



# Lärm von Beschallungsanlagen

## Prognose und Möglichkeiten der Lärminderung

Dr.-Ing. Axel Roy

Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH



# Gliederung

- Aufgabenstellung
- Vorgehensweise
- Emissionskenngrößen von Beschallungsanlagen
- Untersuchungen an Freiluftbühnen
- Untersuchungen an Freilichtkinos
- Schlussfolgerungen
- Maßnahmen zur Pegelminderung
- Ausblick



# Aufgabenstellung

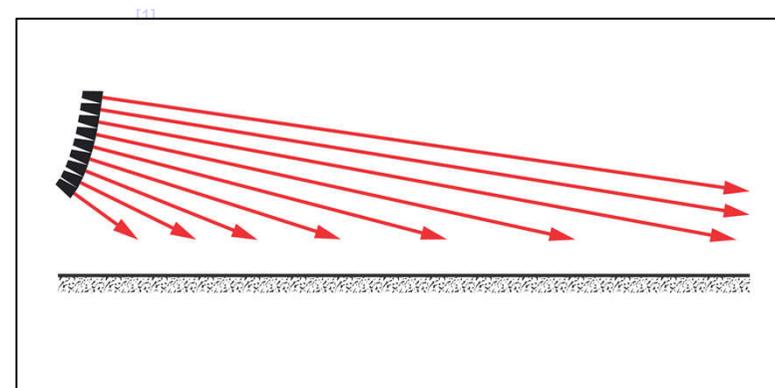
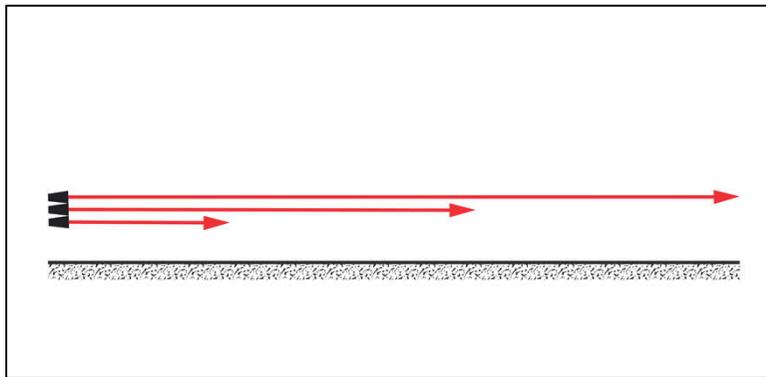
- Überprüfung und Aktualisierung der Sächsischen Freizeitlärmstudie (2006), Gebiet „Freiluftkonzerte“
- Einarbeitung aktueller Messdaten (eigen/fremd)
- Durchführung eigener Messungen 2017/2018
- Aktualisierung der Prognosealgorithmen
- Untersuchungen zu Freilichtkinos als neuer Geräuschquelle (Messdaten/Prognosealgorithmen)
- Betrachtung aktueller Beschallungstechnologien und Schallschutztechnik



# Vorgehensweise

- Signalkenngrößen aus Messungen im Nahfeld (innerhalb Anlagendimension)
  - Energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel  $L_{Aeq}$
  - 5s – Taktmaximal-Mittelungspegel  $L_{AFT5eq}$
  - Impulszuschlag  $K_I = L_{AFT5eq} - L_{Aeq}$
  - Scheitelmaß  $\Delta L_{max} = L_{AFmax} - L_{Aeq}$
  - Terzspektrum (arithmetisch gemittelt, normiert, A-bewertet)
- Richtwirkungsmaß aus Simulation
- Schalleistungspegel aus Ausbreitungsrechnung

# Richtwirkungsmaß von Line Arrays



Typische Anordnung von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays (links) sowie von hoch geflogenen Systemen (rechts) über ebenem Grund

# Richtwirkungsmaß

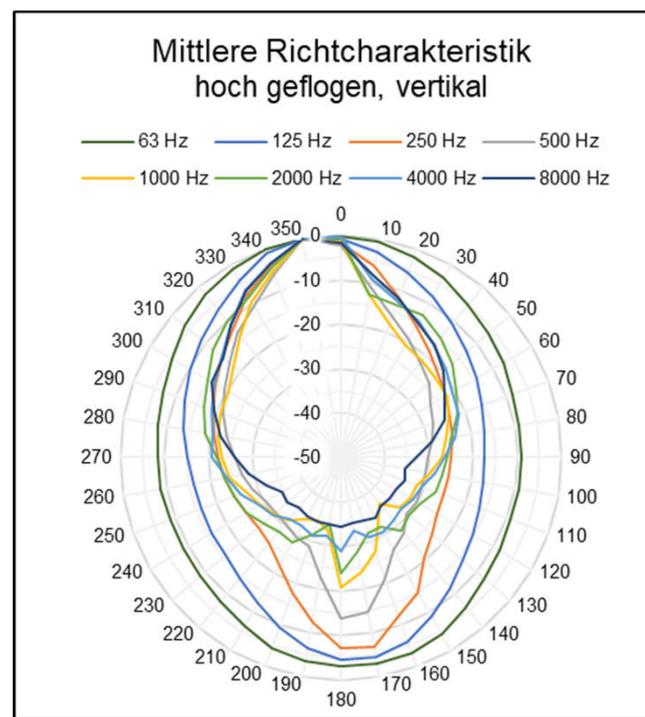
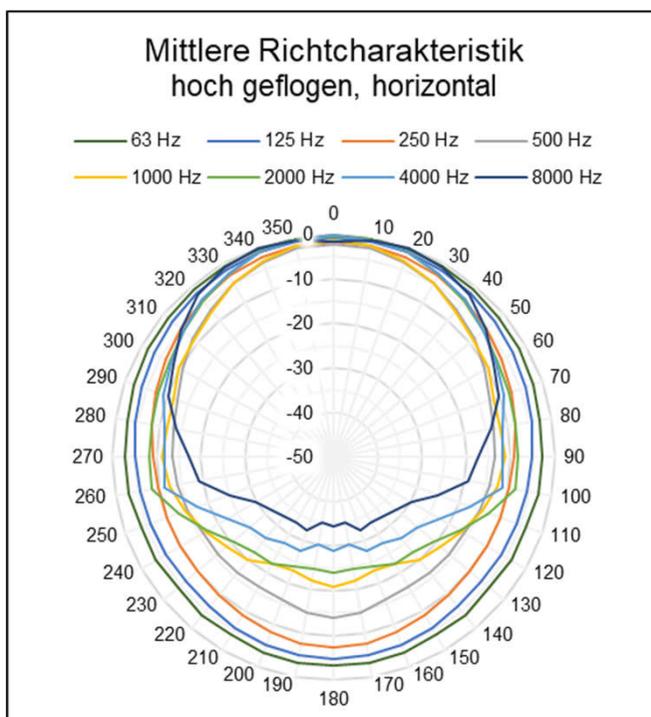
[1]

Hersteller	Modell	Anz.	Einsatz	$h_L$ /m	Winkelung $\rho$
d&b audiotechnik	Y-Serie	6	Freilichtkino	4,8	-2; -2; -3; -5; -10
Meyer Sound	M'elodie	9	Großbühne	4,8	-1; -1; -2; -2; -3; -5; -5; -7
Alcons Audio	LR18	10	Kleinbühne (Kl./Jazz/W.)	7,0	-0,5; -0,7; -0,7; -0,7; -1,4; -1,4; -1,9; -2,7; -3,7
L-Acoustics	K2	12	Großbühne	7,0	-0,25; -0,25; -1; -1; -1; -1; -2; -4; -5; -7,5; -7,5
d&b audiotechnik	J-Serie	16	Großbühne	10	-2; 0; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -2; -4; -5; -7; -7

**Daten der zur Modellierung verwendeten, hoch geflogenen Line Arrays**

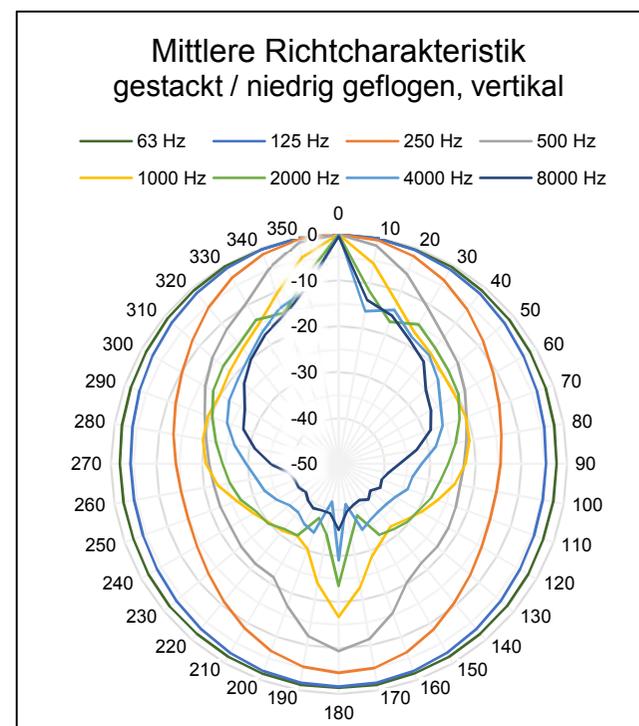
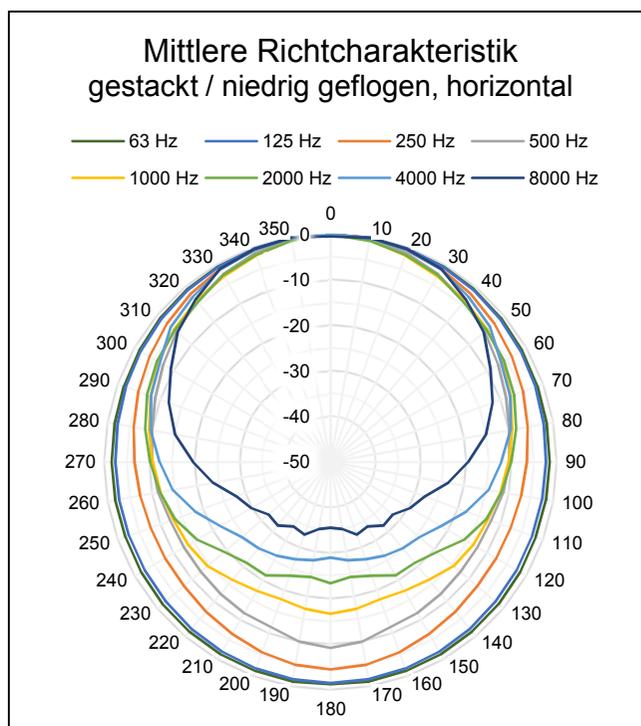


# Mittlere Richtcharakteristik von Line Arrays



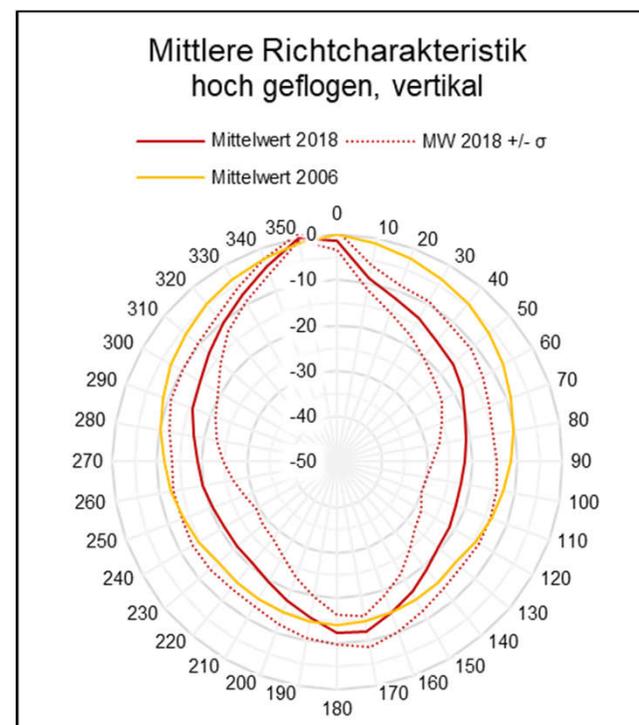
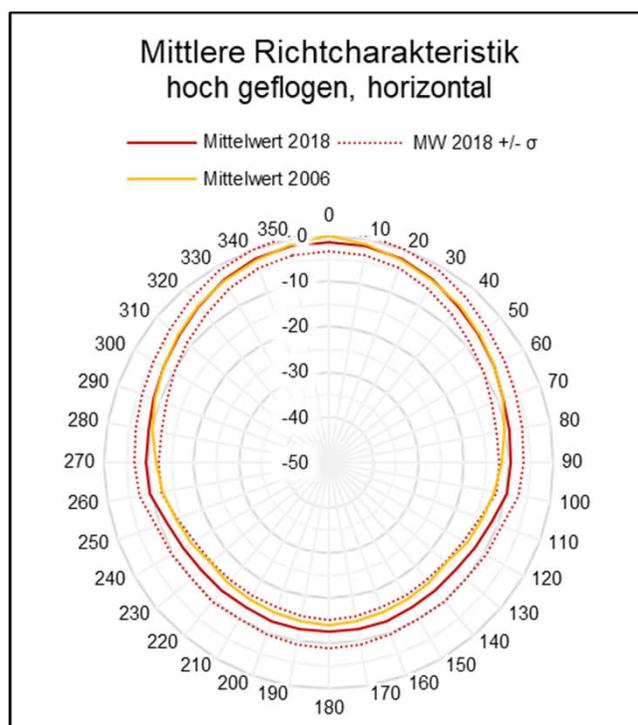
**Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von hoch geflogenen Line Arrays, oktavweise**

# Mittlere Richtcharakteristik von Line Arrays



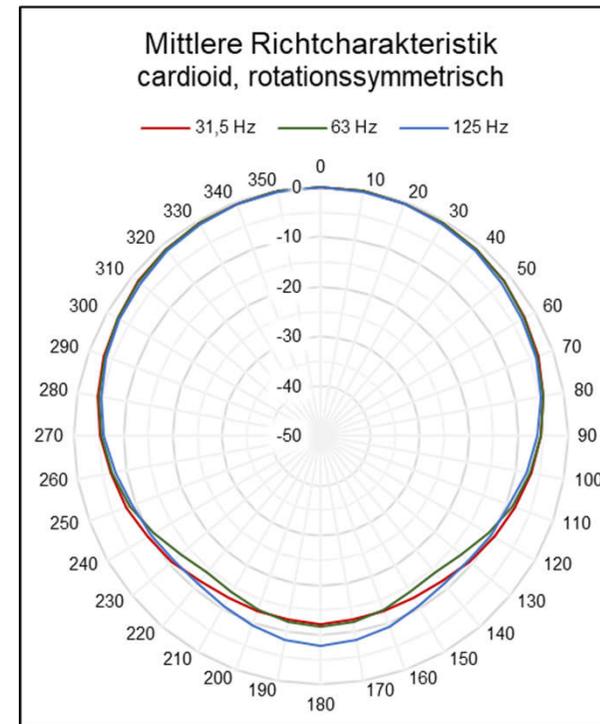
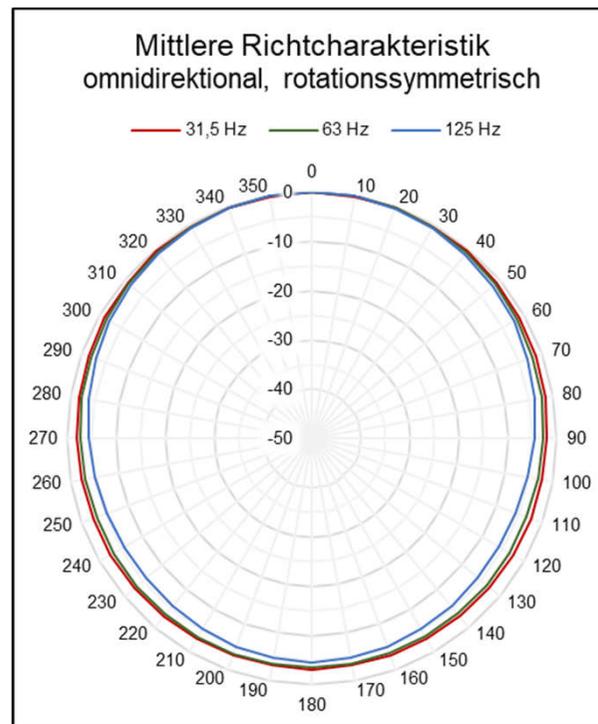
**Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von niedrig geflogenen / gestackten Line Arrays, oktavweise**

# Mittlere Richtcharakteristik von Line Arrays



**Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von Line Arrays (mit Standardabweichung), A-bewertet, Spektrum Großbühnen, im Vergleich zu den Werten der Sächsischen Freizeitlärmstudie (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2006)**

# Mittlere Richtcharakteristik von Subwoofern



**Simulierte mittlere rotationssymmetrische Richtcharakteristik von omnidirektionalen und Cardioid-Subwoofern, oktavweise**



# Untersuchungen an Freiluftbühnen

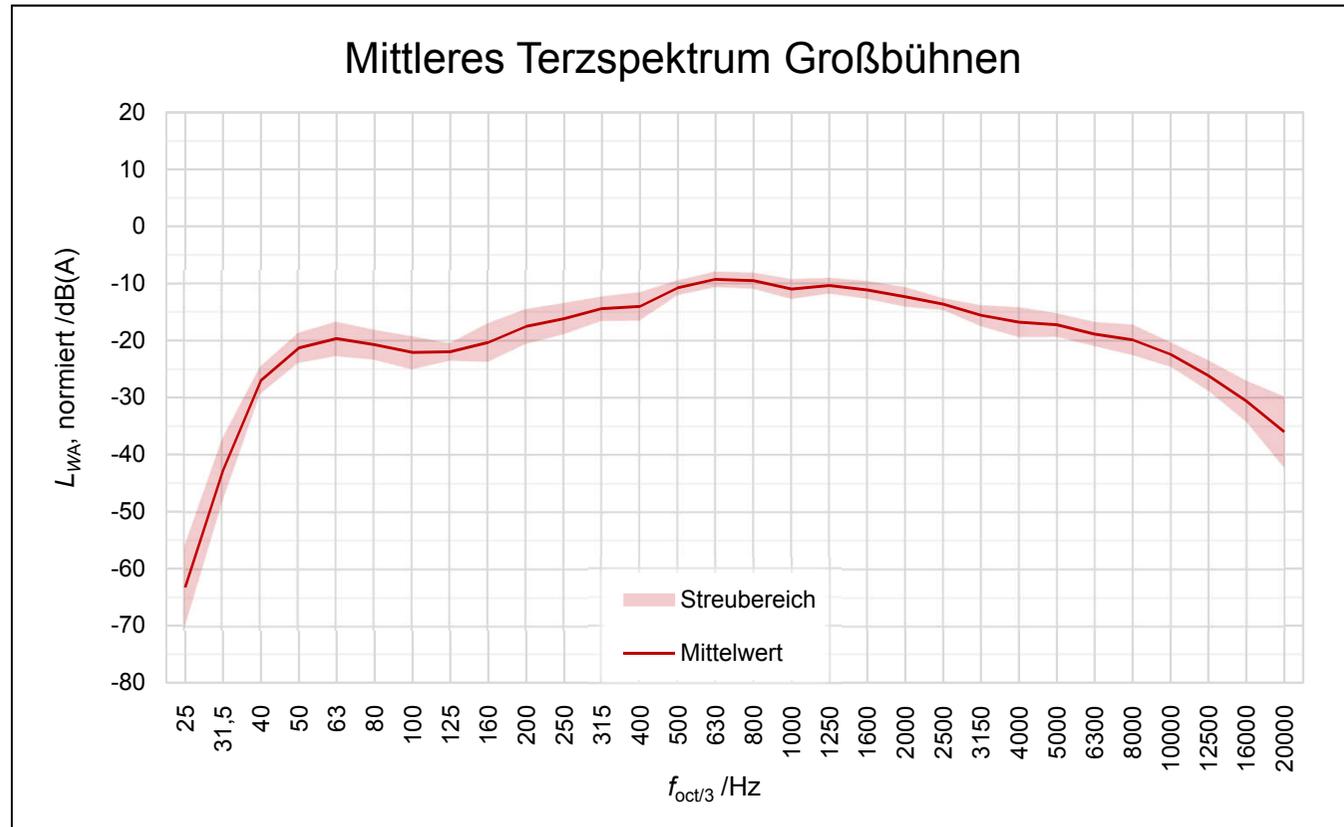
- Messdaten von 86 Konzerten auf insgesamt 33 Freiluftbühnen
- Zuschauerkapazität ca. 800 - 60000
- Zu beschallende Fläche ca. 250 m<sup>2</sup> – 15000 m<sup>2</sup>
- Messorte meist im Bereich des entferntesten Hörerplatzes oder FOH
- Kontrollmessungen in größeren Abständen, z.T. auch hinter der Bühne
- Pegelaufzeichnung in der Regel über gesamte Konzertdauer (mit Titelpausen, Vorbands extra untersucht)



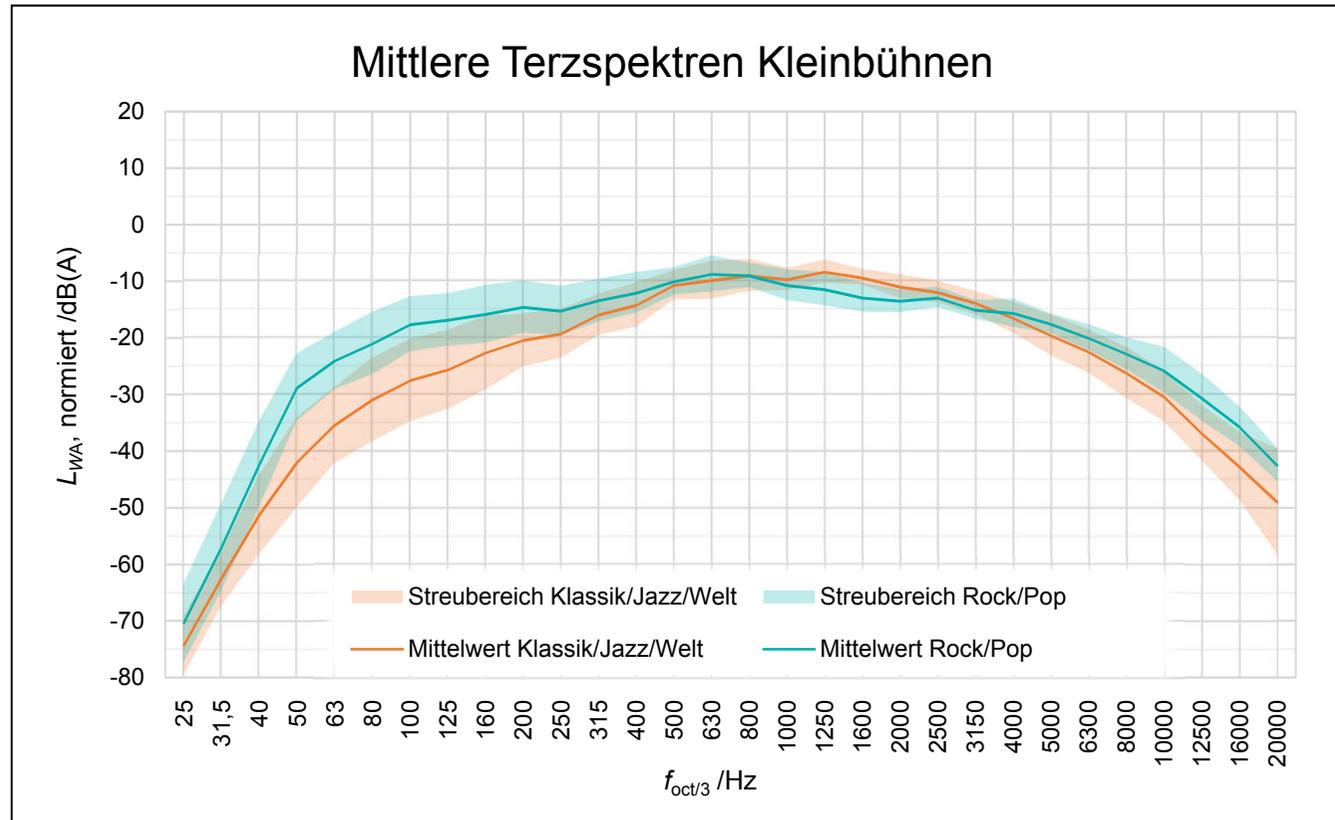
Foto: PAN GmbH

# Signalkenngrößen von Freiluftbühnen

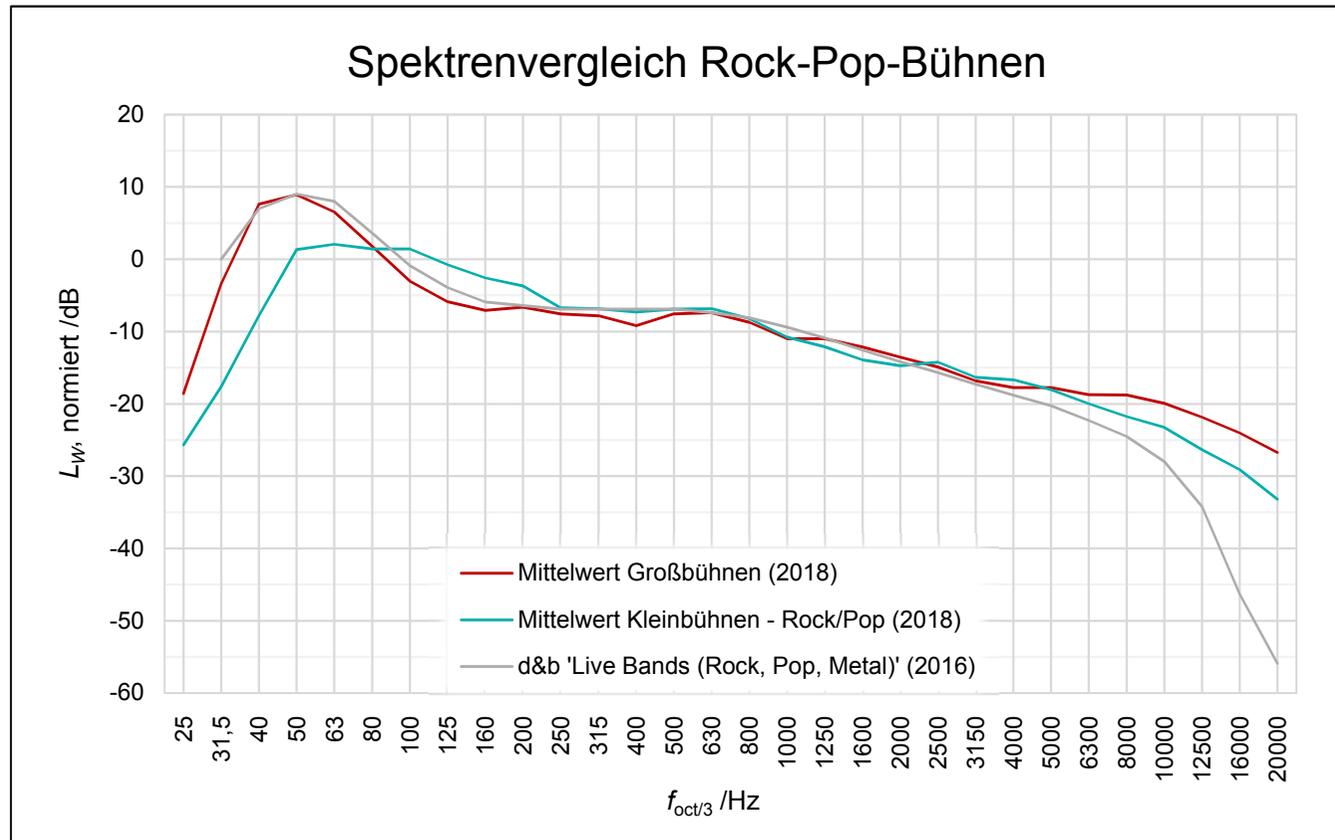
Kenngröße	Großbühnen			Kleinbühnen	Klassikbühnen
	Main Acts	Vorgruppen	Moderation & Musik (Comedians)		
$\overline{L_{VA,min}}$ /dB(A)	93,0	88,7	79,1	85,1	74,8
$\sigma$ /dB	3,0	4,1	0,7	4,2	3,1
$\overline{K_1}$ /dB	4,6	4,2	6,8	4,8	5,0
$\sigma$ /dB	1,3	1,3	0,6	0,7	0,9
$\overline{\Delta L_{Amax}}$ /dB	12,8	12,6	23,0	12,6	17,0
$\sigma$ /dB	2,1	3,5	3,8	3,5	2,2
$\overline{L_{Ceq} - L_{Aeq}}$ /dB	12,6	12,9	7,2	7,7	3,8
$\sigma$ /dB	2,5	4,8	3,0	3,3	2,9
Anz. Messungen	47	18	4	33	7



**Mittleres Terzspektrum für Großbühnen, Mittelwerte und Standardabweichungen von 47 Konzerten (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)**



**Mittlere Terzspektren für Kleinbühnen – Rock/Pop, Klassik/Jazz/Welt, Mittelwert von 40 Konzerten (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)**



**Vergleich des 2017 für Großbühnen ermittelten Terzspektrums mit dem bis 2008 bestimmten Rock-Pop-Spektrum (unbewertet, auf  $L_{Aeq} = 0$  dB normiert)**

# Prognose des Schalleistungspegels

## Klein- und Großbühnen (außer Klassikbühnen)

$$L_{WA} = L_{VA,min} + 8 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\text{m}^2}\right) \text{ dB} + K_G$$

$L_{VA,min}$       *Mindest-Versorgungspegel in dB(A)*

$L_{VA,min} = 93 \text{ dB(A)}$  (Großbühnen)

$L_{VA,min} = 86 \text{ dB(A)}$  (Kleinbühnen unter ca. 1000 Besucher/500 m<sup>2</sup>)

$A$               *zu beschallende Fläche in m<sup>2</sup>*

$K_G$              *Genrekorrektur in dB*

$K_G = -4 \text{ dB}$  (Genrekategorie 1: Jazz, verstärkte akustische Instrumente)

$K_G = +0 \text{ dB}$  (Genrekategorie 2: Pop, klassische Rockmusik)

$K_G = +4 \text{ dB}$  (Genrekategorie 3: Elektro, Techno, Hip-Hop)

*Standardabweichung der Differenz Prognose-Messung:  $\sigma = 2,8 \text{ dB}$*



# Prognose des Schalleistungspegels

## Klassikbühnen

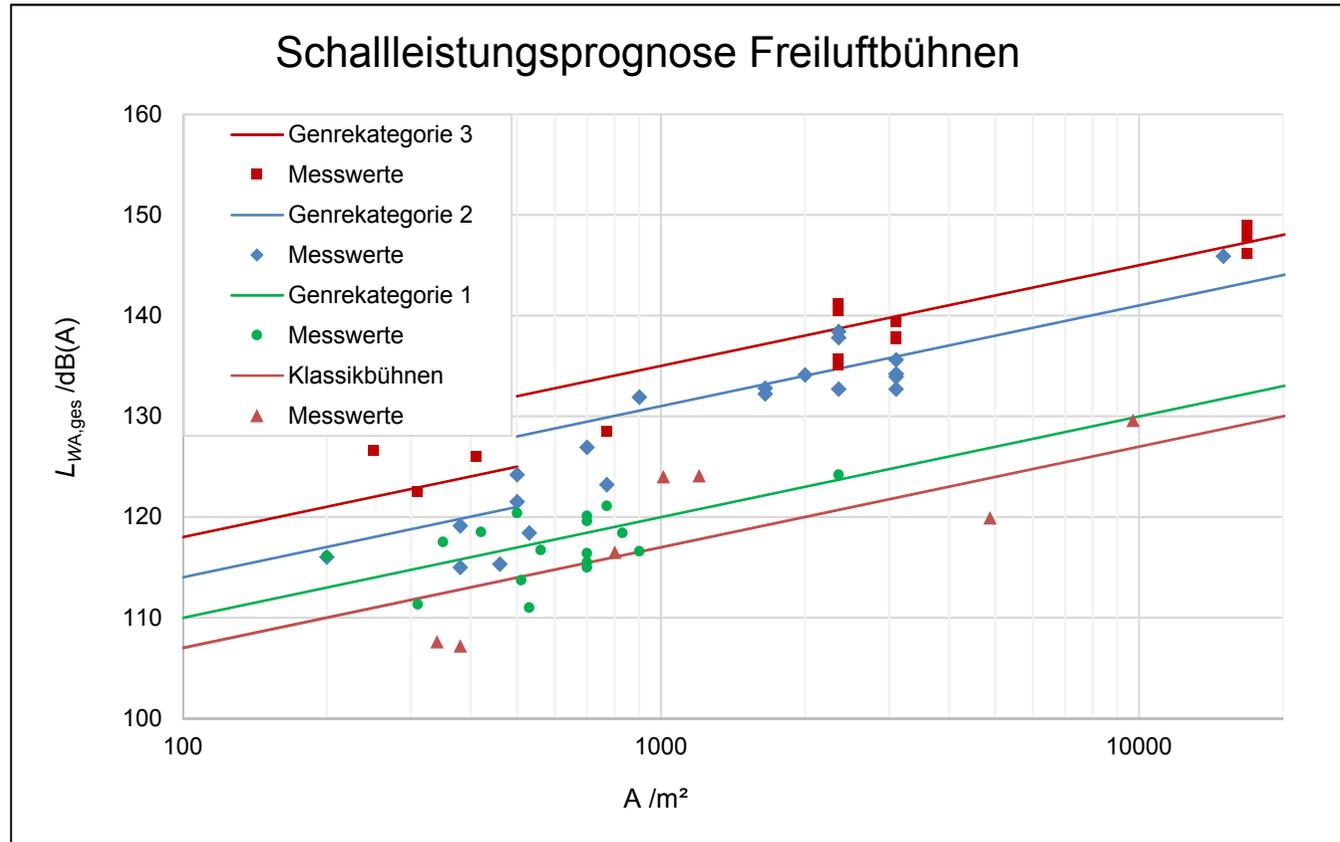
$$L_{WA} = L_{VA,min} + 12 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\text{m}^2}\right) \text{ dB}$$

$L_{VA,min}$       *Mindest-Versorgungspegel in dB(A)*

$L_{VA,min} = 75 \text{ dB(A)}$  (Klassikbühnen)

$A$               *zu beschallende Fläche in m<sup>2</sup>*

*Standardabweichung der Differenz Prognose-Messung:  $\sigma = 5,6 \text{ dB}$*



**Prognosegeraden für den Schalleistungspegel der drei untersuchten Genrekategorien auf Klein- und Großbühnen sowie der untersuchten Klassikbühnen im Vergleich zu aus Messungen ermittelten Werten**

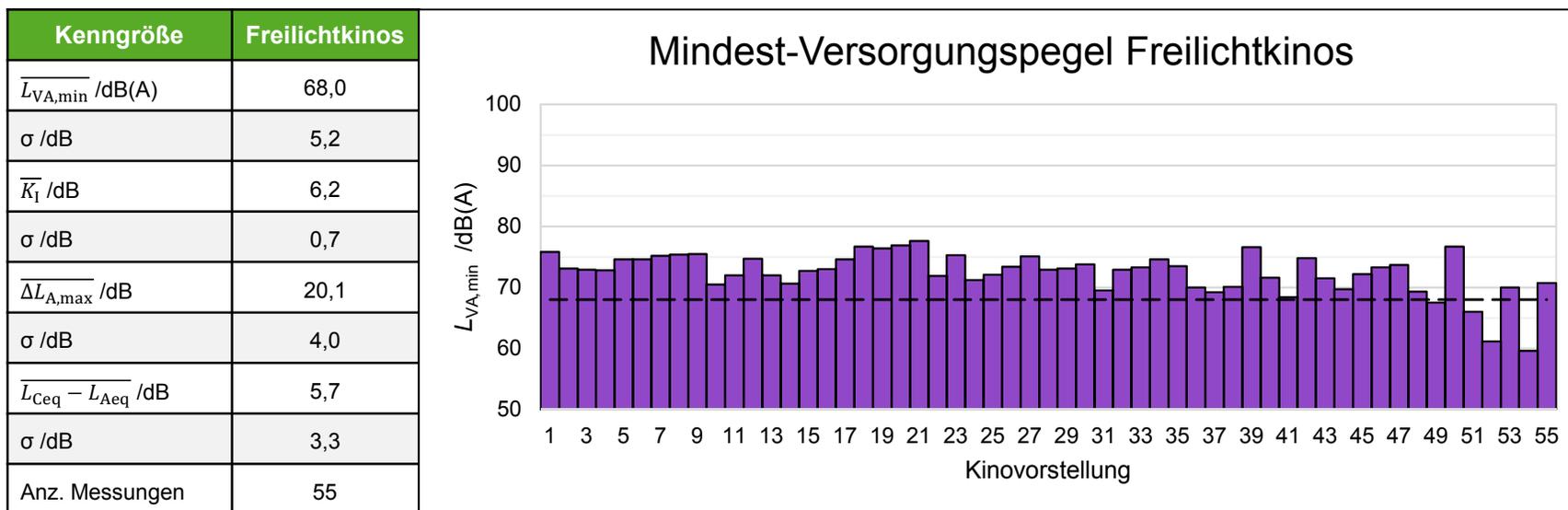


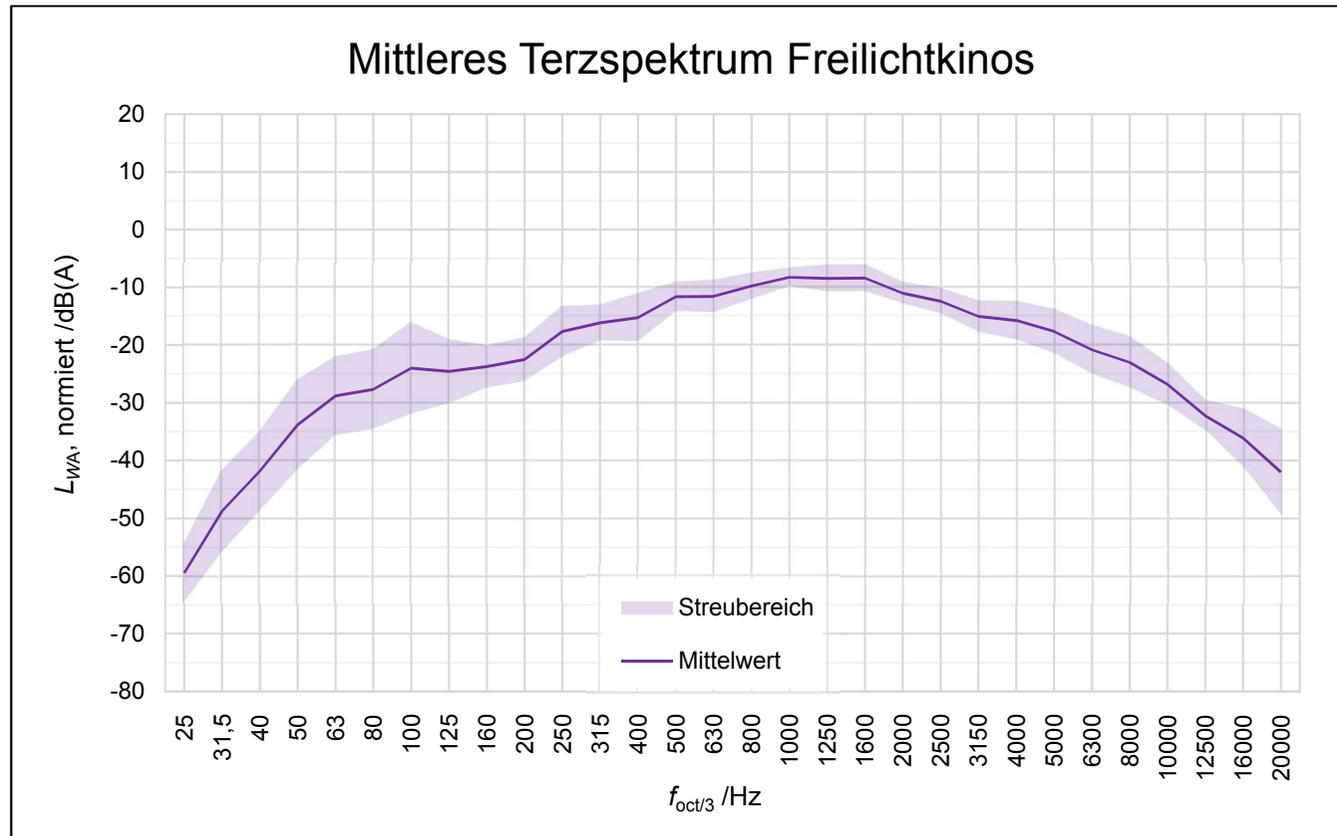
# Untersuchungen an Freilichtkinos

- Messdaten von 55 Vorstellungen an insgesamt 9 Aufführungsstätten
- Beschallung der 2 größten Aufführungsstätten mit Line Arrays, sonst einfache Punktquellen-Lautsprecher
- Zuschauerkapazität: 100 – 4400
- Zu beschallende Fläche: 50 m<sup>2</sup> – 2200 m<sup>2</sup>
- Alle 2017/2018 durch eigene Messungen gewonnen
- Messorte meist im Bereich des entferntesten Hörerplatzes



# Signalkenngrößen von Freilichtkinos





Terzspektrum für Freilichtkinos, Mittelwerte und Streubereich von 55 Vorstellungen (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)



# Prognose des Schalleistungspegels

## Freilichtkinos

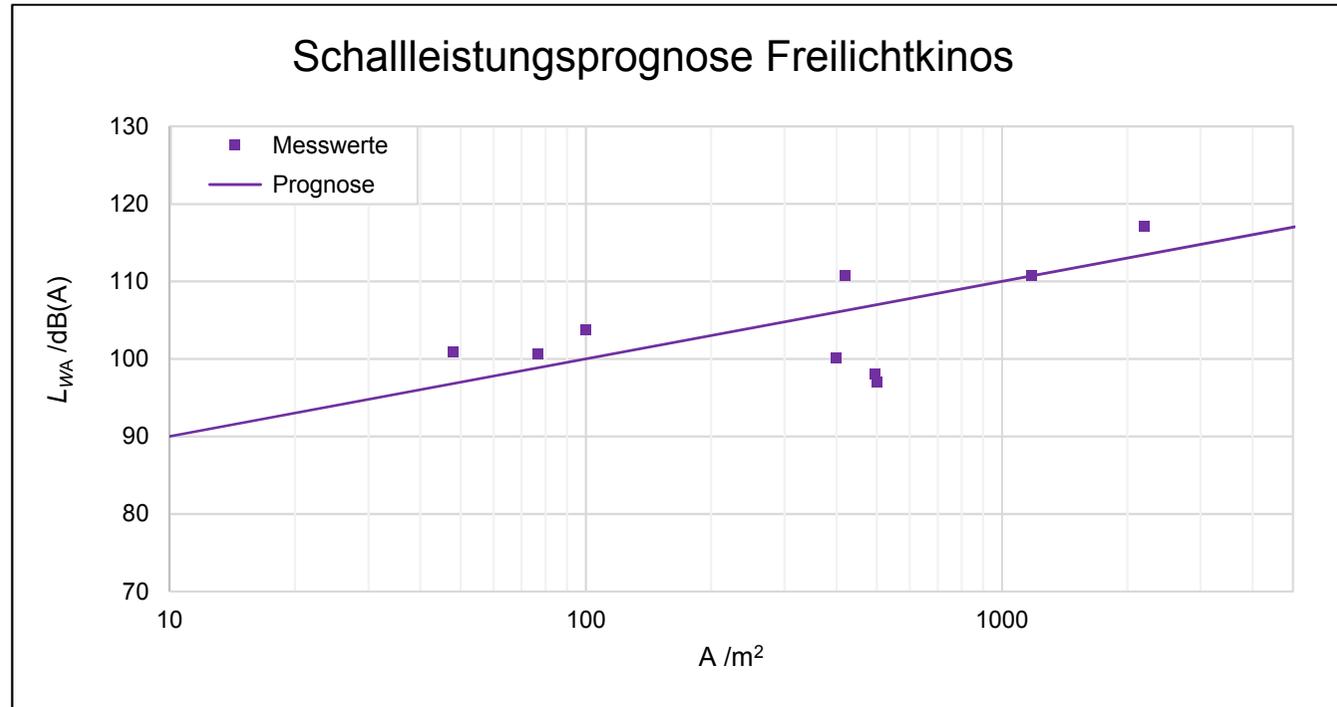
$$L_{WA} = L_{VA,min} + 12 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\text{m}^2}\right) \text{ dB}$$

$L_{VA,min}$       *Mindest-Versorgungspegel in dB(A)*

$L_{VA,min} = 68 \text{ dB(A)}$  (*Freilichtkinos*)

$A$               *zu beschallende Fläche in m<sup>2</sup>*

*Standardabweichung der Differenz Prognose-Messung:  $\sigma = 5,8 \text{ dB}$*



**Prognoselinie des Schalleistungspegels für Freilichtkinos im Vergleich zu Messwerten**



# Prognoserechnungen (Bühnen und Freilichtkinos)

- Berechneter Wert entspricht Gesamt-Schalleistungspegel (in der Regel aufgeteilt auf 2 Quellen)
- Gilt für ungerichtete Schallquelle (Verringerung des Pegels außerhalb der Hauptabstrahlrichtung durch Richtwirkungsmaß)
- Gelten für Punktquellen mit  $K_0 = 3$  dB (Halbraumabstrahlung)
- Line Arrays außerhalb des Nahfelds entsprechen Punktquellen
- Dezentrale Anlagen: individuelle Prognoserechnungen nötig

# Prognoserechnungen

- Überschlüssiges Verfahren (nur zur orientierenden Abschätzung):

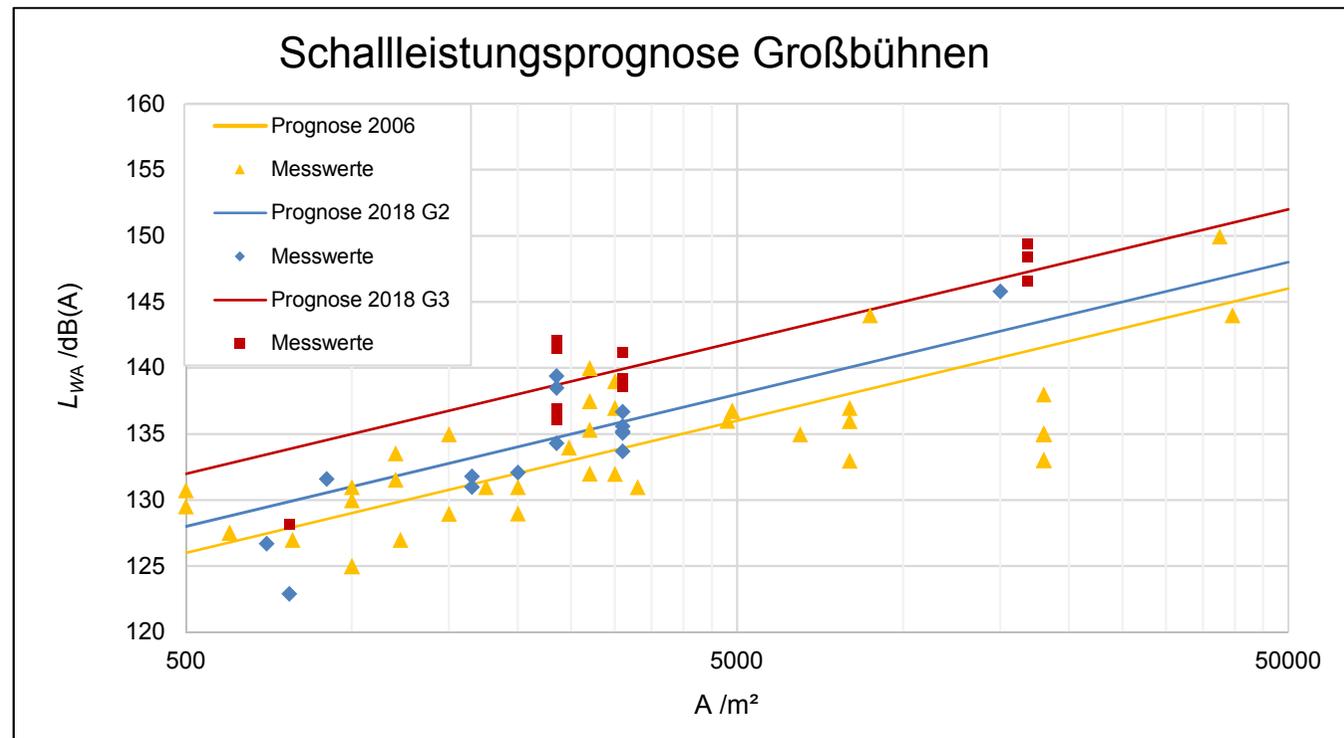
$$L_{Aeq} = L_{WA} + D_I + K_0 - D_S$$

Mit:	$L_{Aeq}$	Schalldruckpegel am Immissionsort (A-bewertet)
	$L_{WA}$	Schalleistungspegel der Quelle (A-bewertet)
	$D_I$	A-bewertetes Richtwirkungsmaß gemäß Tabelle 45
	$K_0$	Raumwinkelmaß
	$D_S$	Abstandsmaß, incl. aller weiteren Ausbreitungsdämpfungen

- Genaues Verfahren (empfohlen):
  - Richtwirkungsmaß frequenzabhängig
  - Aktuelle Spektren
  - Richtwirkung Line Arrays: aktuelle Werte horizontal/vertikal verwenden
  - Punktquellen: Werte aus SFLS 2006 bzw. VDI 3770 verwenden
  - Verwendung spezieller Prognosesoftware sinnvoll

# Entwicklung der Kenngrößen zwischen 2006 und 2018

Kenngröße	Großbühnen		Kleinbühnen		Klassikbühnen	
	2018	2006	2018	2006	2018	2006
$\overline{L_{VA,min}}$ /dB(A)	93,0	89,1	85,1	81,1	74,8	74,7
$\overline{K_1}$ /dB	4,6	4,5	4,8	4,7	5,0	4,8
$\overline{\Delta L_{A,max}}$ /dB	12,8	9,1	12,6	10,4	17,0	12,8
Anzahl Messungen	47	69	33	47	7	12



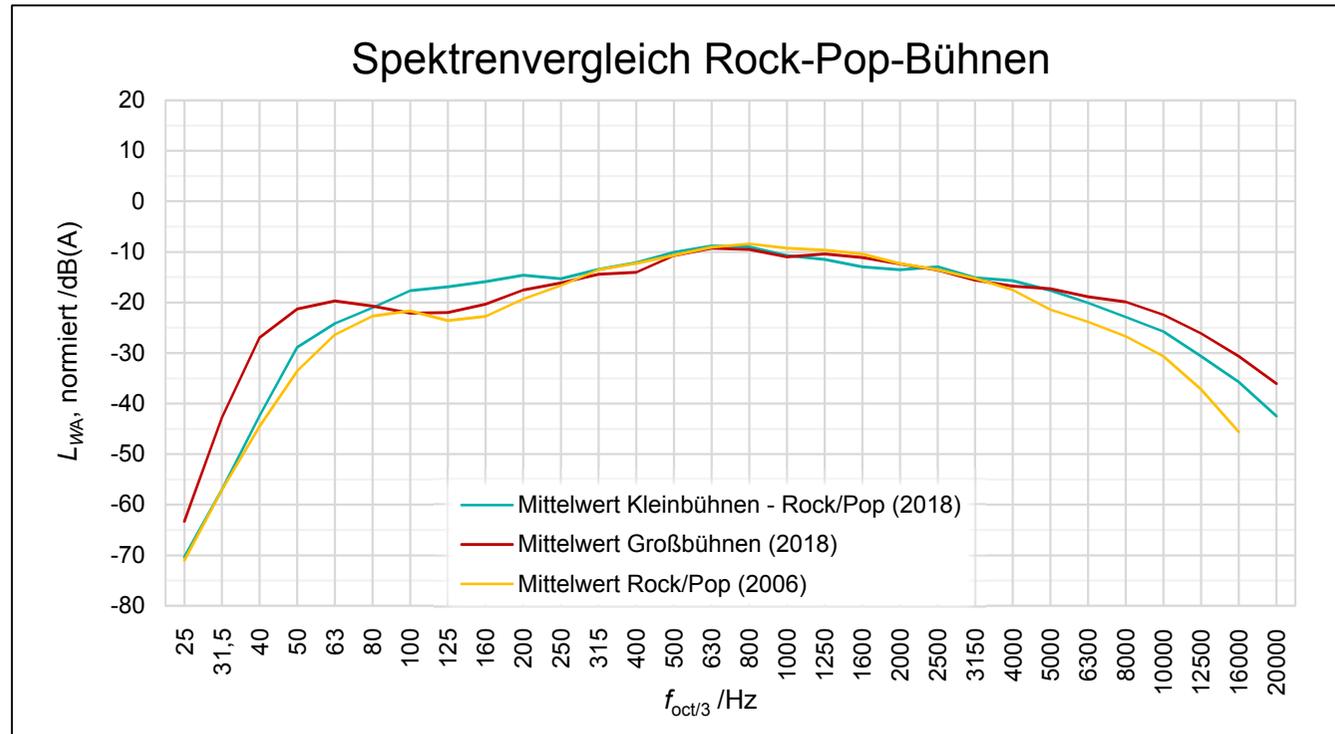
Vergleich des prognostizierten Schalleistungspegels  $L_{WAeq}$  2018 und 2006

- Anstieg Mindestversorgungspegel für Klein- und Großbühnen: + 4 dB
- Erhöhung der Schalleistungs- und Immissionspegel geringer, Ursache: geändertes Richtwirkungsmaß
- Gesondertes Spektrum für Kleinbühnen, Großbühnen, Klassik/Jazz/Welt



## Entwicklung 2006 - 2018

- Anstieg prognostizierter Schalleistungspegel  $L_{WAeq}$  bei gleicher zu beschallender Fläche:
  - Großbühnen: + 2 dB
  - Kleinbühnen: + 3 dB
  - Klassikbühnen: +2 dB
- Anstieg Scheitelmaß  $\Delta L_{max}$  bei Großbühnen von 9,1 dB auf 12,8 dB
- Verschiebung des spektralen Maximums bei Großbühnen von 80 Hz auf 50 Hz (unbewertet)
- Deutlich stärkere Pegelüberhöhung im Bassbereich bei Großbühnen
- Großbühnen und Klassikbühnen ausschließlich mit Line Arrays



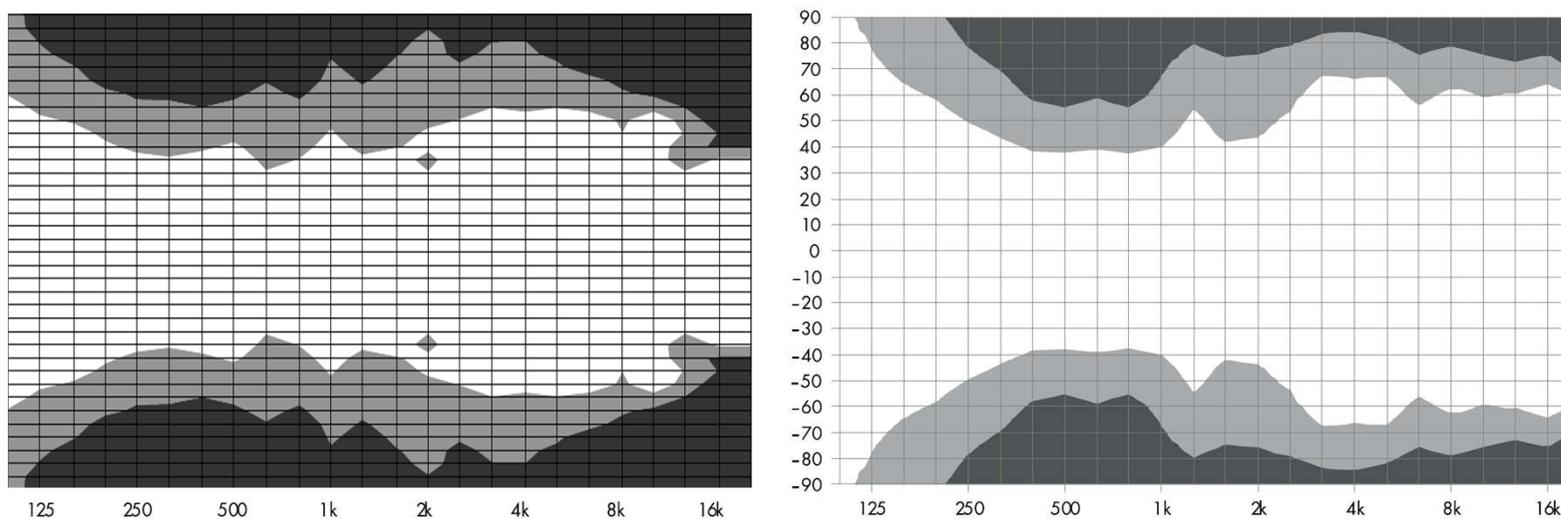
Vergleich der mittleren Terzspektren für Groß- und Kleinbühnen (2018) mit dem in der SFLS bestimmten Rock-Pop-Spektrum (2006) (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)



# Maßnahmen zur Pegelminderung

- Anwendung aktueller Beschallungstechnologien
  - Cardioid Line Arrays
  - Cardioid Subwoofer (Cluster)
- Dezentrale Beschallung
- Schallschutzelemente (Bühneneinhausungen)

# Cardioid Line Arrays



**Schalldruck-Isobaren (horizontal) für – 6 dB und – 12 dB**

**Links: Cardioid Array (d&b GSL12)**

**rechts: Standard Array (d&b J12)**

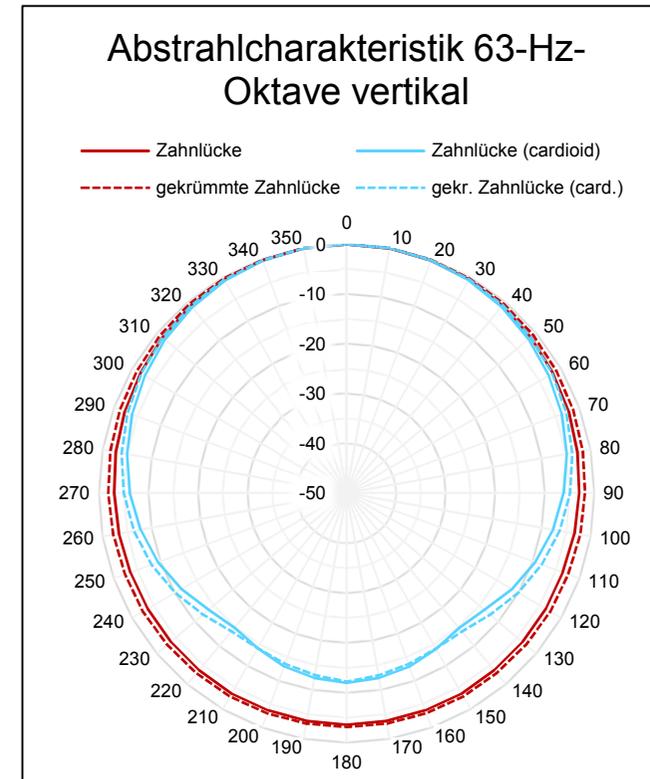
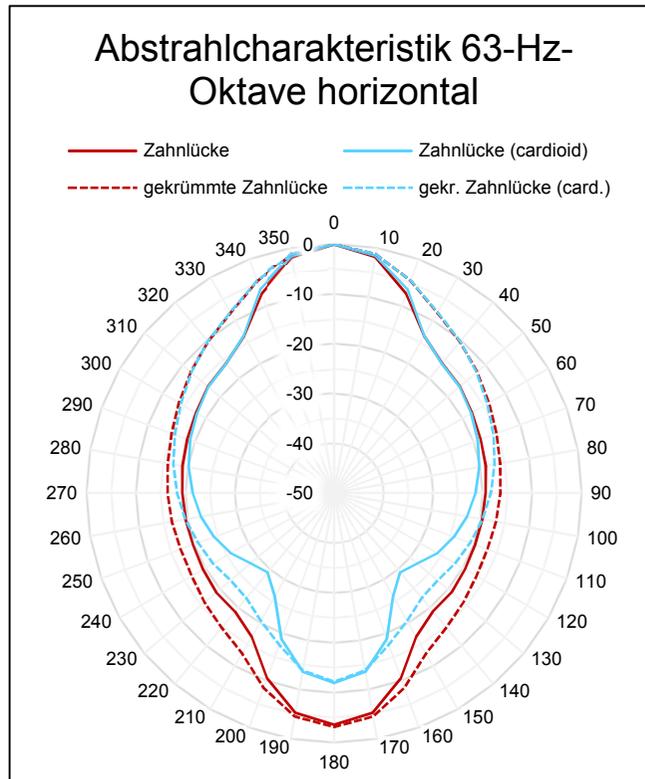
**(Quelle: Systemhandbücher d&b Audiotechnik, 2018)**

# Cardioid Subwoofer Cluster



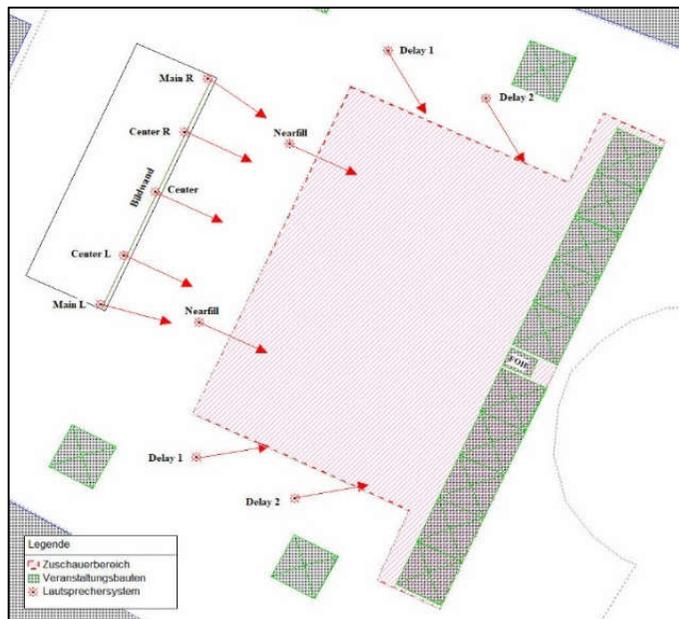
**Beispiel: Subwoofer-Arrays (Zahnlücke)**



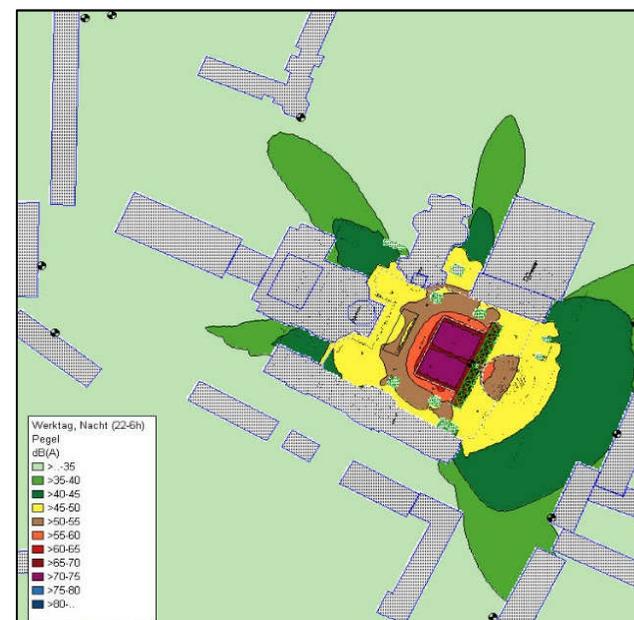
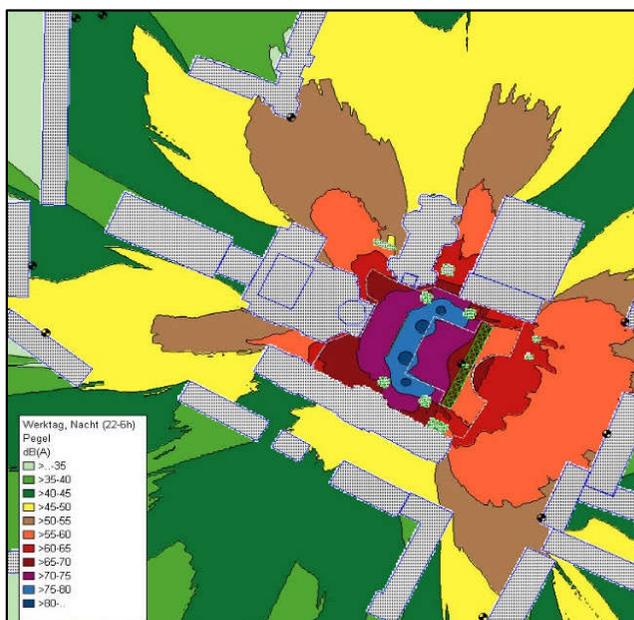


**Simulierte horizontale und vertikale Richtcharakteristik für die 63-Hz-Oktave von acht doppelt gestackten Subwooferclustern in Zahnlückenordnung (gerade/gekrümmt)**

# Dezentrale Beschallung



Lagepläne der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)

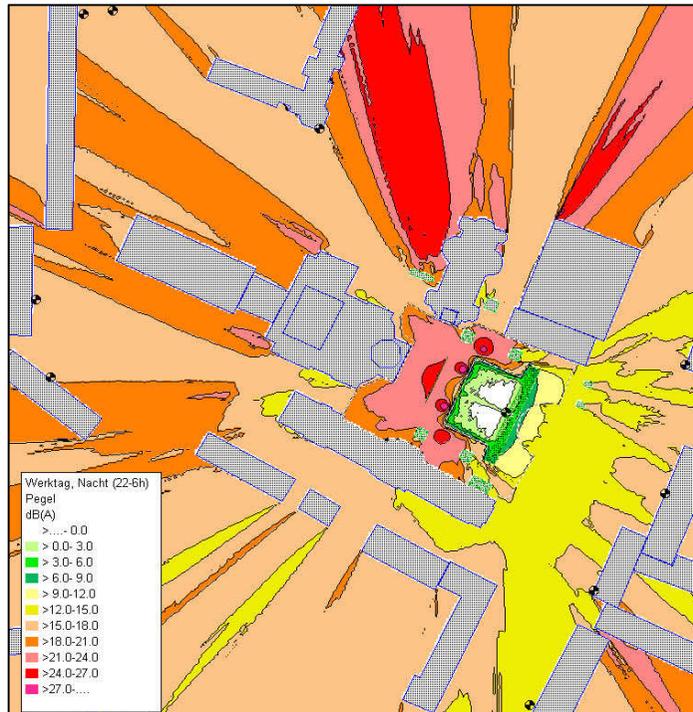


**Berechnete Immissionsraster der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)**



### Praktische Umsetzung des dezentralen Lautsprecherkonzepts

- 236 Kompaktlautsprecher 5" (2-Weg koaxial), je 125 W
- Anordnung 0,8 m über Grund (auf Stativ)
- Subwoofer 16 x 400 W (nicht dargestellt)



**Differenzraster zentral - dezentral**

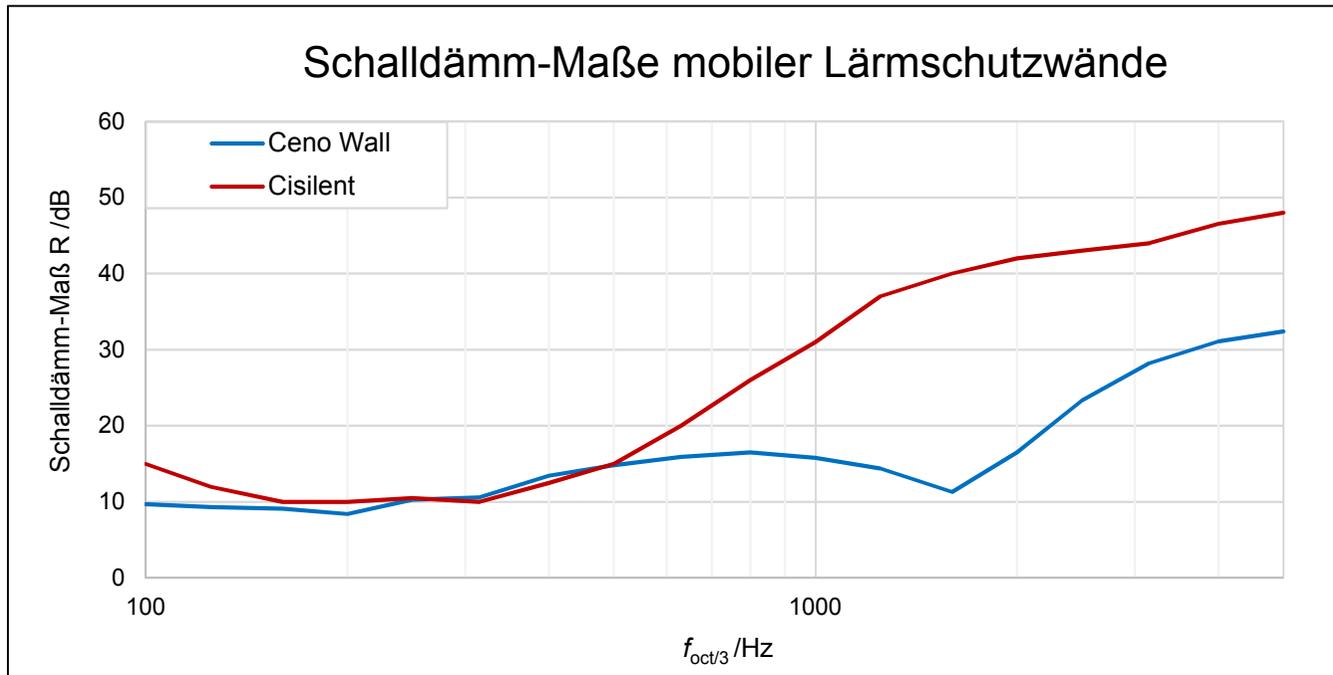
- Einsatz bei den Filmnächten auf dem Chemnitzer Theaterplatz (seit 2011)
- Immissionsrichtwerte (nachts) 40 dB(A) bzw. 45 dB(A)
- **Reduzierung des Beurteilungspegels an den maßgeblichen Immissionsorten um 10..15 dB(A) durch das dezentrale Konzept**



**Beispielansichten mobiler Schallschutzwände; links: Ceno Wall (Foto:Sattler Global/Ceno Tec) , rechts: Cisilent (Foto: Calenberg Ingenieure)**

Technische Daten:

- Ceno Wall: BxHxD = 4,40 m x 3,50 m x 0,20 m (Einzelelement); aufblasbar,  $R_w = 16$  dB
- Cisilent: Dreilagiges Polyestergewebe mit Dämmeinlage,  $D = 0,07$  m,  $R_w = 21$  dB



### Schalldämm-Maße zweier mobiler Lärmschutzwände



## Ausblick

- Genauere Prognosealgorithmen
  - Simulation komplizierter Quell-Konfigurationen möglich (Line Arrays, Subwoofer Arrays)
  - Import der Quell-Datensätze in Programme zur Schall-Ausbreitungsrechnung (Perspektive: Integration der Softwaretools)
  - Ersatzweise Verwendung der mittleren Richtwirkungsmaße
- Beschallungstechnologien zur Minimierung unerwünschter Emissionen
  - Line Arrays mit softwaregesteuerter Abstrahlcharakteristik
  - Cardioid Subwoofer, Cardioid Line Arrays
  - Dezentrale Beschallung



# Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

[www.abd-online.com](http://www.abd-online.com)  
[mail@abd-online.com](mailto:mail@abd-online.com)  
Akustik Bureau Dresden GmbH  
Julius-Otto-Straße 13  
01219 Dresden  
Germany