GEFLOGENE SUBWOOFER ERZEUGEN NICHT MEHR LÄRMBELASTUNG ALS BODENGESTAPELTE SUBWOOFER

Geflogene und bodengestapelte Subwoofer bieten beide die Möglichkeit, die Lärmbelastung bei tiefen Frequenzen zu senken:

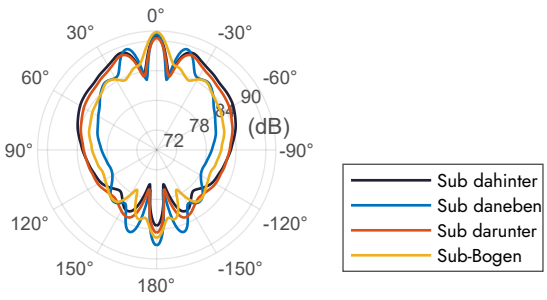
- **Bühnenseiten:** die beste Dämpfung erreichen Subwoofer, die neben dem Hauptsystem geflogen werden (A-bewertet, Oktave 63 Hz); der bodengestapelte Sub-Bogen bringt nur in der Oktave 31,5 Hz Vorteile, die in Lärmschutzvorschriften selten einzeln betrachtet wird.
- **Bühnenrückseite:** die Dämpfung lässt sich verbessern, indem Subwoofer hinter dem Hauptsystem geflogen und kardioide Subwoofer-Konfigurationen eingesetzt werden.
- Bodengestapelte Subwoofer werden von inhomogenen atmosphärischen Bedingungen stärker beeinflusst als geflogene Subwoofer. Werden sie eingesetzt, muss ihre Bandbreite begrenzt werden.

LÄRMBELASTUNG

Bei Großbeschallungen im Freien rückt die Lärmbelastung immer stärker in den Fokus. Sie entsteht durch den Schalldruckpegel (SPL), den das Lautsprechersystem noch in großer Entfernung erzeugt. Eine der wirksamsten Maßnahmen gegen Belästigung ist es, die Bühne so auszurichten, dass sie nicht direkt auf die nächste Nachbarschaft zeigt. Damit beschränkt sich die Lärmbelastung im Wesentlichen auf die Seiten und die Rückseite der Bühne. Bei mittleren und hohen Frequenzen wird sie über die Richtwirkung der Quelle verringert, bei tiefen Frequenzen über die Position der Subwoofer relativ zum Full-Range-System.

SYSTEMVERGLEICH

Beobachtungen im Freifeld



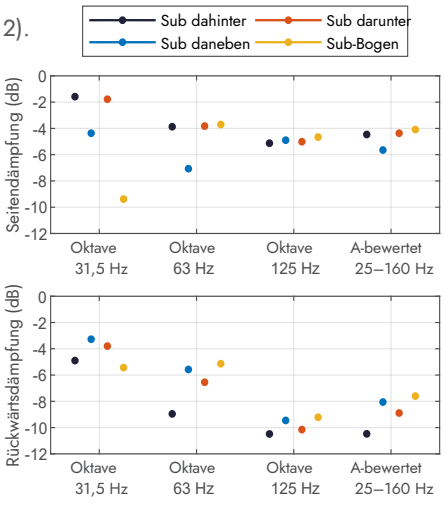
Polardiagramm*

Vier Subwoofer-Aufstellungen werden im Zusammenspiel mit dem Hauptsystem verglichen (Details zu den getesteten Setups in Anhang 1). Die Abbildung daneben zeigt das Polardiagramm in 250 m Entfernung im Frequenzband 20 – 160 Hz.

An der Front (siehe Anhang 2) erzeugen alle Varianten nahezu denselben Pegel. Zwischen der lautesten (Sub dahinter) und der leisesten Variante (Sub-Bogen) liegen rund 1 dB.

Dämpfung

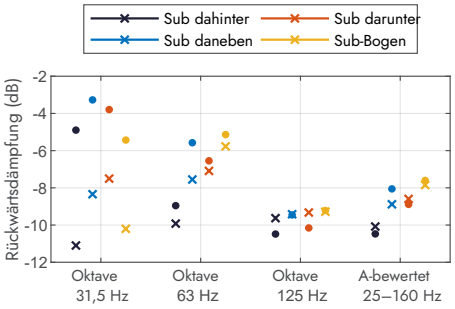
Diese Abbildung zeigt die Dämpfung hinter und neben der Bühne (siehe Anhang 2).



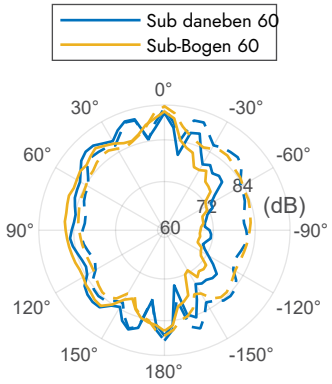
- **Zu den Seiten hin** erreicht der Sub-Bogen die beste Dämpfung in der Oktave 31,5 Hz, schneidet in den Oktaven 63 und 125 Hz aber schlecht ab. Im A-bewerteten Band 20 – 160 Hz hat er damit die schlechteste Seitendämpfung.
- **Sub daneben** hat die beste Seitendämpfung in der Oktave 63 Hz. Diese Konfiguration ist auch in der Oktave um 31,5 Hz besser als andere Links/Rechts-Aufstellungen. Im A-bewerteten Band erreicht sie die beste Seitendämpfung.
- **Nach hinten** hat Sub dahinter die beste Dämpfung in der Übergangsoktave (63 Hz). Hauptsystem und Subwoofer bilden zusammen eine kardioide Anordnung, die den Pegel nach hinten deutlich senkt.

Kardioide Subwoofer-Konfigurationen

- Soll die Lärmbelastung hinter dem System gesenkt werden, lassen sich kardioide Subwoofer-Konfigurationen einsetzen. Die Abbildung daneben zeigt die Rückwärtsdämpfung der Konfigurationen mit Standard-Preset (Punkte) bzw. mit Cardioid-Extended-Preset (x) im Verhältnis 3/1 Sub.
- Die kardioiden Konfigurationen verbessern die Dämpfung, vor allem in der Oktave 31,5 Hz – unabhängig von der Sub-Position.
- Der Gewinn durch ein Cardioid-Extended-Preset ist bei den geflogenen Subwoofern am größten.



Verschiedene atmosphärische Bedingungen



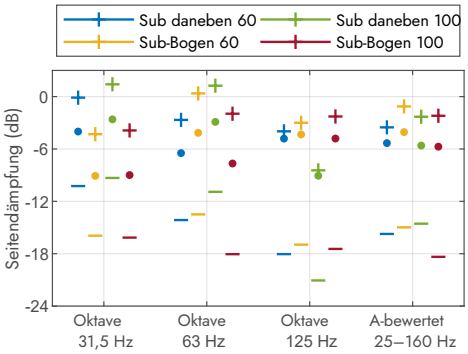
Simulationen im Freifeld setzen homogene atmosphärische Bedingungen voraus. Bei Open-Air-Veranstaltungen sind diese jedoch in der Regel inhomogen (Details in Anhang 3).

Um den Einfluss des Windes zu zeigen, wird seitlicher Wind simuliert (Richtung 90°) und seine Wirkung auf den seitlichen Pegel untersucht. Zwei Systeme sind dabei besonders aufschlussreich: Sub daneben und Sub-Bogen. Betrachtet werden sie mit der ursprünglichen Trennfrequenz um 60 Hz (Sub daneben 60, Sub-Bogen 60) und mit einer auf 100 Hz verschobenen (Sub daneben 100, Sub-Bogen 100).

Die Abbildung daneben zeigt das Polardiagramm für Sub daneben 60 und Sub-Bogen 60. Bei beiden Konfigurationen steigt der Pegel auf der mitwindigen* Seite (links) und sinkt auf der gegenwindigen* Seite (rechts). Beim Sub-Bogen 60 ist der Einfluss des Windes größer, vor allem gegen den Wind.

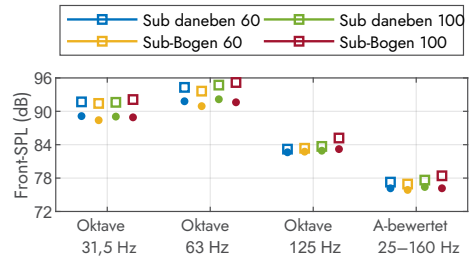
Die nächste Abbildung vergleicht die Seitendämpfung der Systeme: Die Punkte stehen für die Werte ohne Wind, das „+“ für die Werte auf der mitwindigen Seite und das „–“ für die Werte auf der gegenwindigen Seite.

- **Oktave 31,5 Hz:** die beste Seitendämpfung erreichen die Sub-Bogen-Konfigurationen, unabhängig von den Windverhältnissen.
- **Oktave 63 Hz:** Sub daneben 60 dämpft besser als Sub-Bogen 60, vor allem bei Mitwind; Sub-Bogen 100 hat ohne Wind die beste Seitendämpfung, die jedoch stark vom Wind beeinflusst wird – bei Mitwind geht der Vorteil gegenüber Sub daneben 60 verloren.
- **Oktave 125 Hz:** Sub daneben 100 hat die beste Seitendämpfung; sie bleibt auch bei Mitwind stabil.
- **A-bewertetes Band 25 – 160 Hz:** Sub-Bogen 60 hat die schlechteste Seitendämpfung.



Der Einfluss der Temperaturinversion* wird untersucht, indem der Front-Pegel am Tag (Punkte) und in der Nacht (Quadrate) verglichen wird. Die Inversion erhöht den Pegel in allen untersuchten Oktavbändern.

- Tagsüber ist der Pegel an der Front bei den Sub-Bogen-Konfigurationen etwas geringer.
- Nachts macht die Temperaturinversion Sub-Bogen 100 zur lautesten Konfiguration vor dem System.



GLOSSAR

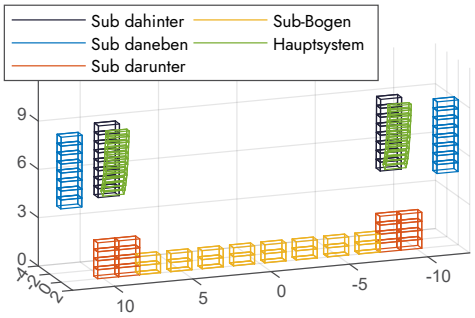
- **Polardiagramm:** zeigt, wie der mittlere bandbegrenzte Schalldruckpegel rund um das System schwankt.
- **Mitwind:** der Wind weht von der Quelle zum Empfänger, in Ausbreitungsrichtung.
- **Gegenwind:** der Wind weht vom Empfänger zur Quelle, entgegen der Ausbreitungsrichtung.
- **Temperaturinversion:** positiver Temperaturgradient, meist nachts zu beobachten.

ANHANG 1 – GETESTETE SYSTEMKONFIGURATIONEN

Haupt- und Subwoofer-System

Das Hauptsystem besteht aus 12 L-Acoustics K2 pro Seite, 18 m voneinander entfernt, in 9 m Höhe geflogen. Die Arrays sind mechanisch so optimiert, dass sie eine Publikumsfläche von 60 m Länge und 45 m Breite abdecken. Verglichen werden vier Subwoofer-Konfigurationen mit je 16 L-Acoustics KS28:

- **Sub dahinter:** geflogene Links/Rechts-Anordnung mit einer senkrechten Reihe aus 8 Subwoofern pro Seite, in 9 m Höhe, 1,7 m hinter dem Hauptsystem.
- **Sub daneben:** geflogene Links/Rechts-Anordnung mit einer senkrechten Reihe aus 8 Subwoofern pro Seite, in 9 m Höhe, 3 m seitlich außerhalb des Hauptsystems.
- **Sub darunter:** bodengestapelte Links/Rechts-Anordnung mit je 2 Spalten à 4 Subwoofern pro Seite, unter dem Hauptsystem gestapelt.
- **Sub-Bogen:** bodengestapelte waagerechte Reihe aus 8 Spalten à 2 Subwoofern im Abstand von 2 m. Auf die Spalten werden paarweise von innen nach außen Verzögerungen gelegt: 0; 0,7; 2,4 und 6,2 ms.



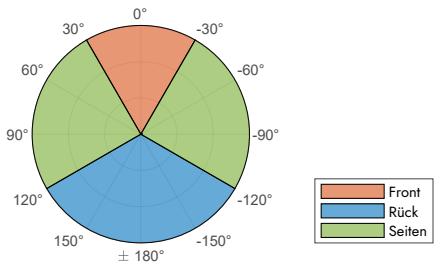
Die Summation von Hauptsystem und Subwoofern ist auf Position [30;4] optimiert, also auf die halbe Länge der Publikumsfläche und leicht außerhalb der Achse. Die ursprüngliche Trennfrequenz zwischen K2 und KS28 (Preset KS28_60) liegt bei etwa 60 Hz. Für die Untersuchung wird sie zusätzlich auf 100 Hz verschoben – über ein Hochpassfilter am K2 (LR24 bei 100 Hz) und das Preset KS28_100 für die Subwoofer.

Normierung

Lautsprechersystem-Designs lassen sich nur dann hinsichtlich Lärmbelastung vergleichen, wenn sie dem Publikum ein vergleichbares Hörerlebnis bieten. Für jedes System wird ein Ansteuersignal so berechnet, dass es in 40 m Entfernung (gemittelt über die Publikumsbreite) dasselbe typische Zielspektrum bei 99 dB(A) bzw. 112 dB(C) erreicht.

ANHANG 2 – VERGLEICHSMETRIK

Die Varianten werden anhand ihres Polardiagramms verglichen, berechnet in 250 m Entfernung vom Systemursprung. Das Polardiagramm entsteht, indem die normierten Frequenzgänge in den jeweiligen Frequenzbändern über den gesamten Bereich 20 – 160 Hz gemittelt werden.



Für die weitere Auswertung wird der Raum in drei Winkelbereiche unterteilt, siehe Abbildung daneben:

1. Front, definiert als die 60° um die Achse des Beschallungssystems, entspricht einer typischen Publikumsbreite
2. Rück, 120° um die Rückseite des Systems
3. Seiten, alle übrigen Winkel zu beiden Seiten des Systems

Für eine genauere Auswertung werden Frontpegel sowie Rückwärts- und Seitendämpfung oktavweise berechnet, als Differenz zwischen dem Pegel hinten bzw. seitlich und dem Pegel an der Front.

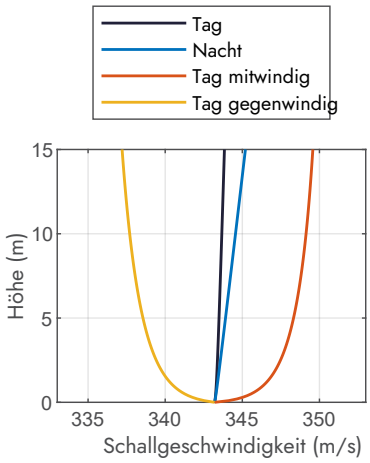
1 Definiert in „Simulating low-frequency noise pollution using the parabolic equations in sound reinforcement loudspeaker systems“ (Link)

ANHANG 3 – INHOMOGENE ATMOSPHÄRISCHE BEDINGUNGEN

Wind- und Temperaturgradient

Bei Open-Air-Veranstaltungen sind Wind und Temperatur meist nicht über die Höhe konstant.

- Der Wind wird meist für eine bestimmte Höhe angegeben; in Bodennähe bremsen ihn Hindernisse und die Bodenrauigkeit.
- An einem sonnigen Tag erwärmt die Sonne den Boden, die Wärme geht an die Luft darüber über und es wird in Bodennähe wärmer. Nachts ist es umgekehrt: Der Boden nimmt Wärme auf, die bodennahe Luft kühlt ab und die Temperatur steigt mit der Höhe (Temperaturinversion).

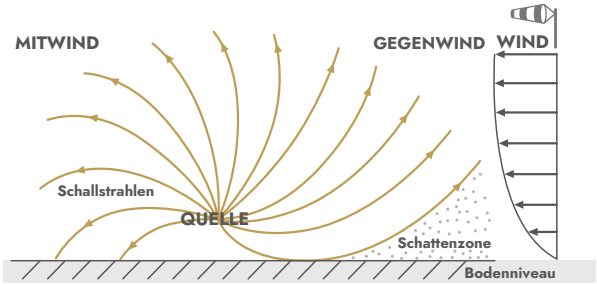


Wind und Temperatur beeinflussen die Schallgeschwindigkeit:

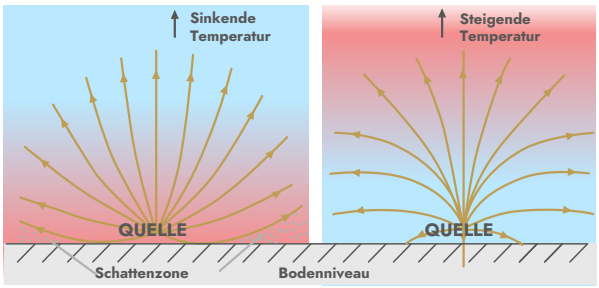
- Mitwind erhöht die Schallgeschwindigkeit, Gegenwind verringert sie.
- Die Schallgeschwindigkeit ist proportional zur Wurzel der absoluten Temperatur.
- Diese inhomogenen Bedingungen erzeugen einen Schallgeschwindigkeits-Gradienten.

Einfluss auf die Schallausbreitung

In der Strahlenakustik wird die gerade Linie von der Quelle zum Empfänger, wie sie in homogener Atmosphäre gilt, bei einem Schallgeschwindigkeits-Gradienten durch einen gekrümmten Strahl ersetzt. Dieses Phänomen heißt Refraktion:



- Mitwind oder positive Temperaturgradienten lassen die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zunehmen. Der Schall wird nach unten gebrochen, am Boden reflektiert und erneut nach unten gebrochen. Er konzentriert sich so in Bodennähe – mit höherem Pegel und höherer Lärmbelastung.



- Umgekehrt lassen Gegenwind oder ein negativer Temperaturgradient die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe abnehmen. Der Schall wird nach oben gebrochen. Das führt zu geringerem Pegel, teils zu einer Schattenzone, und zu weniger Lärmbelastung.

Simulationsmethode

Zur Simulation inhomogener atmosphärischer Bedingungen werden Parabolische Gleichungen (PE) genutzt. Eine vollständige Beschreibung der Methode findet sich im AES-Paper „Simulating low-frequency noise pollution using the parabolic equations in sound reinforcement loudspeaker systems“ (link). PE simuliert komplexe Quellen sehr genau, berücksichtigt variable Bodenimpedanz und vertikale Schallgeschwindigkeitsprofile und braucht weniger Rechenleistung als etwa die Finite-Elemente-Methode (FEM). Bei tiefen Frequenzen ist sie genauer als strahlenakustische Verfahren.

