

Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie

Überprüfung, Aktualisierung und Fortschreibung von
Emissionskenngrößen und Prognoseverfahren für
Beschallungsanlagen im Freien



Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie

Überprüfung, Aktualisierung und Fortschreibung von
Emissionskenngrößen und Prognoseverfahren für
Beschallungsanlagen im Freien

Hans-Jörg Ederer, Max Händel, Andreas Nicht, Axel Roy,
Sebastian Seifert, Christoph Stüber, Holger Trepte, Hartmut Zschaler

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Fachwortverzeichnis	8
Abkürzungen und Formelzeichen	12
1 Vorbemerkungen	14
2 Vorgehensweise.....	15
2.1 Signalkenngößen.....	15
2.2 Messungen	16
2.3 Ermittlung von Emissionskenngößen.....	17
2.4 Hinweise zur Beurteilung der Immissionen	17
3 Untersuchungen zum Richtwirkungsmaß	18
3.1 Line Arrays.....	18
3.2 Subwoofer.....	22
4 Untersuchungen an Freiluftbühnen	24
4.1 Allgemeines	24
4.2 Schalldruckpegel und andere Signalkenngößen	24
4.3 Signalspektren	25
4.4 Prognose des Schalleistungspegels	29
5 Untersuchungen an Freilichtkinos	32
5.1 Allgemeines	32
5.2 Schalldruckpegel und andere Signalkenngößen	32
5.3 Signalspektren	33
5.4 Prognose des Schalleistungspegels	35
6 Schlussfolgerungen	36
6.1 Entwicklung der Kenngößen zwischen 2006 und 2018	36
6.2 Verwendung der Ergebnisse für Prognoserechnungen	38
6.3 Überschlüssiges Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln	39
6.4 Detailliertes Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln	40
6.5 Beispielrechnung	42
7 Maßnahmen zur Pegelminderung.....	46
7.1 Maßnahmen für Mittel-/Hochtonlautsprecher.....	46
7.2 Maßnahmen für Tieftonlautsprecher	46
7.3 Dezentrale Beschallung	48
7.4 Schallschutzelemente	50
8 Ausblick.....	53
Literaturverzeichnis.....	54
Anhang I – Lautsprecheranordnungen bei modernen Beschallungsanlagen.....	55
Anhang II – Berechnung der Ausbreitungsdämpfung nach DIN ISO 9613-2.....	57
Anhang III – Wertetabellen	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel Line Array	18
Abbildung 2: Typische Anordnung von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays (links) sowie von hoch geflogenen Systemen (rechts) über ebenem Grund	19
Abbildung 3: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays, oktavweise	20
Abbildung 4: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von hoch geflogenen Line Arrays, oktavweise	20
Abbildung 5: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays (mit Standardabweichung) im Vergleich zu den Werten der SFLS für Punktstrahler, breitbandig, A-bewertet, mit dem jeweiligen Kleinbühnen-Spektrum bewertet.....	21
Abbildung 6: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von hoch geflogenen Line Arrays (mit Standardabweichung) im Vergleich zu den Werten der SFLS für Punktstrahler, breitbandig, A-bewertet, mit dem Großbühnen-Spektrum bewertet.....	21
Abbildung 7: Simulierte mittlere, rotationssymmetrische Richtcharakteristik von omnidirektionalen und Cardioid-Subwoofern, oktavweise.....	23
Abbildung 8: Gemessene Mindest-Versorgungspegel bei Großbühnen	25
Abbildung 9: Mittleres Terzspektrum für Großbühnen, Mittelwert und Streubereich von 47 Konzerten (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)	26
Abbildung 10: Mittlere Terzspektren für Kleinbühnen – Rock/Pop, Klassik/Jazz/Welt, Mittelwert von 40 Konzerten (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)	27
Abbildung 11: Vergleich der mittleren Terzspektren für Großbühnen und Kleinbühnen mit dem Live-Bands-Spektrum aus der Datenbank von d&b NoizCalc (unbewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB).....	28
Abbildung 12: Prognosegeraden für den Schalleistungspegel der drei untersuchten Genrekategorien auf Klein- und Großbühnen sowie der untersuchten Klassikbühnen im Vergleich zu aus Messungen ermittelten Werten.....	31
Abbildung 13: Gemessene Mindest-Versorgungspegel bei Freilichtkinos	33
Abbildung 14: Mittleres Terzspektrum für Freilichtkinos, Mittelwerte und Streubereich von 55 Vorstellungen (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)	34
Abbildung 15: Vergleich des mittleren Terzspektrums von Freilichtkinos mit dem von Moderation & Musik auf Großbühnen (unbewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB).....	34
Abbildung 16: Prognose für den Schalleistungspegel von Freilichtkinos im Vergleich zu aus Messungen ermittelten Werten ...	35
Abbildung 17: Vergleich von Prognosegeraden und Messwerten für Großbühnen SFLS 2006 und 2018.....	37
Abbildung 18: 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).....	38
Abbildung 19: Lageplan des Veranstaltungsgeländes und der naheliegenden Immissionsorte	43
Abbildung 20: Beispiel: Vergleich der prognostizierten mit den gemessenen (normierten) A-bewerteten Mittelungspegeln	44
Abbildung 22: Simulierte horizontale und vertikale Richtcharakteristik für die 63-Hz-Oktave von acht doppelt gestackten Subwooferclustern in Zahnlückenordnung (gerade/gekrümmt)	47
Abbildung 23: Lagepläne der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)	48
Abbildung 24: Lageplan des Veranstaltungsortes mit umliegender Bebauung	48
Abbildung 25: Berechnete Immissionsraster der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)	49
Abbildung 26: Differenzraster zentral-dezentral.....	49
Abbildung 27: Praktische Umsetzung des dezentralen Lautsprecherkonzeptes.....	50
Abbildung 28: Schalldämm-Maße zweier mobiler Lärmschutzwände (Quellen: Cisilent: http://www.calenberg-ingenieure.de/pre-elastomer-laermschutz-cisilent-typ-e.htm ; Ceno Wall: https://www.sattler-global.com/textile-architektur/konstruktion-und-wirkung-1164.jsp)	51
Abbildung 29: Beispielansichten mobiler Schallschutzwände; links: Ceno Wall (Foto:Sattler Global/Ceno Tec) , rechts: Cisilent (Foto: Calenberg Ingenieure).....	51
Abbildung 30: Verschiedene Lautsprechercluster an Großbühnen.....	55
Abbildung 31: Subwoofer in gekrümmter Zahnlücken-Anordnung mit Front Fills an einer Großbühne	55
Abbildung 32: Gestackte Subwoofer in End-Fire-Anordnung (links und rechts der Bühne) an einer Großbühne	56
Abbildung 33: Parameter zur Ermittlung der mittleren Höhe über Grund.....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten der zur Modellierung verwendeten, gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays	18
Tabelle 2: Daten der zur Modellierung verwendeten, hoch geflogenen Line Arrays	19
Tabelle 3: Daten der zur Modellierung verwendeten Subwoofer	22
Tabelle 4: Signalkenngrößen für Freiluftbühnen, Mittelwerte und Standardabweichungen	24
Tabelle 5: Signalkenngrößen für Freilichtkinos, Mittelwerte und Standardabweichungen	32
Tabelle 6: Vergleich gemessener und ermittelter Signalkenngrößen 2006 und 2018.....	36
Tabelle 7: Beispielrechnung: Ausgangsdaten der Veranstaltung.....	42
Tabelle 8: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für gestackte bzw. niedrig geflogene Anordnungen, horizontal, oktavweise	59
Tabelle 9: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für gestackte bzw. niedrig geflogene Anordnungen, vertikal, oktavweise	60
Tabelle 10: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für hoch geflogene Anordnungen, horizontal, oktavweise	61
Tabelle 11: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für hoch geflogene Anordnungen, vertikal, oktavweise.....	62
Tabelle 12: Aus Simulation an jeweils fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß im Vergleich zu den Werten der SFLS 2006 für Punktstrahler, breitbandig.....	63
Tabelle 13: Aus Simulation an jeweils sechs Subwoofern bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß, rotationssymmetrisch	64
Tabelle 14: Terzpegel-Korrekturwerte für Freiluftbühnen	65
Tabelle 15: Terzpegel-Korrekturwerte für Freiluftbühnen, Einzelquellen	66
Tabelle 16: Terzpegel-Korrekturwerte für Freilichtkinos	67

Fachwortverzeichnis

A-Bewertung	frequenzabhängige Anpassung von Schalldruckpegeln; entspricht dem ↗Frequenzgang des menschlichen Gehörs / den Kurven gleicher Lautstärke bei 20 – 40 phon
Abstandsmaß	gibt die Pegelminderung an, die durch die geometrische Schallausbreitung entsteht
Abstrahlcharakteristik	↗Richtcharakteristik einer Schallquelle
Ausbreitungsrechnung	Berechnung des Schalldruckpegels „von der Quelle zum Immissionsort“; Beachtung der Richtwirkung der Schallquellen und der Dämpfungen aufgrund der geometrischen Ausbreitung, Luftabsorption, Bodeneffekte, Abschirmungen, ...
Basscluster	Lautsprecher-Anordnung, die besonders für die alleinige Wiedergabe tieffrequenter Schallwellen optimiert ist
Beam Steering	Steuerung der Schallabstrahlung von Lautsprechersystemen mittels Elektronik und Software; fußt auf dem Prinzip der Wellenfeldsynthese
Beschallungsanlage	elektronische Anlage, die Audiosignale aus Mikrofonen, Instrumenten oder Wiedergabegeräten verstärkt und mittels Lautsprecher der menschlichen Wahrnehmung zugänglich macht
Beurteilungspegel	mittels Zuschlägen und Zeitbewertung ermittelter Schalldruckpegel; durch Zuschläge wird der Erfahrung und den wissenschaftlichen Erkenntnissen Rechnung getragen, dass Geräusche bestimmter Art oder unter bestimmten Bedingungen mehr oder weniger beeinträchtigend wirken
cardioid	„nierenförmig“; <i>wörtl.</i> : „herzförmig“
Cardioid-Subwoofer	↗Subwoofer mit nierenförmiger Abstrahlcharakteristik; diese Richtwirkung wird erreicht durch gegenphasige Lautsprecherabstrahlung
C-Bewertung	frequenzabhängige Anpassung von Schalldruckpegeln; entspricht dem ↗Frequenzgang des Gehörs / den Kurven gleicher Lautstärke bei 80 – 90 phon
curving	Winkelung der Einzelelemente eines ↗Line Arrays zueinander
Delay Array	↗Line-Array-System, das zusätzlich zum ↗Main Array den hinteren Bereich des Veranstaltungsgeländes versorgt (siehe Abbildung 29); der Name rührt daher, dass diese Arrays gegenüber den Hauptsystemen zeitlich verzögert angesteuert werden müssen
dezentrale Anlage	↗Beschallungsanlage, die nicht nur ein zentrales Hauptsystem besitzt; dabei werden Lautsprecher-Anordnungen über das gesamte Veranstaltungsgelände verteilt; die Einzelquellen können somit mit einem geringeren ↗Schallleistungspegel betrieben werden
Emissionskenngrößen	Kenngrößen, welche die ↗Schallemission einer Schallquelle charakterisieren; ↗Schallleistungspegel, ↗Richtcharakteristik und ↗Frequenzspektrum
Emissionsspektrum	Frequenzspektrum eines von einer Schallquelle emittierten Signals
End Fire	Anordnung von ↗Subwoofern, bei der in gewissen Abständen mehrere ↗Lautsprechercluster hintereinander gereiht werden; die Abstände und Delayeinstellungen bestimmen dabei die entstehende ↗Abstrahlcharakteristik; meist in Stereo ausgeführt
energetische Addition	„logarithmische“ Addition mittels der Formel: $\bar{x} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot x_i} \right)$
energetische Mittelung	„logarithmische“ Mittelung mittels der Formel: $\bar{x} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot x_i} \right)$

energetische Überlagerung	Überlagerung von Schallenergieanteilen, wobei Effekte durch \nearrow Kohärenz von Signalen nicht beachtet werden
energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel	konstanter Schalldruckpegel, der den gleichen Energieanteil besitzt wie ein sich zeitlich ändernder Schalldruckpegel in einem gewissen Zeitraum
Fernfeld	entfernter Bereich um eine Schallquelle; Interferenzeffekte sind weniger stark ausgeprägt; <i>hier</i> : als entfernter Bereich zum Messobjekt bzw. Anlagengelände verstanden; <i>für Line Arrays</i> : Bereich des Schallfeldes, in dem sich das Richtwirkungsmaß mit der Entfernung nicht mehr ändert
FOH	„Front of House“; <i>hier</i> : Ort im Veranstaltungsgelände, an dem der Tontechniker die über die \nearrow Beschallungsanlage wiedergegebenen Audiosignale bearbeitet; bei Open-Air-Veranstaltungen meist ein mit einem Zelt überdachter Bereich, an dem das Mischpult steht
Freilichtkino	Einrichtung für Filmvorführungen im Freien
Freiluftbühne	gegenüber einer Zuschauerfläche abgegrenztes Podium im Freien zur Darbietung von Musik, Moderation oder Theater
Frequenzgang	Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal eines linearen zeitinvarianten Systems (z.B. Lautsprecher, Mikrofon) bezüglich der Amplitude und der Phase
Frequenzspektrum	akustische Kenngröße; gibt die Zusammensetzung der verschiedenen Frequenzen eines Signals an
Front Fill	Lautsprecher-Anordnung zur Beschallung des mittleren, vorderen Publikumsbereichs (siehe Abbildung 30); <i>auch genannt</i> : Near Fill
geflogen	gehangen (meist an Traversen)
gestackt	auf einem festen Untergrund aufgestapelt
Großbühne	\nearrow Freiluftbühne mit einer \nearrow zu beschallenden Fläche von $A \geq 500 \text{ m}^2$; das bedeutet gemäß (VDI 3770, 2012) bei Sitzplätzen (2 Personen/m ²) eine maximale Zuschauerzahl von $n \geq 1000$, bei Stehplätzen (4 Personen/m ²) maximal $n \geq 2000$ Zuschauer
Hörschwelle	derjenige Schalldruckpegel, bei dem das menschliche Gehör Geräusche gerade noch wahrnimmt; abhängig von der Frequenz
Impulshaltigkeit	charakterisiert die \nearrow Schallemission von Impulsen, d.h. Emissionen mit starken zeitlichen Änderungen des \nearrow Schalleistungspegels
Informationshaltigkeit	charakterisiert die \nearrow Schallemission von Geräuschen in einem bestimmten Zeitraum, wobei Informationen aus dem Signal hervortreten
Kleinbühne	\nearrow Freiluftbühne mit einer \nearrow zu beschallenden Fläche von $A < 500 \text{ m}^2$; das bedeutet gemäß (VDI 3770, 2012) bei Sitzplätzen (2 Personen/m ²) eine maximale Zuschauerzahl von $n < 1000$, bei Stehplätzen (4 Personen/m ²) maximal $n < 2000$ Zuschauer
Kohärenz	Eigenschaft von Wellen, dass sich deren Auslenkung zeitlich bis auf eine Phasenverschiebung auf dieselbe Weise ändert
komplexe Überlagerung	Überlagerung von Schallenergieanteilen, wobei bei \nearrow kohärenten Signalen sich durch unterschiedliche Amplituden und Phasengänge konstruktive und destruktive Interferenzen ausbilden, die summiert werden
konventionelle Beschallung	Beschallung mit Punktrahlern (ohne \nearrow Line Arrays)
Lautsprechercluster	gestapelte Anordnung mehrerer Lautsprecher
Line Array	vertikale Anordnung von Lautsprecherboxen, die als Linienstrahler endlicher Länge gesehen werden kann; weisen starke vertikale Schallbündelung auf

Main Act	Hauptkünstler einer Veranstaltung; bei Ticketverkäufen zumeist die einzig angegebenen oder hervorgehobenen Künstler
Main Array	das Haupt-(↗Line Array-)System einer Beschallungsanlage, das meist breitflächig das komplette Veranstaltungsgelände versorgt (siehe Abbildung 29)
Mittel-/Hochtoncluster	Lautsprecher-Anordnung, die besonders für die Wiedergabe mittel- und hochfrequenter Schallwellen optimiert ist
Mittelungspegel	über bestimmten Zeitabschnitt ↗energetisch gemittelter Schalldruckpegel
Nahfeld	Bereich unmittelbar um eine Schallquelle; gekennzeichnet durch ungleichmäßigen Wechsel zwischen Orten konstruktiver und destruktiver Interferenzen; <i>hier</i> : als Bereich in unmittelbarer Nähe zum Messobjekt bzw. Anlagengelände verstanden; <i>für Line Arrays</i> : Bereich des Schallfeldes, in dem sich das Richtwirkungsmaß mit der Entfernung ändert
Near Fill	↗Front Fill
Oktave	Intervall zwischen zwei Tönen, deren Frequenzen sich im Verhältnis 2:1 verhalten,
Oktavband	Frequenzbereich, der durch den Einsatz eines Filters konstanter relativer Bandbreite entsteht; die Bandbreite entspricht einer ↗Oktave; charakterisiert durch die Mittenfrequenz, die das Band in zwei logarithmisch gleich große Bereiche teilt
omnidirektional	„kugelförmig“; <i>bei Abstrahlverhalten</i> : allseitig
Out Fill	↗Side Array
PA-Anlage	„Public Adress System“; ↗Beschallungsanlage, die zur Versorgung des Publikums dient
Punktstrahler	Schallquellen, die eine kugelförmige ↗Abstrahlcharakteristik aufweisen
Richtcharakteristik	akustische Kenngröße; beschreibt die Winkelabhängigkeit der abgegebenen Schallenergie, meist bezogen auf die Intensität in eine Hauptrichtung
Richtwirkungsmaß	Pegelminderung in einem Winkel entsprechend der ↗Richtcharakteristik
rotationssymmetrisch	eine Drehung um einen Punkt bildet das Objekt auf sich selbst ab; <i>hier</i> : eine Drehung um eine Hauptachse bildet das Objekt auf sich selbst ab
Schalldruckpegel	akustische Kenngröße; entspricht der „Stärke des Schallfeldes“ in der Regel im Bezug zur ↗Hörschwelle des menschlichen Gehörs
Schalldruckpegelabfall	<i>hier</i> : Absenkung des ↗Schalldruckpegels mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle
Schallemission	Abgabe von Schallsignalen durch eine Schallquelle
Schallimmission	Einwirkung von Schallsignalen auf einen (Immissions-)Ort
Schalleistungspegel	akustische Kenngröße; entspricht der pro Zeiteinheit abgegebenen Schallenergie einer Schallquelle
Scheitelmaß	mittlerer Abstand zwischen dem ↗energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel und dem zugehörigen ↗Spitzenpegel
Side Array	↗Line-Array-System, das zusätzlich zum ↗Main Array die Seiten des Veranstaltungsgeländes versorgt (siehe Abbildung 29); <i>auch genannt</i> : Out Fill
Signal-Stör-Abstand	Verhältnis der mittleren Leistung des Nutzsignals zur mittleren Leistung des Störsignals
Spektrums-Pegelkorrektur	gibt frequenzabhängige Pegelwerte an, die bei Addition mit dem ↗Schalleistungspegel einer Schallquelle deren ↗Emissionsspektrum ergeben
Spitzenpegel	in einem bestimmten Zeitraum maximal auftretender Pegel
Spitzenpegelkriterium	in verschiedenen Richtlinien (u.a. Freizeitlärmrichtlinie) dargelegt; definiert Maximalpegel, die zur Einhaltung von Richtwerten nicht überschritten werden dürfen

Standardabweichung	<i>hier:</i> empirische Standardabweichung; Kennzahl einer Stichprobe; Wurzel aus der empirischen Varianz; gibt die mittlere Abweichung der Einzelwerte zum Mittelwert der gesamten Stichprobe an
Subwoofer	Lautsprecher, der durch sein Konstruktionsprinzip für die alleinige Wiedergabe tieffrequenter Schallwellen optimiert ist
Summenpegel	durch \wedge energetische Addition ermittelter Gesamt-Schalldruckpegel
Surround-Lautsprecher	Lautsprecher die zur Wiedergabe von Surround-Mehrkanal-Tonsystemen optimiert sind
Taktmaximal-Mittelungspegel	Mittelungspegel, der in bestimmten Zeitabschnitten/Takten (meist 5s) bestimmten \wedge Spitzenpegeln; dient der Beurteilung der Lästigkeit von impulshaltigen Signalen
Terzband	Frequenzbereich, der durch den Einsatz eines Filters konstanter relativer Bandbreite entsteht; die Bandbreite entspricht einer Drittel- \wedge Oktave; charakterisiert durch die Mittenfrequenz, die das Band in zwei logarithmisch gleich große Bereiche teilt
Tonhaltigkeit	charakterisiert die \wedge Schallemission von Geräuschen in einem bestimmten Zeitraum, wobei ein oder mehrere Töne hörbar aus dem Signal hervortreten
Versorgungsgebiet	<i>hier:</i> \wedge zu beschallende Fläche
Versorgungspegel	mittlerer Schalldruckpegel am entferntesten Hörerplatz des Veranstaltungsgeländes
Vorband	\wedge Vorgruppe
Vorgruppe	Band oder Künstler, die vor dem \wedge Main Act einer Konzertveranstaltung auftritt
Zahnücke	<i>hier:</i> Anordnung von \wedge Subwoofern, bei der in gleichmäßigen Abständen mehrere Einzelboxen oder \wedge Lautsprechercluster aneinandergereiht werden; die Abstände und Delayeinstellungen bestimmen dabei die entstehende \wedge Abstrahlcharakteristik; meist mit mehr als zwei Clustern
zu beschallende Fläche	Rezeptionsbereich einer beschallten Veranstaltung; definiert durch den entferntesten Hörerplatz und die geometrische Ausdehnung des Veranstaltungsgeländes

Abkürzungen und Formelzeichen

A	m ²	zu beschallende Fläche
A_m	m ²	Fläche, die sich zwischen der Sichtlinie von Lautsprechercluster und Immissionsort und dem Bodenprofil ergibt
$A[T/O]$	dB	A-Korrektur in Terz- bzw. Oktavbändern gemäß DIN EN 61672-1
$C[T/O]$	dB	C-Korrektur in Terz- bzw. Oktavbändern gemäß DIN EN 61672-1
D	dB	Gesamt-Dämpfungsmaß für die Schallausbreitung von der Punktschallquelle zum Empfänger (entspricht A in DIN ISO 9613-2) ¹
D_{atm}	dB	Dämpfungsmaß für Luftabsorption (entspricht A_{atm} in DIN ISO 9613-2)
D_{bar}	dB	Dämpfungsmaß für Abschirmung (entspricht A_{bar} in DIN ISO 9613-2)
D_{div}	dB	Dämpfungsmaß für die geometrische Ausbreitung (entspricht A_{div} in DIN ISO 9613-2)
$D_f^0[T/O]$	dB	Terz- bzw. Oktavpegel-Korrekturwert, normiert
D_{gr}	dB	Dämpfungsmaß für den Bodeneffekt (entspricht A_{gr} in DIN ISO 9613-2)
D_I	dB	Richtwirkungsmaß
$D_I[T/O]$	dB	Richtwirkungsmaß in Terz- bzw. Oktavbändern
D_{misc}	dB	Dämpfungsmaß für verschiedene Effekte (entspricht A_{misc} in DIN ISO 9613-2)
FOH		Front of House, siehe Fachwortverzeichnis
G		Genrekategorie
h_L	m	senkrechter Abstand der Mitte zwischen Ober- und Unterkante des Lautsprecherclusters vom Grund
IO		Immissionsort, Messort
K_G	dB	Genrekorrektur-Wert
K_I	dB	Zuschlag für Impulshaltigkeit
l	m	Länge, Arraylänge
L_A	dB(A)	Summenpegel, A-bewertet
L_{Aeq}	dB(A)	äquivalenter Dauerschalldruckpegel für einen zeitlich kontinuierlichen Schallpegel gemäß DIN 45641, A-bewertet
$L_{Aeq,mess}$	dB(A)	gemessener äquivalenter Dauerschalldruckpegel, A-bewertet

¹ In diesem Bericht ist A für Flächen und D für Dämpfungsmaße definiert (in DIN ISO 9613-2: A für Dämpfungsmaße).

L_{AFTeq}	dB(A)	Taktmaximal-Mittelungspegel gemäß DIN 45645-1, A-bewertet
L_{AFmax}	dB(A)	Maximalpegel/Spitzenpegel, A-bewertet
L_{Ceq}	dB(C)	äquivalenter Dauerschalldruckpegel für einen zeitlich kontinuierlichen Schallpegel gemäß DIN 45641, C-bewertet
ΔL_{Amax}	dB(A)	Scheitelmaß, A-bewertet
L_{VA}	dB(A)	Versorgungspegel (mittlerer Schalldruckpegel am entferntesten Zuschauerplatz), A-bewertet
L_{WA}	dB(A)	Schalleistungspegel, A-bewertet
$L_{WA}[T/O]$	dB(A)	Schalleistungspegel in Terz- bzw. Oktavbändern, A-bewertet
$L_{WA,prog}$	dB(A)	prognostizierter Schalleistungspegel, A-bewertet
MP		Messpunkt, Messort
n, N		Stichprobenumfang, Anzahl
r	m	Abstand, Radius
r_G	m	Grenzfernung, Grenzradius
r.F.		relative Luftfeuchtigkeit
SFLS		Sächsische Freizeitlärmstudie (SFLS, 2006)
s_L	m	Entfernung zwischen Lautsprecherclustern
s_m	m	Entfernung zwischen Schallquelle und Messort
X_i		Einzelmesswert
σ		Standardabweichung
μ		arithmetischer Mittelwert
λ	m	Wellenlänge

1 Vorbemerkungen

Grundlage der durchzuführenden Arbeiten bilden die Ergebnisse der vorliegenden Sächsischen Freizeitlärmstudie (SFLS, 2006), abgekürzt: SFLS sowie der Ergänzung zum Thema „Public Viewing“ aus dem Jahre 2008. Mehr als 10 Jahre nach Veröffentlichung der Erstfassung ist es notwendig, die Emissionskenngrößen und Prognoseverfahren vor allem auf dem Gebiet „Freiluftkonzerte“ zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren. Im genannten Zeitraum war eine intensive technische Weiterentwicklung der verwendeten Beschallungsanlagen zu verzeichnen, die im Zusammenhang mit neuen Musikrichtungen und geänderten Klangpräferenzen eine Überprüfung der Emissionskenngrößen hinsichtlich Schalleistungspegel, Richtcharakteristik und Spektrum nahelegen.

Auf der Basis von neu durchzuführenden Messungen und der Auswertung vorhandener Berichte und Kenngrößen sind die in der Sächsischen Freizeitlärmstudie zusammengestellten Emissionskenngrößen und Prognoseverfahren insbesondere zum Thema „Freiluftbühnen“ zu aktualisieren und wenn nötig entsprechend dem neuesten Stand der Technik weiterzuentwickeln. Zusätzlich ist die Geräuschquelle „Freilichtkinos“ als eigene Freizeitanlage zu untersuchen und mit ihren spezifischen Emissionskenngrößen zu erfassen.

Folgende Punkte sollen Bestandteil der Untersuchung sein:

- Einarbeitung aktueller Messdaten/Erfahrungen insbesondere zum Thema Freiluftkonzerte
- Durchführung eigener Messungen zur Datengewinnung an verschiedenen Freiluftbühnen
- Einarbeitung von aktuellen Messdaten anderer Quellen (z.B. Literatur, andere Messstellen, Lautsprecherhersteller)
- Neuer Unterpunkt/Freizeitanlage: „Freilichtkinos“ mit Emissionskenngrößen, Richtwirkung, Modellierung auf der Basis neu zu erhebender Messdaten
- Betrachtung aktueller Beschallungstechnologien (Line Arrays, Cardioid-Subwoofer) und Schallschutztechnik (Bühneneinhausungen) im Hinblick auf erreichbare Pegelminderungen und genauere Prognoseverfahren

Im ersten Teil des Berichts werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Richtwirkung moderner Beschallungsanlagen dargestellt. Es folgen aktuelle Messdaten zu Freiluftbühnen, wobei als Quellen sowohl eigene Messungen als auch Daten anderer Messstellen und Lautsprecherhersteller dienen. Damit wurden die schon früher abgeleiteten Prognosealgorithmen aktualisiert. Weiterhin werden die Emissionskenngrößen für Freilichtkinos aufgeführt, die auf der Basis eigener Messungen abgeleitet wurden. Für diese Anlagenart können erstmalig Prognosealgorithmen präsentiert werden, die sich an der bewährten Vorgehensweise bei Freiluftbühnen orientieren. Im letzten Abschnitt werden Maßnahmen zur Pegelminderung an Freiluftbühnen und Freilichtkinos vorgestellt.

2 Vorgehensweise

2.1 Signalkenngrößen

Obwohl die verwendeten Signalkenngrößen bereits in der SFLS beschrieben wurden, sollen sie hier noch einmal kurz zusammengefasst werden.

Aus Nahfeldmessungen², die in jedem Fall ausreichende Signal-Stör-Abstände aufwiesen, wurden die Langzeit-Signalmittelungswerte ermittelt, wie:

- energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel L_{Aeq} gemäß DIN 45641, über die jeweilige Gesamtdauer einer Veranstaltung, inkl. kürzerer Pausen, A-bewertet,
- Taktmaximal-Mittelungspegel L_{AFTeq} gemäß DIN 45645-1, ermittelt nach DIN 45641, A-bewertet,
- Zuschlag für Impulshaltigkeit K_I , der nach Sechster Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm), im Folgenden als TA Lärm beschrieben, gemäß Gleichung (1) als Differenz zwischen dem Taktmaximal-Mittelungspegel und dem zugehörigen energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel definiert ist.

$$K_I = L_{AFTeq} - L_{Aeq} \quad (1)$$

L_{AFTeq} A-bewerteter Taktmaximal-Mittelungspegel, in dB(A), Zeitbewertung fast
 L_{Aeq} A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel, in dB(A)

- Scheitelmaß ΔL_{Amax} , das hier gemäß Gleichung (2) als mittlerer Abstand zwischen dem energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel und dem zugehörigen Spitzenpegel verstanden wird. Für Fernfeld-Immissionssorte kann es sehr gut als Indikator für das Spitzenpegelkriterium herangezogen werden.

$$\Delta L_{Amax} = L_{AFmax} - L_{Aeq} \quad (2)$$

L_{AFmax} A-bewerteter Spitzenpegel, in dB(A), Zeitbewertung fast
 L_{Aeq} A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel, in dB(A)

Schallausbreitungsrechnungen erfolgen allgemein für eine äquivalente, ungerichtet abstrahlende Punktschallquelle nach Gleichung (3):

$$L_{Aeq} = L_{WA} + D_I - D \quad (3)$$

L_{WA} A-bewerteter Schalleistungspegel der Schallquelle, in dB(A)
 D_I Richtwirkungsmaß, in dB
 D Gesamt-Dämpfungsmaß für die Schallausbreitung von der Punktschallquelle zum Empfänger, in dB

Für die untersuchten Beschallungsanlagen wurde das mittlere Spektrum durch arithmetische Mittelung bestimmt. Die Spektren werden generell als normierte Spektren mit einem Summenpegel „0 dB(A)“ angegeben. Für eine detaillierte Prognose kann das Emissionsspektrum $L_{WA}[T/O]$ einer Beschallungsanlage in Terz- oder Oktavbändern

² Die Begriffe „Nahfeld“ und „Fernfeld“ werden hier nicht im strengen Sinne der akustischen Fachterminologie benutzt, wo sie auf die Abmessungen eines Schallstrahlers bezogen werden, sondern auf die Dimensionen des Messobjekts bzw. Veranstaltungsgeländes.

somit gemäß Gleichung (4) durch einfache Addition der Spektrums-Pegelkorrekturen $D_f^0[\text{T/O}]$ und der prognostizierten A-bewerteten Schallleistungspegel L_{WA} gebildet werden.

$$L_{WA}[\text{T/O}] = L_{WA} + D_f^0[\text{T/O}] \quad (4)$$

L_{WA} A-bewerteter Schallleistungspegel in dB(A)
 $D_f^0[\text{T/O}]$ Terz- oder Oktav-Pegelkorrekturwert in dB, normiert

Um eine Aussage über die Streuung der in die Auswertung einbezogenen Einzelmessungen, und damit über die Präzision einer daraus abgeleiteten Prognose, machen zu können, werden für alle Mittelwerte auch die Standardabweichungen der Stichprobe σ nach (5) angegeben.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2} \quad (5)$$

X_i Einzelmesswert
 μ arithmetischer Mittelwert der Stichprobe
 $n-1$ Freiheitsgrad der Stichprobe des Umfangs n

Mit Hilfe der ebenfalls ausgewiesenen Messwerte-Anzahlen (Stichprobenumfang) lässt sich daraus bei Bedarf auch der Vertrauensbereich für die angegebenen Mittelwerte berechnen.

2.2 Messungen

Mit der genannten Zielstellung wurden in den Jahren 2017 und 2018 eigene Messungen an insgesamt 33 Beschallungsanlagen für Freiluftbühnen mit insgesamt 86 Konzerten durchgeführt. Zur Verifizierung dienten außerdem Ergebnisse einer anderen Messstelle (Förster & Wolgast, 2017) sowie eines Lautsprecherherstellers (d&b, 2017). Weiterhin wurden Messungen an Beschallungsanlagen von 7 Veranstaltungsstätten für Freilichtkino mit insgesamt 55 Kinovorstellungen durchgeführt.

In der Regel lagen die Messorte am hinteren Rand der beschallten Fläche. Die so bestimmten Mittelungspegel L_{Aeq} entsprechen somit dem schon früher definierten Mindest-Versorgungspegel $L_{VA,min}$. Da der Name Mindest-Versorgungspegel allerdings fehlleitend sein kann, erfolgte in den vorliegenden Ergänzungen eine Umbenennung in „Versorgungspegel L_{VA} “. Weiterhin wurden Terzspektren des Programmsignals an verschiedenen Messorten im Rezeptionsbereich der Bühnen und Freilichtkinos aufgenommen. Aus den aufgenommenen Pegel-Zeitverläufen an den verschiedenen Messpunkten kann außerdem auf die Dynamik des Programms (mit dem Scheitelmaß ΔL_{Amax}) sowie auf die Impulshaltigkeit geschlossen werden (mit dem Impulszuschlag K_I).

Die Messungen erfolgten mit Schallpegelmessern der Klasse I, deren ordnungsgemäße Funktionalität vor und nach dem Betrieb mit einem geeichten Kalibrator geprüft wurde. Gemäß DIN EN 61672-1 ergeben sich so maximal mögliche Gerätefehler von $\pm 0,7$ dB (1000 Hz).

2.3 Ermittlung von Emissionskenngrößen

Die bereits durch die SFLS bewährten Ansätze zur Ermittlung von Emissionskenngrößen von Beschallungsanlagen wurden auch bei den vorliegenden Untersuchungen verwendet. So ließ sich durch Ausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2 mit den gemessenen Versorgungspegeln L_{VA} auf die Schalleistungspegel der jeweiligen Lautsprecher schließen. Hierbei wurde in Oktavbändern gerechnet und für die A-bewerteten Kenngrößen eine detaillierte Prognose gemäß TA Lärm gemacht. Dabei wurden vorerst die Ausbreitungsparameter der zwei Hauptquellen bestimmt und dann mittels Gleichung (7) auf die Schalleistung der gesamten Beschallungsanlage geschlossen. Als Richtwirkungsmaß für Aufbauten mit Line Arrays wurden die in Abschnitt 3.1 ermittelten, oktavweisen Werte verwendet. Bei konventioneller Beschallung mit Punktstrahlern wurden die D_1 -Werte der SFLS eingesetzt.

Für die Entwicklung aktueller Berechnungsalgorithmen wurden die so ermittelten Schalleistungspegel zur zu beschallenden Fläche A in m^2 in Bezug gesetzt. Aufgrund der Ergebnisse früherer Untersuchungen lässt sich feststellen, dass sich so die sicherste Prognose ergibt.

Die Auswertung der bei Messungen ermittelten Frequenzspektren erfolgte durch arithmetische Mittelung der entsprechenden Terzpegel der Konzerte. Um den Einfluss der Luftabsorption bei verschiedenen Messabständen zu vermindern, wurden die Werte gemäß DIN ISO 9613-2 mit den jeweiligen Abständen korrigiert. Da auf einzelnen Bühnen eine relativ hohe Anzahl von Veranstaltungen messtechnisch erfasst wurden, erfolgte zunächst eine Mittelung der Konzerte pro Bühne. Die so bestimmten mittleren Spektren wurden dann nochmals über alle Bühnen gemittelt, um die endgültigen Signalspektren zu bestimmen.

Um Aussagen zur Richtcharakteristik moderner Lautsprecheranlagen zu erhalten wurden mittlere Richtwirkungsmaße von zehn Line Arrays und zehn Subwoofern mithilfe der Simulationssoftware EASE SpeakerLab (AFMG, 2009) bestimmt. Diese Untersuchungen sind in Abschnitt 3 dargelegt.

2.4 Hinweise zur Beurteilung der Immissionen

Zur Beurteilung der Immissionssituation ist, ausgehend von den prognostizierten Emissionspegeln, der Beurteilungspegel nach der jeweils dafür gültigen Vorschrift unter Berücksichtigung der Zuschläge für Impulshaltigkeit, Ton- und Informationshaltigkeit sowie ggf. für Ruhezeiten zu bestimmen und mit den entsprechenden Immissionsrichtwerten zu vergleichen.

3 Untersuchungen zum Richtwirkungsmaß

3.1 Line Arrays



Abbildung 1: Beispiel Line Array

Beschallungsanlagen sind die entscheidenden Quellen der Schallemission sowohl für Freiluftbühnen als auch Freilichtkinos. Wegen der spezifischen Abstrahlcharakteristik sollte bei Lautsprechern das Richtwirkungsmaß D_1 nicht vernachlässigt werden. In der SFLS wurde eine mittlere Richtcharakteristik für Beschallungsanlagen hergeleitet, die auf der Computersimulation verschiedener typischer Lautsprecheranordnungen beruhte. Basis dafür bildeten Herstellerangaben zur frequenzabhängigen Richtcharakteristik der einzelnen Lautsprecherboxen. Die damals zur Modellierung verwendeten Lautsprechersysteme waren Punktstrahler bzw. Gruppen von Punktstrahlern. Die so bestimmten Richtwirkungsmaße wurden nur für die horizontale Ebene angegeben, wobei vereinfacht eine rotationssymmetrische Abstrahlung angenommen wurde.

Dieser Ansatz mit den 2006 ermittelten Daten ist für Lautsprecheranordnungen, die einem Punktstrahler nahekommen, nach wie vor verwendbar. Solche Systeme werden auch heute noch häufig für Kleinbühnen und Freilichtkinos angewendet. In den vergangenen zehn Jahren haben sich allerdings für die Beschallung mittlerer und größerer Bühnen sogenannte Line Arrays durchgesetzt,

die aus einer vertikalen Anreihung einer mehr oder weniger großen Anzahl von Einzelboxen bestehen (siehe *Abbildung 1*). Diese Arrays sind physikalisch als Linienstrahler endlicher Länge anzusehen und weisen deshalb in der Regel eine wesentlich stärkere vertikale Schallbündelung auf als in der horizontalen Ebene. Zur genaueren Nachbildung der Richtwirkung dieser Systeme, die sowohl für die Auswertung von Messungen als auch die Prognoserechnung der Schallausbreitung benötigt wird, wurde deshalb die Modellierung von typischen Line Arrays durch Mittelung der horizontalen bzw. vertikalen Richtwirkungsmaße verschiedener Array-Typen und -Konfigurationen vorgenommen. Dabei wurden Systeme verwendet, die bei den gemessenen Bühnen und Kinos im Zeitraum 2011 – 2018 zum Einsatz kamen. (siehe *Tabelle 1* und *Tabelle 2*).

Tabelle 1: Daten der zur Modellierung verwendeten, gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays

Hersteller	Modell	Anz.	Einsatz	h_L^3 / m	Winkelung ⁴ / °
Studt-Akustik	S26510L	3	Kleinbühne (Rock/Pop)	2,0	0; 0
dB Technologies	DVA T8	3	Kleinbühne (Kl./Jazz/W.) ⁵	2,2	0; 0
d&b audiotechnik	Y-Serie	4	Kleinbühne (Kl./Jazz/W.)	1,9	0; 0; 2
Meyer Sound	M'elodie	6	Kleinbühne (Kl./Jazz/W.)	3,4	0; -1; -1; -3; -5
L-Acoustics	KARA	6	Kleinbühne (Rock/Pop)	3,2	-1; -1; -3; -5; -7,5

³ Bei Line Arrays beschreibt die mittlere Höhe h_L den Abstand der Mitte zwischen Ober- und Unterkante des Arrays vom Grund.

⁴ Die „Winkelung“ beschreibt die vertikalen Winkel zwischen den Einzelboxen der Arrays vom Rahmen ausgehend. Der vertikale Winkel des (Flug-)Rahmens wurde bei der Modellierung mit 0° definiert.

⁵ Klassik/Jazz/Welt

Tabelle 2: Daten der zur Modellierung verwendeten, hoch geflogenen Line Arrays

Hersteller	Modell	Anz.	Einsatz	h_L /m	Winkelung $^\circ$
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.) ⁶	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

Bei den auf Großbühnen eingesetzten Beschallungsanlagen waren ausschließlich Line Arrays anzutreffen, die je nach Größe der zu beschallenden Fläche dimensioniert wurden. Diese wurden mit vielen Einzelementen sowie starkem „curving“⁷ versehen und hoch aufgehängt. So kann auch über weite Entfernungen eine gleichmäßige Versorgung mit Schall sichergestellt werden (vgl. *Abbildung 2* rechts). Auf Kleinbühnen kamen ähnliche Systeme zum Einsatz, wobei sie allerdings eher niedrig gehangen bzw. gestackt wurden. Auch die Anzahl an Einzelboxen und die Winkelungen waren hier deutlich geringer (vgl. *Abbildung 2* links). Für die beiden Fälle ergeben sich in der horizontalen und vertikalen Ebene je nach Ausrichtung des Hauptabstrahlwinkels unterschiedliche Richtcharakteristiken. Dementsprechend wurden zwei mittlere Richtwirkungsmaße für „gestackte bzw. niedrig geflogene Arrays“ und „hoch geflogene Arrays“ ermittelt.

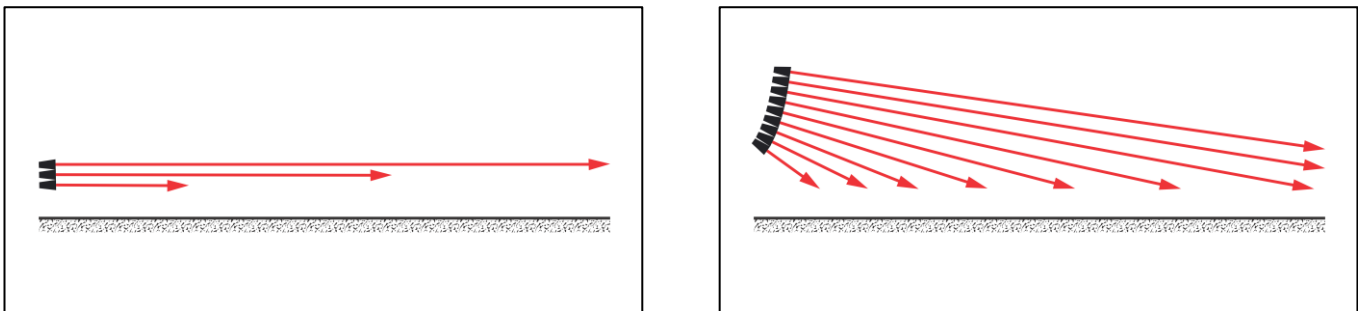


Abbildung 2: Typische Anordnung von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays (links) sowie von hoch geflogenen Systemen (rechts) über ebenem Grund

Bei der Modellierung von Line Arrays ist zu beachten, dass deren Richtwirkungsmaß im Nahfeld entfernungsabhängig ist. Der Übergang vom Nah- zum Fernfeld wird durch die Grenzentfernung r_G charakterisiert, die frequenzabhängig ist und näherungsweise nach Gleichung (6) bestimmt werden kann. Für eine (übliche) Array-Länge l von 5 m und eine Frequenz von 1000 Hz liegt die Grenzentfernung r_G bei ca. 37 m.

$$r_G = \frac{l^2}{2\lambda} \tag{6}$$

l Länge des Line Arrays in m
 λ Wellenlänge in m

Zur Ermittlung der Richtwirkungsmaße wurde die Software EASE SpeakerLab (AFMG, 2009) verwendet. Das Programm liefert für jedes Array durch komplexe Überlagerung der Abstrahlung der Einzelsysteme das Richtwirkungsmaß in 10°-Schritten (horizontal und vertikal) für die Oktaven von 63 Hz bis 8 kHz. Damit die Modellierung für die

⁶ Die Einordnung als Kleinbühne ist hier der Prognose des Schalleistungspegels mittels Genrekategorien geschuldet (siehe Abschnitt 4.4). Die zu beschallende Fläche lässt eher auf eine Großbühne schließen ($A = 1010 \text{ m}^2$).

⁷ „curving“ beschreibt die Winkelung der Einzelemente eines Line Arrays zueinander.

pegelbestimmenden Frequenzen im Fernfeld stattfinden kann, wurden die Abstrahlcharakteristiken für eine Entfernung von 100 m zum Line Array simuliert.

Für die beiden Fälle „gestacktes bzw. niedrig geflogenes Array“ und „hoch geflogenes Array“ wurde das Richtwirkungsmaß pro Oktave für die jeweiligen fünf Line Arrays arithmetisch gemittelt. Die mittleren Richtwirkungsmaße für die Oktaven 63 Hz bis 8 kHz können *Abbildung 3* und *4* sowie *Tabelle 8* bis *11* im Anhang III entnommen werden.

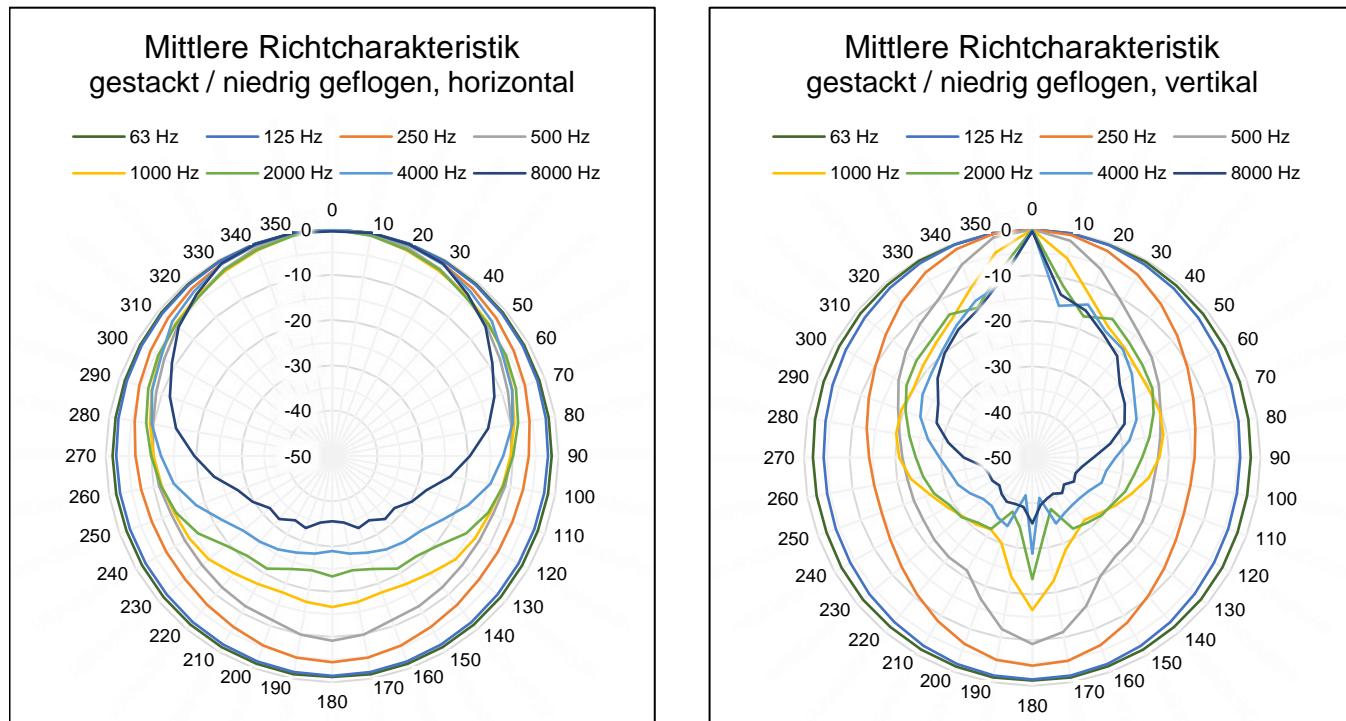


Abbildung 3: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays, oktavweise

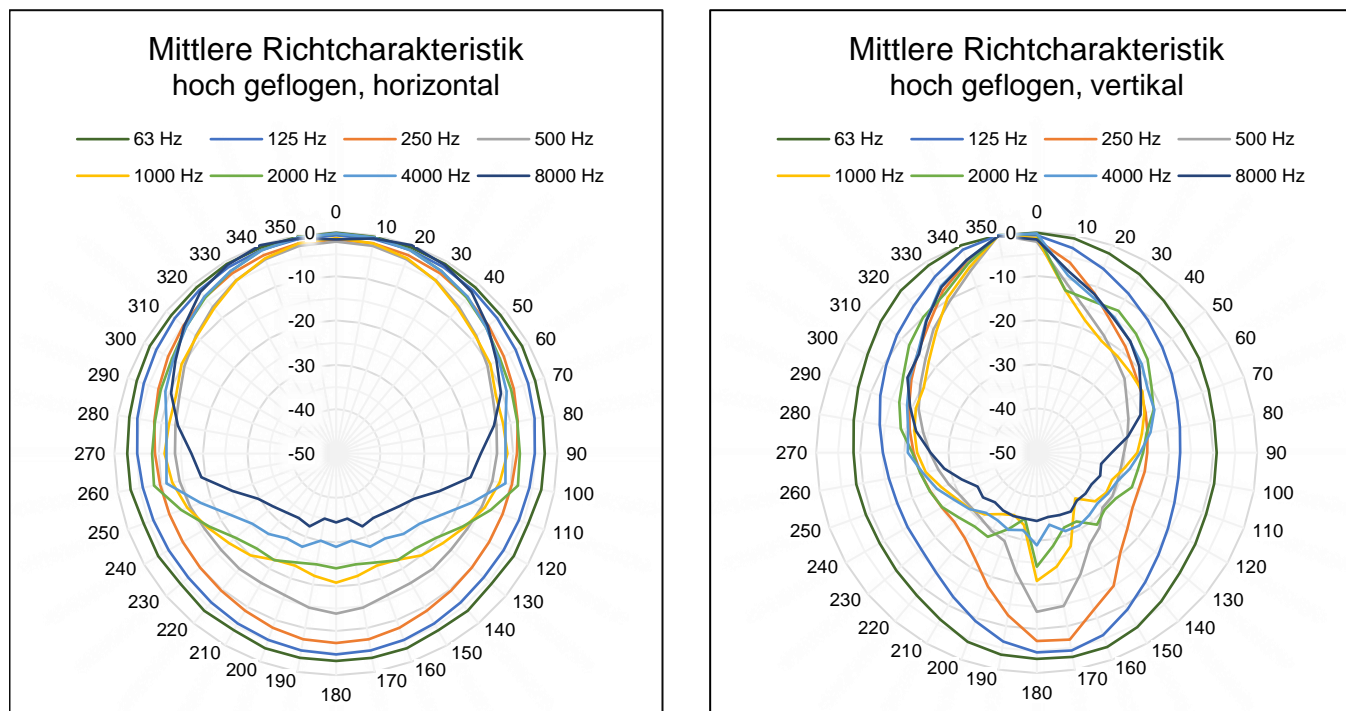


Abbildung 4: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von hoch geflogenen Line Arrays, oktavweise

Weiterhin wurde ein mittleres, breitbandiges Richtwirkungsmaß ermittelt, das *Abbildung 5* und *6* sowie *Tabelle 12* im Anhang III entnommen werden kann. Dazu wurden für jedes der jeweiligen fünf Einzelcluster die Richtwirkungsmaße mit der A-Kurve sowie dem typischen Spektrum für Großbühnen bzw. Kleinbühnen bewertet und anschließend gemittelt. Die Spektren wurden aus einer Vielzahl eigener Messungen an verschiedenen Bühnen sowie Angaben anderer Messstellen ermittelt (siehe Abschnitt 4.3). Die Werte für die spektrale Korrektur breitbandiger Pegelwerte sind in *Tabelle 14* im Anhang III dargestellt.

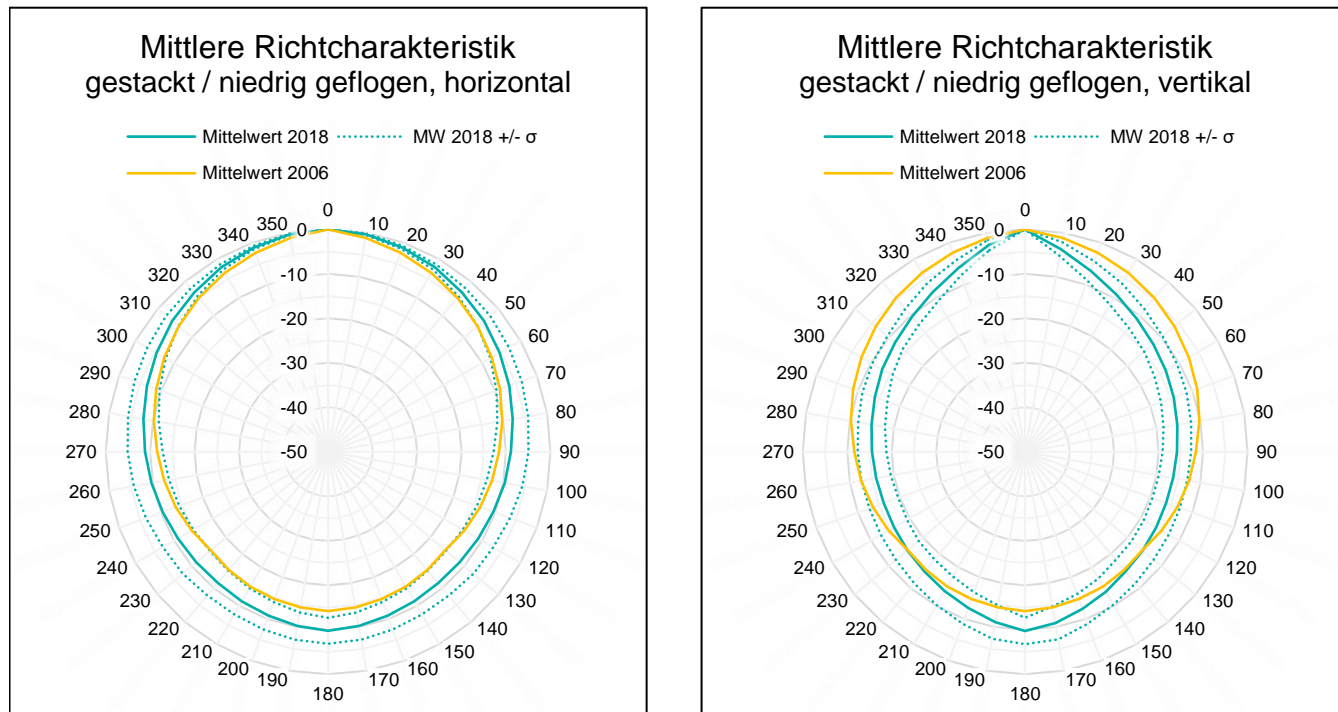


Abbildung 5: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von gestackten bzw. niedrig geflogenen Line Arrays (mit Standardabweichung) im Vergleich zu den Werten der SFLS für Punktstrahler, breitbandig, A-bewertet, mit dem jeweiligen Kleinbühnen-Spektrum bewertet

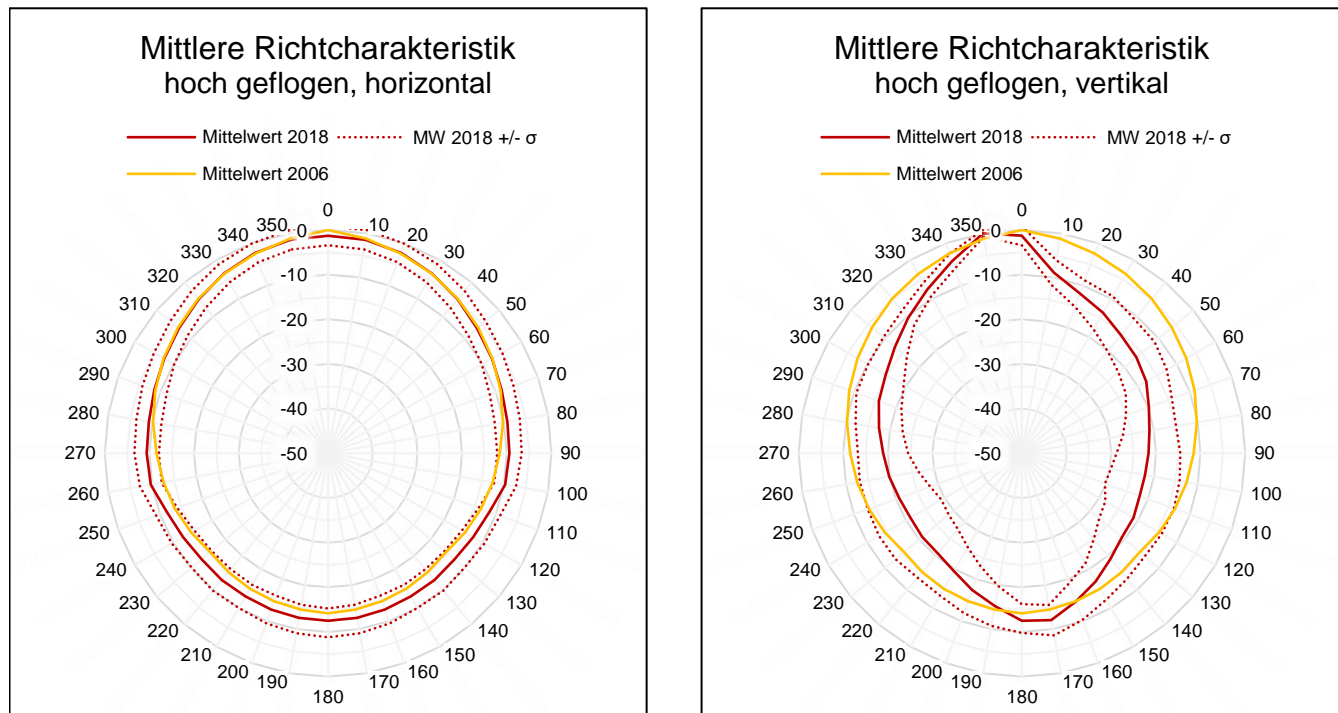


Abbildung 6: Simulierte mittlere horizontale und vertikale Richtcharakteristik von hoch geflogenen Line Arrays (mit Standardabweichung) im Vergleich zu den Werten der SFLS für Punktstrahler, breitbandig, A-bewertet, mit dem Großbühnen-Spektrum bewertet

Der Vergleich zur Richtcharakteristik für Punktschallquellen, die in der SFLS 2006 dargestellt wurde, zeigt allgemein eine etwas breitere horizontale und eine deutlich schmalere vertikale Richtcharakteristik moderner Line Arrays. In *Abbildung 5* lässt sich erkennen, dass bei geringerer Winkelung der Arrays, ein annähernd achsensymmetrischer Verlauf mit dem Hauptmaximum bei einem horizontalen und vertikalen Winkel von 0° erreicht wird. Hingegen wird durch das „curving“ von hoch geflogenen Anordnungen der Hauptabstrahlwinkel zum Boden hin gerichtet (vgl. *Abbildung 6*, vertikales Maximum bei ca. 350°). Generell ist die vertikale Richtkeule bei Systemen mit vielen Einzelelementen nach oben (vertikal 90°), unten (vertikal 270°) und hinten (vertikal 180°) schmaler. Dabei zeigt die hohe Standardabweichung in dieser Ebene, dass sich die Dämpfung je nach Arraylänge sehr stark ändern kann.

3.2 Subwoofer

Subwoofer wurden bisher in der SFLS 2006 nicht gesondert untersucht, da sie allgemein nur geringen Einfluss auf den A-bewerteten Summenpegel haben, der als Beurteilungsgrundlage dient. Mit der technischen Weiterentwicklung sind allerdings neue Problemstellungen entstanden, bei denen auch tieffrequenter Schall relevant ist. Besonders bei der Wiedergabe von Musik hat sich der Trend hin zu immer höheren spektralen Anteilen im Bassbereich entwickelt (siehe Abschnitt 4). Zudem werden Veranstaltungen immer näher an potenziellen Immissionsorten durchgeführt.

Allgemein sind Subwoofer für die alleinige Wiedergabe tiefer Frequenzen optimiert. Die Richtcharakteristik solcher Systeme ist somit als annähernd kugelförmig zu erwarten, da lange Schallwellen nur bedingt gerichtet abgestrahlt werden können. Allerdings kann durch bestimmte Aufstellungen der Boxen sowie die Ansteuerung mit unterschiedlichen

Verzögerungszeiten eine deutlich gerichtete Schallabstrahlung bereitgestellt werden. Anordnungen wie gestackte Arrays, „Zahnlücke“ oder „End Fire“ (siehe Anhang I, vgl. (Mike Rauchfleisch, 2017)) können dabei stärkere seitliche sowie teils vertikale Schallbündelung erreichen.

In den letzten Jahren hat sich zudem der Einsatz von sogenannten Cardioid-Subwoofern deutlich verstärkt. Diese Bassboxen werden mit zusätzlichen Lautsprechertreibern ausgestattet, die entgegen der Hauptabstrahlrichtung wirken. Durch destruktive Interferenzen wird so weniger Schallenergie nach hinten abgegeben. Der Einsatz solcher Systeme hat dabei nicht nur immissions-technische Vorteile, sondern schafft auch einen guten Bühnenklang für die Künstler.

Tabelle 3: Daten der zur Modellierung verwendeten Subwoofer

Hersteller	Modell	Anz.	Treiber	cardioid
Amadeus	DIVA XL 15	2	1x 15"	
APG	UL115B	2	1x 15"	
d&b	18A-SUB	2	1x 18"	
L-Acoustics	SB 18	2	1x 18"	
d&b	V-SUB	2	1x 18"; 1x12"	✓
Meyer Sound	500-HP	2	2x 12"	
dB Technologies	VIO S118	2	2x 18"	✓
d&b	J-SUB	2	3x 18"	✓
Kling&Freitag	Nomos XLC	2	3x 18"	✓
d&b	J-INFRA	2	3x 21"	✓

Um die Richtcharakteristik von Subwoofern zu modellieren wurde ebenfalls die Software EASE SpeakerLab (AFMG, 2009) verwendet. Die jeweils fünf verwendeten, doppelt gestackten Cluster können *Tabelle 3* entnommen werden. Dabei wurden die D_1 -Werte pro Oktave (31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz) gemittelt. Da die Abweichungen zwischen den horizontalen und vertikalen Werten nur sehr gering sind, werden die Richtwirkungsmaße rotationssymmetrisch angegeben (siehe *Tabelle 13* im Anhang III).

Tabelle 13 (siehe Anhang III) kann entnommen werden, dass Cardioid-Subwoofer eine bessere Rückwärtsdämpfung besitzen als omnidirektionale.

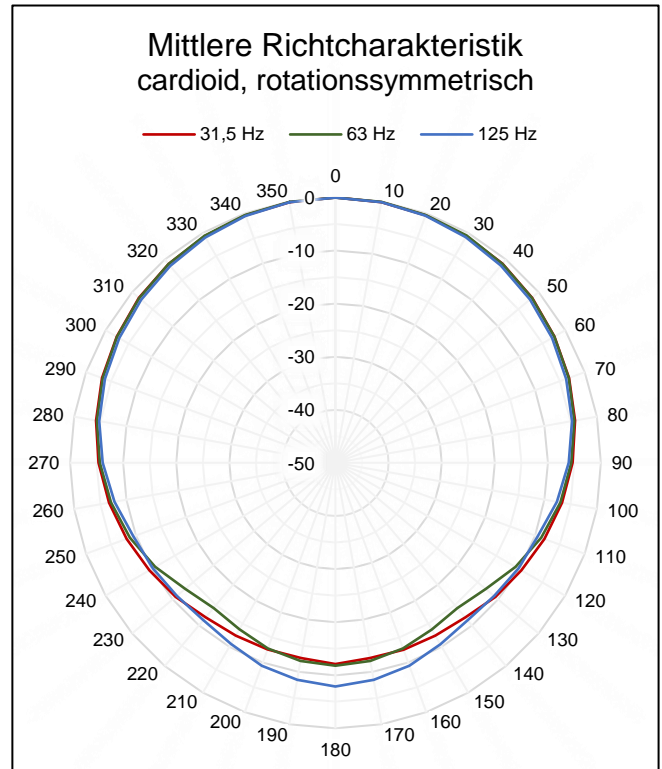
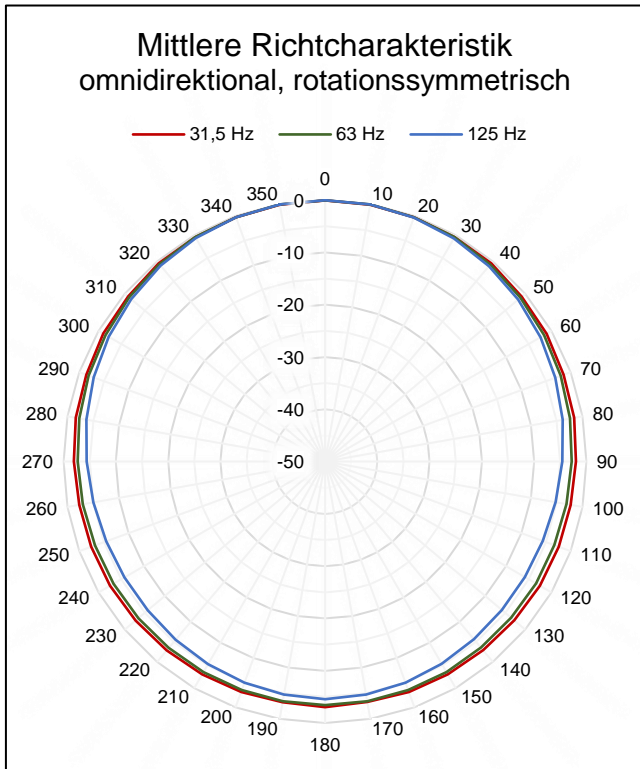


Abbildung 7: Simulierte mittlere, rotationssymmetrische Richtcharakteristik von omnidirektionalen und Cardioid-Subwoofern, oktavweise

4 Untersuchungen an Freiluftbühnen

4.1 Allgemeines

In die aktuelle Auswertung gingen Messdaten von 86 Konzerten ein, die an insgesamt 33 Freiluftbühnen ausgeführt wurden. Dabei wurden in der Regel mittlere Terz-Pegelspektren sowie Pegel-Zeitverläufe über längere Zeiträume von Darbietungen aufgenommen⁸. Die daraus gewonnenen Mittelungspegel und statistischen Parameter beziehen sich also auf den Gesamtzeitraum, in denen eine Bühne "in Betrieb" ist, einschließlich kurzer Pausen, z.B. zwischen Musiktiteln. Messpunkte lagen dabei meist am Rande und Ende des Rezeptionsbereiches⁹. In einzelnen Fällen wurde zur Kontrolle der Schallausbreitung auch hinter und seitlich der Bühne gemessen.

Die schon früher vorgenommene Unterscheidung zwischen Klein- und Großbühnen (vgl. SFLS) wurde übernommen, wobei die Grenze typischerweise bei einer zu beschallenden Fläche von $A \approx 500 \text{ m}^2$ liegt. Dies entspricht nach VDI 3770 einer Anzahl von ca. 1000 Sitzplätzen oder ca. 2000 Stehplätzen. Bei den aktuell (2011 – 2018) untersuchten Bühnen lässt sich feststellen, dass Großbühnen mit Line Arrays beschallt wurden, während Kleinbühnen auch mit Punktstrahlern beschallt wurden. Die Konzerte auf Großbühnen wiesen ein breites Spektrum an Musikrichtungen auf. Vertreten waren u.a. Rock/Pop, Schlager, Punkrock, Hip-Hop, Metal und Singer/Songwriter. Auf Kleinbühnen wurden vor allem Konzerte in den Musikrichtungen Jazz/Welt, Folk und Singer/Songwriter, aber auch Rock/Pop, Schlager und Punk untersucht. Als neue Kategorie wurden Vorgruppen auf Großbühnen mit aufgenommen, wofür Messwerte von 15 Konzerten gewonnen werden konnten.

4.2 Schalldruckpegel und andere Signalkenngrößen

Tabelle 4: Signalkenngrößen für Freiluftbühnen, Mittelwerte und Standardabweichungen

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

Eine Zusammenstellung der mittleren Versorgungspegel $\overline{L_{VA}}$ und weiterer Signalkenngrößen kann aus *Tabelle 4* entnommen werden. Interessant ist z.B., dass Vorbands auf Großbühnen im Mittel 4 dB leiser sind als die Main Acts. Die Untersuchung der Signaldynamik lässt Rückschlüsse auf die maximalen Schallpegel (Spitzenwertkriterium)

⁸ Allgemein wurde der Mittelungspegel pro Konzert an einem Messort über die gesamte Konzertdauer (inkl. Titelpausen & Ansagen) bestimmt.

⁹ Aus Messungen an diesen Punkten leitet sich direkt der Versorgungspegel L_{VA} ab

sowie den Impulszuschlag K_I als Differenz zwischen mittlerem Taktmaximalpegel L_{AFTeq} und Mittelungspegel L_{Aeq} zu. Dabei lässt sich feststellen, dass auf Groß- und Kleinbühnen ein weniger dynamischeres Programm als auf Klassik- und Moderationsbühnen dargeboten wird. Zusätzlich zu früheren Untersuchungen wurde in die Zusammenstellung noch die mittlere Pegeldifferenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem Mittelungspegel $\overline{L_{Ceq} - L_{Aeq}}$ aufgenommen, die Rückschlüsse auf den Anteil tiefer Frequenzen im Signalspektrum zulässt. Diese weist einen wesentlich höheren Bassanteil von Großbühnen gegenüber Kleinbühnen sowie den anderen Bühnenarten auf.

In *Abbildung 8* ist die Streubreite des Versorgungspegels auf Großbühnen erkennbar, die bei insgesamt 47 untersuchten Konzerten von 86 dB(A) bis 101 dB(A) reicht.

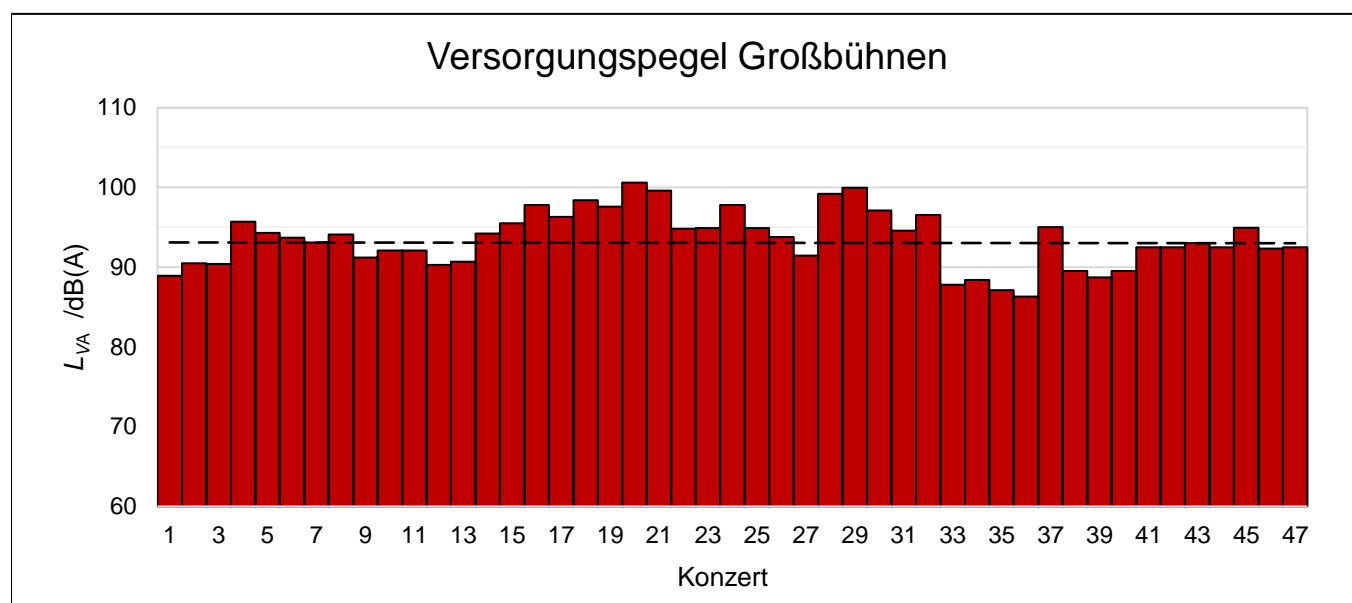


Abbildung 8: Gemessene Versorgungspegel bei Großbühnen

4.3 Signalspektren

Für detaillierte Prognosen der Schallausbreitung ist die Kenntnis der spektralen Zusammensetzung des Quellsignals erforderlich. Deshalb wurden an den untersuchten Freiluftbühnen Terzpegelspektren aufgenommen, wobei in der Regel Mittelungspegel pro Terz über die gesamte Konzertdauer (einschließlich kurzer Titelpausen) bestimmt wurden. Die Messorte lagen dabei sowohl direkt am FOH (Front of House bzw. Mixerplatz) als auch an Orten in dessen Nähe. In der Regel wurde angestrebt die Messungen in der Nähe des entferntesten Hörerplatzes durchzuführen, um den Versorgungspegel L_{VA} zu ermitteln.

Da die Auswertung der Signalkenngrößen zeigte, dass Großbühnen im Mittel hohe Werte der Pegeldifferenz $\overline{L_{Ceq} - L_{Aeq}}$ aufweisen, wurde auch bei der Darstellung des Emissionsspektrums zwischen Großbühnen und Kleinbühnen unterschieden, was bei früheren Veröffentlichungen (vgl. SFLS, VDI 3770) noch nicht der Fall war. Die auf den einzelnen Bühnen gemessenen Spektren wurden pro Terz arithmetische über die Bühnenarten (Groß- bzw. Kleinbühne), sowie für Kleinbühnen über verschiedene Genre gemittelt.¹⁰ Da an einzelnen Veranstaltungsorten eine relativ hohe Anzahl an Konzerten messtechnisch erfasst wurde, erfolgte zunächst eine Mittelung der Konzerte pro Bühne. Die so bestimmten mittleren Spektren wurden dann nochmals über alle Bühnen gemittelt. Um den Einfluss der Luftabsorption bei verschiedenen Messabständen zu berücksichtigen, wurden die Werte gemäß DIN ISO 9613-

¹⁰ Die Werte für Großbühnen beziehen sich im Folgenden immer auf die Main Acts eines Konzerts. Vorgruppen sind nicht pegelbestimmend.

2 mit den jeweiligen Abständen korrigiert¹¹. Die angegebenen Mittelwerte entsprechen somit dem mittleren Emissionsspektrum der Bühnen. In der Regel werden A-bewertete Terzspektren dargestellt, die auf einen A-bewerteten Summenpegel von 0 dB normiert wurden.

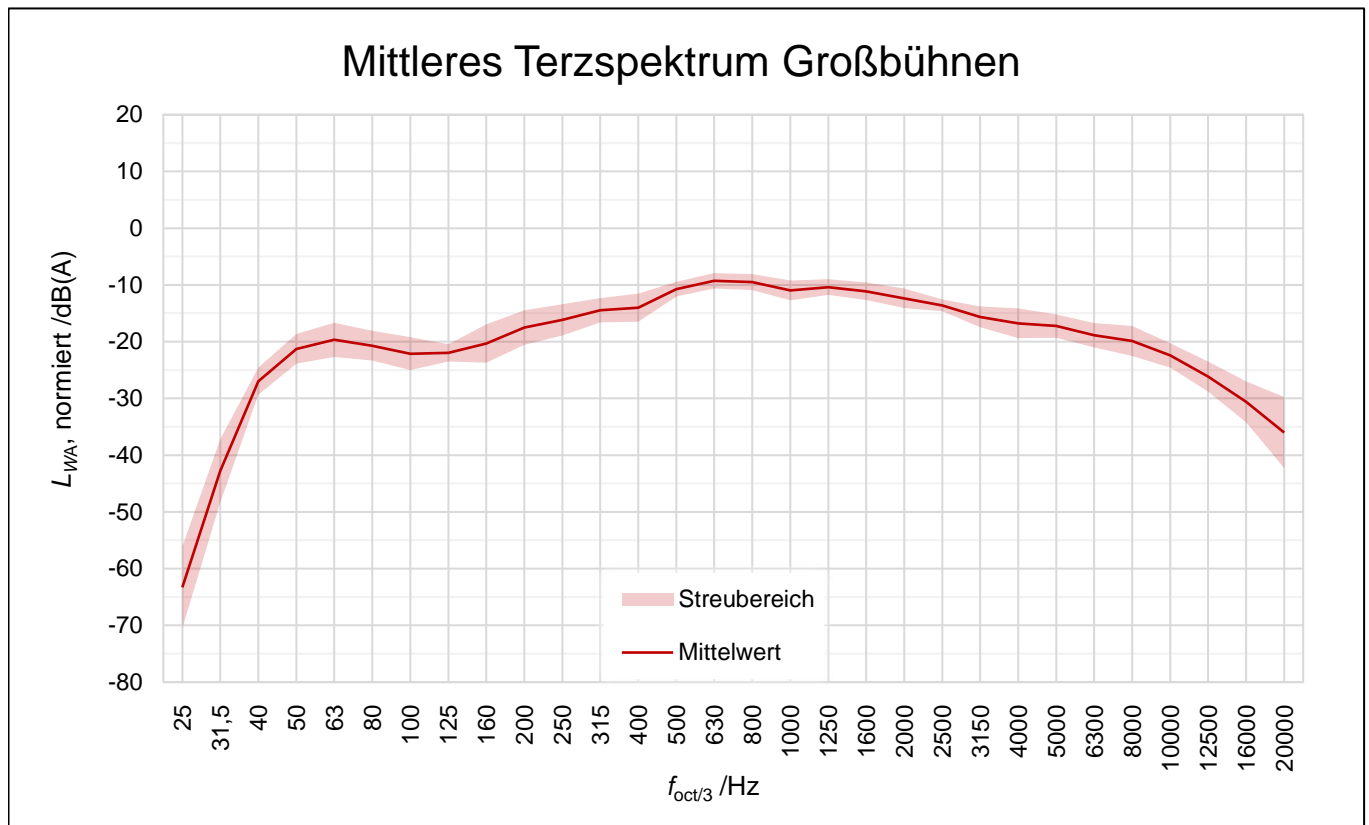


Abbildung 9: Mittleres Terzspektrum für Großbühnen, Mittelwert und Streubereich von 47 Konzerten (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)

Das mittlere, A-bewertete Terzspektrum für Großbühnen ist mit Streubereich¹² in *Abbildung 9* dargestellt. Wegen der geringen Streuung der Messwerte in Frequenzbereichen, die den A-Pegel bestimmen, wurde hier auf weitere genrespezifische Unterscheidungen verzichtet. Der mittlere Messabstand für die 47 auf Großbühnen untersuchten Konzerte lag bei 44 m.

Abbildung 10 zeigt das mittlere, A-bewertete Terzspektrum für Kleinbühnen verschiedener Genre (inkl. Klassik). Die Unterteilung erfolgte dabei nach charakteristischen Besetzungen und genretypischen Beschallungsparametern der jeweiligen Musikrichtungen. So weist das Rock-Pop-Spektrum eine Bassüberhöhung gegenüber den anderen Genre auf¹³. Dagegen ist das Klassik-Jazz-Welt-Spektrum im Frequenzbereich bis 500 Hz eher weniger präsent. In diese Kategorie gingen vor allem Messungen von Konzerten ein, bei denen die Besetzung aus akustischen Instrumenten bestand, die elektroakustisch verstärkt wurden.¹⁴ Der Streubereich ist bei beiden Kategorien im Gegensatz zu Großbühnen recht hoch. Besonders unter 315 Hz ergeben sich hohe Standardabweichungen. Das zeigt, dass der Einfluss der Subwoofer auf Kleinbühnen je nach den verwendeten Systemen unterschiedlich stark sein kann. Aus den normierten, A-bewerteten Spektren leiten sich direkt die Spektrums-Korrekturwerte für Pegelberechnungen ab (siehe *Tabelle 14* im Anhang III).

¹¹ Diese Korrektur erfolgt hier erstmalig. Sie wurde bei früheren Veröffentlichungen (vgl. SFLS, VDI 3770) nicht angewendet.

¹² Der Streubereich ergibt sich hierbei aus der Addition sowie Subtraktion der Standardabweichung der Einzelbühnen vom Mittelwert der Messergebnisse ($\overline{L_{Aeq, mess, norm}[T]} \pm \sigma[T]$).

¹³ Solche Bassüberhöhungen kommen vor allem durch die starke Bearbeitung der Audiosignale zustande.

¹⁴ In diesen Genres ist es typisch den natürlichen Klangcharakter der Instrumente beizubehalten.

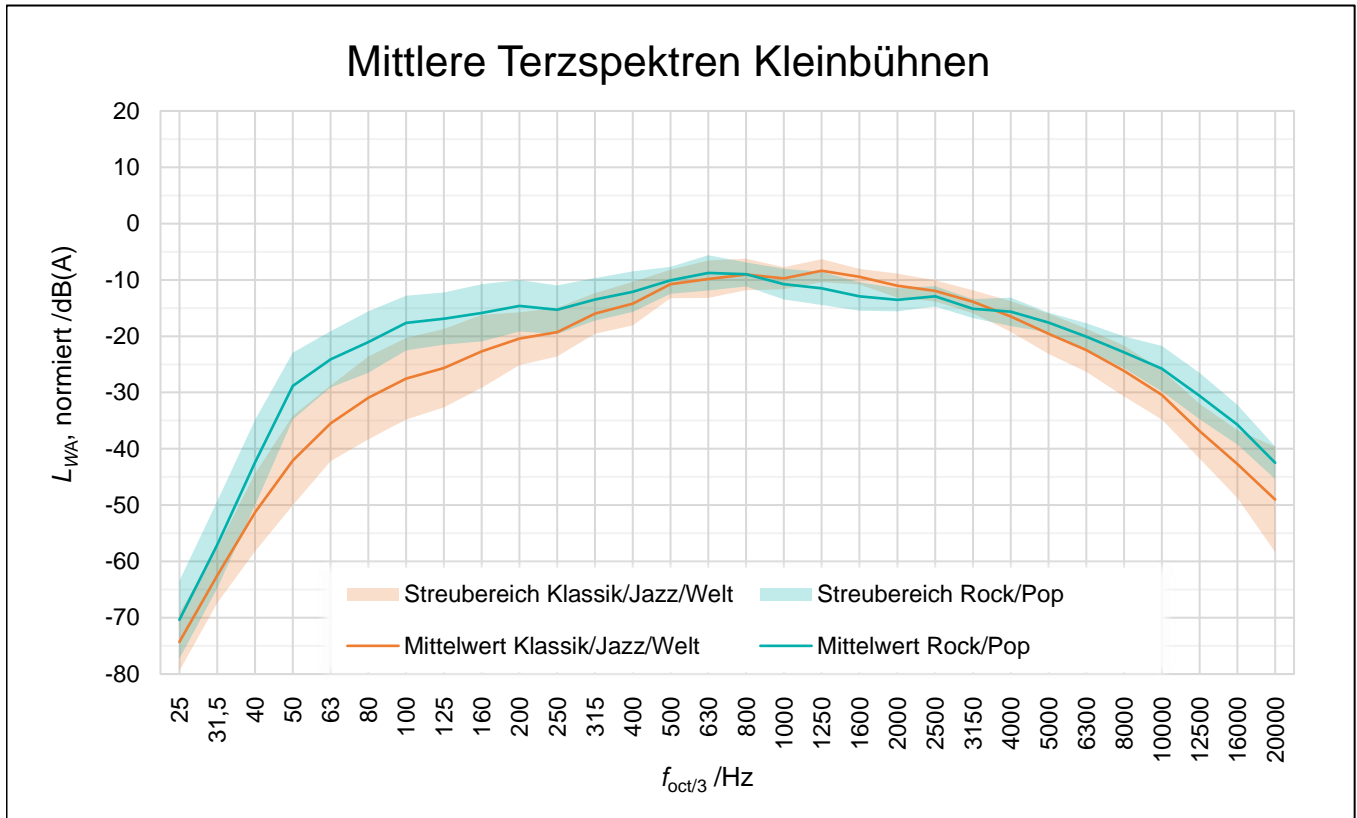


Abbildung 10: Mittlere Terzspektren für Kleinbühnen – Rock/Pop, Klassik/Jazz/Welt, Mittelwert von 40 Konzerten (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)

Der Vergleich der unbewerteten Spektren in *Abbildung 11* zeigt, dass sich die Frequenzverteilung auch zwischen Groß- und Kleinbühnen sehr unterscheidet. Im Großbühnen-Spektrum ist ein definierter Bereich zwischen 25 Hz und 100 Hz zu erkennen, in dem sich der Frequenzgang von Subwoofern deutlich abzeichnet. Dieser Bereich ist bei Kleinbühnen weniger stark ausgeprägt. Hier zeichnet sich die Bass-/Mittenüberhöhung mit einem Maximum zwischen 50 Hz und 100 Hz ab.

Die Mittelwerte für Großbühnen stimmen gut mit den gemessenen Pegelspektren der Firma d&b aus dem Jahr 2016 überein, die in der Datenbank der Prognosesoftware NoizCalc (d&b, 2017) enthalten sind. Die Unterschiede bei hohen Frequenzen ergeben sich aus der Luftdämpfungskorrektur. Die höheren Werte für Großbühnen in diesem Bereich sind auf die Beschallung mit Line Arrays zurückzuführen. Wegen der größeren Ausdehnung des Nahfelds mit steigender Frequenz wird hier eine bessere Höhenwiedergabe erreicht.

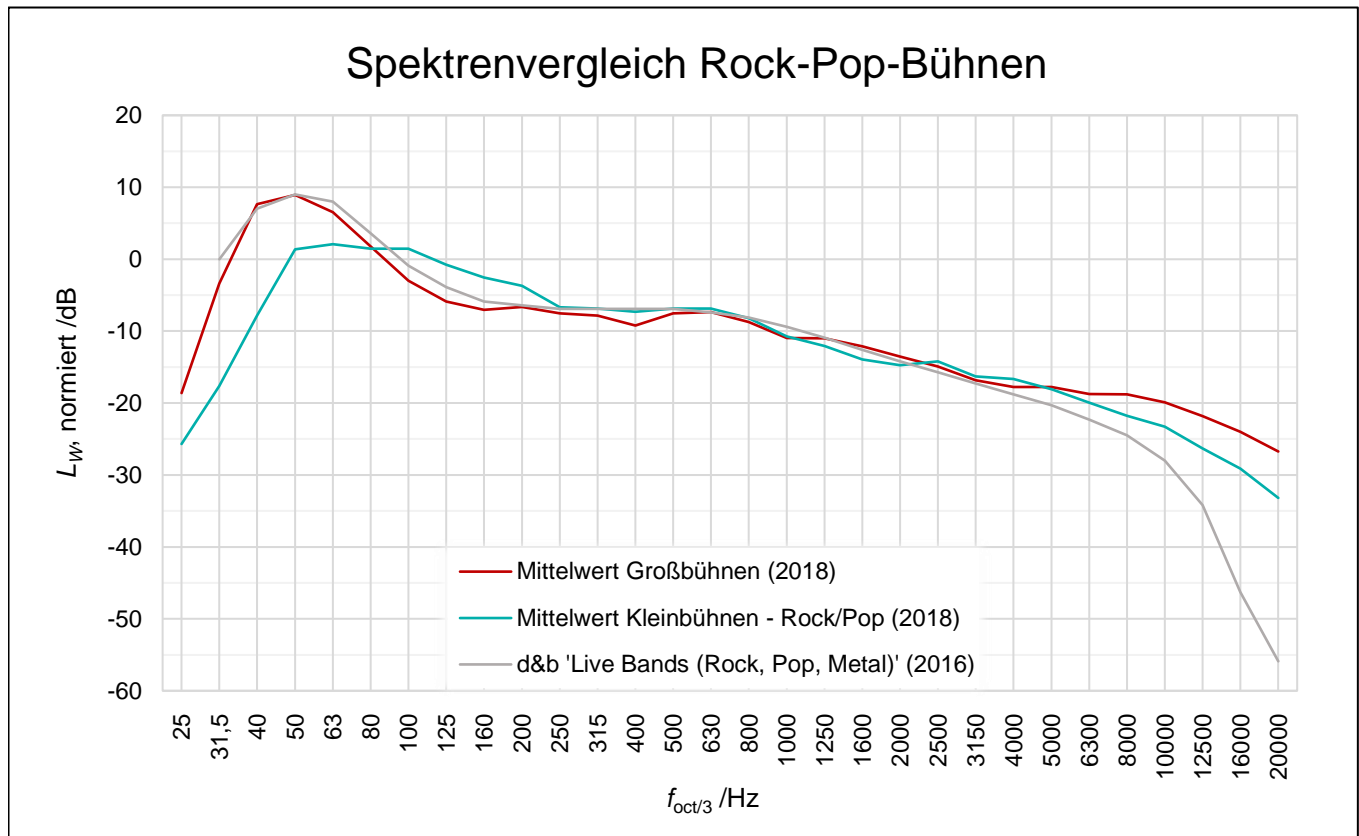


Abbildung 11: Vergleich der mittleren Terzspektren für Großbühnen und Kleinbühnen mit dem Live-Bandspektrum aus der Datenbank von d&b NoizCalc (unbewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)

Die in diesem Abschnitt dargestellten Spektren ergeben sich durch Überlagerung der Schallenergieanteile von Einzelquellen (Lautsprechern) an den Messpunkten. Um detaillierte Prognosen zu komplexen Beschallungssituationen zu erstellen, ist es nötig die Emissionsspektren dieser Einzelquellen gesondert zu betrachten. Subwoofer haben beispielsweise einen deutlich anderen Frequenzgang als Line Arrays oder Punktstrahler. Um Aussagen über Anlagen treffen zu können, bei denen tiefe und hohe Frequenzen mit jeweils unterschiedlichen Lautsprecher-Arten wiedergegeben werden, wurden mittels EASE SpeakerLab (AFMG, 2009) die Frequenzgänge der in Abschnitt 3.1 verwendeten Line Arrays und Subwoofer simuliert und gemittelt. Anschließend wurden die ermittelten Spektren für Groß- und Kleinbühnen auf die beiden Quellenarten energetisch aufgeteilt. Für Subwoofer wurden unter Werten von ca. 100 Hz die Terzspektren für Klein- und Großbühnen, für darüber liegende Werte, der für Subwoofer simulierte, abfallende Frequenzgang verwendet. Für Line Arrays wurde bei den Terzen unter 200 Hz der entsprechende abfallende Frequenzgang, bei darüber liegenden Werten die Klein-/Großbühnenspektren verwendet. Die ermittelten Terzpegel-Korrekturwerte $D_f^0 [T]$ sind in *Tabelle 15* (siehe Anhang III) dargestellt. Diese Werte sind als Terzkorrektur für die Emissionsspektren von Subwoofern bzw. Mittel-/Hochtönern zu sehen.

Für genaue Prognosen ist mit den angegebenen Werten somit auch eine getrennte Modellierung der Subwoofer von Beschallungsanlagen möglich. Dies ist aber nur in Sonderfällen sinnvoll, z.B. bei sehr geringen Abständen von der Bühne zur schützenswerten Wohnbebauung. In Abschnitt 6.4 wird das detaillierte Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln genauer beschrieben.

4.4 Prognose des Schalleistungspegels

Aus den gemessenen Mittelungspegeln im Zuschauerbereich wurde der Schalleistungspegel der gesamten Beschallungsanlage in Oktavbändern $L_{WA}[0]$ rückwirkend aus Gleichung (7) ermittelt:

$$L_{WA}[0] = L_{Aeq}[0] - 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{2} \cdot \sum_i^2 10^{\left(\frac{D_{Li}[0] - D_i[0]}{10} \right)} \right] \text{ dB} \quad (7)$$

$L_{Aeq}[0]$ A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel am Messort, in dB(A), Oktavbänder
 $D_{Li}[0]$ Richtwirkungsmaß der Einzelquelle, in dB, Oktavbänder
 $D_i[0]$ Gesamt-Dämpfungsmaß für die Schallausbreitung von der Einzelquelle zum Empfänger, in dB, Oktavbänder¹⁵

Bei der Berechnung wurden gemäß Abschnitt 6.3 die beiden Haupt-Lautsprecher(-cluster) der Bühne als Einzelquellen mit dem jeweiligen, oktavweisen Richtwirkungsmaß für Line Arrays (Tabelle 8 bis 11) bzw. Punktstrahler (vgl. SFLS) modelliert. Die Gesamt-Dämpfungsmaße $D_i[0]$ wurden für jede Quelle einzeln betrachtet.

Aufbauend auf den ermittelten Schalleistungspegeln wurde der bereits in der SFLS entwickelte Prognosealgorithmus aus der zu beschallenden Fläche gemäß Gleichung (8) für Klein- und Großbühnen sowie gemäß Gleichung (9) für Klassikbühnen aktualisiert:

$$L_{WA} = L_{VA} + 8 \text{ dB} + 10 \cdot \lg(A) \text{ dB} + K_G \quad (8)$$

L_{VA} Versorgungspegel in dB(A)
 $L_{VA} = 93 \text{ dB(A)}$ (Großbühnen)
 $L_{VA} = 86 \text{ dB(A)}$ (Kleinbühnen)
 A zu beschallende Fläche in m^2
 K_G Genrekorrektur in dB
 $K_G = -4 \text{ dB}$ (Genrekategorie 1)
 $K_G = +0 \text{ dB}$ (Genrekategorie 2)
 $K_G = +4 \text{ dB}$ (Genrekategorie 3)

$$L_{WA} = L_{VA} + 12 \text{ dB} + 10 \cdot \lg(A) \text{ dB} \quad (9)$$

L_{VA} Versorgungspegel in dB(A)
 $L_{VA} = 75 \text{ dB(A)}$ (Klassikbühnen)
 A zu beschallende Fläche in m^2

Gegenüber den Untersuchungsergebnissen bis zum Jahr 2008, die in der VDI 3770 veröffentlicht wurden, bedeutet dies eine Erhöhung des A-bewerteten Schalleistungspegels von 4 dB für Großbühnen, von 5 dB für Kleinbühnen sowie von 2 dB für Klassikbühnen. Im Prognosealgorithmus in Gleichung (8) wurde zudem ein Genrekorrektur-Wert K_G eingeführt, da die Messungen gezeigt haben, dass auf denselben Bühnen bei unterschiedlichen Veranstaltungen eine Schalleistungsdifferenz von bis zu 20 dB auftreten kann. Es wurden drei Genrekategorien klassifiziert:

Genrekategorie 1 (G1) beschreibt Konzerte, auf denen hauptsächlich Jazz und akustische Musik gespielt wird. Die Mittelungspegel an den Messorten fielen bei solchen Veranstaltungen geringer als beim Rest der Messungen aus. Die Besetzung kann dabei von Einzelmusikern (Singer-Songwriter ohne Band, Solisten) über kleine Ensemble (Bands, Blaskapellen, ...) bis hin zu größeren Musikgruppen (Big Band, ...) reichen. Charakteristisch für diese Genrekategorie ist, dass akustische Instrumente zum Einsatz kommen, die elektronisch verstärkt werden. Dabei wird der Klangcharakter im Signalprozess nicht gravierend verändert.

¹⁵ Für weitere Erläuterungen zur Berechnung der Dämpfungsmaße gemäß DIN ISO 9613-2 siehe Anhang II.

Hingegen kommen bei Konzerten der Genrekategorie 2 (G2) elektrisch abgenommene Instrumente (E-Gitarre, E-Piano, ...) zum Einsatz. Es findet vor der Wiedergabe eine tiefgreifende Signalbearbeitung statt. Selbst akustische Instrumente wie Schlagzeug werden dabei im Frequenzgang stark bearbeitet. Die zu dieser Kategorie zählenden Messergebnisse liegen im Mittel des Datensatzes und umfassten Darbietungen von Pop- und klassischer Rockmusik, aber auch von Singer/Songwritern mit Band.

Es sind allerdings immer häufiger Konzerte zu verzeichnen, bei denen die Schalleistungspegel sehr hohe Werte annehmen. Es handelt sich hierbei meist um Musik, die vorproduzierte Einspieler (Backing Tracks/Playback) nutzt oder charakteristisch laute Spielarten. Dazu zählen Genres wie Elektro, Techno, Hip-Hop, Schlager, moderne Rockmusik, Metal oder Punk. Solche Konzerte tragen ein großes Risiko in sich Grenzwerte in anliegenden Immissionsgebieten zu überschreiten, und sind somit gesondert zu betrachten. Hierzu wurde die Genrekategorie 3 (G3) definiert und mit einem Genrekorrektur-Wert K_G von +4 dB versehen.

Bei der Prognose wurde der Übergang von Groß- zu Kleinbühnen ab einer zu beschallenden Fläche von $A = 500 \text{ m}^2$ bzw. ab einer Zuschauerkapazität von 1000 sitzenden oder 2000 stehenden Personen beibehalten. Veranstaltungen der Genrekategorien 1 sind immer als Kleinbühnen zu betrachten. Können für eine Veranstaltung keine genauen Angaben zum Genre gemacht werden, ist ein Korrekturwert $K_G = +0 \text{ dB}$ (G2) einzusetzen. Sind mehrere Genrekategorien auf einer Bühne vertreten ist stets die immissionstechnisch kritischere Genrekategorie zu verwenden.

Der Versorgungspegel L_{VA} für Kleinbühnen wurde entgegen den ermittelten Messwerten aus *Tabelle 4* in Gleichung (8) leicht erhöht, da eine große Anzahl von Kleinbühnen der Genrekategorie 1 erfasst wurden. Die Änderung des Korrekturwertes in den Gleichungen (8) und (9) (8 dB für Groß-/Kleinbühnen, 12 dB für Klassikbühnen) gegenüber dem Ansatz von 2006 ist auf die erhöhten Versorgungspegel, das Einführen der Genrekategorien sowie auf die Rückrechnung in Oktaven¹⁶ zurückzuführen.

Für die bei 86 Konzerten durch eigene Messungen bzw. Literaturlauswertung ermittelten Schalleistungspegel ergeben sich zur Prognose über Gleichung (8) und (9) Standardabweichungen der Differenz Prognose-Messung von $\sigma(G1) = 2,5 \text{ dB}$, $\sigma(G2) = 2,1 \text{ dB}$ und $\sigma(G3) = 2,7 \text{ dB}$ sowie für Klassikbühnen $\sigma(\text{Klassik}) = 6,2 \text{ dB}$. Das Klassik-Genre weist erfahrungsgemäß höhere Standardabweichungen auf, weil z.B. zwischen einem Sologitarristen und dem Ensemble einer Opernaufführung erhebliche Unterschiede im verursachten Schalleistungspegel bestehen. Bei Prognoserechnungen kann das durch entsprechende Zuschläge für den Schalleistungspegel berücksichtigt werden. Allgemein können die Ergebnisse für alle Genrekategorien als gesichert angesehen werden. Eine zusammenfassende Darstellung der Prognosegeraden und Messwerte für die drei untersuchten Genrekategorien zeigt *Abbildung 12*.

¹⁶ Für die Berechnungsformel von 2006 wurden die Schalleistungspegel breitbandig ermittelt.

Schalleistungsprognose Freiluftbühnen

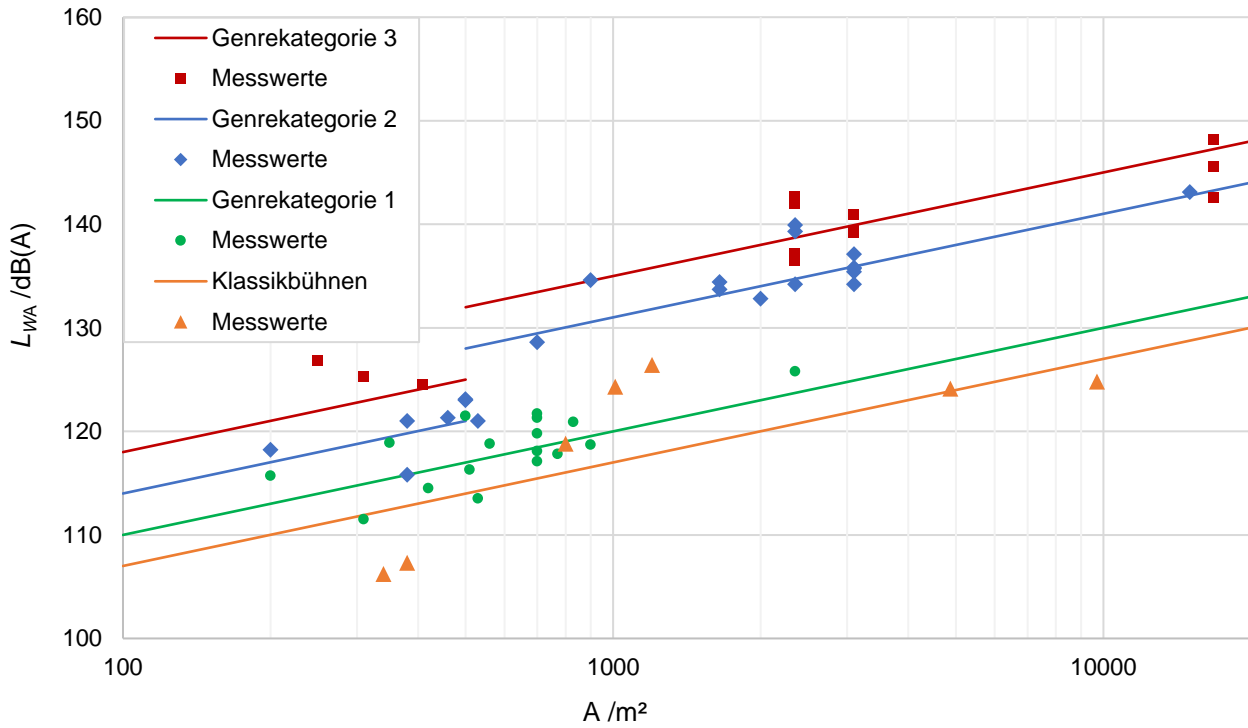


Abbildung 12: Prognosegeraden für den Schalleistungspegel der drei untersuchten Genrekategorien auf Klein- und Großbühnen sowie der untersuchten Klassikbühnen im Vergleich zu aus Messungen ermittelten Werten

5 Untersuchungen an Freilichtkinos

5.1 Allgemeines

Für Freilichtkinos lagen bisher keine systematisch gewonnenen Messdaten zur Schallemission vor. Daher wurden in den Jahren 2017 und 2018 eigene Messungen bei 57 Kinovorstellungen vorgenommen, die an insgesamt 9 Aufführungsstätten ausgeführt wurden. Dabei wurden ebenfalls mittlere Terz-Pegelspektren sowie Pegel-Zeitverläufe über längere Zeiträume von Darbietungen aufgenommen.¹⁷ Die daraus gewonnenen Mittelungspegel und statistischen Parameter beziehen sich also auf den Gesamtzeitraum einer Kinovorstellung einschließlich etwa zu Beginn eingespielter Werbefilme und Vorschaun. Messpunkte lagen dabei ebenfalls meist am Rande und Ende des Rezeptionsbereiches.

Die Zuschauerkapazität der untersuchten Aufführungsorte für Freilichtkino lag zwischen 100 und 4400 Personen, was zu beschallenden Flächen von ca. 50 m² bis ca. 2200 m² entspricht. Von den 9 untersuchten Aufführungsstätten wurden die 3 größten (für 900, 2200 bzw. 4400 Zuschauer) mit Line Arrays beschallt, während die 6 kleineren mit Punktstrahlern versorgt wurden. An 2 der untersuchten Freilichtkinos gab es neben einer Stereo-Beschallung noch Surround-Lautsprecher.

5.2 Schalldruckpegel und andere Signalkenngrößen

Eine Zusammenstellung der mittleren Versorgungspegel $\overline{L_{VA}}$ und weiterer Signalkenngrößen kann *Tabelle 5* entnommen werden. Die Untersuchung der Signaldynamik lässt Rückschlüsse auf die maximalen Schallpegel (Spitzenwertkriterium) sowie den Impulszuschlag K_I als Differenz zwischen mittlerem Taktmaximalpegel L_{AFTeq} und Mittelungspegel L_{Aeq} zu.

Der mittlere Versorgungspegel liegt mit 68,0 dB(A) deutlich unter den Werten der Freiluftbühnen, weist allerdings mit 5,2 dB auch eine höhere Standardabweichung auf. Zu beachten sind auch die signifikant höheren Werte für den Impulszuschlag $\overline{K_I}$ und das Scheitelmaß $\overline{\Delta L_{A,max}}$. Die mittlere Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem Mittelungspegel $\overline{L_{Ceq} - L_{Aeq}}$ liegt bei 5,7 dB. Sie ist damit geringer als bei Kleinbühnen und deutlich geringer als bei Großbühnen, was u.a. mit dem hohen Anteil von Sprachsignalen an der Gesamtemission der Kinobeschallung zu erklären ist.

Aus den Signalkenngrößen ergibt sich, dass für Fernfeldprognosen bei Freilichtkinos ein Impulszuschlag von 6 dB zu verwenden ist.

Tabelle 5: Signalkenngrößen für Freilichtkinos, Mittelwerte und Standardabweichungen

Kenngröße	Freilichtkinos
$\overline{L_{VA}} / \text{dB(A)}$	68,0
σ / dB	5,2
$\overline{K_I} / \text{dB}$	6,2
σ / dB	0,7
$\overline{\Delta L_{A,max}} / \text{dB}$	20,1
σ / dB	4,0
$\overline{L_{Ceq} - L_{Aeq}} / \text{dB}$	5,7
σ / dB	3,3
Anz. Messungen	55

¹⁷ Allgemein wurde der Mittelungspegel pro Filmaufführung an einem Messort über die gesamte Aufführungsdauer (inkl. Werbung & Trailer) bestimmt.

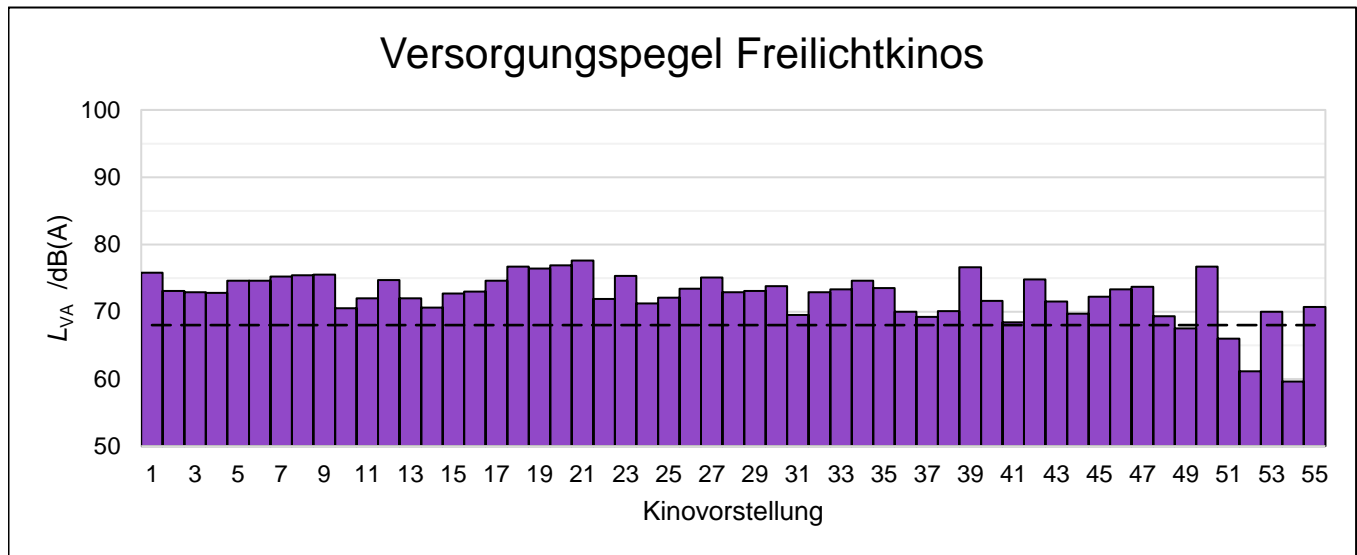


Abbildung 13: Gemessene Versorgungspegel bei Freilichtkinos

In *Abbildung 13* ist die Streubreite des Versorgungspegels bei Freilichtkinos erkennbar, die bei insgesamt 55 untersuchten Vorstellungen von 59 dB(A) bis 77 dB(A) reicht.

5.3 Signalspektren

An den untersuchten Freilichtkinos wurden ebenfalls Terzpegelspektren aufgenommen, wobei in der Regel Mittelungspegel pro Terz über die gesamte Vorstellungsdauer (einschließlich Werbung und Vorschauen zu Beginn) bestimmt wurden. Dabei lagen die Messorte in der Nähe des entferntesten Hörerplatzes. Die Messentfernungen variierten dabei zwischen ca. 9 m und ca. 57 m von den Beschallungslautsprechern in Leinwandebene.

Die Messergebnisse wurden pro Terz arithmetisch gemittelt. Da auch hier an einzelnen Aufführungsstätten eine relativ hohe Anzahl von Kinovorstellungen messtechnisch erfasst wurde, erfolgte zunächst ebenfalls eine Mittelung der Messwerte pro Aufführungsstätte. Die so bestimmten mittleren Spektren wurden nach entsprechenden Korrekturen¹⁸ dann nochmals über alle Messorte gemittelt, um das endgültige Signalspektrum zu bestimmen. Die Ergebnisse werden als A-bewertete Terzspektren dargestellt, die auf einen A-bewerteten Summenpegel von 0 dB normiert wurden. Das mittlere, A-bewertete Terzspektrum für Freilichtkinos ist mit Streubereich in *Abbildung 14* dargestellt. Die zugehörigen Terzpegel-Korrekturwerte D_f^0 [T] sind in

Tabelle 16 (siehe Anhang III) zusammengefasst. Abweichungen der Spektralwerte bei hohen und tiefen Frequenzen kommen vor allem dadurch zustande, dass Action- oder Musikfilme einen höheren Bassanteil aufweisen als ein Großteil der gemessenen Filme.

Abbildung 15 zeigt einen Vergleich des unbewerteten, normierten mittleren Terzspektrums von Freilichtkinos mit dem von Moderation & Musik. Dieses zeigt deutlich größere Schwankungen, was auf die geringe Anzahl von nur vier Messwerten für 2018 zurückzuführen ist. Die Ähnlichkeit der beiden von Sprachsignalen dominierten Quellspektren ist trotzdem deutlich sichtbar.

¹⁸ Die Luftabsorptionsdämpfung der so ermittelten Spektren wurde auch hier gemäß (DIN ISO 9613-2, 1999) mit den jeweiligen Abständen korrigiert.

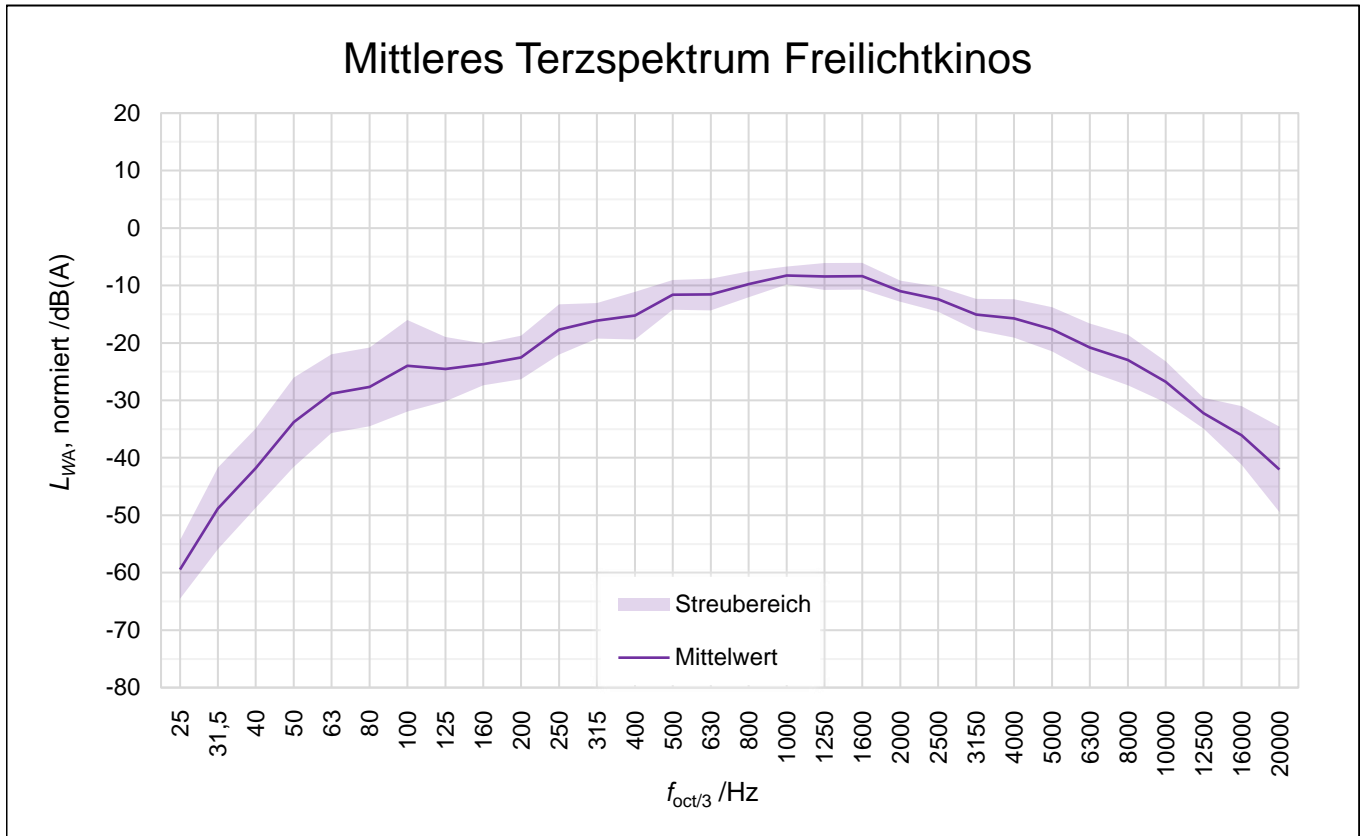


Abbildung 14: Mittleres Terzspektrum für Freilichtkinos, Mittelwerte und Streubereich von 55 Vorstellungen (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)

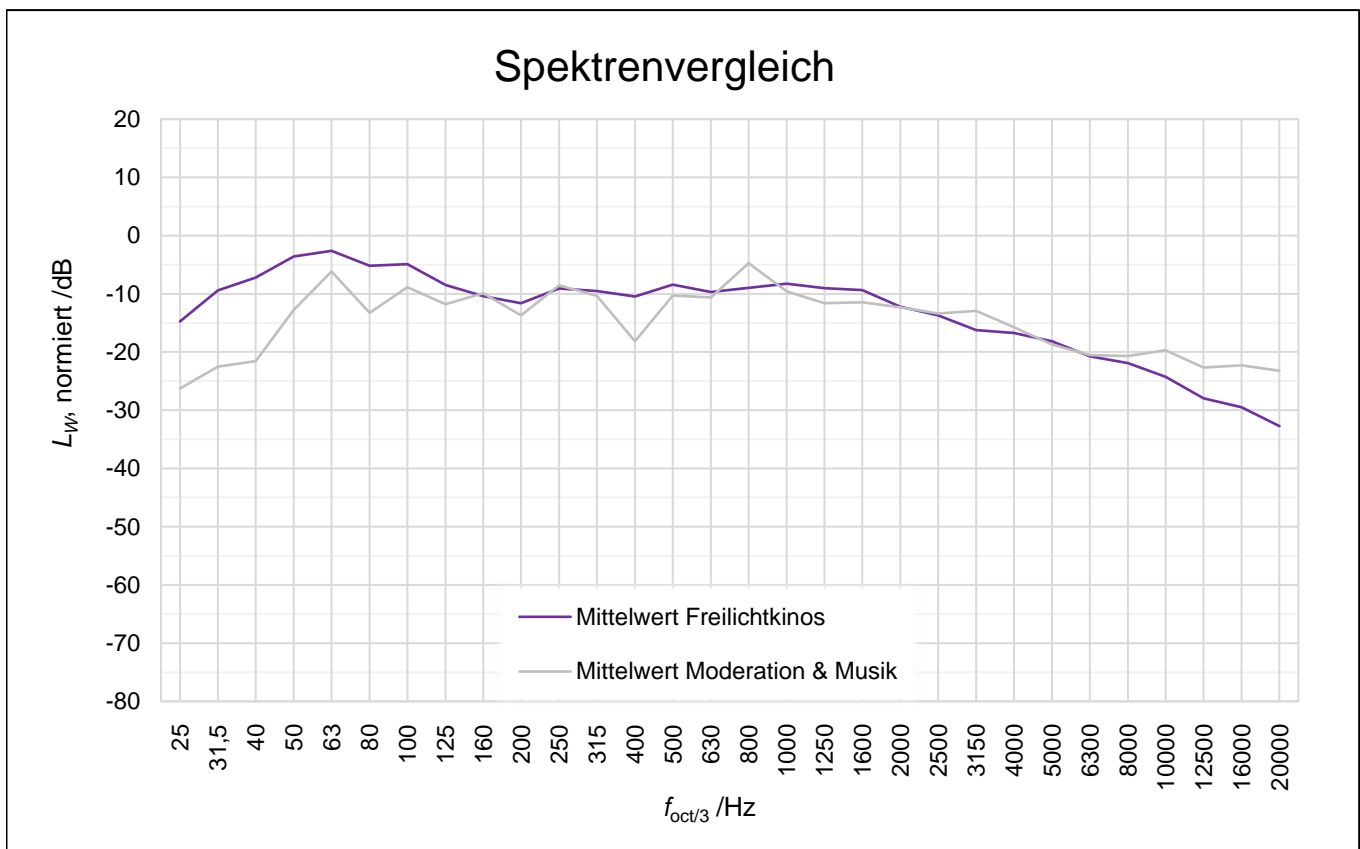


Abbildung 15: Vergleich des mittleren Terzspektrums von Freilichtkinos mit dem von Moderation & Musik auf Großbühnen (unbewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)

5.4 Prognose des Schalleistungspegels

Aus den gemessenen Mittelungspegeln im Zuschauerbereich wurde der Schalleistungspegel der Beschallungsanlagen in Oktavbändern rückwirkend aus Gleichung (7) berechnet. Bei der Berechnung wurden gemäß Abschnitt 6.3 die beiden Haupt-Lautsprecher(-cluster) der Kinobeschallung als Einzelquellen mit dem jeweiligen, oktavweisen Richtwirkungsmaß für Line Arrays (Tabelle 8 bis 11) bzw. Punktstrahler (vgl. SFLS) modelliert. Die Gesamt-Dämpfungsmaße $D_i[0]$ wurden für jede Quelle einzeln betrachtet. Bei zwei von sieben Aufführungsorten wurden neben Stereo-Lautsprechern (links-rechts) noch Surroundlautsprecher eingesetzt. Die von diesen Systemen abgestrahlten Schallsignalanteile wurden vernachlässigt.

Mit den so bestimmten Schalleistungspegeln wurde der bereits in der SFLS entwickelte Prognosealgorithmus aus der zu beschallenden Fläche gemäß Gleichung (10) für die Werte der Kinobeschallung angepasst. Eine genrespezifische Unterteilung gemäß Gleichung (8) wurde nicht vollzogen, da die Schalleistung unabhängig von der Art des Films je nach Aufführungsort sehr stark schwankt.

$$L_{WA} = L_{VA} + 12 \text{ dB} + 10 \cdot \lg(A) \text{ dB} \quad (10)$$

L_{VA} Versorgungspegel in dB(A)
 $L_{VA} = 68 \text{ dB(A)}$ (Freilichtkinos)
 A zu beschallende Fläche in m^2

Gegenüber den Untersuchungsergebnissen für Freiluftbühnen in Abschnitt 4 weisen Anlagen zur Beschallung von Freilichtkinos bei gleicher zu beschallender Fläche einen A-bewerteten Schalleistungspegel auf, der 10 dB unter dem von Kleinbühnen (G1) liegt. Für die bei 57 Kinovorstellungen an 9 Aufführungsorten durch eigene Messungen ermittelten Schalleistungspegel ergibt sich zur Prognose über Gleichung (10) eine Standardabweichung der Differenz Prognose-Messung von $\sigma = 5,8 \text{ dB}$.

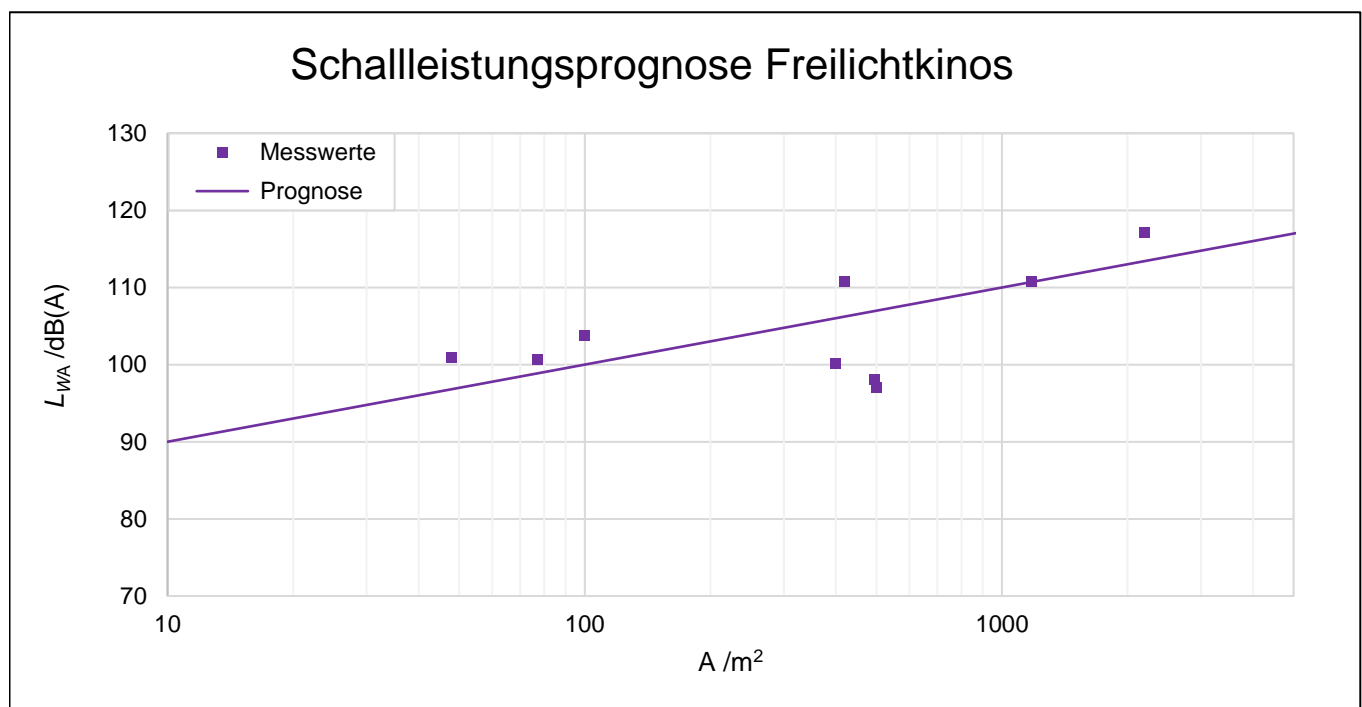


Abbildung 16: Prognose für den Schalleistungspegel von Freilichtkinos im Vergleich zu aus Messungen ermittelten Werten

6 Schlussfolgerungen

6.1 Entwicklung der Kenngrößen zwischen 2006 und 2018

Tabelle 6: Vergleich gemessener und ermittelter Signalkenngrößen 2006 und 2018

Kenngröße	Großbühnen		Kleinbühnen		Klassikbühnen	
	2018	2006	2018	2006	2018	2006
$\overline{L_{VA}} / \text{dB(A)}$	93,0	89,1	85,1	81,1	74,8	74,7
$\overline{K_1} / \text{dB}$	3,0	4,5	4,8	4,7	5,0	4,8
$\overline{\Delta L_{A,\max}} / \text{dB}$	12,8	9,1	12,6	10,4	17,0	12,8
Anzahl Messungen	47	69	33	47	7	12

Der Vergleich der in den Jahren 2017 und 2018 ermittelten Kenngrößen für Freiluftbühnen mit denen früherer Veröffentlichungen (SFLS, 2006), (VDI 3770, 2012) zeigt einen signifikanten Anstieg des Versorgungspegels um ca. 4 dB(A) für Groß- und Kleinbühnen. Durch die Vielzahl an Messungen bei verschiedensten Veranstaltungen wurde diese Entwicklung bestätigt. In der Folge wurden die Prognosealgorithmen überarbeitet, sodass sie nun höhere Schalleistungspegel verwenden. Zudem konnte durch die Einführung von Genrekategorien eine höhere Prognosegenauigkeit erreicht werden. Es wurde darauf geachtet, dass die Prognosen einen konservativen Ansatz verfolgen, wodurch eher höhere Schalleistungspegel ermittelt werden.

Der Impulszuschlag K_1 hat sich für alle Bühnenarten nur geringfügig verändert. Ein Grund für die geringen Abweichungen kann sein, dass die aktuellen Ergebnisse im Mittel in anderen Entfernungen bestimmt wurden. An der früheren Empfehlung (SFLS, 2006), für Fernfeldprognosen einen Impulszuschlag von 4 dB zu verwenden, ändert sich dadurch nichts.

Das signifikant höhere mittlere Scheitelmaß $\overline{\Delta L_{A,\max}}$ lässt auf einen großen Dynamikumfang moderner Anlagen schließen. Groß- und Kleinbühnen weisen dabei ähnliche Werte auf. Auffällig ist eher der gegenüber 2006 um 4,2 dB gestiegene Wert für Klassikbühnen.

Der Zusammenhang zwischen zu beschallender Fläche und prognostiziertem Schalleistungspegel nach den Ansätzen von 2006 und 2018 ist in *Abbildung 17* dargestellt. Die Verschiebung der Prognosegeraden nach oben bedeutet allerdings nicht automatisch, dass die real zu erwartenden Beurteilungspegel an den Immissionsorten sich um den gleichen Betrag erhöhen. Hier spielt z.B. die deutlich engere vertikale Richtkeule der inzwischen bei Großbühnen ausschließlich verwendeten Line Arrays eine Rolle, wie sie in *Abbildung 4* und *Abbildung 6* dargestellt ist. Dadurch haben abschirmende Hindernisse eine wesentlich größere Dämpfungswirkung und können bei sinnvoller Dimensionierung und Ausrichtung der Arrays gezielt zur Pegelminderung eingesetzt werden.

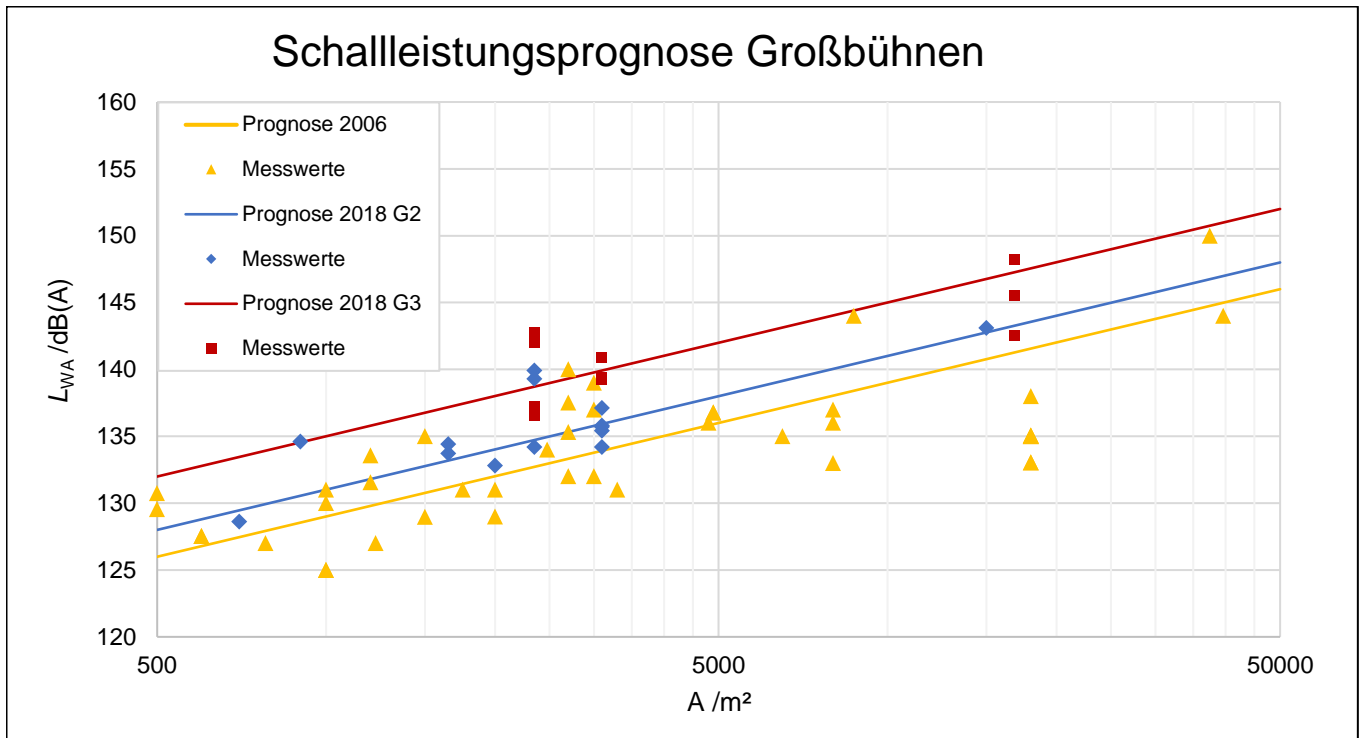


Abbildung 17: Vergleich von Prognosegeraden und Messwerten für Großbühnen SFLS 2006 und 2018

Im Gegensatz zum Vorgehen bei früheren Untersuchungen wurde aktuell ein gesondertes Mittelungsspektrum für Großbühnen bestimmt. Dieses zeigt einen deutlichen Pegelanstieg im Tieftonbereich gegenüber dem bisher verwendeten Rock-Pop-Spektrum,¹⁹ wie aus *Abbildung 18* ersichtlich ist. In der 40-Hz-Terz hat sich dabei der Pegel um fast 20 dB gegenüber 2006 erhöht. Für den Einfluss des Bassbereichs auf den A-bewerteten Summenpegel ist allerdings die Terz bei 63 Hz am wichtigsten.

Die Ursachen für den zunehmenden Bassanteil im übertragenen Spektrum bei Großbühnen liegen in verschiedenen Bereichen. Zum einen gab es in den vergangenen 10 Jahren eine enorme technische Entwicklung in Bezug auf Nennleistung und Wirkungsgrad von Tieftonlautsprechern (Subwoofern). Zum anderen wurden gerade bei Großbühnen neue Arten der Anordnung dieser Lautsprecher in separaten Arrays eingeführt, die in der Regel am Boden im Bereich der Bühnenkante angeordnet werden. Durch gezielte Beeinflussung von Signallaufzeit und Pegel der Einzelsysteme können damit im Bassbereich hohe Energieanteile mit gut kontrollierbarer Richtcharakteristik abgestrahlt werden. Ähnliche Entwicklungen bei der Leistungsfähigkeit von Tieftonlautsprechern fanden im Club-Bereich und (in abgeschwächter Form) auch bei Heimanlagen statt, so dass sich die allgemeinen Hörgewohnheiten auch in Richtung einer stärkeren Bassüberhöhung verschoben haben.

Dieser Trend ist auch bei Kleinbühnen zu erkennen. Allerdings ist hier der Tieftonanteil nicht so stark ausgeprägt. Gegenüber den anderen Spektren zeichnet sich eher im Bereich zwischen 100 Hz und 250 Hz eine Überhöhung ab. Eine Erklärung dafür ist, dass Subwoofer in Anzahl und Größe bei Kleinbühnen deutlich geringer dimensioniert werden. So werden nicht so große Leistungen im Bass (bis 63 Hz), wie in den Tiefmitten (63 Hz – 125 Hz) erreicht. Außerdem können sich, wenn die Systeme nicht so gut aufeinander abgestimmt sind, Schallanteile von Mittel-/Hochtönen und Tieftönen überlagern. Bei Großbühnen tritt das eher selten auf, da hier kompatible Lautsprecher ausgewählt werden, die meist vom selben Hersteller stammen.

¹⁹ Zu beachten ist, dass in das 2006 bestimmte Mittelungsspektrum auch die Werte von Kleinbühnen und Moderation & Musik eingingen.

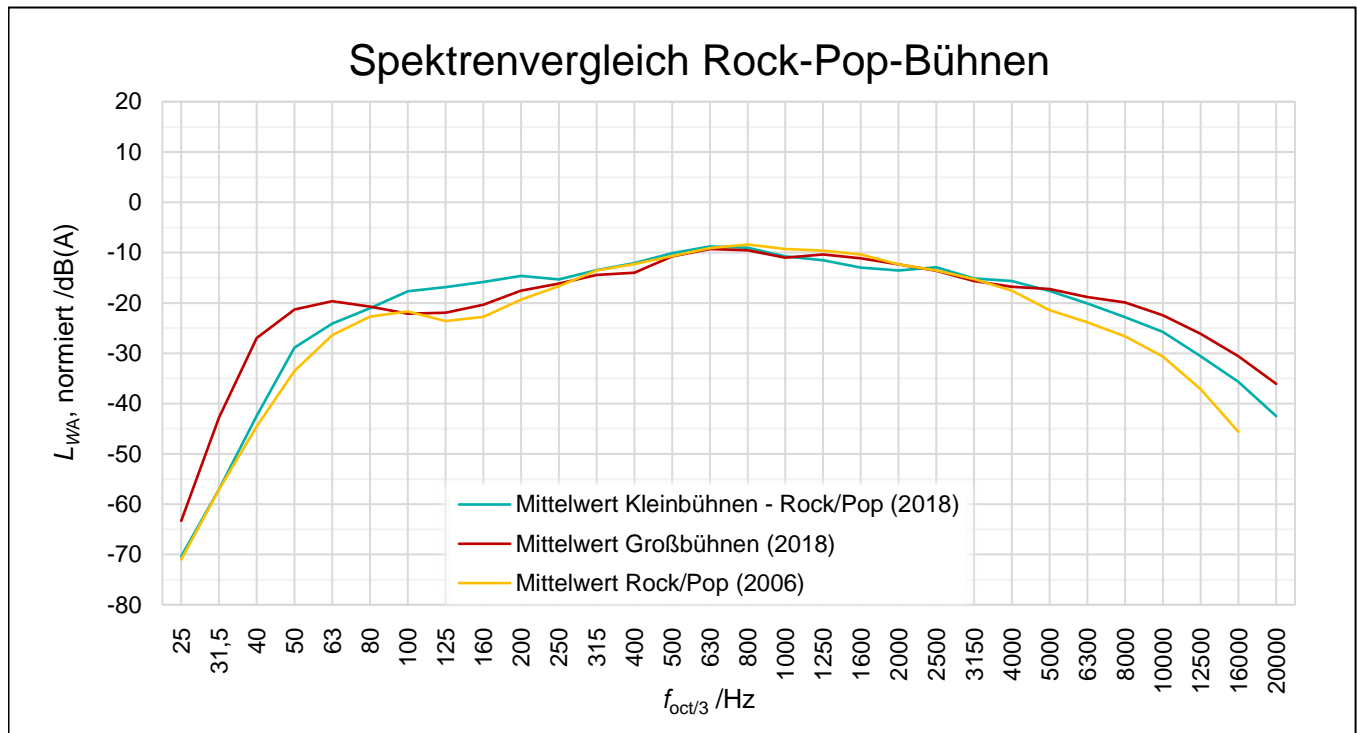


Abbildung 18: Vergleich der mittleren Terzspektren für Groß- und Kleinbühnen (2018) mit dem in der SFLS bestimmten Rock-Pop-Spektrum (2006) (A-bewertet, normiert auf A-Summenpegel 0 dB)

Für die Bildung des Beurteilungspegels bedeutet der zunehmende Bassanteil, dass selbst nach A-Bewertung diese Anteile pegelbestimmend sein können. Das gilt vor allem für entferntere Immissionsorte außerhalb der Hauptabstrahlrichtung von Großbühnen. Dies wird durch die mittlere Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem Mittelungspegel verdeutlicht, die für das gemessene bühnennahe Signal von Großbühnen 13 dB beträgt. Für Kleinbühnen ist eher der Oberbass-Bereich zwischen 100 Hz und 250 Hz kritisch.

Im Bereich über 250 Hz weisen alle Rock-Pop-Spektren einen ähnlichen Verlauf auf. Unterschiede im Hochtonbereich kommen durch die Korrektur der Luftdämpfung für die 2018 ermittelten Verläufe und durch den zunehmenden Einsatz von Line Arrays zustande.

6.2 Verwendung der Ergebnisse für Prognoserechnungen

Bei Verwendung der in Abschnitt 4.4 und 5.4 ermittelten Schallleistungspegel für Prognoserechnungen im Zusammenhang mit Freiluftbühnen und Freilichtkinos sind folgende Punkte zu beachten:

- Der berechnete Wert entspricht dem Gesamt-Schallleistungspegel L_{WAeq} der in der Regel aus mehreren Einzelarrays (oder Lautsprechern) bestehenden Beschallungsanlage.
- Er gilt für die angenommene, ungerichtete Schallquelle (Lautsprecher bzw. Line Array), die den auf der Hauptachse messbaren Schalldruckpegel in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlt. Durch das Richtwirkungsmaß verringert sich bei der Ausbreitungsrechnung der Pegel an Immissionsorten, die nicht in Hauptstrahlrichtung liegen. Die reale Schallleistung des Lautsprechers oder Line Arrays ist deshalb niedriger.
- Die Schallleistungspegel gelten allgemein für Punktschallquellen. Line-Arrays (Linienschallquellen endlicher Länge) können bei Berechnungen für Immissionsorte außerhalb des Nahfeldes wie Punktschallquellen behandelt werden. Die Grenze des Nahfeldes bestimmt sich nach Gleichung (6). Sie liegt für ein Line Array üblicher Länge (ca. 5 m) und eine Frequenz von 1000 Hz bei ca. 36 m.

- Schwankungen des prognostizierten Schalleistungspegels kommen vor allem durch die zu beschallende Fläche zustande. Manchmal ist es schwierig ein genaues Versorgungsgebiet zu definieren. In diesen Fällen sollte die Fläche eher konservativ (also größer) angesetzt werden.
- Bei der Berechnung des Schalleistungspegels für Bühnen auf denen Klassik gespielt wird, ist Gleichung (9) zu verwenden. Aus den in den Jahren 2017 und 2018 gewonnenen Messungen ging hervor, dass je nach Dynamik der Stücke bzw. je nach Besetzung (mit/ohne Gesang) Pegeldifferenzen zwischen den Aufführungen von 10 dB(A) auf der gleichen Bühne auftreten können. Die Standardabweichung σ für die Differenz zwischen prognostiziertem und messtechnisch ermitteltem Schalleistungspegel ist für Klassikbühnen mit 5,6 dB relativ hoch (Genrekategorie 1 - 3: $\sigma = 2,7 \dots 2,9$ dB). Für Klassikbühnen ist es somit sicherer bei der Prognose einen höheren Schalleistungspegel anzusetzen, indem z.B. der Wert der Standardabweichung im Ergebnis als Summand berücksichtigt wird.
- Für dezentrale Anlagen und solche mit Haupt- und Delay-Systemen, bei denen das Hauptsystem weniger als neun Zehntel der Gesamt-Schalleistung abstrahlt, müssen individuelle Prognoserechnungen nach Abschnitt 6.4 durchgeführt werden. Da bei dezentraler Beschallung die Gesamtemission bei gleichem Versorgungspegel geringer als bei zentraler Beschallung ist, liegt man in der Regel mit einer Prognose nach dem hergeleiteten, überschlägigen Verfahren für entfernte Immissionsorte auf der sicheren Seite.
- Für die Berechnung der Beurteilungspegel und der Spitzenpegel aus den prognostizierten Mittelungspegeln am Immissionsort können die in *Tabelle 4* und *Tabelle 5* angegebenen Werte für den Impulszuschlag K_1 und das Scheitelmaß $\Delta L_{A,max}$ verwendet werden. Allerdings muss beachtet werden, dass beispielsweise der Impulszuschlag mit steigender Entfernung zur Schallquelle abnimmt und somit nur für nahe Immissionsorte genaue Aussagen zulässt. In erster Näherung sind diese Werte allerdings auch für Fernfeldprognosen nutzbar.
- Die mit Gleichung (8), (9) und (10) berechneten Schalleistungspegel spiegeln aus aktuellen Messungen ermittelte Werte wieder. Allerdings haben die Untersuchungen gezeigt, dass zureichende Versorgungspegel bei einzelnen Veranstaltungen auch immer wieder überschritten werden. Bei besonders kritischen Emissionssituationen kann somit zum Schalleistungspegel noch die zugehörige Standardabweichung der jeweiligen Messreihe addiert werden.

6.3 Überschlägiges Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln

Ausgangspunkt für die Ermittlung von Beurteilungspegeln an Immissionsorten ist das allgemeine Berechnungsverfahren, das in der deutschen Norm DIN ISO 9613-2 „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien“ beschrieben wird. Eine Ausbreitungsrechnung kann z.B. mit Tabellenkalkulationsverfahren vorgenommen werden. In den meisten Fällen wird die Berechnung mittels spezieller Prognosesoftware für die Schallimmission erfolgen, wie sie von verschiedenen Herstellern angeboten wird.

Zur Vereinfachung sind als Schallquellen nur die zwei Hauptsysteme der Beschallungsanlage (Main Arrays, Punktrahler) zu definieren. Die Quellenhöhe ist einzelfallbezogen in Abhängigkeit von der Aufstellhöhe der Lautsprecher festzulegen. Bei ausgedehnten Anordnungen (z.B. Line Arrays) ist die mittlere Höhe anzusetzen. Für moderne Beschallung mit Line Arrays kann ein mittleres Richtwirkungsmaß verwendet werden, welches *Tabelle 12* (siehe Anhang III) sowie *Abbildung 5* und *6* zu entnehmen ist. Für konventionelle Beschallung können die D_1 -Werte der SFLS 2006 herangezogen werden. Die Gesamt-Schalleistung der Beschallungsanlage ergibt sich aus den Gleichungen (8), (9) bzw. (10) und ist energetisch auf die Schallquellen aufzuteilen. Das bedeutet bei gleicher Pegelung der beiden Lautsprecher(-Cluster) eine Absenkung um jeweils 3 dB.

Die Teil-Immissionspegel pro Schallquelle $L_{Aeq,i}$ können gemäß Gleichung (11) überschlägig berechnet werden. Der Dauerschalldruckpegel am Immissionsort ergibt sich durch energetische Addition der resultierenden Teilpegel.

$$L_{Aeq,i} = L_{WA,i} + D_{I,i} - D_i \quad (11)$$

$L_{WA,i}$	<i>A-bewerteter Schallleistungspegel der Einzelquelle in dB(A)</i>
$D_{I,i}$	<i>Richtwirkungsmaß der Einzelquelle in dB, gemäß Tabelle 12 (siehe Anhang III)</i>
D_i	<i>Gesamt-Dämpfungsmaß für die Schallausbreitung von der Einzelquelle zum Empfänger in dB²⁰</i>

Dieses überschlägige Berechnungsverfahren kann in der praktischen Anwendung gut für Abschätzungen der Problematik der Schallimmission verwendet werden. Die Prognosegenauigkeit des Verfahrens ist im Fernfeld (gemäß Gleichung (6)) ausreichend. Für nahe Immissionsorte sowie für Großveranstaltungen mit komplexen Anordnungen wird das in 6.4 beschriebene detaillierte Verfahren empfohlen.

6.4 Detailliertes Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln

Um Aussagen über komplexe Konfigurationen, dezentrale Anlagen bzw. nahe Immissionsorte treffen zu können, ist das im Folgenden beschriebene, detaillierte Verfahren zu nutzen. Dabei sind Kenntnisse zur Konfiguration der Beschallungsanlage, inkl. Anordnung und Winkelung der Cluster, zur beschallten Fläche sowie zur Art der Veranstaltung notwendig. Sind diese Daten gegeben ist auch hier die Ausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 zu vollziehen.

Vorerst sind Lautsprechercluster als Punktschallquellen zu definieren.²¹ Mittel-/Hochtoncluster sind einzeln zu berechnen, wohingegen am Boden aufgestellte Basscluster-Anordnungen zusammengefasst werden können.²² Front Fills, die zur Beschallung der vordersten Publikumsreihen dienen, strahlen in der Regel nur einen geringen Anteil der Gesamt-Schallenergie ab und sind daher für die Ausbreitungsrechnung zu vernachlässigen.

Die Teil-Immissionspegel pro Schallquelle in Oktavbändern können gemäß Gleichung (12) detailliert berechnet werden. Der Gesamt-Pegel am Immissionsort ergibt sich durch energetische Addition der resultierenden Teilpegel.

$$L_{Aeq,i}[O] = L_{WA,i}[O] + D_{I,i}[O] - D_i[O] \quad (12)$$

$L_{WA,i}[O]$	<i>A-bewerteter Schallleistungspegel der Einzelquelle in dB(A), gemäß Gleichung (13), Oktavbänder</i>
$D_{I,i}[O]$	<i>Richtwirkungsmaß der Einzelquelle in dB, gemäß Tabelle 8 bis 11 und Tabelle 13, Oktavbänder</i>
$D_i[O]$	<i>Gesamt-Dämpfungsmaß für die Schallausbreitung von der Einzelquelle zum Empfänger in dB, Oktavbänder</i>

Zur Ermittlung des Schallleistungspegels der gesamten Beschallungsanlage sind ebenfalls die Gleichungen (8), (9) und (10) zu verwenden. Dieser Pegel ist mittels Gleichung (13) energetisch auf die Einzelquellen aufzuteilen. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Mittel-/Hochtoncluster, sowie alle Basscluster gleich gepegelt sind. Diese Vereinfachung entspricht allerdings nicht der gängigen Beschallungspraxis. Die Schallleistungspegel der Einzelquellen sollten deshalb, wenn möglich, im Verhältnis zueinander einzelfallbezogen definiert werden. Gängige Werte für

²⁰ Für weitere Erläuterungen zur Berechnung der Dämpfungsmaße gemäß DIN ISO 9613-2 siehe Anhang II.

²¹ Zur Veranschaulichung sind in *Abbildung 29* und *Abbildung 30* verschiedene Lautsprechercluster an Messorten dargestellt (siehe Anhang I).

²² Sind Subwoofer in einer Line Array Anordnung enthalten, sind diese als einzelnes Basscluster zu betrachten.

Absenkungen gegenüber den Main Arrays sind 6 – 15 dB für Delay Arrays und 3 – 6 dB für Side Arrays.²³ Die Oktavpegel-Korrekturwerte für Bass- sowie Mittel-/Hochtoncluster leiten sich jeweils aus *Tabelle 15* und *Tabelle 16* ab.²⁴

$$L_{WA,i}[O] = L_{WA} - 10 \cdot \lg(n) \text{ dB} + D_f^0[O] \quad (13)$$

L_{WA}	<i>A-bewerteter Gesamt-Schalleistungspegel der Beschallungsanlage in dB(A), gemäß Gleichung (8), (9) und (10)</i>
n	<i>Anzahl der Einzelquellen</i>
$D_f^0[O]$	<i>Oktavpegel-Korrekturwert für Bass- bzw. Mittel-/Hochtoncluster in dB, gemäß Tabelle 15 und 16, Oktavbänder</i>

Sind alle Einzelquellen definiert, kann eine Ausbreitungsrechnung nach Formel (12) vollzogen werden. Dabei ist das mittlere Richtwirkungsmaß in Oktavbändern, das sich aus den *Tabellen 8 bis 11* ableitet, zu verwenden. Für konventionelle Beschallung können die D_1 -Werte der SFLS 2006 herangezogen werden. Bei Abstrahlrichtungen außerhalb der Hauptachsen ist zwischen den horizontalen und vertikalen Werten des Richtwirkungsmaßes D_1 zu interpolieren. Sind genauere Angaben zur Veranstaltung vorhanden, sollte die Richtcharakteristik des eingesetzten Systems verwendet werden. Diese kann mit Lautsprecher-Simulationsprogrammen wie z.B. EASE SpeakerLab (AFMG, 2009) erstellt werden.

Für detaillierte Ausbreitungsrechnungen ist es empfehlenswert Simulationssoftware zu verwenden, die von verschiedenen Herstellern angeboten wird. Die Immissionsprognose-Software IMMI (Wölfel Engineering GmbH, 2017) bietet beispielsweise den Import von in EASE SpeakerLab (AFMG, 2009) erzeugten xhn-Dateien an²⁵. Des Weiteren ist für SoundPLAN (SoundPLAN, 2017) und NoizCalc (d&b, 2017) der Import von ArrayCalc-Dateien (d&b, 2018) für d&b-Lautsprecher-Systeme möglich.

Bei der Prognose ist vorerst von der in DIN ISO 9613-2 dargelegten Pegelgenauigkeit auszugehen. Häufig ist durch fehlende Informationen zur Veranstaltung keine exakte Rechnung für spezielle Beschallungskonfigurationen möglich. Allgemein ist auch zu beachten, dass in den meisten Berechnungsprogrammen für Schallimmissionen Pegel nicht komplex, sondern energetisch überlagert werden. Kohärenzeffekte, wie sie zum Beispiel durch horizontale Anreihungen von Bass-Clustern (Zahnlücke) auftreten, werden somit nicht berücksichtigt.

Der Prognosealgorithmus ist allgemein zur sicheren Seite hin ausgelegt. Bei Immissionsorten mit hohem Konfliktpotential kann zu den ermittelten Pegeln auch noch die Standardabweichung des Versorgungspegels der jeweiligen Bühnenart addiert werden (siehe *Tabelle 4* und *5*).

²³ Das Schalleistungsverhältnis der verschiedenen Arrays zueinander ist stark abhängig von der Anzahl und dem Typ der Arrays, dem Abstand dieser zueinander sowie der Größe der Veranstaltung. Delaylautsprecher werden allgemein so gepegelt, dass sie im jeweiligen Versorgungsgebiet genauso laut sind wie die Hauptsysteme in diesem Bereich.

²⁴ Die Oktavpegel-Korrekturwerte ergeben sich durch energetische Mittelung der jeweiligen drei Terzpegel-Korrekturwerte, die in der Oktave liegen (z.B. die 800-Hz-, 1000-Hz- und 1250-Hz-Terzen für die 1000-Hz-Oktave).

²⁵ xhn-Dateien enthalten die durch komplexe Überlagerung der Einzeltreiber des Line Arrays ermittelte Richtcharakteristik für einen bestimmten Abstand in 10° Schritten.

6.5 Beispielrechnung

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels das überschlägige Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln veranschaulicht werden. Als Grundlage für die Ausbreitungsrechnung dienen Daten, die auf einem Festival im Sommer 2017 erfasst wurden.

Tabelle 7: Beispielrechnung: Ausgangsdaten der Veranstaltung

Parameter	Festival	Clusterart	Anz.	Bestückung	Anordnung	cardioid
zu besch. Fläche (Main Stage)	16800 m ²	Main Array	2x	14x d&b GSL8, 2x d&b GSL12	geflogen, Line Array ($h_L = 10$ m, $s_L = 20$ m)	✓
Zuschauerkapaz. (ges. Gelände)	45000 Pers.	Side Array	2x	10x d&b J8	geflogen, Line Array ($h_L = 8$ m, $s_L = 40$ m)	
Bühnenart	Großbühne	Delay Array	2x	6x d&b J8, 2x d&b J12	geflogen, Line Array ($h_L = 8$ m, $s_L = 42$ m)	
Genre	Metal (G3)	Subwoofer-cluster	10x	2x d&b SL-SUB	gestackt, Zahnücke ($s_L = 3$ m)	✓

In *Tabelle 7* sind die der Berechnung zugrunde liegenden Daten aufgeführt. Für die Prognose relevante Parameter sind gelb markiert. Aus der zu beschallenden Fläche von $A = 16800$ m² ergibt sich, dass es sich um eine Großbühne handelt ($A \geq 500$ m²). Auf dem Festival treten größtenteils Metalbands auf. Für die Berechnung des Schalleistungspegels nach Gleichung (8) ist somit von einem Genrekorrektur-Wert von $K_G = +4$ dB (Genrekategorie 3) auszugehen. Dementsprechend lässt sich der zu erwartender Schalleistungspegel der Gesamt-Beschallungsanlage berechnen:

$$L_{WAeq} = L_{VA} + 8 \text{ dB} + 10 \cdot \lg(A) \text{ dB} + K_G$$

$$L_{WAeq} = \underline{\underline{147,3 \text{ dB}}}$$

Mit diesem Wert ist eine Prognose gemäß dem überschlägigen Verfahren direkt möglich. Dabei ist der Schalleistungspegel der gesamten Beschallungsanlage energetisch auf die beiden Haupt-Systeme aufzuteilen (3 dB Absenkung pro System). Als zusammengefasste Schallquellen werden hier die beiden Main Arrays verwendet, welche sich aus jeweils 16 Line-Array-Boxen zusammensetzen und in einer mittleren Höhe von 10 m gehangen werden. Für diese Lautsprechercluster ergibt sich gemäß Gleichung (6) die Grenzfernung r_G des Nahfeld-Fernfeld-Übergangs bei 1000 Hz:

$$r_G = \frac{l^2}{2\lambda}$$

$$r_G (1 \text{ kHz}) = \underline{\underline{53 \text{ m}}}$$

Für die Ausbreitungsrechnung werden Referenzmessorte innerhalb (IO 1, IO 2) und außerhalb (IO 3, IO 4, IO 5) des Veranstaltungsgeländes definiert. Der Lageplan des betrachteten Gebiets kann *Abbildung 19* entnommen werden.

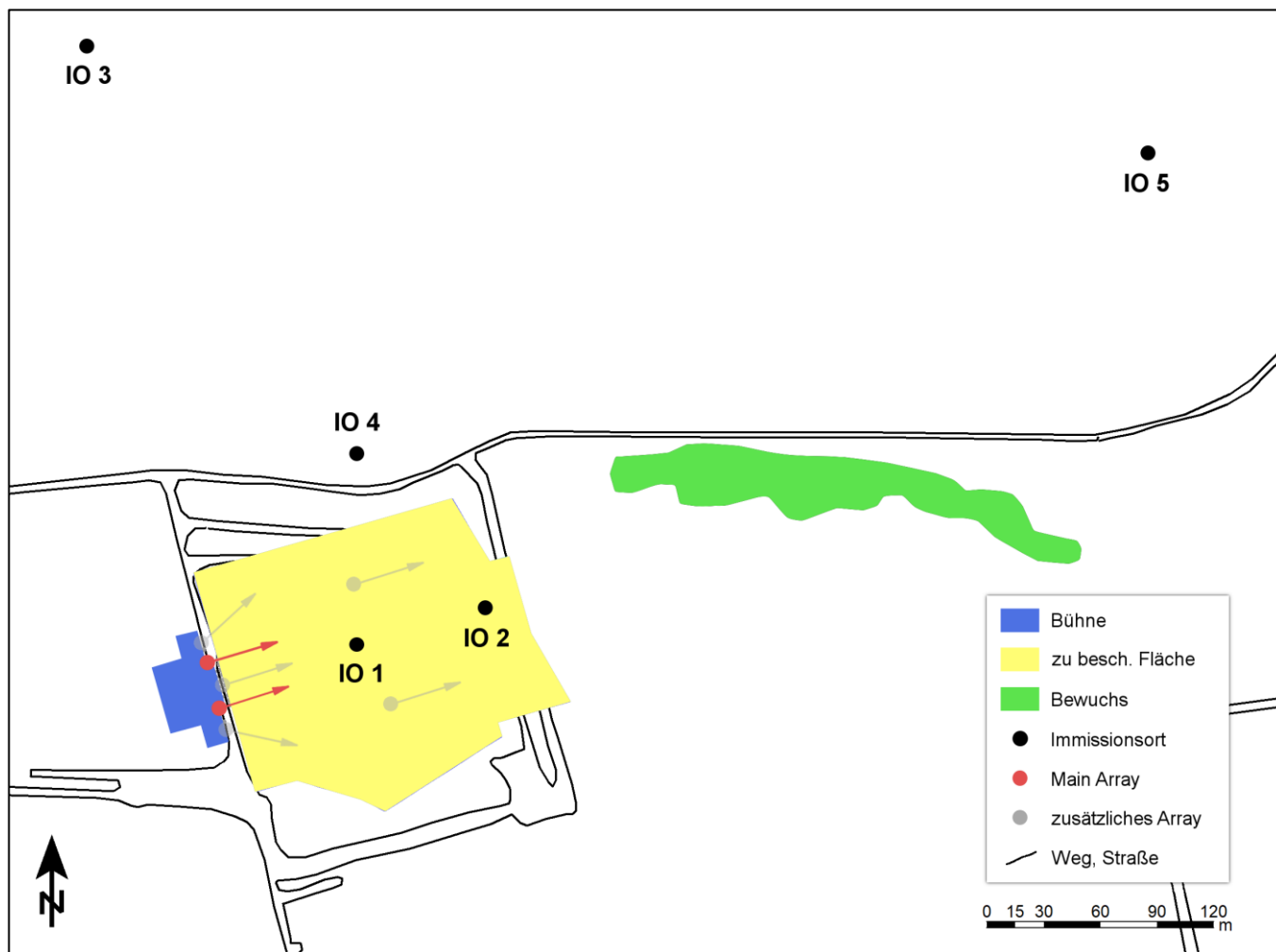


Abbildung 19: Lageplan des Veranstaltungsgeländes und der naheliegenden Immissionsorte

Die zu erwartenden A-Summenpegel an den Immissionsorten wurden mittels Tabellenkalkulation gemäß DIN ISO 9613-2 bestimmt. Zur Berechnung des Abstandsmaßes wurden die jeweiligen (effektiven) Entfernungen s_m zu den Hauptarrays eingesetzt. Das Richtwirkungsmaß wurde mit den D_1 -Werten für Cardioid-Line-Arrays (siehe Abschnitt 7.1) und den sich für jeden Immissionsort ergebenden Winkeln zur Hauptabstrahlrichtung bestimmt.²⁶

Für das vom FOH aus gesehen linke Main Array ergibt sich am Immissionsort 3 ein Abstrahlwinkel von 90° horizontal und 0° vertikal. So ergibt sich ein Richtwirkungsmaß von $D_1 = -9,6$ dB. Dämpfungseffekte der geometrischen Ausbreitung (Abstand zum Array $r_1 = 435$ m, Höhe des IOs $h_{IO} = 1,7$ m), der Luftabsorption sowie durch Boden und Meteorologie sind gemäß DIN ISO 9613-2 zu ermitteln.²⁷ Folglich ergibt sich gemäß Gleichung (11) der Teil-Immissionspegel des linken Arrays am Immissionsort 3:

$$L_{Aeq,1}(IO\ 3) = L_{WA,1} + D_{1,1} - D_1$$

$$L_{Aeq,1}(IO\ 3) = L_{WA,1} + D_{1,1} - D_{div,1} - D_{atm,1} - D_{gr,1}$$

$$L_{Aeq,1}(IO\ 3) = \underline{\underline{67,5\ dB(A)}}$$

²⁶ Bei Abstrahlrichtungen außerhalb der Hauptachsen wurde zwischen den horizontalen und vertikalen Werten des Richtwirkungsmaßes D_1 interpoliert.

²⁷ Für weitere Erläuterungen zur Berechnung der Dämpfungsmaße gemäß DIN ISO 9613-2 siehe Anhang II.

Für das rechte Array ergeben sich leicht abweichende Werte durch die geringere Entfernung zum Immissionsort ($r_2 = 415 \text{ m}$, $h_{I0} = 1,7 \text{ m}$):

$$L_{Aeq,2} (IO 3) = \underline{\underline{68,0 \text{ dB(A)}}$$

Die energetische Addition der Teil-Pegel ergibt den Gesamt-A-Summenpegel am Immissionsort 3:

$$L_{Aeq} (IO 3) = \underline{\underline{70,8 \text{ dB(A)}}$$

Mit dem mittleren Impulszuschlag $K_I = 4 \text{ dB}$ ergibt sich der Taktmaximal-Pegel aus dem energieäquivalenten A-Summenpegel (L_{Aeq}) zu:

$$L_{AFTeq} (IO 3) = L_{Aeq} + K_I$$

$$L_{AFTeq} (IO 3) = \underline{\underline{74,8 \text{ dB(A)}}$$

Das Spitzenpegelkriterium lässt sich anhand des Immissionspegels L_{Aeq} und des Scheitelfaktors $\Delta L_{A,max}$ für Großbühnen (siehe *Tabelle 4*) kontrollieren:

$$L_{max} (IO 3) = L_{Aeq} + \Delta L_{A,max}$$

$$L_{max} (IO 3) = \underline{\underline{83,5 \text{ dB(A)}}$$

Impulszuschlag und Spitzenpegelkriterium können für die weiteren Immissionsorte analog gehandhabt werden.

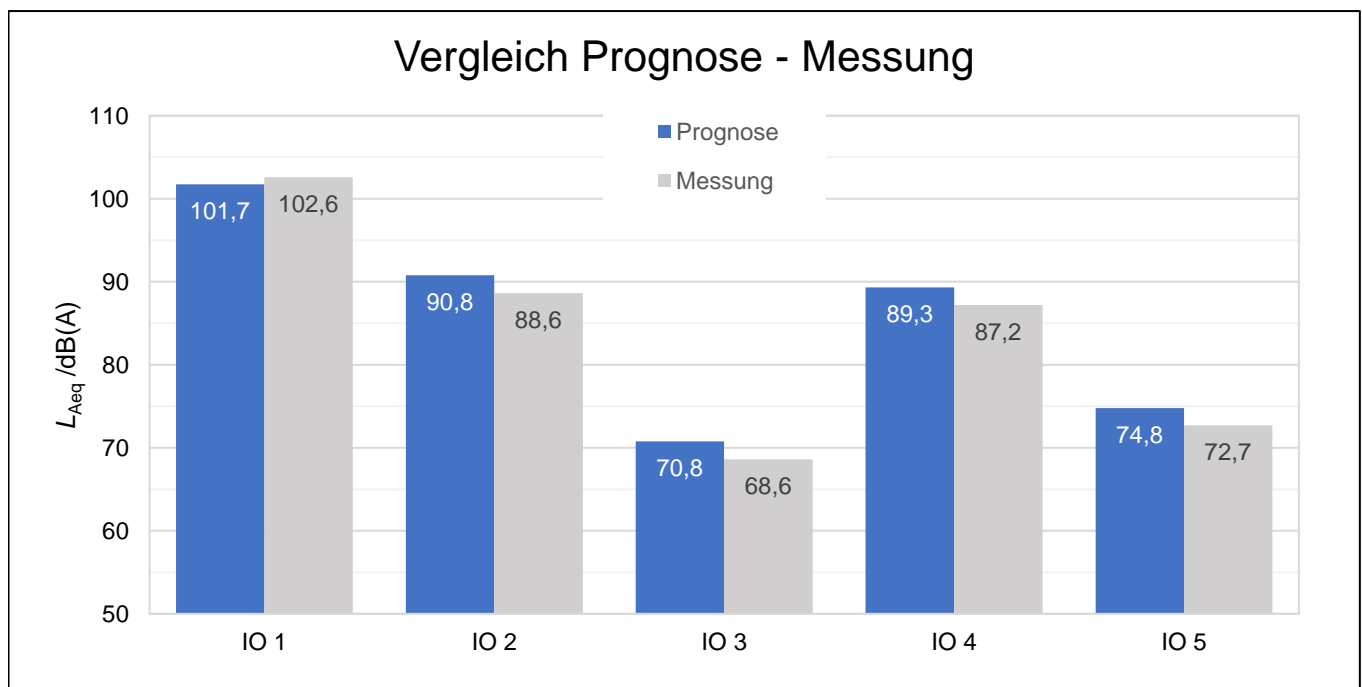


Abbildung 20: Beispiel: Vergleich der prognostizierten mit den gemessenen (normierten) A-bewerteten Mittelungspegeln

In *Abbildung 20* werden alle berechneten Immissions-Pegel dargestellt und mit den auf dem Festival ermittelten Werten verglichen. Allgemein zeigen sich die Trends der Prognose auch in den Messergebnissen. Dabei liegen die berechneten Werte größtenteils über denen der Messung, was zeigt, dass die Prognose zur sicheren Seite hin ausgelegt ist. Dabei ist allerdings zu beachten, dass nur die Immissionsorte 3 und 5 nachweislich außerhalb des Grenzzadius und somit im Fernfeld der Line Arrays liegen. An den anderen Messpunkten kann durch die Effekte der komplexen Überlagerung von Line Arrays keine sichere Prognose gemacht werden. Die Ergebnisse zeigen hier nur eine Tendenz. Hinzu kommt, dass der Großteil an Lautsprecherclustern (siehe *Tabelle 7*), die bei der Veranstaltung zum Einsatz kamen, in der Rechnung nicht mit betrachtet wurden. Die Emissionskenngrößen der zwei Hauptarrays stimmen nur bedingt mit denen der gesamten Beschallungsanlage überein.

Für genauere Prognosen kann das in 6.4 beschriebene detaillierte Verfahren zur Ermittlung von Immissionspegeln genutzt werden. Dabei werden die Pegel in Oktavbändern betrachtet, die Schallenergie auf alle Lautsprechercluster aufgeteilt und genaue Emissionsspektren eingesetzt. Eine solche Prognose kann in den meisten Fällen allerdings nicht ohne eine Simulationssoftware (z.B. IMMI, SoundPLAN, NoizCalc) gemacht werden und wird in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

7 Maßnahmen zur Pegelminderung

7.1 Maßnahmen für Mittel-/Hochtonlautsprecher

Mittel-/Hochtonlautsprecher bilden den Teil einer Beschallungsanlage, der den Frequenzbereich abdeckt, in dem die Hörschwelle des menschlichen Gehörs besonders niedrig ist (500 Hz bis 10 kHz). Diese Elemente sind für den Beurteilungspegel und somit für den Immissionsschutz die relevanten Schallquellen. Bei Bedarf sind Maßnahmen zur Pegelminderung zuerst hier zu ergreifen.

Allgemein sollte die Schallabstrahlung der Lautsprecher auf das Versorgungsgebiet konzentriert werden. Für solche Zwecke bieten sich besonders Line Arrays an. Auch für Kleinbühnen werden mittlerweile entsprechend dimensionierte Systeme angeboten, sodass die Verwendung von Punktstrahlern immer mehr abnimmt. Einige Hersteller wenden mittlerweile das „Cardioid-Prinzip“ (siehe Abschnitt 3.2) auch auf Line Arrays an. Durch zusätzliche Treiber wird hier die Abstrahlcharakteristik noch weiter auf den Rezeptionsbereich gelenkt.

Mittlerweile wurden auch Systeme entwickelt, bei denen Frequenz- und Phasengang so modifiziert werden, dass der Schalldruckpegelabfall über das Versorgungsgebiet gezielt beeinflusst werden kann. So kann der Toningenieur z.B. am Ende des Rezeptionsbereichs einen um 10 dB niedrigeren Pegel als am FOH einstellen. Dieses Prinzip findet Verwendung in sogenannten „Beam Steering“ Linienstrahlern²⁸, aber auch bei einigen Line Arrays und kann bei verschiedenen Veranstaltungsgrößen angewendet werden.

Ein wichtiger Punkt bei der Planung einer Veranstaltung ist auch die Positionierung der Bühne und der Lautsprecher. Line Arrays werden auf Großbühnen meist bis an die Oberkante der Bühne gehangen, wodurch sich der Schall über weite Strecken ausbreiten kann. Wenn man diese niedriger hängt, findet meist eine bessere Abschirmung durch die umliegende Bebauung statt. Wenn möglich sollte außerdem die Bühne so positioniert werden, dass der größte Dämpfungseffekt durch die Richtcharakteristik der Line Arrays für potenzielle Immissionsorte zum Tragen kommt.

Generell sollten die Anordnung, Ausrichtung und Pegelung der Elemente von Line Arrays sorgfältig auf den zu beschallenden Publikumsbereich abgestimmt werden, wobei auch Aspekte des Schall-Immissionsschutzes zu berücksichtigen sind. Hierzu können in der Regel spezielle, von den Herstellern bereitgestellte Software-Tools verwendet werden.

7.2 Maßnahmen für Tieftonlautsprecher

In Abschnitt 4 wurde gezeigt, dass besonders auf Großbühnen der unbewertete Pegel durch tieffrequente Schallanteile dominiert wird (siehe *Abbildung 11*). Diese Anteile haben in der Regel keinen bestimmenden Einfluss auf den A-bewerteten Schalldruckpegel (und somit auch nicht auf den Beurteilungspegel), allerdings sollten auch hier, wenn möglich, unnötige Schallemissionen verhindert werden. Das gelingt hier ebenfalls durch die gezielte Beschallung des Versorgungsbereiches. Die Ausbreitung kann dabei durch die Wahl der Lautsprecher, durch spezielle Anordnungen der Boxen sowie das Einstellen von Verzögerungszeiten beeinflusst werden.

²⁸ „Beam Steering“ Lautsprecher werden unter anderem auch als Cardioid-Systeme angeboten.

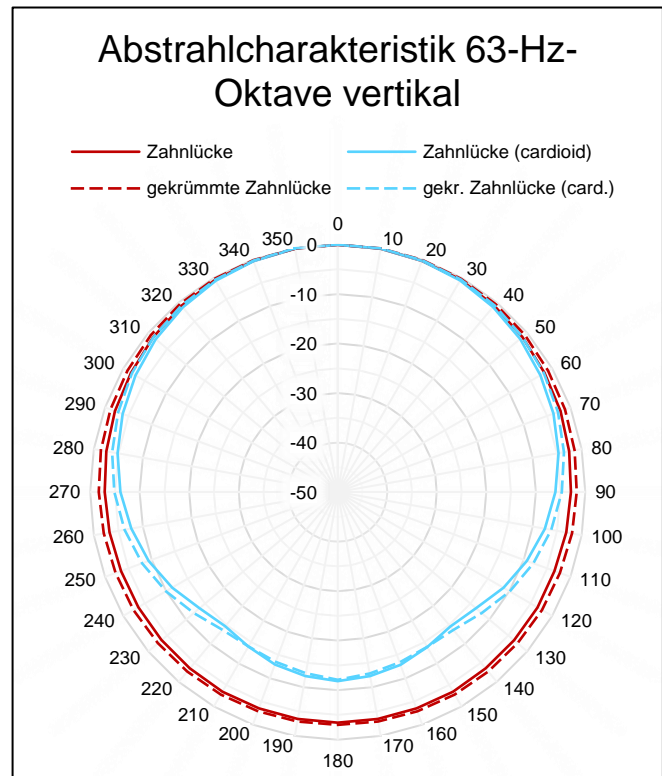
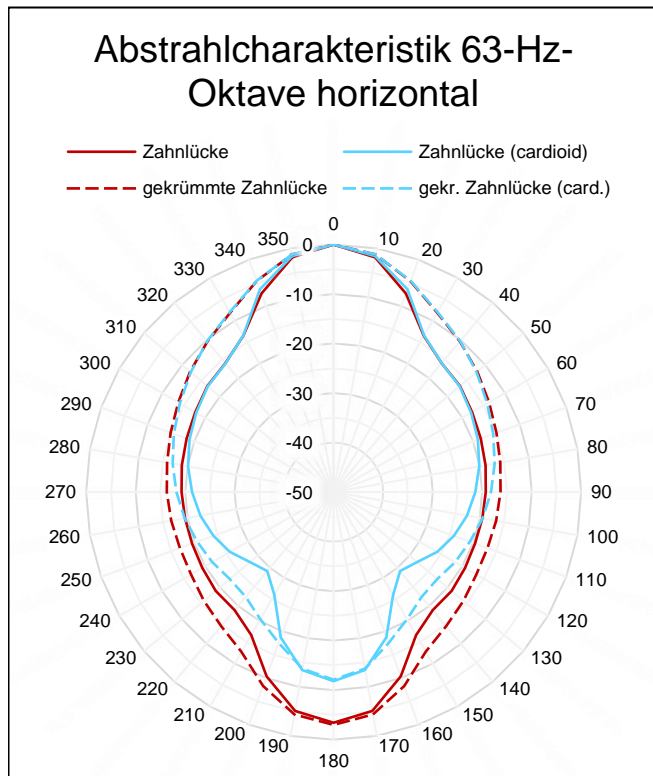


Abbildung 21: Simulierte horizontale und vertikale Richtcharakteristik für die 63-Hz-Oktave von acht doppelt gestackten Subwooferclustern in Zahnlückenordnung (gerade/gekrümmt)

Generell bietet sich der Einsatz von Cardioid-Subwoofern an. Diese Lautsprecher nutzen zusätzliche Treiber, die entgegen der Hauptabstrahlrichtung wirken. So treten destruktive Interferenzen auf, welche die Schallabstrahlung nach hinten und zu den Seiten reduzieren. Dieses Prinzip kann auch mit herkömmlichen Tieftonlautsprechern umgesetzt werden. Wenn z.B. neben den vorgesehenen Subwoofern noch weitere aufgestellt werden, die um 180° gedreht sind und mit veränderter Phasenlage angesteuert werden, kommt eine ähnliche Richtcharakteristik zustande.

Weitere Anordnungen um den Schall auf das Versorgungsgebiet zu konzentrieren sind z.B. „Zahnlücke“ oder „End Fire“ (siehe Anhang I). Dabei wirkt dasselbe Prinzip der komplexen Überlagerung wodurch vor allem die seitliche Schallabstrahlung vermindert wird (siehe *Abbildung 21*). Zudem wird bei Anordnungen bei denen die Cluster nicht in einer Linie, sondern gekrümmt angeordnet werden, der Schall noch gleichmäßiger nach vorne gerichtet. Ist eine solche Aufstellung aus Platzgründen nicht möglich, kann durch das Einstellen von Verzögerungszeiten für die Einzelcluster die Richtcharakteristik teilweise beeinflusst werden.

Die beschriebenen Anordnungen von Cardioid-Subwoofern kommen vorwiegend bei Großbühnen zum Einsatz. Neben dem stärkeren Bassanteil bei dieser Bühnenart spielen hierbei natürlich auch Kostengründe eine Rolle.

Auf den in diesem Bericht ebenfalls betrachteten Kleinbühnen wurden größtenteils einzelne oder Anordnungen von zwei Subwoofern verwendet. Hierbei ist die Schallabstrahlung eher ungerichtet. In konkreten Fällen, in denen besonders tieffrequenter Schall kritisch ist, sollten auch hier die oben genannten Maßnahmen umgesetzt werden. Besonders aus Kostengründen empfehlen sich hier um 180° gedrehte Zusatz-Systeme herkömmlicher Subwoofer. Dafür sind bei entsprechender Ansteuerung auch kleinere Boxen mit 15“- oder 12“-Treibern geeignet.

7.3 Dezentrale Beschallung

Es ist eine bekannte Tatsache, dass durch die dezentrale, verteilte Anordnung von Beschallungslautsprechern bei gleichem Versorgungspegel im Zuhörerbereich die Immissionspegel im Umfeld einer Bühne gegenüber einer zentralen Beschallung deutlich reduziert werden können. An einem konkreten Beispiel einer praktisch realisierten Beschallungsanlage soll die mögliche Verminderung der Beurteilungspegel illustriert werden (Roy, Axel; Zschaler, Hartmut, 2013). Es handelt sich dabei um die Beschallung des Zuschauerbereichs der Filmnächte Chemnitz, die erstmals im Sommer 2011 auf dem Chemnitzer Theaterplatz veranstaltet wurden. Im Vorfeld der Veranstaltung wurden zwei verschiedene Beschallungskonzepte untersucht, wobei als Arbeitsmittel ein digitales Geländemodell in der Software IMMI verwendet wurde.

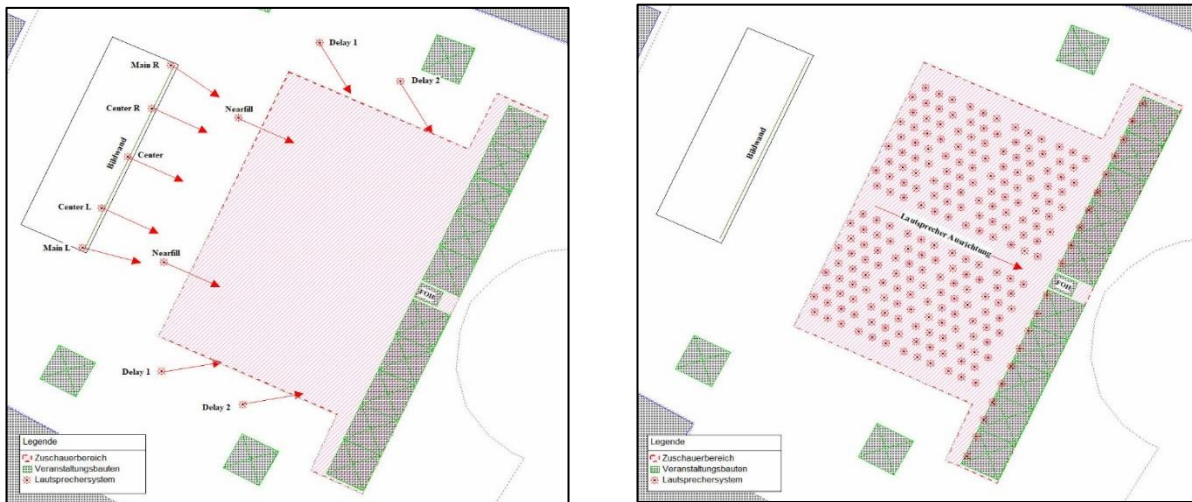


Abbildung 22: Lagepläne der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)

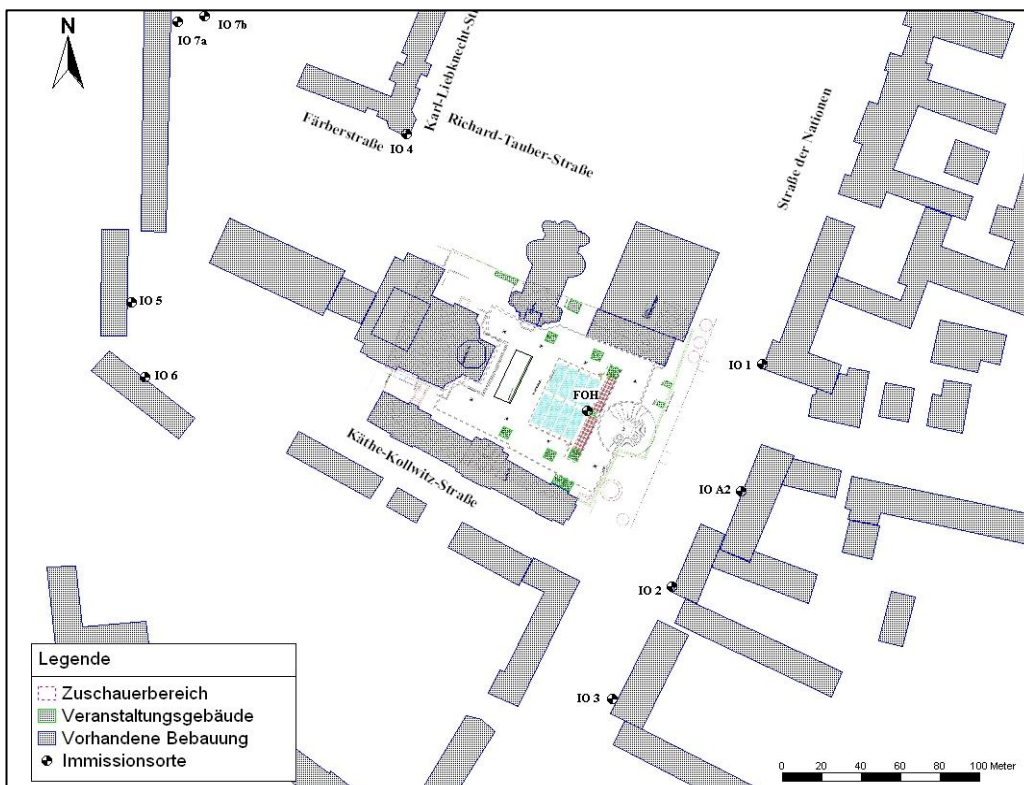


Abbildung 23: Lageplan des Veranstaltungsortes mit umliegender Bebauung

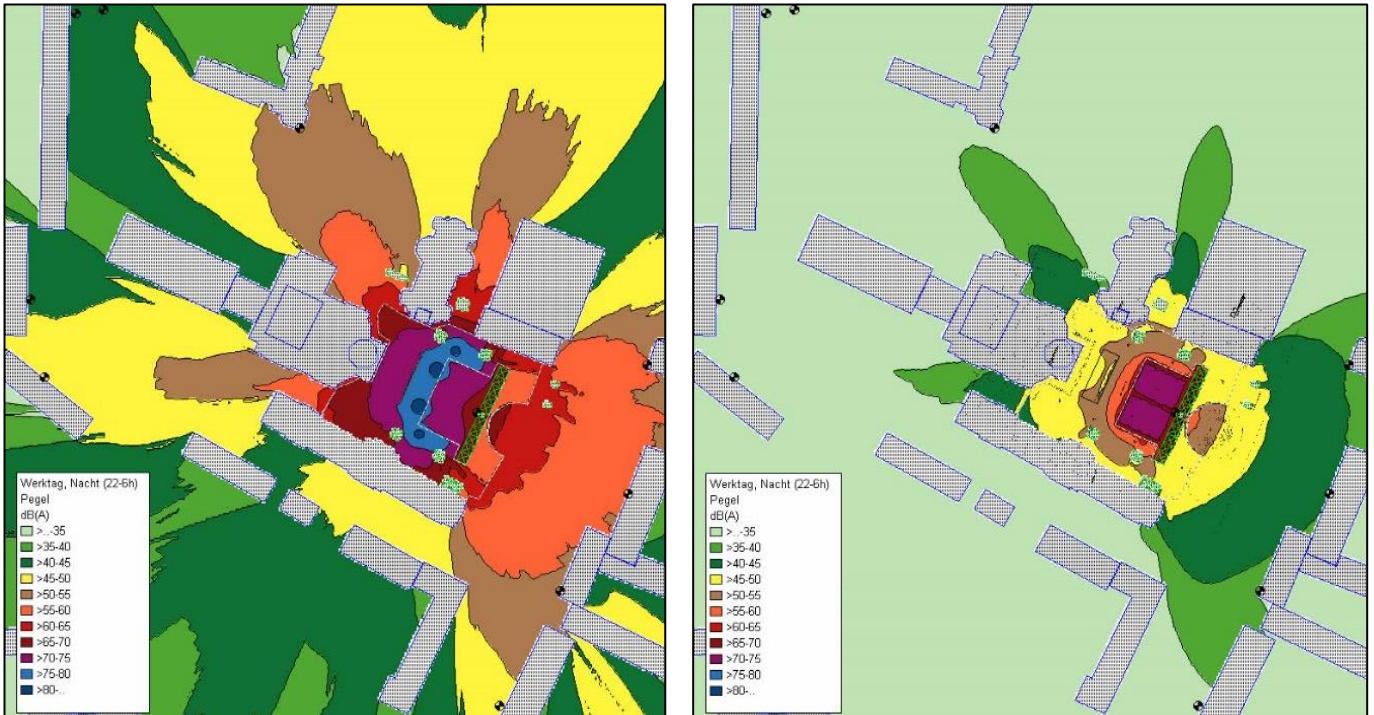


Abbildung 24: Berechnete Immissionsraster der untersuchten Beschallungskonzepte (links: zentral; rechts: dezentral)

Das zentrale Konzept verwendete eine übliche Anordnung von wenigen Lautsprechern bzw. Line Arrays im Bereich der Bildwand und seitlich neben dem Zuschauerbereich (siehe Abbildung 22, links). Dabei kamen folgende Lautsprechersysteme zum Einsatz:

- Main L/R: Line Arrays 6x400W; 11,5m über Grund
- Center L/C/R: je 1x400 W; 11,5m über Grund
- Delay: je 1x400 W; 4m/6m über Grund
- Nearfill: 2 Line Arrays 3x200W; Bodenaufstellung
- Subwoofer: 8x500W cardioid (nicht dargestellt)

Es wurde frühzeitig klar, dass damit die zulässigen Beurteilungspegel im Nachtzeitraum an den maßgeblichen Immissionsorten in der Nachbarschaft des Veranstaltungsgeländes in keinem Falle einzuhalten sind. Diese betragen gemäß (Freizeitlärmrichtlinie; Stand 06.03.2015, Länderausschuss für Immissionsschutz) für einen Teil der betrachteten Immissionsorte 40 dB(A) (Allgemeines Wohngebiet) und für den anderen Teil 45 dB(A) (Dorf-, Kern-, Mischgebiet). Deshalb wurde ein zweites Beschallungskonzept entwickelt, das konsequent dezentral mit maximalen Lautsprecher-Hörer-Abständen von ca. 2 m arbeitet. Dabei kamen folgende Lautsprechersysteme zum Einsatz (siehe Abbildung 22, rechts):

- 236 Kompaktlautsprecher 5"; 2-Weg koaxial; 0,8 m über Grund (auf Stativ); je 125W
- Subwoofer: 16x400W (nicht dargestellt)

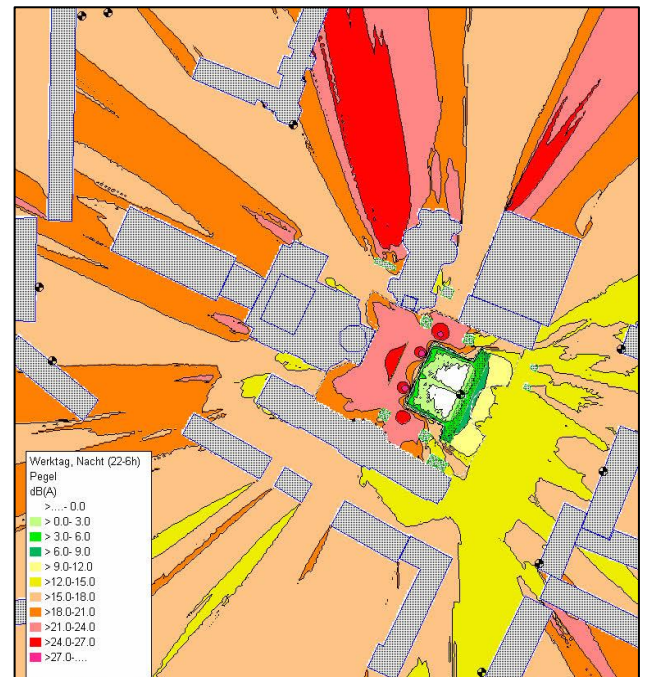


Abbildung 25: Differenzraster zentral-dezentral

Durch die drastische Verkürzung des Beschallungsabstands beim dezentralen Lautsprecherkonzept kann der Beurteilungspegel an den maßgeblichen Immissionsorten um 10...15 dB(A) reduziert werden, wobei der Versorgungspegel im Zuschauerbereich annähernd gleich hoch bleibt. Dies wird durch die Immissionsraster der beiden Konzepte in Abbildung 24 und das Differenzraster in Abbildung 25 verdeutlicht. Damit können die Anforderungen des Schall-Immissionsschutzes für den Nachtzeitraum eingehalten werden. Das dezentrale Konzept wird seit 2011 bei den Filmnächten auf dem Chemnitzer Theaterplatz mit Erfolg eingesetzt. Bemerkenswert ist auch die hervorragende Audioqualität dieses Systems mit sehr präsenter und gut verständlicher Tonübertragung.



Abbildung 26: Praktische Umsetzung des dezentralen Lautsprecherkonzeptes

7.4 Schallschutzelemente

Für den Open Air Konzertbetrieb haben sich mobile Bühnen mit Traversensystemen durchgesetzt. Die Bühnen werden meistens aus Gründen der Wetterbeständigkeit mit PVC-Planen verkleidet. Nach hinten und zu den Seiten dämpfen diese Materialien besonders bei hohen Frequenzen. Durch umliegende Bauten oder Container kann auch im Tieftonbereich bedingt die Schalldämmung erhöht werden. Befinden sich die Bühnen in einem Zelt können durch die Zeltplanen je nach Dicke und Beschaffenheit des Materials Schalldämm-Maße von bis zu 10 dB(A) erreicht werden. Zusätzliche Schallschutzmaßnahmen sollten ergriffen werden, wenn besonders im für die Beurteilung wichtigen Frequenzbereich um 1kHz die Schalldämmung der umliegenden Bühnenelemente nicht ausreicht.

Eine mögliche Maßnahme ist das Aufstellen mobiler Schallschutzwände um das Veranstaltungsgelände bzw. den Bühnenbereich, wie sie unterschiedliche Hersteller anbieten. Diese Lärmschutzelemente lassen sich flexibel einsetzen, sind witterungsbeständig und leicht aufzubauen. Möglich wäre zum Beispiel eine Anwendung bei Veranstaltungen mit Live Orchester oder Big-Band. Hierbei kann die allgemein breitbandige Schallabstrahlung der Instrumente außerhalb der Bühnenöffnung reduziert werden. In *Abbildung 27* werden die Schalldämm-Maße zweier Modelle leichter Schallschutzelemente dargestellt. Die „Ceno Wall“ von Sattler Group / Ceno Tec ist eine aufblasbare Lärmschutzwand und somit sehr leicht zu lagern und zu transportieren. Die Einzelemente haben die Abmessungen von ca. 4,40 m x 3,50 m (Breite x Höhe) bei einer Dicke von ca. 20 cm im aufgeblasenen Zustand. Durch vertikale Doppelung lassen sich mit entsprechenden Halterungen relativ hohe Schirmwände bzw. Einhausungen realisieren.

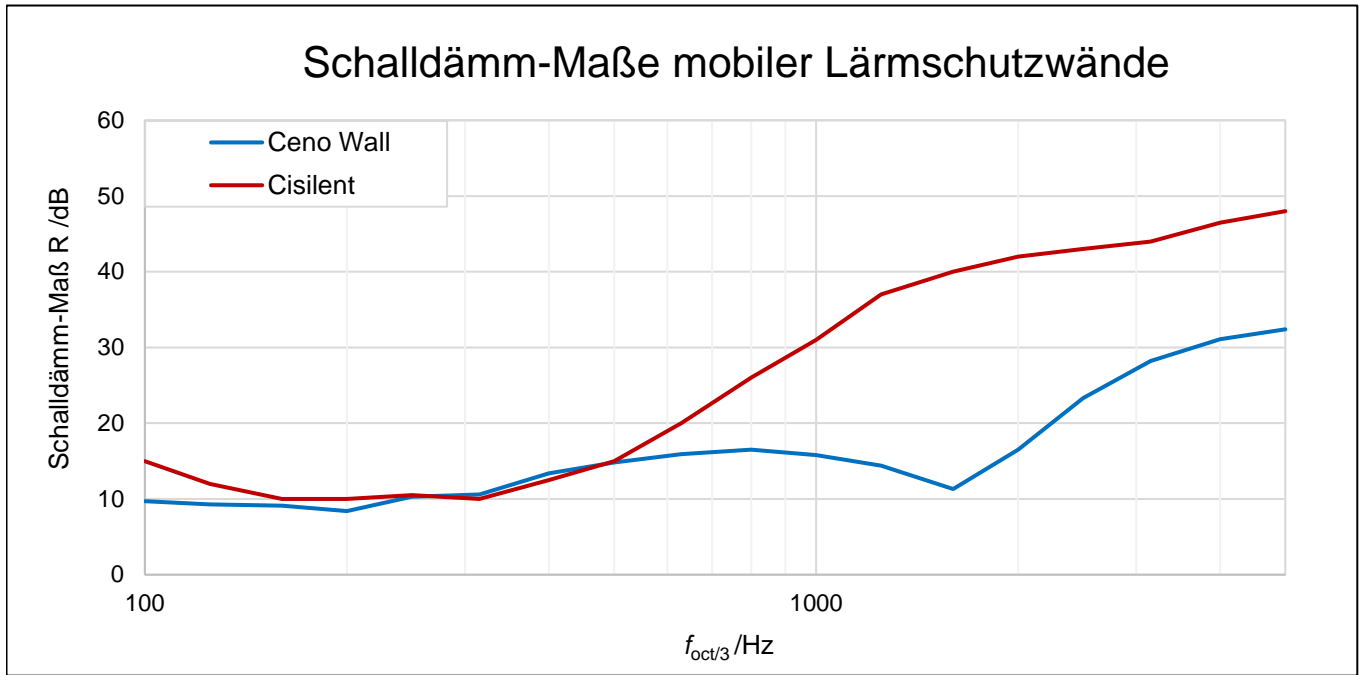


Abbildung 27: Schalldämm-Maße zweier mobiler Lärmschutzwände (Quellen: Cisilent: <http://www.calenberg-ingenieure.de/pr-elastomer-laermschutz-cisilent-typ-e.htm>; Ceno Wall: <https://www.sattler-global.com/textile-architektur/konstruktion-und-wirkung-1164.jsp>)

Ebenfalls auf textilen Materialien basiert das Produkt „Cisilent“ der Fa. Calenberg Ingenieure. Hier werden drei Lagen aus Polyestergerewebe so miteinander verbunden, dass Taschen zur Aufnahme eines dämmenden Füllmediums entstehen. Die Einzelelemente dieses Systems haben ähnliche Abmessungen wie das Produkt „Ceno Wall“.

Diese leichten, mobilen Schallschutzelemente erreichen bewertete Schalldämm-Maße R_w von 15...20 dB. Am wirksamsten sind sie, wenn sie möglichst nahe an der Schallquelle angebracht werden oder direkt als Bühneneinhausung dienen. Die Schalldämmung lässt zu tiefen Frequenzen hin nach, wie *Abbildung 27* zeigt. Allerdings werden im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 300 Hz noch bewertete Schalldämmmaße von ca. 10 dB erreicht, wodurch für Immissionsorte im Nahbereich von Bühnen, die außerhalb der Hauptabstrahlrichtung liegen, wirksame Pegelminderungen auch in diesem Spektralbereich erreicht werden können. Die rückwärtige und seitliche Verkleidung von Bühnen kann natürlich auch mit einfachen, aber schwereren Materialien, z.B. Spanplatten ausgeführt werden. Diese sollten mindestens 16 mm dick sein und möglichst in voller Höhe angebracht werden.



Abbildung 28: Beispielansichten mobiler Schallschutzwände; links: Ceno Wall (Foto: Sattler Global/Ceno Tec), rechts: Cisilent (Foto: Calenberg Ingenieure)

In Hauptabstrahlrichtung der Bühne wäre allerdings der Einsatz abschirmender Wände erst hinter den entferntesten Publikumsbereichen möglich. Aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten muss für eine nennenswerte Einfügungsdämpfung die Oberkante des Schallschirmes deutlich über der Verbindungslinie Schallquelle-Empfangsort liegen. Eine wirksame Abschirmung ist dann aufgrund der geometrischen Bedingungen nur in wenigen Sonderfällen möglich, wenn der Immissionsort in geringer Höhe (Erdgeschoss) nahe an der Veranstaltungsfläche liegt.

Eine weitere Möglichkeit für die Einhausung von Bühnen stellen Schallschutzvorhänge dar. Diese mehrlagigen Stoffauskleidungen erreichen Schalldämm-Maße R_w von bis zu 18 dB und liegen somit in den Dimensionen der genannten Lärmschutzwände. Die Frequenzverläufe der Schalldämmung sind ähnlich wie die in Abbildung 27 dargestellten mit einer relativ geringen Wirkung im Tieftonbereich.

Je nach Quellspektrum ist mit möglichen Pegelminderungen von ca. 8...15 dB durch die genannten Maßnahmen zur Bühneneinhausung zu rechnen.

8 Ausblick

Die Ergebnisse der SFLS wurden im vorliegenden Bericht aktualisiert. Für Freiluftbühnen und Freilichtkinos konnte aus einer Vielzahl von Messungen ein großer Datensatz gewonnen werden, sodass die daraus abgeleiteten Kenngrößen als gesichert angesehen werden können. Die Prognosealgorithmen wurden neu aufgesetzt und weisen unter anderem durch die teils genrespezifische Betrachtung eine hohe statistische Sicherheit für die Vorhersage von Schalleistungspegeln auf.

Die verwendete Untersuchungsmethodik zur Ableitung des Quell-Schalleistungspegels aus den gemessenen Mittelungspegeln beruht auf der Annahme, dass es sich bei den untersuchten Schallstrahlern um Punktschallquellen handelt. Dies trifft auf einzelne Lautsprecher, wie sie noch häufig bei Kleinbühnen und Freilichtkinos eingesetzt werden, in guter Näherung zu. Für Line Arrays gilt diese Annahme nur im sogenannten Fernfeld (zur Ausdehnung: siehe Abschnitt 3), so dass sich für entferntere Immissionsorte mit dem hergeleiteten Punktschallquellen-Ansatz relativ sichere Prognosen treffen lassen. Für Konzerte auf Großbühnen ist es allerdings häufig notwendig, schon im Vorfeld die Pegeldifferenz zwischen maßgeblichem Immissionsort und einem bühnenahen Referenzort (vorzugsweise am FOH) zu kennen, damit dort ein kontrollierbarer Pegelrichtwert festgelegt werden kann, der zur Einhaltung zulässiger Immissionsrichtwerte nicht überschritten werden darf. Die FOH-Plätze befinden sich häufig im Nahfeld der Line Arrays, so dass bei der Bestimmung der Pegeldifferenz aus dem einfachen Punktschallquellenansatz systematische Fehler resultieren können. Zur Lösung dieses Problems wurden von verschiedenen Herstellern in jüngster Zeit Softwaretools entwickelt, bei denen Schallenergieanteile nicht energetisch, sondern komplex überlagert werden. Somit können Line Arrays auch im Nahfeld modelliert werden. Auch die Effekte von Frequenz- oder Phasengangmodellierung, die einige Hersteller anbieten, können somit in die Prognose einfließen. Die Entwicklung dieser Programme steht allerdings erst am Anfang und muss sich noch bei den Lautsprecherherstellern etablieren.

Weitere Abweichungen des Datensatzes können dadurch auftreten, dass einige der untersuchten Veranstaltungsorte bezüglich des zulässigen Schalldruckpegels durch Auflagen stark reglementiert waren. Um Abweichungen in der Prognose auszuschließen wurden die betreffenden Versorgungspegel eher zur sicheren Seite hin (also höher) angesetzt. Entsprechend wurde auch die Unterteilung der Genrekategorien gewählt.

Es ist zu erwarten, dass sich der Trend, den die aktuellen Kenngrößen zeigen, in den nächsten Jahren fortführen wird. Beschallungsanlagen weisen (auch für kleine Veranstaltungen) immer höhere Leistungen auf, sind dabei aber immer besser auf das Versorgungsgebiet abgestimmt. Hier liegt auch die größte Möglichkeit des Immissionsschutzes. Pegelmindernde Maßnahmen sollten dabei immer „von der Schallquelle“ „zum Immissionsort“ betrachtet werden. Vor dem Installieren von Schallschutzelementen sollte also vorerst versucht werden eine gezielte Beschallung zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- AFMG. (2009). *Rechenprogramm EASE SpeakerLab, Version 1.1.*
- d&b. (2017). *Rechenprogramm NoizCalc, Version 1.0.*
- d&b. (2018). *Rechenprogramm ArrayCalc, Version 10.2.2.*
- DIN 45641. (Juni 1990). *Mittelung von Schallpegeln.*
- DIN 45645-1. (Juli 1996). *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft.*
- DIN EN 61672-1. (Juli 2014). *Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013.*
- DIN ISO 9613-2. (1999). *Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren.*
- Förster & Wolgast. (2017). *Messergebnisse Freilichtbühne und Open Air Kino.* Chemnitz. *Freizeitlärmrichtlinie; Stand 06.03.2015.* (Länderausschuss für Immissionsschutz).
- Mike Rauchfleisch. (Oktober 2017). *Praxis Bass-Anwendung: Der Bass, das Rudeltier.* *Production Partner - Fachmagazin für Veranstaltungstechnik*, S. 30-34.
- Roy, Axel; Zschaler, Hartmut. (2013). *Open Air Cinema Arrangement with Minimized Noise Emission.* Meran: DAGA 2013.
- Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm). (1998).
- SFLS. (2006). *Sächsische Freizeitlärmstudie*, 14 - 25. Dresden.
- SoundPLAN. (2017). *Rechenprogramm SoundPLAN 8.0.*
- VDI 2714. (1988). *Schallausbreitung im Freien.* Berlin: Verein Deutscher Ingenieure.
- VDI 3770. (2012). *Emissionskennwerte von Schallquellen: Sport- und Freizeitanlagen*, 65 - 72. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure.
- Wölfel Engineering GmbH. (2017). *Rechenprogramm IMMI, Version 2.17.*

Anhang I – Lautsprecheranordnungen bei modernen Beschallungsanlagen

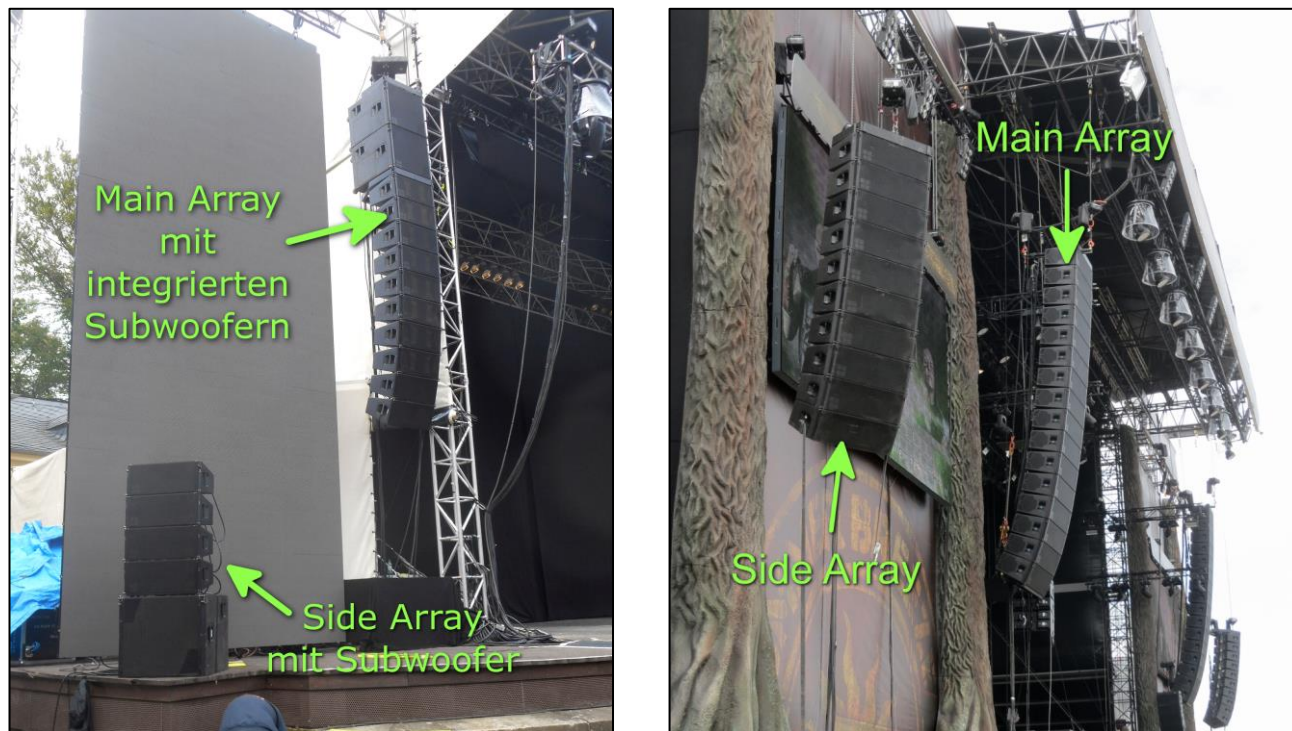


Abbildung 29: Verschiedene Lautsprechercluster an Großbühnen



Abbildung 30: Subwoofer in gekrümmter Zahnlücken-Anordnung mit Front Fills an einer Großbühne



Abbildung 31: Gestackte Subwoofer in End-Fire-Anordnung (links und rechts der Bühne) an einer Großbühne

Anhang II – Berechnung der Ausbreitungsdämpfung nach DIN ISO 9613-2

Im Folgenden wird die Berechnung der Ausbreitungsdämpfung nach DIN ISO 9613-2 aufgezeigt, wie sie im vorliegenden Bericht für das überschlägige Verfahren zur Ermittlung von Immissions-Pegeln (siehe Abschnitt 6.3) bzw. Schalleistungspegeln (ab Abschnitt 2.3) vollzogen wurde.

In DIN ISO 9613-2 ist die zu erwartende Ausbreitungsdämpfung A (im vorliegenden Bericht D) definiert:

$$D = D_{\text{div}} + D_{\text{atm}} + D_{\text{gr}} + D_{\text{bar}} + D_{\text{misc}} \quad (14)$$

D_{div}	Dämpfungsmaß für die geometrische Ausbreitung, in dB
D_{atm}	Dämpfungsmaß für Luftabsorption, in dB
D_{gr}	Dämpfungsmaß für den Bodeneffekt, in dB
D_{bar}	Dämpfungsmaß für Abschirmung, in dB
D_{misc}	Dämpfungsmaß für verschiedene Effekte, in dB

Beim überschlägigen Verfahren gemäß Abschnitt 6.3 ist nicht in Oktaven, sondern mit Summenpegeln zu rechnen. Dies erfordert unter anderem die Anpassung einiger Berechnungsterme. Das Dämpfungsmaß für die geometrische Ausbreitung D_{div} ergibt sich nach DIN ISO 9613-2 zu:

$$D_{\text{div}} = [20 \cdot \lg s_m + 11] \text{ dB} \quad (15)$$

s_m Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort, in m

Dabei ist zu beachten das nicht der auf die Bodenebene projizierte ($s_{m,p}$), sondern der direkte Abstand von der Mitte des Lautsprecherclusters zum Immissionsort (s_m) einzusetzen ist.

Bei der Ermittlung der Dämpfung durch Luftabsorption wird von einem mittleren Luftdämpfungskoeffizienten $\alpha = 5,0$ dB pro 1000 m ausgegangen. Dieser ist in Anlehnung an den Wert α für 1000 Hz (20°C, 70% r. F.) festgelegt. Der Term D_{atm} ergibt sich folglich zu:

$$D_{\text{atm}} = 5 \text{ dB} \cdot s_m / 1000 \quad (16)$$

s_m Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort, in m

Zur Berechnung des Bodeneffekts ist zuerst die mittlere Höhe über Grund h_m zu ermitteln. Hierzu ist in DIN ISO 9613-2 definiert:

$$h_m = A_m / s_m \quad (17)$$

A_m Fläche, die sich zwischen der Sichtlinie von Lautsprechercluster und Immissionsort (s_m) und dem Bodenprofil ergibt, in m^2
 s_m Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort, in m

Das genaue Bodenprofil ist allerdings meist nicht gegeben. Somit wird ein vereinfachtes Modell verwendet.

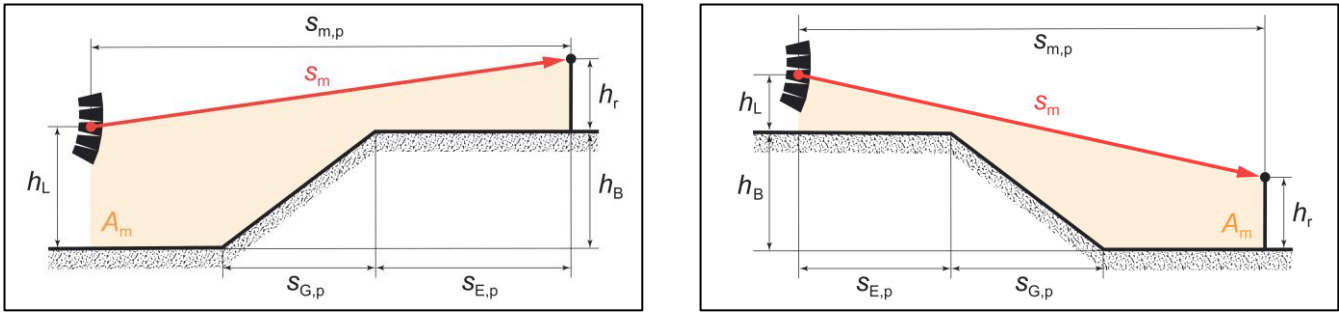


Abbildung 32: Parameter zur Ermittlung der mittleren Höhe über Grund

Maßgeblich ist der Basisversatz zwischen dem Immissionsort und der Schallquelle h_B . Dieser Wert kann positive Werte oder 0 annehmen. Das Bodenprofil wird zudem durch die auf die Bodenebene projizierte Entfernung, die der Schall über Gefälle ($s_{G,p}$) bzw. über die höher oder tiefer liegende Ebene ($s_{E,p}$) zurücklegt, bestimmt.²⁹ Für die mittlere Höhe über Grund h_m ergibt sich so:

$$h_m = \left[\frac{1}{2} \cdot (h_L + h_r + h_B) \cdot s_{m,p} - \frac{1}{2} \cdot h_B \cdot s_{G,p} - h_B \cdot s_{E,p} \right] / s_m \quad (18)$$

- h_L mittlere Höhe des Lautsprecherclusters, in m
- h_r Höhe des Immissionsortes, in m
- h_B Basisversatz zwischen Immissionsort und Lautsprechercluster, in m
- s_m Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort, in m
- $s_{m,p}$ Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort auf die Bodenebene projiziert, in m
- $s_{G,p}$ Entfernung, die Schall über Gefälle zurücklegt, auf die Bodenebene projiziert, in m
- $s_{E,p}$ Entfernung, die Schall über höher bzw. tiefer liegende Ebene zurücklegt, auf die Bodenebene projiziert, in m

Anschließend ist das Dämpfungsmaß für den Bodeneffekt D_{gr} mithilfe des „alternativen Verfahrens“ aus DIN ISO 9613-2 zu berechnen:

$$D_{gr} = \left[\underline{4,8 - \left(\frac{2 \cdot h_m}{s_m} \right) \cdot \left(17 + \frac{300}{s_m} \right)} \right] - 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{s_{m,p}^2 + (h_L - h_r)^2}{s_{m,p}^2 + (h_L + h_r)^2} \right] \text{ dB} \quad (19)$$

- h_m mittlere Höhe über Grund, in m
- h_L mittlere Höhe des Lautsprecherclusters, in m
- h_r Höhe des Immissionsortes, in m
- s_m Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort, in m
- $s_{m,p}$ Entfernung vom Lautsprechercluster zum Immissionsort auf die Bodenebene projiziert, in m

Negative Werte des unterstrichenen Terms sind dabei gleich Null zu setzen. Der zweite Term entspricht D_Ω nach DIN ISO 9613-2 und beschreibt die Pegelerhöhung aufgrund von Bodenreflexionen.

Die weiteren Dämpfungen durch Abschirmung (D_{bar}) und andere Effekte (D_{misc}) sind gegebenenfalls nach den Berechnungsvorschriften in DIN ISO 9613-2 zu ermitteln. Auf diese wird hier nicht weiter eingegangen.

Bei unterschiedlichen Entfernungen zu den Einzelquellen müssen die Ausbreitungsdämpfungen für jedes Cluster einzeln betrachtet werden.

²⁹ Die Werte $s_{G,p}$ und $s_{E,p}$ können auch jeweils 0 annehmen. So können „Sprünge“ bzw. dauerhaftes Gefälle im Bodenprofil berücksichtigt werden.

Anhang III – Wertetabellen

Tabelle 8: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für gestackte bzw. niedrig geflogene Anordnungen, horizontal, oktavweise

Mittleres Richtwirkungsmaß $\overline{D}_1[0]$, horizontal, oktavweise								
Winkel	63 Hz /dB	125 Hz /dB	250 Hz /dB	500 Hz /dB	1000 Hz /dB	2000 Hz /dB	4000 Hz /dB	8000 Hz /dB
0°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4
10°	0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,1	0,0
20°	-0,2	-0,2	-0,5	-1,1	-1,7	-1,6	-0,5	-0,3
30°	-0,3	-0,4	-1,0	-2,4	-2,9	-2,6	-1,1	-1,0
40°	-0,5	-0,7	-1,8	-3,9	-3,8	-4,2	-2,6	-3,4
50°	-0,8	-1,1	-2,7	-5,5	-4,7	-5,0	-3,9	-5,7
60°	-1,1	-1,4	-3,7	-7,2	-6,0	-5,7	-6,3	-9,1
70°	-1,3	-1,8	-4,7	-8,7	-7,6	-6,8	-7,7	-11,9
80°	-1,4	-2,1	-5,7	-9,9	-9,2	-8,3	-9,6	-15,0
90°	-1,5	-2,3	-6,6	-10,4	-10,6	-10,0	-12,2	-19,6
100°	-1,6	-2,5	-7,2	-11,2	-11,7	-11,7	-14,5	-23,6
110°	-1,7	-2,5	-7,6	-12,2	-13,0	-13,3	-18,0	-27,8
120°	-1,6	-2,5	-7,7	-12,5	-13,6	-15,8	-21,8	-29,7
130°	-1,5	-2,3	-7,6	-12,5	-14,4	-19,3	-24,3	-32,1
140°	-1,3	-2,1	-7,1	-12,1	-16,2	-21,1	-25,2	-31,8
150°	-1,2	-1,9	-6,3	-11,7	-17,3	-21,2	-26,2	-33,6
160°	-1,1	-1,7	-5,5	-11,4	-17,9	-23,4	-27,3	-33,0
170°	-1,0	-1,5	-4,8	-9,9	-17,3	-24,3	-28,1	-35,0
180°	-1,2	-1,4	-4,4	-9,2	-16,6	-23,4	-29,0	-35,6
190°	-1,0	-1,5	-4,8	-9,9	-17,3	-24,3	-28,1	-35,0
200°	-1,1	-1,7	-5,5	-11,4	-17,9	-23,4	-27,3	-33,0
210°	-1,2	-1,9	-6,3	-11,7	-17,3	-21,2	-26,2	-33,6
220°	-1,3	-2,1	-7,1	-12,1	-16,2	-21,1	-25,2	-31,8
230°	-1,5	-2,3	-7,6	-12,5	-14,4	-19,3	-24,3	-32,1
240°	-1,6	-2,5	-7,7	-12,5	-13,6	-15,8	-21,8	-29,7
250°	-1,7	-2,5	-7,6	-12,2	-13,0	-13,3	-18,0	-27,8
260°	-1,6	-2,5	-7,2	-11,2	-11,7	-11,7	-14,5	-23,6
270°	-1,5	-2,3	-6,6	-10,4	-10,6	-10,0	-12,2	-19,6
280°	-1,4	-2,1	-5,7	-9,9	-9,2	-8,3	-9,6	-15,0
290°	-1,3	-1,8	-4,7	-8,7	-7,6	-6,8	-7,7	-11,9
300°	-1,1	-1,4	-3,7	-7,2	-6,0	-5,7	-6,3	-9,1
310°	-0,8	-1,1	-2,7	-5,5	-4,7	-5,0	-3,9	-5,7
320°	-0,5	-0,7	-1,8	-3,9	-3,8	-4,2	-2,6	-3,4
330°	-0,3	-0,4	-1,0	-2,4	-2,9	-2,6	-1,1	-1,0
340°	-0,2	-0,2	-0,5	-1,1	-1,7	-1,6	-0,5	-0,3
350°	0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,1	0,0

Tabelle 9: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für gestackte bzw. niedrig geflogene Anordnungen, vertikal, oktavweise

Mittleres Richtwirkungsmaß $\bar{D}_1[0]$, vertikal, oktavweise								
Winkel	63 Hz /dB	125 Hz /dB	250 Hz /dB	500 Hz /dB	1000 Hz /dB	2000 Hz /dB	4000 Hz /dB	8000 Hz /dB
0°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4
10°	-0,1	-0,1	-0,5	-1,7	-5,7	-11,6	-16,2	-13,7
20°	-0,4	-0,5	-1,8	-6,1	-12,6	-17,1	-14,3	-15,7
30°	-0,5	-1,0	-3,7	-10,8	-16,8	-14,9	-18,0	-18,8
40°	-0,8	-1,7	-6,1	-13,9	-18,6	-17,0	-19,0	-21,0
50°	-1,1	-2,4	-8,5	-15,8	-19,9	-18,5	-21,5	-25,0
60°	-1,4	-3,1	-10,7	-18,0	-20,4	-19,6	-24,1	-26,6
70°	-1,6	-3,6	-12,4	-20,1	-20,3	-21,7	-25,7	-28,5
80°	-1,9	-4,1	-13,7	-21,5	-20,8	-23,9	-28,4	-32,6
90°	-2,1	-4,4	-14,4	-22,4	-22,1	-25,9	-31,8	-36,6
100°	-2,2	-4,5	-14,8	-22,9	-24,1	-27,4	-33,5	-38,9
110°	-2,1	-4,3	-14,6	-22,6	-26,9	-28,3	-33,8	-39,9
120°	-1,9	-4,0	-13,7	-22,1	-29,0	-29,6	-35,5	-39,5
130°	-1,7	-3,5	-12,3	-21,7	-30,9	-30,3	-36,3	-40,9
140°	-1,6	-3,0	-10,4	-21,7	-32,2	-31,3	-36,4	-39,9
150°	-1,5	-2,4	-8,3	-20,1	-30,8	-32,1	-35,9	-40,9
160°	-1,3	-1,9	-6,3	-15,4	-28,5	-38,0	-34,7	-40,5
170°	-1,1	-1,5	-4,8	-11,2	-22,7	-33,8	-41,0	-39,5
180°	-1,2	-1,4	-4,4	-9,2	-16,6	-23,4	-29,0	-35,6
190°	-1,1	-1,5	-5,0	-11,8	-23,5	-34,5	-41,6	-39,0
200°	-1,3	-1,9	-6,6	-17,0	-30,2	-37,4	-34,1	-39,2
210°	-1,5	-2,4	-8,6	-21,4	-31,9	-31,9	-34,9	-38,8
220°	-1,6	-3,0	-10,8	-21,5	-30,9	-31,4	-36,2	-39,6
230°	-1,6	-3,5	-12,7	-22,0	-30,0	-29,8	-36,0	-40,6
240°	-1,8	-4,0	-14,1	-22,5	-28,4	-29,1	-34,3	-39,9
250°	-2,0	-4,2	-14,9	-22,4	-26,2	-27,1	-32,7	-39,9
260°	-2,0	-4,4	-14,9	-22,2	-23,0	-25,7	-31,6	-39,0
270°	-2,0	-4,3	-14,3	-21,6	-20,9	-24,5	-29,7	-35,0
280°	-1,7	-4,0	-13,2	-20,5	-19,7	-22,7	-26,8	-31,4
290°	-1,4	-3,5	-11,9	-18,7	-19,5	-20,5	-23,9	-27,7
300°	-1,2	-2,8	-10,2	-16,2	-19,9	-18,2	-22,3	-26,3
310°	-0,9	-2,1	-8,1	-13,9	-18,7	-16,9	-21,2	-23,0
320°	-0,6	-1,5	-5,6	-11,8	-17,2	-16,0	-19,4	-20,1
330°	-0,3	-0,9	-3,2	-9,5	-14,9	-13,8	-16,7	-17,6
340°	-0,3	-0,3	-1,4	-5,0	-10,6	-15,0	-13,5	-15,4
350°	-0,1	-0,1	-0,3	-1,0	-4,3	-8,7	-11,1	-10,6

Tabelle 10: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für hoch geflogene Anordnungen, horizontal, oktavweise

Mittleres Richtwirkungsmaß $\overline{D}_1[0]$, horizontal, oktavweise								
Winkel	63 Hz /dB	125 Hz /dB	250 Hz /dB	500 Hz /dB	1000 Hz /dB	2000 Hz /dB	4000 Hz /dB	8000 Hz /dB
0°	-0,2	-0,8	-1,7	-2,2	-1,4	-0,4	-0,3	-1,7
10°	-0,4	-0,9	-1,8	-2,4	-1,8	-0,4	-0,5	-0,7
20°	-0,5	-1,1	-2,3	-3,4	-3,1	-1,1	-1,2	0,0
30°	-0,6	-1,4	-3,1	-4,9	-5,0	-2,5	-2,5	-0,9
40°	-1,0	-1,9	-4,0	-6,8	-7,2	-4,1	-3,8	-2,4
50°	-1,5	-2,5	-5,1	-8,7	-8,9	-5,7	-5,8	-5,3
60°	-1,5	-3,2	-6,2	-10,5	-9,8	-7,3	-7,6	-8,2
70°	-2,2	-3,8	-7,3	-12,4	-11,6	-7,9	-9,0	-10,4
80°	-2,6	-4,5	-8,4	-13,2	-11,7	-8,5	-11,2	-13,8
90°	-2,9	-5,2	-9,2	-13,7	-11,3	-8,5	-11,8	-17,4
100°	-3,0	-5,7	-9,7	-14,2	-12,5	-8,3	-11,1	-19,2
110°	-3,8	-6,1	-10,0	-15,0	-14,3	-12,9	-17,5	-25,2
120°	-3,7	-6,4	-10,1	-15,9	-16,6	-17,0	-22,5	-29,7
130°	-4,3	-6,5	-10,0	-16,2	-18,5	-20,4	-25,4	-31,5
140°	-3,7	-6,2	-9,7	-16,1	-20,0	-22,1	-26,4	-32,6
150°	-3,9	-5,7	-9,0	-16,3	-22,3	-22,2	-27,9	-33,2
160°	-3,2	-5,2	-8,2	-16,0	-23,1	-23,8	-27,6	-32,5
170°	-3,2	-4,9	-7,5	-14,7	-22,0	-24,7	-30,0	-35,1
180°	-3,2	-4,7	-7,3	-13,9	-20,9	-24,1	-29,0	-34,5
190°	-3,2	-4,9	-7,5	-14,7	-22,0	-24,7	-30,0	-35,1
200°	-3,2	-5,2	-8,2	-16,0	-23,1	-23,8	-27,6	-32,5
210°	-3,9	-5,7	-9,0	-16,3	-22,3	-22,2	-27,9	-33,2
220°	-3,7	-6,2	-9,7	-16,1	-20,0	-22,1	-26,4	-32,6
230°	-4,3	-6,5	-10,0	-16,2	-18,5	-20,4	-25,4	-31,5
240°	-3,7	-6,4	-10,1	-15,9	-16,6	-17,0	-22,5	-29,7
250°	-3,8	-6,1	-10,0	-15,0	-14,3	-12,9	-17,5	-25,2
260°	-3,0	-5,7	-9,7	-14,2	-12,5	-8,3	-11,1	-19,2
270°	-2,9	-5,2	-9,2	-13,7	-11,3	-8,5	-11,8	-17,4
280°	-2,6	-4,5	-8,4	-13,2	-11,7	-8,5	-11,2	-13,8
290°	-2,2	-3,8	-7,3	-12,4	-11,6	-7,9	-9,0	-10,4
300°	-1,5	-3,2	-6,2	-10,5	-9,8	-7,3	-7,6	-8,2
310°	-1,5	-2,5	-5,1	-8,7	-8,9	-5,7	-5,8	-5,3
320°	-1,0	-1,9	-4,0	-6,8	-7,2	-4,1	-3,8	-2,4
330°	-0,6	-1,4	-3,1	-4,9	-5,0	-2,5	-2,5	-0,9
340°	-0,5	-1,1	-2,3	-3,4	-3,1	-1,1	-1,2	0,0
350°	-0,4	-0,9	-1,8	-2,4	-1,8	-0,4	-0,5	-0,7

Tabelle 11: Aus Simulation an fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß für hoch geflogene Anordnungen, vertikal, oktavweise

Mittleres Richtwirkungsmaß $\overline{D}_1[0]$, vertikal, oktavweise								
Winkel	63 Hz /dB	125 Hz /dB	250 Hz /dB	500 Hz /dB	1000 Hz /dB	2000 Hz /dB	4000 Hz /dB	8000 Hz /dB
0°	-0,2	-0,8	-1,7	-2,2	-1,4	-0,4	-0,3	-1,7
10°	-0,7	-3,0	-6,4	-11,0	-12,7	-12,7	-9,2	-8,3
20°	-2,0	-5,7	-11,6	-16,2	-18,1	-13,4	-12,6	-11,8
30°	-3,4	-8,4	-16,0	-19,5	-20,7	-12,9	-14,7	-15,0
40°	-5,1	-10,8	-18,7	-22,2	-21,5	-14,9	-17,1	-17,0
50°	-6,6	-12,9	-21,1	-24,0	-22,1	-17,2	-18,9	-19,6
60°	-7,5	-14,6	-22,7	-26,4	-22,3	-19,9	-21,0	-22,7
70°	-8,5	-16,0	-23,7	-27,9	-24,0	-21,8	-21,6	-25,0
80°	-9,1	-17,0	-24,5	-29,1	-25,8	-24,7	-23,8	-29,0
90°	-9,2	-17,5	-24,9	-30,2	-27,1	-25,9	-26,5	-33,0
100°	-9,2	-17,4	-25,1	-30,6	-29,8	-26,8	-28,6	-35,2
110°	-9,1	-16,7	-25,4	-30,6	-31,8	-27,1	-30,6	-34,7
120°	-8,5	-15,6	-24,9	-30,2	-31,7	-29,2	-31,3	-35,6
130°	-7,6	-13,9	-23,1	-30,5	-32,7	-29,9	-32,0	-35,6
140°	-6,0	-11,7	-20,4	-27,8	-36,4	-28,7	-31,5	-35,8
150°	-4,3	-8,9	-15,1	-25,9	-33,4	-31,9	-30,8	-34,5
160°	-3,1	-6,0	-12,1	-20,8	-27,4	-31,9	-31,0	-34,9
170°	-2,9	-4,4	-6,9	-14,6	-23,8	-28,5	-33,4	-35,2
180°	-3,2	-4,7	-7,3	-13,9	-20,9	-24,1	-29,0	-34,5
190°	-3,5	-6,5	-12,5	-22,6	-33,3	-34,8	-32,1	-34,8
200°	-4,3	-9,3	-17,7	-28,7	-34,9	-31,6	-31,3	-34,7
210°	-6,3	-12,2	-22,1	-29,5	-33,9	-27,9	-32,2	-34,8
220°	-7,7	-14,5	-24,6	-30,4	-31,6	-28,1	-32,1	-35,3
230°	-8,4	-15,8	-25,6	-30,7	-30,1	-27,0	-30,1	-34,2
240°	-8,9	-16,2	-25,1	-30,2	-29,0	-25,2	-28,5	-34,6
250°	-8,8	-16,4	-24,3	-28,8	-27,1	-24,2	-26,0	-32,0
260°	-8,5	-16,0	-23,3	-27,4	-24,5	-23,2	-23,7	-28,7
270°	-8,5	-15,1	-22,1	-25,8	-22,9	-21,8	-20,8	-25,9
280°	-7,9	-13,9	-20,8	-23,9	-21,8	-18,7	-20,4	-22,2
290°	-7,0	-12,3	-19,2	-21,5	-20,9	-16,9	-18,7	-19,5
300°	-5,7	-10,6	-17,2	-19,6	-20,5	-15,1	-16,7	-16,2
310°	-3,8	-8,7	-14,8	-17,1	-18,0	-12,2	-14,8	-15,2
320°	-2,1	-6,6	-12,0	-13,6	-14,5	-9,9	-10,9	-11,1
330°	-1,0	-4,0	-7,6	-10,5	-9,5	-8,4	-6,5	-6,8
340°	0,0	-1,1	-3,8	-6,2	-5,4	-4,5	-3,6	-3,6
350°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2

Tabelle 12: Aus Simulation an jeweils fünf Line Arrays bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß im Vergleich zu den Werten der SFLS 2006 für Punktstrahler, breitbandig

Mittleres Richtwirkungsmaß \overline{D}_1 , breitbandig					
Winkel	■ gestackte bzw. niedrig geflogene Line Arrays (2018)		■ hoch geflogene Line Arrays (2018)		■ Punktstrahler (2006)
	horizontal /dB	vertikal /dB	horizontal /dB	vertikal /dB	rotationssym. /dB
0°	0,0	0,0	-1,3	-1,3	0,0
10°	-0,3	-3,7	-1,5	-8,9	-1,2
20°	-1,1	-6,7	-2,2	-12,0	-2,4
30°	-2,0	-9,1	-3,5	-13,7	-3,6
40°	-3,2	-10,9	-4,9	-15,5	-4,8
50°	-4,3	-12,3	-6,4	-16,5	-6,1
60°	-5,5	-13,4	-7,6	-17,9	-7,5
70°	-6,7	-14,4	-8,6	-19,7	-8,9
80°	-7,8	-15,3	-9,2	-21,0	-10,2
90°	-8,9	-15,9	-9,4	-21,7	-11,6
100°	-9,7	-16,2	-9,7	-22,0	-12,6
110°	-10,4	-16,2	-11,6	-22,0	-13,6
120°	-11,0	-16,0	-12,5	-21,2	-14,6
130°	-11,3	-15,5	-13,1	-20,7	-15,6
140°	-11,4	-14,8	-13,0	-19,1	-15,3
150°	-11,2	-13,7	-13,0	-16,9	-15,0
160°	-10,8	-12,4	-12,8	-14,7	-14,7
170°	-10,2	-10,9	-12,6	-12,1	-14,4
180°	-9,7	-9,7	-12,5	-12,5	-14,2
190°	-10,2	-11,1	-12,6	-15,2	-14,4
200°	-10,8	-12,6	-12,8	-17,5	-14,7
210°	-11,2	-13,9	-13,0	-19,5	-15,0
220°	-11,4	-14,8	-13,0	-20,7	-15,3
230°	-11,3	-15,4	-13,1	-20,9	-15,6
240°	-11,0	-16,0	-12,5	-21,1	-14,6
250°	-10,4	-16,1	-11,6	-20,7	-13,6
260°	-9,7	-16,0	-9,7	-19,8	-12,6
270°	-8,9	-15,6	-9,4	-18,9	-11,6
280°	-7,8	-14,9	-9,2	-17,5	-10,2
290°	-6,7	-14,1	-8,6	-15,9	-8,9
300°	-5,5	-12,9	-7,6	-14,8	-7,5
310°	-4,3	-11,8	-6,4	-12,9	-6,1
320°	-3,2	-10,4	-4,9	-10,4	-4,8
330°	-2,0	-8,5	-3,5	-7,6	-3,6
340°	-1,1	-6,0	-2,2	-4,3	-2,4
350°	-0,3	-2,8	-1,5	0,0	-1,2

Tabelle 13: Aus Simulation an jeweils sechs Subwoofern bestimmtes, mittleres Richtwirkungsmaß, rotationssymmetrisch

Mittleres Richtwirkungsmaß $\overline{D}_1[0]$, rotationssymmetrisch, oktavweise						
	omnidirektionale Subwoofer			Cardioid-Subwoofer		
Winkel	31,5 Hz /dB	63 Hz /dB	125 Hz /dB	31,5 Hz /dB	63 Hz /dB	125 Hz /dB
0°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10°	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
20°	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4
30°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,7	-0,6	-0,9
40°	-0,5	-0,8	-1,2	-1,0	-1,1	-1,5
50°	-0,9	-1,2	-1,8	-1,6	-1,7	-2,2
60°	-1,0	-1,6	-2,4	-2,4	-2,4	-2,9
70°	-1,4	-2,0	-3,1	-3,2	-3,3	-3,7
80°	-1,6	-2,4	-3,8	-4,2	-4,3	-4,7
90°	-2,0	-2,8	-4,6	-5,3	-5,5	-6,1
100°	-2,3	-3,1	-5,2	-6,7	-7,0	-7,7
110°	-2,4	-3,3	-5,7	-8,1	-8,8	-9,4
120°	-2,5	-3,4	-5,9	-9,5	-10,8	-10,2
130°	-2,8	-3,5	-5,9	-10,7	-13,0	-11,0
140°	-2,9	-3,6	-5,6	-12,0	-14,3	-11,3
150°	-3,0	-3,5	-5,3	-12,4	-13,8	-10,5
160°	-3,1	-3,5	-5,0	-12,6	-12,8	-9,3
170°	-3,3	-3,5	-4,8	-12,7	-12,1	-8,5
180°	-3,0	-3,4	-4,6	-12,1	-11,8	-7,9
190°	-3,3	-3,4	-4,7	-12,7	-12,1	-8,5
200°	-3,1	-3,5	-5,0	-12,6	-12,8	-9,4
210°	-3,0	-3,5	-5,2	-12,5	-13,8	-10,6
220°	-2,9	-3,5	-5,5	-12,0	-14,3	-11,3
230°	-2,7	-3,4	-5,7	-10,7	-13,0	-11,0
240°	-2,5	-3,3	-5,7	-9,5	-10,8	-10,3
250°	-2,4	-3,2	-5,5	-8,2	-8,8	-9,5
260°	-2,3	-3,0	-5,0	-6,7	-7,0	-7,7
270°	-2,0	-2,7	-4,4	-5,4	-5,6	-6,1
280°	-1,6	-2,3	-3,7	-4,2	-4,4	-4,8
290°	-1,4	-1,9	-2,9	-3,2	-3,3	-3,8
300°	-1,0	-1,5	-2,2	-2,4	-2,5	-3,0
310°	-0,9	-1,1	-1,6	-1,7	-1,7	-2,2
320°	-0,5	-0,7	-1,1	-1,1	-1,1	-1,5
330°	-0,4	-0,4	-0,6	-0,7	-0,6	-1,0
340°	-0,3	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,5
350°	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2

Tabelle 14: Terzpegel-Korrekturwerte für Freiluftbühnen

Terzpegel-Korrekturwert $D_f^0[T]$ /dB für den A-bewerteten Summenpegel				
Frequenz	Großbühnen	Kleinbühnen Rock/Pop	Kleinbühnen Klassik/Jazz/Welt	Moderation & Musik
25 Hz	-63,0	-70,8	-74,3	-71,0
31,5 Hz	-42,5	-57,7	-62,5	-61,9
40 Hz	-26,7	-43,1	-51,3	-56,2
50 Hz	-21,0	-29,0	-42,1	-43,0
63 Hz	-19,4	-24,3	-35,5	-32,4
80 Hz	-20,4	-21,1	-31,0	-35,8
100 Hz	-21,8	-17,9	-27,6	-28,0
125 Hz	-21,7	-17,6	-25,7	-27,9
160 Hz	-20,0	-16,7	-22,7	-23,2
200 Hz	-17,2	-15,4	-20,4	-24,6
250 Hz	-15,8	-16,0	-19,3	-17,1
315 Hz	-14,1	-13,9	-16,0	-17,0
400 Hz	-13,7	-12,6	-14,2	-23,0
500 Hz	-10,4	-10,0	-10,7	-13,5
630 Hz	-9,0	-8,7	-9,9	-12,5
800 Hz	-9,2	-9,0	-9,0	-5,5
1000 Hz	-10,7	-10,7	-9,7	-9,6
1250 Hz	-10,1	-11,0	-8,4	-11,0
1600 Hz	-10,8	-12,3	-9,4	-10,5
2000 Hz	-12,0	-13,1	-11,0	-11,1
2500 Hz	-13,3	-12,7	-12,0	-12,1
3150 Hz	-15,3	-15,0	-13,9	-11,7
4000 Hz	-16,5	-15,6	-16,5	-14,7
5000 Hz	-16,9	-17,3	-19,6	-18,2
6300 Hz	-18,5	-19,6	-22,5	-20,6
8000 Hz	-19,6	-22,5	-26,2	-21,8
10000 Hz	-22,1	-25,8	-30,4	-22,2
12500 Hz	-25,8	-30,8	-36,9	-27,0
16000 Hz	-30,3	-36,2	-42,7	-28,9
20000 Hz	-35,7	-43,1	-49,0	-32,5

Tabelle 15: Terzpegel-Korrekturwerte für Freiluftbühnen, Einzelquellen

Terzpegel-Korrekturwert $D_f^0 [T]$ /dB für den A-bewerteten Summenpegel für Einzelquellen (Subwoofer, Line Arrays)								
Frequenz	Großbühnen		Kleinbühnen Rock/Pop		Kleinbühnen Klassik/Jazz/Welt		Moderation & Musik	
	Subwoofer	Mittel-/Hochtöner	Subwoofer	Mittel-/Hochtöner	Subwoofer	Mittel-/Hochtöner	Subwoofer	Mittel-/Hochtöner
25 Hz	-63,0	-99,0	-70,8	-99,0	-74,3	-99,0	-71,0	-99,0
31,5 Hz	-42,5	-86,9	-57,7	-80,9	-62,5	-86,9	-61,9	-84,4
40 Hz	-26,7	-69,9	-43,2	-63,9	-51,4	-69,9	-56,6	-67,4
50 Hz	-21,0	-54,4	-29,1	-48,4	-42,4	-54,4	-43,6	-51,9
63 Hz	-19,5	-41,7	-24,7	-35,7	-36,7	-41,7	-33,1	-41,0
80 Hz	-20,6	-32,8	-22,4	-26,8	-34,8	-33,3	-38,9	-38,8
100 Hz	-23,6	-26,5	-21,2	-20,7	-33,8	-28,8	-30,4	-31,8
125 Hz	-29,2	-22,6	-22,9	-19,1	-35,5	-26,2	-34,7	-28,9
160 Hz	-32,1	-20,2	-26,1	-17,2	-38,4	-22,8	-36,1	-23,4
200 Hz	-36,0	-17,2	-30,0	-15,6	-42,3	-20,4	-39,7	-24,7
250 Hz	-41,0	-15,8	-35,0	-16,1	-47,3	-19,3	-44,8	-17,1
315 Hz	-48,7	-14,1	-42,7	-13,9	-55,0	-16,0	-52,9	-17,0
400 Hz	-51,0	-13,7	-45,0	-12,6	-57,3	-14,2	-56,1	-23,0
500 Hz	-54,7	-10,4	-48,7	-10,0	-61,0	-10,7	-60,1	-13,5
630 Hz	-60,1	-9,0	-54,1	-8,7	-66,4	-9,9	-65,0	-12,5
800 Hz	-65,1	-9,2	-59,1	-9,0	-71,4	-9,0	-68,7	-5,5
1000 Hz	-71,8	-10,7	-65,8	-10,7	-78,1	-9,7	-74,1	-9,6
1250 Hz	-76,5	-10,1	-70,5	-11,0	-82,8	-8,4	-78,2	-11,0
1600 Hz	-83,7	-10,8	-77,7	-12,3	-90,0	-9,4	-84,9	-10,5
2000 Hz	-93,9	-12,0	-87,9	-13,1	-99,0	-11,0	-92,7	-11,1
2500 Hz	-99,0	-13,3	-99,0	-12,7	-99,0	-12,0	-99,0	-12,1
3150 Hz	-99,0	-15,3	-99,0	-15,0	-99,0	-13,9	-99,0	-11,7
4000 Hz	-99,0	-16,5	-99,0	-15,6	-99,0	-16,5	-99,0	-14,7
5000 Hz	-99,0	-16,9	-99,0	-17,3	-99,0	-19,6	-99,0	-18,2
6300 Hz	-99,0	-18,5	-99,0	-19,6	-99,0	-22,5	-99,0	-20,6
8000 Hz	-99,0	-19,6	-99,0	-22,5	-99,0	-26,2	-99,0	-21,8
10000 Hz	-99,0	-22,1	-99,0	-25,8	-99,0	-30,4	-99,0	-22,2
12500 Hz	-99,0	-25,8	-99,0	-30,8	-99,0	-36,9	-99,0	-27,0
16000 Hz	-99,0	-30,3	-99,0	-36,2	-99,0	-42,7	-99,0	-28,9
20000 Hz	-99,0	-35,7	-99,0	-43,1	-99,0	-49,0	-99,0	-32,5

Tabelle 16: Terzpegel-Korrekturwerte für Freilichtkinos

Terzpegel-Korrekturwert D_f^0 [T] /dB für den A-bewerteten Summenpegel, Freilichtkinos			
Frequenz	Gesamtanlage	Subwoofer	Mittel-/ Hochtöner
25 Hz	-59,5	-59,5	-99,0
31,5 Hz	-48,8	-48,8	-93,1
40 Hz	-41,8	-41,8	-76,1
50 Hz	-33,8	-33,8	-60,6
63 Hz	-28,8	-28,9	-47,9
80 Hz	-27,7	-28,2	-37,8
100 Hz	-24,0	-34,5	-24,4
125 Hz	-24,6	-36,2	-24,9
160 Hz	-23,7	-39,1	-23,8
200 Hz	-22,5	-43,0	-22,5
250 Hz	-17,7	-48,0	-17,7
315 Hz	-16,2	-55,7	-16,2
400 Hz	-15,2	-58,0	-15,2
500 Hz	-11,6	-61,7	-11,6
630 Hz	-11,6	-67,1	-11,6
800 Hz	-9,8	-72,1	-9,8
1000 Hz	-8,3	-78,8	-8,3
1250 Hz	-8,5	-83,5	-8,5
1600 Hz	-8,4	-90,7	-8,4
2000 Hz	-11,0	-99,0	-11,0
2500 Hz	-12,4	-99,0	-12,4
3150 Hz	-15,1	-99,0	-15,1
4000 Hz	-15,7	-99,0	-15,7
5000 Hz	-17,7	-99,0	-17,7
6300 Hz	-20,8	-99,0	-20,8
8000 Hz	-23,0	-99,0	-23,0
10000 Hz	-26,8	-99,0	-26,8
12500 Hz	-32,2	-99,0	-32,2
16000 Hz	-36,1	-99,0	-36,1
20000 Hz	-42,0	-99,0	-42,0

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autor:

Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH
Julius-Otto-Straße 13, 01219 Dresden
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Axel Roy
Telefon: +49 351 4711568
Telefax: +49 351 4711599
E-Mail: mail@abd-online.com
www.abd-online.com

Redaktion:

Christoph Fritzsche
Abteilung 5 / Referat 52
Söbrigener Straße 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5209
Telefax: +49 351 2612-5099
E-Mail: christoph.fritzsche@smul.sachsen.de

Fotos:

© Akustik Bureau Dresden
© PAN Veranstaltungslogistik und Kulturgastronomie GmbH (Titelblatt)
© Sattler Global/Ceno Tec (Abb. 29, S. 62)
© Calenberg Ingenieure (Abb. 29, S.62)

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.