

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 44 823 55 11  
F +41 44 821 62 44  
www.empa.ch



Materials Science & Technology

Baudirektion Kanton Zürich  
Fachstelle Lärmschutz  
Christian Mikolasek  
Walcheplatz 2  
8090 Zürich

## Untersuchungsbericht Nr. 459'459, int. 591.2531

**Auftrag:** Bereitstellung von Grundlagen zur Ausarbeitung eines Merkblatts  
für die Bewilligung von Open-Air Veranstaltungen

Anzahl Seiten: 17

- 1 Zusammenfassung
  - 2 Auftrag
  - 3 Einleitung
  - 4 VDI 3770
  - 5 Schallausbreitungsdämpfung
  - 6 Störwirkung tieffrequenter Signale
  - 7 Fazit
- Anhang: Zahlenbeispiele

---

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärminderung  
Dübendorf, 9. März 2012

Projektleiter:  
Dr. Kurt Heutschi

Abteilungsleiter:  
Kurt Eggenschwiler

## 1 Zusammenfassung

Im Auftrag der Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich wurden Grundlagen zur Bestimmung der möglichen Lärmstörwirkung von open-Air Veranstaltungen zusammengetragen. Diese umfassen Hinweise zur Abschätzung der Quellstärken und der Abstrahlcharakteristika, zur Schallausbreitung über grössere Distanzen und zur Abgrenzung der Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen. Im Sinne eines Rezepts werden die aus Sicht einer Bewilligungsinstanz erforderlichen Grundlagen und Nachweise für eine open-Air Veranstaltung aufgelistet und mit Zahlenbeispielen illustriert.

## 2 Auftrag

Mit e-mail vom 17.11.2011 beauftragte die Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung mit der Erarbeitung von Grundlagen für die spätere Verfassung eines Merkblatts zu Händen der Gemeinden rund um die Prüfung der möglichen Lärmstörung in der Nachbarschaft von Open-Air Veranstaltungen. Insbesondere sollten folgende Aspekte diskutiert werden:

- Störwirkung durch tieffrequente Signale
- Kriterium der C/A-Bewertungs-Pegeldifferenzen
- Besondere Phänomene bei der Ausbreitung über grössere Entfernungen
- Typische Richtcharakteristiken von Lautsprechersystemen mit dem Fokus der Möglichkeiten der Pegelminderungen in der Umgebung durch Optimierung der Ausrichtung.

## 3 Einleitung

Die Abschätzung einer möglichen Störwirkung von Anwohnern durch im Freien aufgestellte Beschallungsanlagen, wie sie z.B. bei Freiluftkonzerten eingesetzt werden, basiert auf einer Betrachtung des A-bewerteten Immissionspegels und gegebenenfalls auf einer separaten Untersuchung der tieffrequenten Schallanteile. Im Bewilligungsverfahren muss auf rechnerische Prognosen oder Abschätzungen abgestellt werden, da keine konkrete Messmöglichkeit besteht. Für eine solche vorgängige Immissionspegelermittlung ist die Kenntnis der Quellstärke und der entsprechenden Abstrahlcharakteristik sowie der Ausbreitungsdämpfung erforderlich. Die Immissionspegel können dann mit Richtwerten verglichen werden, um die Wahrscheinlichkeit einer Störung abzuschätzen. In den folgenden Abschnitten werden Grundlagen zur Abschätzung der Quellstärke und Richtwirkung präsentiert, Besonderheiten der Schallausbreitung über

grössere Entfernungen diskutiert und schliesslich Hinweise zur Bedeutung der tiefen Frequenzen für das Störurteil angeben.

## 4 VDI 3770: Emissionskennwerte von Schallquellen: Sport und Freizeitanlagen

Zur Abschätzung der Emission von Beschallungsanlagen, die bei Open-Air Veranstaltungen eingesetzt werden, kann die als Entwurf vom Mai 2011 vorliegende VDI Richtlinie 3770 herangezogen werden.

### 4.1 Quellstärke

Die Quellstärke wird als A-bewerteter Schallleistungspegel  $L_{WA}$  in Funktion der zu beschallenden Fläche A (bzw. der maximalen Zuschauerzahl) und eines genreabhängigen Mindestversorgungspegels  $L_{AV,min}$  spezifiziert. Es stehen Angaben für Grossbühnen (Diskotheken, Rock- und Popmusikbühnen), Kleinbühnen (Jazzbühnen) sowie Klassikveranstaltungen zur Verfügung (Abbildung 1). Für jedes Genre werden überdies Spektrums-Korrekturen in Terzen angegeben (Abbildung 2), welche eine Abschätzung der Bedeutung des Tieffrequenzanteils und eine frequenzabhängige Ausbreitungsrechnung ermöglichen.

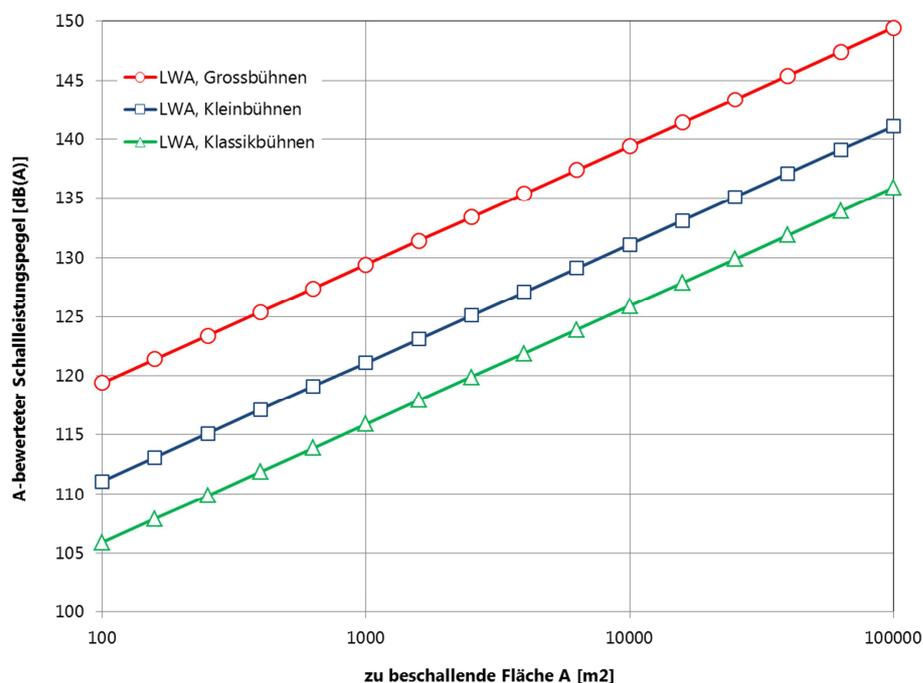


Abbildung 1: Schallleistungspegel in Abhängigkeit von der zu beschallenden Fläche für drei verschiedene Veranstaltungstypen.

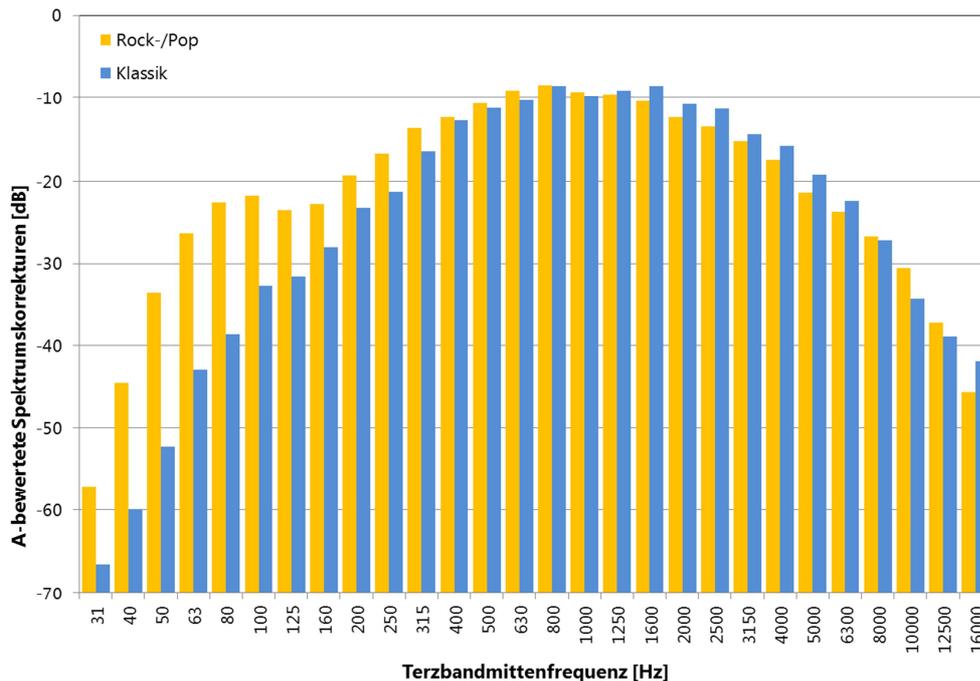


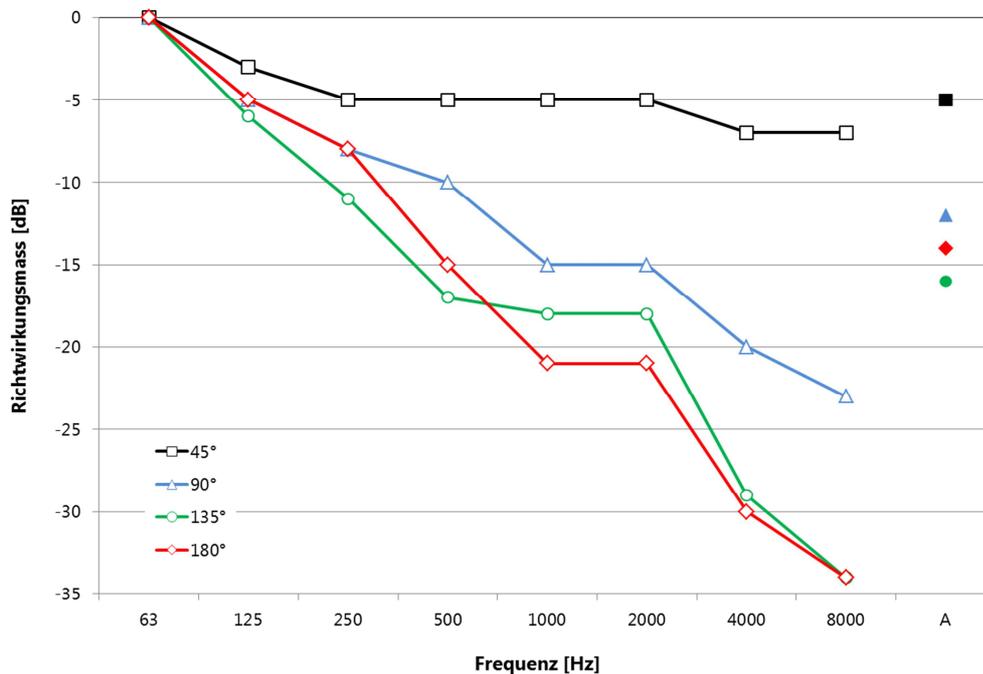
Abbildung 2: A-bewertete Spektrumskorrekturen für die beiden Genres *Rock-/Pop* und *Klassik*.

## 4.2 Abstrahlcharakteristik

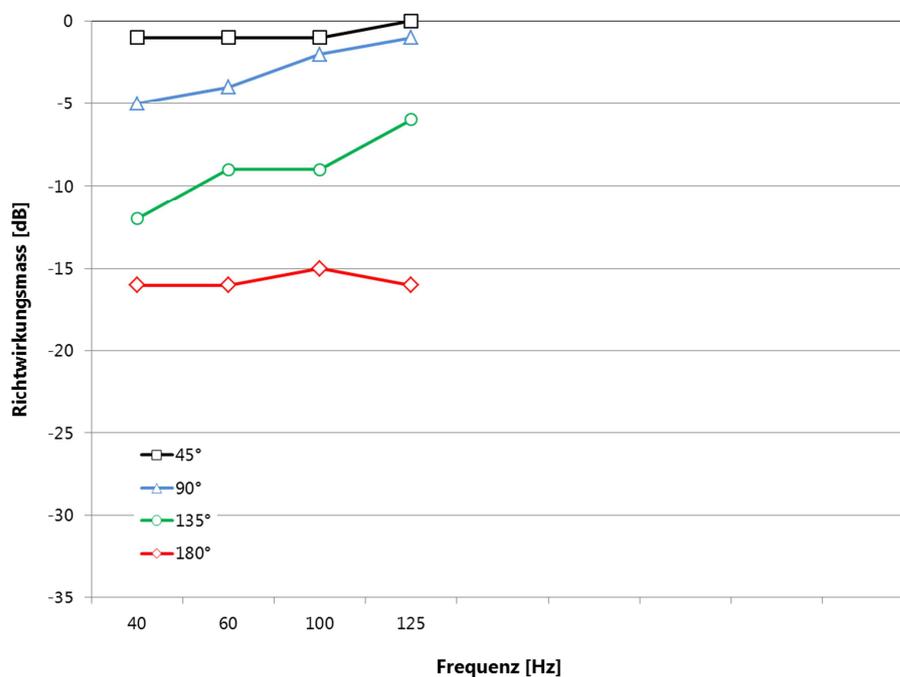
Die Abstrahlcharakteristik wird in Form eines Richtwirkungsmasses DI sowohl für den A-bewerteten Summenpegel als auch in Oktaven von 63 Hz bis 8 kHz spezifiziert (Abbildung 3). Diese Richtwirkung ist in der horizontalen Ebene zu verstehen. In der vertikalen können Lautsprecherzeilen oder Line Arrays wesentlich stärkere Bündelungen erzeugen. Man beachte, dass sich die Abstrahlcharakteristik bei Aufstellung unmittelbar vor einer reflektierenden Oberfläche stark verändern kann.

Wie Abbildung 3 zeigt, strahlen konventionelle Lautsprechersysteme tieffrequent in alle Richtungen gleich stark ab. Gegen hohe Frequenzen hin nimmt die Bündelung in Achsrichtung stark zu.

Ohne quantitative Aussagen zu machen, weist die VDI Richtlinie darauf hin, dass insbesondere bei grösseren Beschallungsanlagen zunehmend Cardioid-Subwoofer eingesetzt werden, die eine gerichtete Abstrahlung aufweisen. Wie Abbildung 4 exemplarisch zeigt, erreichen solche Systeme gegen ganz hinten auch sehr tieffrequent Abschwächungen von rund 15 dB. Es ist allerdings zu beachten, dass diese maximale Dämpfung bei 180° (welche gerne als Zahl im Prospekt genannt wird) nur in einem sehr engen Winkelbereich gilt. Wenn in einer konkreten Anwendung ein Cardioid Subwoofer eingesetzt wird, sollten selbst für die Richtung 180° höchstens die „schräg hinten“ Werte (135°) eingesetzt werden, da sich der Subwoofer nicht so präzise ausrichten lassen wird.



**Abbildung 3: Frequenzabhängige Richtwirkungskorrekturen für die Richtungen 45°, 90°, 135° und 180° bzgl. der Hauptabstrahlrichtung (0°) für ein konventionelles Lautsprechersystem.**



**Abbildung 4: Horizontale Richtwirkung eines Cardioid Subwoofers am Beispiel des PSW-6 von Meyer Sound.**

## 5 Schallausbreitungsämpfung

Die Ausbreitung des Schalls von Open-Air Veranstaltungen wird durch die Phänomene geometrische Verdünnung, Luftdämpfung, Bodeneffekt, mögliche Hinderniswirkung sowie mögliche Reflexionen bestimmt. Da die Quellen-Empfänger-Abstände zu möglicherweise durch Lärm belästigten Personen relativ gross sein können, ist von einem relevanten Einfluss der Meteorologie auf die Schallausbreitung auszugehen.

### 5.1 Geometrische Verdünnung

Die geometrische Verdünnung ist frequenzunabhängig und beschreibt die Abnahme des Schalldrucks mit zunehmender Entfernung als Folge der Verdünnung der Quellenleistung über eine immer grösser werdende Oberfläche. Ab Entfernungen von rund 3-mal der Abmessung des ganzen Beschallungssystems kann die Quelle als Punktquelle betrachtet werden. Es lässt sich für die geometrische Verdünnung  $A_{div}$  schreiben:

$$A_{div} = 20 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 10 \cdot \log(4\pi) \quad [\text{dB}]$$

wobei  $d$  dem Abstand in m und  $d_0$  der Referenzdistanz 1 m entspricht. Der Term  $10 \log(4\pi)$  entspricht 11 dB und bewerkstelligt die Überführung von Schalleistungspegel in Schalldruckpegel in 1 m Abstand.

### 5.2 Luftdämpfung

Die Schallausbreitung erfährt in der Luft eine Abschwächung, die vom Zustand der Luft (Temperatur und Feuchte), der Frequenz und dem Laufweg abhängt. Generell nimmt die Luftdämpfung gegen hohe Frequenzen hin stark zu. Dies führt mit zunehmendem Abstand zu einer Verschiebung der Signalenergie gegen tiefere Frequenzen. Für gegebene Temperatur- und Feuchtwerte finden sich die Dämpfungskoeffizienten in der ISO 90613-1<sup>1</sup>.

### 5.3 Bodeneffekt

Die meisten Bodentypen, insbesondere auch Grasflächen, stellen für Schallwellen wirksame Reflektoren dar. Bei der Schallausbreitung in Bodennähe trägt damit nebst dem Direktschall die Bodenreflexion nennenswert zum Schalldruck an einem Empfänger bei. Abhängig von der Geometrie und den Bodeneigen-

---

<sup>1</sup> ISO Norm 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

schaften entsteht ein Interferenzmuster, so dass sich gewisse Frequenzen verstärken und andere abschwächen. Der Bodeneffekt bezeichnet die Pegeldifferenz am Empfangspunkt mit und ohne Boden.

Es existieren sowohl empirische Bodeneffektformeln (z.B. ISO 9613-2<sup>2</sup>) als auch effiziente numerische Verfahren, die explizit die Bodenreflexion für eine Punktquelle über lokal reagierendem Boden berechnen<sup>3</sup>.

## 5.4 Hinderniswirkung

Massive und luftundurchlässige Objekte, die die direkte Sichtlinie Quelle-Empfänger unterbrechen, führen zu einer signifikanten Reduktion der Immission. Die geometrische Schattenzone hinter einem Hindernis wird möglicherweise durch gebrochenen Schall, durch an der Hinderniskante gebeugten Schall und durch Streuung an Mediumsinhomogenitäten versorgt.

Nebst massiven Hindernissen, wie z.B. Geländekanten, Wänden oder Gebäuden, können auch lockere Strukturen wie z.B. Wald zu einer abschwächenden Wirkung führen. Allerdings sind dazu Tiefen grösser als 25 m erforderlich (ISO 9613-2).

## 5.5 Reflexionen

Zusätzlich zur Bodenreflexion können relevante Reflexionen an künstlichen Objekten wie Hausfassaden oder an natürlichen Strukturen wie Wäldern und Felsen entstehen. Diese Reflexionen wirken immer verstärkend, da sie zusätzliche Ausbreitungspfade ohne festen Phasenbezug zum Direktschall darstellen und damit keine Interferenzausschlöschungen erzeugen. Bei spiegelnden Reflexionen ist abzuklären, ob der Reflektor gross genug ist (ISO 9613-2).

## 5.6 Wettereinfluss

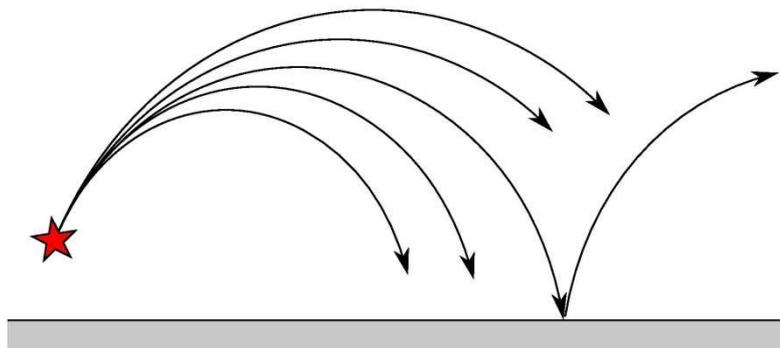
Der Wettereinfluss auf die Schallausbreitung über grössere Distanzen entsteht hauptsächlich durch gekrümmte Ausbreitung als Folge von nennenswerten vertikalen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit. Die effektive Schallgeschwindigkeit entspricht für einigermassen horizontale Abstrahlung mit guter Näherung der vektoriellen Addition des von der Quelle radial nach aussen zeigenden Schallgeschwindigkeitsvektors und des Windgeschwindigkeitsvektors. Ein von 0 abweichender vertikaler Gradient entsteht immer dann, wenn die Schallgeschwindigkeit und/oder die Windgeschwindigkeit höhenabhängig sind. Da

<sup>2</sup> ISO Norm 9613-2: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation.

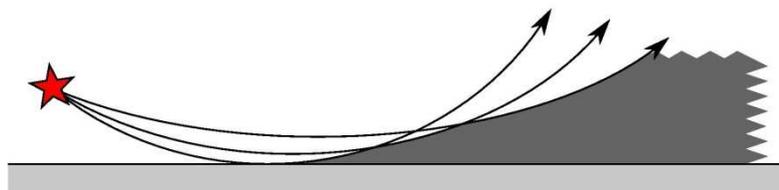
<sup>3</sup> C. I. Chessel, Propagation on noise along a finite impedance boundary, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 62, 825-834 (1977).

die Schallgeschwindigkeit hinsichtlich aller atmosphärischer Einflussgrössen vor allem eine Temperaturabhängigkeit zeigt, ist für die Frage des vertikalen Gradienten nebst der Windgeschwindigkeit die Temperaturschichtung zu untersuchen.

Positive vertikale Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit (d.h. mit der Höhe zunehmend) entstehen bei Mitwind und/oder bodennaher Temperaturinversion (typisch nachts). Negative Gradienten resultieren bei Gegenwind und/oder labiler Temperaturschichtung (typisch tagsüber). Die als Folge vertikaler Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit auftretende Krümmung der Ausbreitung kann mit Strahlenbildern sehr vorteilhaft visualisiert werden. Bei positiven vertikalen Gradienten werden die Schallstrahlen zum Boden hin gekrümmt (Abbildung 5). Dies kann dazu führen, dass Hindernisse überstiegen werden und diese damit ihre Abschirmwirkung verlieren oder dass in sehr grossen Abständen mehrere Bodenreflexionen auftreten (siehe „Ausbreitung über Wasser“ weiter unten). Bei negativen Gradienten krümmen sich die Schallstrahlen vom Boden weg, so dass sich Schattenzonen ausbilden (Abbildung 6). Diese Schattenzonen werden nur durch Beugung und Streuung an Mediumsinhomogenitäten mit Schallenergie versorgt, so dass sich in diesen Regionen sehr hohe Abschwächungen der Immissionen einstellen.



**Abbildung 5: Strahlenbild für mit der Höhe zunehmende effektive Schallgeschwindigkeit.**



**Abbildung 6: Strahlenbild für mit der Höhe abnehmende effektive Schallgeschwindigkeit und Ausbildung einer Schattenzone.**

## 5.7 Besonderheiten bei der Schallausbreitung über Wasser

Hinsichtlich der Schallausbreitung weisen Wasserflächen gegenüber natürlichen Landflächen (Gras, ...) zwei Besonderheiten auf. Zum einen können sie in guter Näherung als akustisch hart betrachtet werden (verlustlose Reflexion ohne Phasendrehung), zum anderen stellen sich am Übergang Wasser/Luft besondere Temperaturverhältnisse ein. An warmen Sommertagen ist sowohl tagsüber als auch nachts die Luft oft wärmer als das Wasser. Ähnlich wie in klaren Nächten führt dies zur Ausbildung einer Temperaturinversion mit einer zum Boden hin gekrümmten Ausbreitung.

Abbildung 7 bis Abbildung 9 zeigen ray tracing Simulation im Falle einer solchen Temperaturinversion für eine 4 m hohe Quelle und einen 4 m hohen Empfänger. Die Grafiken sind als Vertikalschnitt in der Landschaft zu lesen, wobei ganz unterschiedliche Skalierungen der horizontalen und vertikalen Achse verwendet werden. Es zeigt sich, dass mit wachsendem Quellen-Empfänger Abstand die Anzahl der Strahlen  $N_{rays}$  die von der Quelle zum Empfänger führen, zunimmt. Da die Strahlen auch bei Mehrfachreflexionen an der akustisch harten Wasseroberfläche keine nennenswerten Abschwächung erfahren, erhöht sich gegenüber der freien Ausbreitung ( $20 \log(d/d_0)$ ) der Immissionspegel um  $\Delta L$  mit

$$\Delta L \approx 10 \log(N_{rays})$$

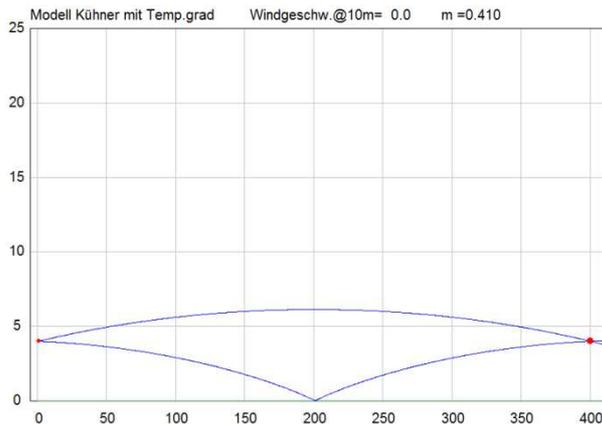
Mit Hilfe von geometrischen Näherungsüberlegungen kann festgestellt werden<sup>4</sup>, dass  $N_{rays}$  proportional mit dem Quellen-Empfänger-Abstand  $d$  zunimmt und damit für  $\Delta L$  geschrieben werden kann:

$$\Delta L \approx K + 10 \log(d)$$

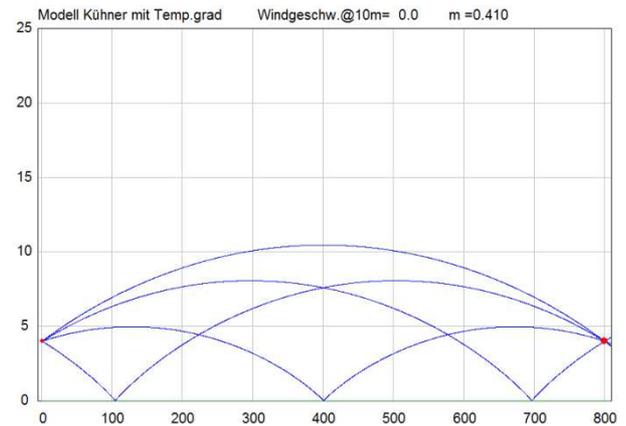
wobei  $K$  eine Konstante darstellt, die vom Gradienten der effektiven Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der Quellen- und Empfängerhöhe abhängt. Diese Betrachtungen setzen voraus, dass die Wasserfläche perfekt glatt ist. Da reale Wasserflächen immer eine gewisse Welligkeit aufweisen, gelten obige Pegelzunahmen nicht mehr in grossen Abständen und einer damit verbundenen grossen Zahl von Reflexionen.

---

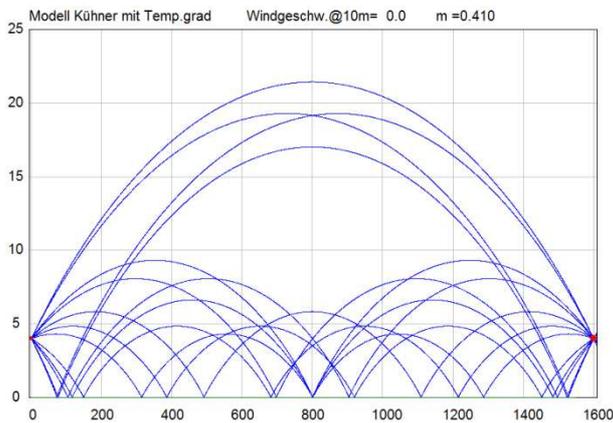
<sup>4</sup> E. M. Salomons, Computational Atmospheric Acoustics, Kluwer Academic Publishers, 2001.



**Abbildung 7: Ray tracing Simulation einer Inversionslage mit allen Strahlen von einer 4 m hohen Quelle zu einem 4 m hohen Empfänger bei einem Abstand von 400 m.**



**Abbildung 8: Ray tracing Simulation einer Inversionslage mit allen Strahlen von einer 4 m hohen Quelle zu einem 4 m hohen Empfänger bei einem Abstand von 800 m.**



**Abbildung 9: Ray tracing Simulation einer Inversionslage mit allen Strahlen von einer 4 m hohen Quelle zu einem 4 m hohen Empfänger bei einem Abstand von 1600 m.**

## 6 Störwirkung tieffrequenter Signale

### 6.1 Abschätzung der C/A-Bewertungs-Pegeldifferenzen

Generell ist bei ausgeprägt tieftonhaltigen Geräuschen eine Beurteilung der möglichen Störwirkung anhand des A-Pegels alleine nicht mehr zuverlässig. In diesen Fällen wird die Anwendung der DIN 45680<sup>5</sup> empfohlen.

Rock-/Pop Veranstaltungen weisen relativ viel tieffrequente Signalenergie auf (Abbildung 2) und müssen insbesondere in grösseren Abständen (als Folge der frequenzabhängigen Luftdämpfung) und in Nicht-

<sup>5</sup> DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, 1997.

Hauptabstrahlrichtung möglicherweise nach der DIN 45680 beurteilt werden. Gemäss der DIN 45680 bzw. der Sächsischen Freizeitlärmstudie<sup>6</sup> kann diese Notwendigkeit anhand der Pegeldifferenz der C- und A-Bewertung (im Freien ausserhalb des Gebäudes bestimmt) entschieden werden. Bei C/A-Differenzen kleiner 20 dB ist die A-Pegel-Bewertung ausreichend, bei C/A-Differenzen grösser 20 dB muss zusätzlich die tieffrequente Störwirkung untersucht werden.

Basierend auf dem Schalleistungsspektrum für Rock-/Pop Veranstaltungen gemäss VDI 3770 wird hier die C/A-Pegeldifferenz detaillierter untersucht. Das Spektrum alleine führt auf eine C/A-Pegeldifferenz von 6.5 dB. Eine weitere Verschiebung zu tiefen Frequenzen ergibt sich für grössere Abstände und in Nicht-Hauptabstrahlrichtung bzgl. der Lautsprecher. Die Abstandsabhängigkeit ist die Folge der mit der Distanz an Bedeutung gewinnenden Luftdämpfung, welche vor allem die hohen Frequenzen abschwächt. Die Abhängigkeit von der Abstrahlrichtung ist die Konsequenz der Frequenzabhängigkeit der Lautsprecherrichtungswirkung. Für tiefe Frequenzen ist die Abstrahlung praktisch rund (Ausnahmen sind die erwähnten Cardioid Subwoofer) währenddem die Bündelung in Achsrichtung mit steigender Frequenz zunimmt.

Für die Berechnungen wurde die Luftdämpfung bei 20° und 60% relativer Feuchte gemäss ISO 9613-1 eingesetzt. Für die fünf Abstrahlrichtungen 0°, 45°, 90°, 135° und 180° wurden entsprechend den VDI 3770 Richtwirkungskorrekturen (Abbildung 3) jene Entfernungen gesucht, für welche die C/A-Pegeldifferenz  $\Delta L_{CA}$  gerade 20 dB erreicht. Zusätzlich sind auch die Distanzen für  $\Delta L_{CA} = 12$  dB aufgeführt. Die Tabelle 1 zeigt die gefundenen Abstände. Wenn Cardioid Subwoofer eingesetzt werden, erhöhen sich die Distanzen für die „nach hinten Richtungen“.

Abstrahlrichtung	0°	45°	90°	135°	180°
Distanz für $\Delta L_{CA} = 12$ dB	1800 m	600 m	0 m	0 m	0 m
Distanz für $\Delta L_{CA} = 20$ dB	8500 m	5000 m	2700 m	800 m	1700 m

**Tabelle 1: Distanzen, oberhalb welchen die C/A-Pegeldifferenz von 12 bzw. 20 dB überschritten wird.**

<sup>6</sup> Sächsische Freizeitlärmstudie, April 2006, [www.umwelt.sachsen.de/lfug](http://www.umwelt.sachsen.de/lfug)

## 6.2 DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen

Die DIN 45680 versteht als Bereich tiefer Frequenzen die Terzbänder von 10 bis 80 Hz. Da in diesem Frequenzbereich grössere Unsicherheiten hinsichtlich der Schalldämmung von Hausfassaden bestehen und das Schallfeld in den Innenräumen durch Resonanzen dominiert ist, kann anhand einer Aussenpegelbeurteilung nicht verlässlich auf die Störwirkung im Innern geschlossen werden. Deshalb sollte eine Störwirkungsbeurteilung direkt anhand der Innenraumpegel vorgenommen werden.

Grundlage für die Beurteilung bildet eine Terzbandanalyse. Die Signal-Mittelungspegel  $L_{eq}$  und die mit der Zeitkonstanten Fast bewerteten Maximalpegel werden in jeder Terz mit den entsprechenden Hörschwellenpegeln verglichen. Überdies wird geprüft, ob das Signalspektrum deutlich hervortretende tonale Komponenten aufweist. Eine solche tonale Komponente zeichnet sich dadurch aus, dass der Terzbandpegel um mindestens 5 dB höher liegt als seine beiden Nachbarerzwerte. Um auch jene Fälle zu entdecken, in welchen die Frequenz der tonalen Komponente gerade in der Mitte zwischen zwei Terzen liegt, wird die 5 dB Prüfung zusätzlich mit der energetischen Summe zweier benachbarter Terzen durchgeführt. Zusätzlich muss in diesem Fall aber die Tonalität durch einen Höreindruck bestätigt werden.

Im Beiblatt 1 zur Norm werden Anhaltswerte genannt, deren Einhaltung im allgemeinen keine erheblichen Belästigungen garantiert. Bei Präsenz von tonalen Komponenten müssen in der Nachtperiode die Terzbandmittelungspegel im Wesentlichen (Ausnahme 80 Hz Terz) unter der Hörschwelle liegen.

## 7 Fazit für die Störwirkungsabschätzung von Open-Air Veranstaltungen

### **Notwendige Grundlagen:**

- Beschallungskonzept mit Ausrichtung der Lautsprecher und einem Nachweis, dass die Ausrichtung hinsichtlich der Störung in der Nachbarschaft optimiert ist.
- Angaben zur Publikumsfläche und der akustisch abgestrahlten Leistung, sodass eine Kontrolle mit den VDI 3770 Emissionsangaben möglich ist.
- Angabe zum Subwoofer System, (Cardioid Ja/Nein). Da heute Cardioid Systeme keine Exoten mehr sind, ist möglicherweise zur Befriedigung des Vorsorgeprinzips die Forderung angebracht, dass solche Systeme eingesetzt werden müssen.

**Notwendige Nachweise:**

Zur Beurteilung der möglichen Störwirkung wird eine frequenzabhängige Immissionspegelberechnung in Terzen oder Oktaven für die exponierten Anwohnerstandorte unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik des Beschallungssystems benötigt. Als Ausbreitungsmodell kann z.B. ISO 9613-2 verwendet werden.

Folgende Punkte verdienen besonderes Augenmerk:

- Bei Betrieb abends oder nachts sind förderliche Ausbreitungsbedingungen anzunehmen, z.B. indem Hinderniswirkungen von Objekten, die nicht in unmittelbarer Nähe zur Quelle oder zum Empfänger liegen und die Sichtverbindung nur knapp unterbrechen, ignoriert werden.
- Bei Schallausbreitung über Wasserflächen ist prinzipiell von höheren Pegeln als über Grasboden auszugehen. Es ist eine distanzproportionale Pegelerhöhung gegenüber Freifeld zu berücksichtigen, wobei diese Erhöhung in 1600 m Abstand frequenzunabhängig in der Grössenordnung von 10 dB liegen kann. Diese Abschätzung ist allerdings mit einer grösseren Unsicherheit verbunden.
- Für Distanzen kleiner als rund 1000 m genügt eine A-Pegel Diskussion, in grösserer Entfernung kann je nach Winkel bzgl. der Hauptabstrahlrichtung die C/A-Pegeldifferenz  $> 20$  dB sein, so dass eine zusätzliche Beurteilung für tieffrequente Geräusche notwendig wird. Diese Distanzgrenze gilt unter der Voraussetzung, dass im Bereich der beschallten Publikumsfläche eine C/A Pegeldifferenz  $\Delta L_{C/A}$  von 6.5 dB gilt und kein Cardioid Subwoofer eingesetzt wird. Bei allfällig grösseren  $\Delta L_{C/A}$  Werten im Publikumsbereich werden die 20 dB bereits in geringeren Abständen erreicht. Umgekehrt erhöhen sich die Entfernungen in die „nach hinten“ Richtungen, wenn Cardioid Subwoofer verwendet werden.

## Anhang: Zahlenbeispiele

- Berechnung der C/A-Pegeldifferenz für die in der VDI 3770 definierten Spektren *Rock-/Pop* und *Klassik*.
- Berechnung der immissionsseitigen C/A-Pegeldifferenz für das in der VDI 3770 definierte Spektrum *Rock-/Pop*, eine Richtwirkungskorrektur für 90° nach Abbildung 3 und mit einer Luftdämpfung für einen Schalllaufweg von 2700 m.
- Abschätzung des Anlagen-Schalleistungspegels für eine Grossbühne (Rock- und Popmusik) anhand der Zuschauerzahl und Bestimmung des Immissionspegels in 500 m Entfernung mittels des überr-schlägigen Verfahrens.

Die Tabelle 2 zeigt die Berechnung der C/A-Pegeldifferenzen aus obigen Spektrumskorrekturen. Dazu wurde ausgehend von den Spektrumskorrekturen in jeder Terz die A-Bewertung rückgängig gemacht (→ lineare Spektren), dann darauf die C-Bewertung angewendet (→ C-bewertete Spektren) und davon der Summenpegel bestimmt. Für das Rock-/Pop Spektrum ist die C/A-Pegeldifferenz 6.5 dB, für das Klassikspektrum 1.7 dB.

	A-Spektrums-korrekturen		A-Bew.	lineare Spektren		C-Bew.	C-bewertete Spektren	
	Rock-/Pop	Klassik		Rock-/Pop	Klassik		Rock-/Pop	Klassik
	[dB]	[dB]		[dB]	[dB]		[dB]	[dB]
31	-57.1	-66.5	-39.4	-17.7	-27.1	-3.0	-20.7	-30.1
40	-44.5	-59.9	-34.6	-9.9	-25.3	-2.0	-11.9	-27.3
50	-33.5	-52.3	-30.2	-3.3	-22.1	-1.3	-4.6	-23.4
63	-26.4	-42.9	-26.2	-0.2	-16.7	-0.8	-1.0	-17.5
80	-22.7	-38.6	-22.5	-0.2	-16.1	-0.5	-0.7	-16.6
100	-21.7	-32.7	-19.1	-2.6	-13.6	-0.3	-2.9	-13.9
125	-23.6	-31.6	-16.1	-7.5	-15.5	-0.2	-7.7	-15.7
160	-22.8	-28.0	-13.4	-9.4	-14.6	-0.1	-9.5	-14.7
200	-19.3	-23.3	-10.9	-8.4	-12.4	0.0	-8.4	-12.4
250	-16.7	-21.3	-8.6	-8.1	-12.7	0.0	-8.1	-12.7
315	-13.6	-16.4	-6.6	-7.0	-9.8	0.0	-7.0	-9.8
400	-12.3	-12.7	-4.8	-7.5	-7.9	0.0	-7.5	-7.9
500	-10.7	-11.2	-3.2	-7.5	-8.0	0.0	-7.5	-8.0
630	-9.1	-10.3	-1.9	-7.2	-8.4	0.0	-7.2	-8.4
800	-8.4	-8.5	-0.8	-7.6	-7.7	0.0	-7.6	-7.7
1000	-9.3	-9.7	0.0	-9.3	-9.7	0.0	-9.3	-9.7
1250	-9.6	-9.1	0.6	-10.2	-9.7	0.0	-10.2	-9.7
1600	-10.4	-8.5	1.0	-11.4	-9.5	-0.1	-11.5	-9.6
2000	-12.3	-10.8	1.2	-13.5	-12.0	-0.2	-13.7	-12.2
2500	-13.5	-11.3	1.3	-14.8	-12.6	-0.3	-15.1	-12.9
3150	-15.2	-14.4	1.2	-16.4	-15.6	-0.5	-16.9	-16.1
4000	-17.5	-15.8	1.0	-18.5	-16.8	-0.8	-19.3	-17.6
5000	-21.4	-19.2	0.5	-21.9	-19.7	-1.3	-23.2	-21.0
6300	-23.8	-22.5	-0.1	-23.7	-22.4	-2.0	-25.7	-24.4
8000	-26.7	-27.2	-1.1	-25.6	-26.1	-3.0	-28.6	-29.1
10000	-30.6	-34.4	-2.5	-28.1	-31.9	-4.4	-32.5	-36.3
12500	-37.2	-38.9	-4.3	-32.9	-34.6	-6.2	-39.1	-40.8
16000	-45.6	-41.9	-6.6	-39.0	-35.3	-8.5	-47.5	-43.8
Summen-pegel [dB]	0.0	0.0					<b>6.5</b>	<b>1.7</b>

**Tabelle 2: Berechnung der C/A-Pegeldifferenz für die in der VDI 3770 definierten Spektren Rock-/Pop und Klassik.**

Die Tabelle 3 zeigt die Berechnung der immissionsseitigen C/A-Pegeldifferenz für das Rock-/Pop Spektrum unter 90° in einer Entfernung von 2700 m. Es wurden nur die frequenzabhängigen Ausbreitungseffekte berücksichtigt. Für die 90° Richtwirkungskorrektur wurde ein konventionelles Lautsprechersystem angenommen. *alpha* bezeichnet die Luftdämpfungskoeffizienten in Terzen (gültig für 20° und 60%), die Spalte *Luftd.* Entspricht der effektiven Luftdämpfung für eine Entfernung von 2700 m.

	lin. Spek.	Richtwirkung		Luftd.				
	Rock-/Pop	90 Grad	alpha	2700 m	A-Bew.	C-Bew.	Immission A-bew.	Immission C-bew.
	[dB]	[dB]	[dB/km]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
31	-17.7	0.0	0.0	0.1	-39.4	-3.0	-57.2	-20.8
40	-9.9	0.0	0.1	0.2	-34.6	-2.0	-44.7	-12.1
50	-3.3	0.0	0.1	0.2	-30.2	-1.3	-33.7	-4.8
63	-0.2	0.0	0.1	0.3	-26.2	-0.8	-26.7	-1.3
80	-0.2	0.0	0.2	0.4	-22.5	-0.5	-23.1	-1.1
100	-2.6	-5.0	0.3	0.7	-19.1	-0.3	-27.4	-8.6
125	-7.5	-5.0	0.4	1.0	-16.1	-0.2	-29.6	-13.7
160	-9.4	-5.0	0.6	1.6	-13.4	-0.1	-29.4	-16.1
200	-8.4	-8.0	0.9	2.3	-10.9	0.0	-29.6	-18.7
250	-8.1	-8.0	1.2	3.3	-8.6	0.0	-28.0	-19.4
315	-7.0	-8.0	1.7	4.5	-6.6	0.0	-26.1	-19.5
400	-7.5	-10.0	2.2	6.0	-4.8	0.0	-28.3	-23.5
500	-7.5	-10.0	2.8	7.5	-3.2	0.0	-28.2	-25.0
630	-7.2	-10.0	3.4	9.2	-1.9	0.0	-28.3	-26.4
800	-7.6	-15.0	4.1	11.0	-0.8	0.0	-34.4	-33.6
1000	-9.3	-15.0	4.8	13.0	0.0	0.0	-37.3	-37.3
1250	-10.2	-15.0	5.7	15.5	0.6	0.0	-40.1	-40.7
1600	-11.4	-15.0	7.2	19.5	1.0	-0.1	-44.9	-46.0
2000	-13.5	-15.0	9.3	25.1	1.2	-0.2	-52.4	-53.8
2500	-14.8	-15.0	12.4	33.5	1.3	-0.3	-62.0	-63.6
3150	-16.4	-20.0	17.4	47.0	1.2	-0.5	-82.2	-83.9
4000	-18.5	-20.0	25.6	69.2	1.0	-0.8	-106.7	-108.5
5000	-21.9	-20.0	37.7	101.8	0.5	-1.3	-143.2	-145.0
6300	-23.7	-23.0	57.2	154.4	-0.1	-2.0	-201.2	-203.1
8000	-25.6	-23.0	88.9	240.0	-1.1	-3.0	-289.7	-291.6
10000	-28.1	-23.0	134.6	363.5	-2.5	-4.4	-417.1	-419.0
12500	-32.9	-23.0	203.4	549.0	-4.3	-6.2	-609.2	-611.1
16000	-39.0	-23.0	317.8	858.0	-6.6	-8.5	-926.6	-928.5
Summenpegel [dB]							<b>-16.6</b>	<b>3.4</b>

**Tabelle 3: Berechnung der immissionsseitigen C/A-Pegeldifferenz für das in der VDI 3770 definierte Spektrum Rock-/Pop, eine Richtwirkungskorrektur für 90° nach Abbildung 3 und mit einer Luftdämpfung für einen Schalllaufweg von 2700 m.**

Hier wird für eine Grossbühne (Rock- und Popmusik) anhand der Zuschauerzahl der Schallleistungspegel der Anlage gemäss VDI 3770 bestimmt und mittels des überschlägigen, nicht empfohlenen Verfahrens der Immissionspegel berechnet.

Die Veranstaltung ist für 2000 Zuschauer auf Stehplätzen geplant. Mit angenommenen 4 Personen pro m<sup>2</sup> ergibt dies eine zu beschallende Fläche  $A = 500 \text{ m}^2$ . Der durchschnittliche Schallleistungspegel  $L_{WAeq}$  ergibt sich mit folgender Formel ( $A_0 = 1 \text{ m}^2$ ):

$$L_{WAeq} = 89.4 + 10 + 10 \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

zu **126 dB(A)**.

Der A-bewertete Immissionspegel  $L_{eq}$  für einen 500 m entfernten, bzgl. der Hauptabstrahlrichtung der Beschallungsanlage unter 45° liegenden Empfängerpunkt kann wie folgt grob abgeschätzt werden:

$$L_{eq} = L_{WAeq} + D_I + K_0 - D_s$$

$D_I$  entspricht dem A-bewerteten Richtwirkungsmass der Anlage und ist für 45° = -5 dB (VDI 3770).  $K_0$  ist das Raumwinkelmass und wird mit +3 dB angesetzt (durch den Boden begrenzte Abstrahlung in den Halbraum).  $D_s$  ist das Abstandsmass und umfasst alle weiteren Ausbreitungsdämpfungen. Es wird hier angenommen, dass freie Sicht zwischen Quelle und Empfänger besteht, sodass nebst der geometrischen Verdünnung nur noch Luftdämpfung und Bodendämpfung in Rechnung zu stellen ist. Die Luftdämpfung wird für eine Schwerpunktsfrequenz von 1 kHz eingesetzt und ist in 500 m Entfernung rund 2 dB. Die Bodendämpfung ist nach VDI 2714 bei 4 m als angenommene mittlere Ausbreitungshöhe über Boden 4.5 dB. Die geometrische Verdünnung schliesslich wird 65 dB, sodass insgesamt der Immissionspegel zu **52.5 dB(A)** abgeschätzt werden kann.