



Akustik Bureau Dresden GmbH · Julius-Otto-Straße 13 · 01219 Dresden

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE

Herrn Christoph Fritzsche

Pillnitzer Platz 3

01326 Dresden

Ihr Zeichen
52-Z310/22

Ihre Nachricht vom
2. Juni 2022

Unser Zeichen
ABD 43719/22 - sft

Dresden
2. Dezember 2022

Bericht ABD 43719-01/22

zur

Ermittlung von exemplarischen 3D-Richtcharakteristiken

für Line Arrays

**A
K
U
S
T
I
K**

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	3
1.1	Zielstellung.....	3
1.2	Aktueller Kenntnisstand und Forschungsbedarf.....	3
2	Vorgehensweise.....	4
2.1	Grundansatz.....	4
2.2	Betrachtete Beschallungssituationen.....	4
2.3	Verwendete Array-Konfigurationen.....	5
2.4	Erzeugung der 3D-Richtungsdaten.....	8
2.5	Berechnungsmethodik zur Mittelung.....	11
3	Berechnungsergebnisse.....	12
4	Anwendungsempfehlungen.....	14
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	16
6	Literaturverzeichnis.....	17

Der vorliegende Bericht wurde mit größter Sorgfalt angefertigt. Er enthält 17 Seiten und 2 Anlagen (6 Seiten).

Dresden, 2. Dezember 2022



Dr.-Ing. Hans-Jörg Ederer
fachlich Verantwortlicher

AKUSTIK BUREAU DRESDEN



B. Eng. Sebastian Seifert-Roy
Bearbeiter

1 Aufgabenstellung

1.1 Zielstellung

Ziel des Projektes ist die Berechnung von 3D-Richtcharakteristiken für (zunächst) vier exemplarische Konfigurationen von Line Arrays. Diese sollen dann für die computergestützte Schallimmissionsprognose verwendet werden, wenn eine konkrete Lautsprecherkonfiguration nicht feststeht oder die Abstrahlcharakteristik der eingesetzten Beschallungsanlage nicht bekannt ist.

In die Berechnungen der 3D-Richtcharakteristiken sollen viele verschiedene gebräuchliche Lautsprecheranordnungen eingehen, wie sie den Polardiagrammen in der *Ergänzung zur Sächsischen Freizeidlärmstudie* [1] zugrunde liegen.

1.2 Aktueller Kenntnisstand und Forschungsbedarf

In [1] sind mittlere Abstrahlcharakteristiken von Line Arrays als Polardiagramme in der horizontalen und in der vertikalen Ebene angegeben, zum einen für „hoch geflogene“ und zum anderen für „niedrig geflogene“ bzw. „gestackte“ Lautsprecheranordnungen. Diese sind abgeleitet aus den Richtcharakteristiken einiger verschiedener gebräuchlicher Anordnungen und dienen der Veranschaulichung des prinzipiellen Abstrahlverhaltens von Line Arrays.

Bei der Schallausbreitung nach DIN ISO 9613-2 [2] wird das Richtwirkungsmaß einer Schallquelle berücksichtigt. Die Software zur Schallausbreitungsrechnung einiger Anbieter kann dazu dreidimensionale Richtcharakteristiken von Schallquellen verarbeiten. Ein übliches Format für die Übergabe solcher 3D-Richtcharakteristiken ist das *.xhn-Format, das von der Software EASE SpeakerLab für konkrete Lautsprecheranordnungen erzeugt werden kann. Bei dem Format handelt es sich um eine ASCII-Datei, in welcher terzweise die Richtungsmaße in modifizierten Kugelkoordinaten angegeben sind.

Für solche Fälle, in denen die konkrete Lautsprecherkonfiguration noch nicht feststeht oder die Abstrahlcharakteristik der eingesetzten Beschallungsanlage nicht bekannt ist, werden universelle, im Sinne des Schall-Immissionsschutzes auf der sicheren Seite liegende 3D-Richtcharakteristiken für grundlegende Konfigurationen von Beschallungsanlagen benötigt, um eine einheitliche und hinreichend konservative Schallimmissionsprognose zu ermöglichen.

2 Vorgehensweise

2.1 Grundansatz

Die in der *Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie* [1] enthaltenen Polardiagramme in der horizontalen und vertikalen Ebene repräsentieren das mittlere Richtwirkungsmaß der dort beschriebenen, typischen Konfigurationen von Line Arrays in den Oktavbändern von 63 Hz bis 8000 Hz. Damit sind numerische Ausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2 [2] möglich, für die man z.B. Tabellenkalkulationssoftware verwenden kann. Für Ausbreitungsrichtungen, die zwischen der horizontalen und der vertikalen Ebene liegen, muss dabei aus den angegebenen Werten interpoliert werden. Daraus resultiert eine gewisse Ungenauigkeit, die durch die Verwendung dreidimensionaler Richtcharakteristiken, sogenannter Balloons, vermieden werden könnte. Inzwischen sind von mehreren Anbietern Software-Pakete zur Berechnung der Schallausbreitung verfügbar, die den Import solcher 3D-Richtcharakteristiken ermöglichen und damit die Prognose der Schallimmission durch Beschallungsanlagen wesentlich vereinfachen können. Ein gebräuchliches Datenformat dafür ist das *.xhn-Format (ASCII-Datei), das mit der Software EASE SpeakerLab erzeugt werden kann. In dieser Software können 3D-Richtcharakteristiken für konkrete Array-Konfigurationen berechnet werden, wobei Lautsprechertypen, -anzahl und -winkel festgelegt werden müssen. Wenn für die Prognoserechnung, z.B. für ein Open-Air-Konzert, diese konkrete Lautsprecherkonfiguration bekannt ist, kann mit Hilfe des daraus in EASE SpeakerLab bestimmten *.xhn-Files die Ausbreitungsrechnung durchgeführt werden. Häufig ist aber die konkrete Lautsprecherkonfiguration nicht bekannt, z.B. wenn im Vorfeld die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit eines Bühnenstandorts geprüft werden soll. Deshalb sollen durch entsprechende Mittelungsrechnungen allgemeingültige *.xhn-Files erzeugt werden, die typischen Beschallungssituationen entsprechen.

2.2 Betrachtete Beschallungssituationen

In der *Sächsischen Freizeitlärmstudie* [1] werden Polardiagramme für „hoch geflogene“ sowie „niedrig geflogene bzw. gestackte“ Line Arrays angegeben. Die Richtcharakteristiken unterscheiden sich vor allem in der vertikalen Ebene, wo die relativ geringen Winkel zwischen den Elementen der „niedrig geflogenen bzw. gestackten“ Arrays zu einer schmaleren Abstrahlung im Hochtonbereich führen als bei den hoch geflogenen Arrays. Es soll weiterhin untersucht werden, ob noch andere typische Beschallungssituationen zu signifikanten Unterschieden in der Richtcharakteristik führen und deshalb dafür eigene mittlere *.xhn-Files sinnvoll sind. Aus der eigenen Messpraxis sowie der Abstimmung mit namhaften Verleih-Firmen für Beschallungsanlagen wurde eine

Klassifizierung entsprechend der maximalen Beschallungsentfernung im Zusammenhang mit dem Höhenprofil der Zuhörerfläche sowie der Lage und Höhe des Arrays entwickelt.

Folgende Beschallungssituationen wurden betrachtet:

- Großbühne, flach, 100 m (geflogene Arrays)
- Großbühne, Arena, 60 m (geflogene Arrays)
- Mittlere Bühne, flach, 50 m (geflogene Arrays)
- Kleinbühne, flach, 30 m (geflogene Arrays)
- Kleinbühne, flach, Tribüne, 20 m, (gestackte Arrays)

Die angegebenen Entfernungen markieren die übliche Ausdehnung des beschallten Zuhörerbereiches von der Bühnenkante aus. Für weiter entfernte Abschnitte müssten dann zusätzliche Systeme (sogenannte Delay-Lines) zum Einsatz kommen.

2.3 Verwendete Array-Konfigurationen

Bei den für die einzelnen Beschallungssituationen verwendeten Array-Konfigurationen wurde versucht, die heute im Veranstaltungsbereich vorwiegend eingesetzten Lautsprechertypen in für die Situation angepasster Anzahl und Winkelung zur Simulation der 3D-Richtcharakteristiken zu verwenden. Dabei wurde jeweils von einer Standard-Konfiguration für die jeweilige Beschallungssituation ausgegangen, die mit gleicher Element-Anzahl und Winkelung, aber Lautsprechern verschiedener Hersteller zur Berechnung der *.xhn – Files verwendet wurde. Diese Standard-Konfiguration wurde ergänzt um weitere Anordnungen mit abweichender Element-Anzahl und Winkelung, die vor allem aus der Messpraxis der Verfasser abgeleitet wurden. Eine detaillierte Aufstellung der Daten aller für die Simulation verwendeten Arrays mit Hersteller/Typ, Lautsprecher-Bestückung und Abstrahlwinkel der Elemente, Anzahl und (Splay-)Winkel der Elemente findet man in Anlage 1. Der Splay-Winkel gibt an, wie stark die Einzel-Elemente des Arrays vertikal gegeneinander gewinkelt sind. Der Gesamt-Splay-Winkel ist die Summe der einzelnen Splay-

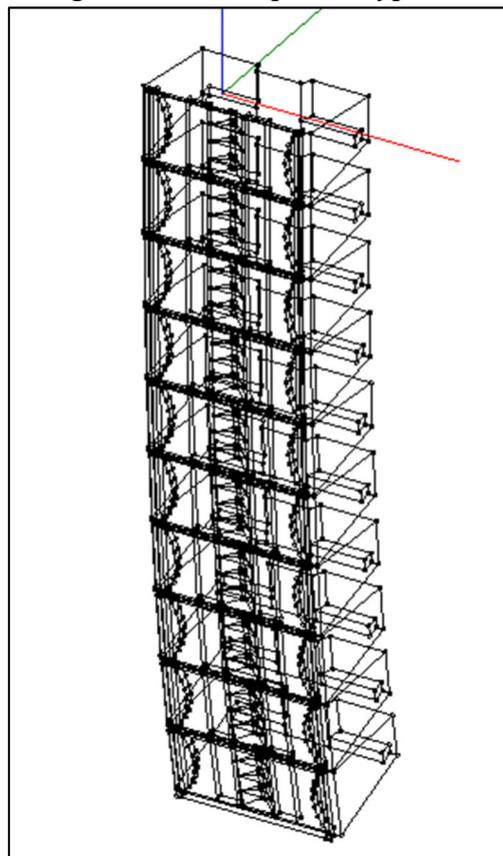


Abbildung 1: Standard-Array-Konfiguration (geflogen) für „Mittlere Bühne, flach, 50m“ (d&b Audiotechnik V-Serie; Grafik aus EASE SpeakerLab)

Winkel und beschreibt die Stärke der Krümmung (Curving) des gesamten Arrays. Die meisten Konfigurationen arbeiten mit geflogenen Arrays, die mit einem Flugrahmen an geeigneten Hängepunkten befestigt werden. Gestackte Arrays für kleinere Bühnen werden (meist mit einem unteren Befestigungsrahmen) z.B. auf Subwoofern oder dem Bühnenrand angeordnet (siehe Abbildung 2)

Im Folgenden werden die Angaben für die einzelnen Beschallungssituationen kurz zusammengefasst.

Großbühne, flach, 100 m (geflogene Arrays)

Anwendungsbeispiele: große Konzertaufbauten auf „freier Wiese“ (für Hauptsysteme, aber auch Delay-Lines)

Standard-Konfiguration: 14 Elemente, Gesamt-Splay-Winkel 25°

Hersteller/Typen: d&b Audiotechnik/KSL, L-Acoustics/K3, Martin Audio/WPL, Adamson/E-Series, L-Acoustics/K2, Meyer Sound/LEO-M, JBL/VTX A12, d&b Audiotechnik/GSL, Coda Audio/ AiRAY,

weitere Konfigurationen:

d&b Audiotechnik/J-Serie/16 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 16°

L-Acoustics K2/12 Elemente/ Gesamt-Splay-Winkel 30,5°

d&b Audiotechnik/J-Serie/22 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 6°

L-Acoustics Kara/12 Elemente/ Gesamt-Splay-Winkel 22,5°

Großbühne, Arena, 60 m (geflogene Arrays)

Anwendungsbeispiele: ansteigende Auditorien bei großen Konzerten (in Stadien/Amphitheatern), Berücksichtigung größerer Out-Fill-Systeme oder ggf. Delay-Lines

Standard-Konfiguration: 10 Elemente, Gesamt-Splay-Winkel 14°

Hersteller/Typen: d&b Audiotechnik/KSL, L-Acoustics K3, Martin Audio WPL, Adamson/E-Series, L-Acoustics/K2, Meyer Sound/LEO-M, JBL/VTX A12, d&b Audiotechnik/GSL, Coda Audio/ AiRAY

Mittlere Bühne, flach, 50 m (geflogene Arrays)

Anwendungsbeispiele: Bühnen bei größeren Straßenfesten und Märkten, Berücksichtigung größerer Out-Fill-Systeme und ggf. Delay-Lines

Standard-Konfiguration: 10 Elemente, Gesamt-Splay-Winkel 11°

Hersteller/Typen: d&b Audiotechnik/V-Serie, L-Acoustics/Kara II, Martin Audio/WPC, dB technologies/DVA T8, Meyer Sound/Melodie, Meyer Sound/Lyon, JBL/VTX V20, d&b Audiotechnik/GSL, Coda Audio/ AiRAY,

Kleinbühne, flach, 30 m (geflogene Arrays)

Anwendungsbeispiele: Bühnen bei kleineren Straßenfesten und Märkten, kleinere Open-Air-Tanzveranstaltungen mit DJs (z.B. u.U. auch auf Ausflugsschiffen), Berücksichtigung von kleineren Out- bzw. Front-Fill-Systemen

Standard-Konfiguration: 8 Elemente, Gesamt-Splay-Winkel 18°

Hersteller/Typen: d&b Audiotechnik/Y-Serie, L-Acoustics Kiva II

weitere Konfigurationen:

Martin Audio/WPS/6 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 14°

Meyer Sound/Melodie/6 Elemente/ Gesamt-Splay-Winkel 10°

Meyer Sound/Lina/4 Elemente/ Gesamt-Splay-Winkel 6°

d&b Audiotechnik/Y-Serie/4 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 6°

db technologies/M2M/4 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 4,5°

Studt-Akustik/S6510L/3 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 0°

CODA Audio/TiRAY/6 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 9°

RCF/HDL 10-A /6 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 10°

Kleinbühne, flach, Tribüne, 20 m (gestackte Arrays)

Anwendungsbeispiele: Beschallung kleinerer Amphitheater, Beschallung von Teilbereichen größerer Tribünen, Berücksichtigung von kleineren Out- bzw. Front-Fill-Systemen

Hersteller/Typen:

L-Acoustics Kiva II/3 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 4°

RCF/HDL 10-A /4 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 8°

d&b Audiotechnik/Y-Serie/3 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 0°

db technologies/DVA Mini G2/4 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 6°

Studt-Akustik/S6510L/4 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 0°

CODA Audio/TiRAY/4 Elemente/Gesamt-Splay-Winkel 9°



Abbildung 2: Beispiel für gestacktes Array mit 3 Elementen (auf Subwoofer)

2.4 Erzeugung der 3D-Richtungsdaten

Als Format der 3D-Richtungsdaten wird das *.xhn-Format verwendet, das mit modifizierten Kugelkoordinaten arbeitet. Es kann mit der Software EASE SpeakerLab des Herstellers AFMG erzeugt werden. Dazu müssen die Lautsprecherdaten im *.gll-Format eingelesen werden. Diese sind für alle marktüblichen Typen verfügbar und können in der Regel sowohl von den Herstellern als auch von der Firma AFMG per Download bezogen werden. In EASE SpeakerLab muss zunächst das gewünschte Array konfiguriert werden, wobei die konkreten Element- Fabrikate/-Typen und ihre jeweiligen Relativ-Winkel einzugeben sind (außer für das erste Einzelement). Der Winkel des Flugrahmens entspricht dem vertikalen Null-Grad-Winkel, wie auch dem Winkel des ersten

Array-Elementes, d.h. der Aufhängungswinkel des Gesamt-Arrays kann hier nicht berücksichtigt werden, sondern muss an späterer Stelle (bei Anwendung der Simulationsergebnisse in einer anderen Software) eingestellt werden.

Die Richtwirkungs-Simulationen werden ohne die optional mögliche Berücksichtigung der Luftdämpfung durchgeführt – diese wird in der Schallimmissions-Software bei der Ausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 [2] berücksichtigt.

Nach Einstellung der Mapping-Distanz/des Simulations-Radius (hier einheitlich 100 m für alle Konfigurationen, da so eine ausreichende Entfernung in Bezug auf die Nahfeld-Fernfeld-Grenzdistanz von Line-Arrays sichergestellt ist) sowie des Signal-Spektrums (kein relevanter Einfluss auf Berechnungsergebnis) errechnet EASE SpeakerLab frequenzabhängig unter phasengenaue Überlagerung der Schallabstrahlung der Einzelelemente Schalldruckpegel auf einer Kugeloberfläche (Kugel mit Radius der eingestellten Mapping-Distanz) und daraus, relativ zum Pegelwert auf der 0°-Achse, Dämpfungswerte je Frequenzband. Durch diese frequenzabhängige Normierung ist der Absolut-Betrag des Schalldruckpegels und damit die Aussteuerung bzw. die Gesamtleistung des Arrays sowie dessen Frequenzgang bei der Simulation der Richtwirkung nicht mehr von Relevanz.

Der Bezugspunkt (Schnittpunkt der Raumachsen in der untenstehenden Abbildung) bzw. der Mittelpunkt für die gedachte Kugeloberfläche in der Simulation liegt bei geflogenen Array-Konfigurationen mittig auf der Oberkante der Frontfläche des obersten Array-Elements und bei gestackten Arrays mittig auf der Unterkante der Frontfläche des untersten Array-Elements. Allgemein sind die Einstellungen/Simulationen für gestackte Arrays um 180° in der Vertikalen gedreht gegenüber geflogenen Systemen.

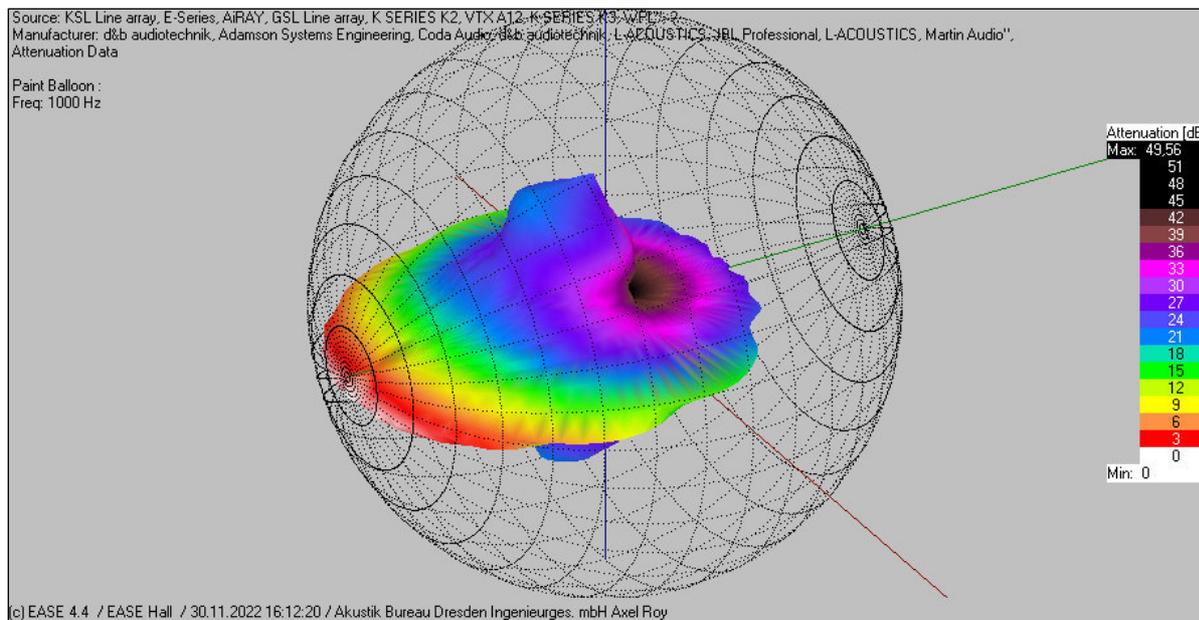


Abbildung 3: Beispiel eines Richtwirkungs-Balloons

Das Beispiel in Abbildung 3 verdeutlicht den Aufbau des Richtwirkungs-Balloons, dessen Daten im *.xhn-File enthalten sind. Sie werden in Kugelkoordinaten ermittelt, wobei das Winkelraster horizontal und vertikal jeweils 5° beträgt. Die Anordnung entspricht der Arbeitsweise üblicher Messeinrichtungen für Lautsprecherdaten. Man kann sich vorstellen, dass ein horizontaler Halbkreis über 180° um die Längsachse in 5° -Schritten gedreht wird, wobei jeweils Messwerte im 5° -Abstand bestimmt werden. Das führt beim *.xhn-File zu einem Raster von $180^\circ \times 360^\circ$, jeweils in 5° -Schritten. Für jeden der Rasterpunkte werden Betrags- und Phasendaten des Schalldrucks ermittelt. Die Betragsdaten werden als Dämpfungswerte im Pegelmaßstab abgebildet, wobei der Bezugspunkt (0-dB-Punkt) jeweils der Dämpfungswert auf der Mittelachse ist (0° -Punkt). Der zugehörige Winkel ist per Definition der Winkel des Flugrahmens. Es ist also möglich, dass einzelne Punkte des *.xhn-Files negative (Dämpfungs-)Werte aufweisen, wenn z.B. der abgestrahlte Schalldruckpegel eines Arrays in der Simulation dort höher ist als in vertikaler 0° -Richtung, was in der Regel der Fall ist, da sich das simulierte Array nur in einer Hemisphäre (geflogen – untere, gestackt – obere) befindet.

Aus Abbildung 3 wird deutlich, dass die Verteilungsdichte der Datenpunkte über die Kugeloberfläche nicht konstant ist. Im Bereich der Pole (horizontal 0° und 180°) ist die Punktdichte wesentlich größer als beispielsweise im Bereich von horizontal 90° bzw. 270° .

Die hier in diesem Bericht dargestellten Richtwirkungs-Balloons sind doppelt skaliert, d.h. die ermittelten Dämpfungswerte werden sowohl durch eine Einordnung auf einer Farbskala als auch durch ihren Abstand zum Mittelpunkt der Pegel-skalierten Umkugel (vergleichbar mit der Darstellung in Polardiagrammen) repräsentiert.

Die Daten der Richtungs-Balloons für das *.xhn-Format werden in Terzbändern von 100 Hz bis 10 kHz ermittelt. Im Frequenzbereich unter 100 Hz wird nach Import eines *.xhn-Files bei der Ausbreitungsrechnung in üblichen Prognose-Programmen zur Schallimmission eine kugelförmige Richtcharakteristik (ungerichtete Punktquelle) verwendet.

2.5 Berechnungsmethodik zur Mittelung

Die Betragsdaten zur Dämpfung wurden für die jeweilige Beschallungssituation gemäß Abschnitt 2.2 über alle betrachteten Arrays für alle Balloon-Punkte in jedem Terzband von 100 Hz bis 10 kHz arithmetisch gemittelt. Da bei der Ausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 [2] und ähnlichen Vorschriften keine Phasendaten verwendet werden, wurden diese aus den *.xhn-Files entfernt.

Der Header, der im *.xhn-File den Daten des Punktrasters vorangeht, wurde auf das Notwendigste reduziert und enthält im Wesentlichen noch Informationen über die zur Mittelung verwendeten Lautsprecherfabrikate/-typen und die Anzahl der Elemente.

Die Berechnungsmethodik in der Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie [1] geht von mittleren horizontalen und vertikalen Polardiagrammen zur Implementierung des Richtwirkungsmaßes aus, deren Dämpfungswerte maximal 0 dB betragen können. Auf dieser Basis wurden die Prognose-Algorithmen für die Schalleistungspegel von Open-Air-Bühnen entwickelt. Um dieser Systematik zu entsprechen, wurden die mittleren *.xhn-Richtungs-Balloons in jeder Terz so auf die Richtungsmaxima (d.h. Punkte minimaler Dämpfung) normiert, dass nur Dämpfungswerte von 0 dB oder mehr möglich sind.

Der mittlere Richtungs-Balloon ist sicherlich ein nützliches Werkzeug für Prognoserechnungen bei üblichen Aufgabenstellungen, z.B. zur Untersuchung der Genehmigungsfähigkeit bestimmter Standorte. Um im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung, z.B. bei besonders sensiblen Situationen, bezüglich der umgebenden Immissionsorte auf der sicheren Seite zu liegen, wurden neben den mittleren Richtungs-Balloons für die jeweiligen Beschallungssituationen auch maximale Richtungs-Balloons bestimmt. Dabei wird für jede Raumrichtung nicht der mittlere, sondern der minimale Dämpfungswert verwendet, der zum maximalen Schalldruckpegel in der jeweiligen Richtung führt. Hierbei wurde die terzweise Normierung nicht auf das jeweilige Richtungsmaximum des Maximal-Balloons durchgeführt, sondern auf das des entsprechenden mittleren Balloons. Dadurch sind Dämpfungswerte kleiner Null möglich, die dann zu höheren prognostizierten Pegelwerten führen. Im Sinne der Worst-Case-Betrachtung ist diese Verfahrensweise sinnvoll.

3 Berechnungsergebnisse

Die eigentlichen Berechnungsergebnisse stellen die für die angenommenen Beschallungssituationen erzeugten zehn *.xhn-Files dar, die mit dem hier vorliegenden Bericht übergeben werden. Mithilfe der Richtwirkungs-Import-Funktion für *.xhn-Files in der Software IMMI 2021 der Wölfel Engineering GmbH & Co. KG wurden die Dateien auf ihre korrekte Funktionalität überprüft.

Eine Visualisierung der berechneten 3D-Richtcharakteristiken, die in den gelieferten *.xhn-Files enthalten sind, findet sich im Anhang 2. Dazu wurden die ermittelten *.xhn-Dateien in die Software EASE SpeakerBase importiert, die im EASE 4.4-Paket enthalten ist. Anschließend wurden sogenannte Richtwirkungs-Balloons erzeugt, in denen die Dämpfungswerte der dreidimensionalen Richtcharakteristik sowohl geometrisch als auch durch Farbkodierung visualisiert werden. Der Balloon-Radius entspricht dabei einer Spanne von 50 dB. Anhand der Farbkodierung mit Legende können die Dämpfungswerte relativ genau abgelesen werden.

Für die Darstellung wurden für jede Array-Konfiguration eine perspektivische Darstellung in der 1 kHz-Terz sowie Seitenansichten des Richtwirkungs-Balloons für die Terzen bei 250 Hz, 1 kHz und 4 kHz ausgewählt. Diese veranschaulichen sehr gut das vertikale Richtverhalten und machen so die Unterschiede zwischen den verschiedenen Konfigurationen deutlich. Neben den mittleren Richtwirkungs-Balloons, die jeweils auf eine Dämpfung von 0 dB normiert wurden, sind auch die maximalen Balloons dargestellt. Diese enthalten für jeden Richtungspunkt nicht den mittleren, sondern den minimalen Dämpfungswert, der zum maximalen Schalldruckpegel in der jeweiligen Richtung führt. Hierbei wurde die Normierung nicht auf das jeweilige Richtungsmaximum des Maximal-Balloons durchgeführt, sondern auf das des entsprechenden mittleren Balloons. Die dadurch entstehenden negativen Dämpfungswerte sind in den in Anhang 2 dargestellten maximalen Balloons gut erkennbar, sie wurden in weißer Farbe kodiert.

Die auffälligsten Unterschiede in den dargestellten 3D-Richtcharakteristiken ergeben sich im tiefrequenten Bereich bei 250 Hz. Die stärkere vertikale Bündelung der größeren (und damit längeren) Arrays für die Großbühnen und mittleren Bühnen sind in den Ansichten gut erkennbar. Die Richtcharakteristiken der Kleinbühnen mit Tribüne und 20 m Bezugsentfernung nähern sich aufgrund der geringen Array-Größe schon stark der Kugelform an. Auch die Rückwärtsdämpfung der kleinen Arrays in der 1 kHz-Terz liegt im Mittel deutlich unter der der Arrays für die Großbühnen.

Gut erkennbar ist auch das vertikale Richtungsmaximum der Abstrahlung, das für alle geflogenen Arrays aufgrund der Krümmung nach unten und Anordnung der Einzelelemente in der unteren

Hemisphäre bei ca. $3 \dots 5^\circ$ unter der vertikalen Null-Achse liegt. Nur für die gestackten Arrays der Kleinbühne mit Tribüne liegt das Maximum der vertikalen Abstrahlung leicht über der vertikalen Null-Achse, was aus der leichten Krümmung nach oben und der Anordnung in der oberen Hemisphäre resultiert (siehe Abb. A 33 – A 40).

Eine genaue Quantifizierung der bei den Simulationen und Mittelungen erzielten statistischen Genauigkeit ist nicht möglich. Bedingt durch eine frequenzabhängige Ausprägung von Nebenkeulen im Abstrahlverhalten, die je nach Winkelung und gewähltem Lautsprecher-Typ stark variiert, ergeben sich bei Auswertung der Standardabweichung in unterschiedlichen Winkelbereichen und Terzbändern teils sehr hohe Werte von über 20 dB. Inwiefern die Bestimmung der Standardabweichung für eine Bewertung der Genauigkeit jedoch aussagekräftig ist, bleibt fraglich, da es sich bei den verschiedenen gemittelten Konfigurationen auch nicht um statistisch abhängige oder annähernd normalverteilte Größen handelt. Allgemein kann jedoch festgestellt werden, dass sich im Hauptabstrahl-Bereich der Systeme, d.h. in Beschallungsrichtung, geringere Abweichungen ergeben (ungefähr bis zu 5 dB), da in diesem Bereich auch keine Nebenkeulen ausgebildet werden.

4 Anwendungsempfehlungen

Zur Berechnung der von Line Arrays hervorgerufenen Schallimmissionen mittels Schallimmissions-Software unter Anwendung der DIN ISO 9613-2 [2] sind folgende Rahmenbedingungen/Einstellungen erforderlich bzw. empfehlenswert:

- Als Ersatzschallquellen sind Punktschallquellen-Elemente zu verwenden. Der hier beschriebene Richtwirkungs-Ansatz ist nicht für Linien- oder Flächenquellen-Elemente entwickelt worden, weshalb bei derartiger Anwendung mit größeren Ungenauigkeiten zu rechnen ist.
- Je Line Array sollte eine separate Punktschallquelle platziert werden (z.B. im Standardfall Hauptsystem links und rechts der Bühne). Komplexere Beschallungsanlagen (z.B. mit Delay-Lines, Out-Fills, Front-Fills) könnten ggf. durch den Einsatz einer größeren Anzahl von Punktschallquellen nachgebildet werden, denen entsprechend dem Einsatzbereich der Systeme die passenden Richtcharakteristiken separat zugeordnet werden könnten. Insbesondere für den Fall, dass ausschließlich zwei Links-Rechts-Hauptsysteme vorliegen, kann ein Bühnenstandort allerdings bei ausreichend großem Abstand zu den Immissions-Berechnungspunkten (Immissionsorten) im Verhältnis zu den Bühnenabmessungen auch durch eine einzelne Punktschallquelle modelliert werden.
- Die Bestimmung der Schallleistung der Ersatzschallquellen und die Wahl des Emissionsspektrums sollte nach den Angaben und Empfehlungen der *Ergänzung zur Sächsischen Freizeidlärmstudie* [1] erfolgen. Von Berechnungen mit A-bewerteten Summen-Emissionspegeln im Kontext von Open-Air-Veranstaltungen ist dringend abzuraten.
- Zusätzlich zur Zuweisung von Emissionsspektrum und Richtcharakteristik müssen die Punktschallquellen noch in der korrekten Höhe über Grund positioniert und in geeigneter Weise ausgerichtet werden. Die horizontale Ausrichtung richtet sich nach der Geometrie der zu beschallenden Fläche und der Anzahl der für diese Fläche vorgesehenen Systeme; Links-Rechts-Hauptsysteme sind häufig je um wenige Grad (maximal ca. 10°) in Richtung Bühnenmitte eingedreht. Auch die Ausrichtung der Systeme in der Vertikalen (Winkel des Flugrahmens bei geflogenen Systemen) sowie deren Höhe sind stark von den Gegebenheiten des zu untersuchenden Veranstaltungsortes abhängig (z.B. ermöglichen Bühnenkonstruktionen mechanisch nur eine bestimmte Maximal-Höhe der Aufhängung, was in Kombination mit der Geometrie der zu beschallenden Fläche wiederum einen Einfluss auf die Ausrichtung von Arrays in der Vertikalen hat) und sollten dementsprechend den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

- Die anzusetzende Höhe für die Ersatzschallquellen entspricht der zu erwartenden Höhe des Flugrahmens (vgl. Bezugspunkt für Richtwirkungs-Simulation), nicht der mittleren Höhe des Arrays wie in [1]! Auch bei gestackten Systemen definiert die Höhe des Stacking-Rahmens die anzusetzende Höhe der Ersatzschallquelle (häufig direkt auf der Bühnenkante und/oder auf ein oder zwei Subwoofern montiert). Zur Bestimmung des vertikalen Winkels der Ersatzschallquellen sollten die Ersatzschallquellen etwa auf den hintersten Punkt einer Hörerfläche (bei Stehenden Personen ca. 1,7 m über Grund, bei sitzenden Personen ca. 1,2 m über Grund) ausgerichtet werden.

Die nachfolgende Tabelle 1 liefert Empfehlungen für die Ersatzschallquellen bzw. übliche Hauptwinkel und Höhen von Arrays in Abhängigkeit von den betrachteten Beschallungsszenarios:

Beschallungsszenario	typische Höhe der Aufhängung/Aufstellung bzw. der Ersatzschallquelle über Grund	typische vertikale Winkelung (Hauptausrichtung des Arrays/Winkel der Ersatzschallquelle)
Großbühne flach 100m	8 m...12 m	-3°...-8°
Großbühne Arena 60m	8 m..12 m	+2°...-3°
Mittlere Bühne flach 50m	5 m...8 m	-5°...-12°
Kleinbühne flach 30m	3 m ...5 m	-5°...-12°
Kleinbühne Tribüne 20m	1 m ...1,5 m	0°...+5°
(Kleinbühne Tribüne 20m) ¹ (für flaches Auditorium bei Veranstaltungen mit sehr kleinen, überwiegend geraden Line Arrays)	1 m ...1,5 m (2 m ...3 m)	-5°...0° (-12°...-7°)

Tabelle 1: typische vertikale Hauptwinkel und Höhen von Line Arrays je nach Beschallungsszenario bzw. Empfehlungen für die entsprechenden Parameter der Ersatzschallquellen

¹ Hier wird der mögliche Anwendungsfall betrachtet, dass die ermittelte Richtcharakteristik der wenigen, zueinander auch wenig gewinkelten Systeme (gestacktes Mini-Line-Array) aufgrund der vertikalen Symmetrie des Balloons auch als Richtcharakteristik für kleine Beschallungsaufgaben (z.B. bei kleineren Open-Air-Tanzveranstaltungen mit DJ) verwendet wird. Die leichte Neigung nach oben muss dabei durch Verwendung der in Klammern angegebenen Winkel für die Ausrichtung der Punktschallquelle kompensiert werden (Korrektur um ca. 7°). Ist dies geschehen, kann die Punktschallquelle auch für geflogene Mini-Arrays verwendet werden, wobei hier als Besonderheit nicht der Flugrahmen die Höhe der Punktschallquelle definiert, sondern das unterste Array-Element (Klammer-Angaben in der Tabelle sind Empfehlungen zur Höhe der Ersatzschallquelle unter Annahme einer Array-Länge von ca. 1 m).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Software EASE SpeakerLab wurde eine Vielzahl von 3D-Richtcharakteristiken von Line Arrays simuliert, die für verschiedene Bühnenkonfigurationen verwendbar sind. Als Format der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik diente das *.xhn-Format, das von der Firm AFMG als Exportformat definiert wurde. Nach entsprechender Verarbeitung wurden aus den *.xhn-Daten der Einzelarrays für insgesamt fünf Beschallungssituationen mittlere sowie maximale 3D-Richtwirkungs-Balloons erzeugt, die im *.xhn-Format zur Verfügung gestellt werden. Diese können in Programme zur Ausbreitungsrechnung, z.B. nach ISO 9613-2 [2], importiert werden. Die ausgewählten Beschallungssituationen unterscheiden sich hauptsächlich durch die Bezugsentfernung sowie das Profil der beschallten Fläche (flach bzw. Arena/Tribüne).

Die Anwendung in der Praxis der Prognoserechnung muss zeigen, welche Verbesserungen mit diesen verallgemeinerten 3D-Richtwirkungsdaten erreichbar sind und ob die ausgewählten Beschallungssituationen sinnvoll und ausreichend sind.

Mit Ausnahme der KSL/GSL-Systeme von d&b Audiotechnik wurden keine Cardioid-Systeme betrachtet, die eine deutlich höhere Rückwärtsdämpfung aufweisen als konventionelle Line-Array-Systeme und somit potenziell auch zur Entspannung von Immissionskonflikten beitragen können. Ebenfalls keine Berücksichtigung fanden in der Horizontalen asymmetrisch abstrahlende Systeme (z.B. des Herstellers Alcons) bzw. durch einstellbare Hornaufsätze horizontal anpassbare Systeme. Die technische Entwicklung tendiert immer mehr zur Verwendung derartiger Systeme (vor allem Cardioid-Systeme) – als Standard-Anwendungsfall sind sie jedoch noch nicht zu betrachten. Daher wurde die Untersuchung – als sicherheitsbetonter/konservativer Ansatz – auf die ausgewählten Systeme beschränkt. Bei fortschreitender Verbreitung derartiger Systeme könnte sich eine Aktualisierung bzw. Separierung der Richtwirkungsbetrachtung u.U. als sinnvoll erweisen.

Aufgrund der Beschränkung des *.xhn-Formats, aber auch des abweichenden Aufbaus von Beschallungsanlagen für den Tieftonbereich (Subwoofer), sind Richtwirkungen von Bass-Systemen bzw. -Anordnungen nicht in dieser Untersuchung berücksichtigt worden. Zu diesem Themenbereich werden jedoch immer wieder (und auch aktuell) Untersuchungen und Simulationen durchgeführt, die ggf. zu einer besseren Abbildung des Tiefton-Richtwirkungsverhalten in Immissionsprognosen führen könnten. Auch im Tiefton-Bereich nimmt die Einsatzhäufigkeit von richtenden Systemen mit Cardioid-Charakteristik stetig zu, stellt jedoch – insbesondere bei kleineren Anwendungen – noch nicht den zu erwartenden Standard dar.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG): *Ergänzung zur Sächsischen Freizeidlärmstudie - Aktualisierung von Emissionskenngrößen und Prognoseverfahren für Beschallungsanlagen im Freien*. 2019.
- [2] DIN ISO 9613-2: *Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren*, 1999.

Anhang 2: Visualisierung der berechneten 3D-Richtcharakteristiken (Balloons)

Großbühne, flach, 100 m

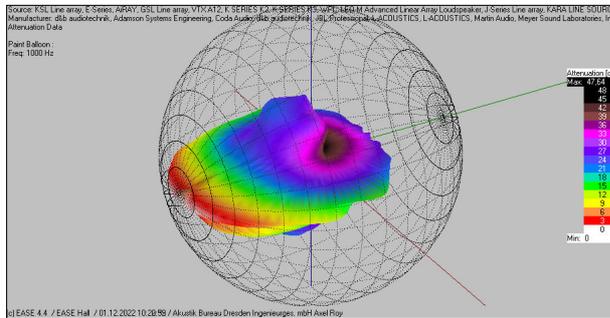


Abb. A 1: Mittlerer Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

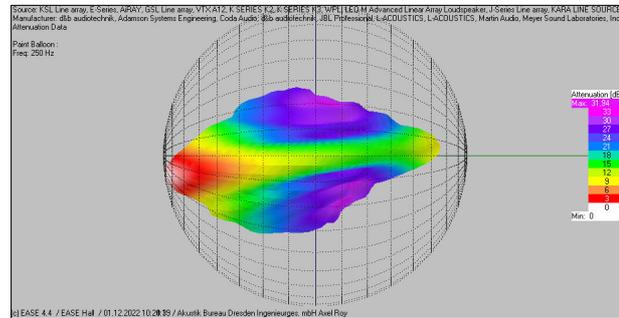


Abb. A 2: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 250 Hz

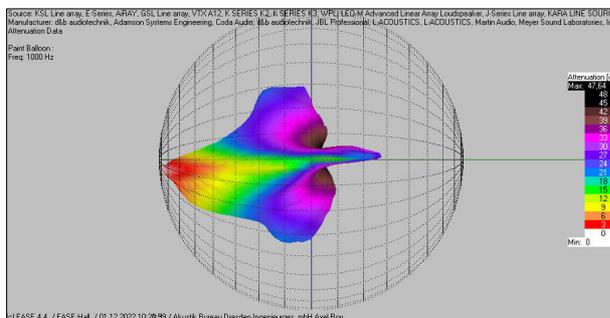


Abb. A 3: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

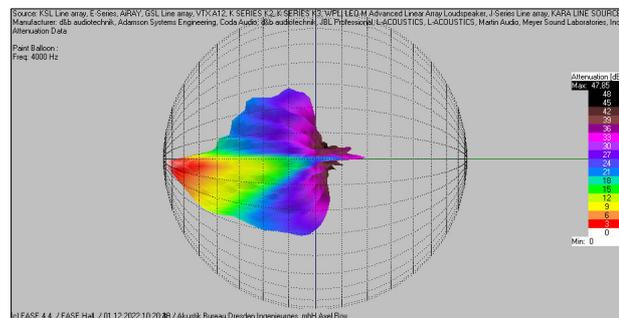


Abb. A 4: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

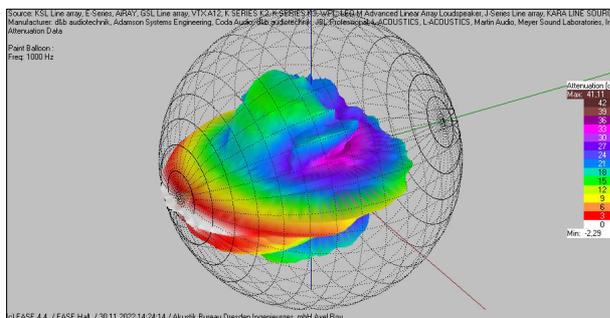


Abb. A 5: Maximaler Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

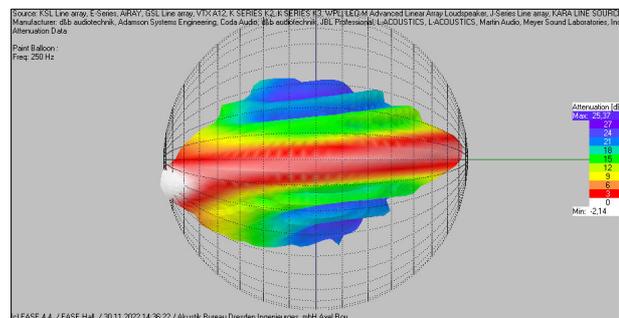


Abb. A 6: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 250 Hz

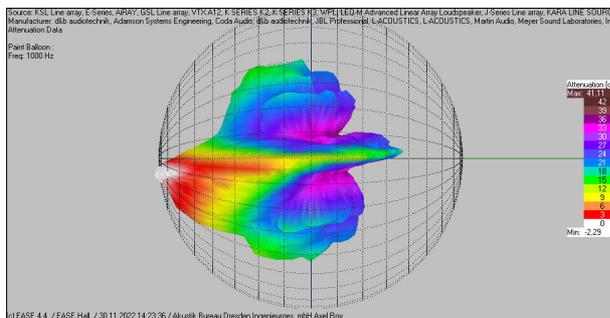


Abb. A 7: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

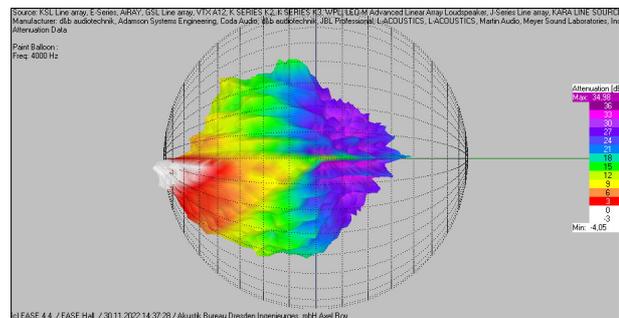


Abb. A 8: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

Großbühne, Arena, 60 m

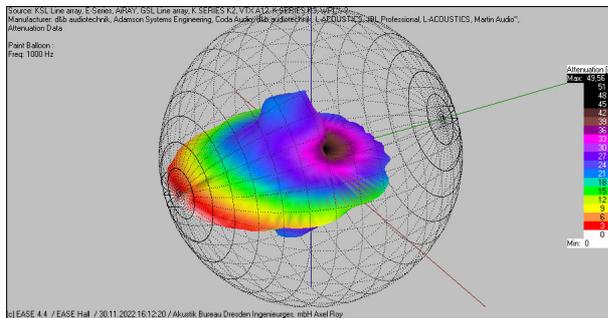


Abb. A 9: Mittlerer Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

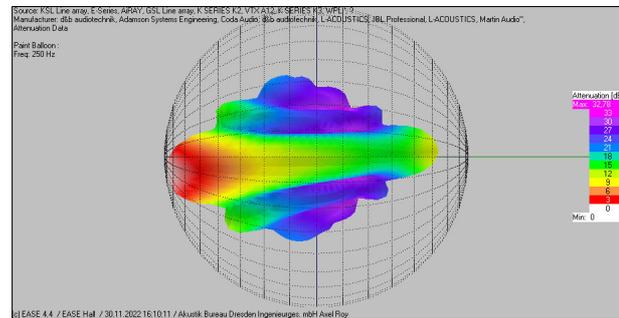


Abb. A 10: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 250Hz

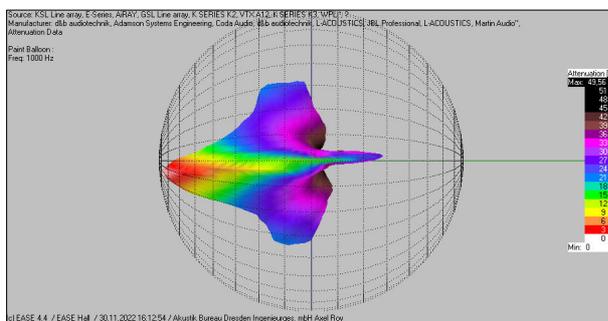


Abb. A 11: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

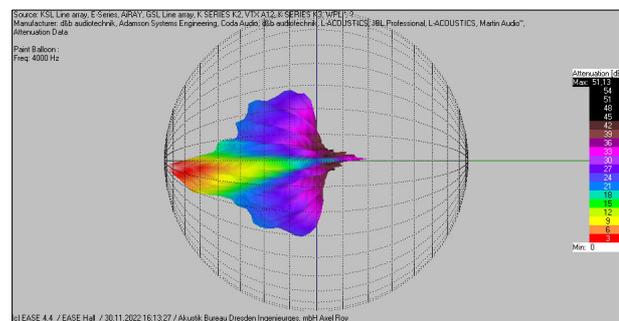


Abb. A 12: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

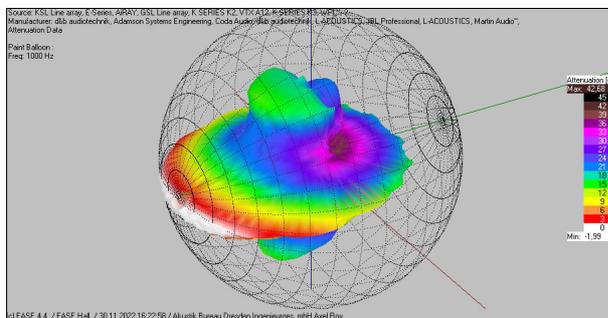


Abb. A 13: Maximaler Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

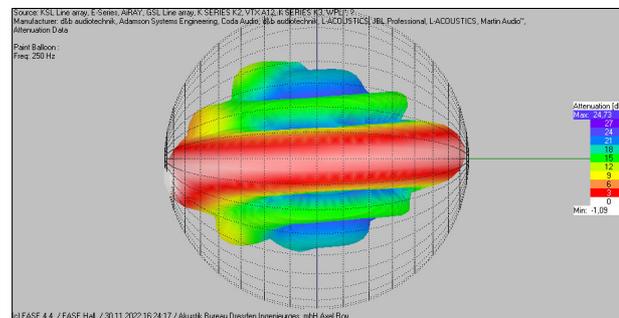


Abb. A 14: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 250Hz

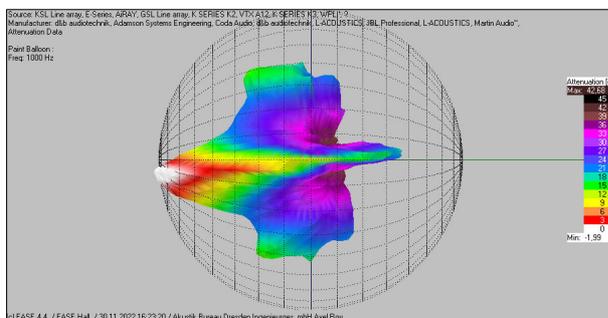


Abb. A 15: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

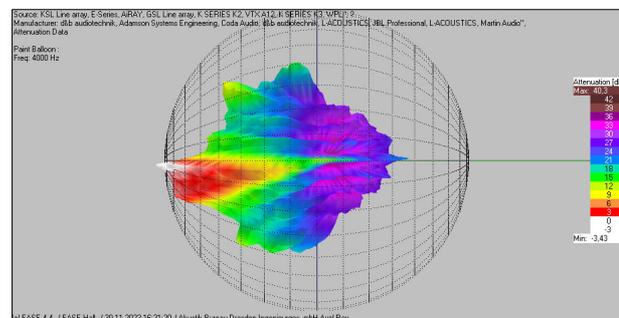


Abb. A 16: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

Mittlere Bühne, flach, 50 m

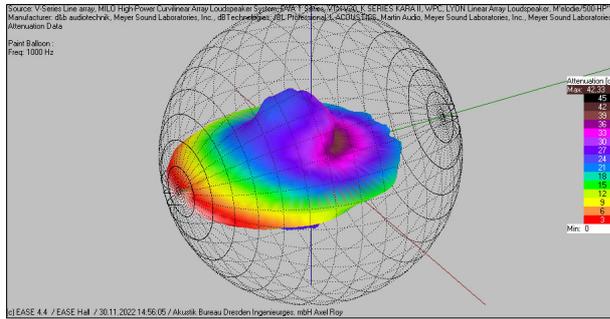


Abb. A 17: Mittlerer Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

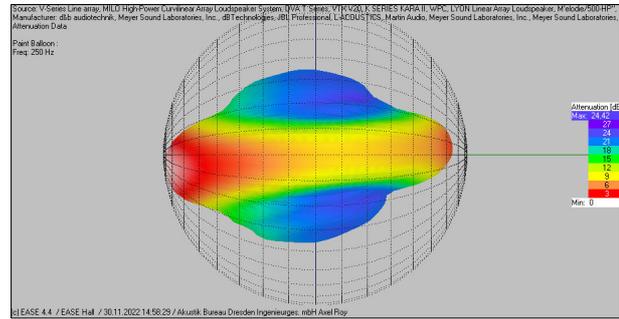


Abb. A 18: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 250Hz

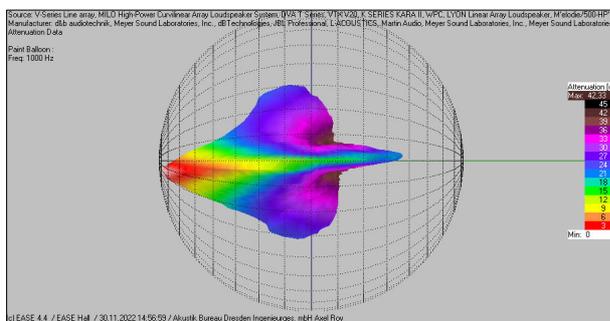


Abb. A 19: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

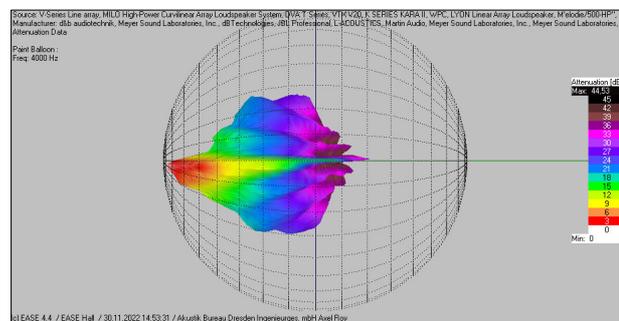


Abb. A 20: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

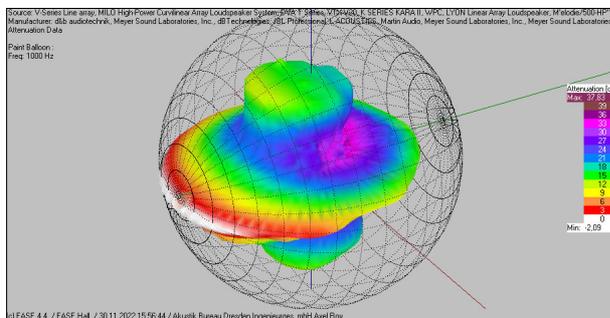


Abb. A 21: Maximaler Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

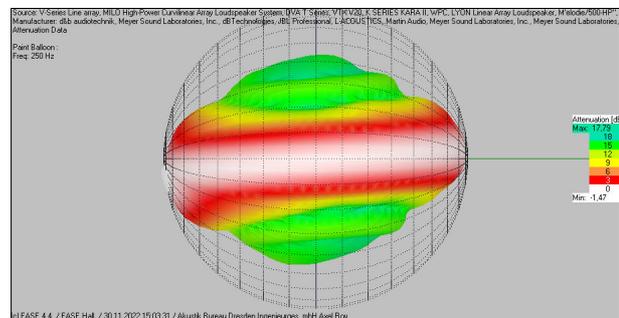


Abb. A 22: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 250Hz

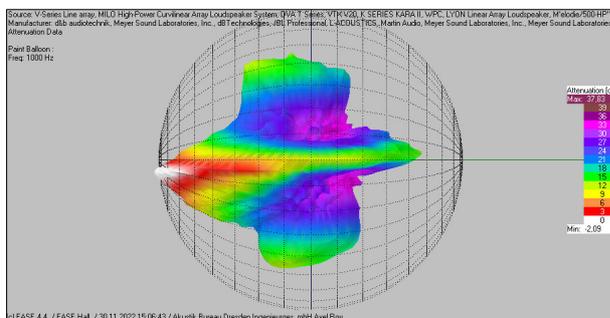


Abb. A 23: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

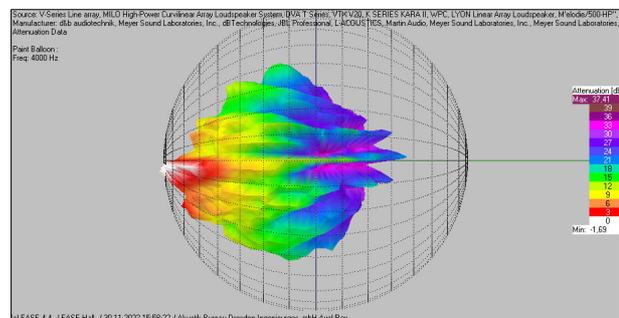


Abb. A 24: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

Kleinbühne, flach, 30m

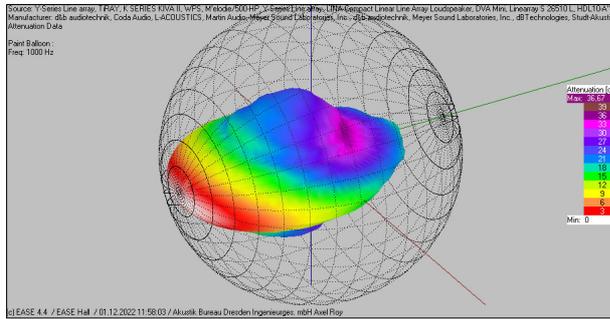


Abb. A 25: Mittlerer Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

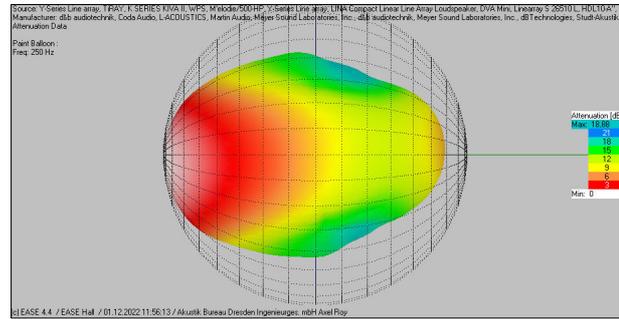


Abb. A 26: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 250 Hz

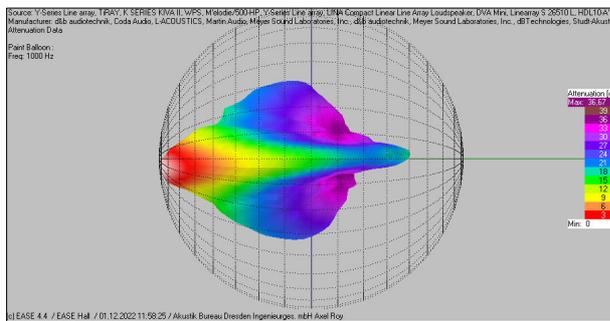


Abb. A 27: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

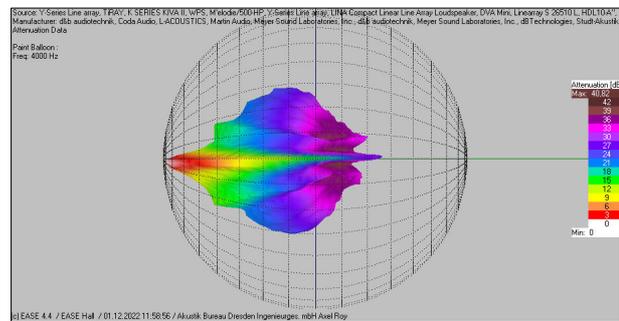


Abb. A 28: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

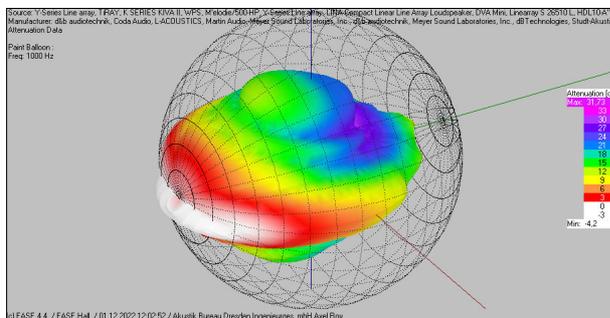


Abb. A 29: Maximaler Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

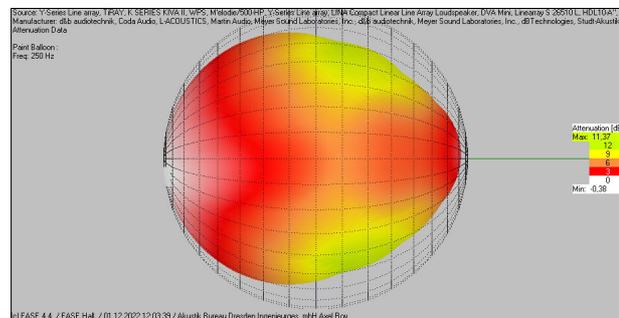


Abb. A 30: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 250 Hz

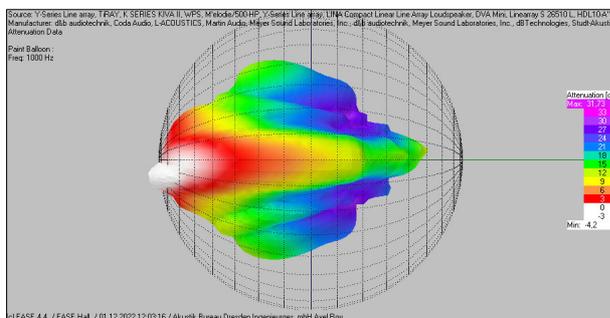


Abb. A 31: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

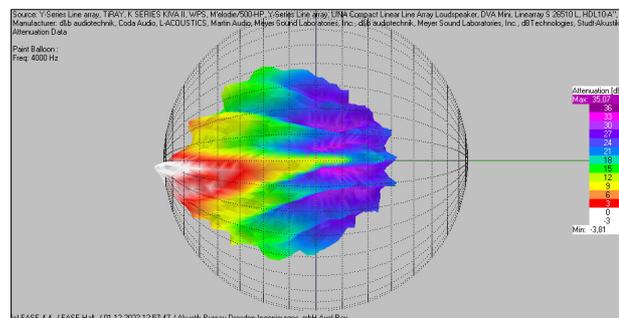


Abb. A 32: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

Kleinbühne, Tribüne, 20m

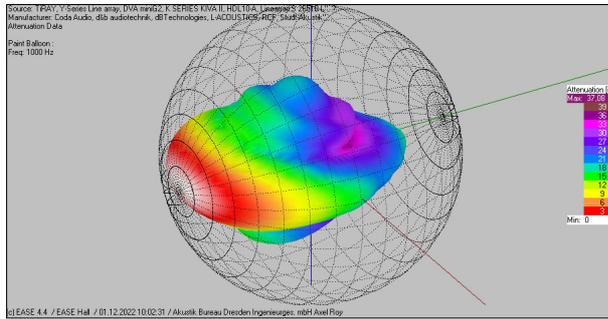


Abb. A 33: Mittlerer Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

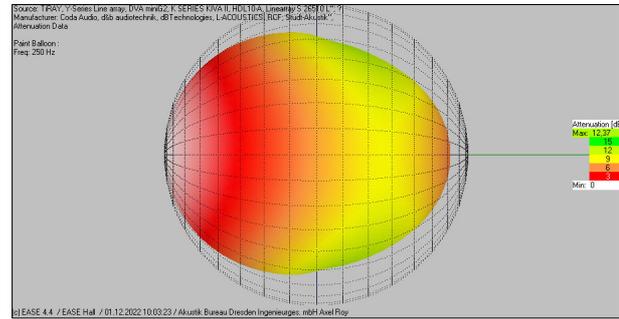


Abb. A 34: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 250Hz

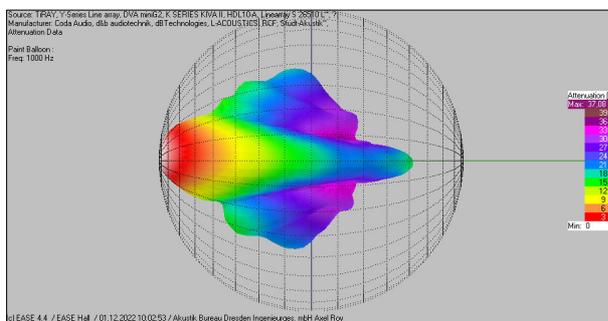


Abb. A 35: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

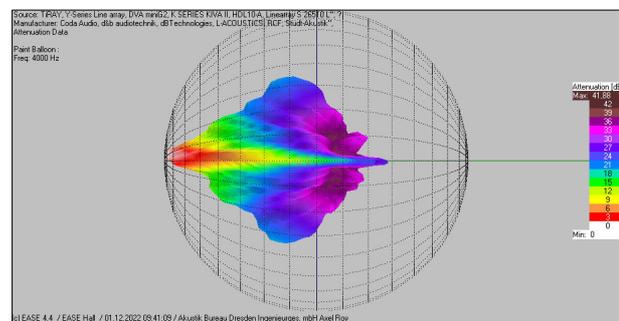


Abb. A 36: Mittlerer Balloon, Seitenansicht, 4 kHz

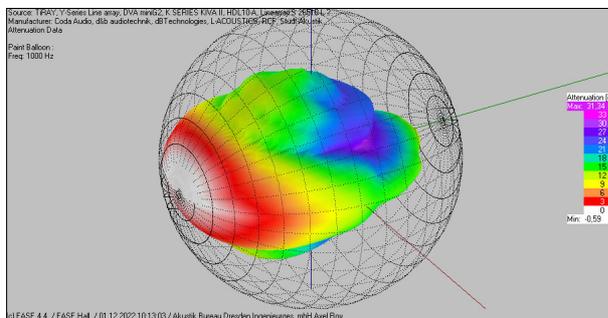


Abb. A 37: Maximaler Balloon, Perspektivansicht, 1 kHz

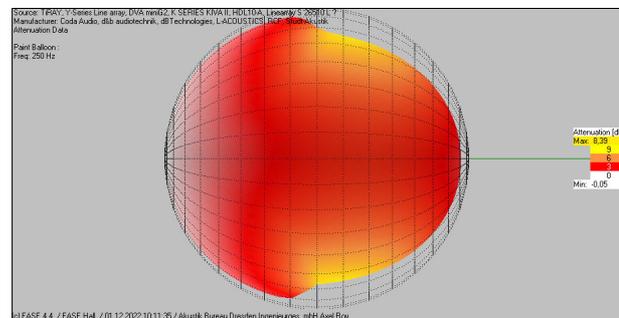


Abb. A 38: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 250Hz

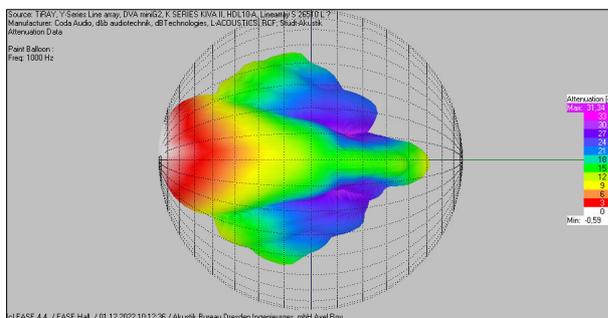


Abb. A 39: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 1 kHz

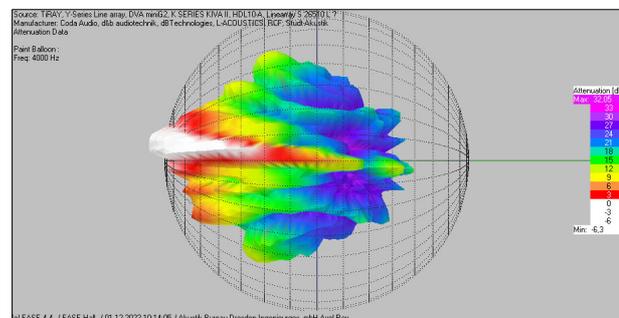


Abb. A 40: Maximaler Balloon, Seitenansicht, 4 kHz