



# Erneuerung der Lautsprecheranlage für den Krönungssaal des Aachener Rathauses

**Anselm Goertz , Alfred Schmitz**

28.9.2012

## Übersicht

---

### Planung und Simulation der Lautsprecheranlage für den Krönungssaal

#### Grundlagen

1. Anforderungen, Zielsetzungen und akustische Randbedingungen
2. Sprachverständlichkeit und STI Werte
3. Normen und andere Vorgaben
4. Planung der Lautsprecheranlagen

#### Konzepte und Simulationen

5. Modellbildung
6. Lautsprecherkonzept
7. Simulationen
8. Ergebnisse
  
9. Fazit

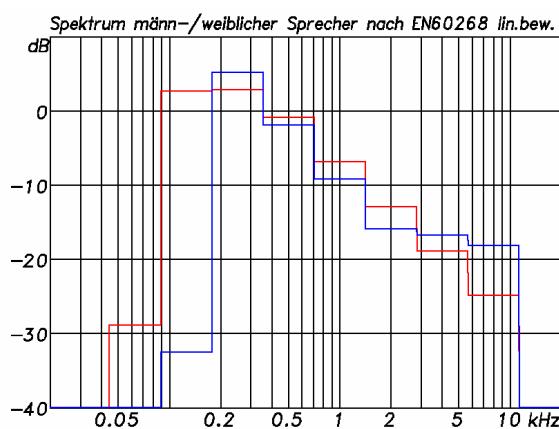
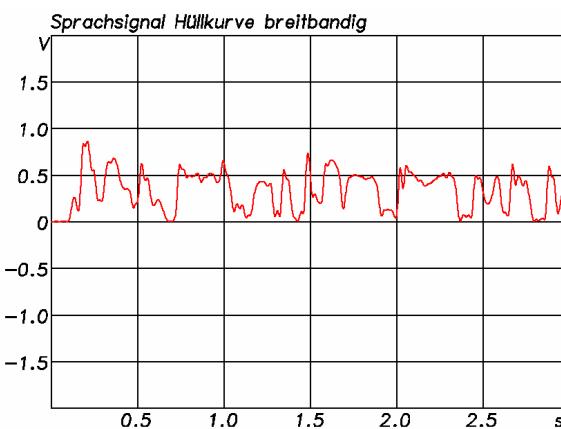
# Die Beschallungsanlage

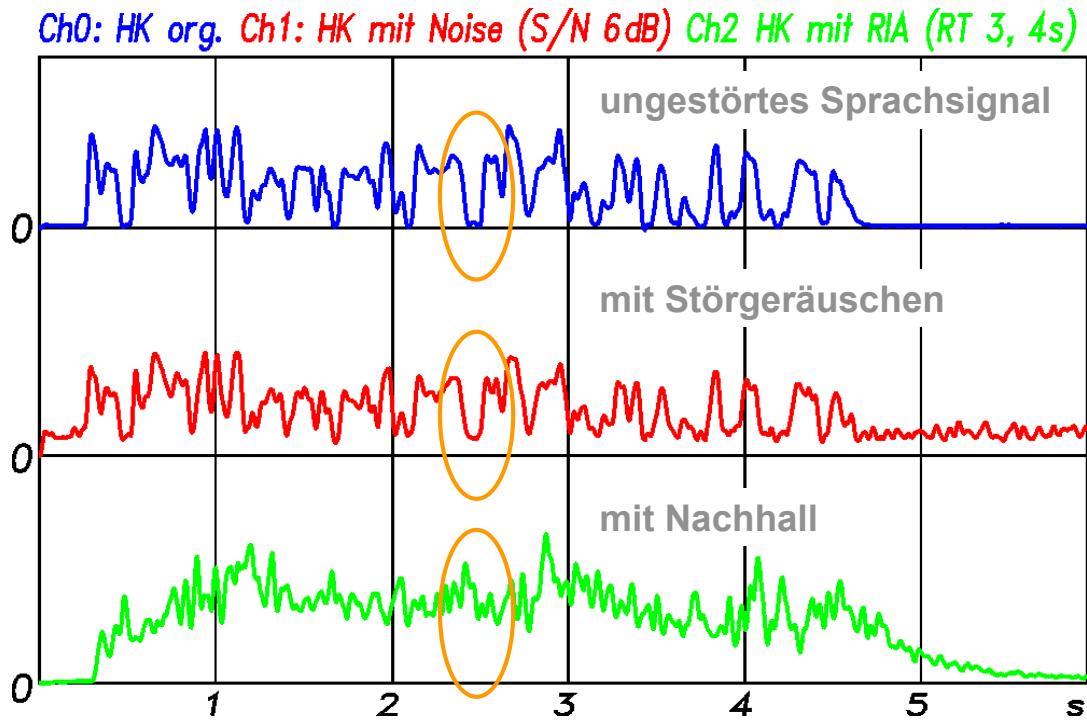
- Ansprachen, Festveranstaltungen, Musik, ....
- Informationen, Warnungen etc. für die anwesenden Personen
- Gemeinsames Ziel: Eine hinreichende Sprachverständlichkeit
- Störende Einflüsse:
  - Störgeräusche (Signal/Noise respektive Störabstand) 
  - Nachhall (Raumakustik) 
  - zu niedriger Pegel (Hörschwelle) 
  - zu hoher Pegel (Maskierung) 

## Wann ist Sprache gut verständlich?

### ■ Sprache ist ein moduliertes Signal

- ⇒ Der Informationsgehalt wird großteils über die Modulation transportiert
- ⇒ Nachhall, Störgeräusche und Bandbegrenzungen führen zum Verlust von Modulationstiefe im Signal und somit zum Informationsverlust, d.h. zur einer reduzierten Sprachverständlichkeit
- ⇒ Modulationsfrequenzen bis 20 Hz
- ⇒ Spektrale Zusammensetzung in den 7 Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz





## Problem Nr. 1 Nachhall

- Nachhall entsteht primär durch große Hallen mit vielen schallharten Flächen (Glas, Beton, Steinzeug, Blech, ...)
- Im Krönungssaal je nach Bestuhlung und Besetzung bis zu 7s
- Entscheidend ist es, hier möglichst viel Direktschall aus den Lautsprechern zu den Zuhörern zu bringen und den Nachhall so wenig wie möglich anzuregen
- Lösungen:
  - wenige stark bündelnde Lautsprecher auf die Hörerflächen richten (guter Ansatz für große Hallen etc., da große freie Weglängen erforderlich sind)
  - viele kleine Lautsprecher so nahe wie möglich an die Zuhörer bringen (nur bei partieller Beschallung des Raumes sinnvoll)
  - Raumakustische Maßnahmen wären der Königsweg, sind aber nur in den seltensten Fällen möglich.

## Problem Nr. 2 Störgeräusche

- Störgeräusche sind häufig sowohl zeitlich wie auch in der spektralen Zusammensetzung stark schwankend und damit nur schwer eindeutig zu definieren
- Anhaltspunkt: ... bis zu 85 dBA (Messung bei einer lauten Veranstaltung)
- Entscheidend ist nicht das Störgeräusch als solches, ...
- ... sondern das Verhältnis vom Sprachsignalpegel zum Störpegel
- Lösung: hinreichend laute Sprachwiedergabe, aber ...
  - ab einem gewissen Pegel wird die Verständlichkeit durch den Maskierungseffekt wieder schlechter
  - die ausgeprägte Fluktuation erfordert auf jeden Fall eine (automatische) Pegelanpassung, da die Anlage sonst zu 95% der Zeit viel zu laut wäre
  - der Aufwand für die Beschallungsanlage sollte in einem angemessenen Verhältnis bleiben



## Akustische Randbedingungen im Rathaus

- Lange Nachhallzeiten im Krönungssaal ( 2 – 7 s)
  - Zum Vergleich
    - Kirchen 2 – 10 s
    - Straßentunnel 10 – 30 s
    - Stadien 2 – 6 s
- hohe Anforderungen an das Richtverhalten der Lautsprecher
- Störpegel (max. 85 dBA) bei einer lauten Veranstaltung im Krönungssaal
  - Zum Vergleich
    - Kirchen <70 dBA ⇒ Signalpegel bei Sprache max. 80 dBA
    - Straßentunnel 95 dBA ⇒ Signalpegel bei Sprache min. 105 dBA
    - Sportstätten 95 dBA ⇒ Signalpegel bei Sprache min. 105 dBA
- Gehobene Anforderungen an den Maximalpegel
- ~~Handelt es sich zusätzlich um eine SAA dann kommt hinzu:~~
  - Mindestwerte für die Sprachverständlichkeit im Normal- und Havariebetrieb nach VDE 0833-4
  - Überwachung der Anlage, Ausfallsicherheit, etc....
  - Komponenten nach EN54-...

Wichtigste  
Randbedingung



# 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

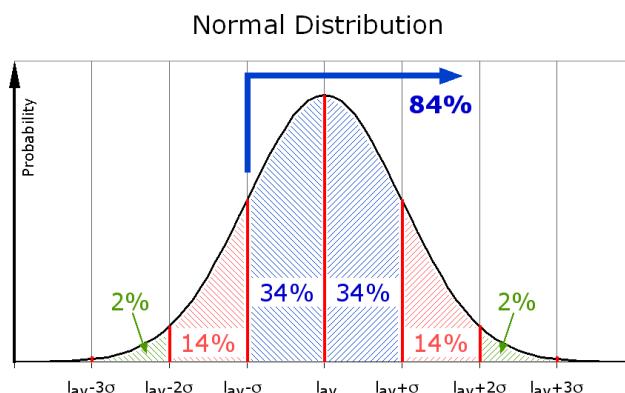
- Arithmetischer Mittelwert – Standardabweichung  $\geq 0,5$

- $I_{av} - \sigma \geq 0,5$

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

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

- Messraster: 6 m



# STI Anforderung aus der EN 60268-16 von 2011

## Examples of STI qualification bands and typical applications

The information in the Table G.1 is presented as an example of usage.

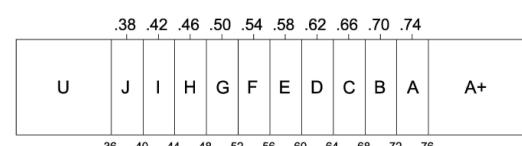
Table G.1 – Examples between STI qualification bands and typical applications

Category	Nominal STI value	Type of message information	Examples of typical uses (for natural or reproduced voice)	Comment
A+	>0,76		Recording studios	Excellent intelligibility but rarely achievable in most environments
A	0,74	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, parliaments, courts, Assistive Hearing Systems (AHS)	High speech intelligibility
B	0,7	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts	High speech intelligibility
C	0,66	Complex messages, unfamiliar words	Lecture theatres, classrooms, concert halls	Good speech intelligibility
D	0,62	Complex messages, familiar words	Concert halls, modern churches	High quality PA systems
E	0,58	Complex messages, familiar context	PA systems in shopping malls, public buildings offices, VA systems, cathedrals	Good quality PA systems
F	0,54	Complex messages, familiar context	Shopping malls, public buildings offices, VA systems	Target value for VA systems
G	0,5	Complex messages, familiar context	VA and PA systems in difficult acoustic environments	Normal lower limit for VA systems
H	0,46	Simple messages, familiar words	VA and PA systems in very difficult spaces	
I	0,42	Simple messages, familiar context	VA and PA systems in very difficult spaces	
J	0,38		Not suitable for PA systems	
U	<0,36		Not suitable for PA systems	

NOTE 1 These values should be regarded as minimum target values.

NOTE 2 Perceived intelligibility relating to each category will also depend on the frequency response at each listening position.

NOTE 3 The STI values refer to measured values in sample listening positions or as required by specific application standards.



■ Anforderung detailliert nach Nutzung und Räumlichkeit

■ die geforderten Werte sind als Mittelwerte zu verstehen

Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 11



## Zusammenhang des STI mit subjektiven Testmethoden

STI-Wert	CIS-Wert	Alcons in %	Einstufung EN 60268	Silbenverständlichkeit in %	Wortverständlichkeit in %	Satzverständlichkeit 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
<u>0,45...0,6</u>	<u>0,65...0,78</u>	17...8	angemessen	<u>61...85</u>	<u>68...88</u>	<u>93...98</u>
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

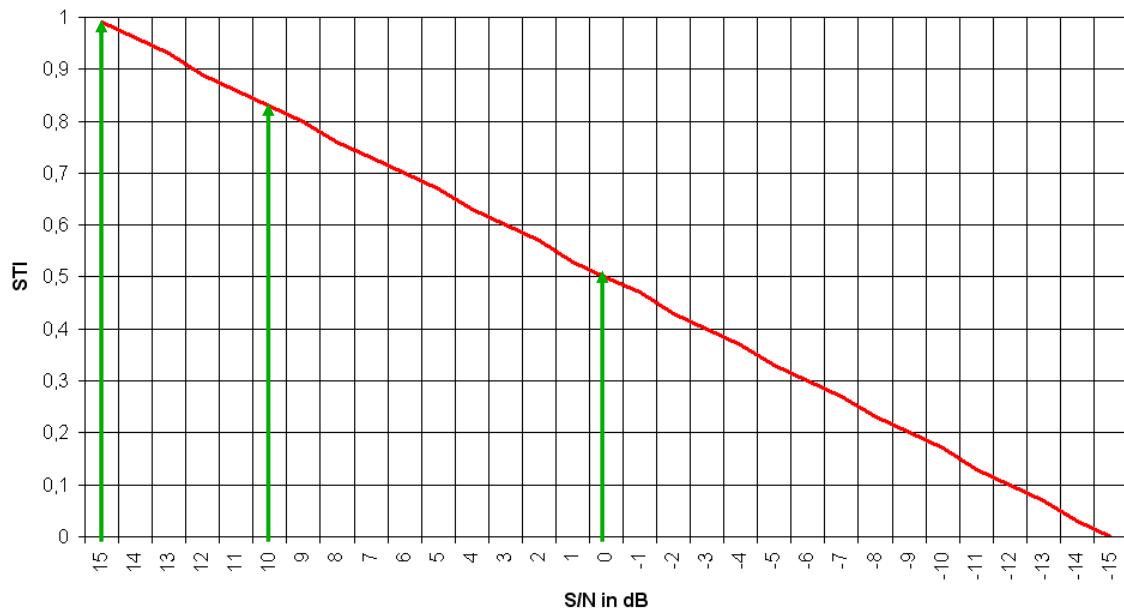
Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 12



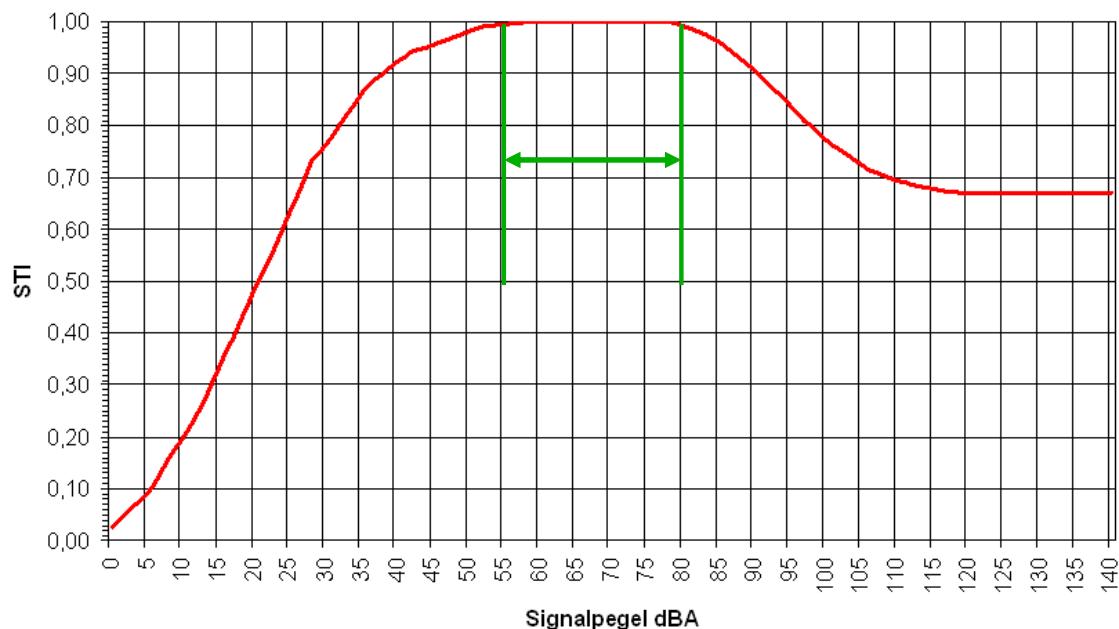
# Signal- und Störpegel beim STI

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



## Verdeckung und Hörschwelle beim STI

STI in Abhängigkeit vom Signalpegel des Sprechers und vom Störpegel  
(SNR / MSK / HTR optional)



# Wie plant man die Beschallungsanlage ?

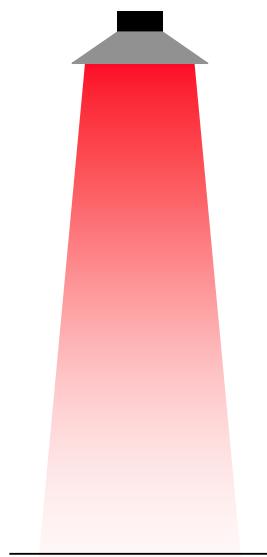
## ■ Ausgangssituation:

- Nachhallzeit in Oktav- oder Terzbändern
- Störpegel in Oktav- oder Terzbändern
- einzuhaltenden Normen
  - VDE 0833-4 ?
- weitere Randbedingungen
  - variable Einsatzmöglichkeiten (Sprache, Musik, ...)
  - Denkmalschutz
  - spätere Ein- oder Umbauten
  - Fernsteuerung und Überwachung
- weitere Fragen
  - Welche Lautsprecherpositionen sind möglich ?
  - Sind aktive Lautsprecher möglich ?
  - Wie sieht die Notstromversorgung aus ?



## Problem vieler Lautsprecher bei Nachhall

- Farbintensität = Lautstärke
- Kontrast zum Umfeld = Modulationstiefe = Sprachverständlichkeit



# Problem vieler Lautsprecher bei Nachhall

- Farbintensität = Lautstärke
- Kontrast zum Umfeld = Modulationstiefe = Sprachverständlichkeit



# Problem vieler Lautsprecher bei Nachhall

- Farbintensität = Lautstärke
- Kontrast zum Umfeld = Modulationstiefe = Sprachverständlichkeit



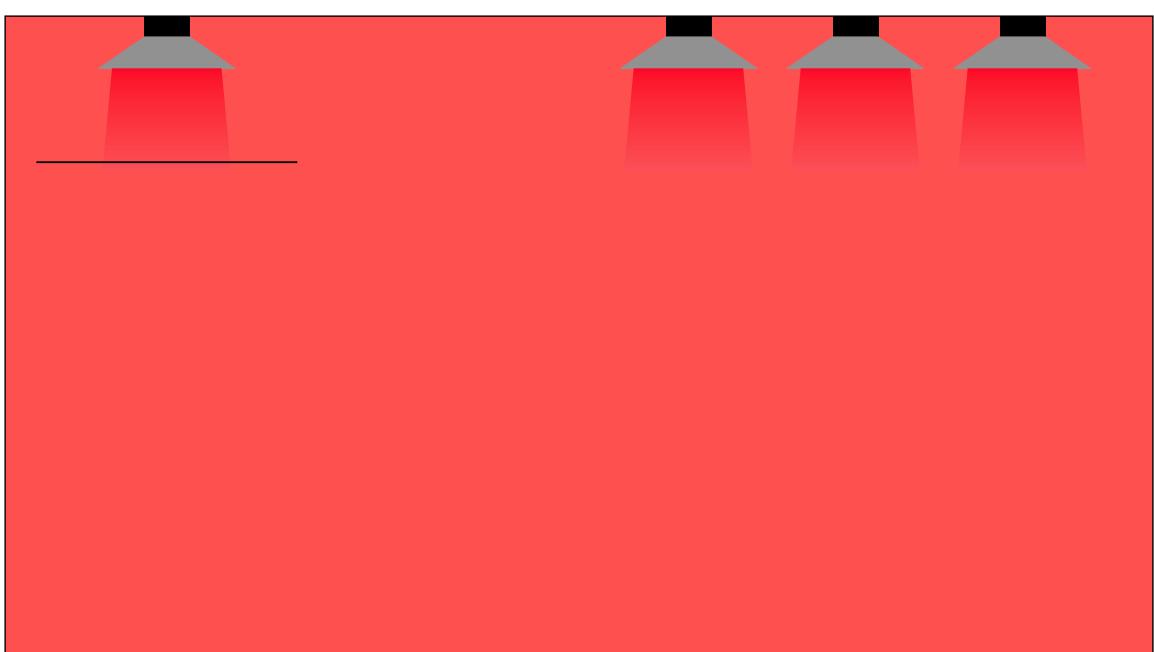
# Problem vieler Lautsprecher bei Nachhall

- Farbintensität = Lautstärke
- Kontrast zum Umfeld = Modulationstiefe = Sprachverständlichkeit



# Problem vieler Lautsprecher bei Nachhall

- Farbintensität = Lautstärke
- Kontrast zum Umfeld = Modulationstiefe = Sprachverständlichkeit

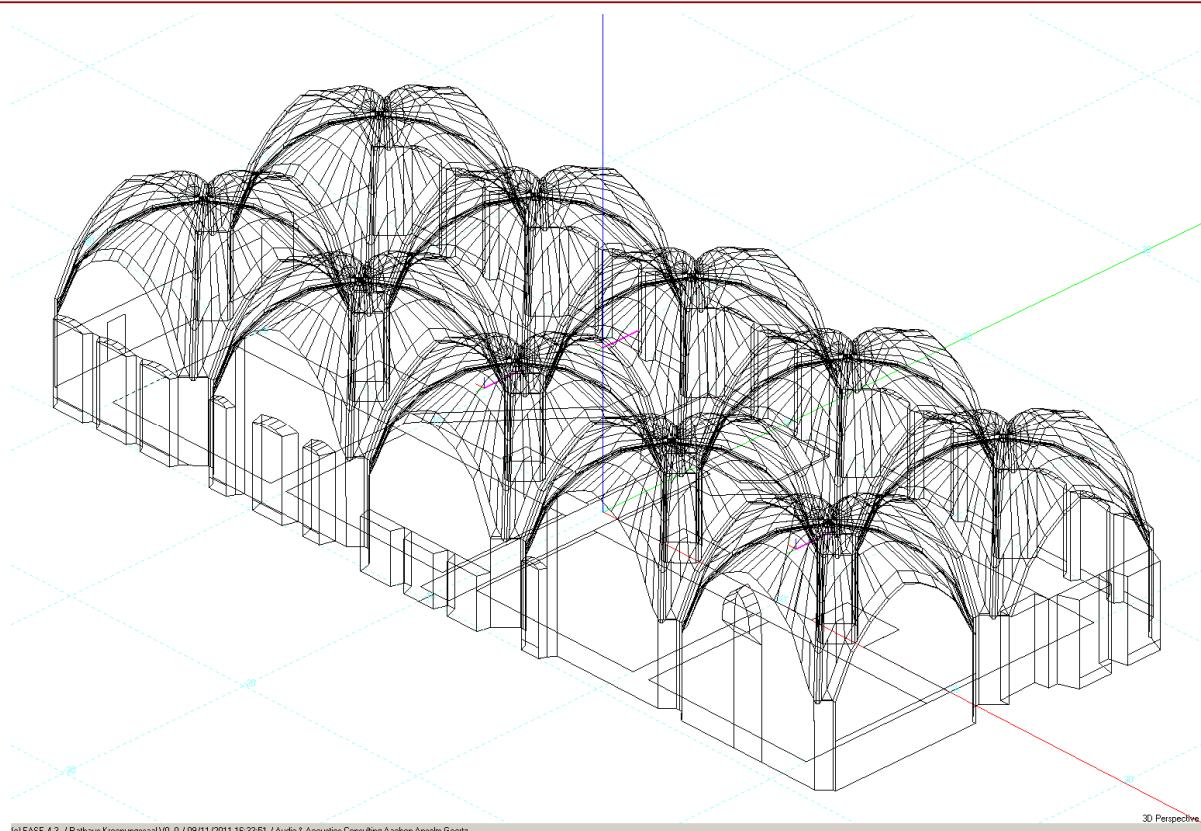


# Anforderungen an die Beschallung

- Hinreichende Sprachverständlichkeit min.  $STI_{MW-STABW} \geq 0,5$
- Ausreichender hoher Sprachsignalpegel  $S/N > 10$  dB
- Flexible Anpassung an den aktuellen Bedarf (Zonenbeschallung)
- Eignung für Musikübertragung (für die üblichen Veranstaltungen)
- Möglichst wenige Lautsprecher mit ausgeprägter Richtwirkung
- Unauffällige Lautsprecher
- Geringer Installationsaufwand
- Wenig Verkabelung



## Modellbildung

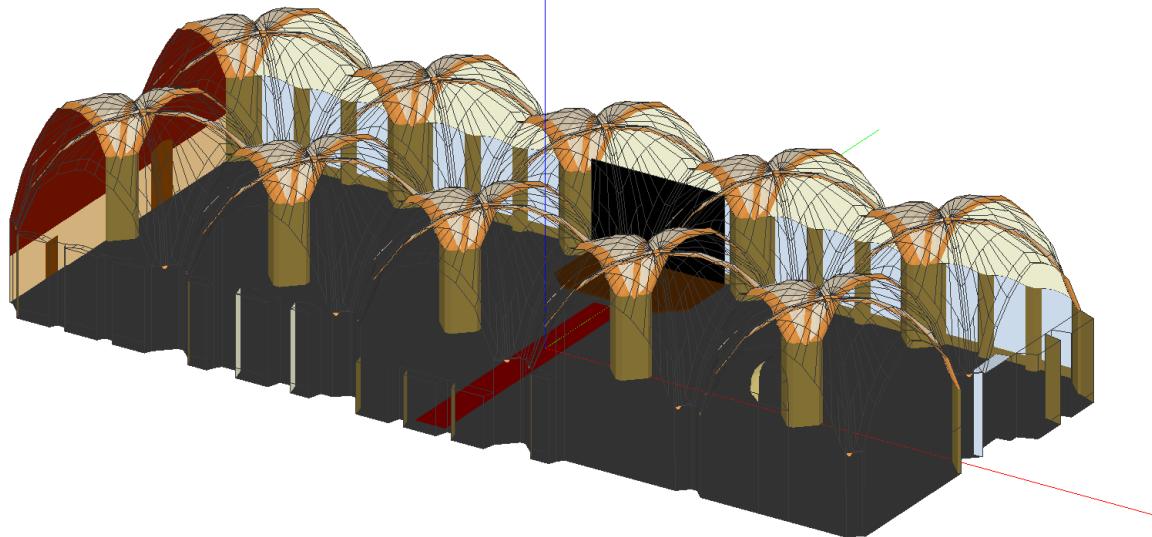


(c) EASE 4.3 / Rathaus Krönungssaal V0\_0 / 09/11/2011 15:33:51 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz



# Modellbildung

Ver:25° Hor:147°  
Project:ACRath-KS-V0\_0  
Dye: Material Colors  
Freq:1000 Hz



(c)EASE 4.3 / Rathaus Krönungssaal V0\_0 / 09/11/2011 16:36:28 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 23



# Modellbildung

Ver: 0° Hor:-110°  
H.Scope: 46° V.Scope: 34°  
View Point: Walker  
X = -19.91 m Y = -7.66 m Z = 1.80 m  
Project:ACRath-KS-V0\_0  
Dye: Material Colors  
Freq:1000 Hz



(c)EASE 4.3 / Rathaus Krönungssaal V0\_0 / 09/11/2011 16:53:41 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goetz

Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 24



# Modellbildung

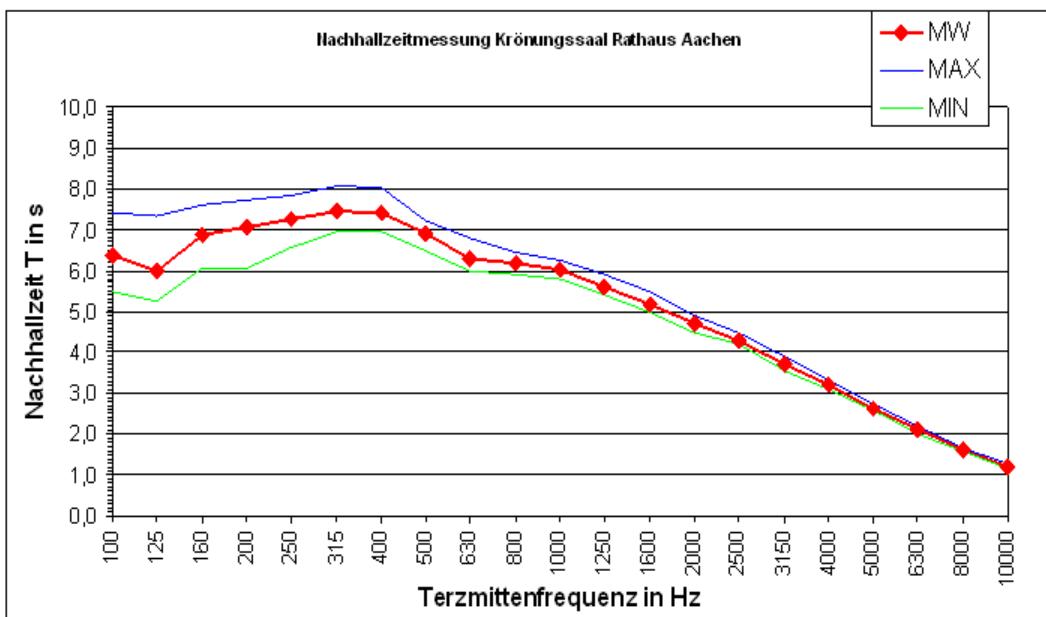


Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

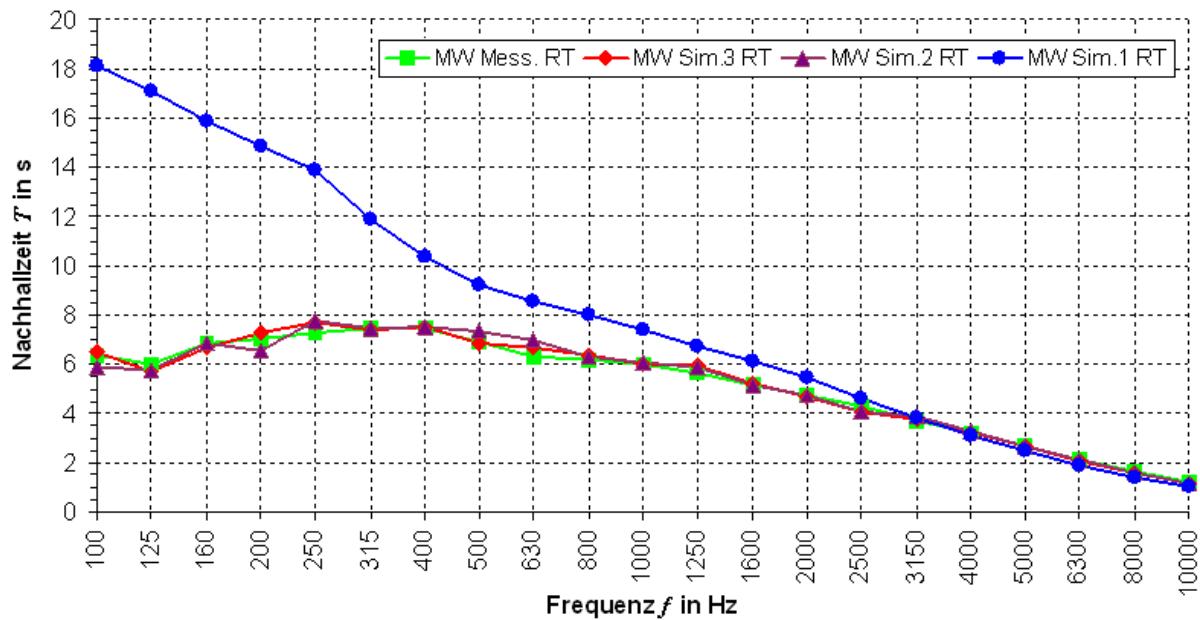
A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
*Folie Nr. 25*



## Nachhallzeitmessungen im leeren Saal

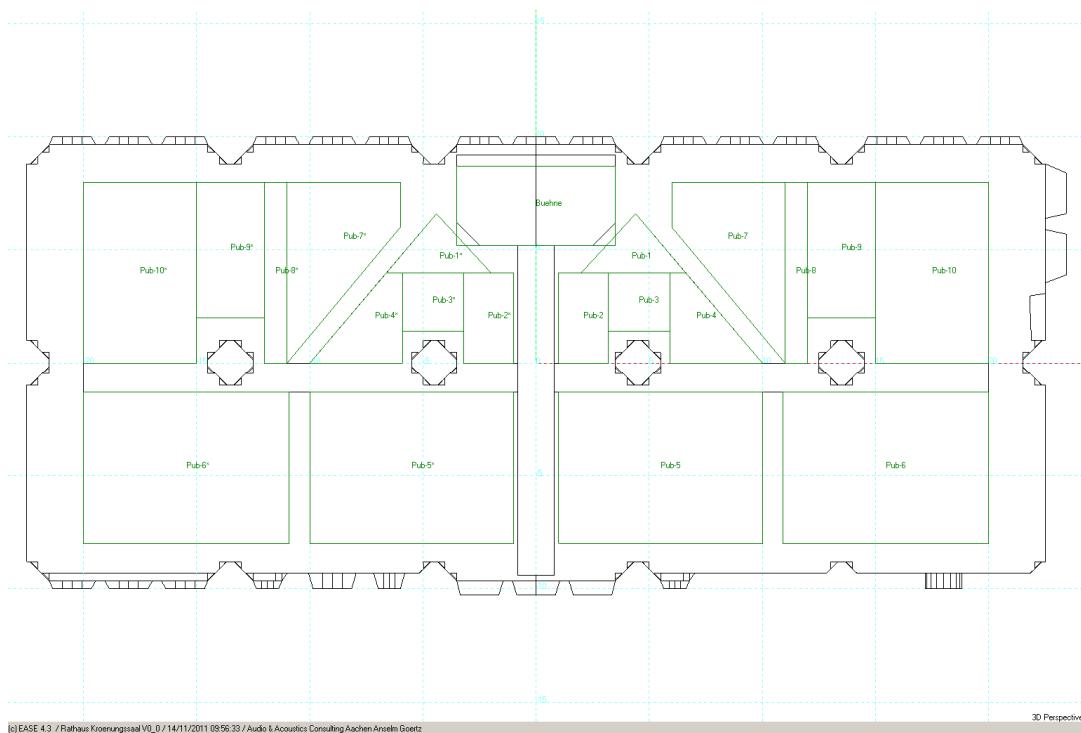


# Nachhallzeitanpassung des Modells



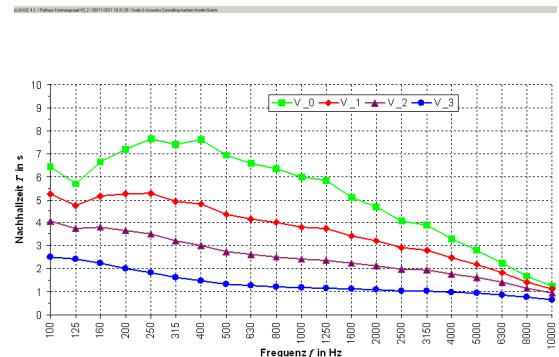
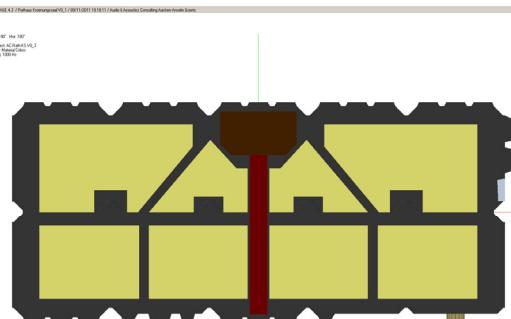
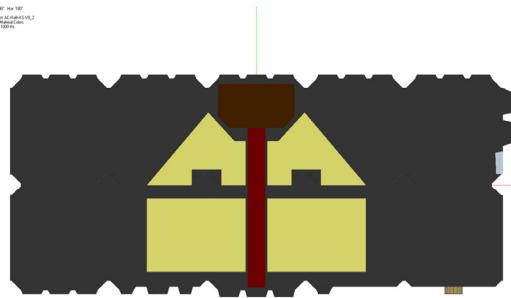
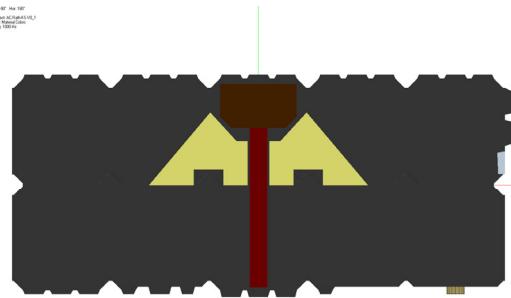
- nur nach Materialdaten
- 1. Iterationsschritt mit Aura (über eine simulierte Messung mit einer Punktquelle)
- 2. Iterationsschritt mit Aura

## Hörerflächen



- Exemplarische Aufteilung in einzelne Publikumsflächen

# Bestuhlungsvarianten

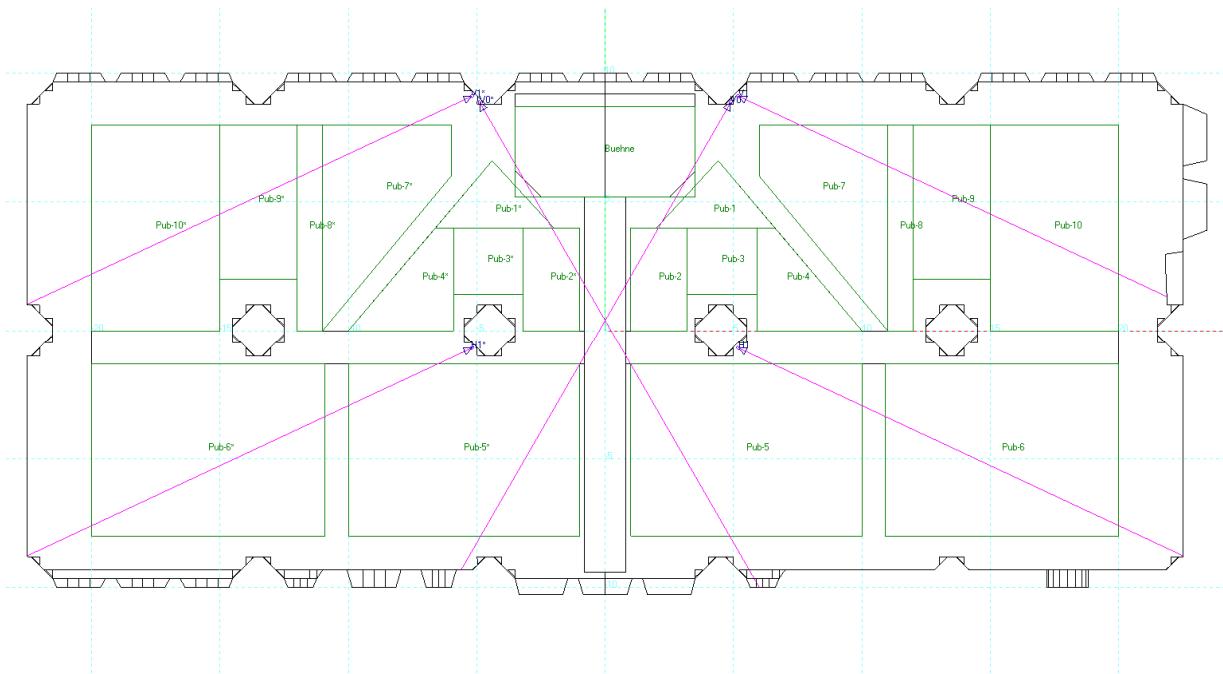


Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 29



# Beschallungskonzept



- 6 Lautsprecherzeilen an 4 Positionen

Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 30



# Lautsprechertypen

- Duran Audio DSX180

DSP gesteuerte aktive 2-Wege Zeile mit 10x 4"-Breitbänder und 4x 1"-Hochtöner mit Horn  
Länge: 1,78 m, Gewicht: 19 kg, Stromversorgung: 230V/6A  
Montagehöhe UK Zeile zum Boden: 2,05 m

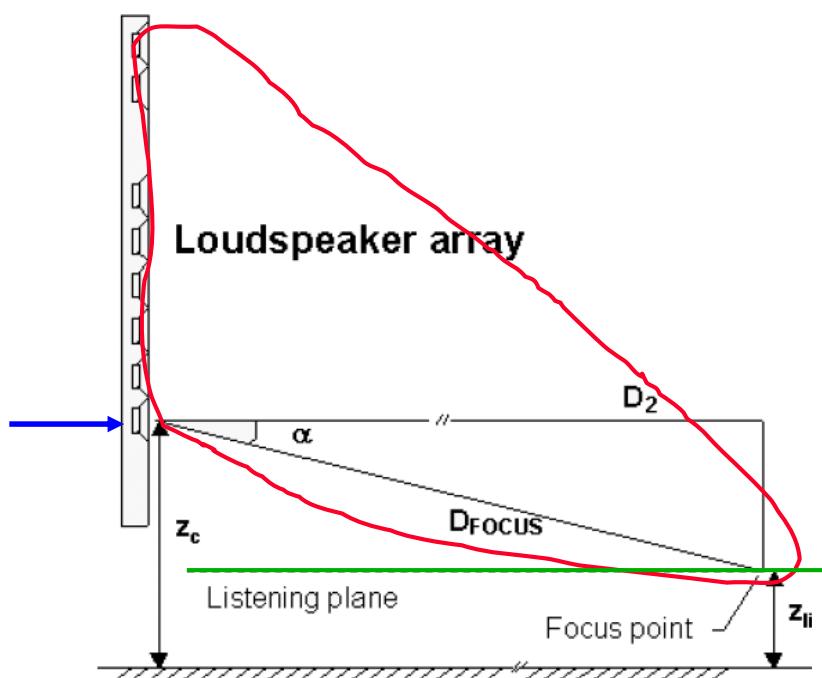
- Steffens Evolutone 2000

DSP gesteuerte aktive 2-Wege Zeile mit 16x 4"-Breitbänder und 32x 1"-Hochtöner  
Länge: 1,86 m, Gewicht: 25 kg, Stromversorgung: 230V/6A  
Montagehöhe UK Zeile zum Boden: 2,05 m

- BOSE MA12 EX

Pro Zeile drei Elemente der passiven Zeile mit je 12x 2,25" Breitbänder  
Länge über alles: 2,96 m, Gesamtgewicht: 29 kg, Belastbarkeit: 3x 150W/8Ω  
Montagehöhe UK Zeile zum Boden: 0,91 m

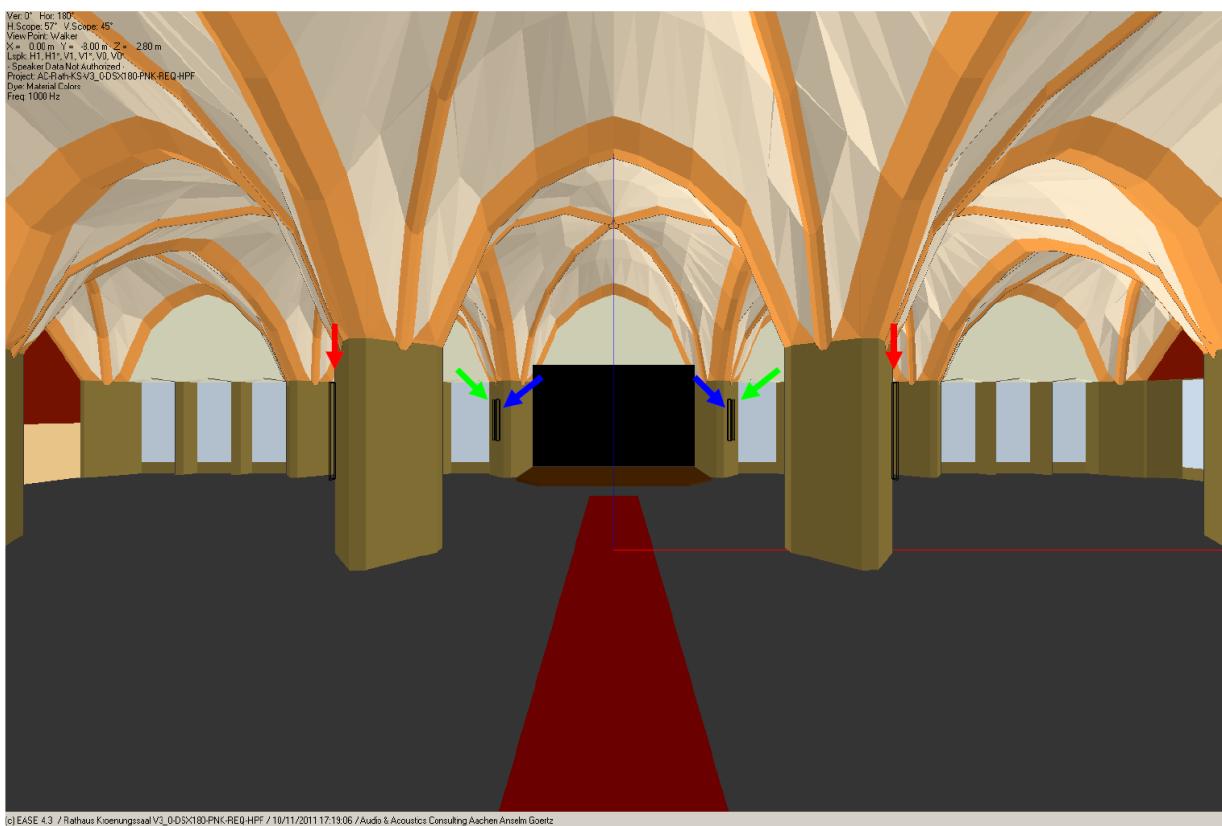
## DSP gesteuerte Zeile



- Akustisches Zentrum ist der unterste Lautsprecher in der Linie, der sich in über Kopf Höhe befindet.  
( $z_c = 2,1$  m)
- Der Beam wird über seine Neigung  $\alpha$  auf die hinteren Zuhörerreihen eingestellt.

Figure 4.2: Geometry for the calculation of the elevation angle and the focus distance.

# Lautsprecherpositionen

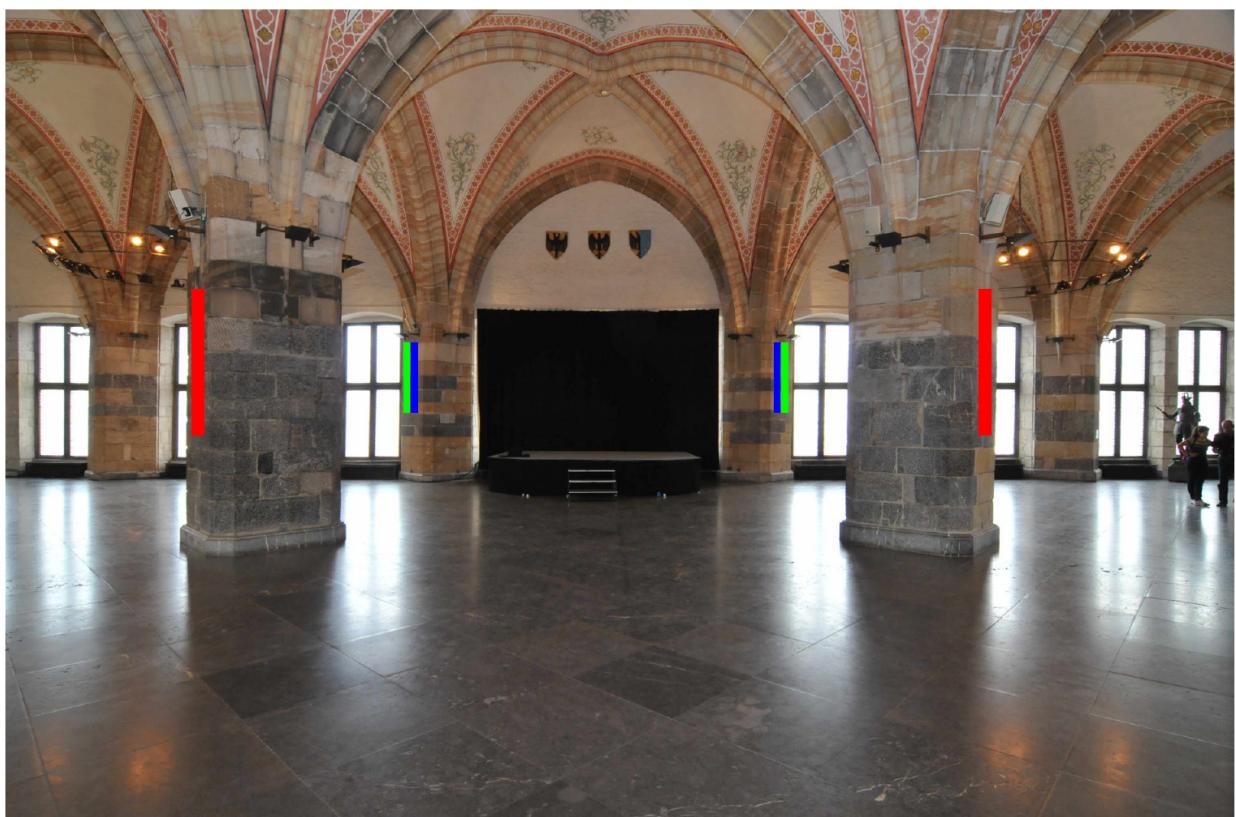


Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 33



# Lautsprecherpositionen

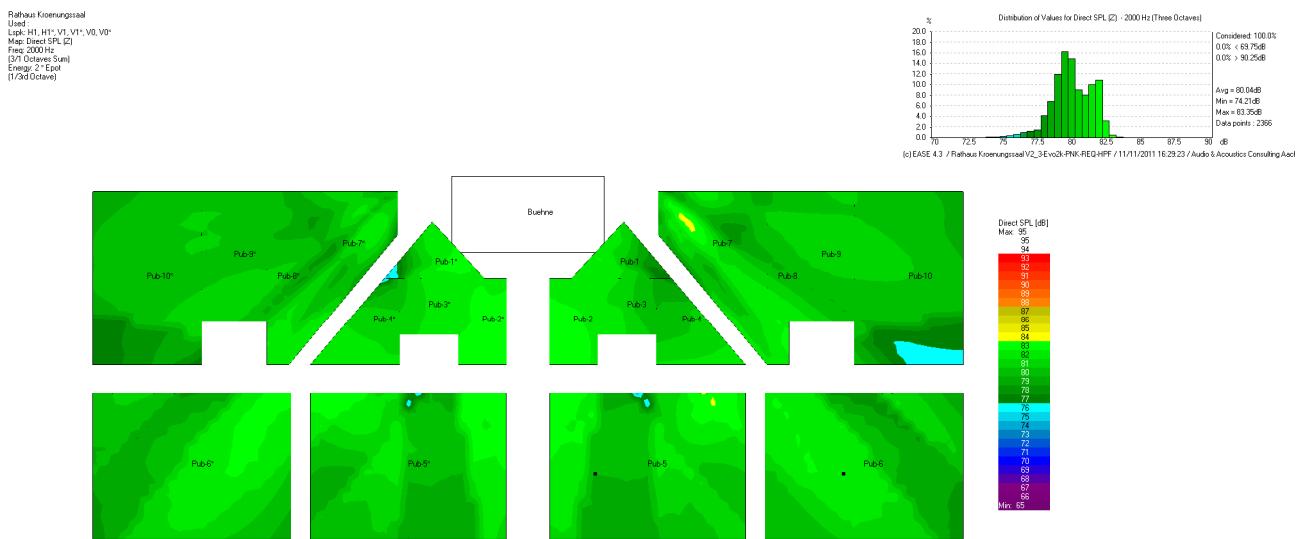


Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 34



# Simulationen: Direktschallpegelverteilung V2.3



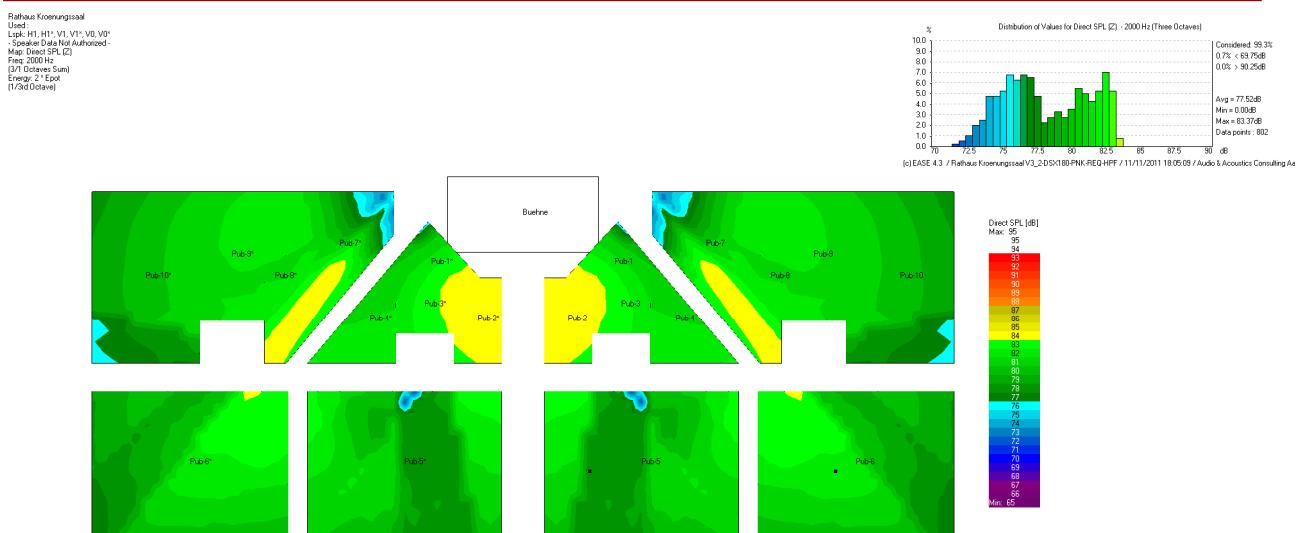
- Direktschallpegel für die Oktavbänder 1k, 2k und 4k
- Szenario 3 mit voller Besetzung
- Lautsprecher: Evo 2000

Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 35



# Simulationen: Direktschallpegelverteilung V3.3



- Direktschallpegel für die Oktavbänder 1k, 2k und 4k
- Szenario 3 mit voller Besetzung
- Lautsprecher: DSX180

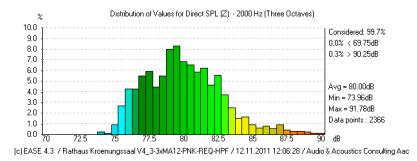
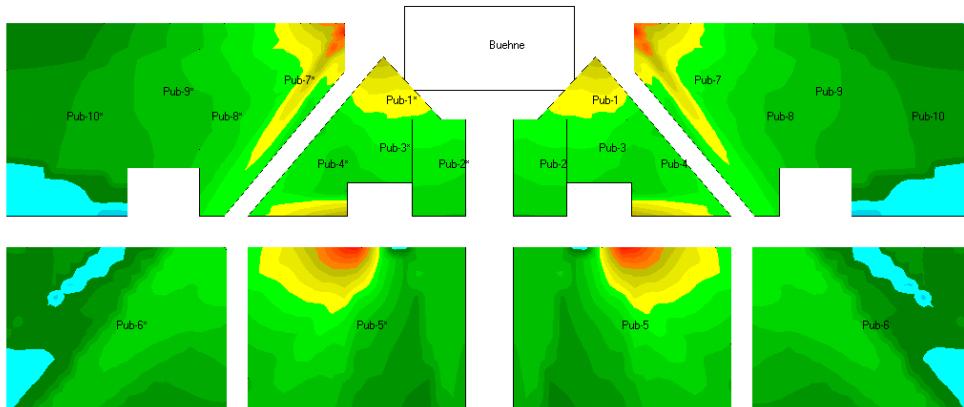
Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 36



# Simulationen: Direktschallpegelverteilung V4.3

Rathaus Krönungssaal  
Used:  
Lapl\_H1\*, H1\*, V1\*, V0\*, V0\*  
- Speaker Data Not Authorized-  
Map: Direct SPL [Z]  
Freq: 2000 Hz  
(3/1 Octaves Sum)  
Energy: 2 \* Epot  
(1/3rd Octave)



- Direktschallpegel für die Oktavbänder 1k, 2k und 4k
- Szenario 3 mit voller Besetzung
- Lautsprecher: MA12EX

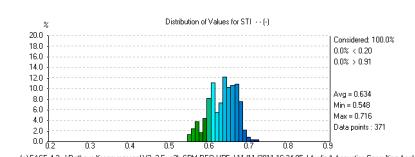
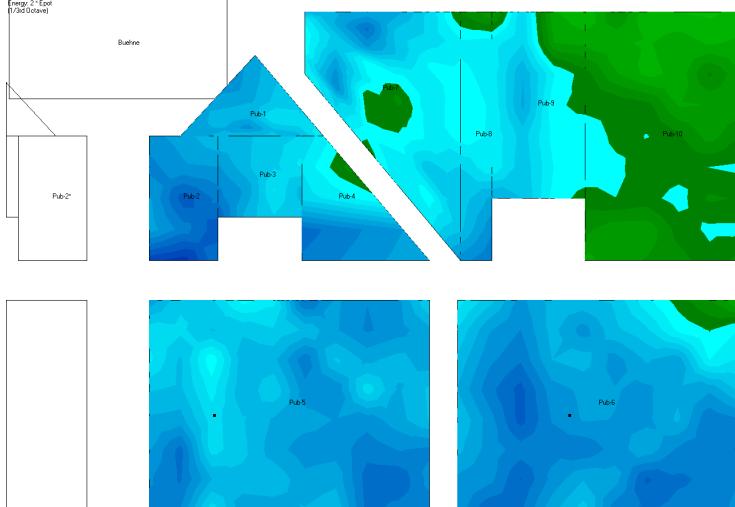
Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 37



# Simulationen: Sprachverständlichkeit V2.3

Rathaus Krönungssaal  
Used:  
Lapl\_H1\*, H1\*, V1\*, V0\*, V0\*  
Map: S31\_SoundField  
Warning: Rough Approximation Only --  
Energy: 2 \* Epot  
(1/3rd Octave)



(c)EASE 4.3 / Rathaus Krönungssaal V2\_3\_Evo2k\_SPMREQ-HPF / 11/11/2011 16:34:05 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Analysis Goetz

- STI Werte ohne S/N und ohne Masking
- Szenario 3 mit voller Besetzung
- Lautsprecher: Evo 2000

MW = 0,63

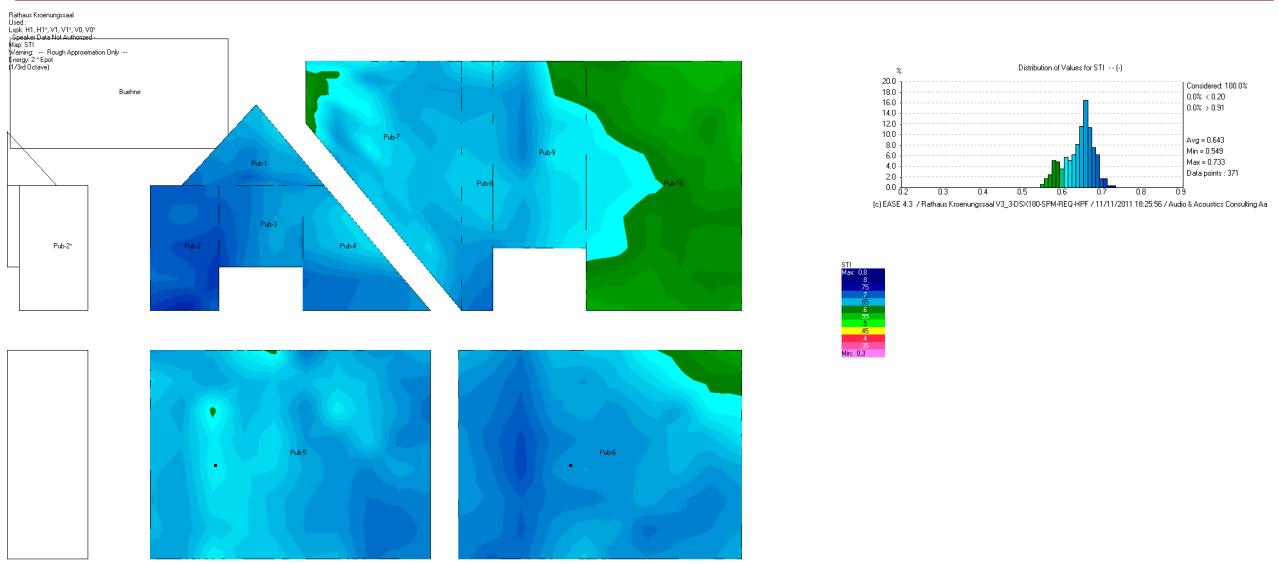
MW-STABW = 0,60

Vortrag 28.Sept.2012  
Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 38



# Simulationen: Sprachverständlichkeit V3.3



(c) EASE 4.3 / Rathaus Krönungssaal V3\_3DS180SPM-REQ-HPF / 11/11/2011 18:26:41 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

- STI Werte ohne S/N und ohne Masking MW = 0,64
- Szenario 3 mit voller Besetzung MW-STABW = 0,61
- Lautsprecher: DSX180

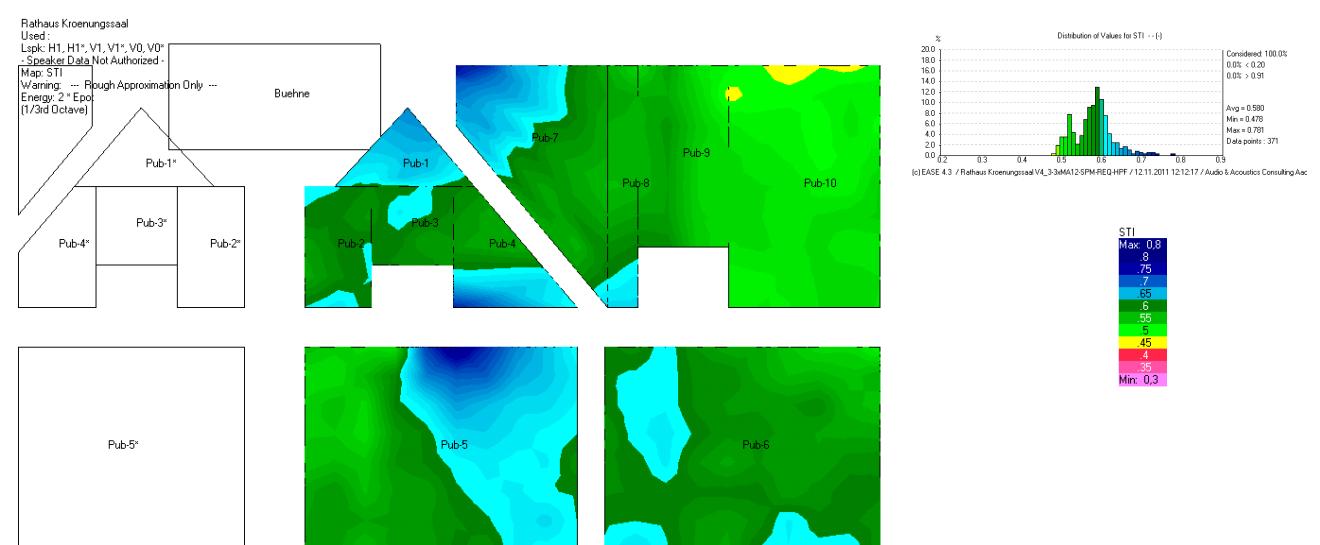
Vortrag 28.Sept.2012

Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 39



# Simulationen: Sprachverständlichkeit V4.3



(c) EASE 4.3 / Rathaus Krönungssaal V4\_3-3xMA12-SPM-REQ-HPF / 12.11.2011 12:13:42 / Audio & Acoustics Consulting Aachen Anselm Goertz

- STI Werte ohne S/N und ohne Masking MW = 0,58
- Szenario 3 mit voller Besetzung MW-STABW = 0,53
- Lautsprecher: MA12EX

Vortrag 28.Sept.2012

Rathaus Aachen Krönungssaal

A.Goertz ; A.Schmitz IFAA Aachen  
Folie Nr. 40



# Werteübersicht und Vergleich

Szenario	LS-Typ	STI Mittelwert	STI MW-STABW	Max.SPL in dBA* <sup>1</sup>
0	Evo 2000	0,42	0,38	105,9
1	Evo 2000	0,63	0,59	100,2
2	Evo 2000	0,64	0,58	98,4
<u>3</u>	<u>Evo 2000</u>	<u>0,63</u>	<u>0,60</u>	<u>101,3</u>
0	DSX180	0,41	0,37	101,7
1	DSX180	0,65	0,61	95,7
2	DSX180	0,64	0,58	93,6
<u>3</u>	<u>DSX180</u>	<u>0,64</u>	<u>0,61</u>	<u>96,4</u>
0	MA12EX	0,38	0,33	101,0
1	MA12EX	0,58	0,54	94,5
2	MA12EX	0,56	0,50	92,8
<u>3</u>	<u>MA12EX</u>	<u>0,58</u>	<u>0,53</u>	<u>96,4</u>
0	Bestand	0,33	0,29	-

Tabelle 2

Übersicht die STI Werte und erreichbaren Maximalschalldruckwerte.

Die STI Werte gelten für einen Schalldruck von 55-80 dBA und einem

gleichzeitigen S/N von mindestens 15 dB in allen Frequenzbändern

\*1 für einen männlichen Sprecher komprimiert auf 6 dB Crestfaktor

## Vergleich

	Steffens Evo 2000	Duran DSX180	Bose MA12EX
Länge in m	1,86	1,78	2,94
Montagehöhe UK	2,05	2,05	0,91
Anschluss	Line Signal 230V/6A (Netzwerk)	Line Signal 230V/6A (Netzwerk)	100V
STI Mittelwert	0,63	0,64	0,58
Maximalpegel in dBA	101,3	96,4	96,4
Kosten für 6 Zeilen	35.400	40.000	22.500
Bewertung	++	++	+

# Fazit

---

Szenario	LS-Typ	STI Mittelwert	STI MW-STABW	Max.SPL in dBA* <sup>1</sup>
0	Evo 2000	0,42	0,38	105,9
1	Evo 2000	0,63	0,59	100,2
2	Evo 2000	0,64	0,58	98,4
<u>3</u>	<u>Evo 2000</u>	<u>0,63</u>	<u>0,60</u>	<u>101,3</u>
0	DSX180	<del>0,41</del>	0,37	101,7
1	DSX180	0,65	0,61	95,7
2	DSX180	0,64	0,58	93,6
<u>3</u>	<u>DSX180</u>	<u>0,64</u>	<u>0,61</u>	<u>96,4</u>
0	MA12EX	0,38	0,33	101,0
1	MA12EX	0,58	0,54	94,5
2	MA12EX	0,56	0,50	92,8
<u>3</u>	<u>MA12EX</u>	<u>0,58</u>	<u>0,53</u>	<u>96,4</u>
0	Bestand	0,33	0,29	-

Tabelle 2

Übersicht die STI Werte und erreichbaren Maximalschalldruckwerte.

Die STI Werte gelten für einen Schalldruck von 55-80 dBA und einem

gleichzeitigen S/N von mindestens 15 dB in allen Frequenzbändern

\*1 für einen männlichen Sprecher komprimiert auf 6 dB Crestfaktor

Zielwert: STI MW = 0,62

Zielwert: 95 dBA

## Simulationen und Messungen

---

- Simulationsergebnisse für Szenario 0 mit Duran DSX180
- STI MW = 0,41
- STI MW-STABW = 0,37
- Max.SPL für Sprache:
  - Peak: ca. 110 dB
  - LAeq: 101,7 dBA
- Messergebnisse für Szenario 0\* mit Duran DSX180
- STI MW = 0,47
- STI MW-STABW = 0,44
- Max.SPL für Sprache:
  - Peak: 109,0 dB
  - LAeq: 99,1 dBA

- ★ einige Tisch und Stellwände aufgebaut
- ★ Beam Parameter messtechnisch vor Ort optimiert



Manuskript zu diesem Vortrag und zu den aktuellen Versionen  
der Vorträge der DEGA Akademie als PDF Files unter:

**[www.ifaa-akustik.de](http://www.ifaa-akustik.de)**