



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

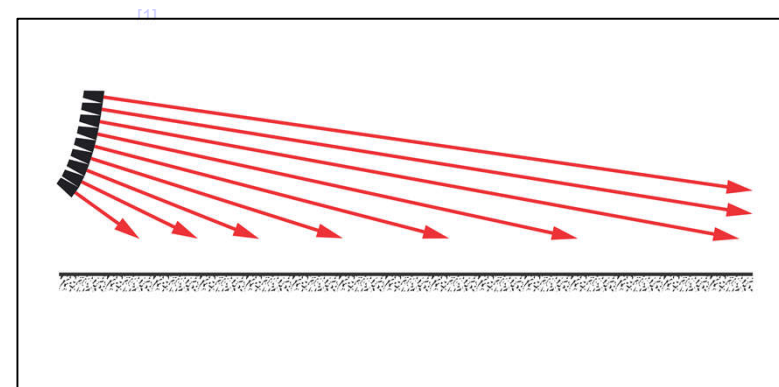
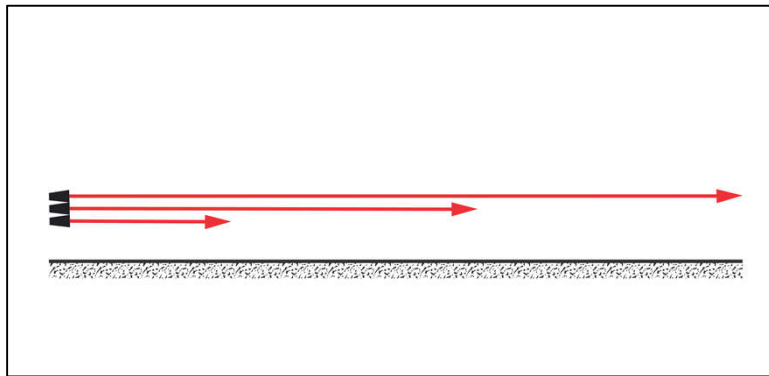
- Überprüfung und Aktualisierung der Sächsischen Freizeitlärmstudie (2006), Gebiet „Freiluftkonzerte“
- Einarbeitung aktueller Messdaten (eigen/fremd)
- Durchführung eigener Messungen 2017/2018
- Aktualisierung der Prognosealgorithmen
- Untersuchungen zu Freilichtkinos als neuer Geräuschquelle (Messdaten/Prognosealgorithmen)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

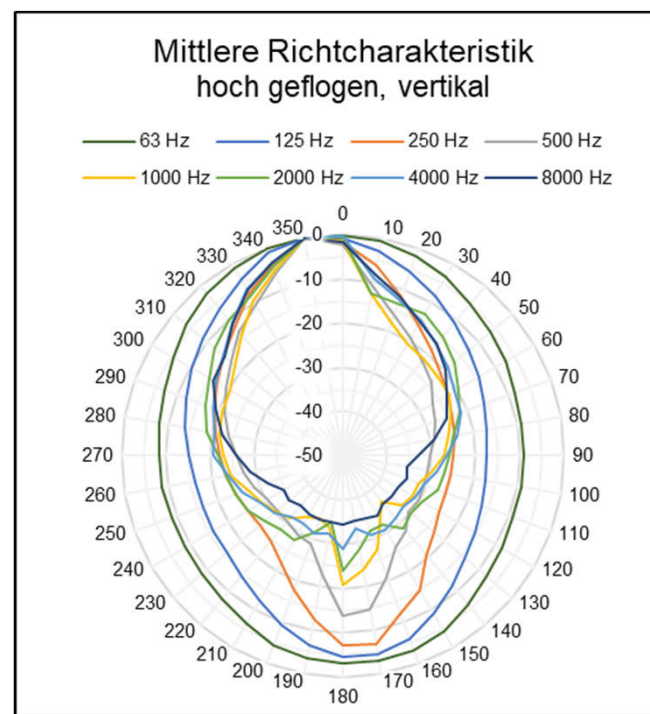
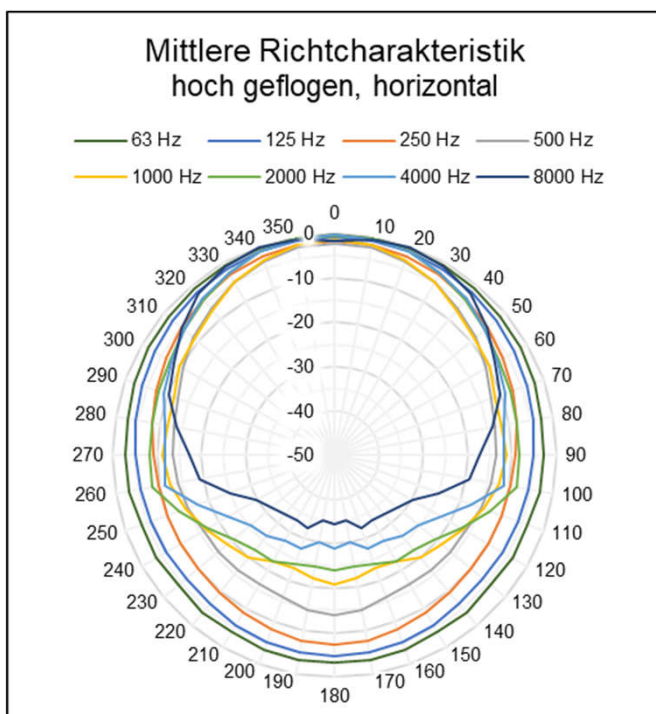
[1]

Hersteller	Modell	Anz.	Einsatz	h_L /m	Winkelung ρ°
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

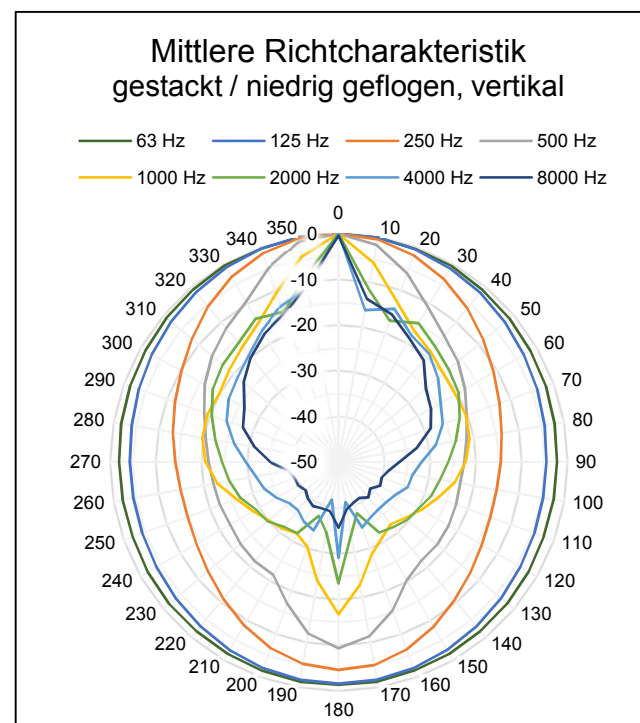
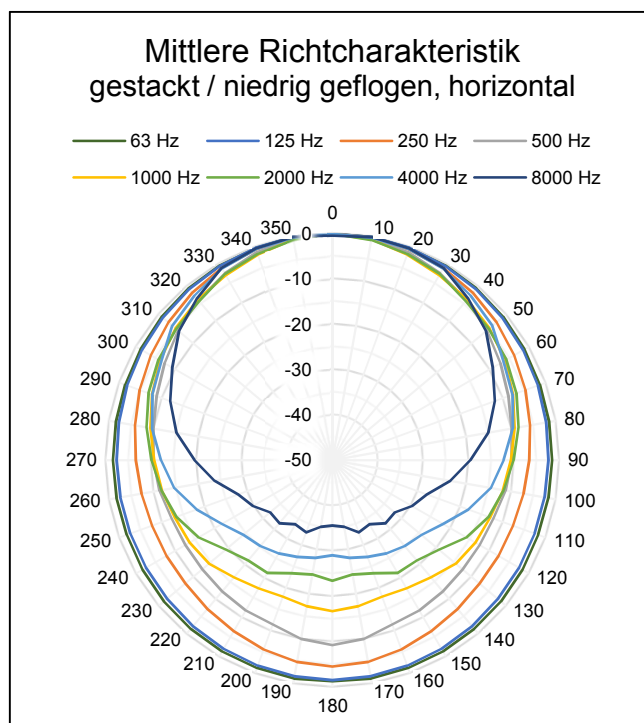


Mittlere Richtcharakteristik von Line Arrays



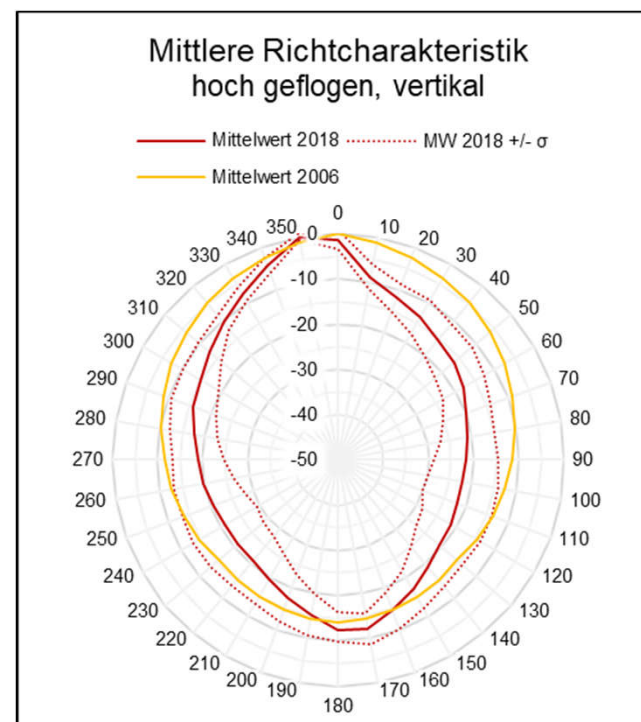
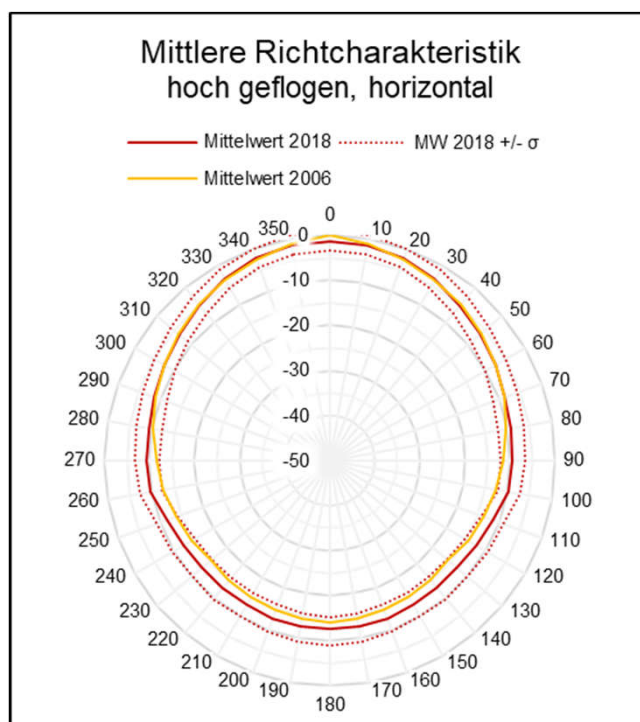
Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von hoch geflogenen Line Arrays, oktavweise

Mittlere Richtcharakteristik von Line Arrays



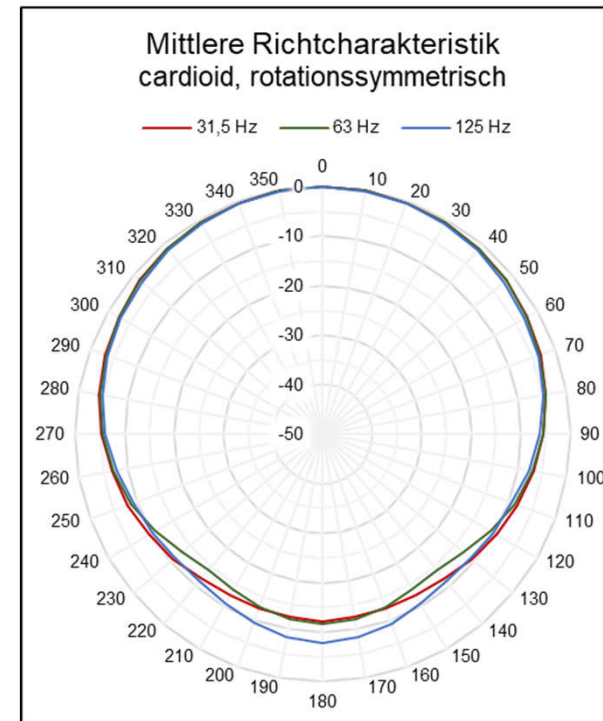
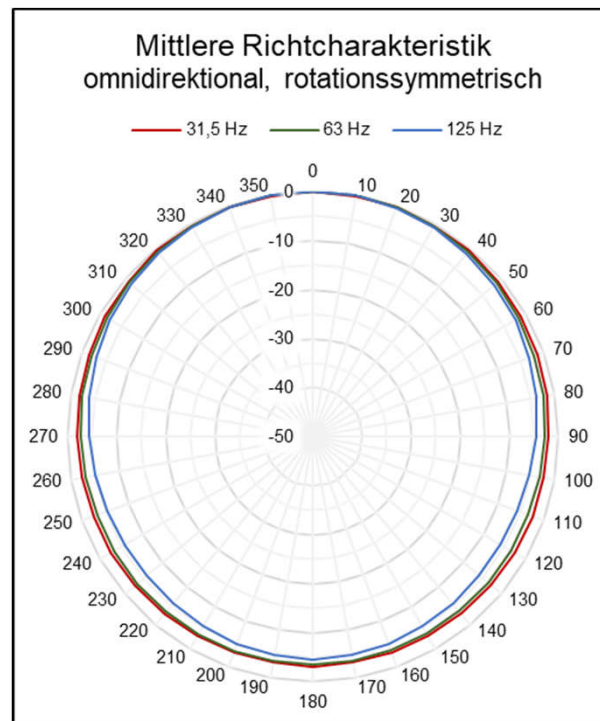
Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von niedrig geflogenen / gestackten Line Arrays, oktavweise

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

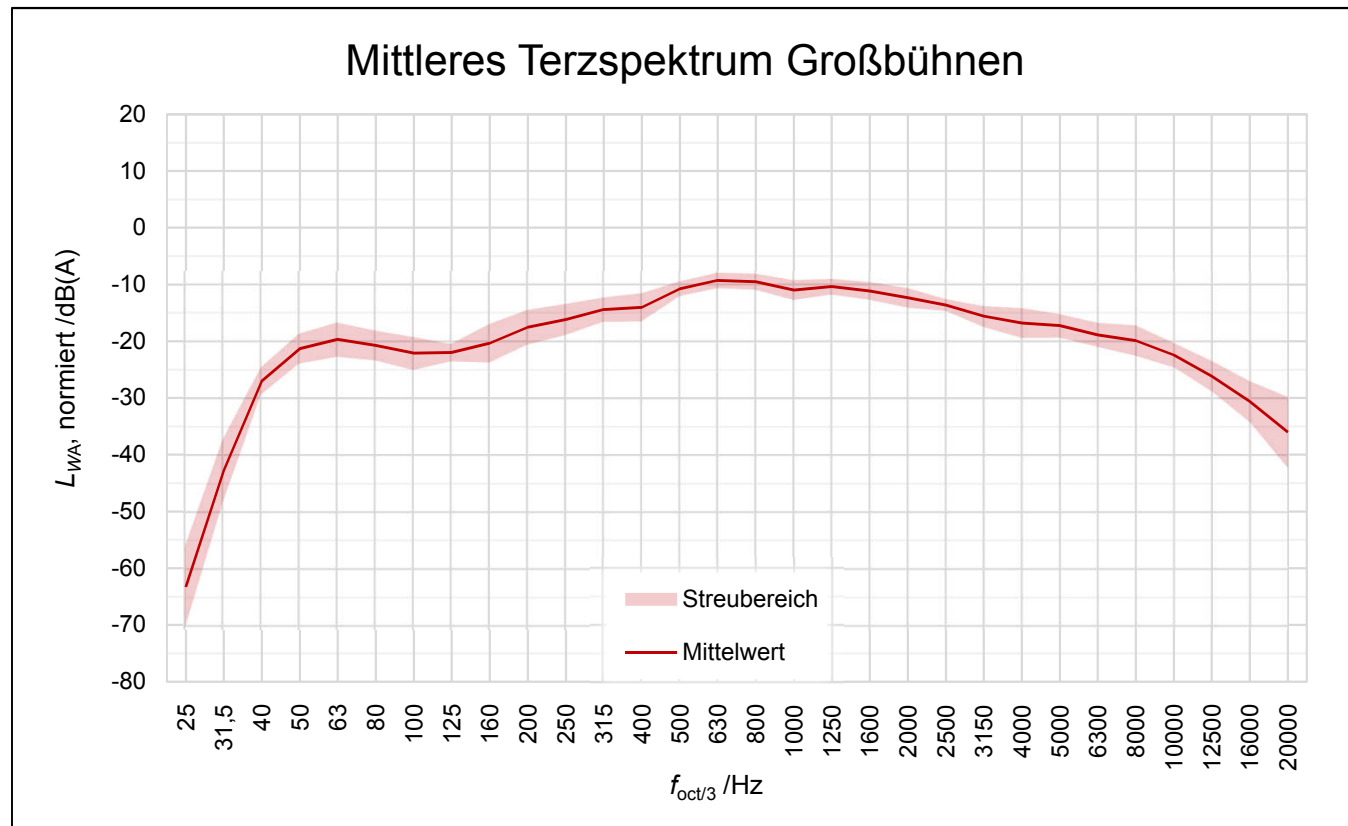
- Messdaten von 86 Konzerten auf insgesamt 33 Freiluftbühnen
- Zuschauerkapazität ca. 800 - 60000
- Zu beschallende Fläche ca. 250 m² – 15000 m²
- Messorte meist im Bereich des entferntesten Hörerplatzes oder FOH
- Kontrollmessungen in größeren Abständen, z.T. auch hinter der Bühne
- Pegelaufzeichnung in der Regel über gesamte Konzertdauer (mit Titelpausen, Vorbands extra untersucht)



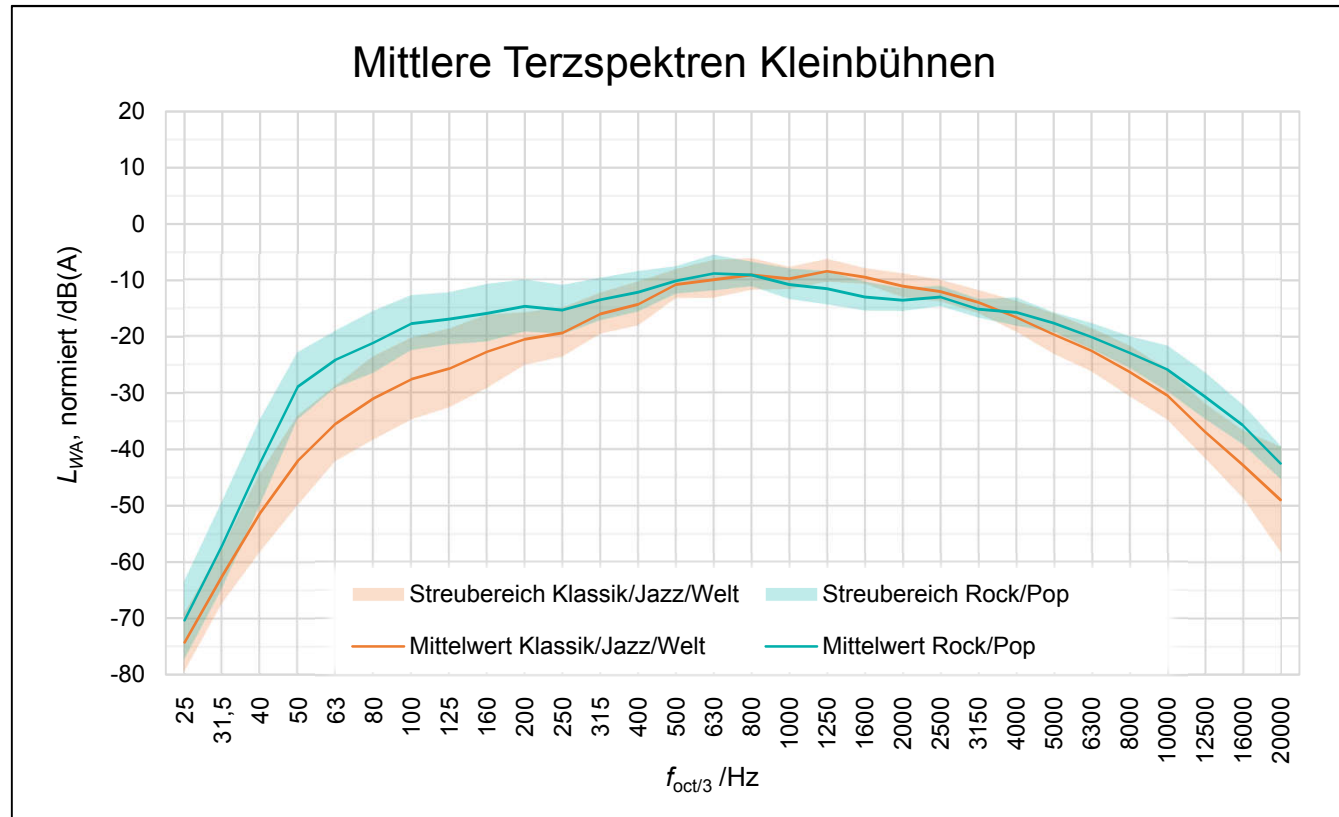
Foto: PAN GmbH

Signalkenngrößen von Freiluftbühnen

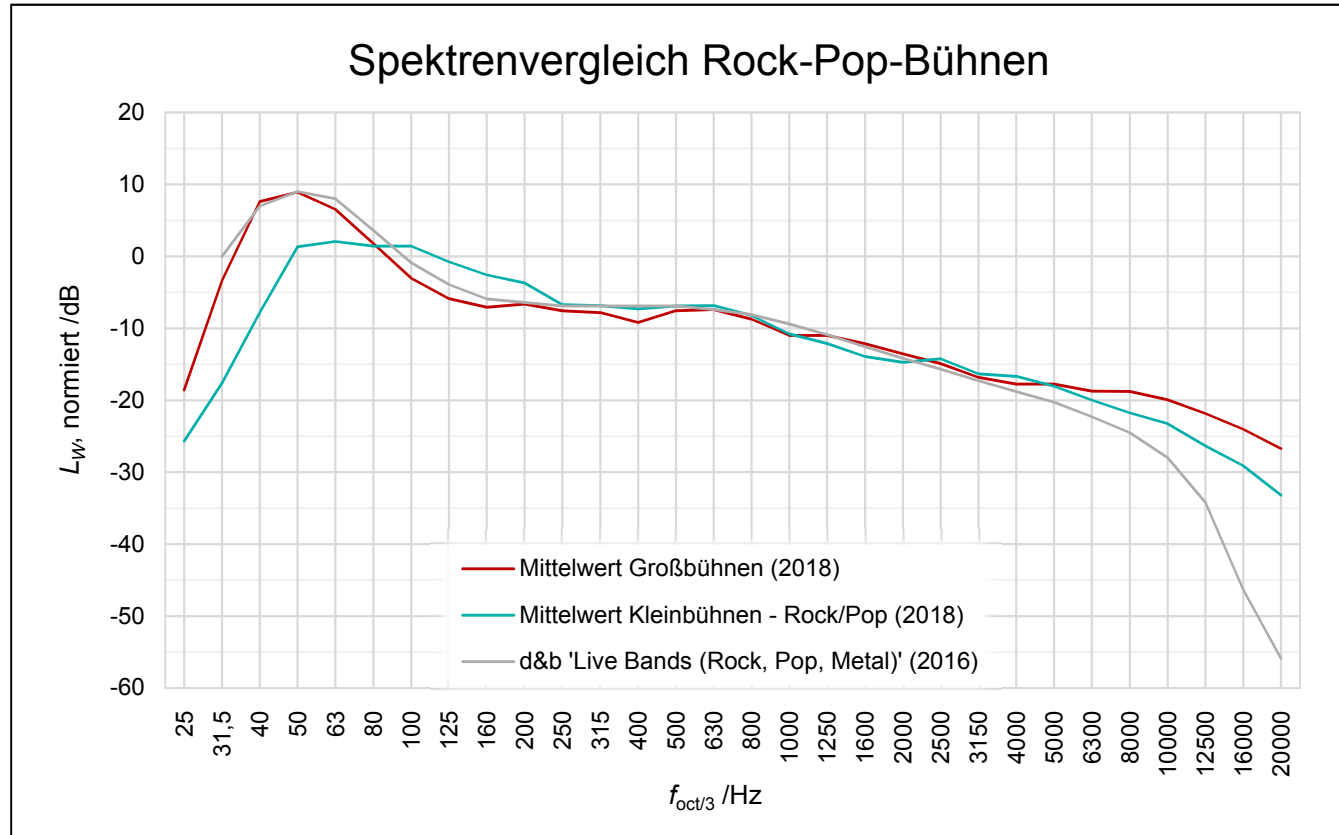
Kenngroße	Großbühnen			Kleinbühnen	Klassikbühnen
	Main Acts	Vorgruppen	Moderation & Musik (Comedians)		
$\overline{L_{VA,min}}$ /dB(A)	93,0	88,7	79,1	85,1	74,8
σ /dB	3,0	4,1	0,7	4,2	3,1
$\overline{K_1}$ /dB	4,6	4,2	6,8	4,8	5,0
σ /dB	1,3	1,3	0,6	0,7	0,9
$\overline{\Delta L_{Amax}}$ /dB	12,8	12,6	23,0	12,6	17,0
σ /dB	2,1	3,5	3,8	3,5	2,2
$\overline{L_{Ceq}} - \overline{L_{Aeq}}$ /dB	12,6	12,9	7,2	7,7	3,8
σ /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 m²)

A *zu beschallende Fläche in m²*

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

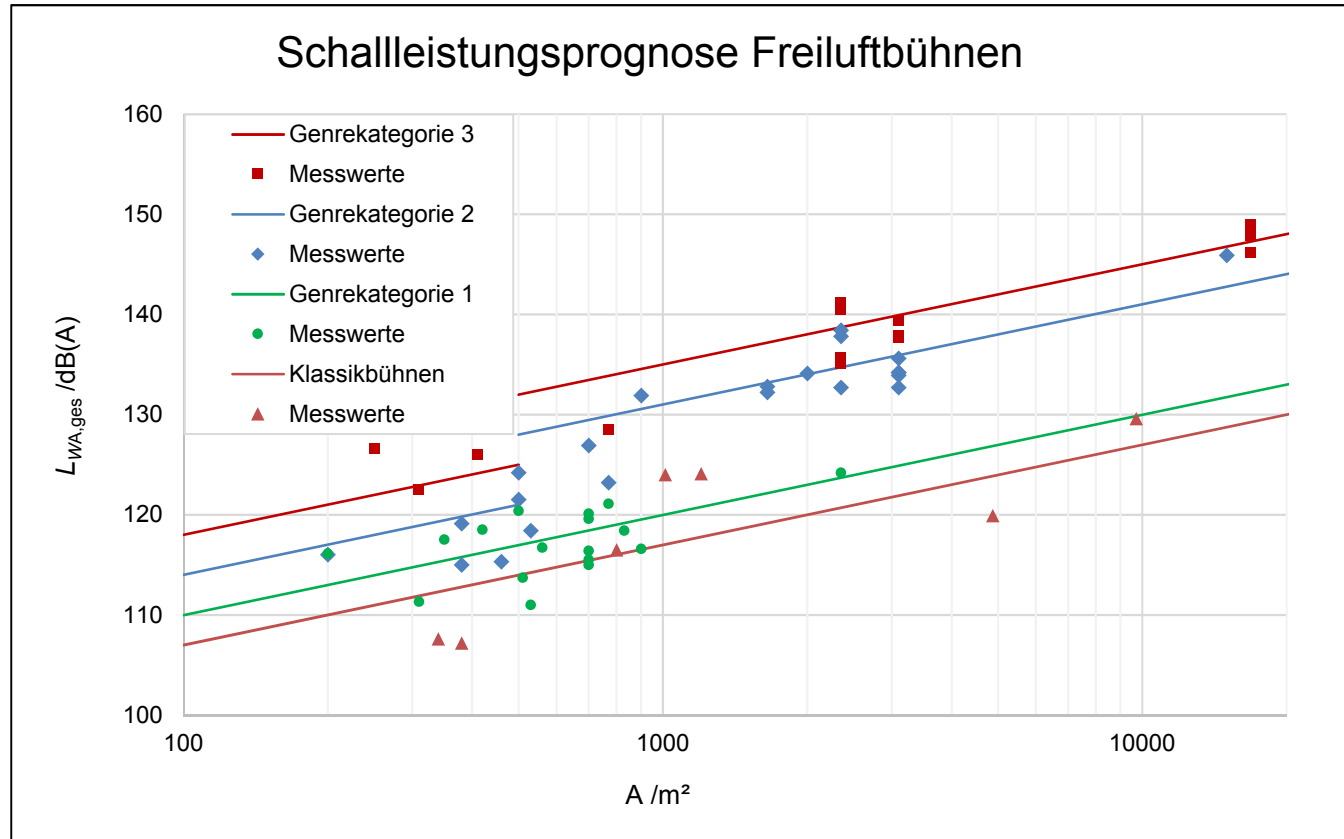
$$L_{WA} = L_{VA,min} + 12 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\text{m}^2}\right) \text{ dB}$$

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

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

A *zu beschallende Fläche in m²*

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

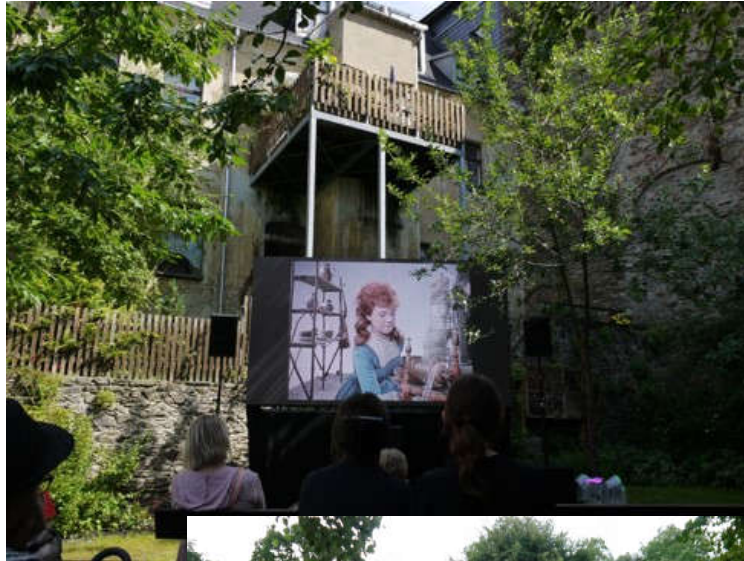


Prognosegeraden für den Schalleistungspegel der drei untersuchten Genrekategorien auf Klein- und Großbühnen sowie der untersuchten Klassikbühnen im Vergleich zu aus Messungen ermittelten Werten

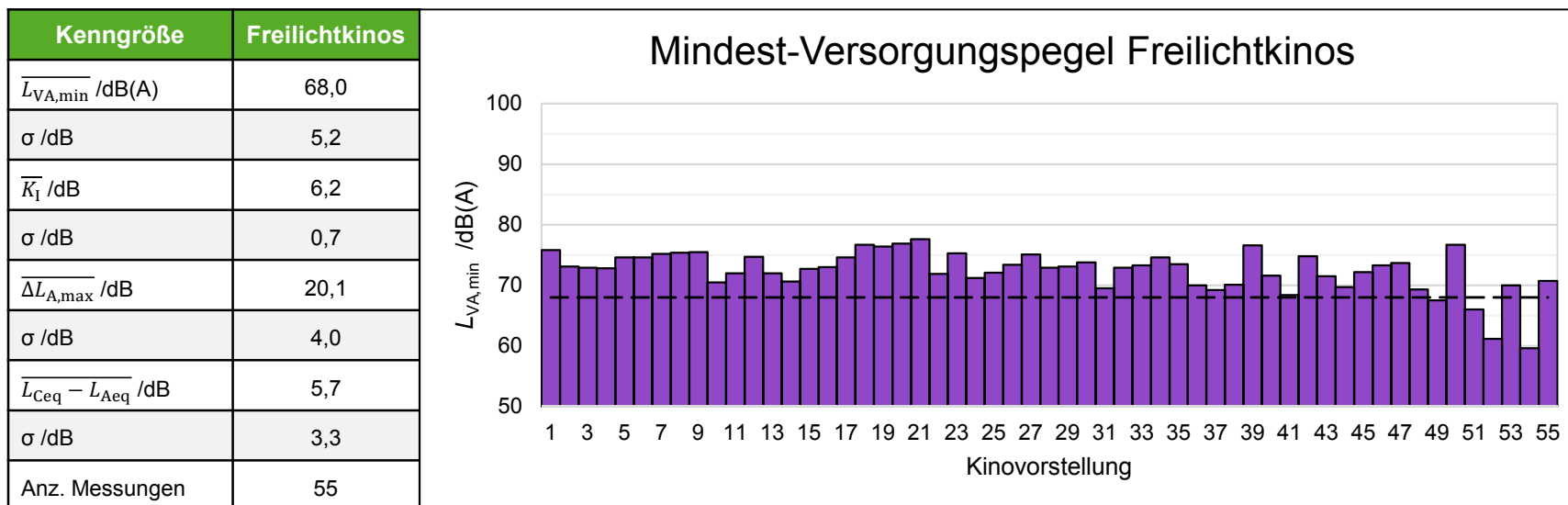


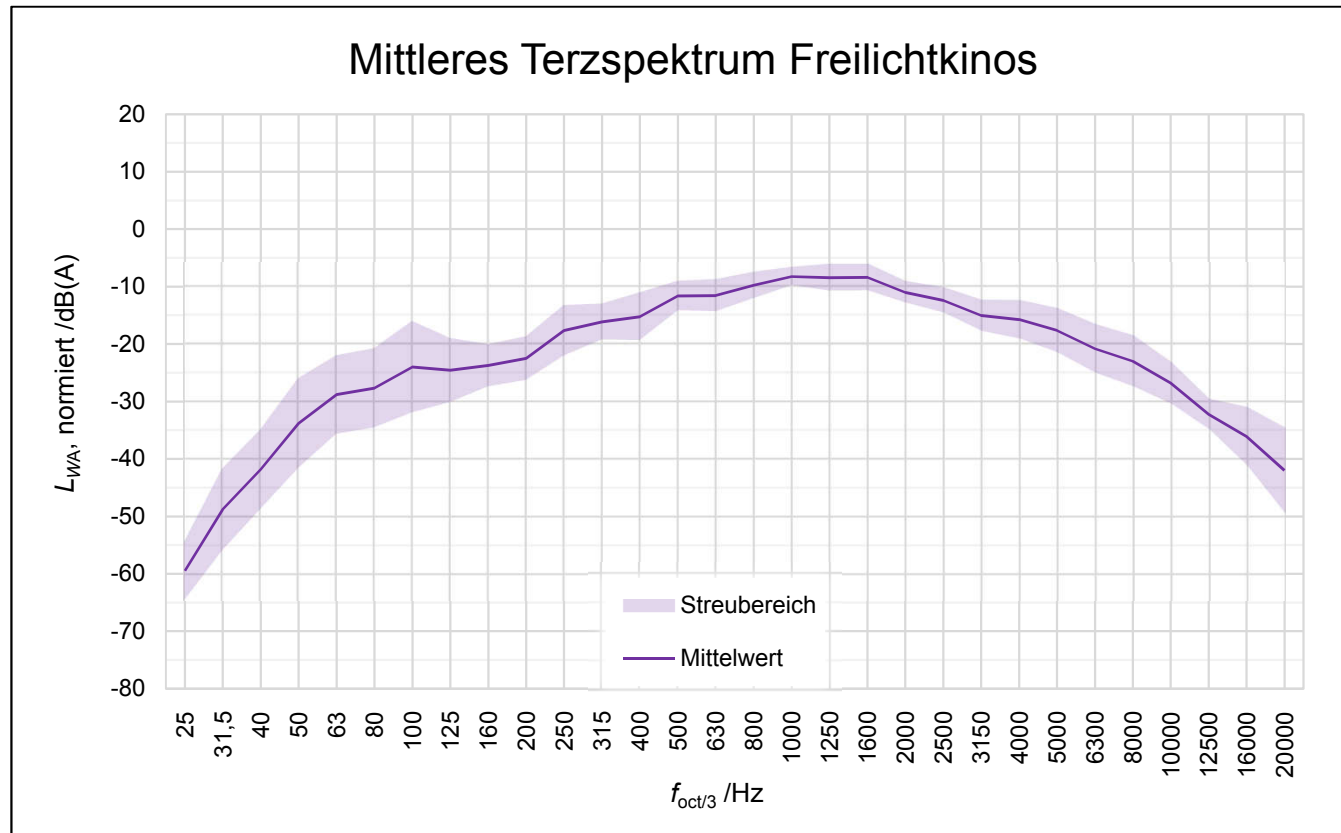
Untersuchungen an Freilichtkinos

- 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 m² – 2200 m²
- 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

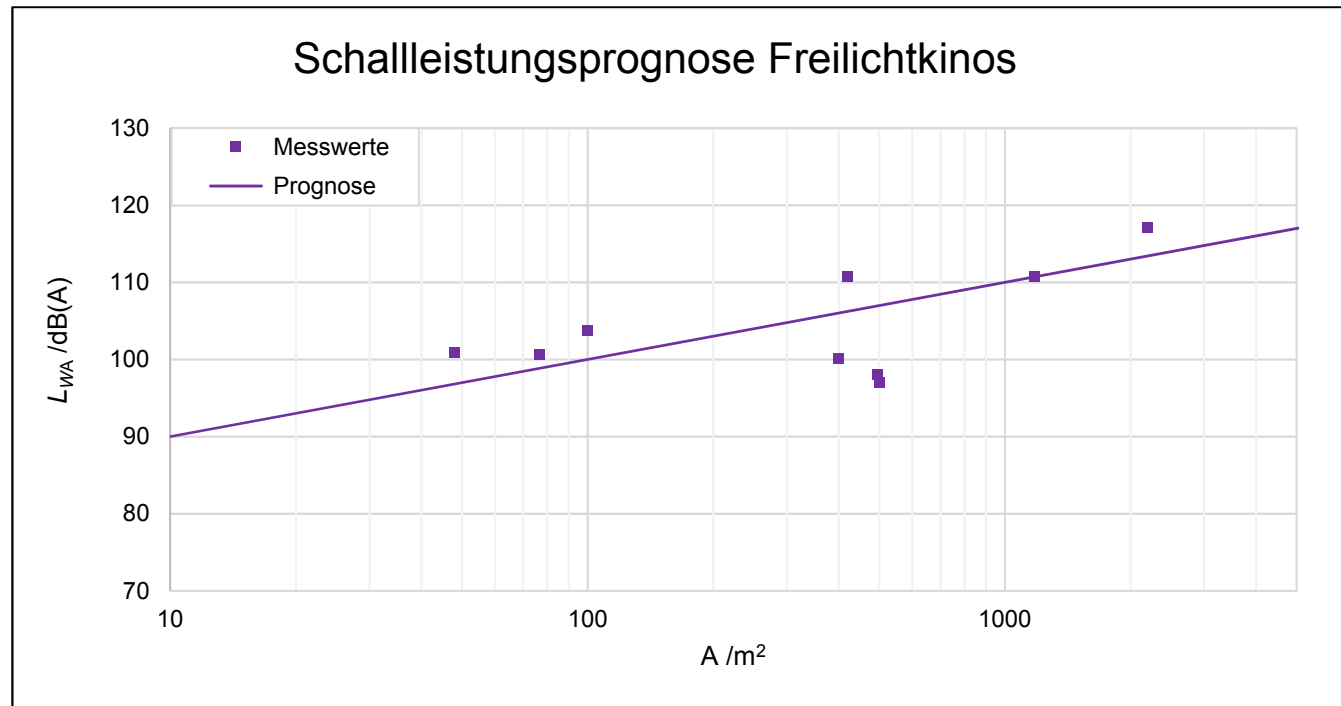
$$L_{WA} = L_{VA,min} + 12 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\text{m}^2}\right) \text{ dB}$$

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

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

A *zu beschallende Fläche in m²*

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



Prognoselinie des Schallleistungspegels 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):

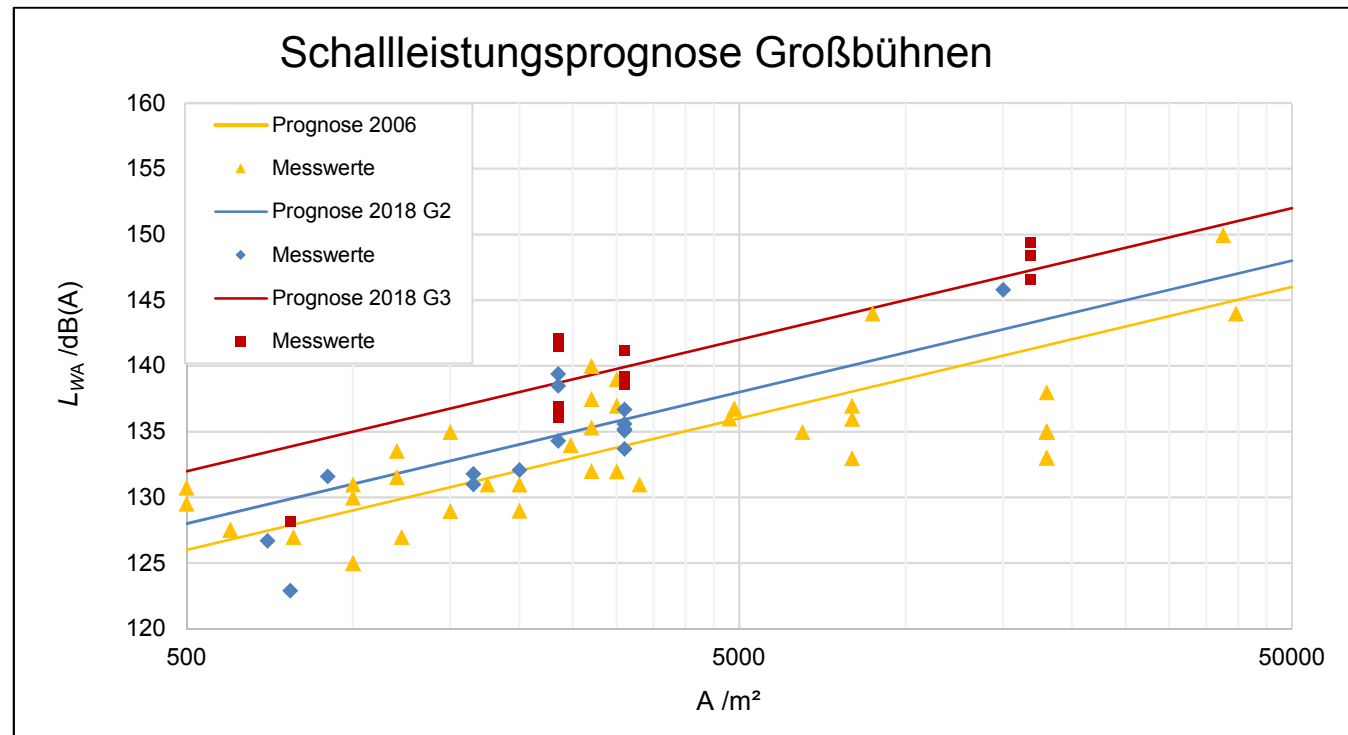
$$L_{Aeq} = L_{WA} + D_I + K_0 - D_S$$

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



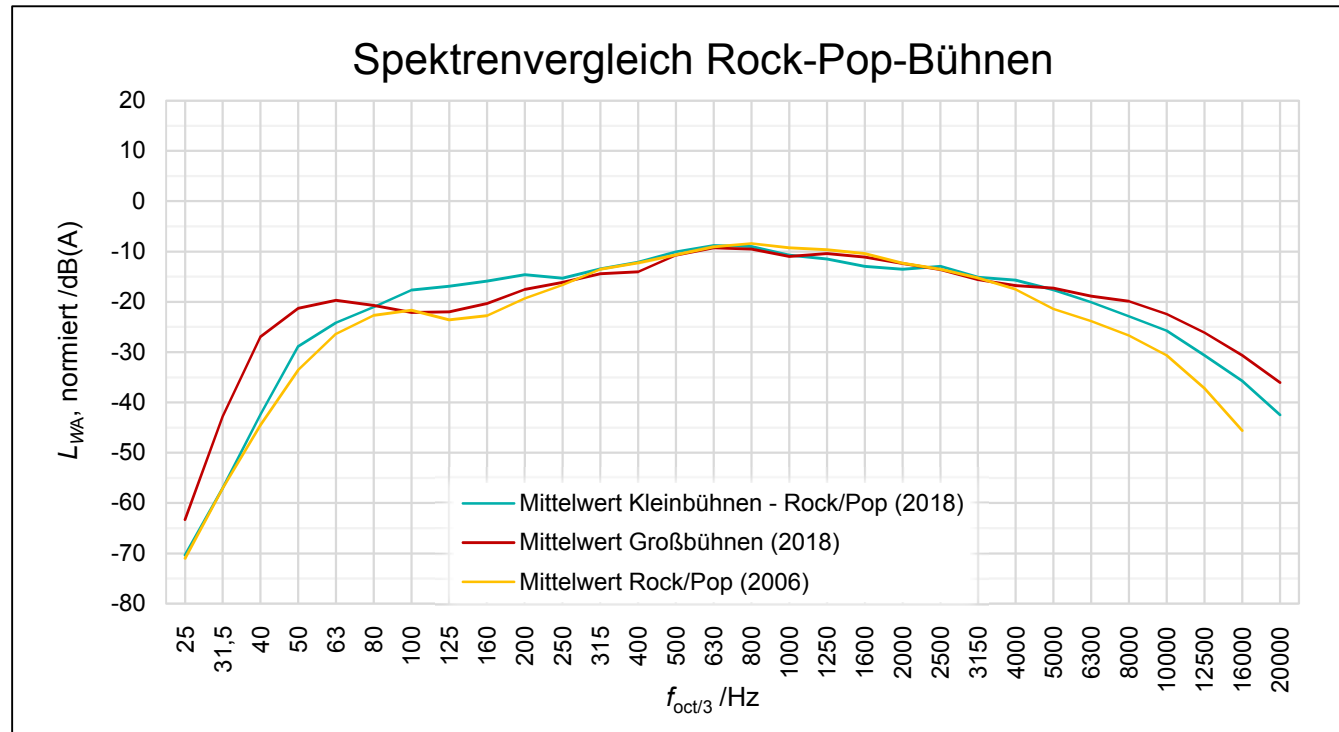
Vergleich des prognostizierten Schalleistungspegels L_{WAeq} 2018 und 2006

- 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 ΔL_{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



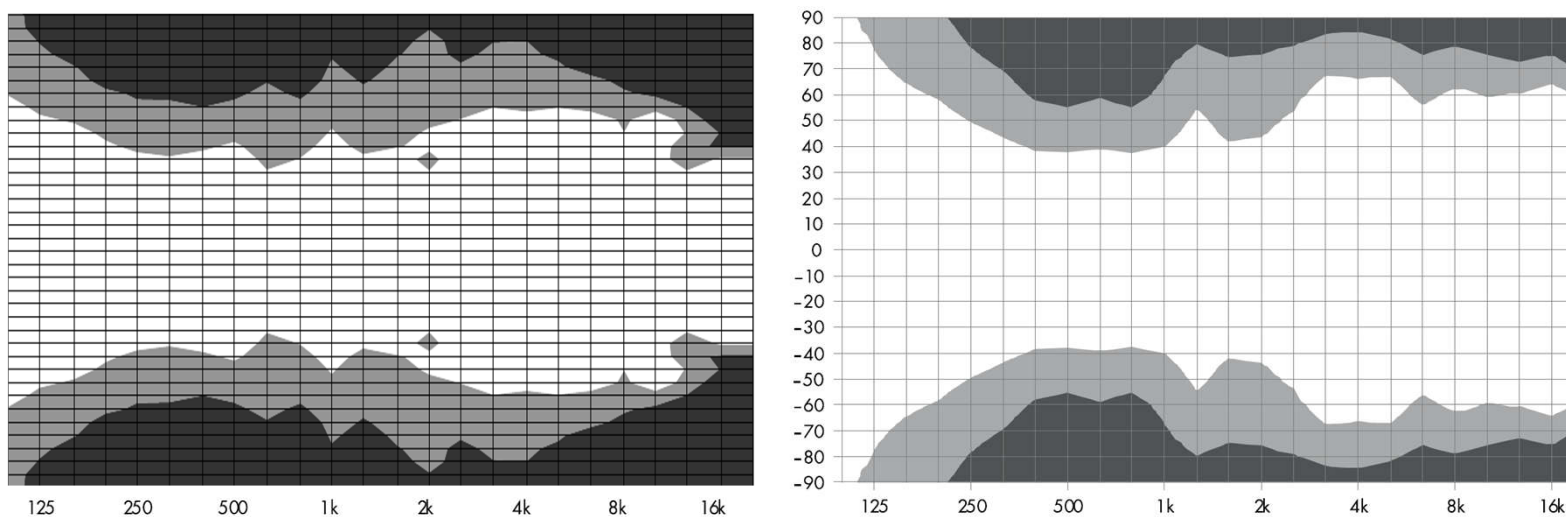
Vergleich der mittleren Terzspektren für Groß- und Kleinbühnen (2018) mit dem in der SFLS bestimmten Rock-Pop-Spektrum (2006) (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)



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)

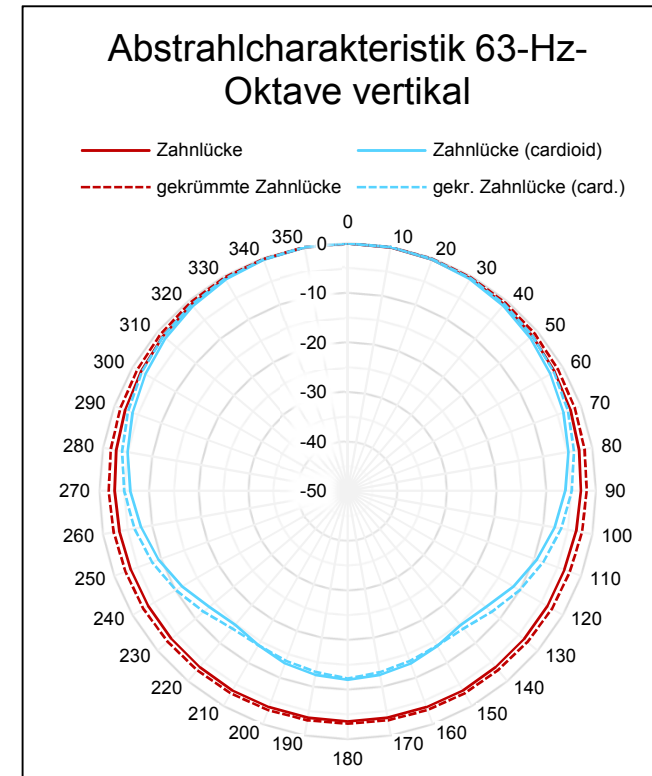
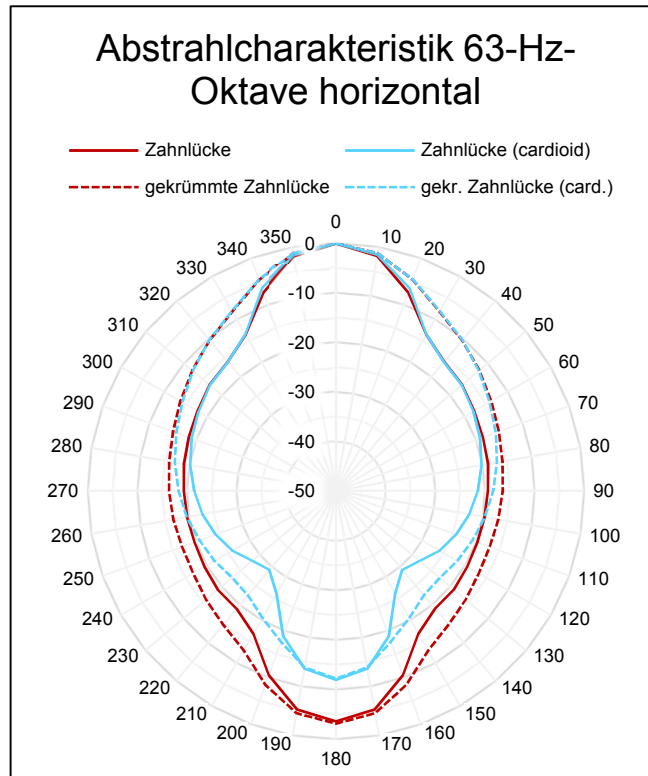
(Quelle: Systemhandbücher d&b Audiotechnik, 2018)

Cardioid Subwoofer Cluster



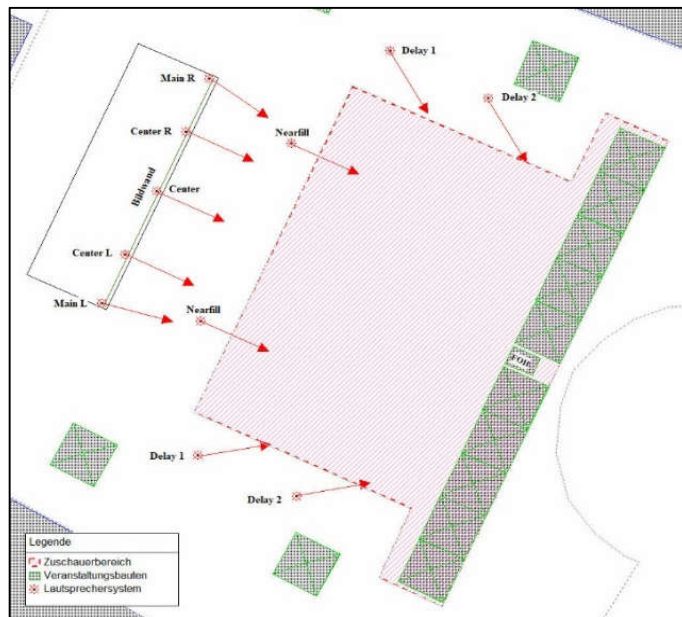
Beispiel: Subwoofer-Arrays (Zahnlücke)



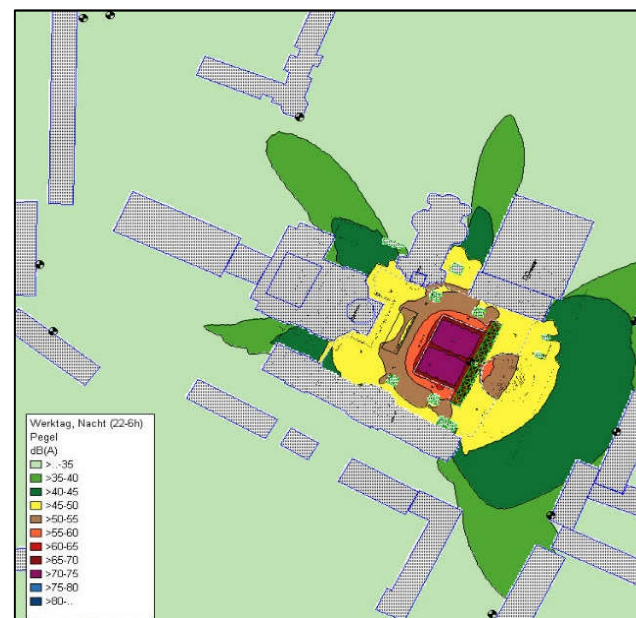
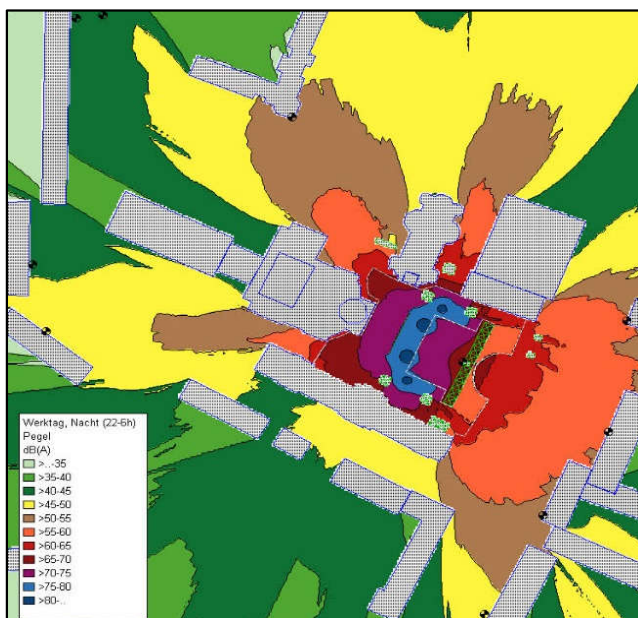


Simulierte horizontale und vertikale Richtcharakteristik für die 63-Hz-Oktave von acht doppelt gestackten Subwooferclustern in Zahnlückenordnung (gerade/gekrümmt)

Dezentrale Beschallung



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

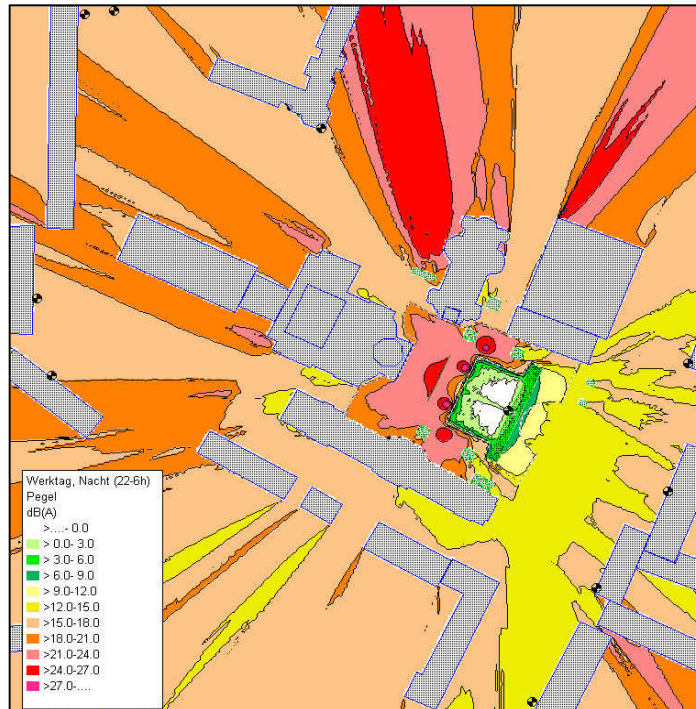


Berechnete Immissionsraster der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)



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

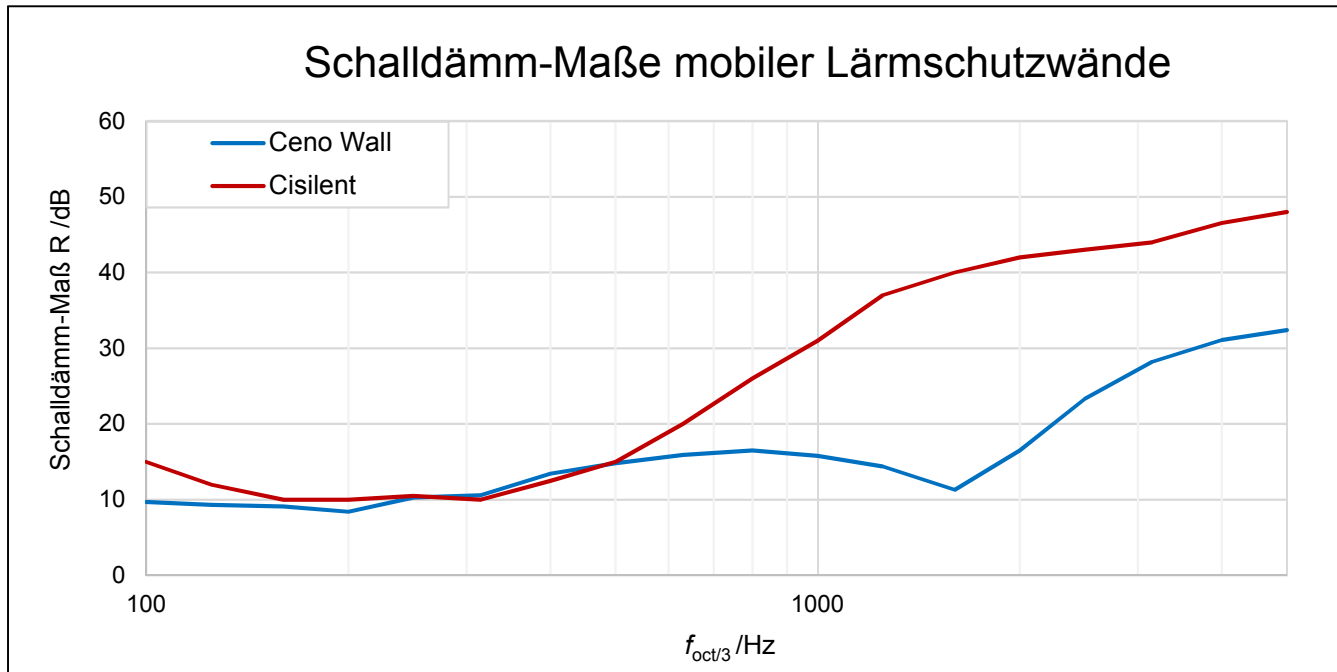
- Einsatz bei den Filmnächten auf dem Chemnitzer Theaterplatz (seit 2011)
- Immissionsrichtwerte (nachts) 40 dB(A) bzw. 45 dB(A)
- **Reduzierung des Beurteilungspegels an den maßgeblichen Immissionsorten um 10..15 dB(A) durch das dezentrale Konzept**



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
mail@abd-online.com
Akustik Bureau Dresden GmbH
Julius-Otto-Straße 13
01219 Dresden
Germany