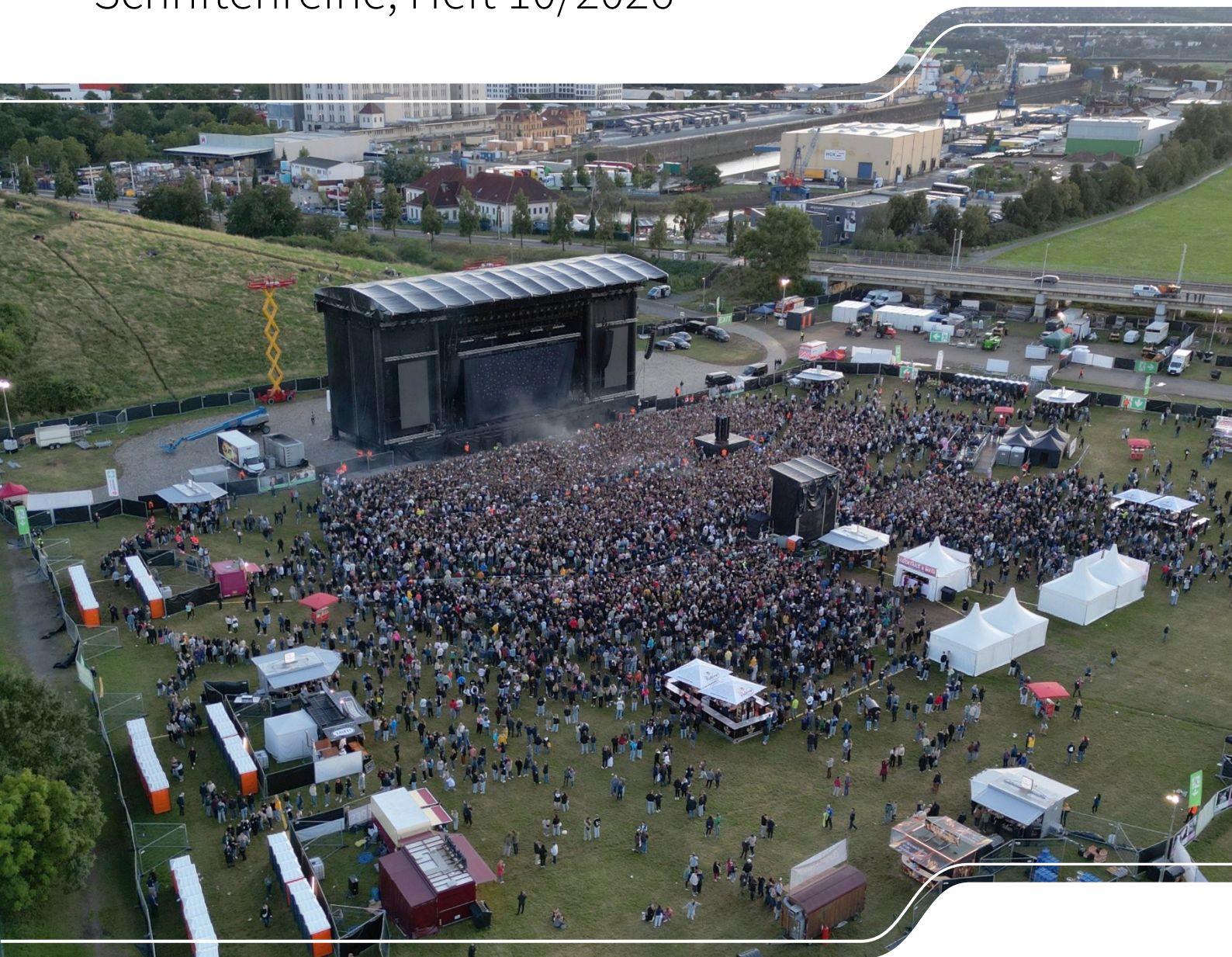


Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie

Schriftenreihe, Heft 10/2026



Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie – Aktualisierung von Emissionskenngrößen für Beschallungsanlagen und Empfehlungen für Schallimmissionsprognosen

Dipl.-Ing. Andreas Nicht, B. Eng. Max Händel, M. Sc. Oliver Gehler, Akustik Bureau Dresden

Besonderen Dank an Dr. rer. nat. Stefan Feistel, AFMG Technologies GmbH; M. Sc. Tobias Goldmann,
TW AUDiO International GmbH; M. Sc. Lukas Roskosch, Technische Hochschule Mittelhessen;
Dipl.-Phys. Daniel Belcher, d&b audiotechnik GmbH; B. Eng. Bela Voigt

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	11
1 Einleitung und Aufgabenstellung	12
2 Stand der Technik.....	14
2.1 Subwoofer.....	14
2.1.1 Einzelsysteme	14
2.1.2 Subwoofer-Arrays	15
2.1.3 Subbass- und Infraschall	19
2.2 Prognosesoftware.....	19
3 Untersuchungen.....	20
3.1 Emissionskenngrößen.....	20
3.1.1 Frequenzspektrum	20
3.1.2 Schallleistungspegel.....	24
3.1.3 Impulshaltigkeit und Spitzenpegel.....	25
3.2 Richtcharakteristik	28
3.2.1 Line-Arrays	28
3.2.2 Subwoofer.....	29
4 Empfehlungen für die Prognose	35
4.1 Schallleistungspegel.....	35
4.2 Frequenzspektren.....	36
4.3 Zuschläge	37
4.4 Spitzenpegel	38
4.5 Richtcharakteristik	39
4.6 Vorgehensweise für die Prognose.....	40
Danksagung	42
Literaturverzeichnis.....	43
Anhang.....	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Beschallungsanlage mit geflogenen Subwoofer-Arrays in rot, Line-Arrays in grün.....	16
Abbildung 2: Typische Beschallungsanlage (2.2-System) mit Subwoofer-Stacks seitlich der Bühne in rot, Line-Arrays in grün	17
Abbildung 3: Typische Beschallungsanlage mit Subwoofern in Zahnlücken-Anordnung vor der Bühne in rot, Line-Arrays in grün.....	18
Abbildung 4: Mittlere Terzspektren für Großbühnen – Rock/Pop, A-bewertet, normiert auf 0 dB(A).....	22
Abbildung 5: Mittlere Terzspektren für Großbühnen – Elektro, A-bewertet, normiert auf 0 dB(A)	22
Abbildung 6: Mittlere Terzspektren für Klassik-Bühnen, A-bewertet, normiert auf 0 dB(A)	23
Abbildung 7: Simulierte horizontale Richtwirkung eines Subwoofers im omnidirektionalen Betrieb (links) und im Cardioid-Betrieb (rechts)	29
Abbildung 8: Übliches Stacking von Subwoofern –omnidirektional (links); mit Cardioid- Lautsprechern (Mitte); End-Fire-Anordnung (rechts).....	30
Abbildung 9: Simulierte horizontale Richtwirkung einer End-Fire-Aufstellung mit zwei hintereinander angeordneten omnidirektionalen Subwoofern in 1 Meter (links) und 1,5 Metern Abstand (rechts)	30
Abbildung 10: Simulierte horizontale Ersatzrichtwirkung von einem Zahnlücken-Subwoofer- Array für eine Großbühne mit omnidirektional (links) und gerichtet abstrahlenden Einzelsystemen (rechts).....	33
Abbildung 11: Simulierte horizontale Ersatzrichtwirkung von einem Zahnlücken-Subwoofer- Array für eine kleine oder mittelgroße Bühne mit omnidirektional (links) und gerichtet abstrahlenden Einzelsystemen (rechts)	33
Abbildung 12: Mittlere Terzspektren für Groß- und Kleinbühnen, A-bewertet, normiert auf Summenpegel 0 dB(A)	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der zum Vergleich herangezogenen Messdaten	21
Tabelle 2: Gemessener Impulzzuschlag und Scheitelmaß im Versorgungsbereich sowie an Immissionsorten bei Veranstaltungen auf Großbühnen	26
Tabelle 3: Vergleich der Empfehlungen für Fernfeldprognosen und Messwerte für Impulzzuschlag K_I und Scheitelmaß ΔL_{Amax}	27
Tabelle 4: Simulierte Setups in Zahnlücken-Anordnung für kleine und mittelgroße Bühnen	32
Tabelle 5: Simulierte Setups in Zahnlücken-Anordnung für Großbühnen	32
Tabelle 6: Entfernungsabhängiger Zuschlag für Impulshaltigkeit K_I für verschiedene Bühnenarten	37
Tabelle 7: Entfernungsabhängige Werte für das Scheitelmaß ΔL_{Amax} verschiedener Bühnenarten	38

Tabellenverzeichnis für den Anhang

Tabelle A 1: Terzpegel-Korrekturwerte für Freiluftbühnen aus der Ergänzung zur SFLS 2019	45
Tabelle A 2: Terzpegel-Korrekturwerte für Einzelschallquellen auf Freiluftbühnen aus der Ergänzung zur SFLS 2019	46
Tabelle A 3: Terzpegel-Korrekturwerte der zur Untersuchung des Frequenzspektrums herangezogenen Datensätze für Rock/Pop-Großbühnen (siehe Abbildung 4 auf Seite 22)	47
Tabelle A 4: Terzpegel-Korrekturwerte der zur Untersuchung des Frequenzspektrums herangezogenen Datensätze für Elektro-Großbühnen (siehe Abbildung 5 auf Seite 22)	48
Tabelle A 5: Terzpegel-Korrekturwerte der zur Untersuchung des Frequenzspektrums herangezogenen Datensätze für Klassikbühnen (siehe Abbildung 6 auf Seite 22)	49

Fachwortverzeichnis

2.2-System	auf kleinen Bühnen typische Beschallungsanlage mit zwei Hoch-/Mitteltonlautsprechern bzw. Line-Arrays und zwei Subwoofern bzw. Subwoofer-Stacks zu beiden Seiten der Bühne
A-Bewertung	frequenzabhängige Anpassung von Schalldruckpegeln; entspricht dem Frequenzgang des menschlichen Gehörs / den Kurven gleicher Lautstärke bei 20–40 phon
APS	Aggregate Point Source; Austauschformat für Ersatzschallquellen der Beschallungsplanung
Beschallungsanlage	elektronische Anlage, die Audiosignale aus Mikrofonen, Instrumenten oder Wiedergabegeräten verstärkt und mittels Lautsprecher der menschlichen Wahrnehmung zugänglich macht
Beschallungsplanung	von einem Fachplaner abgestimmtes Konzept für eine Beschallungsanlage mit eingesetzten Lautsprechern sowie deren exakten Konfiguration (Gain- und Delay-Einstellung)
Beurteilungspegel	mittlerer Schalldruckpegel an einem Einwirkungsort, gegebenenfalls mit Zuschlägen; 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“, Richtwirkung nach hinten gedämpft
Curving	Ausprägung des Öffnungswinkels, wobei durch physisches Eindrehen der äußeren Elemente eines Subwoofer-Arrays oder durch die Ansteuerung der Einzelsysteme eines Subwoofer-Arrays mit verschiedenen Verzögerungszeiten (Delays) verschiedene Richtcharakteristiken realisiert werden können
Delay	Verzögerungszeit
Dissipation	Zerstreuung
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, wobei mehrere Lautsprecher oder Lautsprecher-Stacks hintereinander positioniert werden; die vorderen Systeme werden mit einer Verzögerungszeit (Delay) versehen; siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.2
Fernfeld	entfernter Bereich um eine Schallquelle; Interferenzeffekte sind hier weniger stark ausgeprägt

Front of House (FOH)	Ort im Veranstaltungsgelände, an dem der Tontechniker die über die Beschallungsanlage wiedergegebenen Audiosignale bearbeitet; bei Open-Air-Veranstaltungen meist ein mit einem Zelt überdachter Bereich, an dem das Mischpult steht
gecurvt	siehe Curving
geflogen	gehangen (meist an Traversen)
gestackt	auf einem festen Untergrund aufgestapelt
Großbühne	Freiluftbühne mit einer zu beschallenden Fläche von $A \geq 500 \text{ m}^2$; das bedeutet gemäß VDI 3770 bei Sitzplätzen (2 Personen/ m^2) eine maximale Zuschauerzahl von $n \geq 1000$, bei Stehplätzen (4 Personen/ m^2) maximal $n \geq 2000$ Zuschauer
Immissionsort (IO)	Ort, für den eine Schallimmissionsberechnung bzw. -messung und Beurteilung vorgenommen wird
Impulshaltigkeit	Eigenschaft von Geräuschen mit starken zeitlichen Änderungen des Schalldruckpegels; wird in den Beurteilungsvorschriften in der Regel anhand des Impulszuschlages berücksichtigt
Informationshaltigkeit	Eigenschaft von Geräuschen, bei denen sprachliche Informationen erkennbar hervortreten; wird in den Beurteilungsvorschriften in der Regel anhand eines Zuschlages berücksichtigt
Kleinbühne	Freiluftbühne mit einer zu beschallenden Fläche von $A < 500 \text{ m}^2$; das bedeutet gemäß VDI 3770 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
Limiter	Effektgerät als Soft- oder Hardware, das die Maximalpegel eines Musikssignals auf einen voreingestellten Wert begrenzt
Line-Array	vertikale Anordnung von Lautsprecherboxen, die als Linienstrahler endlicher Länge gesehen werden kann; weisen starke vertikale Schallbündelung auf; meist zur Beschallung des Mittel- und Hochtonbereiches eingesetzt
Links-Rechts	<i>bei Subwoofer-Arrays:</i> Aufstellung von Subwoofern oder Subwoofer-Stacks zu beiden Seiten der Bühne; die Schallausbreitung ist hier stark von konstruktiven und destruktiven Interferenzen gekennzeichnet
Mittel-/Hochtonlautsprecher	Lautsprecher einer Beschallungsanlage, die zur Wiedergabe von Frequenzen über der Trennfrequenz des Systems (bei ca. 60 bis 120 Hz) eingesetzt werden
Mittelungspegel	über einen bestimmten Zeitabschnitt energetisch gemittelter Schalldruckpegel

Nahfeld	Bereich unmittelbar um eine Schallquelle; gekennzeichnet durch ungleichmäßigen Wechsel zwischen Orten konstruktiver und destruktiver Interferenzen
Öffnungswinkel	<i>bei Subwoofer-Arrays:</i> Winkel um die Hauptabstrahlrichtung, auf den die Beschallung des Subwoofer-Arrays optimiert ist
omnidirektional	„kugelförmig“, ohne Richtwirkung
Perzentil	statistisches Maß; beispielsweise gibt das 90-Perzentil den Wert an, der von 90 % der Werte einer Menge unterschritten oder gerade erreicht wird
phasenrichtig	<i>bei Schallausbreitungsrechnungen:</i> Berechnung unter Berücksichtigung der Phasenlage von kohärenten Signalen
Richtcharakteristik	auch Richtwirkung; akustische Kenngröße; beschreibt die Winkelabhängigkeit der abgegebenen Schallenergie, meist bezogen auf die Intensität in die Hauptrichtung
Schalldruckpegel	akustische Kenngröße; entspricht der „Stärke des Schallfeldes“ in der Regel im Bezug zur Hörschwelle des menschlichen Gehörs
Schallleistungspegel	akustische Kenngröße; entspricht der pro Zeiteinheit abgegebenen Schallenergie einer Schallquelle
Scheitelmaß	mittlerer Abstand zwischen dem energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel und dem zugehörigen Spitzenschalldruckpegel
SDE	Sound/System Design/Data Exchange/Export; Austauschformat in der Beschallungsplanung für phasenrichtige Schallausbreitungsrechnungen
Spitzenpegel	in einem bestimmten Zeitraum maximal auftretender Pegel
Spitzen-Schallleistungspegel	in einem bestimmten Zeitraum maximal auftretender Schallleistungspegel einer Schallquelle
Standardabweichung	Kennzahl einer Stichprobe; Wurzel aus der empirischen Varianz; gibt die mittlere Abweichung der Einzelwerte zum Mittelwert der gesamten Stichprobe an
Subwoofer	Lautsprecherboxen, die durch ihr Konstruktionsprinzip für die Wiedergabe tieffrequenter Schallwellen optimiert sind
Subwoofer-Anordnung	Aufstellung von mehreren Subwoofern zur gezielten Beeinflussung der Schallabstrahlung; z.B. Links-Rechts, Zahnücke, End Fire
Subwoofer-Array	Lautsprechergruppe aus mehreren Subwoofern, welche in bestimmten Abständen zueinander horizontal oder vertikal angeordnet werden
Subwoofer-Stack	Lautsprechergruppe aus mehreren übereinander gestapelten Subwoofern
Summenpegel	durch energetische Addition ermittelter Gesamtpegel

Taktmaximal-Mittelungspegel	Mittelungspegel aus den in Takten von 5 s bestimmten Maximalpegeln; dient der Beurteilung der Lästigkeit von impulshaltigen Signalen
Tonhaltigkeit	Eigenschaft von Geräuschen, bei denen ein oder mehrere Töne hörbar hervortreten; wird in den Beurteilungsvorschriften in der Regel anhand eines Zuschlages berücksichtigt
Treiber	<i>bei Lautsprechern:</i> Schallwandler, der elektrische in akustische Signale umwandelt
Trennfrequenz	Frequenz, bei welcher die Signalübertragung von den Tieftonlautsprechern (Subwoofern) zu den Mittel-/Hochtonlautsprechern übergeht
Versorgungspegel	mittlerer Schalldruckpegel am entferntesten Hörerplatz des Veranstaltungsgeländes
XHN	Austauschformat der Beschallungsplanung für Richtcharakteristiken einzelner Systeme
Zahnlücke	Subwoofer-Anordnung, wobei einzelne oder mehrere übereinander gestackte Subwoofer parallel zur Bühnenkante in gleichmäßigen Abständen positioniert werden
zu beschallende Fläche	Rezeptionsbereich einer beschallten Veranstaltung; definiert durch den entferntesten Hörerplatz und die geometrische Ausdehnung des Veranstaltungsgeländes

Formelzeichen

A	zu beschallende Fläche, in m^2
A_0	Bezugsfläche, in m^2
$A[T]$	A-Korrektur in Terzbändern gemäß DIN EN 61672-1
c	Schallgeschwindigkeit in Luft, $c \approx 340 \text{ m/s}$
$D_f^0[T]$	Terzpegel-Korrekturwert, normiert, in dB
f	Frequenz, in Hz
$f_{\text{oct}/3}$	Terzmittenfrequenz, in Hz
K_B	Korrektur für verschiedene Bühnen- und Veranstaltungsarten, in dB
K_G	Korrektur für verschiedene Musikgenres bei Freiluftkonzerten, in dB
K_I	Impulszuschlag, in dB
ΔK_I	Differenz zwischen Impulszuschlägen für verschiedene Orte (siehe 3.1.3), in dB
L_{Aeq}	äquivalenter Dauerschallpegel für einen zeitlich kontinuierlichen Schallpegel gemäß DIN 45641, A-bewertet, in dB(A)
L_{AFmax}	Spitzenpegel, A-bewertet, in dB(A)
L_{AFTeq}	Taktmaximal-Mittelungspegel gemäß DIN 45645-1, A-bewertet, in dB(A)
ΔL_{Amax}	Scheitelmaß, in dB
L_{VA}	Versorgungspegel, (mittlerer) Schalldruckpegel am Rande des Zuschauerbereiches, in dB(A)
L_{WA}	Schallleistungspegel, in dB(A)
L_{WAmax}	Spitzen-Schallleistungspegel, in dB(A)
s_m	Entfernung zwischen Schallquelle und Messort bzw. Immissionsort, in m
Δs_m	Differenz der Entfernungen von der Schallquelle zu verschiedenen Messorten (s. 3.1.3), in m
t_s	Verzögerungszeit (Delay) zwischen Subwoofern, in ms

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der aktuelle Stand der Technik von Beschallungsanlagen für Open-Air-Konzerte untersucht. Die in den bisherigen Untersuchungen der Sächsischen Freizeitlärmstudie benannten Prognoseansätze wurden auf Aktualität überprüft und erforderlichenfalls präzisiert.

Dies umfasst insbesondere die Frequenzspektren der Schallemission der Beschallungsanlagen – mit besonderem Blick auf den Anteil der Subwoofer. Für den tieffrequenten Bereich wurden detaillierte Ersatzrichtcharakteristiken unterschiedlicher Subwoofer-Konfigurationen ermittelt, welche als Weiterentwicklung der vorhandenen exemplarischen Richtcharakteristiken für Line-Arrays eine genauere Prognoserechnung von Großbühnen ermöglichen. Somit besteht für den gesamten Frequenzbereich die Möglichkeit einer richtungsabhängigen Prognose, wenn keine konkrete Beschallungsplanung vorliegt. Außerdem wurden die Entfernungsabhängigkeit der zeitlichen Parameter Impulszuschlag und Scheitelmaß untersucht und für die Immissionsprognose differenzierte Empfehlungen gegeben.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

In der Sächsischen Freizeitlärmstudie 2002 [1] bzw. 2006 [2], kurz SFLS, sowie deren Ergänzung 2019 [3] wurde die Schallemission verschiedener Freizeiteinrichtungen untersucht. Auf Basis einer Vielzahl von Messdaten wurden Prognoseverfahren zur Abschätzung der durch diese Anlagen zu erwartenden Geräuschimmission in der Nachbarschaft entwickelt. Einen wesentlichen Teil stellen die Prognoseansätze für Beschallungsanlagen von Open-Air-Musikveranstaltungen sowie -Kinos dar – insbesondere in der Ergänzung 2019. In den Jahren seit Veröffentlichung der Studie haben sich im Bereich der Konzertveranstaltungen verschiedene Faktoren verändert. Zum einen wurde die Beschallungstechnik weiterentwickelt. Zum anderen haben sich die Klangpräferenzen vor allem im Bereich der Populärmusik verändert. Darüber hinaus gibt es Weiterentwicklungen im Softwarebereich, sodass inzwischen mit verschiedenen Berechnungsprogrammen eine teilweise phasenrichtige Schallausbreitungsrechnung von Beschallungsanlagen auch auf größere Entfernungen möglich ist. Eine erneute Untersuchung und ggf. Aktualisierung der maßgeblichen Kenngrößen Frequenzspektrum, Schallleistungs- bzw. Versorgungsspegel und Richtcharakteristik liegt somit nahe und ist Gegenstand dieses Berichtes.

Zur Verifikation der Emissionskenngrößen wurden schalltechnische Messungen aus den Jahren 2017 bis 2025 herangezogen. In die Auswertung flossen aktuelle Messungen des AKUSTIK BUREAU DRESDENS, umfangreiche Datensätze der TECHNISCHEN HOCHSCHULE MITTELHESSEN und genrespezifische Spektren aus der *NoizCalc*-Datenbank von D&B AUDIOTECHNIK ein. Neben den Frequenzspektren und Schallpegeln wurden dabei insbesondere die Impulshaltigkeit und der Spitzenpegel genauer betrachtet. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die in der SFLS vorgeschlagenen Emissionsparameter für den Impulzzuschlag K_1 und das Scheitelmaß ΔL_{Amax} für die Ermittlung von Beurteilungspegeln an den oft sehr weit entfernt liegenden Immissionsorten sehr konservativ sind. Deshalb erfolgte die Auswertung besonders in Hinblick auf die Abnahme dieser Parameter mit steigender Entfernung zur Quelle.

Zur Richtwirkung moderner Beschallungsanlagen für verschiedene Bühnengrößen wurden bereits im Jahr 2022 weitergehende Untersuchungen durchgeführt [4]. Für fünf exemplarische Konfigurationen von Line-Arrays wurden mittlere und maximale¹ Richtcharakteristiken ermittelt. Die Kenngrößen wurden mit Hilfe der Software *EASE Speaker Lab*² simuliert und als 3D-Richtwirkungs-Balloons im XHN-Format zur Verfügung gestellt. Diese Dateien lassen sich in Programmen zur Ausbreitungsrechnung, z. B. nach DIN ISO 9613-2, importieren. Sie können für den Fall, dass keine konkreten Daten zur

¹ Maximale zu erwartende Abstrahlung durch minimale Dämpfung als worst-case-Ansatz

² *EASE® Speaker Lab* von AFMG Technologies GmbH

Konfiguration der Beschallungsanlage vorliegen, genutzt werden, um die Richtwirkung der Schallquellen (Lautsprecher) konservativ abzuschätzen.

Im Zuge der Untersuchungen aus dem Jahr 2022 wurden die Teile der Beschallungsanlage, welche den Tieftonbereich wiedergeben (Subwoofer), technisch bedingt nicht berücksichtigt. Zu diesem Zeitpunkt konnten für diese Lautsprechergruppe keine verwertbaren Ergebnisse erzielt werden, da das verwendete Simulationsprogramm ebenso wie das Datenformat für die Richtcharakteristiken auf den Frequenzbereich über 100 Hz beschränkt war. Für diese wurde zur sicheren Seite hin immer eine allseitig konstante Abstrahlung angesetzt. Mittlerweile kann mit *EASE Speaker Lab* jedoch auch der Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz exportiert werden. Somit lassen sich nun auch Richtwirkungs-Balloons für Tiefton-Lautsprechercluster ermitteln. Für die aktuellen Untersuchungen wurden übliche Konfigurationen bei mittleren und größeren Bühnen abstrahiert.

Letztendlich ist das Ziel dieser Überarbeitung der SFLS, Veranstaltern, Anlagenbetreibern, Fachplanern, Sachverständigen und Behörden praxisorientierte Prognoseansätze zu liefern. Die Genehmigung von Open-Air-Veranstaltungen gestaltet sich häufig schwierig, da die Geräuschimmissionen der Beschallungsanlage sehr unterschiedlich wahrgenommen werden können. Während sie vom Konzertbesucher gewünscht werden, empfindet sie ein Anwohner möglicherweise als äußerst störend. Hier muss zwischen verschiedenen Interessen abgewogen werden, was möglichst genaue Prognoseverfahren umso wichtiger macht. Es sei darauf hingewiesen, dass die Empfehlungen dieses Berichtes im Hinblick auf eine objektive Einschätzung der schalltechnischen Situation gegeben werden und weder zugunsten der Veranstalter und Konzertbesucher noch der Betroffenen ausgelegt sind, aber in jedem Fall eine angemessene rechnerische Sicherheit berücksichtigen.

2 Stand der Technik

2.1 Subwoofer

Lautsprecherboxen, die durch ihr Konstruktionsprinzip für die Wiedergabe tieffrequenter Schallwellen optimiert sind, werden Subwoofer genannt. Auf Open-Air-Konzerten werden sie entweder einzeln oder als gestapelte bzw. gehängene Lautsprechergruppen im Verbund eingesetzt. Allgemein haben die von Subwoofern ausgehenden Schallanteile aufgrund ihrer spektralen Zusammensetzung (zumindest im Nahbereich der Veranstaltungsfläche) keinen maßgeblichen Einfluss auf den A-bewerteten Summenpegel, welcher als Beurteilungsgrundlage herangezogen wird. Für Prognoserechnungen an komplexen Beschallungsanlagen sollten allerdings auch die Emissionsanteile von Subwoofern berücksichtigt werden. Diese können insbesondere bei größeren Entfernungen von der Schallquelle zum Immissionsort sowie für seitlich und rückwärtig gelegene Immissionsorte bzw. bei Genres mit maßgeblichen Anteilen bei tiefen Frequenzen eine Rolle spielen.

2.1.1 Einzelsysteme

Konventionelle Subwoofer sind im Allgemeinen mit einem oder mehreren in dieselbe Richtung abstrahlenden Treibern ausgestattet. Deren Richtwirkung kann aufgrund der großen Wellenlängen als annähernd kugelförmig (omnidirektional) angenommen werden. Mittlerweile werden jedoch von verschiedenen Herstellern auch sogenannte Cardioid-Subwoofer angeboten. Diese Lautsprecher besitzen zusätzliche Treiber, welche entgegen der Hauptabstrahlrichtung ausgerichtet sind. Durch gezielte Ansteuerung mittels Phasenumkehr und Verzögerungszeit lassen sich so gezielt destruktive Interferenzen entgegen der Hauptabstrahlrichtung erzeugen. Die Richtcharakteristik solcher Subwoofer kann als annähernd nierenförmig beschrieben werden. Vergleichbare Konfigurationen sind auch durch den Einsatz mehrerer, in entgegengesetzte Richtung abstrahlender oder hintereinander angeordneter Subwoofer realisierbar. In Kapitel 3.2.2 wird die Richtwirkung solcher Systeme genauer untersucht.

Der Einsatz von Cardioid-Subwoofern bzw. -Konfigurationen hat schalltechnisch bedeutende Vorteile gegenüber konventionellen Systemen. Einerseits sind hier die Verbesserungen aus tontechnischer Sicht zu erwähnen. Durch die gerichtete Abstrahlung im Tieftonbereich hat die Beschallungsanlage weniger Einfluss auf die Mikrofonierung auf der Bühne. Weiterhin werden Bühnen in der Veranstaltungspraxis häufig um 180° gedreht zu den naheliegendsten Immissionsorten ausgerichtet. Durch den Einsatz gerichteter Basssysteme kann hierbei neben dem Hochtonbereich auch eine große Schallbündelung im Tieftonbereich erzielt werden. Durch die Rückwärtsdämpfung über einen größeren Frequenzbereich können so die sonst teilweise tieffrequent bestimmten Beurteilungspegel gesenkt werden. Der Einsatz von Cardioid-Subwoofern ist allerdings nur für entsprechende Problemstellungen wirtschaft-

lich, da die Anschaffungs- bzw. Verleihkosten solcher Systeme meist deutlich höher sind. Deshalb werden in der Regel für Open-Air-Veranstaltungen immer noch konventionelle Systeme eingesetzt.

2.1.2 Subwoofer-Arrays

Für die Beschallung von Kleinbühnen sind häufig schon einzelne Subwoofer ausreichend. Für Veranstaltungen, bei denen eine großflächige Versorgung mit tieffrequentem Schall gewünscht ist, kommen jedoch mittlerweile in der Regel mehrere Subwoofer zum Einsatz. Diese werden dann in Form mehrerer Einzelsysteme entlang der Bühnenvorderkante als horizontales Subwoofer-Array aufgestellt oder als vertikales Subwoofer-Array an Traversen gehangen. Die Schallabstrahlung der gesamten Beschallungsanlage kann aufgrund der akustischen Überlagerung der Einzellautsprecher stark variieren und ist für Subwoofer-Anordnungen mit mehreren Elementen insbesondere von folgenden Parametern abhängig:

- vertikale Anordnung: geflogen/gestackt
- horizontale Positionierung: Links-Rechts/Zahnücke/End Fire
- horizontaler Versatz: gecurvt/nicht gecurvt
- Richtwirkung der Einzellautsprecher: omnidirektional/cardioid
- Zeitverzögerung der Einzellautsprecher: $t_s = 0 \dots 20 \text{ ms}$

Im Allgemeinen können Subwoofer auf dem Boden gestapelt (gestackt) oder an Traversen, auch Truss genannt, gehangen (geflogen) werden. Eine Stapelung lässt sich deutlich einfacher realisieren und ist deshalb im Veranstaltungsbetrieb üblich. Hierbei werden bis zu drei Einzellautsprecher übereinander als Subwoofer-Stacks angeordnet.

Vertikale, geflogene Subwoofer-Arrays

Geflogene Subwoofer bzw. Subwoofer-Arrays werden häufig nur bei Veranstaltungen mit großen Budgets und auf ausdrücklichen Wunsch der Produktionsfirma oder des Tontechnikers umgesetzt. Durch das hohe Gewicht der Subwoofer-Arrays müssen diese in Zusammenhang mit der Bühnenarchitektur optimiert werden. Subwoofer-Arrays haben den Vorteil, dass sie für einen großen Versorgungsbereich eine homogenere Abdeckung ermöglichen und auf diesen fein abgestimmt werden können. Zudem werden Dämpfungseffekte durch Menschen oder andere Hindernisse im hinteren Publikumsbereich minimiert. Die Richtcharakteristik von Subwoofer-Arrays ist stark abhängig von den eingesetzten Lautsprechern und deren Ansteuerung. Aufgrund der langen Wellenlängen ist aber ein deutlich geringerer Bündelungsgrad als bei Line-Arrays zu erwarten.

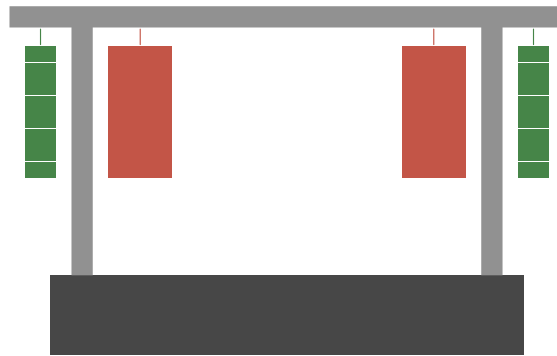


Abbildung 1: Typische Beschallungsanlage mit geflogenen Subwoofer-Arrays in rot, Line-Arrays in grün

Horizontale, gestackte Subwoofer-Arrays

Für Großbühnen, bei denen der Publikumsbereich möglichst homogen mit Schall versorgt werden soll, reichen einzelne Subwoofer häufig nicht mehr aus. Im Regelfall kommen hier Anordnungen mit mehreren gestackten Lautsprechern zum Einsatz. Aufgrund der akustischen Überlagerung der Einzellautsprecher ist die Schallabstrahlung der gesamten Beschallungsanlage dabei stark abhängig von der Positionierung, Ausrichtung und Ansteuerung der Einzelelemente. In der Praxis haben sich die Anordnungen Links-Rechts, Zahnücke und End Fire durchgesetzt.

Für die Beschallung kleiner und mittelgroßer Bühnen sind sogenannte 2.2-Systeme weit verbreitet. Diese bestehen aus zwei Topteilen für den Hoch-/Mitteltonbereich und zwei Subwoofern für den Tieftonbereich. Die Subwoofer werden aus Platzgründen meist zu beiden Seiten der Bühne aufgestellt – man spricht von einer Links-Rechts-Anordnung. Die Richtcharakteristik ist aufgrund der großen Abstände der Einzelelemente stark von additiven und destruktiven Interferenzen gekennzeichnet. Eine verallgemeinerte Prognose von 2.2-Systemen ist somit nur bedingt möglich. Trotz der teilweise stark uneinheitlichen Versorgung erfreuen sich Links-Rechts-Anordnungen großer Beliebtheit, da sie durch den Einsatz von nur wenigen Einzelelementen sehr wirtschaftlich sind.



Abbildung 2: Typische Beschallungsanlage (2.2-System) mit Subwoofer-Stacks seitlich der Bühne in rot, Line-Arrays in grün

Bei größeren Publikumsflächen hat sich der Einsatz sogenannter Zahnlücken-Anordnungen durchgesetzt. Hierfür werden einzelne oder mehrere übereinander gestackte Subwoofer parallel zur Bühnenkante in gleichmäßigen Abständen angeordnet. Je nach Bühnengröße sind 6 bis 12 Einzelpositionen mit Abständen von 1,5 bis 3 Metern üblich. Auf großen Festivalbühnen kommen sogar teilweise bis zu 20 Subwoofer-Stacks zum Einsatz. Die Schallabstrahlung dieser Anordnung wird durch verschiedene Parameter stark beeinflusst. Die horizontale Bündelung ist in erster Linie von der Länge des gesamten Zahnlücken-Arrays abhängig. Je länger das Array, desto weniger stark ist dessen seitliche Schallabstrahlung. Durch den Abstand der Einzelelemente zueinander wird zudem die frequenz- und ortsabhängige Ausbildung von Interferenzen beeinflusst. Je größer der Abstand zwischen den Einzelelementen ist, desto niedriger ist die Grenzfrequenz, ab der die Elemente nicht mehr homogen abstrahlen. Die optimale Entfernung kann auf Basis der oberen Trennfrequenz zu den Topteilen ermittelt werden (entscheidend ist hierbei die halbe Wellenlänge). Durch die Ansteuerung der Einzelelemente mit verschiedenen Verzögerungszeiten (*Delay*) lassen sich zudem breitere horizontale Öffnungswinkel realisieren. Dabei gilt: je größer das Delay der äußeren Elemente gegenüber den Elementen in der Mitte der Zahnlücke ist, desto größer ist auch der resultierende Öffnungswinkel. Übliche Delayzeiten liegen hier im Bereich von $t_s = 0 \dots 20$ ms. Die Schallausbreitung in der Horizontalen kann auch durch das physische Eindrehen der äußeren Subwoofer beeinflusst werden. Man spricht dann von einer „gecurvten“ Zahnlücke. Zur Optimierung der Abstrahlcharakteristik für konkrete Beschallungssituationen werden von verschiedenen Herstellern Kalkulationstools angeboten. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren variieren die Konfigurationen der Zahnlücke von Bühne zu Bühne sehr stark. Im Allgemeinen werden auf mittelgroßen Bühnen (z. B. Stadtfesten) jedoch eher Anordnungen mit weniger Einzelelementen, geringem Curving und kleinen Öffnungswinkeln eingesetzt. Währenddessen kommen auf großen Bühnen (z. B. Festivalbühnen) auch Anordnungen mit sehr vielen Einzelelementen, großem Curving und großen Öffnungswinkeln vor.



Abbildung 3: Typische Beschallungsanlage mit Subwoofern in Zahnlücken-Anordnung vor der Bühne in rot, Line-Arrays in grün

Eine weitere Möglichkeit der Schallbündelung stellt die End-Fire-Anordnung dar. Hierbei werden mehrere Subwoofer oder Subwoofer-Stacks hintereinander positioniert. Die vorderen Systeme werden mit einer Verzögerungszeit (Delay) versehen, sodass sich, abhängig von der Frequenz, die Schallwellen der Einzelsysteme nach vorne konstruktiv und nach hinten destruktiv überlagern. Die resultierende Richtwirkung ist stark frequenzabhängig. Die stärkste Pegelabsenkung entgegen der Hauptabstrahlrichtung ergibt sich bei der Frequenz f mit einem Abstand d der vorderen zu den hinteren Systemen von einem Viertel der Wellenlänge λ ($d = \lambda/4$; $f = c/\lambda$) und entsprechender Verzögerung der vorderen Systeme ($t_s = d/c$).

Die End-Fire-Anordnung kann auch in Kombination mit anderen Anordnungen (z.B. Zahnücke oder geflogene Subwoofer-Arrays) umgesetzt werden. Durch Anpassung von Verzögerungszeit und Abstand bzw. Versatz zwischen den Stacks lassen sich auch hier verschiedene Richtwirkungen und Öffnungswinkel realisieren.

Von Tontechnikern werden End-Fire-Anordnungen häufig bevorzugt. Im Gegensatz zu cardioiden Systemen wird, bei ähnlicher rückwärtiger Dämpfung, der Klangeindruck im Versorgungsbereich als deutlich „kraftvoller“ beschrieben. Die Nachteile dieser Aufstellung sind, dass sehr viele Subwoofer benötigt werden, diese sehr viel Raum beanspruchen und dadurch meist weniger Publikums- bzw. Bühnenfläche nutzbar ist. Deshalb kommen End-Fire-Anordnungen häufig nur bei Veranstaltungen zum Einsatz, bei denen viel Wert auf eine besonders druckvolle Tieftonwiedergabe gelegt wird (z. B. Elektro-Festivals).

2.1.3 Subbass- und Infraschall

In den letzten Jahren ließ sich auf Großveranstaltungen vereinzelt auch der Einsatz von sogenannten Subbass- bzw. Infraschall-Subwoofern beobachten. Der Frequenzgang solcher Systeme reicht teilweise bis unter 20 Hz. Die emittierten Schallwellen können als Vibration oder Druckgefühl wahrgenommen werden. Sollte sich der Einsatz solcher Systeme etablieren, können sich neue schallschutztechnische Probleme ergeben. In den aktuellen Untersuchungen blieb diese Art von Subwoofern jedoch unberücksichtigt.

2.2 Prognosesoftware

Die Richtwirkungen von komplexen Beschallungsanlagen (z. B. Line-Arrays) wurden im Rahmen der SFLS 2019 [3] in *EASE SpeakerLab* ermittelt und in Form von XHN-Daten exportiert. Sowohl die Simulation als das Übergabedatenformat XHN waren dabei auf eine minimale Terzfrequenz von 100 Hz limitiert. Dies ist ausreichend, um die starke Richtwirkung von Line-Arrays abzubilden. Konventionelle Einzellautsprecher weisen zudem in diesem Frequenzbereich keine relevante Richtwirkung auf, sodass eine entsprechende Richtwirkungsmodellierung hierfür ebenfalls nicht erforderlich war.

Inzwischen bieten jedoch sowohl die Simulationsprogramme der Hersteller (z. B. *ArrayCalc* und *Sound-Vision*) aber auch neuere Versionen von *EASE 5* bzw. *EASE Speaker Lab* die Möglichkeit der Berechnung sowie des Exports der resultierenden Richtwirkung cardioider Einzelsysteme sowie komplexer Subwoofer-Arrays im Frequenzbereich unter 100 Hz. Mit den neuesten Softwareversionen stehen auch Datenformate für die Übergabe an Schallausbreitungsberechnungsprogramme zur Verfügung.

Bei der Schallausbreitungsberechnung werden zwei verschiedene Wege beschritten. Das Programm *SoundPlan* mit dem Stage-Plugin bzw. das externe Softwaretool *NoizCalc*, führen direkt im Programm die Überlagerung der Einzelsysteme der komplexen Anlagen (Kohärenzgruppen) und die Überlagerung der nicht-kohärenten Teilanlagen sowie die weitere Schallausbreitungsberechnung nach ISO 9613-2 durch. Als Übergabe-Datenformate können *ArrayCalc*- oder SDE-Datensätze für konkrete Beschallungsplanungen ausgewählter Hersteller eingelesen werden. [5, 6]. Im Programm *IMMI* erfolgt die Berechnung mithilfe von Fernfeld-Ersatzrichtcharakteristiken, welche extern in *EASE 5* ermittelt werden können, und in Form von 3D-Richtwirkungs-Datensätzen (als APS-Datei) übergeben werden. [7, 8, 9] Beide Verfahren zielen auf konkrete Beschallungsplanungen ab.

Wenn jedoch für die Schallimmissionsprognose keine konkrete Beschallungsplanung zur Verfügung steht, kann auf verallgemeinerte Richtcharakteristiken zurückgegriffen werden. Während für den Mittel- und Hochtonbereich bereits Datensätze zur Verfügung stehen [4] war dies für typische Subwoofer-Arrays bisher noch nicht der Fall, weshalb hier nun entsprechende verallgemeinerte Richtcharakteristiken ermittelt wurden.

3 Untersuchungen

3.1 Emissionskenngrößen

Die Ermittlung der Emissionskenngrößen von Beschallungsanlagen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfolgte analog zu den bewährten Ansätzen der SFLS. Als Grundlage wurden schalltechnische Messungen aus den Jahren 2017 bis 2025 herangezogen. In die Auswertung gingen Messungen des AKUSTIK BUREAU DRESDEN ein, welche 2024 und 2025 im Raum Dresden durchgeführt wurden. Weiterhin wurde ein größerer Datensatz hinzugezogen, welcher seit 2017 im Zuge eines Forschungsprojektes zur Schallemission bei Open-Air-Konzerten von der TECHNISCHEN HOCHSCHULE MITTELHESSEN und der KRAMER SCHALLTECHNIK GMBH erhoben wurde [10]. Abschließend wurden zum Vergleich auch die genrespezifischen Spektren aus der *NoizCalc*-Datenbank von D&B AUDIOTECHNIK einbezogen, welche auf einer Vielzahl von Messungen aus den Jahren 2016–2021 basieren.

In die Auswertung flossen Messdaten von über 500 Konzerten verschiedener Genres auf Open-Air-Bühnen ein. Der Großteil der Messungen wurde an Bühnen mit zu beschallenden Publikumsflächen von $A \geq 500 \text{ m}^2$, das heißt an Großbühnen durchgeführt. In der Regel wurden mittlere Terz-Pegelspektren sowie Pegel-Zeitverläufe über längere Zeiträume von Darbietungen (inkl. kurzer Titelpausen und Ansagen) erfasst. Die Messpunkte lagen meist am *Front of House* (FOH). Teilweise wurden parallel auch Messwerte an Immissionsorten bzw. in größerer Entfernung erfasst.

Im Zuge der Untersuchung wurde ein besonderes Augenmerk auf die Emissionsspektren gelegt. Zudem hat sich gezeigt, dass die in der SFLS für Prognosen empfohlenen Werte für den Impulzzuschlag K_1 und das Scheitelmaß $\Delta L_{A_{\max}}$ für Immissionsorte in größerer Entfernung eher konservativ sind. Für diese Parameter erfolgt die Auswertung deshalb zusätzlich für verschiedene Entfernungen zur Quelle.

3.1.1 Frequenzspektrum

Das Emissionsspektrum der Beschallung bei Open-Air-Konzerten kann je nach Bühnengröße, Genre, Besetzung und der Beschallungsanlage (insbesondere Subwoofer-Anordnung) variieren. In der Ergänzung zur SFLS 2019 [3] wurde die Frequenzverteilung deshalb für Groß- und Kleinbühnen getrennt untersucht. Kleinbühnen wurden zusätzlich in Klassik/Jazz/Welt- und Rock/Pop-Bühnen unterschieden. Aus Messungen am FOH wurde je Bühne durch Rückrechnung gemäß DIN ISO 9613-2 auf die Emissionsspektren in Terzbändern geschlossen und diese Werte gemittelt. Für Großbühnen wiesen die ermittelten Frequenzspektren eine recht geringe Standardabweichung auf. Eine weitere Unterteilung nach Genre erschien deshalb nicht hilfreich. Für die Kleinbühnen-Spektren ergab sich ein deutlich größerer Streubereich.

Die Klangpräferenzen für Musik sind allgemein einem starken Wandel unterworfen. Beispielsweise ließ sich im Bereich der Popularmusik (Billboard Hot 100) über die letzten 60 Jahre eine deutliche Zunahme tieffrequenter Anteile beobachten [11]. Es ist plausibel, dass sich dieser Trend potenziell auch in der Beschallung von Open-Air-Veranstaltungen widerspiegelt. Hinzu kommt, dass durch technische Weiterentwicklungen im Bereich der Lautsprecher-Treiber aktuelle Subwoofer auch bei tieferen Frequenzen hohe Wirkungsgrade besitzen. Aufgrund der entsprechend höheren Leistungsreserven ist eine ausgeglichene Beschallung großer Flächen gut realisierbar. Für die immer häufiger eingesetzten, gerichteten Subwoofer-Systeme (siehe Abschnitt 2) ist zudem theoretisch eine Erhöhung des Basspegels im Versorgungsbereich möglich, ohne die Immissionsschutzaufgaben von Immissionsorten, die oft hinter der Bühne liegen, zu verletzen. Abschließend zeigen Studien, dass besonders tieffrequente Schallanteile Konzertbesucher mehr zum Tanzen anregen [12].

Eine Veränderung des Spektrums bei Open-Air-Konzerten gegenüber den Ergebnissen von 2019 ist somit nicht abwegig und wurde weitergehend untersucht. Abweichungen im tieffrequenten Bereich können dazu führen, dass Genres wie Elektro stärker aus dem Datensatz herausstechen. Für die Prognose kann es dann sinnvoll sein, separate Korrekturspektren zu verwenden.

Zum Abgleich des Frequenzgangs von Großbühnen werden die Spektren der Ergänzung zur SFLS [3] aktuellen, arithmetisch gemittelten Spektren des AKUSTIK BUREAU DRESDEN, der TECHNISCHEN HOCHSCHULE MITTELHESSEN und von D&B AUDIOTECHNIK gegenübergestellt. Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen die auf einen Gesamtpegel von 0 dB(A) normierten, A-bewerteten Terzpegel für die Genres Rock/Pop, Elektro und Klassik. Die Korrekturwerte können auch dem Anhang in Tabelle A 3 bis Tabelle A 5 auf den Seiten 47 bis 49 entnommen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass für eine bessere Vergleichbarkeit der aktuellen Spektren auf die Korrektur der Luftabsorption verzichtet wurde. Es wurden folgende Daten herangezogen:

Tabelle 1: Übersicht der zum Vergleich herangezogenen Messdaten

Spektrum	Messstelle	Zeitraum	Genre	Anz.
THM – Rock/Pop	TH Mittelhessen/Kramer Schalltechnik	2017 – 2025	Rock, Pop, Punk, Metal	388
THM – Electronic	TH Mittelhessen/Kramer Schalltechnik	2017 – 2025	Elektro	46
THM – Klassik	TH Mittelhessen/Kramer Schalltechnik	2017 – 2025	Klassik	24
ABD – Rock/Pop	Akustik Bureau Dresden	2024 – 2025	Rock, Pop, Metal	5
d&b – Live Bands	d&b audiotechnik	2016 – 2018	Rock, Pop, Metal	k. A.

Spektrum	Messstelle	Zeitraum	Genre	Anz.
d&b – Electronic	d&b audiotechnik	2016 – 2021	Elektro	k. A.
d&b – Klassik	d&b audiotechnik	k. A.	Klassik	k. A.
SFLS – Großbühnen	Akustik Bureau Dresden	2014 – 2018	u. a. Rock, Pop, Elektro	47
SFLS – Kleinbühne Klassik	Akustik Bureau Dresden	2014 – 2018	Klassik	7

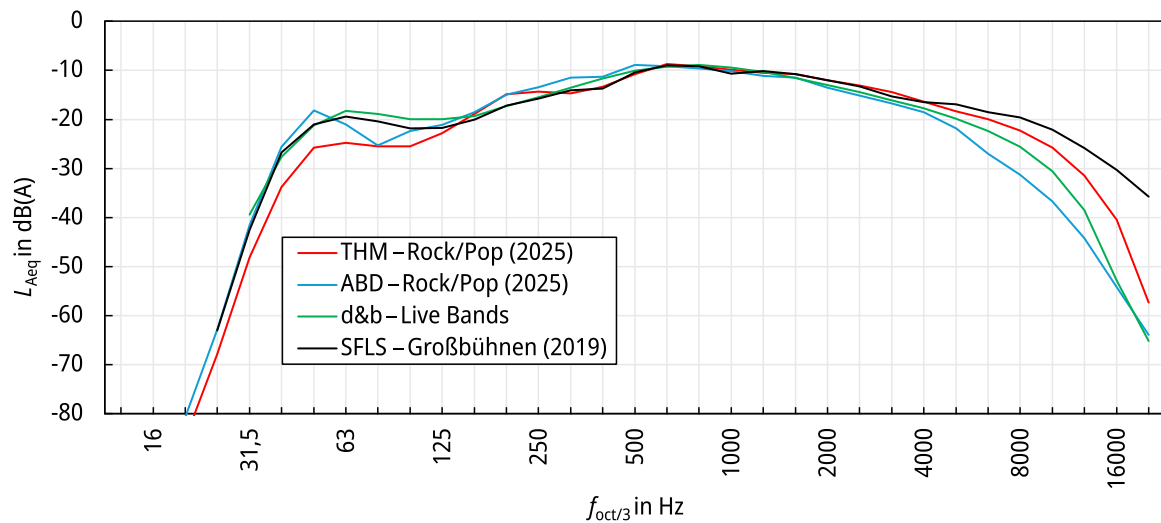


Abbildung 4: Mittlere Terzspektren für Großbühnen – Rock/Pop, A-bewertet, normiert auf 0 dB(A)

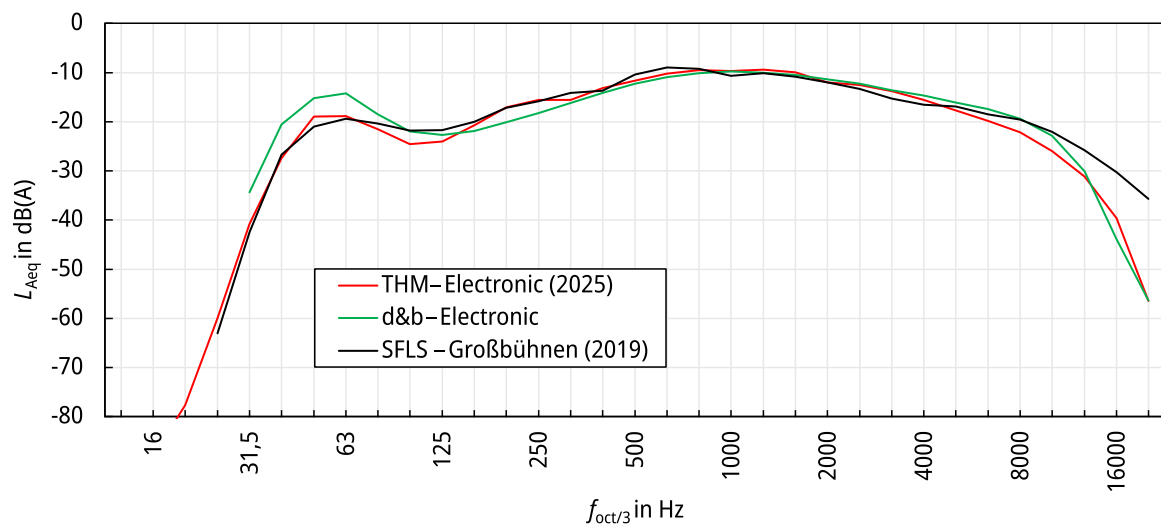


Abbildung 5: Mittlere Terzspektren für Großbühnen – Elektro, A-bewertet, normiert auf 0 dB(A)

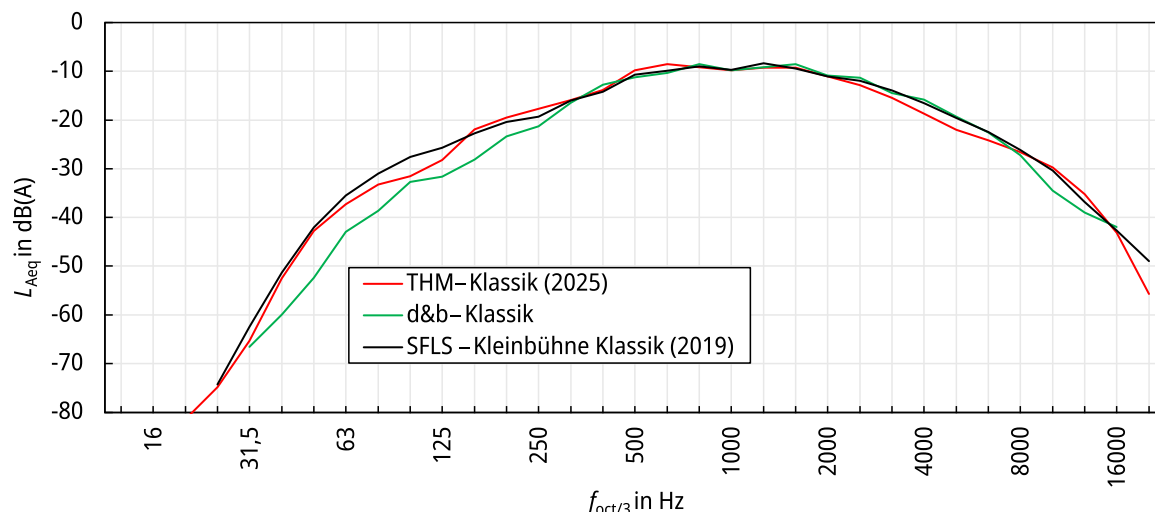


Abbildung 6: Mittlere Terzspektren für Klassik-Bühnen, A-bewertet, normiert auf 0 dB(A)

Im Allgemeinen zeigen die untersuchten Spektren eine hohe Übereinstimmung. Relevante Unterschiede ergeben sich vor allem in der Ausprägung des Bassbereiches (31,5 Hz bis 125 Hz) gegenüber dem pegelbestimmenden Mittenbereich (250 Hz bis 4 kHz). Eine generelle Anhebung des Bassbereiches seit 2019 ist aus den Messdaten nicht ersichtlich. Allerdings zeigt sich teils eine Verschiebung des Frequenzschwerpunktes im Bassbereich um eine „halbe Terz“ (siehe THM – Electronic) bzw. eine „ganze Terz“ (siehe ABD – Rock/Pop) nach unten. Diese Ergebnisse spiegeln die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Tieftonwiedergabe und Klangpräferenzen wider. Es sei erwähnt, dass die sehr deutliche tieffrequente Verschiebung im Messdatensatz des AKUSTIK BUREAU DRESDEN auf zwei Konzerte von Popgruppen mit teils sehr dominanten elektronischen Beats zurückzuführen und statistisch nicht signifikant ist. Die teils deutlichen Abweichungen der Spektren im Hochtonbereich > 4 kHz sind teils auf systematische Unterschiede in der Berücksichtigung der Luftdämpfung zurückzuführen.

Trotz der geringfügigen Unterschiede lässt sich einschätzen, dass das Großbühnenspektrum der SFLS von 2019 immer noch als Ausgangspunkt für Prognosen anwendbar ist. Anhand der Ergebnisse lässt sich derzeit keine Notwendigkeit zur Anpassung des Spektrums ableiten. Auch die Abweichungen im Bassbereich sind im Allgemeinen nur geringfügig. Im Einzelfall kann es jedoch ratsam sein, für Prognosen ein genrespezifisches Spektrum zu verwenden, wenn detailliertere Informationen zur Verfügung stehen. Dies betrifft insbesondere Genres wie Elektro, aber auch Metal und Punk³. Die dargestellten Datensätze der TH MITTELHESSEN und von D&B AUDIOTECHNIK bieten für genrespezifische Ansätze eine gute Grundlage. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass der Frequenzbereich ab 4 kHz bereits im Nahbereich nicht pegelbestimmend und aufgrund der spektralen Dämpfungswerte für

³ E-Gitarren- und Schlagzeug-zentrierte Genres sind spektral besonders im Bereich um 250 Hz und 4 kHz stärker betont als andere.

Fernfeldprognosen oft nicht relevant ist. Aus diesem Grund ist auch die Verwendung von hinsichtlich der Luftabsorption nicht korrigierten Spektren prinzipiell möglich.

3.1.2 Schallleistungspegel

Im Zuge der Ergänzung zur SFLS aus dem Jahr 2019 [3] fand eine großangelegte Messkampagne statt. Aus Messungen am FOH wurde jeweils durch Rückrechnung gemäß DIN ISO 9613-2 auf den Schallleistungspegel der Beschallungsanlage geschlossen. Die Ergebnisse der Messungen dienten als Ausgangspunkt für die Formeln zur Prognose der Schallleistungspegel auf Grundlage der zu beschallenden Fläche.

Eine große Abweichung der Schallleistungspegel gegenüber den Werten von 2019 ist nicht zu erwarten. Beschallungssysteme werden im Allgemeinen zwar immer leistungstärker und effizienter. Jedoch sind Open-Air-Veranstaltungen häufig durch Lärmschutzauflagen reguliert. In vielen Beschallungssituationen ist eine Erhöhung der Lautstärke zudem mit negativen Auswirkungen auf den Klang verbunden (z. B. durch die Artefakte des Limiters). Deshalb präferieren Tontechniker häufig eher eine Reduktion des Dynamikumfangs der Musik um den Lautstärkeindruck zu erhöhen. Der Einfluss der Programmdynamik und spektralen Zusammensetzung auf den Schallleistungspegel wird gegenüber anderen Einflussfaktoren als gering eingeschätzt. Eine Pegelerhöhung durch die zunehmende Verbreitung von gerichteten Subwoofern-Systemen ist ebenfalls nicht evident.

Bei den über 400 Messungen der TH MITTELHESSEN wurden im Zuschauerbereich mittlere Schalldruckpegel von $L_{Aeq} = 95,2 \text{ dB(A)}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 6,0 \text{ dB}$ erfasst [10]. Für die aktuellen Messungen des AKUSTIK BUREAU DRESDEN ergaben sich Mittelwerte von $L_{Aeq} = 95,6 \text{ dB(A)}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 6,2 \text{ dB}$. Der Maximalpegel der DIN 15905-5 [13] von 99 dB(A)^4 wird also im Regelfall nicht ausgeschöpft. Diese Werte decken sich mit den Messwerten der SFLS 2019 und zeigen einen hohen Übereinstimmungsgrad zwischen den verschiedenen Messstellen. Die Pegel wurden größtenteils am *Front of House* (FOH) ermittelt. Eine Rückrechnung auf den mittleren Versorgungspegel L_{VA} fand nicht statt, da für die betrachteten Messdaten größtenteils keine Angaben zur Beschallungsanlage und der zu beschallenden Fläche vorliegen. Die aufgeführten Werte sind somit nicht direkt mit den Emissionswerten aus Tabelle 4 der Ergänzungen zur SFLS vergleichbar. Aus den Messergebnissen der Ergänzung zur SFLS 2019 ergeben sich an Großbühnen vom FOH zum entferntesten Hörerplatz Reduktionen des Beschallungspegels von bis zu 4 dB . Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die aktuellen Schalldruckpegel im Bereich der Messergebnisse von 2019 liegen. Eine Anpassung der Versorgungspegel L_{VA} bzw. der für Prognosen heranzuziehenden Schallleistungspegel L_{WA} erscheint nicht notwendig.

⁴ DIN 15905-5 regelt den aus Gründen des Gehörschutzes über ein Zeitfenster von 30 Minuten maximal zulässigen Schalldruckpegel im Zuschauerbereich.

3.1.3 Impulshaltigkeit und Spitzenpegel

Maßgeblich für die Beurteilung der immissionsrechtlichen Situation in Deutschland (z. B. nach Freizeitlärmrichtlinie [14] oder TA Lärm [15]) ist der Beurteilungspegel, welcher in Anlehnung an die DIN 45645-1 zu bilden ist. Bei der Bestimmung dieses Pegels fließt unter anderem ein Zuschlag für Impulshaltigkeit ein. Zudem darf in der Regel ein bestimmter Spitzenpegel nicht überschritten werden.

Für Immissionsprognosen im Vorfeld von Veranstaltungen müssen diese Signalkenngrößen häufig abgeschätzt werden. Im Rahmen der vorangegangenen Untersuchungen wurde deshalb der Impulszuschlag K_i , als Differenz zwischen dem mittleren Taktmaximalpegel $L_{AF_{Teq}}$ und dem Mittelungspegel L_{Aeq} , sowie das Scheitelmaß ΔL_{Amax} , als Differenz zwischen dem Spitzenpegel $L_{AF_{max}}$ und dem Mittelungspegel L_{Aeq} , ermittelt. Die Messungen erfolgten in der Regel in der Nähe des entferntesten Hörerplatzes am Rand der zu beschallenden Fläche.

Im Abschnitt „Signalkenngrößen bei Beschallungsanlagen“ der SFLS 2006 [2] wird bezogen auf den Impulszuschlag die folgende Empfehlung ausgesprochen: *„Der Impulszuschlag K_i kann im Mittel sehr sicher mit 4,9 dB angesetzt werden, auch wenn genre- oder betreiberabhängig größere Abweichungen auftreten können. Für Fernfeld-Prognosen wird ein Wert von $K_i = 4$ dB empfohlen.“* Das Scheitelmaß (in der SFLS auch Scheitelfaktor genannt) wird in den Messergebnissen der SFLS zwar aufgeführt, für dessen Anwendung bei Prognosen aber keine konkrete Empfehlung ausgesprochen. In den Ergänzungen zur SFLS wurde das Vorgehen dahingehend präzisiert: *„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_i und das Scheitelmaß ΔL_{Amax} verwendet werden.“*

Mit den am Rand des Versorgungsbereiches gemessenen Werten lassen sich die Impulshaltigkeit und der Maximalpegel in erster Näherung abschätzen. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Taktmaximal-Mittelungspegel $L_{AF_{Teq}}$ und die Spitzenpegel $L_{AF_{max}}$ mit steigender Entfernung zur Beschallungsanlage in der Regel stärker abnehmen als die Mittelungspegel L_{Aeq} . Ab Entfernungen von ca. 500 Metern liegen die realen Impulszuschläge und Maximalpegel meist unter den in der SFLS angegebenen Werten. In der Fachliteratur wird auf diesen Umstand hingewiesen [16]. Es sind jedoch keine Literaturquellen bekannt, welche eine allgemeine Abnahme der Signalkenngrößen Impulszuschlag und Spitzenpegel mit steigender Entfernung thematisieren. Der beschriebene Effekt kann zum einen damit erklärt werden, dass mit steigender Entfernung die Luftabsorption hoher Frequenzen zunimmt. Somit werden besonders impuls-haltige Geräuschanteile wie Sprache, Gesang und Perkussion-Instrumente (z. B. Becken) sowie die Publikumsgeräusche⁵ deutlich stärker abgedämpft. Zum anderen kommt es zur inkohärenten

⁵ Für die Messungen der SFLS 2019 wurden auch Passagen, in denen das Publikumsgeräusch dominierte als Teil des Veranstaltungsgeräusch betrachtet.

Überlagerung unterschiedlicher Übertragungspfade sowie zu Dissipationseffekten, was zu einer „Verschleifung“ der zeitlichen Struktur und damit zur Verringerung von Impulsen führt.

Für eine allgemeine Einschätzung wurde der beschriebene Effekt im Zuge der Untersuchungen genauer betrachtet. Dafür wurden durch das AKUSTIK BUREAU DRESDEN bei Open-Air-Konzerten in unterschiedlichen Entfernungen folgende Messwerte erfasst:

Tabelle 2: Gemessener Impulszuschlag und Scheitelmaß im Versorgungsbereich sowie an Immissionsorten bei Veranstaltungen auf Großbühnen

Datum	Genre	Versorgungsbereich		Immissionsort		Differenz	
		K_I in dB	s_m in m	K_I in dB	s_m in m	ΔK_I in dB	Δs_m in m
15.05.2024	Metal	3,3	100	2,3	600	-1,0	500
16.06.2024	Rock	4,2	100	3,1	900	-1,1	800
16.06.2024	Rock	2,8	250	1,7	600	-1,1	350
23.08.2024	Rock	3,5	300	3,3	900	-0,2	600
22.08.2025	Pop	3,7	100	3,2	300	-0,5	200
23.08.2025	Pop	4,5	100	3,6	300	-0,9	200
Mittelwert		3,7		2,9		-0,8	490
Standardabweichung		0,6		0,7		0,4	

Die Messungen erfolgten parallel im Versorgungsbereich und an den zugehörigen Immissionsorten bzw. in größerer Entfernung zur Beschallungsanlage. Es wurden dabei stets die gleichen Zeitfenster ausgewertet, die Verzögerungszeit durch die Ausbreitung korrigiert und Zeitfenster mit erhöhtem Störgeräuschanteil (am Immissionsort) für beide Positionen ausgeblendet.

Aus den Messwerten lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Werte des Impulszuschlags K_I und Scheitelmaßes ΔL_{Amax} liegen für alle Messungen an den Immissionsorten unter den Werten, welche im Versorgungsbereich ermittelt wurden.
- Ab Entfernungen von $s_m \geq 500$ m nimmt der Impulszuschlag K_I im Mittel um ca. 1 dB und das Scheitelmaß ΔL_{Amax} um ca. 1,5 dB ab.
- Die untersuchten Konzerte wiesen im Allgemeinen einen geringen Dynamikumfang auf. Der Impulszuschlag lag im Versorgungsbereich ca. 1 dB, das Scheitelmaß sogar mehr als 4 dB unter den gemittelten Werten der Ergänzung zur SFLS von 2019. Abweichungen traten vor allem bei Konzerten mit großer Publikumsbeteiligung auf (z. B. bei Popkonzerten, bei denen viel mitgesungen wird). Hier wurden Werte ermittelt, die mit den Ergebnissen von 2019 vergleichbar sind.

Die Messergebnisse bestätigen den häufig beschriebenen Effekt, dass bei größeren Entfernungen zum Veranstaltungsgelände die Kenngrößen Impulszuschlag und Spitzenpegel abnehmen.⁶ Außerdem konnte gezeigt werden, dass Beschallungsanlagen inzwischen mit einem geringeren Dynamikumfang betrieben werden. Eine Anpassung der Signalkenngrößen, die für Prognoserechnungen herangezogen werden sollten, ist somit sinnvoll. Für Entfernungen vom Rand des Versorgungsbereiches zum Immissionsort von $s_m \geq 500$ m werden folgende Werte empfohlen:

Tabelle 3: Vergleich der Empfehlungen für Fernfeldprognosen und Messwerte für Impulszuschlag K_I und Scheitelmaß ΔL_{Amax}

Bühnenart	Empfehlung 2006 (entfernungsunabhängig)	Messwerte 2019 (entfernungsunabhängig)		Empfehlung 2026 (ab $s_m \geq 500$ m)	
	K_I in dB	K_I in dB	ΔL_{Amax} in dB	K_I in dB	ΔL_{Amax} in dB
Großbühnen – Main Acts	4	4,6	12,8	3	10
Großbühnen – Moderation & Musik		6,8	23,0	6	20
Kleinbühnen		4,8	12,6	3	10
Klassikbühnen		5,0	17,0	4	15
Freiluftkino	–	6,2	20,1	5	18

Für Konzerte, bei denen eine außergewöhnlich hohe Publikumsbeteiligung in Form von Mitsingen zu erwarten ist, sollten für Prognoseberechnungen in größeren Entfernungen weiterhin die etwas höheren Werte der Ergänzung zur SFLS 2019 herangezogen werden (siehe hierzu Abschnitt 4.3 und 4.4).

In Einzelfällen kann es sinnvoll sein, von diesen Ansätzen abzuweichen. Elektro-Konzerte ohne Live-Gesang weisen meist einen deutlich geringeren Dynamikumfang als andere Veranstaltungen auf. Ob im Einzelfall auf Grundlage der Gegebenheiten geringere Werte für den Impulszuschlag und den Spitzenpegel angesetzt werden können, ist gutachterlich zu prüfen. Im Rahmen der aktuellen Messkampagne kann eine genrespezifische Einordnung aufgrund der geringen Anzahl an Messdaten nicht vorgenommen werden.

⁶ Bei Degenkolb [16] wird eine Abnahme von 0,5 dB je 1000 m sowie ein anzuwendender Mindestwert von $K_I = 3$ dB benannt. Diesen Prognoseansätzen liegen jedoch expressis verbis keine detaillierten Untersuchungen zugrunde. Die Empfehlungen liegen auf der sicheren Seite, und sind nicht als widersprüchlich zu den nunmehr getätigten Vorschlägen anzusehen.

3.2 Richtcharakteristik

Schallimmissionsprognosen für Open-Air-Veranstaltungen werden in unterschiedlichen Planungsphasen durchgeführt: In manchen Fällen besteht bei Veranstaltungsfirmen bereits ein konkretes Veranstaltungskonzept. Hierfür liegt dann oftmals bereits eine Beschallungsplanung durch die beteiligte Fachfirma vor. Dann können mittels der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Softwaretools Schallimmissionsprognosen für die konkrete Planung durchgeführt werden. In anderen Fällen kann es im Planungsprozess jedoch auch vorkommen, dass genaue Randbedingungen noch nicht feststehen. Mitunter sollen Standorte auch grundsätzlich auf ihre Eignung für eine Open-Air-Veranstaltung bewertet werden, ohne dass eine konkrete Planung besteht. Immissionsprognosen werden hier eher im Sinne einer „Machbarkeitsstudie“ durchgeführt, wobei neben der zuständigen Behörde meist auch externe Gutachter hinzugezogen werden. Ohne eine konkrete Beschallungsplanung sind bei der Einschätzung der schalltechnischen Situation Prognoseansätze, wie die der SFLS, heranzuziehen. Für eine objektive Einschätzung sind valide Daten zu üblichen Beschallungsanlagen für die entsprechende Bühnengröße erforderlich. Ziel der aktuellen Untersuchungen war es, wie auch schon in den Veröffentlichungen von 2019 und 2022, verallgemeinerte Richtcharakteristiken zu ermitteln, die die gebräuchlichen Konfigurationen von Beschallungsanlagen hinreichend gut abbilden. Diese können für Schallimmissionsprognosen genutzt werden, wenn keine genaueren Daten verfügbar sind.

3.2.1 Line-Arrays

Verallgemeinerte Richtcharakteristiken für Line-Arrays (Mitten-/Hochtonbereich) wurden im Hinblick auf die Prognoseansätze der SFLS 2019 bzw. 2022 ermittelt, und können weiterhin als den Stand der Technik repräsentierend angesehen werden. Sie liegen in Form von XHN-Daten für den Frequenzbereich 100 Hz bis 10 kHz vor.

Der Frequenzgang moderner Line-Arrays reicht jedoch auch teilweise bis deutlich unter 100 Hz. Je nach Einstellung der Beschallungsanlage kann somit auch ein großer Teil der tieffrequenten Schallenergie über die Line-Arrays abgegeben werden. In diesem Fall werden die Trennfrequenzen zwischen den Line-Arrays und Subwoofern bei niedrigeren Werten von 60 bis 80 Hz angesetzt. Eine generelle Einordnung der Richtwirkung von Line-Arrays im tieffrequenten Bereich ohne eine konkrete Planung ist jedoch kaum möglich, da aufgrund der großen Abstände der Arrays zueinander sich hier starke Interferenzmuster ausbilden. Zur sicheren Seite sollte hier für überschlägige Prognosen eine kugelförmige (omnidirektionale) Richtwirkung angenommen werden. Liegen für einzelne Terzen in einer XHN-Datei keine Daten vor, wird die Richtwirkung für diese Frequenzbereiche mit Werten von 0 dB besetzt. Die 2022 ermittelten mittleren Richtcharakteristiken sind somit auch in diesem Fall anwendbar.

3.2.2 Subwoofer

Im Zuge der aktuellen Untersuchungen sollten verallgemeinerte Richtcharakteristiken für komplexe Subwoofer-Arrays (Tieftonbereich) ermittelt werden. Die Simulation erfolgte in der durch die vergangenen Untersuchungen bewährten Vorgehensweise. Als Ausgangspunkt wurden durch Befragungen von Veranstaltern, Beschallungsplanern und Bühnenverleihern sowie anhand konkreter Planungsunterlagen repräsentative Subwoofer-Anordnungen ermittelt. Daraufhin wurde eine Systematik entwickelt, um die Ergebnisse für typischen Beschallungssituationen zusammenzufassen.

Omnidirektionale und gerichtete Einzelsysteme

Bei Betrachtungen der Richtwirkung sollte vorerst unterschieden werden, ob es sich bei den eingesetzten Einzelsystemen um ungerichtet (omnidirektional , kugelförmig) oder gerichtet (nierenförmig) abstrahlende Subwoofer handelt. Als Ausgangspunkt der Simulation wurde deshalb ein Subwoofer mit zwei integrierten Treibern gewählt.⁷ Durch verschiedentliche Ansteuerung der beiden Treiber können mit diesem Lautsprecher sowohl cardioide als auch omnidirektionale Richtwirkungen realisiert werden. In Abbildung 7 ist die in *EASE Speaker Lab* simulierte horizontale Richtwirkung⁸ des Subwoofers für den omnidirektionalen Betrieb (links) und für den Cardioid-Betrieb (rechts) dargestellt.

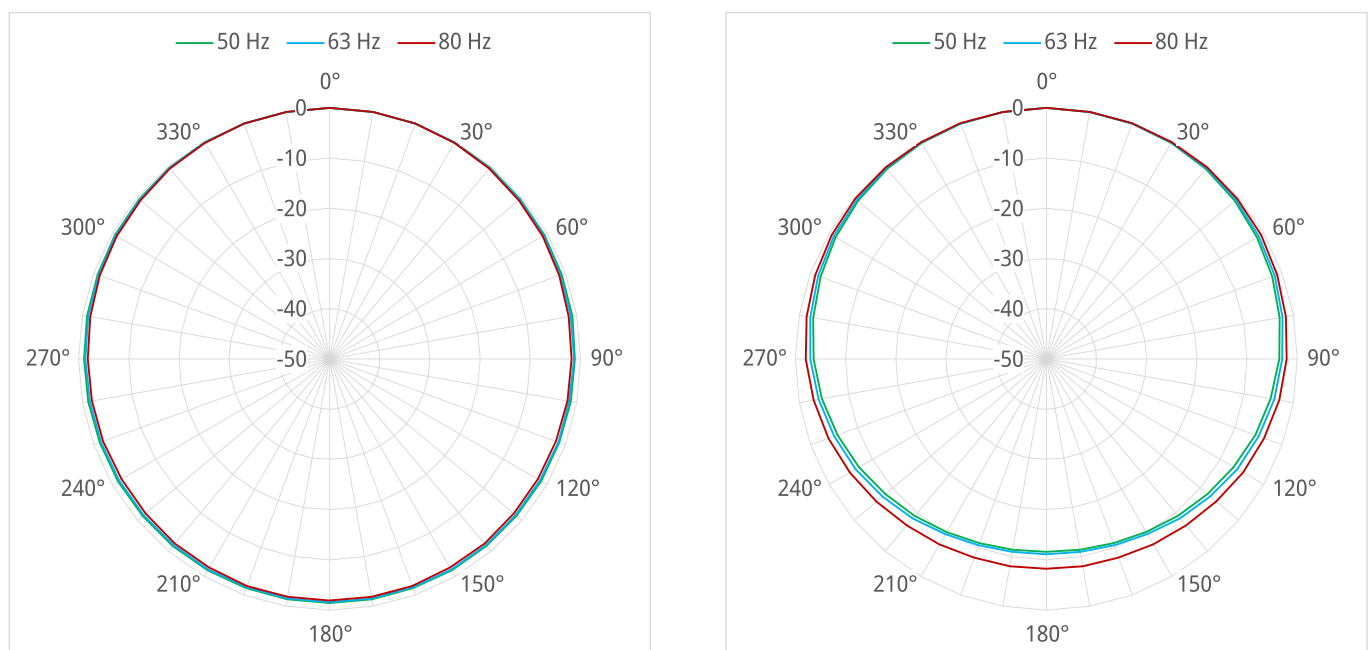


Abbildung 7: Simulierte horizontale Richtwirkung eines Subwoofers im omnidirektionalen Betrieb (links) und im Cardioid-Betrieb (rechts)

⁷ Subwoofer-Referenztyp: TW Audio Vera S32 (Modi Omni/Cardioid, Treiber: 18" vorn, 14" hinten)

⁸ In diesem Kapitel werden lediglich die horizontalen Richtwirkungen dargestellt. Für einen Großteil der Anordnungen sind die resultierenden Richtwirkungen rotationssymmetrisch.

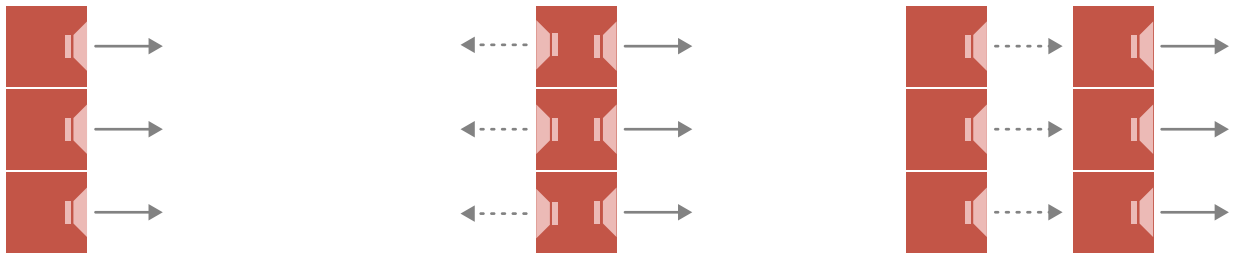


Abbildung 8: Übliches Stacking von Subwoofern –omnidirektional (links); mit Cardioid-Lautsprechern (Mitte); End-Fire-Anordnung (rechts)

Eine vergleichbare Absenkung des Pegels entgegen der Hauptabstrahlrichtung kann auch durch eine sogenannte End-Fire-Aufstellung erzielt werden. Dazu werden zwei oder mehr Subwoofer bzw. Subwoofer-Stacks hintereinander angeordnet und die Verzögerungszeit der vorderen Systeme gemäß dem Abstand zu den hinteren Systemen angepasst. Um End-Fire-Anordnungen insgesamt einordnen zu können, wurde die Richtwirkung für eine Aufstellung mit zwei omnidirektionalen Subwoofern in einem Abstand von 1 Meter (Abbildung 9, links) und 1,5 Metern (Abbildung 9, rechts) zueinander simuliert. Der vordere Lautsprecher wurde jeweils gemäß dem Treiberabstand mit einer Verzögerungszeit von $t_s = 2,9$ bzw. 4,4 ms versehen.

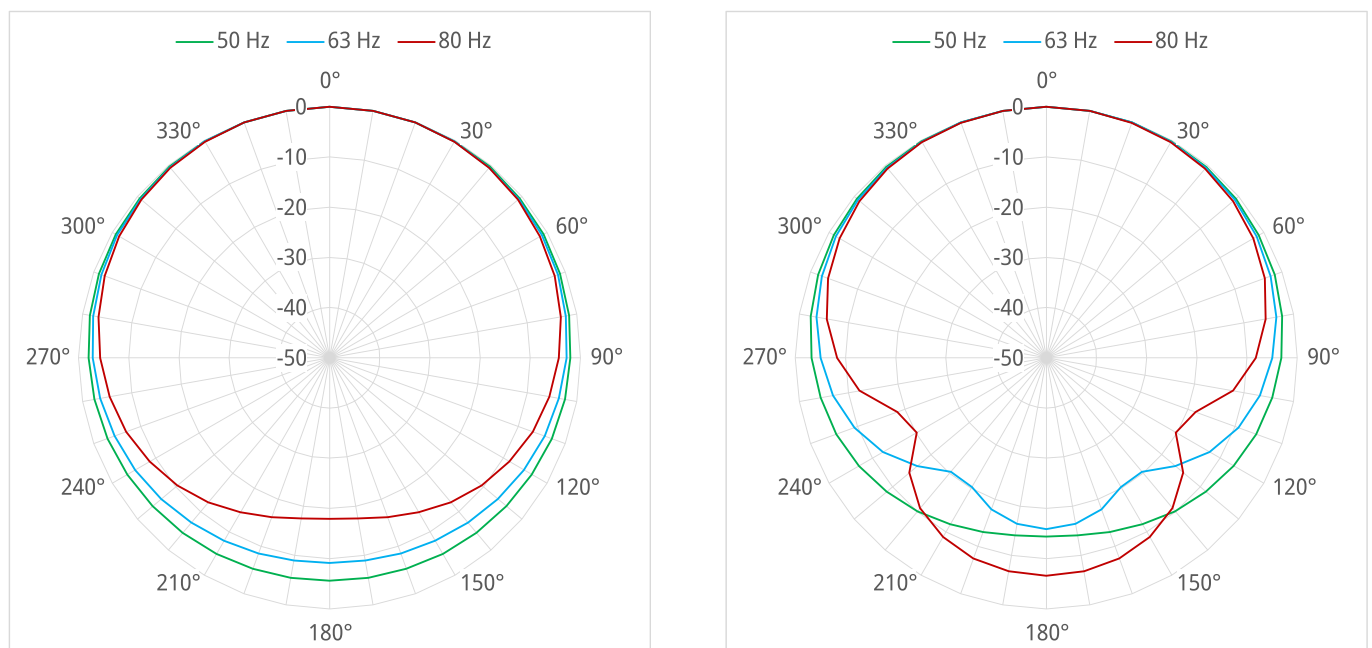


Abbildung 9: Simulierte horizontale Richtwirkung einer End-Fire-Aufstellung mit zwei hintereinander angeordneten omnidirektionalen Subwoofern in 1 Meter (links) und 1,5 Metern Abstand (rechts)

Aus den Simulationsergebnissen für End-Fire-Anordnungen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Richtwirkung von End-Fire-Setups jenseits der Hauptabstrahlrichtung ist stark frequenzabhängig. Dabei ergeben sich im tieffrequenten Bereich die größten Auslöschungen bei einer Wellenlänge, die einem Viertel des Abstandes zwischen den Subwoofern entspricht.
- Geht man von einem Frequenzschwerpunkt der Subwoofer zwischen 50 und 63 Hz aus, ist ein Abstand von 1,5 Metern zwischen den Subwoofern hinsichtlich der erreichten Pegelreduktionen jenseits der Hauptabstrahlrichtung ideal. Allerdings sind in der Praxis häufig Anordnungen mit geringeren Abständen aus Platzgründen deutlich praktikabler.
- Übliche End-Fire-Anordnungen erreichen hinsichtlich der Richtwirkung jenseits der Hauptabstrahlrichtung ähnliche Pegelreduktionen wie Cardioid-Subwoofer, bzw. mitteln sich die richtungsabhängigen Unterschiede über den relevanten Frequenzbereich heraus. Bei Prognosen können für Subwoofer in End-Fire-Anordnungen ersatzweise die Richtcharakteristiken von Cardioid-Subwoofern genutzt werden.

Untersuchte Subwoofer-Anordnungen

Im Zuge der Untersuchungen wurden für die folgenden Konfigurationen jeweils für omnidirektional und gerichtet abstrahlende Einzelsysteme mittlere Richtcharakteristiken als XHN-Datei ermittelt:

- Einzellautsprecher
- Zahnlücken-Anordnung (gestackt)
 - Großbühne (z. B. Festivalbühne)
 - kleine und mittelgroße Bühne (z. B. Stadtfestbühne)

Die gewählten Konfigurationen spiegeln einen Großteil aktueller Beschallungsanlagen wider. Geflogene Subwoofer-Arrays wurden nicht betrachtet, da sie eher selten eingesetzt werden. Diese Systeme kommen zudem nur bei sehr großen Veranstaltungen vor, für die in der Regel eine konkrete Beschallungsplanung vorliegt. Für 2.2-Systeme (Rechts-Links-Aufstellung) ist eine Verallgemeinerung der Richtcharakteristik nur bedingt möglich, da aufgrund der großen Abstände der Einzelelemente die Ausbreitung stark von additiven und destruktiven Interferenzen gekennzeichnet ist. Für Prognosen wird es als praktikabel angesehen, hier zur sicheren Seite hin die Richtwirkung der Einzellautsprecher anzusetzen. Für End-Fire-Anordnungen kann ersatzweise die Richtcharakteristik von gerichtet abstrahlenden Einzelsystemen genutzt werden. Für omnidirektionale Einzellautsprecher kann die Richtwirkung unter 100 Hz vernachlässigt werden, weshalb grundsätzlich für diese keine Richtwirkungskorrektur erforderlich ist. Der Vollständigkeit halber werden die simulierten XHN-Richtwirkungsdaten dennoch zur Verfügung gestellt.

Für die untersuchten Zahnlücken-Konfigurationen wurde jeweils ein Datensatz typischer Setups simuliert, wobei die Anzahl an Subwoofer-Stacks und der Abstand zwischen den Stacks variiert wurde. Für kleine und mittelgroße Bühnen wurde weiterhin ein Öffnungswinkel von 0° (gerade Aufstellung) und für Großbühnen 60° (gecurvte Aufstellung bzw. Zeitverzögerung der Einzelsysteme) gewählt. Diese Abstraktion erfolgte in Absprache mit Beschallungsplanern im Hinblick auf die typische Lage und Form der zu beschallenden Publikumsfläche für die verschiedenen Bühnengrößen. Für die Zahnlücken-Anordnungen wurden Richtcharakteristiken für die folgenden Setups simuliert:

Tabelle 4: Simulierte Setups in Zahnlücken-Anordnung für kleine und mittelgroße Bühnen

		Anzahl an Subwoofer-Stacks			
		4	6	8	10
Abstand zw. Stacks	1,0 m		x	x	x
	1,25 m		x	x	x
	1,5 m	x	x	x	
	2,0 m	x	x		
	2,5 m	x			

Tabelle 5: Simulierte Setups in Zahnlücken-Anordnung für Großbühnen

		Anzahl an Subwoofer-Stacks				
		8	10	12	14	16
Abstand zw. Stacks	1,5 m		x	x	x	x
	2,0 m	x	x	x	x	x
	2,5 m	x	x	x	x	
	2,75 m	x	x	x		
	3,0 m	x	x			

2022 wurden zur Ermittlung der verallgemeinerten Richtcharakteristiken von Line-Arrays die simulierten Datensätze der Einzelkonfigurationen gemittelt bzw. der Maximalwert gebildet. Aufgrund der großen Variabilität von möglichen Anordnungen im Tieftonbereich sowie um Interferenzmuster (Side Lobes) nicht zu stark überzubewerten, wurde sich bei den Zahnlücken-Anordnungen für eine Auswertung anhand des 90-Perzentils entschieden. Die resultierenden Richtcharakteristiken spiegeln somit die Verringerungen der Schallabstrahlung abseits der Hauptabstrahlrichtung wider, welche durch 90 % der Subwoofer-Anordnungen erreicht werden. Durch diese Art der Auswertung liegen die Ergebnisse einerseits auf der sicheren Seite, andererseits schätzen sie die typischerweise erzielte Richtwirkung gut ab.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Richtwirkungen der ermittelten XHN-Dateien als Polardigramme für die horizontale Ebene dargestellt.

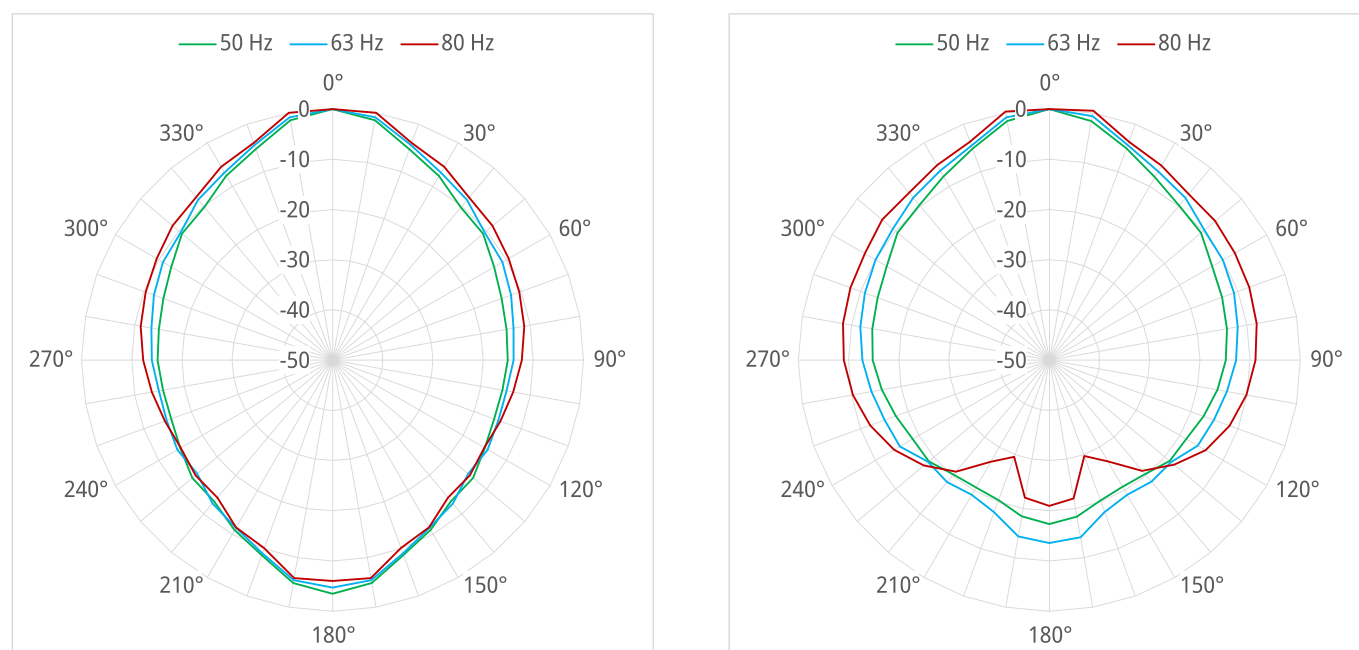


Abbildung 10: Simulierte horizontale Ersatzrichtwirkung von einem Zahnlücken-Subwoofer-Array für eine Großbühne mit omnidirektional (links) und gerichtet abstrahlenden Einzelsystemen (rechts)

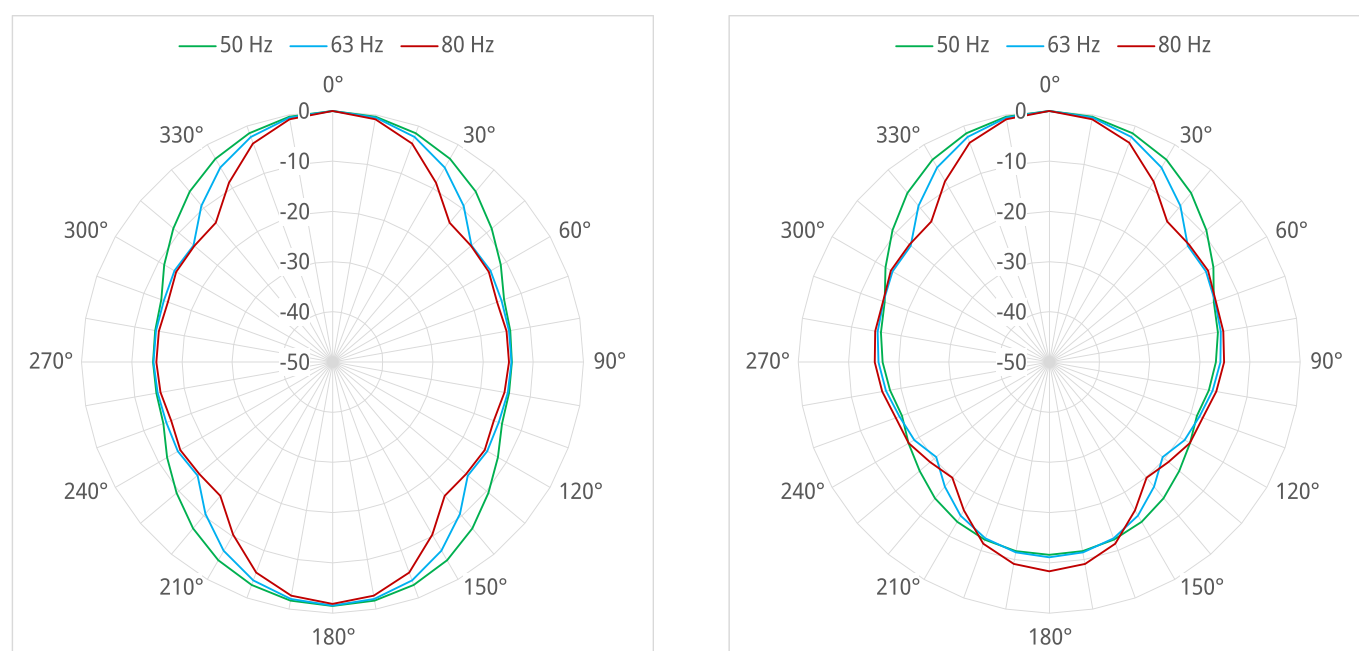


Abbildung 11: Simulierte horizontale Ersatzrichtwirkung von einem Zahnlücken-Subwoofer-Array für eine kleine oder mittelgroße Bühne mit omnidirektional (links) und gerichtet abstrahlenden Einzelsystemen (rechts)

Die Richtwirkungen für die Einzelsysteme (omnidirektional und cardioid) sind in Abbildung 7 (Seite 29) dargestellt.

Aus den gemittelten Richtwirkungen lässt sich Folgendes ableiten:

- Durch Zahnücken-Anordnungen wird im Allgemeinen die horizontale Schallabstrahlung insbesondere seitlich zur Hauptabstrahlrichtung (90° bzw. 270°) deutlich verringert. Die erreichte Pegelreduktion ist stark abhängig von der Aufstellung und dem Curving bzw. dem Öffnungswinkel des Arrays.
- Durch den Einsatz von gerichteten Einzelsystemen bzw. Anordnungen (z. B. End Fire) lassen sich deutlich stärkere Dämpfungswerte entgegen der Hauptabstrahlrichtung realisieren.
- Da die Subwoofer-Arrays auf Großbühnen im Regelfall mit größeren Öffnungswinkeln (gecurvte Aufstellung bzw. Zeitverzögerung der Einzelsysteme) betrieben werden, ergeben sich hier maximale Dämpfungswerte nicht seitlich bei 90° bzw. 270° , sondern eher leicht „nach hinten“ verschoben bei 120° bzw. 240° . Daraus lässt sich ableiten, dass je größer der Öffnungswinkel gewählt wird, sich entsprechend die maximalen Dämpfungswerte in Richtung von 180° verschieben. Durch eine Anpassung des Öffnungswinkels, der Breite der zu beschallenden Fläche bzw. der Ausrichtung der Bühne wird somit eine gezielte Pegelreduktion im tieffrequenten Bereich in Richtung der maßgeblichen Immissionsorte möglich.
- Für kleine und mittelgroße Bühnen liegen die maximale Dämpfungswerte durch die geringeren Öffnungswinkel bei 90° . Für eine gezielte Pegelreduktion im tieffrequenten Bereich sollten demnach Beschallungsanlagen orthogonal zu den maßgeblichen Immissionsorten ausgerichtet werden.

4 Empfehlungen für die Prognose

4.1 Schallleistungspegel

Die Empfehlungen aus dem Jahr 2019 zur Prognose des Schallleistungspegels werden prinzipiell beibehalten. Es wird empfohlen, den Schallleistungspegel für Beschallungsanlagen anhand folgender Gleichung zu ermitteln. Es handelt sich hierbei um eine einheitliche Formel für alle Bühnenarten, welche die bisherigen absoluten Korrekturwerte ersetzt.

$$L_{WA} = L_{VA} + K_B + K_G + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{A_0}\right) \text{ dB} \quad (1)$$

L_{WA} Schallleistungspegel in dB(A)

L_{VA} Versorgungspegel in dB(A)

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

$L_{VA} = 86 \text{ dB(A)}$ für Kleinbühnen

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

K_B Korrektur für verschiedene Bühnen- und Veranstaltungsarten in dB

$K_B = 8 \text{ dB}$ für Großbühnen und Kleinbühnen

$K_B = 12 \text{ dB}$ für Klassikbühnen

K_G Korrektur für verschiedene Musikgenres bei Freiluftkonzerten in dB

$K_G = -4 \text{ dB}$ für Genrekategorie 1

$K_G = 0 \text{ dB}$ für Genrekategorie 2 und Klassikbühnen

$K_G = +4 \text{ dB}$ für Genrekategorie 3

A zu beschallende Fläche in m^2

$A \geq 500 \text{ m}^2$ für Großbühnen

$A < 500 \text{ m}^2$ für Kleinbühnen

A_0 Bezugsfläche = 1 m^2

Der Übergang von Groß- zu Kleinbühnen ist ab einer zu beschallenden Fläche von $A = 500 \text{ m}^2$ bzw. ab einer Zuschauerkapazität von 1000 sitzenden oder 2000 stehenden Personen definiert. Veranstaltungen der Genrekategorie 1 sind immer als Kleinbühnen zu betrachten. Für Klassikbühnen und für Veranstaltungen, bei denen keine genauen Angaben zum Genre gemacht werden können, ist ein Korrekturwert $K_G = 0 \text{ dB}$ (Genrekategorie 2) einzusetzen. Treten auf einer Bühne Musikgruppen verschiedener Genres auf, ist für die Gesamtprognose stets die immissionstechnisch kritischere Genrekategorie zu verwenden.

Genrekategorie 1 beschreibt Konzerte, auf denen hauptsächlich Jazz und akustische Musik gespielt wird. Die Besetzung kann dabei von Einzelmusikern (Singer-Songwriter ohne Band, Solisten) über kleine Ensembles (Bands, Blaskapellen, ...) bis hin zu größeren Musikgruppen (Big Band, ...) reichen. Charakteristisch für diese Genrekategorie ist, dass akustische Instrumente zum Einsatz kommen und deren Klangcharakter im Signalprozess nicht gravierend verändert wird.

Bei Konzerten der **Genrekategorie 2** kommen 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. Zu dieser Kategorie zählen Darbietungen von Pop- und klassischer Rockmusik, aber auch von Singer/Songwritern mit Band.

Genrekategorie 3 beschreibt die Beschallung charakteristisch lauter Genres oder solcher, bei der vorproduzierte Einspieler (Backing Tracks/Playback) zum Einsatz kommen. Dazu zählen unter anderem Elektro, Techno, Hip-Hop, Schlager, moderne Rockmusik, Metal oder Punk.

4.2 Frequenzspektren

Für Prognosen von Open-Air-Veranstaltungen ist es in der Regel ratsam, die Berechnungen frequenzabhängig durchzuführen. Als Ausgangspunkt werden die gemittelten Terz-Emissionsspektren der Ergänzung zur SFLS aus dem Jahr 2019 für Großbühnen, Kleinbühnen – Rock/Pop und Kleinbühnen – Klassik/Jazz/Welt empfohlen (siehe Abbildung 12, Tabelle A 1 auf Seite 45).

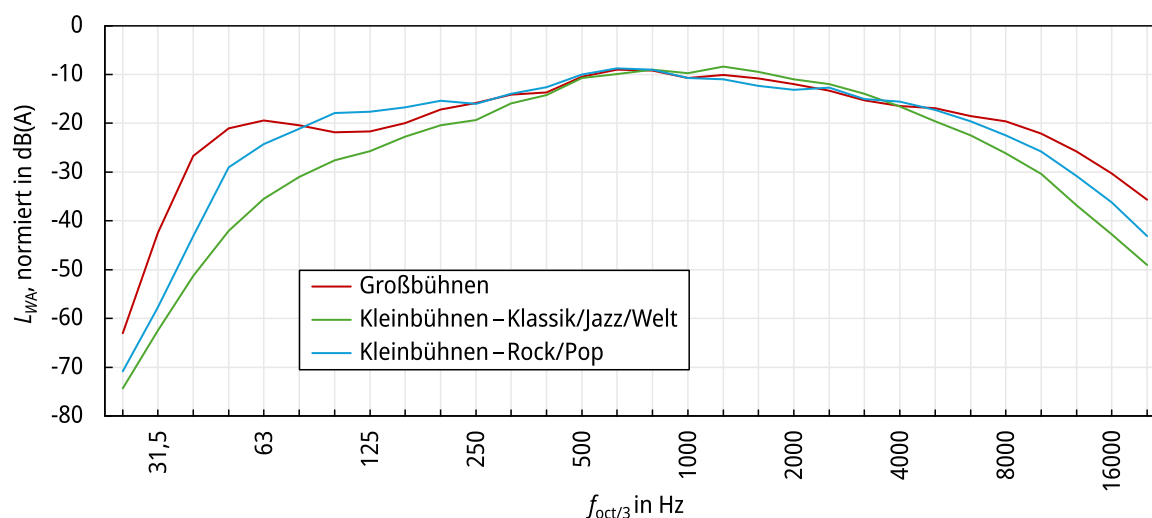


Abbildung 12: Mittlere Terzspektren für Groß- und Kleinbühnen, A-bewertet, normiert auf Summenpegel 0 dB(A)

Sind genauere Prognosen mit separaten Schallquellen für Hoch-/Mitteltonlautsprecher und Subwoofer notwendig, ist das Frequenzspektrum energetisch auf diese aufzuteilen. Für moderne Beschallungsanlagen liegen die Trennfrequenzen üblicherweise zwischen 63 und 125 Hz. Als Ausgangspunkt werden hier die aufgeteilten gemittelten Terz-Emissionsspektren der Ergänzung zur SFLS 2019 empfohlen (siehe Tabelle A 2 auf Seite 46).

Im Einzelfall kann es ratsam sein, für Prognosen ein genrespezifisches Spektrum zu verwenden, wenn detailliertere Informationen zur Verfügung stehen. Dies betrifft insbesondere Genre wie Elektro sowie Metal und Punk. Hierfür bieten sich als Grundlage beispielsweise die Datensätze der TH MITTELHESSEN und von D&B AUDIOTECHNIK an (siehe Tabelle A 3 bis Tabelle A 5 auf den Seiten 47 bis 49). In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass der Frequenzbereich ab 4 kHz für Fernfeldprognosen oft nicht relevant ist. Aus diesem Grund ist auch die Verwendung von hinsichtlich der Luftabsorption nicht korrigierten Spektren prinzipiell möglich.

4.3 Zuschläge

Die aktuellen Untersuchungen haben gezeigt, dass an Immissionsorten in größerer Entfernung zur Beschallungsanlage geringere Werte für den Impulzzuschlag K_I zu erwarten sind. Für Fernfeldprognosen wird deshalb empfohlen, die von der Entfernung von der Schallquelle zum Immissionsort s_m abhängigen Werte aus Tabelle 6 zu verwenden.

Tabelle 6: Entfernungsabhängiger Zuschlag für Impulshaltigkeit K_I für verschiedene Bühnenarten

Bühnenart	K_I in dB	
	$s_m < 500$ m	$s_m \geq 500$ m
Großbühnen	4	3
Großbühnen (Moderation & Musik)	7	6
Kleinbühnen	4	3
Klassikbühnen	5	4
Freiluftkino	6	5

Die Werte für Entfernungen $s_m < 500$ m ergeben sich aus den Messergebnissen der Ergänzung zur SFLS 2019. Diese am Rande der Zuschauerfläche ermittelten Werte wurden hier abgerundet, da die aktuellen Untersuchungen gezeigt haben, dass die Werte für den Impulzzuschlag K_I für Immissionsorte in der Umgebung des Veranstaltungsgeländes bei aktuellen Veranstaltungen generell geringer ausfallen. Die Werte für größere Entfernungen $s_m \geq 500$ m ergeben sich aus den aktuellen Erkenntnissen dazu, dass die Impulshaltigkeit mit steigender Entfernung abnimmt (siehe hierzu auch Kapitel 3.1.3).

Für Konzerte, bei denen eine außergewöhnlich hohe Publikumsbeteiligung in Form von Mitsingen zu erwarten ist, sollten für Prognoseberechnungen in größeren Entfernungen weiterhin die Werte der Ergänzung zur SFLS 2019 bzw. aus den Spalten für „ $s_m < 500 \text{ m}$ “ in Tabelle 6 herangezogen werden. Alternativ kann das Publikumsgeräusch auch als separate Quelle, zum Beispiel mit den Emissionsansätzen der VDI 3770, modelliert werden.

Grundsätzlich ist bei der Bildung des Beurteilungspegels nach TA Lärm, LAI-Freizeitlärmrichtlinie oder Sportanlagenlärmschutzverordnung (18. BImSchV) auch ein Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit zu berücksichtigen. Dessen Höhe ist entsprechend den Pegelverhältnissen und örtlichen Gegebenheiten mit 0 dB, 3 dB oder 6 dB anzusetzen.

4.4 Spitzenpegel

Die aktuellen Untersuchungen haben gezeigt, dass an Immissionsorten in größerer Entfernung zur Beschallungsanlage geringere Werte für das Scheitelmaß ΔL_{Amax} zu erwarten sind. Für Fernfeldprognosen wird deshalb empfohlen, für die Bestimmung des Spitzenpegels die von der Entfernung von der Schallquelle zum Immissionsort s_m abhängigen Werte aus Tabelle 7 heranzuziehen.

Tabelle 7: Entfernungsabhängige Werte für das Scheitelmaß ΔL_{Amax} verschiedener Bühnenarten

Bühnenart	ΔL_{Amax} in dB	
	$s_m < 500 \text{ m}$	$s_m \geq 500 \text{ m}$
Großbühnen	12	10
Großbühnen (Moderation & Musik)	22	20
Kleinbühnen	12	10
Klassikbühnen	17	15
Freiluftkino	20	18

Analog zur Impulshaltigkeit ergeben sich die Werte für Entfernungen $s_m < 500 \text{ m}$ aus den gerundeten Messergebnissen im Publikumsbereich der Ergänzung zur SFLS 2019. Die Werte für größere Entfernungen $s_m \geq 500 \text{ m}$ sind auf die aktuellen Erkenntnisse zur Abnahme des Scheitelmaßes mit der Entfernung zurückzuführen. Die Angaben aus Tabelle 7 liegen dabei gegenüber den Messergebnissen immer noch auf der sicheren Seite.

Für einen Immissionsort ergibt sich der Spitzenpegel aus dem äquivalenten Schalldruckpegel (ohne Zuschläge) und dem entfernungsabhängigen Scheitelmaß:

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

L_{AFmax} A-bewerteter Spitzen-Schalldruckpegel

L_{Aeq} A-bewerteter äquivalenter Schalldruckpegel (ohne Zuschläge)

ΔL_{Amax} Scheitelmaß

In vielen Fällen, wenn die Entfernungsabhängigkeit des Scheitelmaßes keine Rolle spielt, ist es bei der Schallimmissionsprognose praktikabel, das Scheitelmaß im Rechenprogramm emissionsseitig aufzuschlagen. In diesem Fall ergibt sich der Spitzen-Schallleistungspegel der Beschallungsanlage L_{WAmax} durch Addition des mittleren Schallleistungspegels L_{WA} – ebenso ohne Zuschläge – mit dem Scheitelmaß ΔL_{Amax} .

4.5 Richtcharakteristik

Sind keine genauen Angaben zur Beschallungsanlage gemacht, können die mittleren Richtwirkungen der SFLS 2022 für konventionelle Beschallungsanlage (2-Punkt-Beschallung) sowie für Line-Arrays im Mittel- und Hochtonbereich unverändert übernommen werden. Für Prognosen werden auf der Website des LfULG XHN-Dateien für die folgenden Bühnenarten zur Verfügung gestellt:

- Großbühne flach
- Großbühne Arena
- Mittlere Bühne flach
- Kleinbühne flach
- Kleinbühne Tribüne

Im Zuge der aktuellen Untersuchungen wurden ergänzend für die folgenden Subwoofer-Anordnungen jeweils für omnidirektional und gerichtet abstrahlende (cardioide) Einzelsysteme mittlere Richtcharakteristiken als XHN-Dateien ermittelt:

- Einzellautsprecher
- Zahnücken-Anordnung (gestackt)
 - Großbühne (z. B. Festivalbühne)
 - kleine und mittelgroße Bühne (z. B. Stadtfestbühne)

Für omnidirektionale Einzellautsprecher kann die Richtwirkung unter 100 Hz vernachlässigt werden, weshalb grundsätzlich für diese keine Richtwirkungskorrektur erforderlich ist. Der Vollständigkeit halber werden die simulierten XHN dennoch zur Verfügung gestellt. Für End-Fire-Anordnungen kann ersatzweise die Richtcharakteristik von gerichtet abstrahlenden Einzelsystemen genutzt werden. Für 2.2-Systeme (Links-Rechts-Aufstellung) wird empfohlen zur sicheren Seite die Richtwirkung von Einzellautsprechern anzusetzen. Bei geflogenen Subwoofer-Arrays sollte möglichst mit einer konkreten Planung gerechnet werden, da hier aufgrund der großen Abstände der Einzelelemente die Schallabstrahlung stark von additiven und destruktiven Interferenzen gekennzeichnet sein kann.

Grundsätzlich handelt es sich bei den Datensätzen um verallgemeinerte Richtcharakteristiken, welche durch die Bestimmung des 90-Perzentils einen überschlägigen Ansatz darstellen. Diese sind vor allem in den Fällen heranzuziehen, wo noch keine konkrete Beschallungsplanung vorhanden ist oder keine Details zu dieser bekannt sind. Für eine weiterführende, genauere Prognose sollte die Richtwirkung anhand der konkreten Beschallungsplanung bestimmt werden.

4.6 Vorgehensweise für die Prognose

Die hier empfohlene Vorgehensweise ist mit verschiedenen gängigen Schallausbreitungsberechnungsprogrammen umsetzbar. Unterschiede zwischen den einzelnen Programmen sollen hier jedoch nicht im Detail betrachtet werden, insbesondere die Art und Weise der Verknüpfung von Richtwirkungsdateien (z. B. als tieffrequent erweiterte XHN-Datei).

Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Verfahrensweisen zu unterscheiden:

- Immissionsberechnung für eine Veranstaltung mit konkreter Beschallungsplanung
- Immissionsberechnung für eine Veranstaltung ohne konkrete Beschallungsplanung

Sofern für eine Veranstaltung eine konkrete Beschallungsplanung vorliegt, sollte die Immissionsberechnung mit den geplanten Parametern vorgenommen werden, da diese die Emissionen genauer beschreiben als ein abstrakter Ansatz. Allerdings ist zu beachten, dass sich die Beschallungsplanung zum Zeitpunkt der Schallimmissionsprognose im Detail von der tatsächlichen Beschallungskonfiguration vor Ort unterscheiden kann.

Für eine solche konkrete Beschallungsplanung kann die für die Immissionsorte relevante Richtwirkung im Berechnungsprogramm oder einem externen Programm ermittelt werden. Die Ansätze unterscheiden sich hierfür z. B. bei *IMMI* (APS-Ansatz) und *SoundPlan* (SDE-Ansatz) – Untersuchungen zeigen jedoch, dass beide Ansätze im Fernfeld ausreichend genaue Ergebnisse liefern [17, 18, 19].

Für eine konkrete Planung können im Regelfall auch Versorgungspegel am FOH oder einem anderen Referenzpunkt sowie ein zugehöriges Spektrum vorgegeben werden.

Sind keine genauen Angaben zur Beschallungsplanung verfügbar, dann sollte auf die mit dieser bzw. den vorangegangenen Untersuchungen bereitgestellten Ersatzrichtwirkungen zurückgegriffen werden. Die Emissionspegel (Schallleistungspegel der Ersatzschallquellen) sind dabei nach Abschnitt 4.1 zu bestimmen und die Spektren nach Abschnitt 4.2.

Zu den zeitlichen Parametern Impulszuschlag und Scheitelmaß wird auf die Ansätze nach den Abschnitten 4.3 und 4.4 verwiesen. Sofern Genaueres zum Genre und der Umgebungssituation bekannt ist, können hier spezifische Werte angesetzt werden. Hinsichtlich der Spitzenpegel und Zuschläge kann eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Immissionsorte sinnvoll sein.

Grundsätzlich kann die Immissionsprognose umso detaillierter sein, je genauer die Angaben zur geplanten Veranstaltung, deren Genre, geplanter Lautstärke im Versorgungsbereich sowie der Umgebungsbedingungen an den Immissionsorten sind.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei allen Projektbeteiligten ausdrücklich für die engagierte Zusammenarbeit bedanken. Wir bedanken uns insbesondere bei Dr. Stefan Feistel von AFMG TECHNOLOGIES und Tobias Goldmann von TW AUDIO, welche im Hinblick auf die Simulation der Richtcharakteristiken von Subwoofern ihre Fachexpertise eingebracht haben und maßgeblich dafür verantwortlich sind, dass wir mittlere Richtwirkungen zur Verfügung stellen können. Unser Dank gebührt zudem Lukas Roskosch von der TECHNISCHEN HOCHSCHULE MITTELHESSEN, welcher uns einen großen Datensatz an Messdaten zur Verfügung gestellt und somit die Ergebnisse dieser Untersuchung maßgeblich mitgeprägt hat. Abschließend möchten wir uns bei Daniel Belcher von D&B AUDIOTECHNIK und Bela Voigt bedanken, welche uns mit ihrem Wissen rund um Beschallungsanlagen einen praxisnahen Blick auf die aktuellen Entwicklungen ermöglichten.

Literaturverzeichnis

- [1] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), *Sächsische Freizeitlärmstudie*, 2002.
- [2] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), *Sächsische Freizeitlärmstudie*, 2006.
- [3] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.), *Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie*, 2019.
- [4] Akustik Bureau Dresden, „Bericht ABD 43719-01/22 zur Ermittlung von exemplarischen 3D-Richtcharakteristiken für Line Arrays,“ 2022.
- [5] D. Belcher und D. Zollitsch, „Methodology of the SDE-Standard to Calculate Sound Systems at any Distance utilizing Decoherence Effects,“ in *Proceedings of DAS|DAGA 2025*.
- [6] D. B. Moore, E. Corteel, Y. G. Gicquel, T. Mouterde, J. Schaal und D. Belcher, „An improved workflow for simulating loudspeaker systems in outdoor environments using the System Design Exchange approach,“ *Journal of the Audio Engineering Society*, 2025.
- [7] S. Feistel, J. Blaul, T. Goldmann und A. Nicht, „Sound immission modeling of open-air sound systems,“ *Journal of the Audio Engineering Society*, 2024.
- [8] T. Goldmann, S. Feistel, J. Blaul und A. Nicht, „Modelling and Verification of Low-Frequency Sound Systems in the Application of Noise Predictions,“ *Journal of the Audio Engineering Society*, 2025.
- [9] J. Blaul, S. Feistel, T. Goldmann und A. Nicht, „Standard-Compliant Sound Immission Forecasts for Open-Air Music Events,“ in *Proceedings of DAS|DAGA 2025*.
- [10] L. Roskosch, B. Bernschütz, T. Meffert, J. Latz, D. Styra und F. Dirla, „Untersuchung von Schallemissions- und Immissionswerten bei Open-Air Veranstaltungen,“ 2017-2025.
- [11] M. J. Hove, P. Vuust und J. Stupacher, „Increased levels of bass in popular music recordings 1955–2016 and their relation to loudness,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019.
- [12] D. J. Cameron, D. Dotov, E. Flaten, D. Bosnyak, M. J. Hove und L. J. Trainor, „Undetectable very-low frequency sound increases dancing at a live concert,“ *Current Biology*, pp. R1201-R1225, 2022.
- [13] DIN 15905-5:2022-07, *Veranstaltungstechnik – Tontechnik - Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemissionen elektroakustischer Beschallungstechnik*.
- [14] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI), *Freizeitlärmrichtlinie*, Stand 06.03.2015.
- [15] TA Lärm, *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)* v. 26.08.1998, GMBL 49 (1998), Nr. 26 v. 28.08.1998, S. 503; Zul.geä.d. VV v.1.6.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5).
- [16] Sachverständigenbüro Dr. Degenkolb für Lärmschutz und Umweltmanagement, „Untersuchungen zur Prognose der Lärmimmissionen großer musikalischer Freiluftveranstaltungen und zu Maßnahmen zur Minderung der von ihnen ausgehenden Lärmbelastigungen,“ im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Mecklenburg-Vorpommern (Überarbeitete Fassung April 2010), 2010.

- [17] J. Blaul, S. Feistel, T. Goldmann und A. Nicht, „Ein softwareübergreifender Workflow zur schalltechnischen Bewertung komplexer Beschallungssysteme im Rahmen von Immissionsprognosen,“ in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2026*.
- [18] A. Nicht, O. Gehler, M. Händel, T. Goldmann, S. Feistel und J. Blaul, „Messtechnische Validierung von Prognoserechnungen für Open-Air-Beschallungsanlagen hinsichtlich der richtungsabhängigen Schallabstrahlung,“ in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2026*.
- [19] D. Belcher, Y. G. Gicquel, D. Zollitsch und J. Schaal, „Kalibrierung von Beschallungsanlagen mit Eingangsspektren beim SDE-Verfahren, Dekohärenzfaktoren und Vergleich mit Messungen,“ in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2026*.
- [20] DIN ISO 9613-2:1999-10, *Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996)*.
- [21] DIN 45645-1:1996-07, *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 1: Geräuschemissionen in der Nachbarschaft*.
- [22] VDI 3770:2012-09, *Emissionskennwerte von Schallquellen - Sport- und Freizeitanlagen*.

Anhang

Tabelle A 1: Terzpegel-Korrekturwerte für Freiluftbühnen aus der Ergänzung zur SFLS 2019

Terzpegel-Korrekturwert $D_f^0[T]$ für den A-bewerteten Summenpegel in dB				
Frequenz	Großbühnen	Kleinbühnen Rock/Pop	Kleinbühnen Klassik/Jazz/Welt	Moderation & Musik
12,5 Hz				
16 Hz				
20 Hz				
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
1.000 Hz	-10,7	-10,7	-9,7	-9,6
1.250 Hz	-10,1	-11,0	-8,4	-11,0
1.600 Hz	-10,8	-12,3	-9,4	-10,5
2.000 Hz	-12,0	-13,1	-11,0	-11,1
2.500 Hz	-13,3	-12,7	-12,0	-12,1
3.150 Hz	-15,3	-15,0	-13,9	-11,7
4.000 Hz	-16,5	-15,6	-16,5	-14,7
5.000 Hz	-16,9	-17,3	-19,6	-18,2
6.300 Hz	-18,5	-19,6	-22,5	-20,6
8.000 Hz	-19,6	-22,5	-26,2	-21,8
10.000 Hz	-22,1	-25,8	-30,4	-22,2
12.500 Hz	-25,8	-30,8	-36,9	-27,0
16.000 Hz	-30,3	-36,2	-42,7	-28,9
20.000 Hz	-35,7	-43,1	-49,0	-32,5

**Tabelle A 2: Terzpegel-Korrekturwerte für Einzelschallquellen auf Freiluftbühnen aus der
Ergänzung zur SFLS 2019**

Terzpegel-Korrekturwert $D_f^0[T]$ für den A-bewerteten Summenpegel in dB								
Frequenz	Großbühnen		Kleinbühnen Rock/Pop		Kleinbühnen Klassik/Jazz/Welt		Moderation & Musik	
	Sub- woofer	Mittel-/ Hoch- töner	Sub- woofer	Mittel-/ Hoch- töner	Sub- woofer	Mittel-/ Hoch- töner	Sub- woofer	Mittel-/ Hoch- töner
12,5 Hz								
16 Hz								
20 Hz								
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
1.000 Hz	-71,8	-10,7	-65,8	-10,7	-78,1	-9,7	-74,1	-9,6
1.250 Hz	-76,5	-10,1	-70,5	-11,0	-82,8	-8,4	-78,2	-11,0
1.600 Hz	-83,7	-10,8	-77,7	-12,3	-90,0	-9,4	-84,9	-10,5
2.000 Hz	-93,9	-12,0	-87,9	-13,1	-99,0	-11,0	-92,7	-11,1
2.500 Hz	-99,0	-13,3	-99,0	-12,7	-99,0	-12,0	-99,0	-12,1
3.150 Hz	-99,0	-15,3	-99,0	-15,0	-99,0	-13,9	-99,0	-11,7
4.000 Hz	-99,0	-16,5	-99,0	-15,6	-99,0	-16,5	-99,0	-14,7
5.000 Hz	-99,0	-16,9	-99,0	-17,3	-99,0	-19,6	-99,0	-18,2
6.300 Hz	-99,0	-18,5	-99,0	-19,6	-99,0	-22,5	-99,0	-20,6
8.000 Hz	-99,0	-19,6	-99,0	-22,5	-99,0	-26,2	-99,0	-21,8
10.000 Hz	-99,0	-22,1	-99,0	-25,8	-99,0	-30,4	-99,0	-22,2
12.500 Hz	-99,0	-25,8	-99,0	-30,8	-99,0	-36,9	-99,0	-27,0
16.000 Hz	-99,0	-30,3	-99,0	-36,2	-99,0	-42,7	-99,0	-28,9
20.000 Hz	-99,0	-35,7	-99,0	-43,1	-99,0	-49,0	-99,0	-32,5

Tabelle A 3: Terzpegel-Korrekturwerte der zur Untersuchung des Frequenzspektrums herangezogenen Datensätze für Rock/Pop-Großbühnen (siehe Abbildung 4 auf Seite 22)

	Terzpegel-Korrekturwert D_f^0 [T] für den A-bewerteten Summenpegel in dB		
Frequenz	■ THM – Rock/Pop (2025)	■ ABD – Rock/Pop (2025)	■ d&b – Live Bands
12,5 Hz	-101,9	-98,0	
16 Hz	-93,9	-90,2	
20 Hz	-85,1	-80,7	
25 Hz	-67,8	-62,9	
31,5 Hz	-48,2	-41,6	-39,4
40 Hz	-33,8	-25,5	-27,6
50 Hz	-25,8	-18,2	-21,2
63 Hz	-24,8	-21,0	-18,2
80 Hz	-25,5	-25,3	-18,9
100 Hz	-25,5	-22,4	-20,0
125 Hz	-22,8	-21,1	-20,0
160 Hz	-18,9	-18,5	-19,3
200 Hz	-14,9	-14,9	-17,3
250 Hz	-14,3	-13,5	-15,5
315 Hz	-14,7	-11,5	-13,5
400 Hz	-13,3	-11,3	-11,7
500 Hz	-10,8	-8,9	-10,1
630 Hz	-8,7	-9,2	-9,3
800 Hz	-9,2	-9,6	-8,9
1.000 Hz	-9,9	-10,2	-9,4
1.250 Hz	-10,5	-11,1	-10,3
1.600 Hz	-10,8	-11,5	-11,6
2.000 Hz	-12,0	-13,5	-13,0
2.500 Hz	-13,1	-15,1	-14,4
3.150 Hz	-14,5	-16,7	-16,1
4.000 Hz	-16,4	-18,5	-17,8
5.000 Hz	-18,3	-21,8	-19,8
6.300 Hz	-19,9	-27,0	-22,4
8.000 Hz	-22,3	-31,3	-25,6
10.000 Hz	-25,7	-36,7	-30,5
12.500 Hz	-31,4	-44,2	-38,5
16.000 Hz	-40,5	-54,2	-52,9
20.000 Hz	-57,3	-64,0	-65,2

Tabelle A 4: Terzpegel-Korrekturwerte der zur Untersuchung des Frequenzspektrums herangezogenen Datensätze für Elektro-Großbühnen (siehe Abbildung 5 auf Seite 22)

	Terzpegel-Korrekturwert $D_f^0[T]$ für den A-bewerteten Summenpegel in dB	
Frequenz	■ THM – Electronic (2025)	□ d&b – Electronic
12,5 Hz	-94,5	
16 Hz	-88,0	
20 Hz	-77,7	
25 Hz	-60,0	
31,5 Hz	-40,8	-34,4
40 Hz	-27,4	-20,6
50 Hz	-18,9	-15,2
63 Hz	-18,8	-14,2
80 Hz	-21,5	-18,5
100 Hz	-24,5	-22,0
125 Hz	-24,0	-22,7
160 Hz	-20,8	-21,9
200 Hz	-17,0	-20,1
250 Hz	-15,6	-18,2
315 Hz	-15,6	-16,2
400 Hz	-13,2	-14,1
500 Hz	-11,6	-12,2
630 Hz	-10,3	-10,9
800 Hz	-9,5	-10,1
1.000 Hz	-9,7	-9,8
1.250 Hz	-9,4	-10,0
1.600 Hz	-9,9	-10,5
2.000 Hz	-12,0	-11,3
2.500 Hz	-12,5	-12,3
3.150 Hz	-13,8	-13,6
4.000 Hz	-15,6	-14,7
5.000 Hz	-17,7	-16,0
6.300 Hz	-19,9	-17,4
8.000 Hz	-22,1	-19,4
10.000 Hz	-26,0	-22,9
12.500 Hz	-31,1	-30,1
16.000 Hz	-39,6	-43,9
20.000 Hz	-56,4	-56,3

Tabelle A 5: Terzpegel-Korrekturwerte der zur Untersuchung des Frequenzspektrums herangezogenen Datensätze für Klassikbühnen (siehe Abbildung 6 auf Seite 23)

Frequenz	Terzpegel-Korrekturwert $D_f^0[T]$ für den A-bewerteten Summenpegel in dB	
	■ THM – Klassik (2025)	■ d&b – Klassik
12,5 Hz	-95,9	
16 Hz	-87,4	
20 Hz	-81,4	
25 Hz	-74,8	
31,5 Hz	-65,3	-66,5
40 Hz	-52,5	-59,9
50 Hz	-42,7	-52,3
63 Hz	-37,3	-43,0
80 Hz	-33,2	-38,7
100 Hz	-31,6	-32,7
125 Hz	-28,2	-31,7
160 Hz	-21,9	-28,1
200 Hz	-19,5	-23,4
250 Hz	-17,7	-21,3
315 Hz	-15,9	-16,5
400 Hz	-13,9	-12,8
500 Hz	-9,8	-11,2
630 Hz	-8,5	-10,4
800 Hz	-9,2	-8,5
1.000 Hz	-9,8	-9,8
1.250 Hz	-9,2	-9,2
1.600 Hz	-9,3	-8,6
2.000 Hz	-11,1	-10,9
2.500 Hz	-12,9	-11,3
3.150 Hz	-15,4	-14,5
4.000 Hz	-18,7	-15,8
5.000 Hz	-22,0	-19,3
6.300 Hz	-24,2	-22,6
8.000 Hz	-26,6	-27,3
10.000 Hz	-29,8	-34,5
12.500 Hz	-35,2	-39,0
16.000 Hz	-43,1	-42,0
20.000 Hz	-55,7	

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: Poststelle@lfulg.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren

Andreas Nicht, Max Händel, Oliver Gehler
Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH
Julius-Otto-Straße 13, 01219 Dresden
Telefon: + 49 351 207255-00
E-Mail: mail@abd-online.com

Redaktion

Christoph Fritzsche
Abteilung 5 / Referat 52 Immissionsschutz, Lärm
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-5209, Telefax: + 49 351 2612-5099
E-Mail: christoph.fritzsche@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis

Titelseite: Johannes Jung

Redaktionsschluss

04.08.2026

ISSN

1867-2868

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de