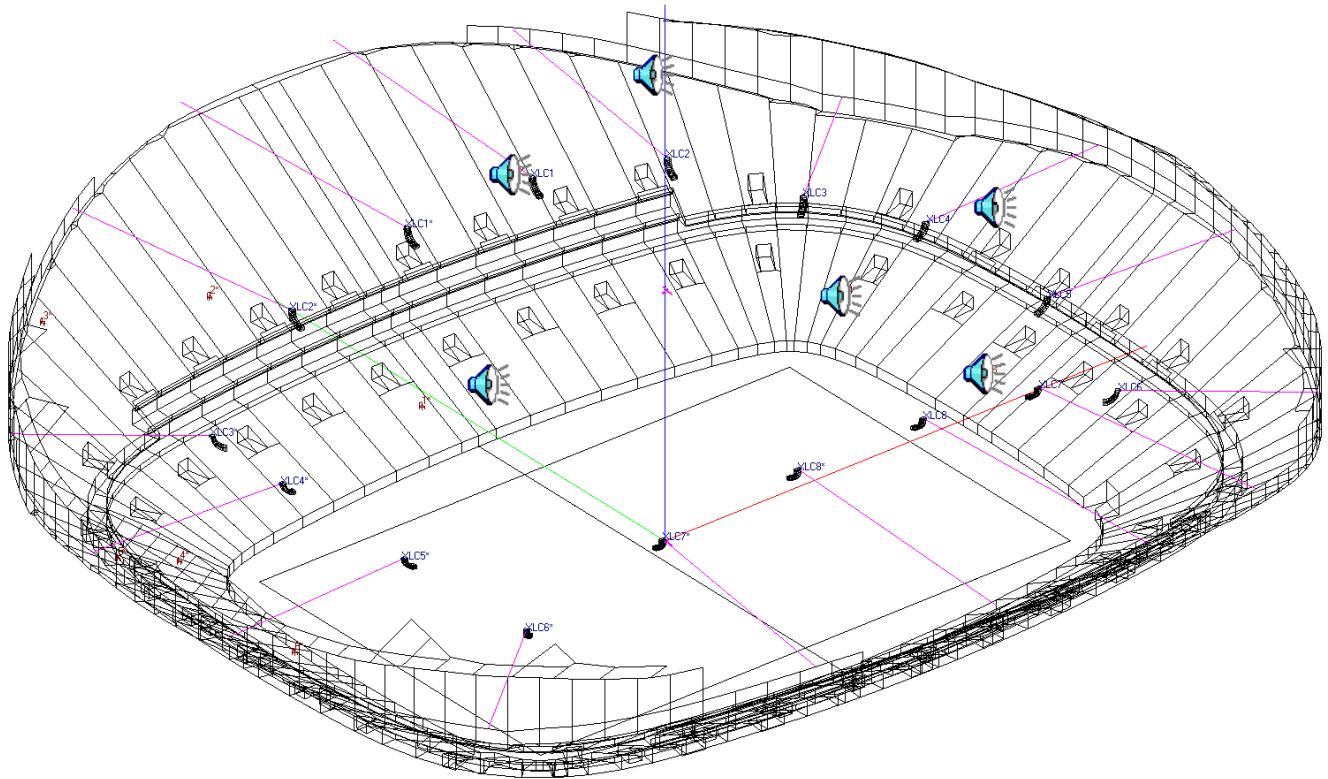


- **DIN VDE 0833-4, VDE 833-4: 2007-09**  
Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall - Teil 4: Festlegungen für Anlagen zur automatischen Sprachalarmierung im Brandfall
- **DIN EN 60268-16, Ausgabe: 2004-01**  
Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2003); Deutsche Fassung EN 60268-16:2004 (mit Berücksichtigung des Verdeckungseffektes)

## Auralisation mit Line-Arrays ohne Publikum (v11)



# Auralisation mit Line-Arrays und 100% Publikum (v21)

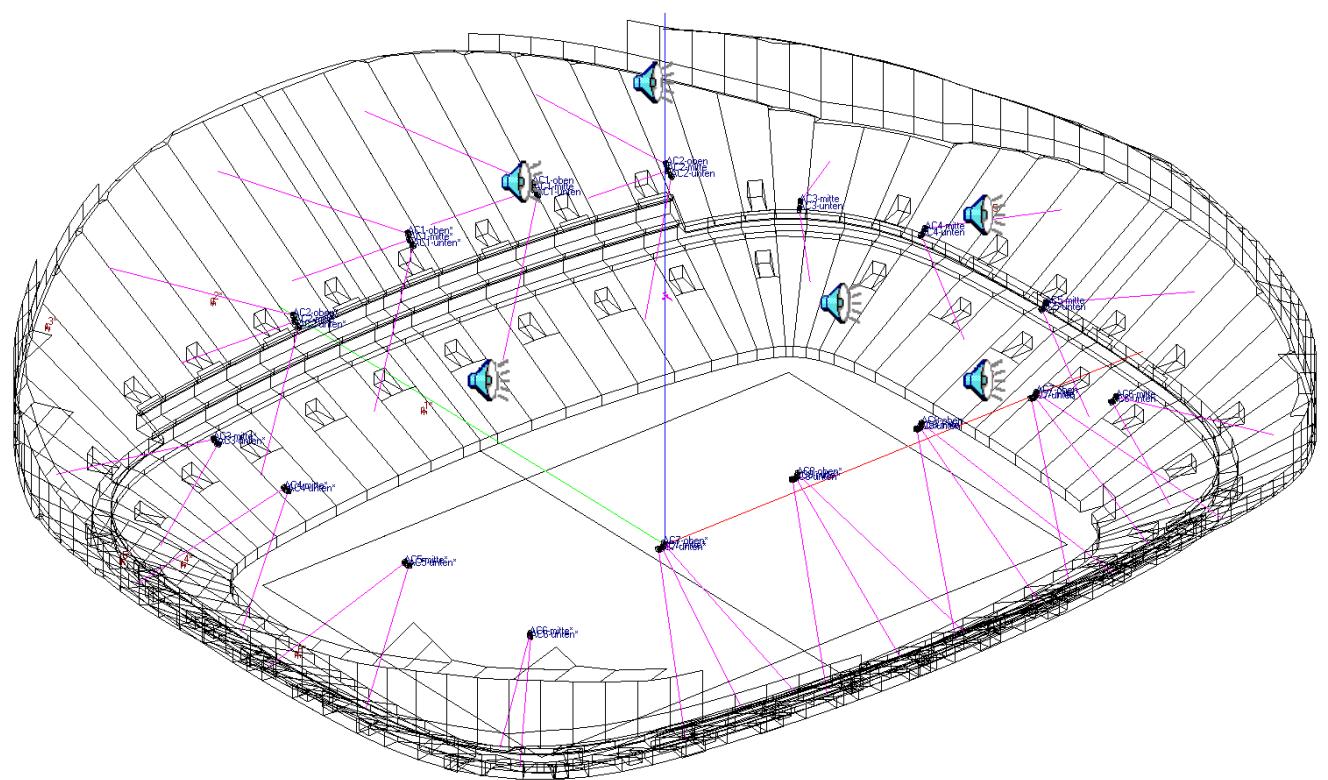


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

43

# Auralisation mit Horn-Cluster ohne Publikum (v12)

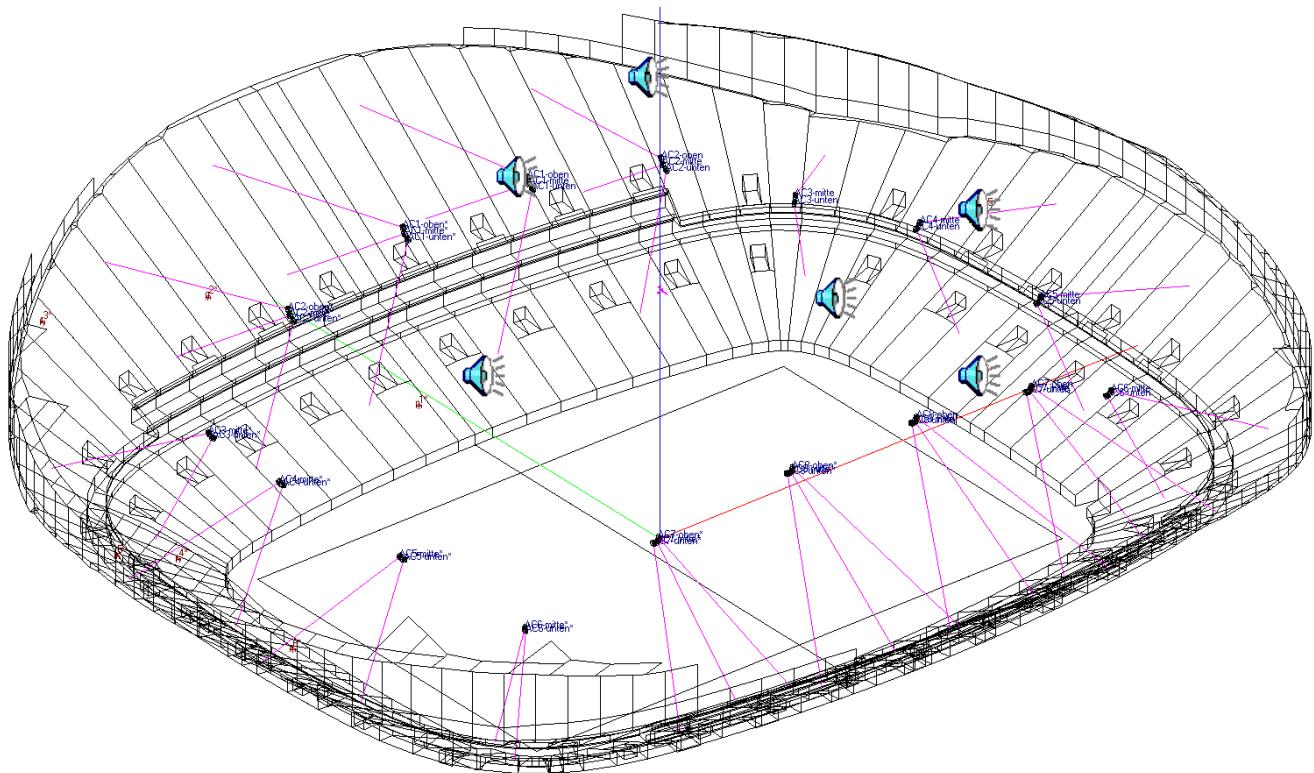


A.Goertz, A.Schmitz

Prolight+Sound Media Systems Congress 2009

44

# Auralisation mit Horn-Cluster mit 100% Publikum (V22)



## Fazit

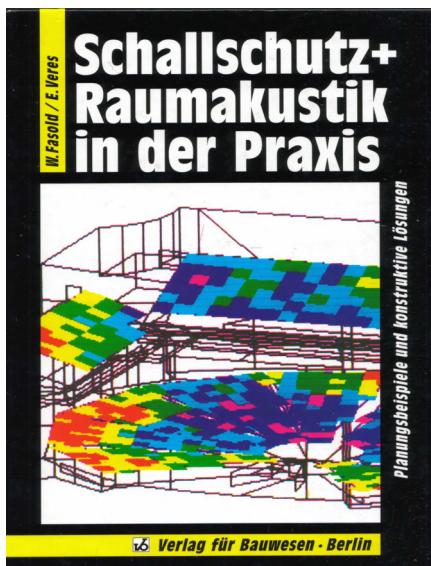
- Planung
  - Raumakustik beachten und von vorne herein einplanen
  - Sorgfältige Auswahl der Lautsprecher mit einem Schwerpunkt auf das erforderliche Richtverhalten
- Simulationen
  - Das Modell möglichst gut an die realen akustischen Verhältnisse anpassen (nicht „schön“ rechnen)
  - Nur hoch aufgelöste Lautsprecherdaten incl. Phaseninformationen verwenden
  - Hinreichende Länge und Auflösung der Simulation
  - Hinreichend dichtes Rasternetz verwenden
- Auswertung der Simulationen für die Sprachverständlichkeit
  - Mittelwert und Standardabweichung berechnen
  - Signal/Noise beachten
  - Bei Bedarf Maskierung beachten
  - Oben genannte Schritte je nach Simulationssoftware extern ausführen
- Aktuelle Normen
  - Es müssen klare Vorgaben für den Störpegel und das Störspektrum gegeben werden
  - Es muß eine Vorgabe geben für welchen Besetzungsgrad die Werte zu erfüllen sind
  - Die Norm ist bei mehr als 60% Besetzung, 95 dBA Störpegel ohne Berücksichtigung der Maskierung knapp zu erfüllen
  - Unter Berücksichtigung der Maskierung jedoch in der Regel nicht mehr

# Literatur zum Thema

Viele der technischen Abbildungen sind den folgenden Büchern entnommen:

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

S. Weinzierl.  
Handbuch der Audiotechnik  
Springer Verlag



## Paper Download

[www.anselmgoertz.de](http://www.anselmgoertz.de)

Manuskript zu diesem Vortrag mit Text und  
Grafiken als PDF File ab dem 31.März 2009