Beschallungstechnik und Raumakustik
Welcher Lautsprecher ist der richtige?

Alfred Schmitz - IFAA
Anselm Goertz - IFAA

Forum Akustika *am 4. Mai 2017*

Übersicht

Beschallungstechnik und Raumakustik

Grundlagen zur Raumakustik

1. Absorption, Transmission, Diffusion, … 3 - 18
2. Messtechnische Parameter, Nachhallzeit, STI, … 19 - 35

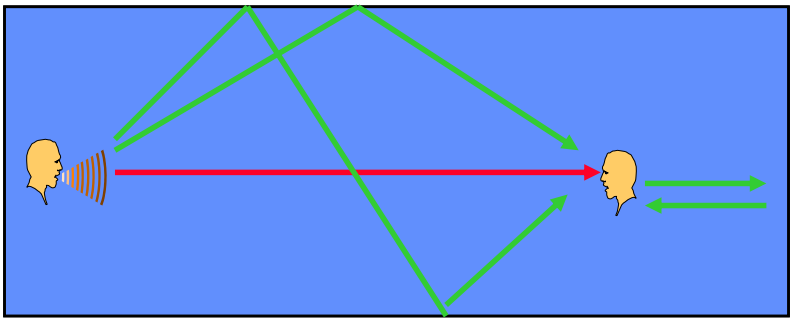
Eigenschaften von Lautsprechern

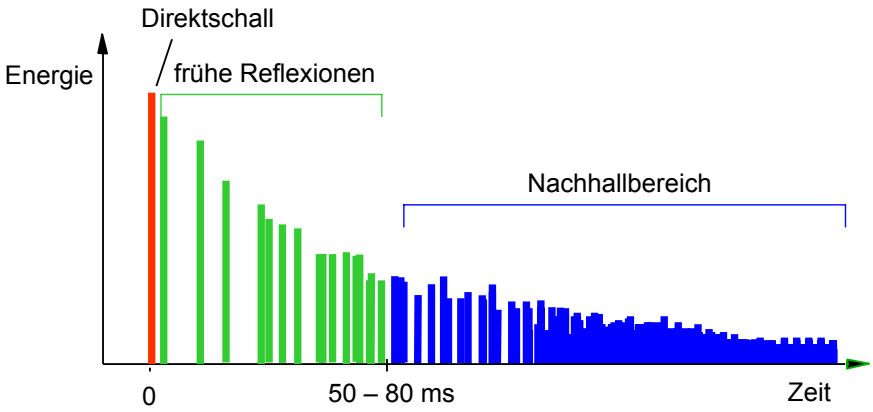
3. Strahlertypen und deren Eigenschaften 36 - 43
4. Messtechnische Beschreibung von Lautsprechern 44 - 52

Beispiel: Planung einer Beschallungsanlage

5. Modellbau, Raumakustik, Störpegel, … 53 - 59
6. Simulationen: Ergebnisse und deren Interpretation 60 - 72

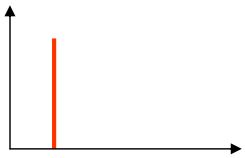
Schallausbreitung in Räumen



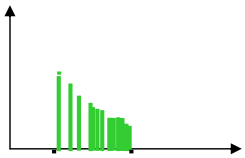


Wirkung der verschiedenen Schallanteile

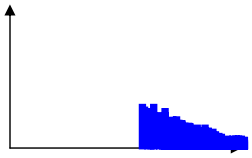
- Direktschall
  - Schalleinfallsrichtung
  - bestimmt Grundpegel
  - meist stark ortsabhängig



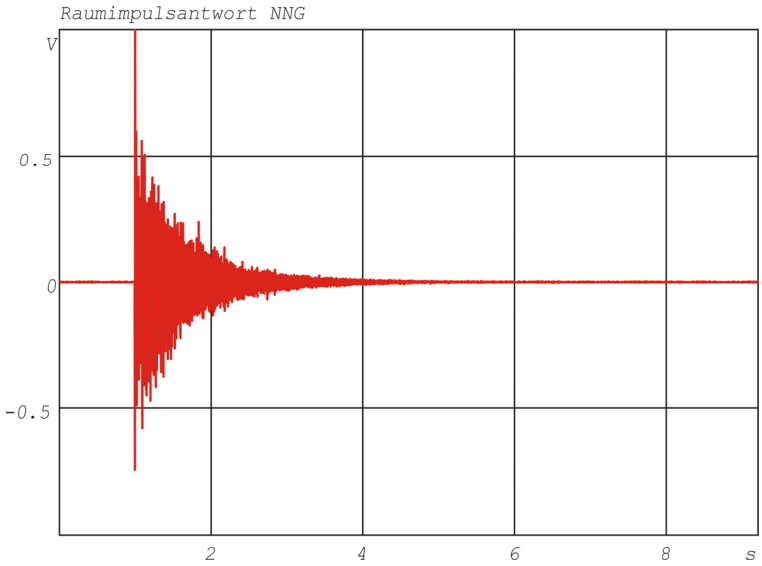
- frühen Reflexionen (0- 50ms oder 0-80ms)
  - Unterstützung des Direktschalls hinsichtlich Intensität
  - seitliche Reflexionen (hier wirkt bereits eine) geben Räumlichkeitseindruck
  - „akustischer Fingerabdruck des Raumes“
  - <u>stark ortsabhängig !!!</u>



- Nachhallbereich
  - bestimmt die empfundene Raumgröße („Klangvolumen“)
  - führt zur Verschmelzung von zeitlich strukturierten Signalanteilen
  - Verschlechterung der Deutlichkeit und Sprachverständlichkeit

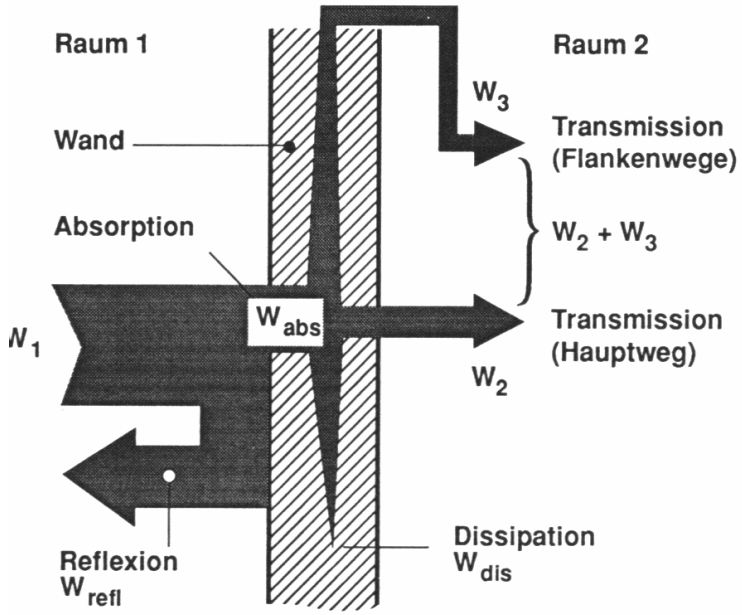


Beispiel einer Raumimpulsantwort

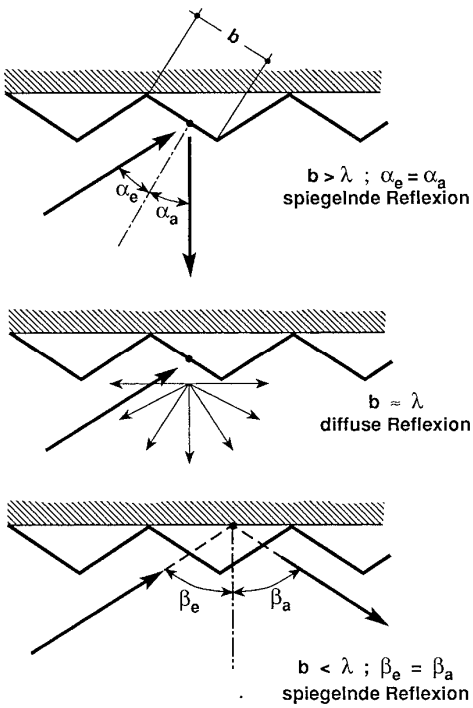


- Impulsantwort (von einer Sendeposition zur einer Empfangsposition)
  - beschreibt die Raumeigenschaften vollständig
  - ist mitunter stark ortsabhängig
  - das Richtverhalten von Sender und Empfänger geht ein
  - Aussteuerungsgrenze und Störpegel bei der Messung beachten

Reflexion und Transmission

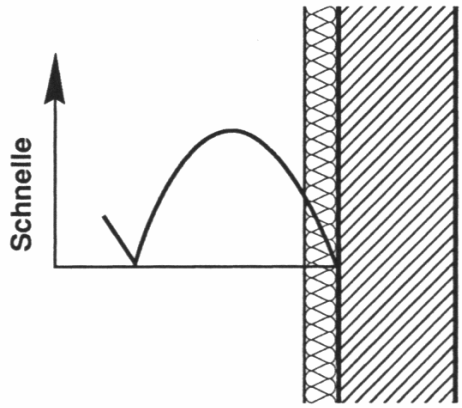


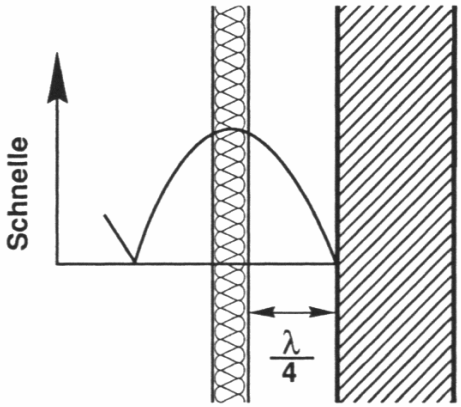
Spiegelnde Reflexion und Streuung

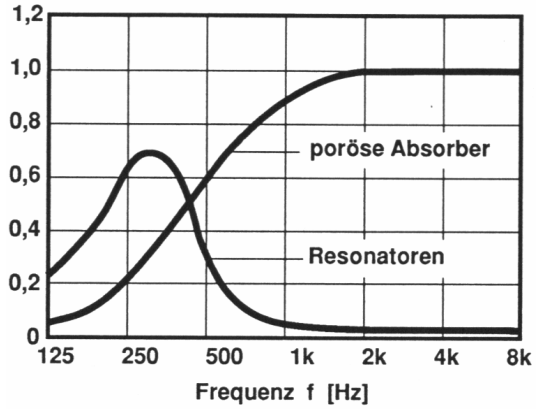


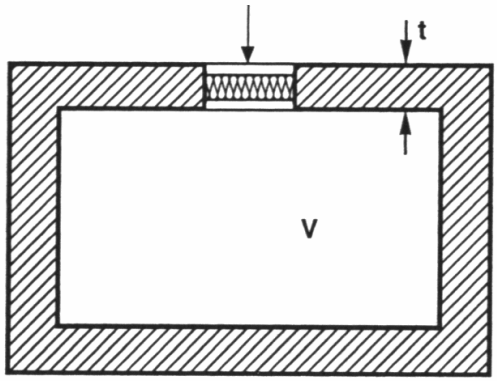
- Streugrad = Verhältnis der diffus gestreuten Energie zur Gesamtenergie
- Streu- oder Diffusitätsgrad ist stark geometrie- und frequenzabhängig
- Streugrade werden nicht standardmäßig gemessen
- Streugrade finden nur rudimentären Eingang bei Simulationen

Resonanz Absorber und Poröse Absorber

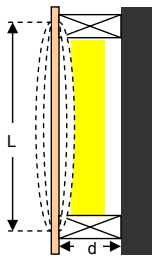




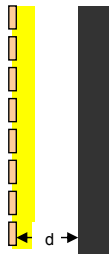




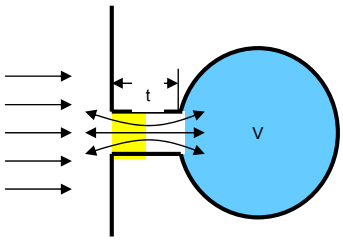
Resonanzabsorber



- **Plattenresonator**
  - Luftschicht hinter Platte wirkt als Feder
  - schwingende Platte wirkt als Masse
  - eingelegtes Dämmmaterial bewirkt die Resonanzbedämpfung

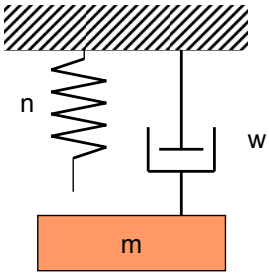


- **Loch- / Schlitzabsorber**
  - Luftschicht hinter Platte wirkt als Feder
  - Luft in den Öffnungen wirkt als Masse
  - eingelegtes Dämmmaterial oder Hinterlegung der Öffnungen mit einem Vlies bewirkt die Resonanzbedämpfung

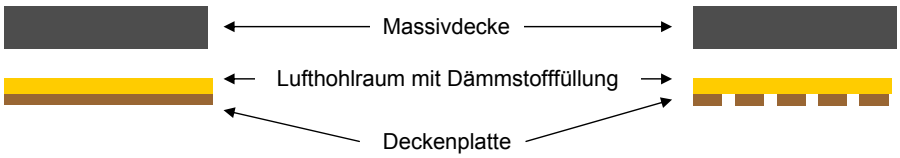


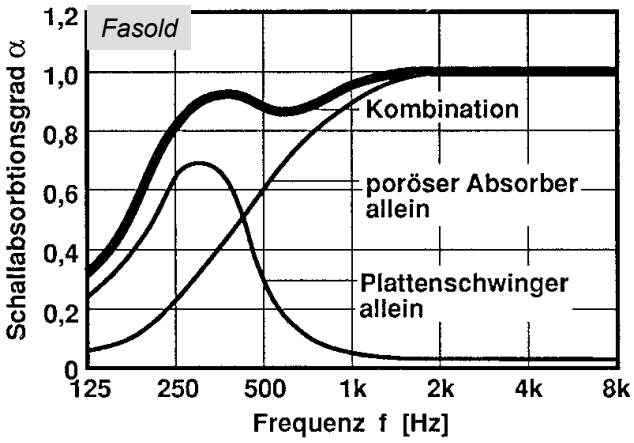
- **Helmholtz-Resonator**
  - Luft im Volumen wirkt als Feder
  - Luft in der Halsöffnung wirkt als Masse
  - Dämmmaterial oder Vlies im Resonator-Halsbereich wirkt als Resonanzdämpfung

Ersatzmodell



Kombinierte Absorber





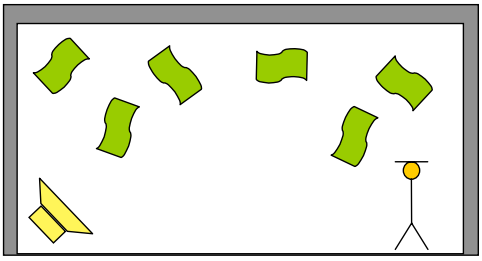
Die meisten Akustikdecken sind kombinierte Absorber

Absorptionsgrad verschiedener Materialien

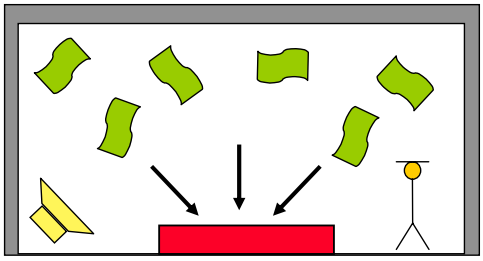
Material	Absorptionsgrad bei Frequenz (in Hz) 125	250	500	1000	2000	4000
Harte Flächen (Putz, Mauerwerk, harte Fußböden	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Teppich in Schlingenwebart, 4,5 mm dick, imprägniert, direkt auf dem Boden	–	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32
Satinvorhang 82 Rayl, 20 cm vor Wand, 1,5-fache Faltung	0,09	0,55	1,03	0,89	0,93	0,92
Gebundene Mineralfaserplatte 12 Rayl/cm, 30 mm dick	–	0,44	0,84	0,84	0,93	0,88
wie oben, mit 50 mm lichtem Abstand montiert	–	0,73	1,00	0,89	0,82	0,84
Mineralfaserplatte 20 Rayl/cm 50 mm dick, 50 mm lichter Wandabstand, sichtseitig mit 6 mm Sperrholz abgedeckt	0,40	0,53	0,29	0,18	0,11	0,11
Holz, 1,6 cm dick, auf 4 cm Holzlatten	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
18 mm Gipskartonplatte, 16 kg/m², 40 mm vor starrer Wand	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,04
wie oben, hinterlegt mit 30 mm Mineralfasermatte, 1,05 kg/m²	0,18	0,10	0,08	0,07	0,10	0,10
Geschlossenes Doppelfenster	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Gipskartonlochplatte 19,6 % Lochflächenanteil, 15 mm Lochdurchmesser, 100 mm vor starrer Wand, hinterlegt mit Faservlies 12 Rayl, Mineralfasermatte 1,05 kg/m²	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62
Metallpaneele, 0,5 mm Alublech, 85 mm breit, 15 mm freie Schlitzbreite zwischen Paneelen, 164 mm Abstand vor starrer Wand, hinterlegt mit 20 mm Mineralfaserplatte 2,5 kg/m²	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62

Material	Absorptionsgrad bei Frequenz (in Hz) 125	250	500	1000	2000	4000	6000
Publikum auf Holzstühlen 2 Personen pro m	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,80
Publikum auf Holzstühlen 1 Person pro m	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78	0,75
Publikum auf mäßig gepolstertem Gestühl 0,85 m x 0,63 m	0,72	0,82	0,91	0,93	0,94	0,87	0,77
Publikum auf mäßig gepolstertem Gestühl 0,90 m x 0,55 m	0,55	0,86	0,83	0,87	0,90	0,87	0,80
Mäßig gepolstertes, unbesetztes Gestühl	0,44	0,56	0,67	0,74	0,83	0,87	0,80
dicht sitzendes Publikum, Orchester und Chor unter Einbeziehung angrenzender Gänge bis zu einer Breite von 1 m	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85	0,80
unbesetztes, "durchschnittliches" mit Stoff bezogenes, gut gepolstertes Gestühl (Sitze mit perforierten Unterseiten)	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70	0,64

Hallraummethode nach DIN EN ISO 354



Messung „leer“ → T_1



Messung „mit Materialprobe“ → T_2

Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche

$$A = 55{,}3 \cdot V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4\,V\left(m_2 - m_1\right)$$

Berechnung des Absorptionsgrades von ebenen Absorbern für diffusen Schalleinfall

$$\alpha_s = \frac{A}{S}$$

m_1 = Dämpfungskonstante bei Leermessung

m_2 = Dämpfungskonstante bei Messung mit Materialprobe

$c_{1,2}$ = Schallgeschwindigkeiten

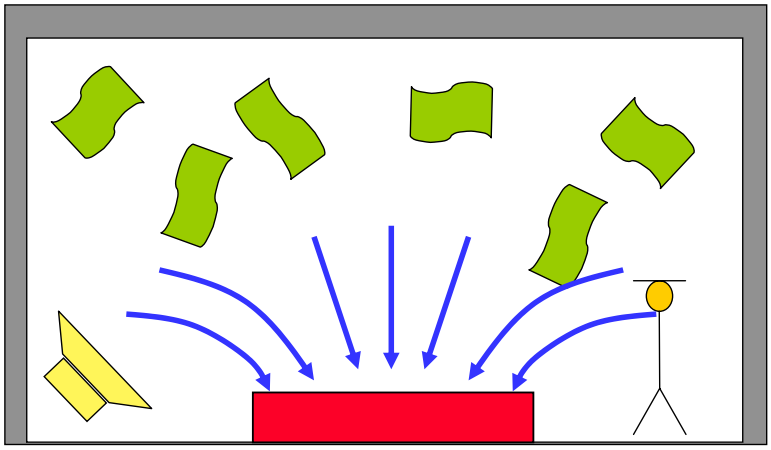
V = Volumen des Hallraumes

α_s = Schallabsorptionsgrad für ebene Absorber im diffusen Schallfeld

S = Fläche der Materialprobe

A = äquivalente Absorptionsfläche

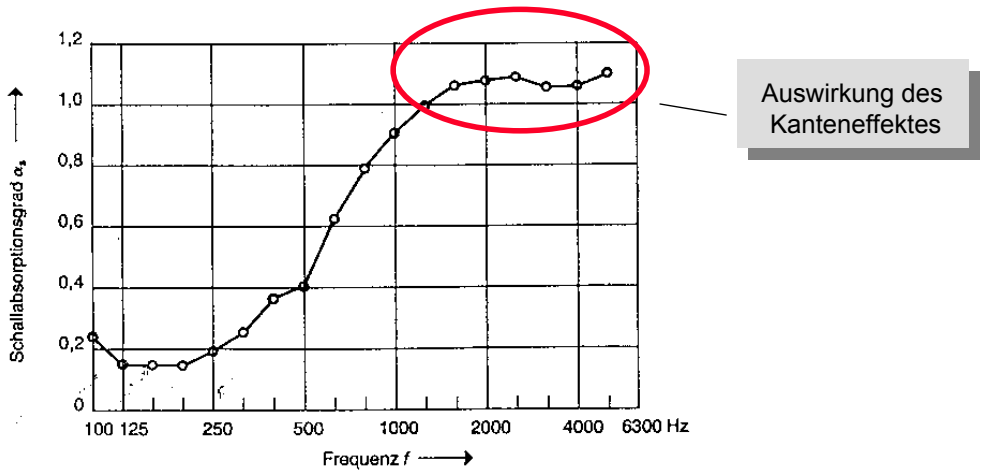
Kanteneffekt (Beugung der Schallenergie in den Absorber)



- Beugung des den Absorber umgebenden Schallfeldes in Richtung der Absorptionsfläche
- es fällt mehr Schallenergie auf den Absorber ein, als ohne Schallbeugung alleine auf Grund seiner geometrischen Ausdehnung im diffusen Schallfeld auftreffen würde

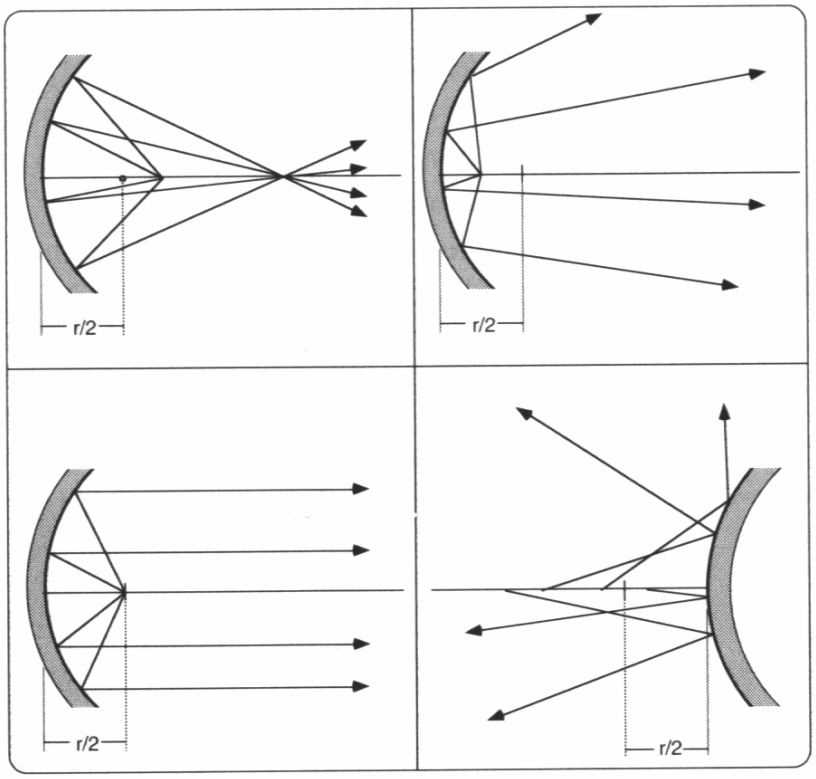
Konsequenzen des Kanteneffektes

- tritt bei allen „räumlich begrenzten“ Absorbern auf
- Absorptionsgrad ist von der Messfläche abhängig !!
- bei hoch absorbierenden Materialien kann ein Absorptionsgrad $\alpha_s > 1$ gemessen werden
- <u>Absorptionsgrade der in Räumen verbauten Materialien können von denen im Hallraum ermittelten abweichen → bei der Planung berücksichtigen</u>

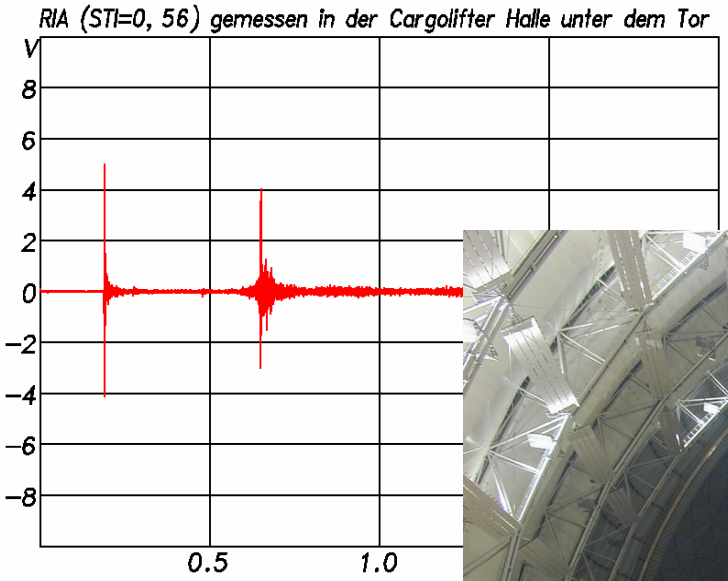


Beispiel einer im Hallraum gemessenen Absorptionskurve

Gewölbte Flächen

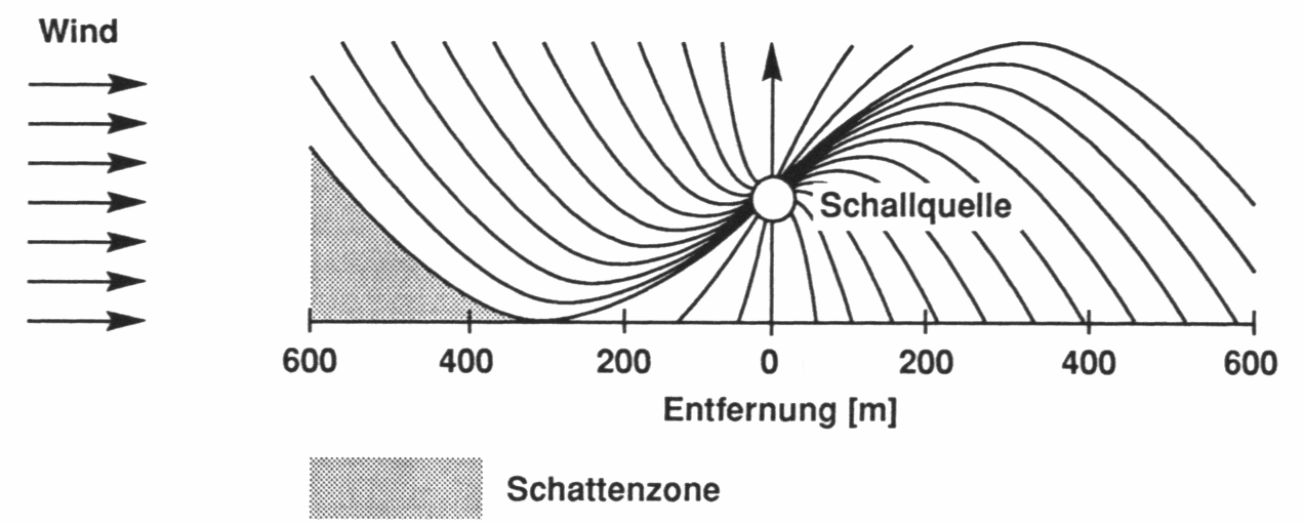


Fokussierung des Schalls

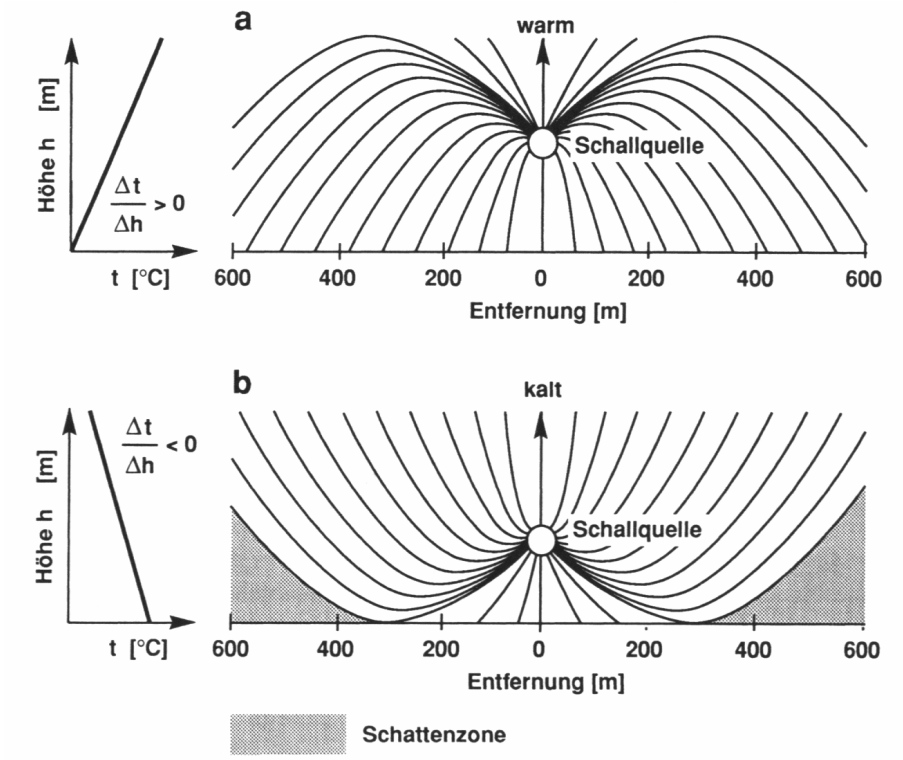


Original Sprecher	
Impulsantwort	
Sprecher im Raum	

Einfluss von Wind auf die Schallausbreitung

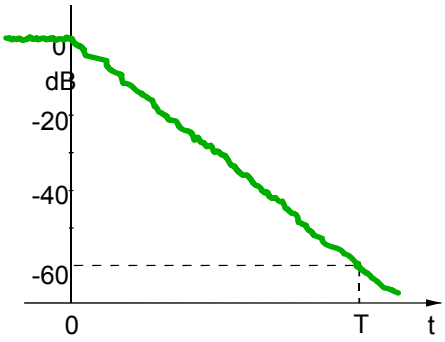


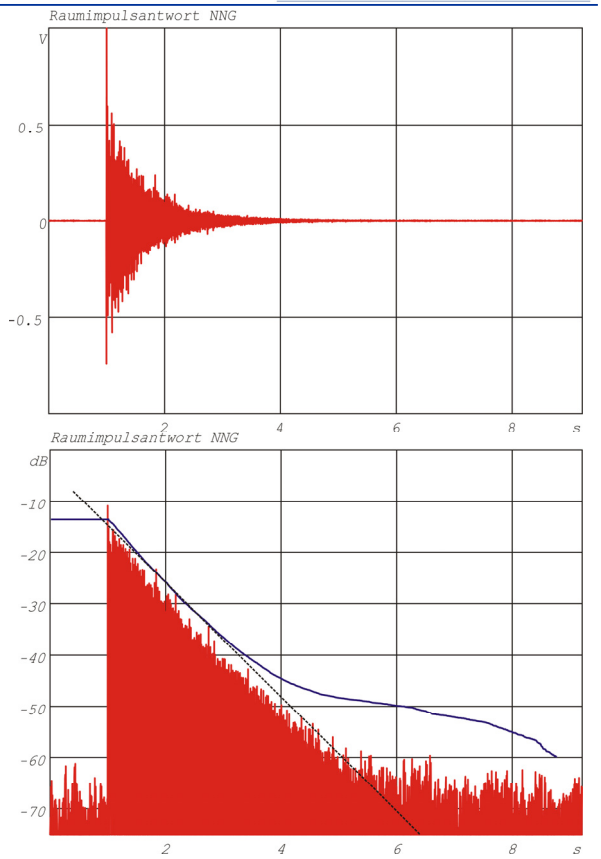
Einfluss von Temperaturschwankungen



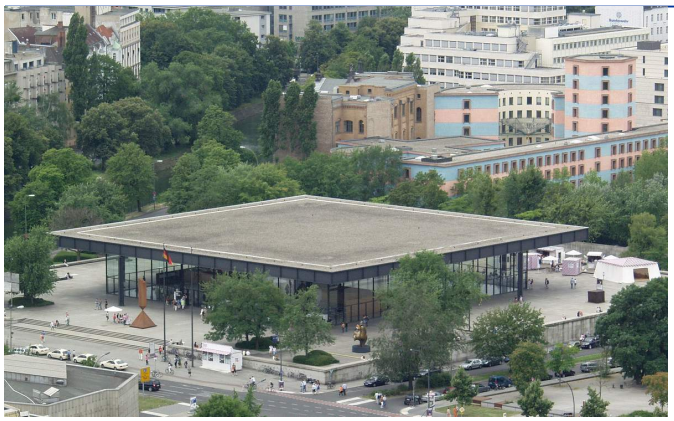
Nachhallzeit

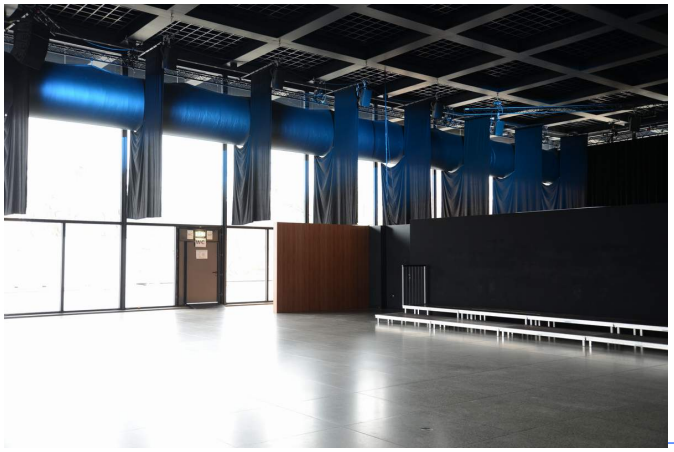
- Die Nachhallzeit ist der wichtigste raumakustische Parameter
- Die Nachhallzeit ist stark frequenzabhängig
- Die Auswertung erfolgt daher in Oktav- oder Terzbändern
- Die Messung erfolgt gemittelt über verschiedene Sender und Empfänger Positionen im Raum
- Messung direkt oder über die Impulsantwort mit Hilfe der Schroeder Rückwärtsintegration

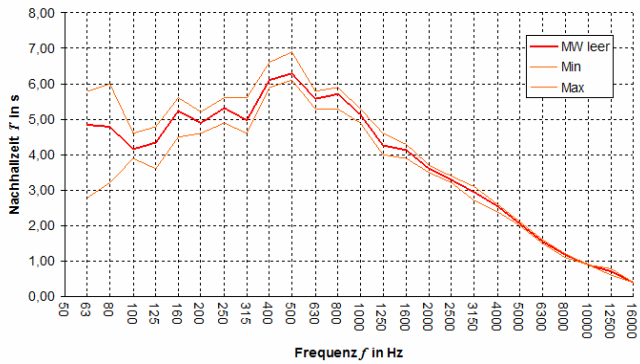


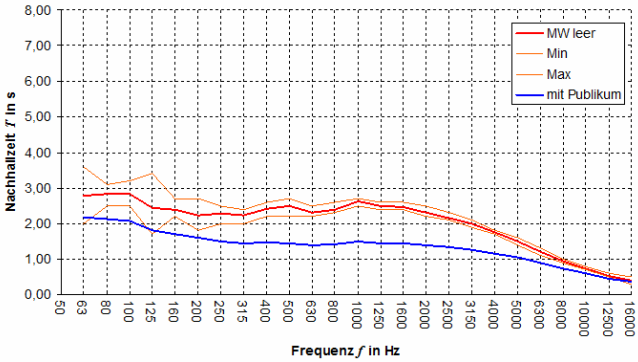


Nachhallzeitmessung in der NNG Berlin

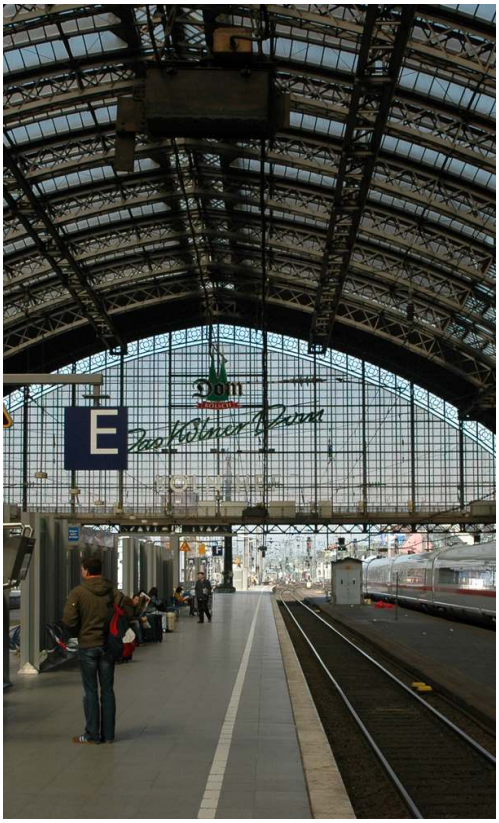


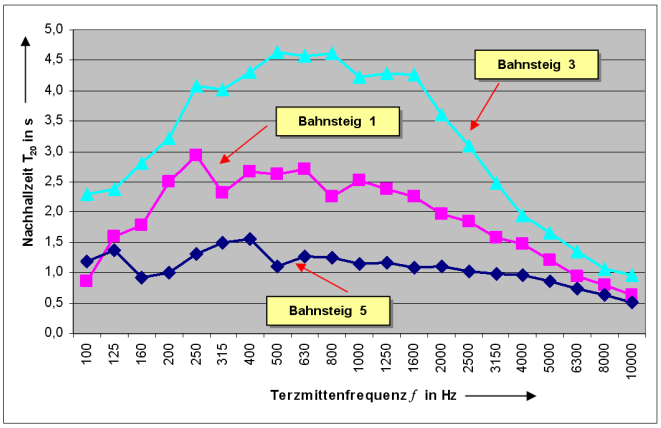






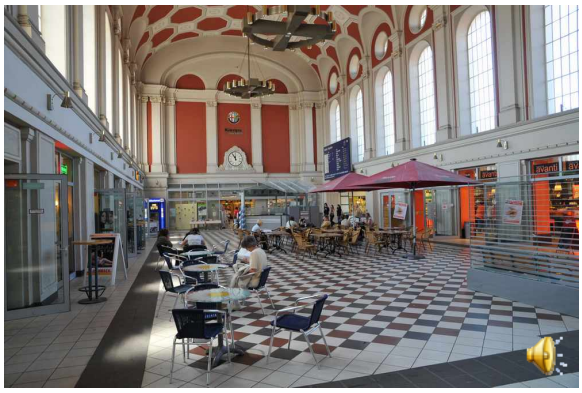
Beispiel einer Nachhallzeitmessung

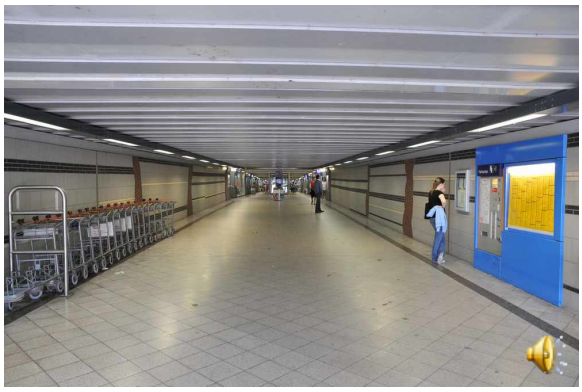


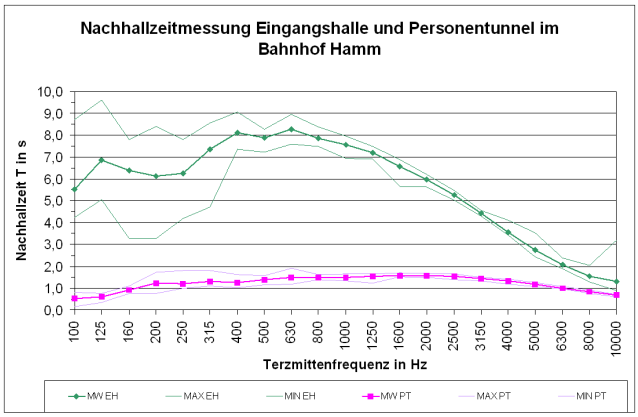


- In der Halle hohe Werte von bis zu 4,5 s im mittleren Frequenzbereich
- deutlicher Abfall zu hohen und tiefen Frequenzen
- In den Randbereichen teilweise (BS1) oder ganz (BS5) außerhalb der Halle wesentlich niedrigere Werte

Beispiel einer Nachhallzeitmessung





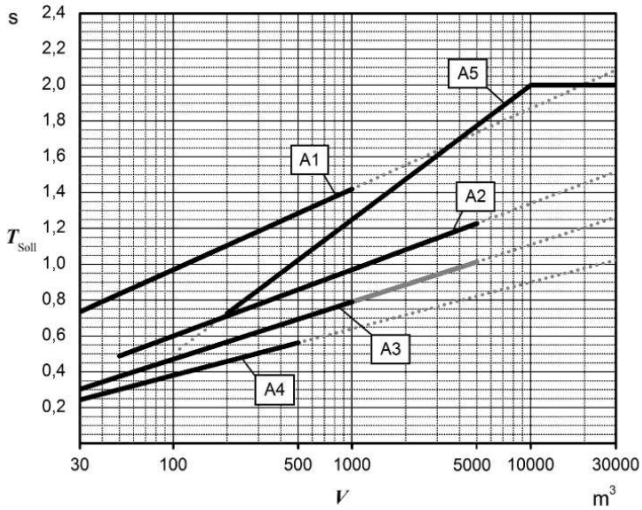


- In der Halle extrem hohe Werte von bis zu 9 s im tieferen Frequenzbereich
- Abfall erst zu den hohen Frequenzen hin
- keine raumakustischen Maßnahmen
- Im Personentunnel mit ca. 1,8 s gemäßigte Werte, die jedoch ohne Raumakustik auch grenzwertig sind.

Typische mittlere Nachhallzeiten

Raumart und Nutzung	Günstige Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen in s
Diskothek, Musical, Techno	unter 1
Mehrzweckhalle	0,5 – 1,5
Hörsaal, Sitzungssaal	1
Schauspielhaus	1 – 1,4
Opernhaus	1,2 – 1,8
Konzertsaal	1,7 – 2,1
Kirche	größer 2

Empfehlungen nach DIN 18041 2016-03



A1 „Musik“:

$$T_{SollA1} = \left(0{,}45 \lg \frac{V}{m^3} + 0{,}07\right) s \qquad 30\ m^3 \le V < 1\,000\ m^3 \qquad (1)$$

A2 „Sprache/Vortrag“:

$$T_{SollA2} = \left(0{,}37 \lg \frac{V}{m^3} - 0{,}14\right) s \qquad 50\ m^3 \le V < 5\,000\ m^3 \qquad (2)$$

A3 „Unterricht/Kommunikation“ (bis 1 000 m³) sowie „Sprache/Vortrag inklusiv“ (bis 5 000 m³):

$$T_{SollA3} = \left(0{,}32 \lg \frac{V}{m^3} - 0{,}17\right) s \qquad 30\ m^3 \le V < 5\,000\ m^3 \qquad (3)$$

A4 „Unterricht/Kommunikation inklusiv“:

$$T_{SollA4} = \left(0{,}26 \lg \frac{V}{m^3} - 0{,}14\right) s \qquad 30\ m^3 \le V < 500\ m^3 \qquad (4)$$

A5 „Sport“:

$$T_{SollA5} = \left(0{,}75 \lg \frac{V}{m^3} - 1{,}00\right) s \qquad 200\ m^3 \le V < 10\,000\ m^3 \qquad (5)$$

$$T_{SollA5} = 2{,}0\ s \qquad V \ge 10\,000\ m^3 \qquad (6)$$

Gilt für den besetzten Zustand mit Regelbesetzung (80%)

Legende

T_{Soll} Soll-Nachhallzeit in Sekunden

V Volumen in Kubikmeter

Soll-Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen für im Sinne dieser Norm typische Raumvolumina in Sekunden

Soll-Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen in Sekunden

Soll-Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen für im Sinne dieser Norm untypische Raumvolumina in Sekunden

A1 Nutzungsart: „Musik“

A2 Nutzungsart: „Sprache/Vortrag“

A3 Nutzungsart: „Unterricht/Kommunikation“ (bis 1 000 m³) sowie „Sprache/Vortrag inklusiv“ (bis 5 000 m³)

A4 Nutzungsart: „Unterricht/Kommunikation inklusiv“

A5 Nutzungsart: „Sport“

Einfache Berechnung der Nachhallzeit

- Sabine´sche Nachhallzeit (nur für diffuses Schallfeld)

$$T = 0{,}163 \frac{V}{\sum S_i \alpha_i} = 0{,}163 \frac{V}{A}$$

V = Volumen
S_i = Teilflächen
α_i = Absorptionsgrad der Teilflächen
A = Äquivalente Absorptionsfläche

- Äquivalente Absorptionsfläche

=

S= 105
α = 1

S_1 = 100 m² α_1 = 0,9
S_2 = 100 m² α_2 = 0,1
S_3 = 10 m² α_3 = 0,5

A = 105 m²

Deutlichkeit und Klarheitsmaß

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}$$

Deutlichkeit D (wird in % angegeben)

D_{50} = 65% -70% gute Sprache

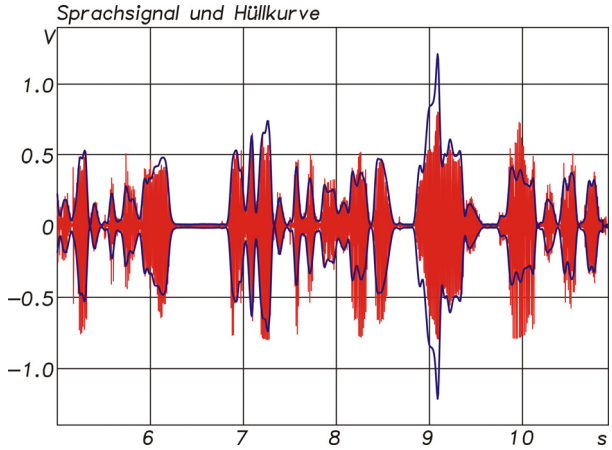
D_{50} = 50% -70% Mehrzwecksaal

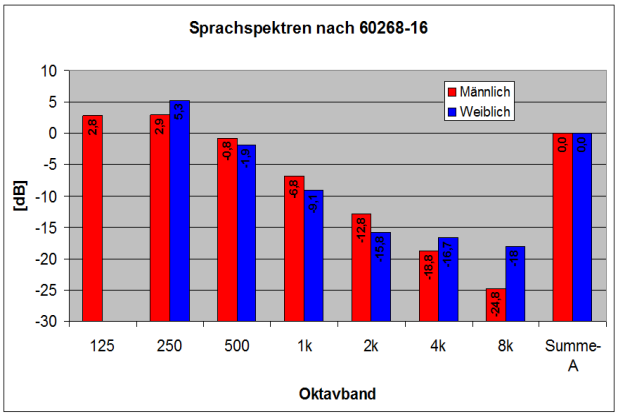
$$C = 10\lg \frac{\int_0^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

Klarheitsmaß C (wird in dB angegeben)

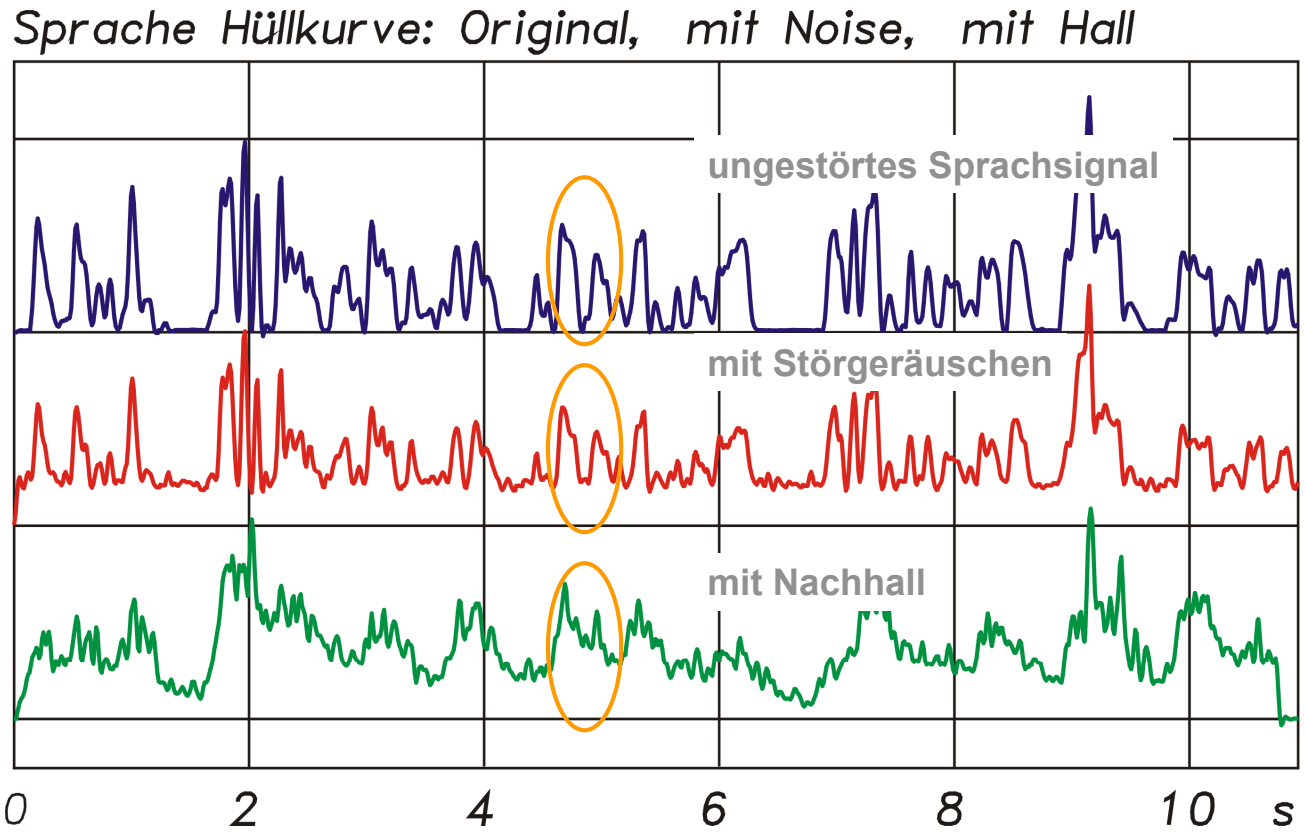
Sprachverständlichkeit

- 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

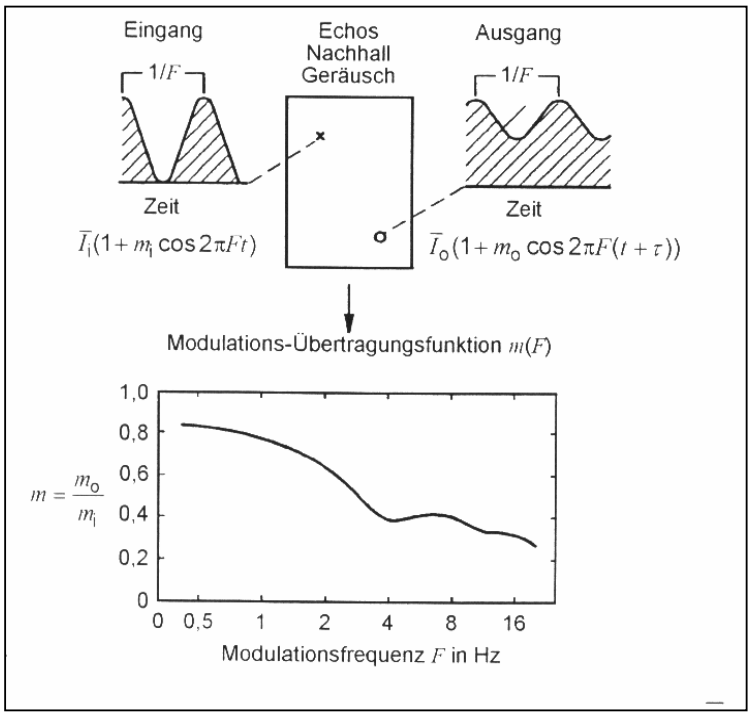




Modulationsverlust durch Störgeräusche und Nachhall



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:

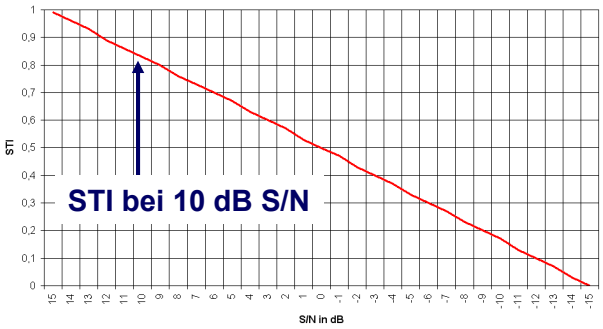
- **Nachhall**
- **Signal-/Störabstand**
- **Hörschwelle**
- **Maskierung**
- **div. Andere Effekte ...**

STI Wertebereich zwischen 0 und 1

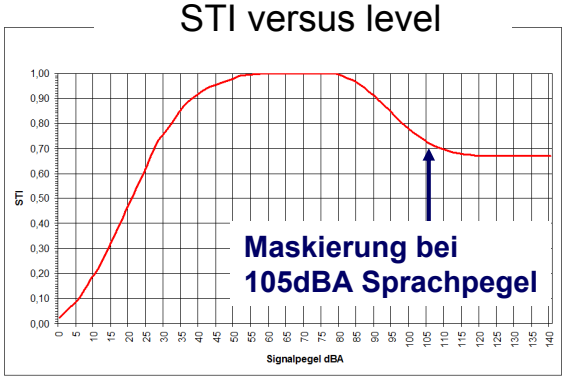
Sprachverständlichkeit als STI Wert

- Messwert STI zwischen 0 und 1
- Anforderung für Sprachalarmierung nach VDE 0828 oder 0833-4 : $STI_{MW\text{-}STABW} \geq 0{,}5$
- Berechnung als arithmetischer Mittelwert <u>abzüglich der Standardabweichung</u>
- Unter Berücksichtigung des Störpegels respektive des <u>S/N</u> und der <u>Maskierung</u> (?)
- Eine sinnvolle Bewertung über den STI ist nur dann möglich, wenn die Randbedingungen klar definiert sind.

STI versus S/N



STI versus level



Normen über Sprachverständlichkeit

- IEC 60268-16
  Elektroakustische Geräte
  Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex

- DIN EN 60849 (IEC 60849 und VDE 0828)
  Elektroakustische Notfallwarnsysteme

- DIN VDE 0833-4
  Messverfahren zur Bestimmung des Sprachübertragungsindex STI

- EN 54-24 (Produktnorm)
  Brandmeldeanlagen — Teil 24: Komponenten für Sprachalarmierungssysteme - Lautsprecher

STI Anforderung nach 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.

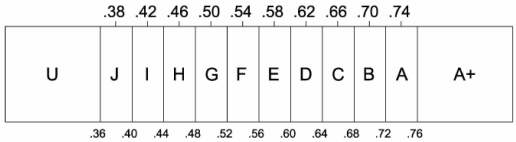
Table G.1 – Examples between STI qualification bands and typical applications

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		
C	0,66	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts	High speech intelligibility
D	0,62	Complex messages, familiar words	Lecture theatres, classrooms, concert halls	Good speech intelligibility
E	0,58	Complex messages, familiar context	Concert halls, modern churches	High quality PA systems
F	0,54	Complex messages, familiar context	PA systems in shopping malls, public buildings offices, VA systems, cathedrals	Good quality PA systems
G	0,5	Complex messages, familiar context	Shopping malls, public buildings offices, VA systems	Target value for VA systems
H	0,46	Simple messages, familiar words	VA and PA systems in difficult acoustic environments	Normal lower limit for VA systems
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 abzüglich der Standardabweichung zu verstehen

- Tabelle nur zur Orientierung !

STI und subjektive 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

Bestimmung des STI Mindestwertes

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

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

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

- Messraster: 6 m (alt) oder nach Bedarf (siehe Tab. 50849)

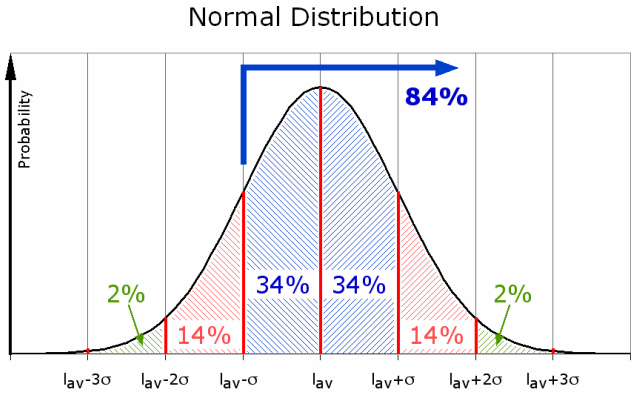
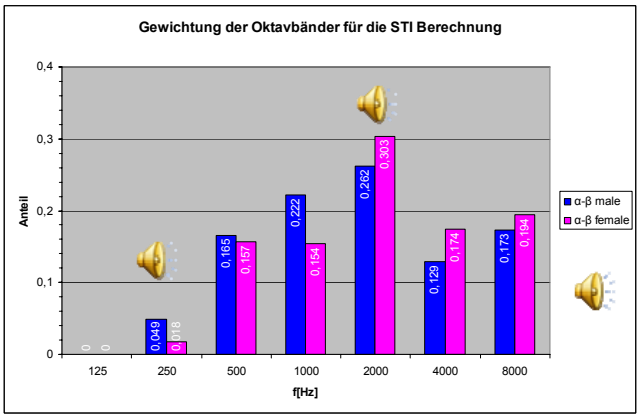


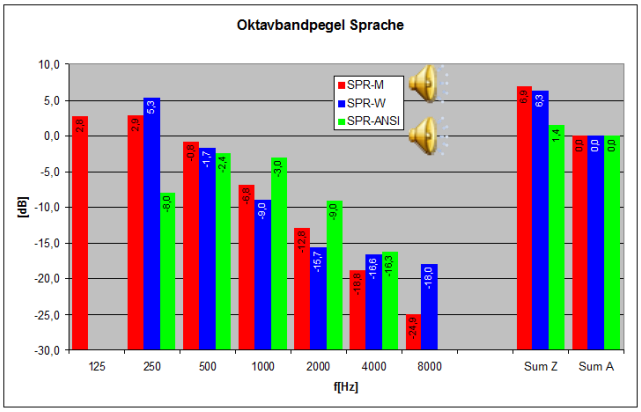
Table B.1 — Minimum number of measurement points

Area of the ADA (m^2)	Minimum number of measurement points
Less than 25	1
25 to less than 100	3
100 to less than 500	6
500 to less than 1500	10
1500 to less than 2500	15
Greater than 2500	15 per 2500 m^2

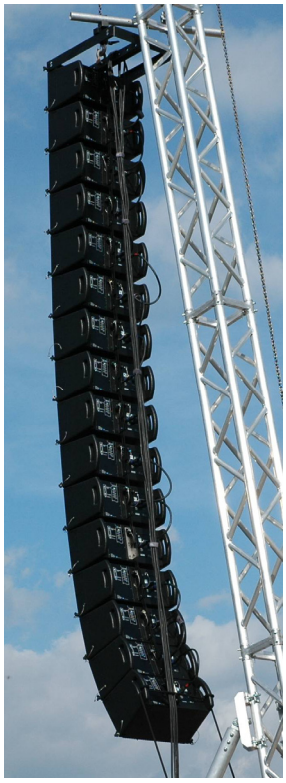
Frequenzbänder

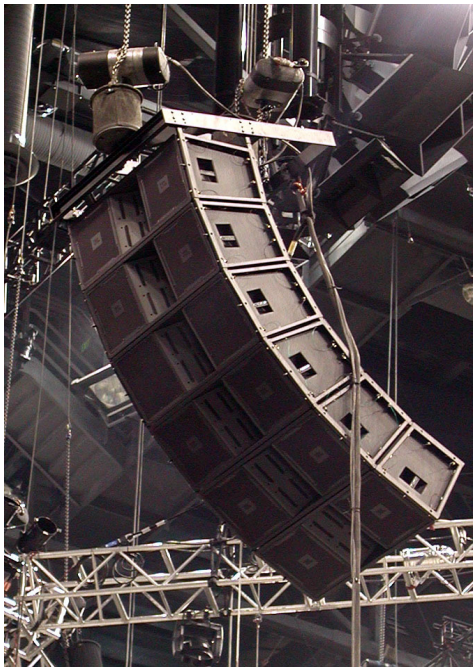
- Anpassung des Sprachspektrums an den Störpegel
- Die wichtigsten Frequenzbänder sind die Oktavbänder von 1 bis 4 kHz
- Hochpassfilter ($f_u \approx 150 - 200$ Hz , 4th)
  - Entlastet die Lautsprecher
  - Reduziert die Maskierung bei männlichen Sprecher durch das laute 125 Hz Band
  - Verringert die Verständlichkeit nicht!
- Präsenzanhebung 2 kHz , +6 dB
  - Stärkt das wichtigste Frequenzband
- Bei breitbandigen Pegelwerten ist hier trotz der zu hohen absoluten Pegel die A-Bewertung sinnvoll.



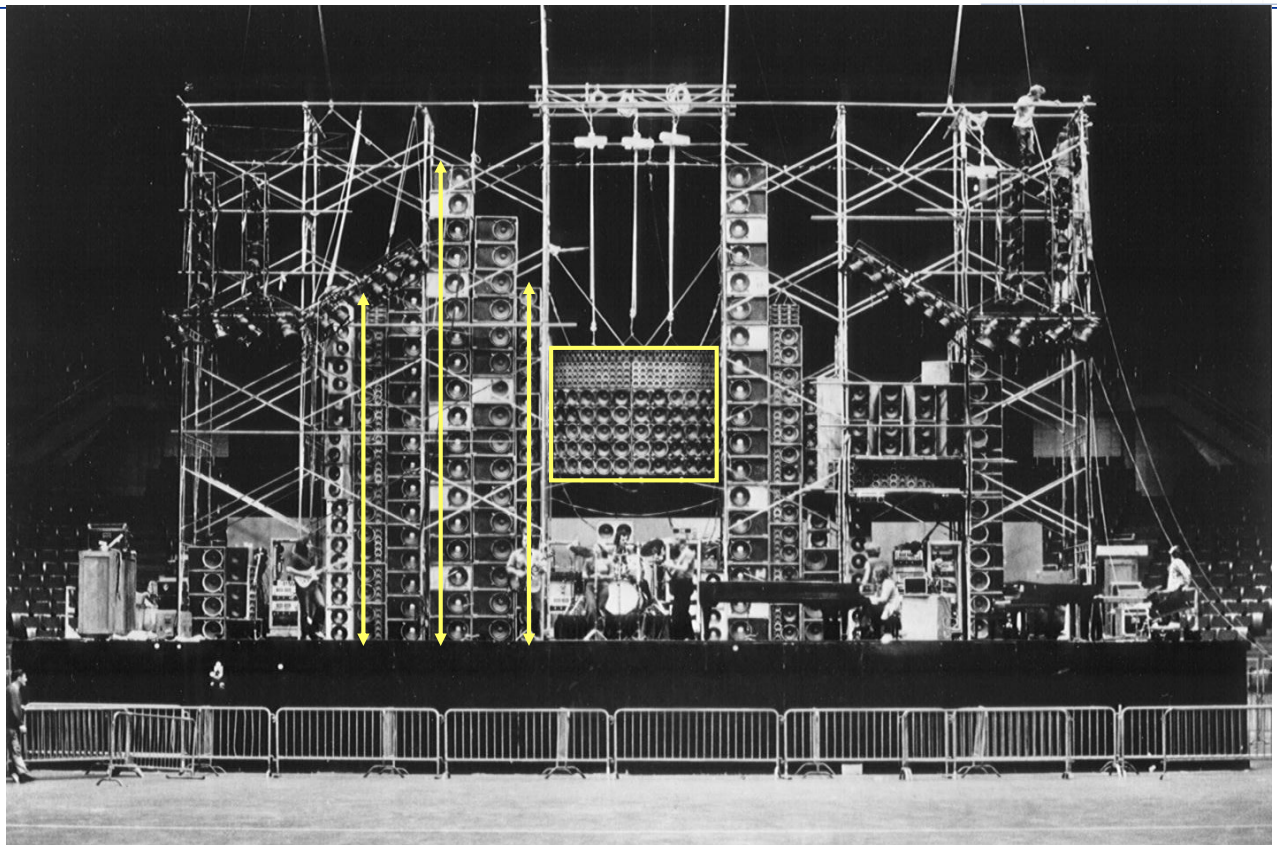


Beschallung heute





... und damals !



Idealisierte Betrachtungsweise

Die abgestrahlte Schallleistung verteilt sich auf einer Fläche A.

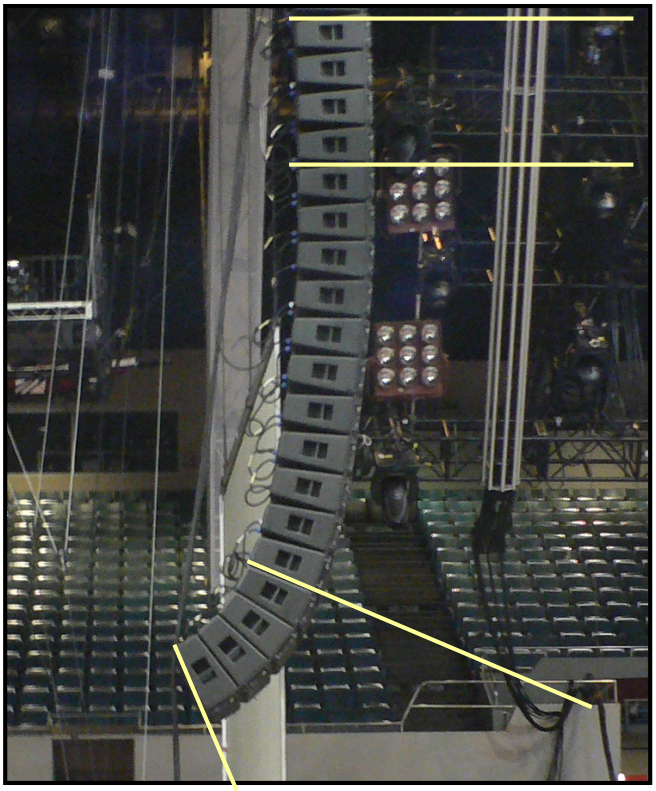
Je größer die Fläche bei gegebener Leistung ist, desto geringer ist der Schalldruck.

Eine Verdopplung der Fläche reduziert den Schalldruck um 3 dB.

Für eine idealisierte Quellenbetrachtung gilt somit:

- Bei Punktquellen fällt der Schalldruck pro Entfernungsverdopplung von der Quelle um 6 dB ab.
  - Oberfläche = $4\pi r^2$
- Bei unendlich ausgedehnten Linienquellen fällt der Schalldruck pro Entfernungsverdopplung von der Quelle um 3 dB ab.
  - Oberfläche = $2\pi r \cdot h$
- Bei einem unendlich ausgedehnten Flächenstrahler ist der Pegel unabhängig von der Entfernung konstant.
  - Oberfläche unabhängig von der Entfernung

Line-Array mit Intensity Shading

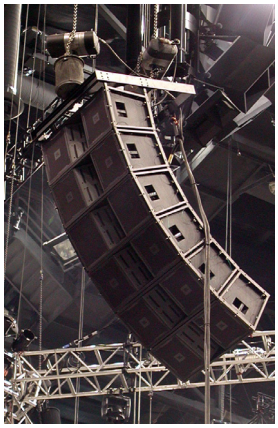


- Oben:
  - gerade Linie mit hoher Leistungsdichte auf kleinem Raumwinkel mit folglich großer Reichweite für weit entferntes Publikum
- Unten
  - zunehmend stärker gekrümmte Linie mit abnehmender Leistungsdichte auf einem größer werdenden Raumwinkel für Publikum in kurzer Distanz

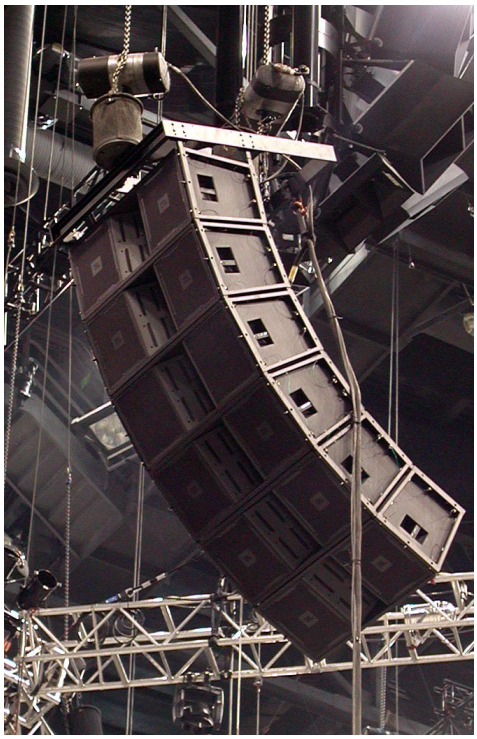
Wall of Bass in Wien

Nah- und Fernfeld bei Lautsprechern

- „Normale“ Lautsprecher arbeiten im Fernfeld und strahlen hier eine sphärische Wellenfront ab. **Pointsource**
- **Line-Arrays** arbeiten je nach Länge bei hohen Frequenzen noch im Nahfeld und strahlen hier eine Zylinderwelle ab.
- Flächenstrahler arbeiten je nach Ausdehnung bei hohen Frequenzen noch im Nahfeld und strahlen hier eine ebene Welle ab

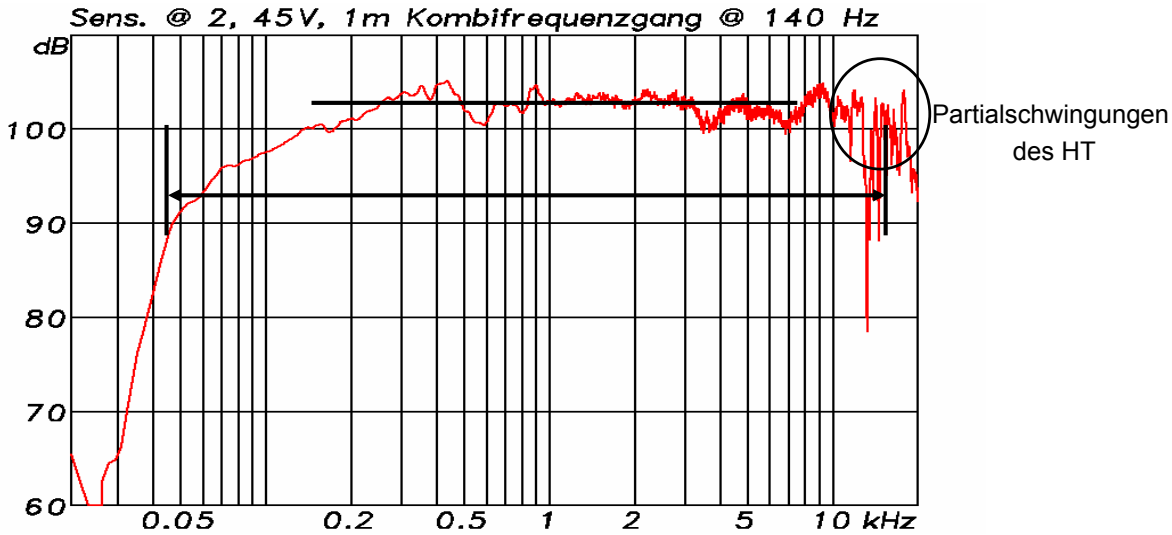


Wo liegt der Unterschied?



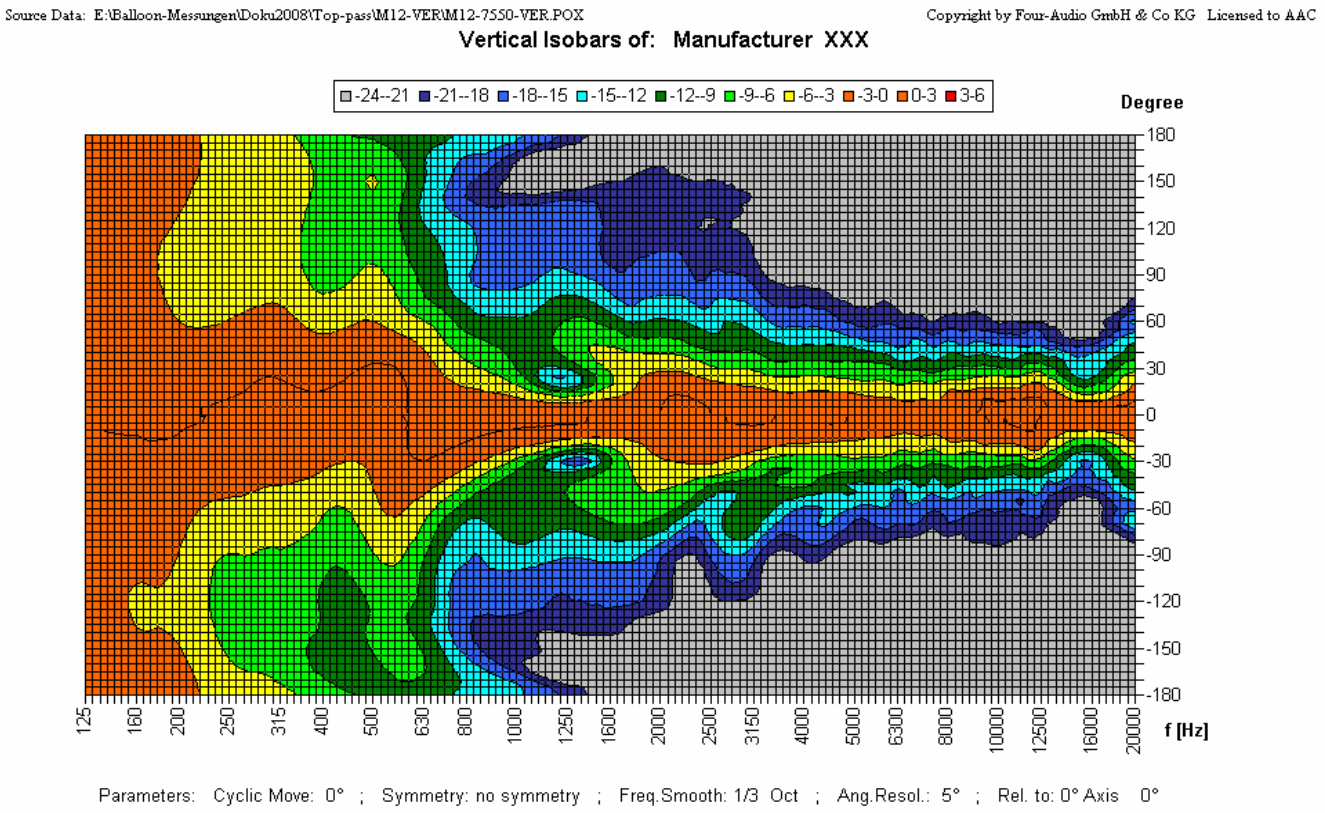
Auch ein Lautsprecher ?

Frequenzgang und Sensitivity

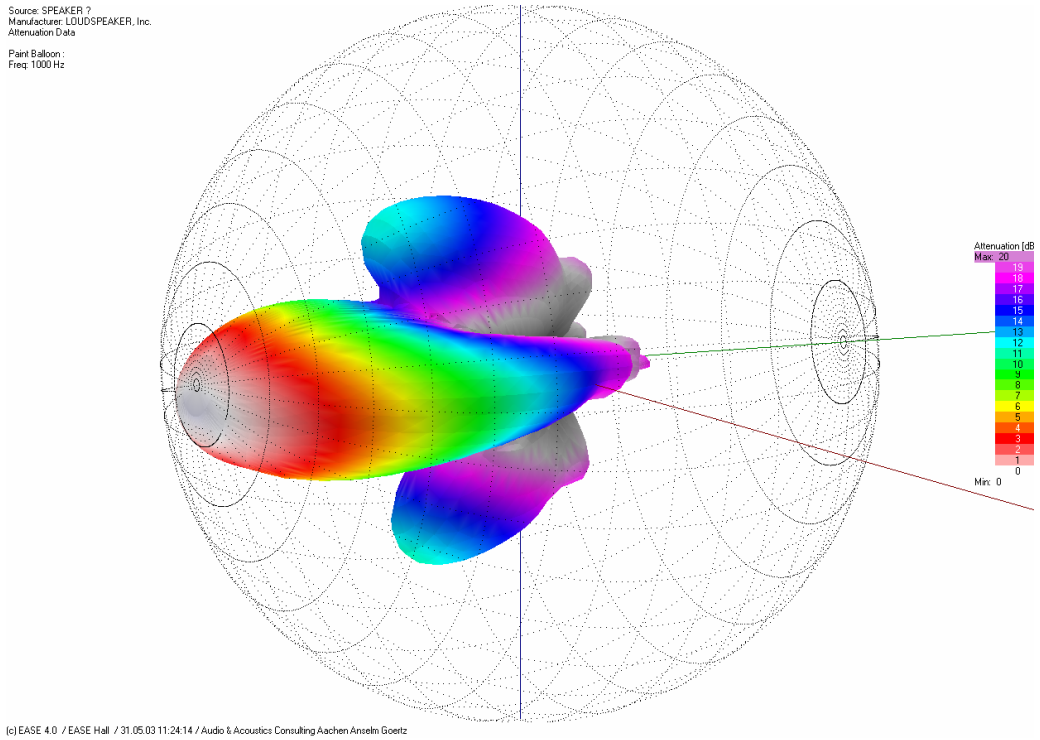


- Übertragungsbereich nach DIN EN 60268-5 Abschnitt 21.2.1: ... durch obere und untere Grenzen beschränkter Frequenzbereich, ... in dem der auf der Bezugsachse ... gemessene Frequenzgang ... nicht mehr als 10 dB unter dem Schallpegel liegt, der über eine Oktave im Bereich maximaler Empfindlichkeit oder in einem breiteren, vom Hersteller angegebenen Frequenzbereich gemittelt wurde. .... scharfe Einbrüche bis 1/3 Terz Breite ignorieren usw. ...

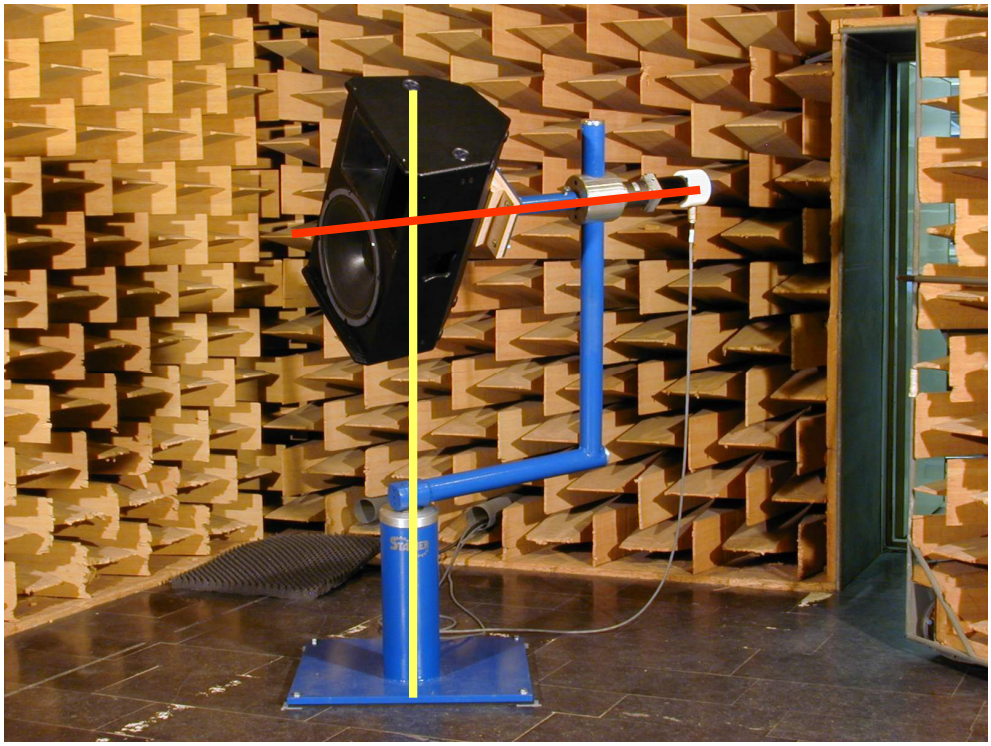
Isobarendarstellung für die hor. und ver. Ebene



Balloondaten



Messaufbau

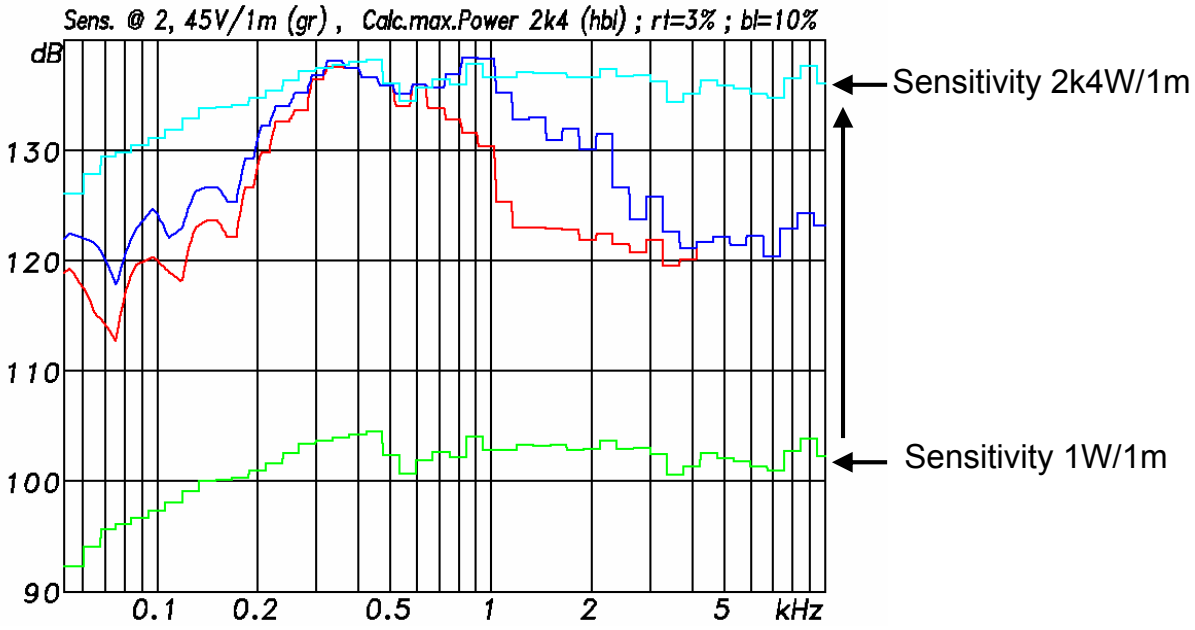


Datenformate

Winkelauflösung in °	Anzahl Messpunkte	Frequenzauflösung in Oct.	Messdauer in h *1	Nahfeld-Fernfeld-Betrachtung	Phasendaten	Formate
10	614	1/1	1	Fernfeld	Nein	EASE 2.1 CATT Bose Modeler CADP2
5	2522	1/1	1-3	Fernfeld	Nein	Ulysses 2.60
5	2522	1/3	1-3	Fernfeld	Nein	EASE 3.0 CLF
5	**2522**	**1/3**	**1-3**	**Fernfeld**	**Ja**	**EASE 4.0**
beliebig	-	beliebig	1-48	Nahfeld-Fernfeld	Ja	EASE bzw. CATT DLL
beliebig	**-**	**beliebig**	**1-48**	**Nahfeld-Fernfeld**	**Ja**	**Speaker LAB GLL**

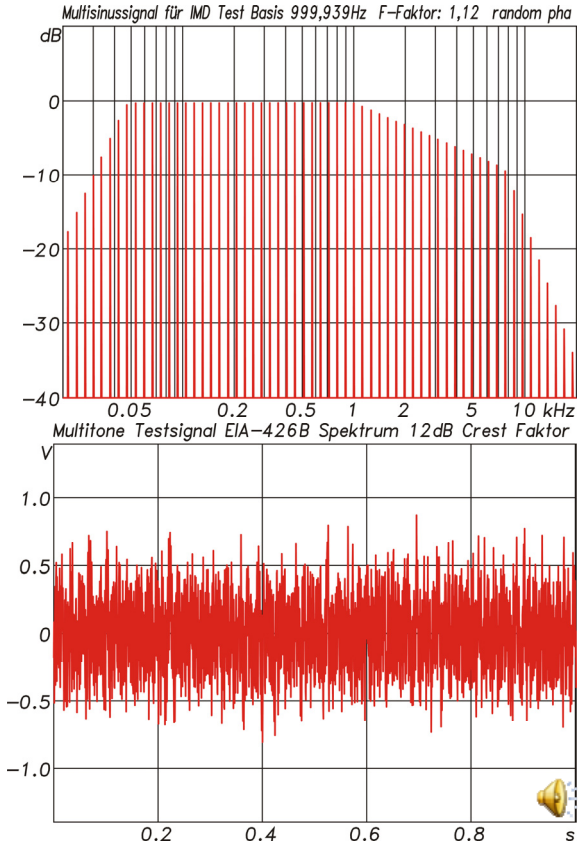
*1 Messdauer je nach Symmetrie der Box ohne Interpolation

Berechneter Maximalpegel



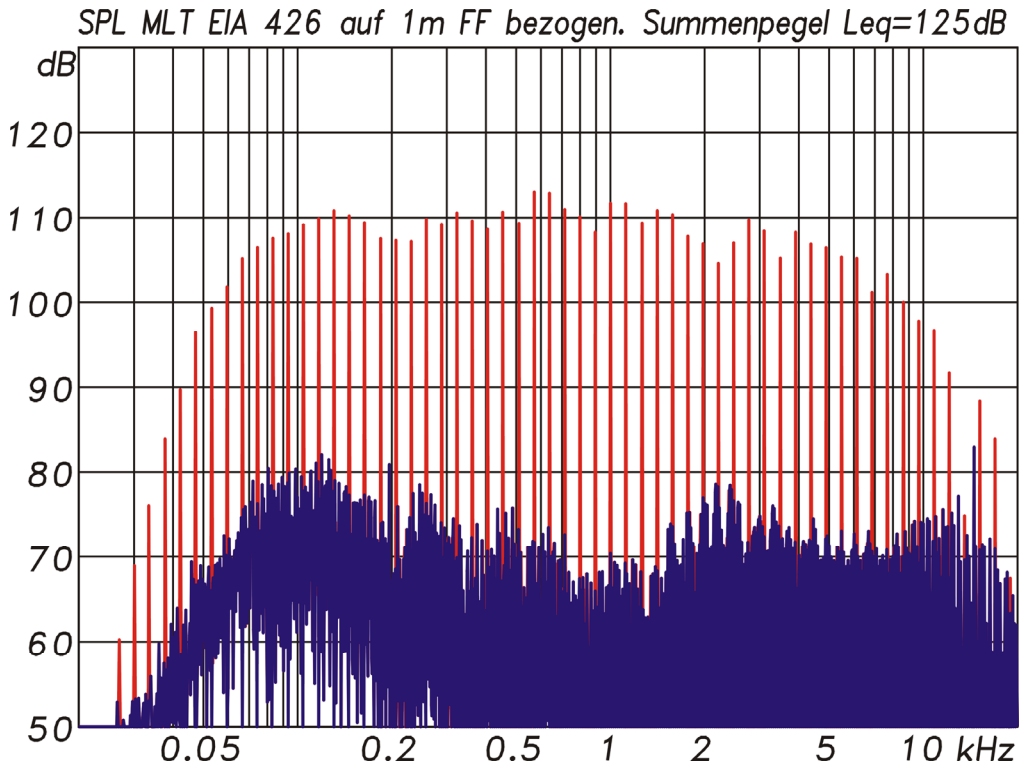
- Berechneter Max.SPL aus der 1W/1m Sensitivity und dem Leistungslimit ohne Berücksichtigung der Verzerrungen

Messung mit Multitonsignalen

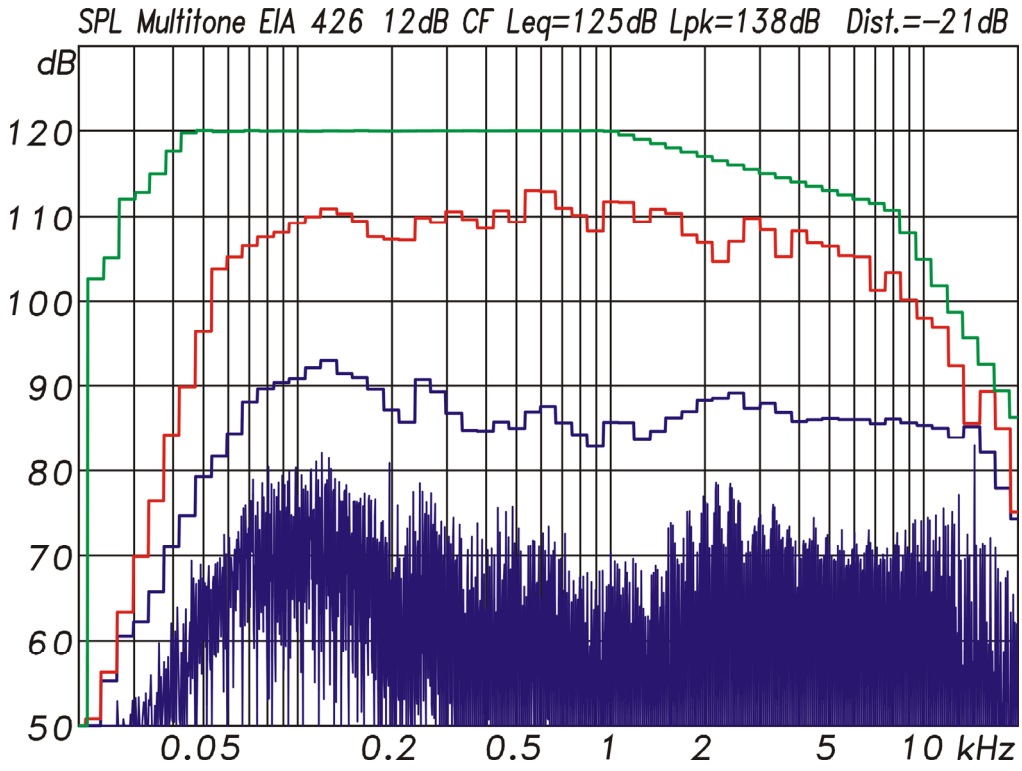


- 60 Sinussignale
- Spektrale Gewichtung hier entsprechend EIA-426B
- Zufallsphase
- Zeitsignal mit einem Crestfaktor (Spitzenwert zu Effektivwert) von 4 entsprechend 12 dB
- Einfache Auswertung über Subtraktion der Spektrallinien aus dem Anregungssignal

Intermodulationsverzerrungen



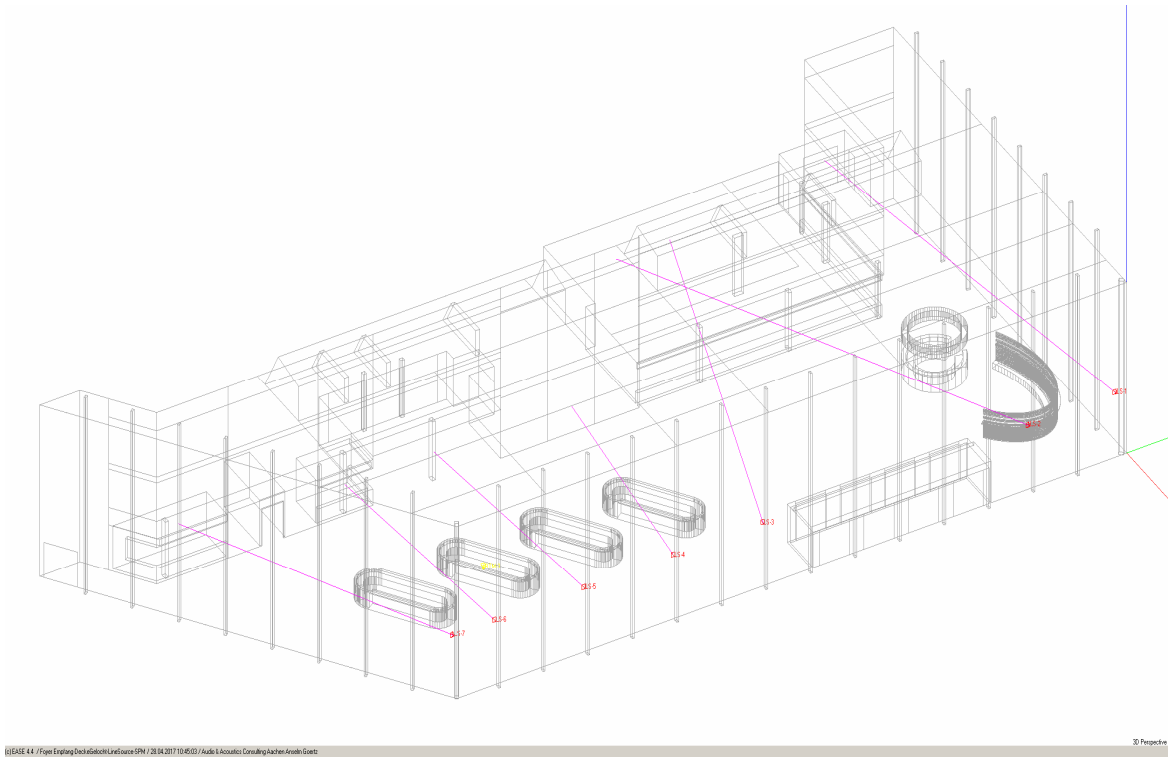
Intermodulationsverzerrungen



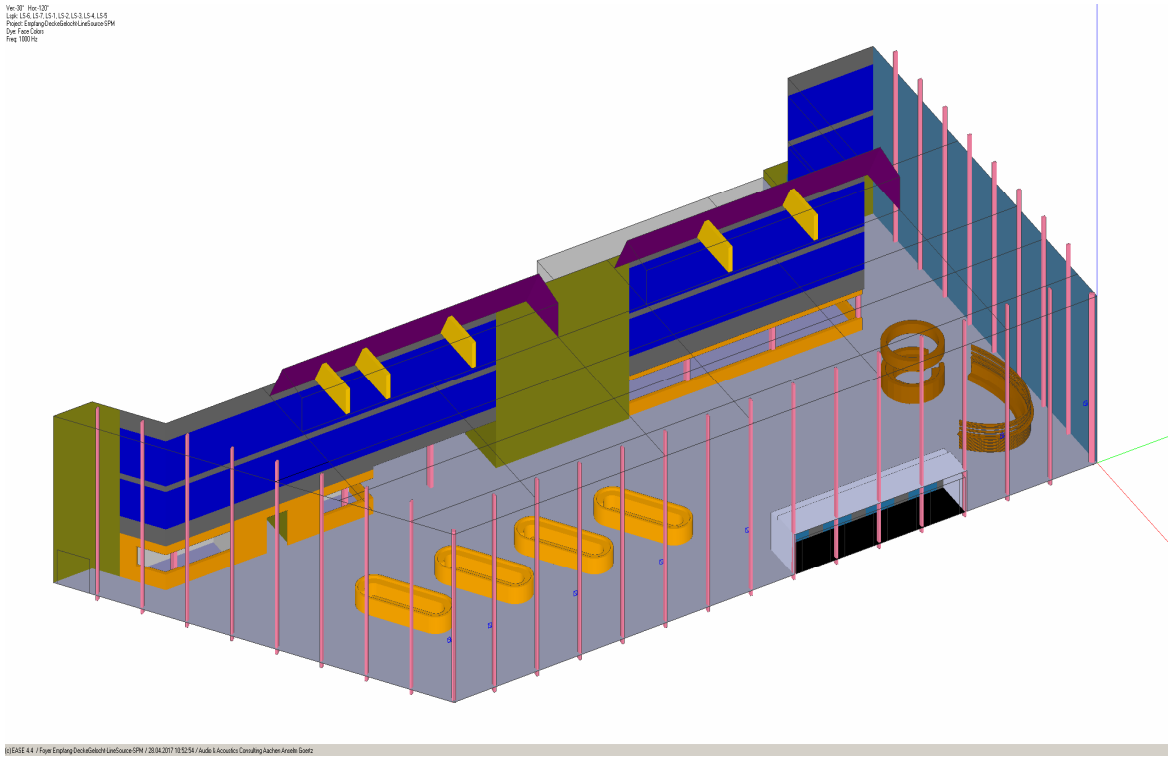
Beispiel mit Simulation

- Großer Empfangsraum mit ca. 22.300 m³ Volumen
- Grundfläche ca. 1.780 m²
- Deckenhöhe ca. 12 m
- Viele Glasflächen und Steinfußboden
- Bis zu 2.400 Personen

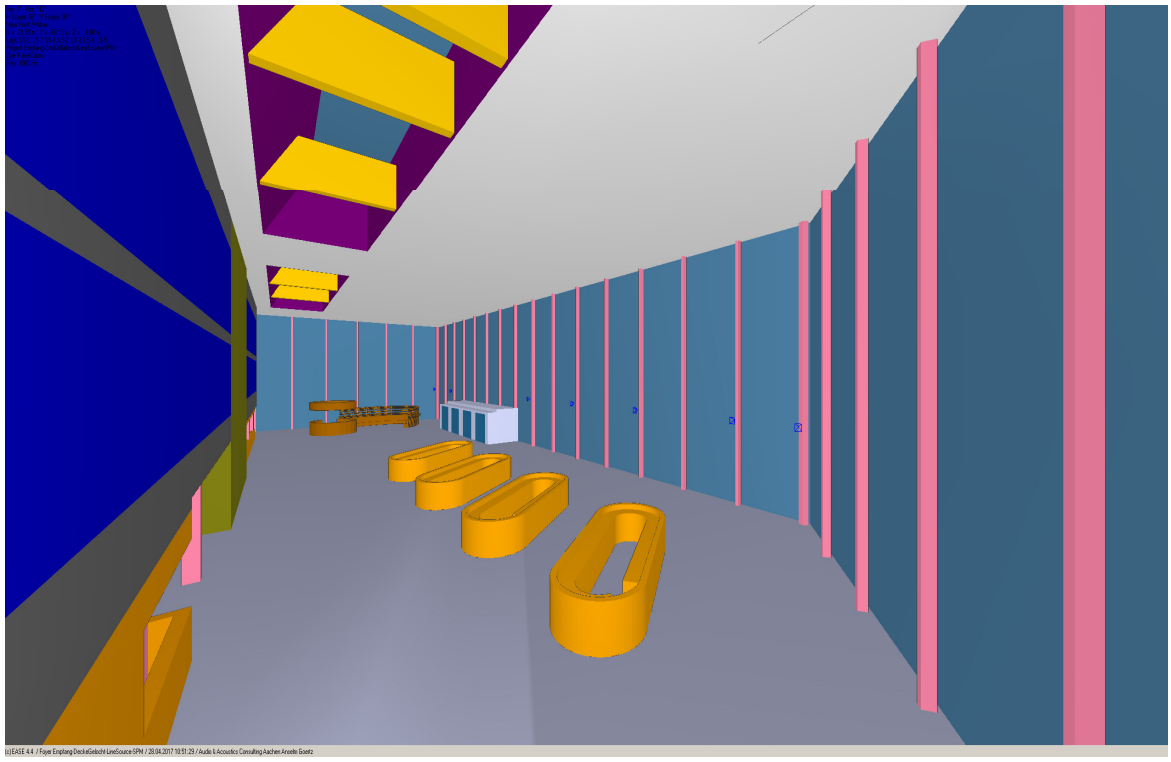
EASE Raummodell



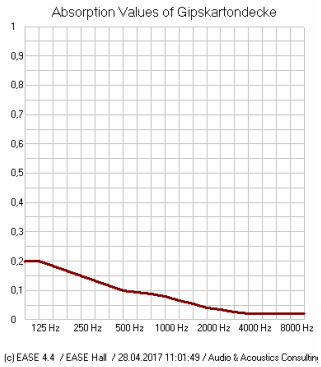
EASE Raummodell

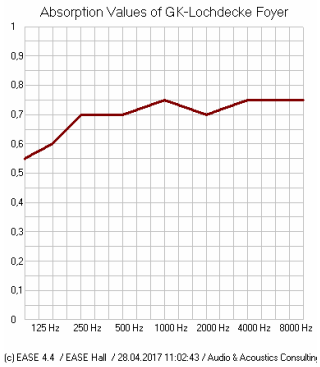


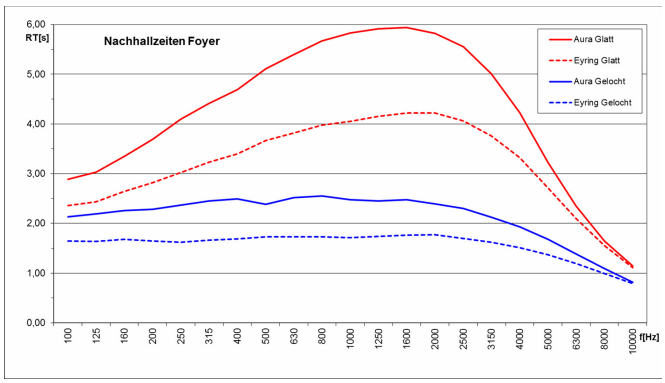
EASE Raummodell



Prognose der Nachhallzeiten



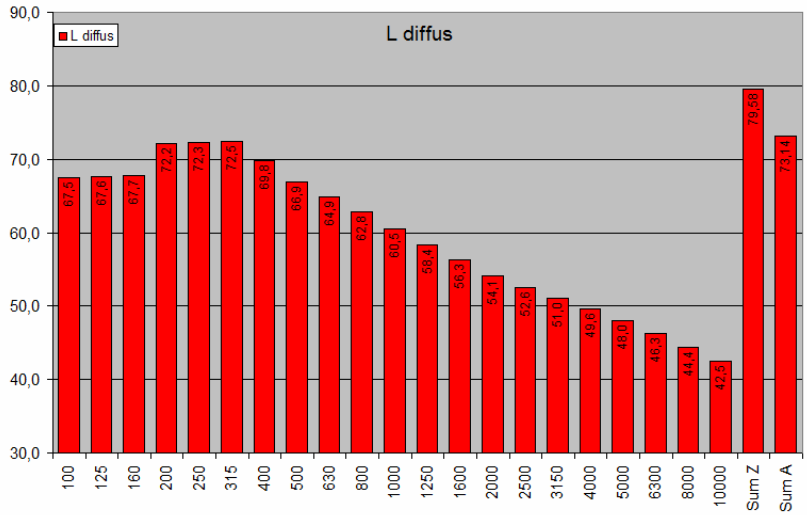




- Einfache Abschätzung der Nachhallzeit nach Eyring oder Sabine
  - Schnelle und einfache Berechnung mit Tabellenkalkulation
  - Liefert bei ungleichmäßiger Verteilung der absorbierenden Flächen ungenau Ergebnisse
- Genauere Berechnung mittels AURA als simulierte Nachhallzeitmessung
  - Kombinierte Spiegelquellen und Strahlenverfolgung
  - Relativ lange Rechenzeit
  - Liefert genauere Ergebnisse
- Berechnung für eine geschlossene GK Decke und für eine gelochte GK Decke mit MW Auflage

Prognose des Störpegels

- 1200 Personen sprechen in mittlerer Lautstärke
- Schallleistung pro Person L_{WAeq} = 68 dB (entspricht ca. 63 dBA DSPL)
- Raumvolumen ca. 22.300 m³
- Mittlere Nachhallzeit ca. 2,4 s



$$L = L_W - 10 \cdot \lg\left(\frac{V/m^3}{T/s}\right) + 13{,}88\,dB$$

Störpegel bei RT = 2,4 s:

80 dBZ

73 dBA

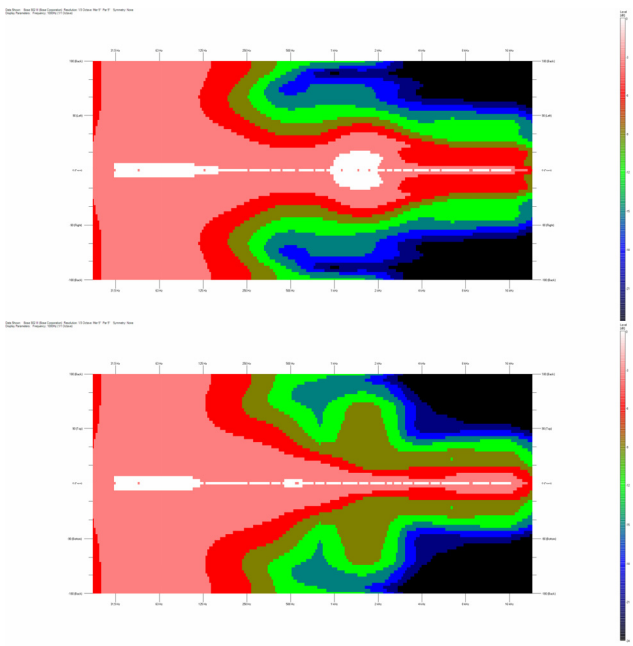
Störpegel bei RT = 5,2 s:

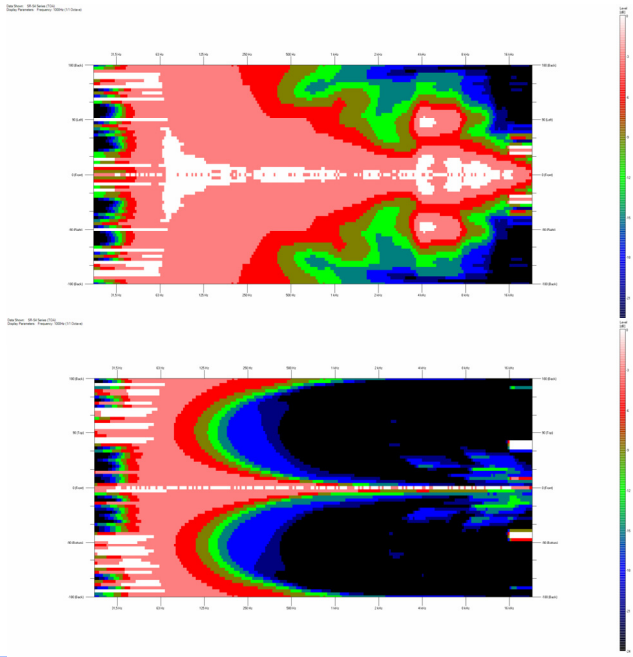
82 dBZ

76 dBA

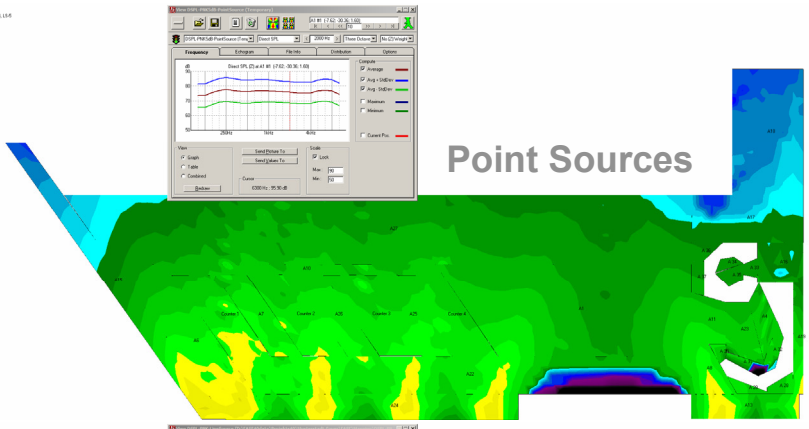
Auswahl der Lautsprecher

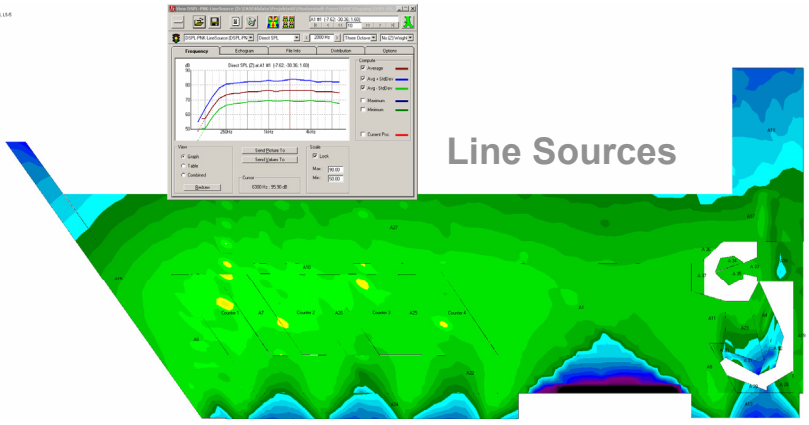
- Point Source
  - klassische kompakte PA Box
  - hor. und ver. Isobaren
- Line Source
  - Strahlerzeile 2m Länge gekrümmt
  - hor. und ver. Isobaren





Direktschallpegel Mapping

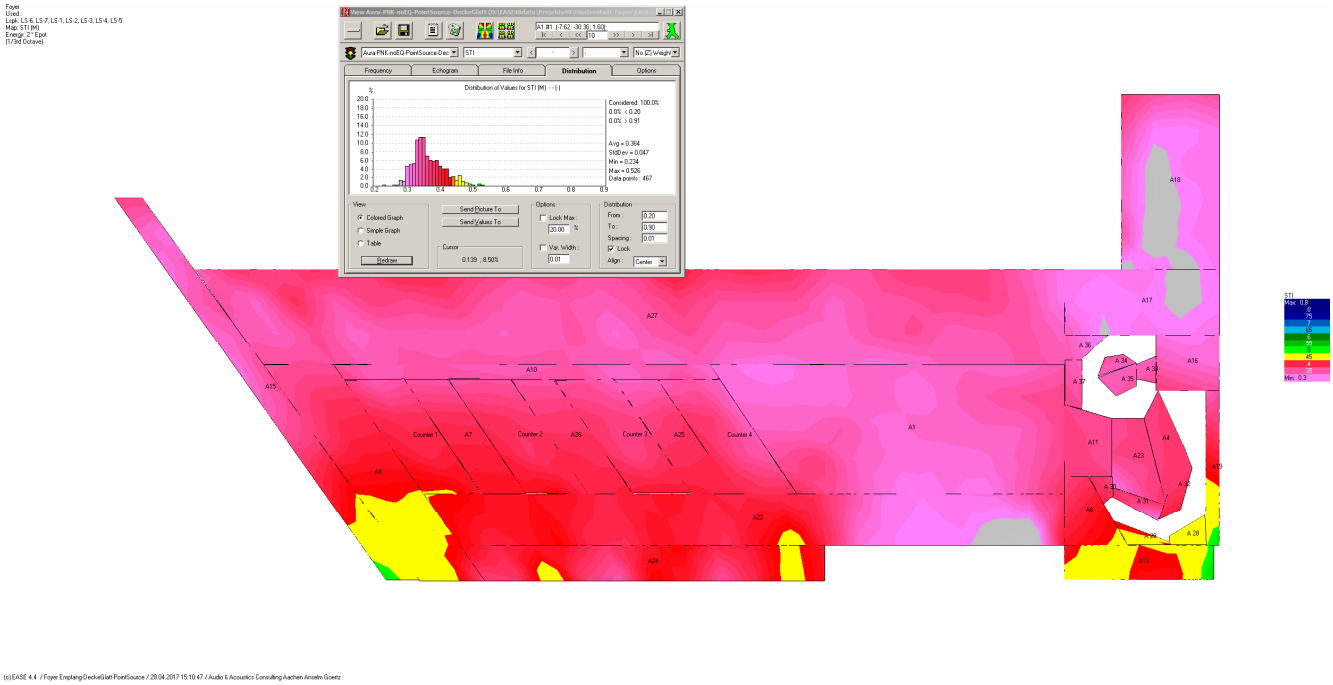




- Wichtiger Frequenzbereich der Oktaven von 1, 2 und 4 kHz
- Exciter: Pinknoise
- Mapping als Summenpegel der drei Oktavbänder
- Gleichmäßigkeit der Abdeckung als Kriterium
- Auflösung: 1 m

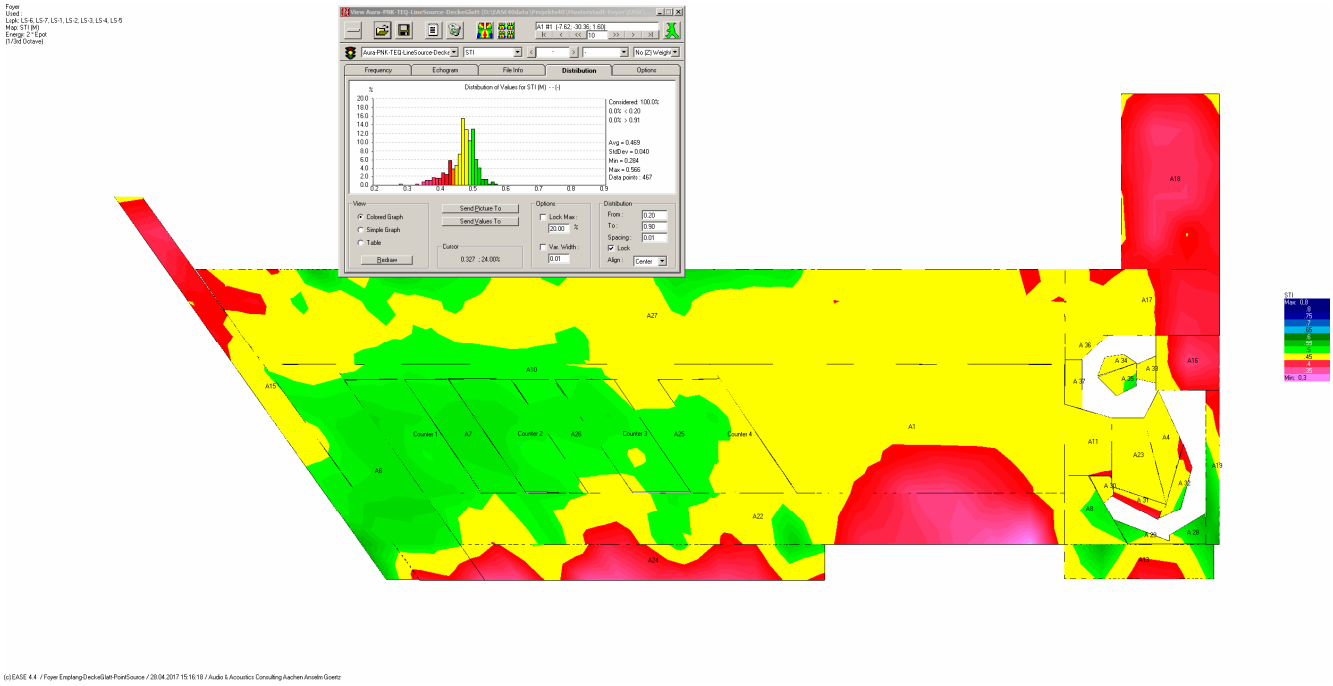
Sprachverständlichkeit

- Decke glatt und Point Source Lautsprecher
- $STI_{MW\text{-}STABW}$ = 0,36 - 0,05 = 0,31 (ohne Masking und ohne S/N)



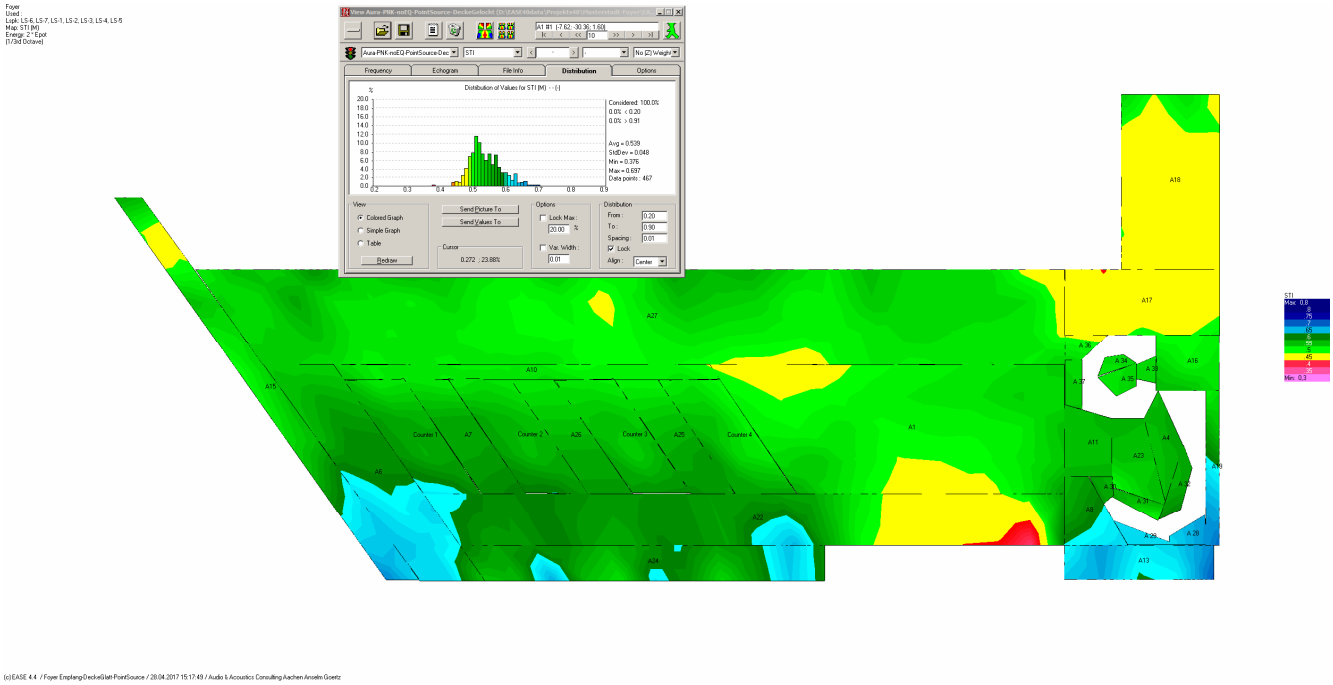
Sprachverständlichkeit

- Decke glatt und Line Source Lautsprecher
- $STI_{MW\text{-}STABW}$ = 0,47 - 0,04 = 0,43 (ohne Masking und ohne S/N)



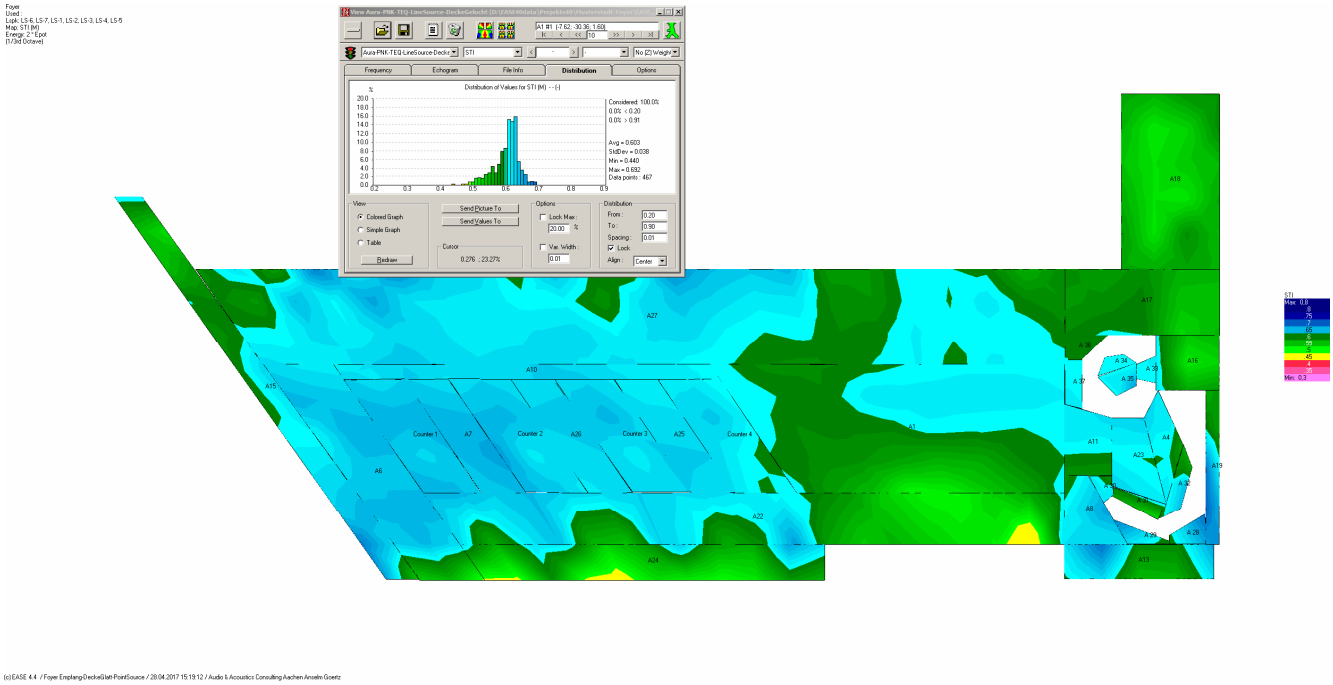
Sprachverständlichkeit

- Decke gelocht und Point Source Lautsprecher
- $STI_{MW\text{-}STABW}$ = 0,54 - 0,05 = 0,49 (ohne Masking und ohne S/N)



Sprachverständlichkeit

- Decke gelocht und Line Source Lautsprecher
- $STI_{MW\text{-}STABW}$ = 0,60 - 0,04 = 0,56 (ohne Masking und ohne S/N)

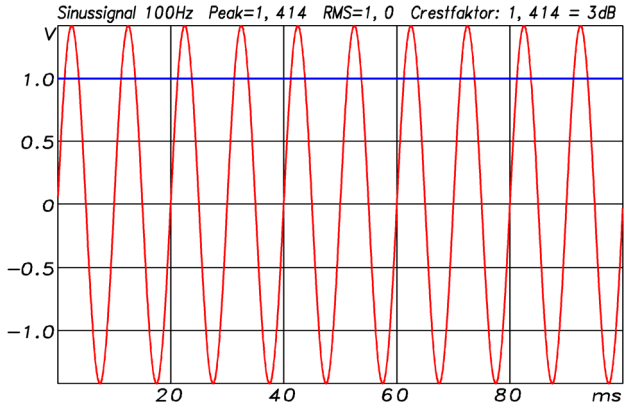


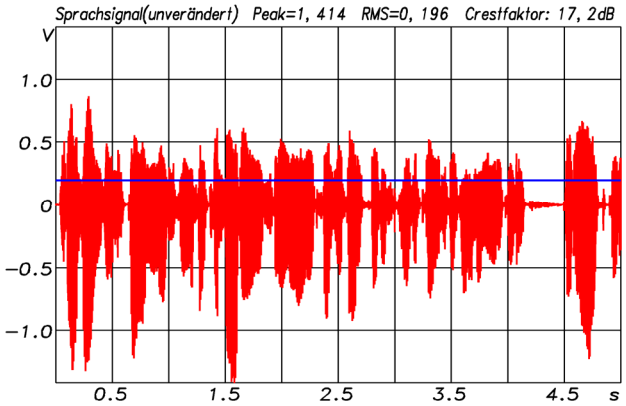
Was bedeutet der Crestfaktor ?

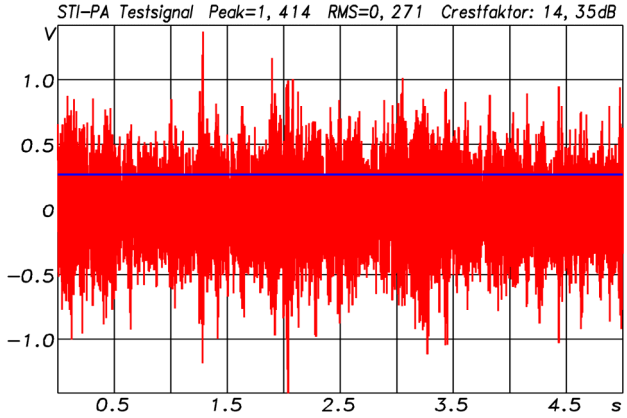
- Auf elektrischer Seite gibt es die Spannung als Spitzenwert und als Effektivwert entsprechend einem Spitzenwert oder Mittelwert der elektrischen Leistung.
- Auf akustischer Seite gibt es zum Effektivwert der Spannung einen vergleichbaren L_{eq} Schalldruckwert (SPL) (Energieäquivalenter Dauerschallpegel)
- Beispiel Lautsprecher (100V/200W) Lautsprecher erreicht bei $100V_{eff}$, respektive 200 W Leistung in 1 m Abstand einen SPL von 117 dB
- Wann wird eine mittlere Leistung von 200 W erreicht ?

- Crestfaktor:
  Verhältnis in einem Signal vom Spitzenwert zum Effektivwert (Peak/RMS)
- Crestfaktoren:
  - Sinussignal: 3 dB
  - Sprache: 12 - 20 dB
  - STIPA Testsignal: **12** - 14 dB
  - Musik: 9 - 20 dB
  - Rechteck: 0 dB
- Beispiel 100 V System
  - Verstärker 141 V_{pk} max. und 100 V_{eff}
  - CF 3 dB: LS erhält 200 $W_{avg.}$
  - CF 12 dB: LS erhält 25 $W_{avg.}$
  - Pegelverlust im L_{eq} von 9 dB gegenüber dem rechnerischen Wert bei 200 W

Messbare Schalldruckwerte



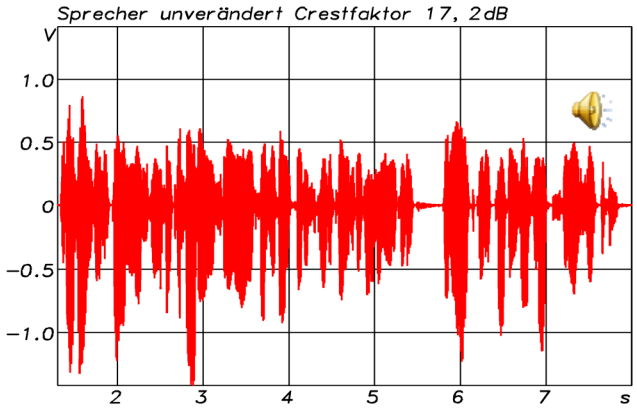


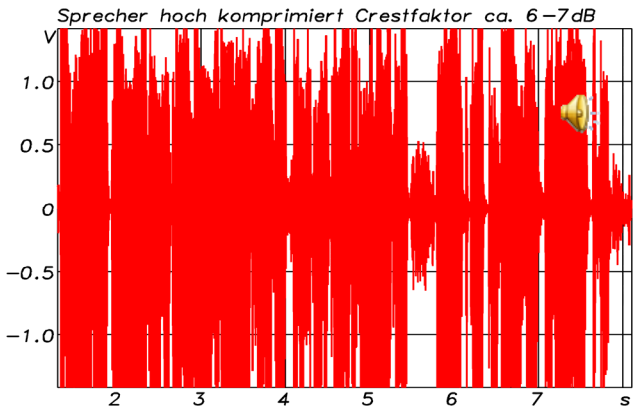


- SPL Messwerte des Muster Lautsprechers bei Vollaussteuerung des 100V/200W Verstärkers bis zur Clipgrenze:
  - mit Sinussignal: 117 dB
  - mit STI-PA Testsignal: 106 dB
  - mit Sprache: 103 dB
- Messung der Pegelwerte für die STI Berechnung immer als **lin.-bew.** L_{eq} für die Oktavbänder von 125 – 8k
- **Exciter: Sprachersatzrauschen** (z.B.: STI-PA Noise)

Auswege !?

- Größere Verstärker:
  - Um ein Signal mit 12 dB Crestfaktor mit 200 W RMS Leistung unverzerrt zu übertragen, wäre ein Verstärker mit 1600 W Leistung erforderlich !
  - ... unverhältnismäßig !
- Alternative: Signal komprimieren
- Zielwert: Crestfaktor 6 dB
- Der messtechnisch erreichbare Wert ist dann nur noch 3 dB geringer als der Wert aus der Simulation.
- Theoretischer Verlust im STI-Wert durch die Kompression von 1 auf 0,89





Signalkompression bei der STI Messung ?

F.8 Maximaler Schalldruckpegel

Zur Bestimmung des bei Brandfalldurchsagen erreichbaren Maximalpegels ist wie folgt vorzugehen:

– In die SAA ist ein Testsignal (Rauschen) einzuspeisen, dessen Frequenzspektrum und Crest-Faktor einem typischen Sprachsignal entspricht. Für das Frequenzspektrum sind hierbei die Vorgaben aus DIN EN 60268-16 zu berücksichtigen. Der Crest-Faktor (Verhältnis Spitzenwert zu Effektivwert) sollte etwa 12 dB betragen.

– Die Sprachalarmanlage ist auf die maximal mögliche Lautstärke einzustellen, wobei sich die SAA im Brandfallbetrieb befindet.

– Zur Ermittlung eines Nutzsignalspektrums (zum Zweck einer Korrektur nach F.6) ist mit Hilfe geeigneter Oktavbandfilter der unbewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel in den einzelnen Frequenzbändern für mindestens 16 s an den repräsentativen Analysepunkten des Wirkungsbereichs zu bestimmen, wobei sich die SAA im Brandfallbetrieb befindet.

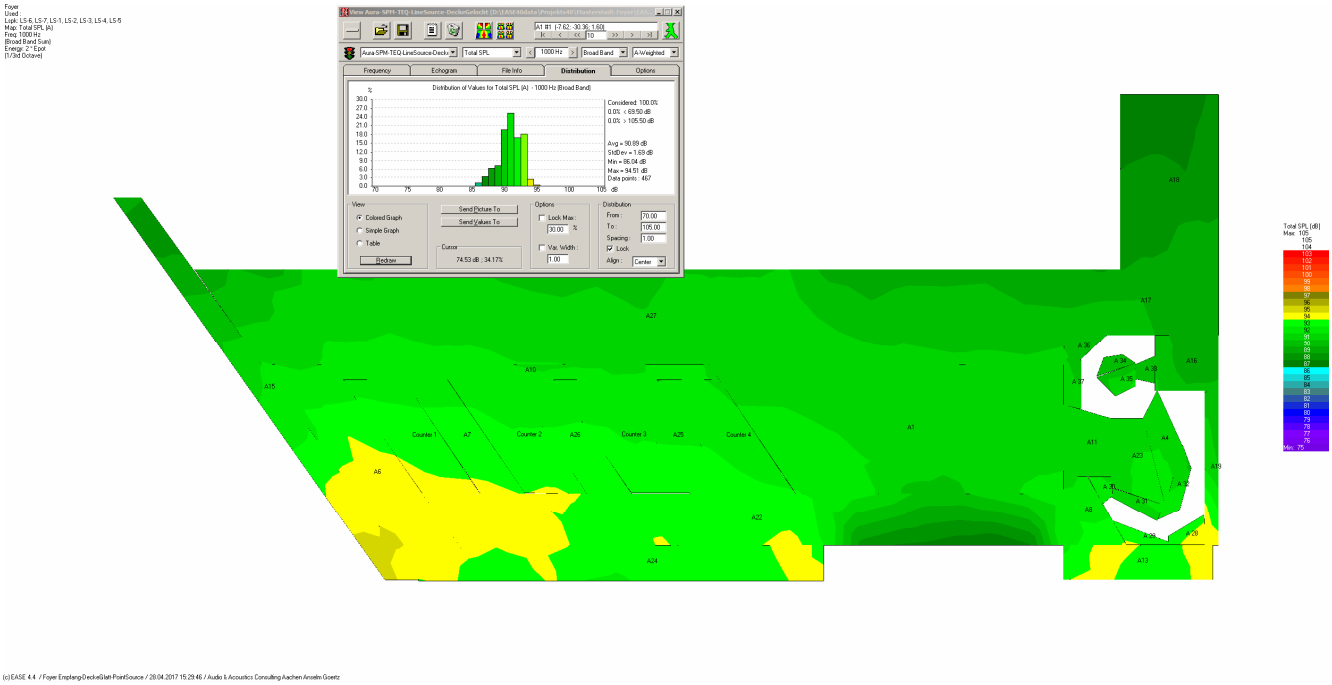
– Zur Ermittlung eines Einzahlenwertes ist der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel (L_{Aeq}) für mindestens 16 s an den repräsentativen Punkten des Wirkungsbereichs zu messen, wobei sich die SAA im Brandfallbetrieb befindet.

– Durch geeignete Dynamikbearbeitung (z. B. Kompressoren) ist es möglich, den Crest-Faktor eines Sprachsignals zu verringern. Auf diese Weise kann bei konstantem Spitzenpegel der äquivalente Dauerschallpegel und damit ggf. der Signal-Stör-Abstand und somit die Sprachverständlichkeit erhöht werden.
Verfügt die SAZ über eine entsprechende Signalverarbeitung, ist das Spektrum des maximalen Schalldruckpegels mit eingeschalteter Dynamikbearbeitung zu ermitteln.

ANMERKUNG: Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Bestimmung der Sprachverständlichkeit alle dynamikverändernden Elemente im Signalweg deaktiviert sein müssen, um Fehlmessungen zu vermeiden. Siehe auch F.4 sowie G.3.2.

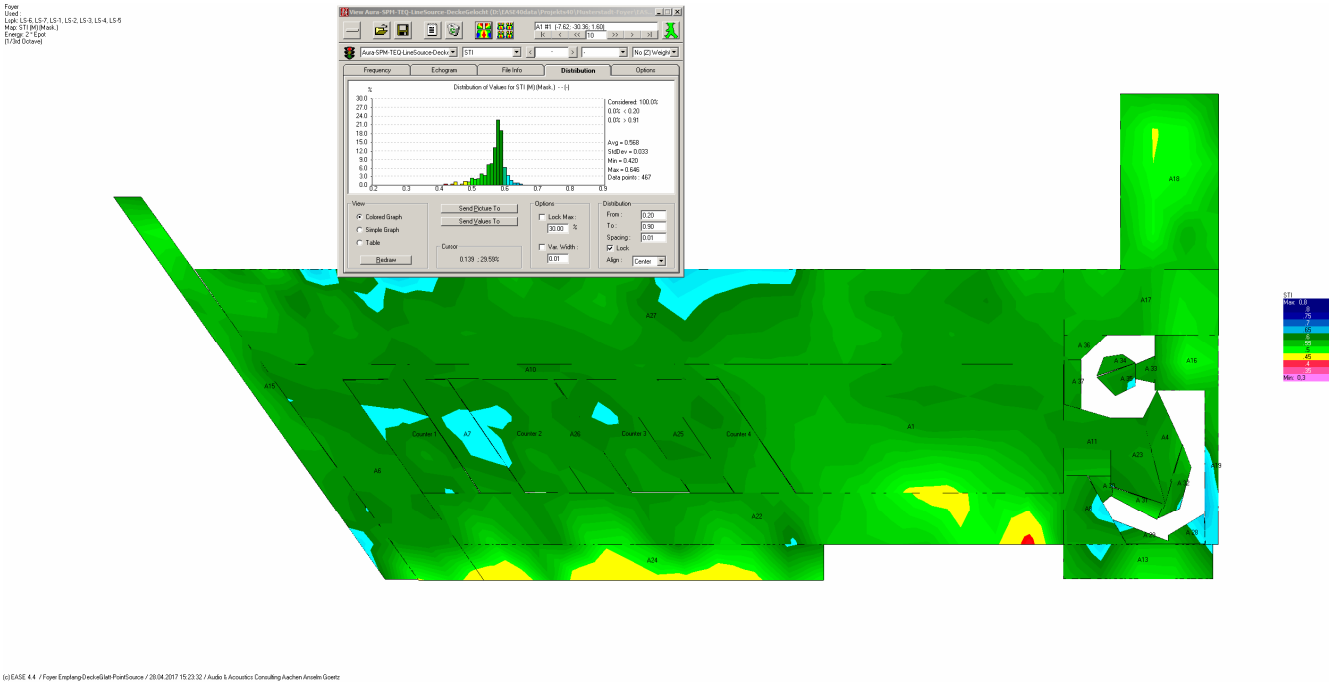
Gesamtschallpegel mit Sprache

- Exciter: male Speaker (60268-16) mit 12 dB Crestfaktor
- Mapping mit L_{Aeq}: Avg.: 91 dBA



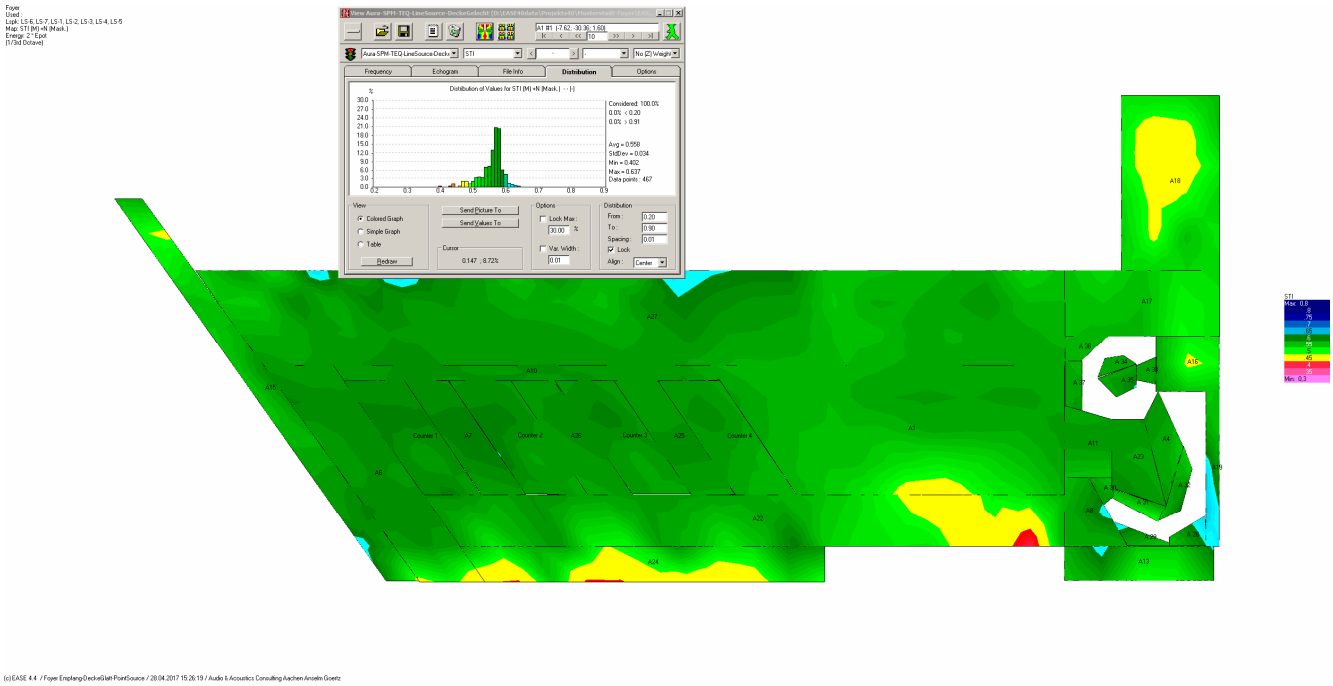
Sprachverständlichkeit

- Decke gelocht und Line Source Lautsprecher
- $STI_{MW\text{-}STABW}$ = 0,57 - 0,03 = 0,54 (mit Masking und ohne S/N) ; S = 91 dBA



Sprachverständlichkeit

- Decke gelocht und Line Source Lautsprecher
- $STI_{MW\text{-}STABW}$ = 0,56 - 0,03 = 0,53 (mit Masking und mit S/N) ; S = 91 dBA ; N = 73 dBA



Fehlerbetrachtung und Erfahrungen

- Fehlerabschätzung
  - Ungenauigkeiten der Lautsprecherdaten
  - <u>Fehlinterpretation der Lautsprecherdaten</u>
  - Abweichung in den Werten der Absorberflächen
  - Nicht alle Absorber sind dem Schallfeld hinreichend exponiert
  - Unzulänglichkeiten der Simulationsverfahren:
    - Beugung geht nicht ein
    - Streuung wird nur stark vereinfacht berücksichtigt
  - Durch eine Nachhallzeitmessung und die darauf basierende Anpassung des Simulationsmodells kann die Planungssicherheit verbessert werden, was aber häufig nicht möglich ist, wenn sich die Räumlichkeiten noch in der Bauphase befinden
- Erfahrungen
  - Pegelwerte werden bei richtiger Anwendung meist erreicht oder leicht übertroffen
  - STI Werte schwanken in einer Größenordnung von ±0,02
  - Bisher wurde meist eine gute Übereinstimmung erreicht.

Literaturempfehlungen

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

Stefan Weinzierl
Handbuch der Audiotechnik
Springer Verlag 2008

Andreas Simon
Fachkraft für Sprachalarm-
anlagen nach DIN 14675

Paper Download

www.ifaa-akustik.de

Manuskript zu diesem Vortrag mit Text und Grafiken als PDF File