

Überreichweiten

Über Zonen abnormaler Hörbarkeit und Zonen des Schweigens

Karl-Wilhelm Hirsch

Überreichweiten führen bei der Schallausbreitung über große Entfernungen abwechselnd zu „Zonen abnormaler Hörbarkeit“ und „Zonen des Schweigens“, wie es in ersten wissenschaftlichen Untersuchungen umschrieben wird. Ihre Ursache im großskaligen Maßstab (100 km und mehr) sind hochreichende nicht monoton verlaufende Temperaturschichten oder der Jet-Stream. In kleinskaligen Entfernungen sind es eher sich bildende oder auflösende Inversionswetterlagen oder so genannte „Low-Level-Jets“. Überreichweiten in diesen kleinskaligen Entfernungen können Berichte von Lärmbetroffenen erklären, in denen von „sehr lauten Ereignissen“ die Rede ist. Deshalb kann das Wissen über die Häufigkeit des Auftretens von Überreichweiten ein interessantes Kalkül im Beschwerdemanagement der Verwaltungsakustik sein.

Auf der Grundlage von stundenspezifischen Profilprognosen der Windgeschwindigkeit und -richtung und der Temperatur wird das Auftreten von Überreichweiten phänomenologisch erklärt und statistisch analysiert. Es zeigt sich, dass Überreichweiten in der zweiten Nachthälfte und in den Morgen- und Abendstunden häufiger auftreten als über Tag. Die Untersuchung stellt die Abhängigkeit des Auftretens von Überreichweiten von der Jahreszeit dar und dokumentiert die Richtungsabhängigkeit.

Einleitung

Der Begriff „Überreichweite“ ist in der Funktechnik gebräuchlich. Er bezeichnet die besonderen Situationen, in denen Funksignale in deutlich größeren Entfernungen als üblich und beabsichtigt zu empfangen sind. Der Begriff ist in der Akustik nicht gebräuchlich; wird hier aber genauso eingeführt. Die besonderen Situationen sind in der Akustik natürlich Wettersituationen. In der älteren einschlägigen Literatur spricht man bei Überreichweiten von „Zonen abnormalen Hörens“, die sich mit „Zonen des Schweigens“ abwechseln.

In der auf den Immissionsschutz gerichteten „Lärmakustik“, die technische Modelle der Schallausbrei-

Overreach – Abnormal Sound Propagation Conditions

It is well-known that particular weather conditions can establish so-called „abnormal“ propagation of sound yielding alternating zones of silence and audibility. Under such conditions the atmosphere works like a wave guide: The sound is bound to a certain layer where the geometric spreading is not proportional to $1/r^2$ but to $1/r$. In addition, there are no ground reflections that normally contribute significantly to the attenuation of sound. It cannot be ruled out that under such condition sound can reach receiver points at far distances with unexpected high levels.

On a large scale (100 km and more), varying temperature and wind profiles in the upper atmosphere establish a condition of abnormal long-range sound propagation. On a small scale, relevant for noise prediction purposes, the reasons for such conditions are for instance profiles that occur during the beginning and ending of a period of temperature inversion.

After a brief introduction into the principal acoustics of sound propagation through refracting atmospheres that can cause such zones, hourly predictions of the wind profiles and the temperature profiles available over a whole year are used to analyze the frequency of occurrence of such abnormal sound propagation situations. As a result, these situations occur more frequently during the second half of the night and during the morning and evening hours. The analysis also considers the seasonal influences and indicates the dependency on the cardinal direction.

tung zur Prognose der Lärmbelastung im Immissionsschutz nutzt, sind solche Phänomene nicht bekannt.

Die Beschreibung der Schallausbreitung im Freien erfolgt dort zunächst textlich. Man spricht von Mitwind-, Gegenwind- und Querwindausbreitung und von Inversion, als Ausprägungen von schallausbreitungsgünstigen, -ungünstigen bzw. -neutralen Bedingungen. Implizit beziehen sich diese klassierten Aussagen auf bodennahe Verhältnisse in der Atmosphäre, also auf eine Schicht bis ca. 10 m. Für diese Schicht werden Angaben zur Windstärke, zur Windrichtung, zur Temperatur und zur Luftfeuchte gemacht. Implizit wird aber auch unterstellt, was häufig übersehen wird, dass mit dieser Klassierung auch die

Annahme monotoner Schallgeschwindigkeitsprofile verbunden ist. Erst diese Annahme führt zu einfachen Brechungsverhältnissen bei der Schallausbreitung. Die klassierenden Aussagen gelten also für die bodennahe Schallausbreitung, wie sie für niedrige Quellen und Empfänger typisch und im Regelfall pegelbestimmend zu sein scheint.

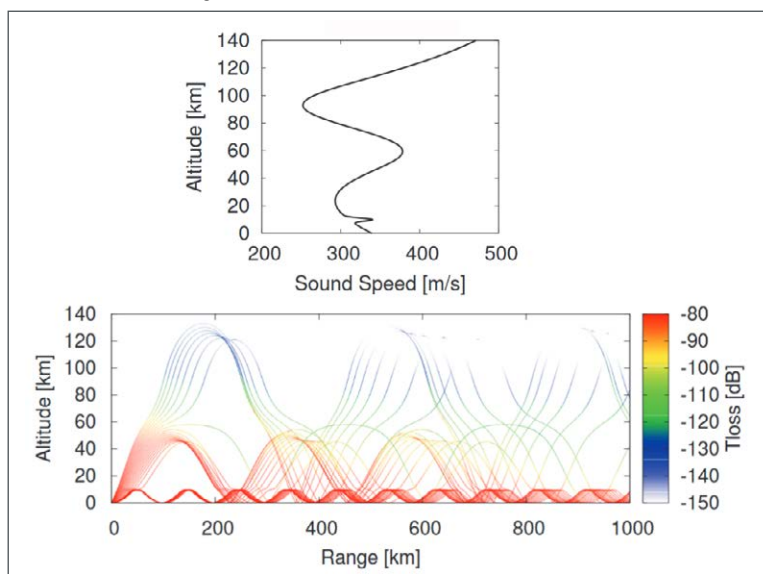
Sobald aber diese Monotonie des Schallgeschwindigkeitsprofils gerade in den darüberliegenden Schichten der Atmosphäre nicht mehr gilt, beeinflusst die Schallausbreitung dort auch die Pegel in Bodennähe. Dann kann es zu Überreichweiten kommen, zu Zonen des Schweigens, die sich mit Zonen abnormaler Hörbarkeit abwechseln.

Überreichweiten sind also weder schallausbreitungsgünstig noch neutral: Überreichweiten sind ortsabhängig abwechselnd ungünstig und günstig. Die Überreichweite gehört also als eigene Klasse zur Beschreibung der Schallausbreitungsbedingungen hinzu, gerade wenn es um Voraussagen über größere Entfernungen geht.

Nach einem kurzen Abriss der Geschichte zum Thema Überreichweiten wird zunächst erläutert, welche Voraussetzung in der Atmosphäre erfüllt sein müssen, um Überreichweiten entstehen zu lassen. Schwerpunkt ist dann eine statistische Analyse zu folgenden Fragen:

- Wie häufig kommen Überreichweiten vor?
- Wie hängt ihr Auftreten von der Tageszeit und von der Jahreszeit ab?
- Gibt es bevorzugte Himmelsrichtungen?
- Wie breit sind die Zonen des Schweigens und die Zonen der abnormalen Hörbarkeit?

Abb. 1: Profil und daraus folgende Schallstrahlen über größte Entfernungen in östlicher Richtung, nach [4]



Geschichtlicher Abriss

Schilderungen von Überreichweiten bei der Schallausbreitung im Freien reichen bis weit in das 17. Jahrhundert zurück [1], [2, S. 200]. Damals berichteten Ohrenzeugen immer häufiger über die Hörbarkeit von Kanonenfeuer in Entfernungen von mehreren hundert Kilometern. Die Schlacht von Verdun war 1916 bis weit nach Deutschland hinein zu hören. Osteroth [3] nennt es in einem Beitrag in der „Zeit“ 2016 eine „... merkwürdige kleine Geschichte der Kriegsakustik. Wer immer die Artillerie aus der Ferne hörte, bekam eine Vorstellung vom modernen Krieg mit seinem technischen Großgerät. Es war wie eine Liveübertragung, ein makabres Faszinosum.“

Erste Erklärungsversuche [1] vermuten als Ursache die Reflexion der Schallwellen am Übergang der inneren Lufthülle zu einer darauf schwimmenden Schicht mit sehr hohem Wasserstoffanteil. Dies war eine damals weitverbreitete Vorstellung von der Atmosphäre. Whipple wies 1923 in einem Beitrag in der Zeitschrift Nature wohl als erster darauf hin, dass die Ursache von Überreichweiten in der Temperaturverteilung in der Atmosphäre liegen könnte. Dies wurde in den 1950er Jahren durch Messungen bestätigt, vgl. [2, S. 202].

Heute kann man das Phänomen der Überreichweiten besser verstehen und beschreiben. Moderne numerische Methoden können die Differentialgleichung der Schallausbreitung durch bewegte Medien hinreichend zuverlässig lösen. Ihre Voraussagen können die akustischen Messungen „nachrechnen“, wenn man eine sachgerechte Atmosphäre vorgibt.

In [4] geht es um Infraschall und seine Ausbreitung über hunderte Kilometer. In diesen Fällen erreichen die Schallstrahlen Höhen von zig Kilometern. In Abbildung 1 starten die Strahlen in östliche Richtungen in eine bodennahe Schicht, in der sie nach oben gebrochen werden. Der Jetstream in ca. 8 km Höhe bricht sie wieder nach unten. Es ergibt sich ein Kanal, der die Strahlen im Bereich 40 km wieder in die Nähe der Erdoberfläche führt.

Die Strahlen in Abbildung 1 werden nach einer Differentialgleichung der Schallausbreitung in bewegten Medien berechnet, die auch im Rahmen dieser Studie in ähnlicher Tiefe gelöst wird. Aus Abbildung 1 ist auch zu entnehmen, dass jeweils nur Strahlen aus einem bestimmten Bereich des Abstrahlwinkels in die Kanäle eintreten. Diese Beobachtung wird sich auch unten für bodennähere Ausbreitung bestätigen.

Der Stand des Wissens zum Thema Überreichweiten wird zurzeit wohl durch die Proceedings der Reihe „Symposium on Long Range Sound Propagation“, [5] repräsentiert, die online frei verfügbar sind. Die bei den dortigen Autoren enthaltenen Zitate liefern einen vollständigen Überblick über die Erkenntnis-

fortschritte der letzten Jahrzehnte.

Bisher ging es stets um Überreichweiten, bei denen sich die Ausdehnung der Zonen des Schweigens und der Zonen der abnormalen Hörbarkeit in zig Kilometern messen lassen, also auch um Schallstrahlen, die 10 km und mehr Höhe erreichen. Das Phänomen Überreichweite ist im Hinblick auf die Schallausbreitung der „Lärmakustik“ noch nicht diskutiert worden. Dabei liegt es auf der Hand, dass auch in niedrigeren Höhen dieselbe Differentialgleichung gilt wie in großen Höhen: Es muss bei entsprechenden bodennäheren Atmosphären zu Überreichweiten kommen, die in Entfernungen ab wenigen hundert Metern auftreten können.

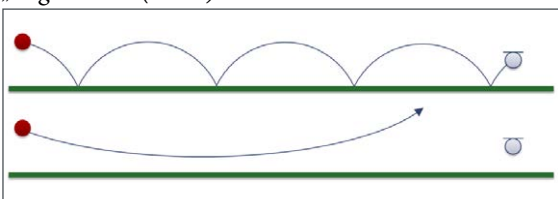
Man kann durchaus vermuten, dass Überreichweiten auch für Beobachtungen von unvorhersehbar, außergewöhnlich hohen Immissionspegeln verantwortlich sind; Pegel von Geräuschquellen beispielsweise, die in der betrachteten Entfernung längst irrelevant sein sollten oder eben im Nahbereich nach Maßgabe des technischen Regelwerks viel zu niedrig sind. Man kann auch vermuten, dass in vielen Fällen Überreichweiten den relativ großen Schwankungsbereich der Pegel im Gegenwind- oder Querwindbereich erklären können.

Das Phänomen Überreichweite und seine Kenngrößen

Abbildung 2 zeigt oben für Mitwind und Inversion den erwarteten Verlauf der Schallstrahlen. Dabei wird angenommen, dass der Wind (bzw. die Temperatur) mit der Höhe gleichmäßig und monoton zunimmt. Diese Annahme führt zu kreisförmigen, nach unten gebrochenen Strahlen, weil die effektive Schallausbreitungsgeschwindigkeit (die Summe aus Schallgeschwindigkeit in Luft und der Windgeschwindigkeit) mit der Höhe größer wird.

Die in Mitwindrichtung gelegenen Immissionsorte werden durch mehrere Strahlen mit Schallenergie versorgt. Je stärker die Zunahme des Windes oder der Temperatur ausfällt, umso kleiner ist der Radius. Starke Zunahmen von Windgeschwindigkeit bzw. Temperatur vergrößern deshalb die Anzahl der Strahlen. Das führt aber auch dazu, dass jeder einzelne Strahl mehr Bodenreflexionen erleidet und deshalb stärker gedämpft wird. Die Schallausbreitung

Abb. 2: Schallstrahlen bei „Mitwind“ (oben) und bei „Gegenwind“ (unten)



Anmerkung:

Es ist keineswegs so, dass große Schallgeschwindigkeitsgradienten zu hohen Pegeln führen. Starke Zunahme des Windes oder „starke“ Inversion ist kein Maßstab für Immissionspegel. Die Bodenreflexionen und damit die Bodeneigenschaften haben einen erheblichen Einfluss auf die Schallausbreitung.

wird deshalb u. U. stark abhängig von den Bodeneigenschaften.

Abbildung 2 zeigt unten die Ausbreitung in Gegenwindrichtung. Hier wird die effektive Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit der Höhe kleiner, die Strahlen werden nach oben gebrochen. Die Folge: Schallstrahlen erreichen bodennahe Immissionsorte nicht mehr. Es entstehen Schallschatten in Bodennähe.

Bei Querwind werden die Strahlen weder bevorzugt nach oben noch nach unten gebrochen. Diese Ausbreitungsbedingung ist eigentlich ein Übergang, in dem Pegel nennenswert schwanken können.

Mitwind, Inversion, Gegenwind und Querwind sind erschöpfend formulierte Klassen der akustischen Atmosphäre, wenn man davon ausgeht, dass sich das Windfeld und das Temperaturfeld monoton und gleichförmig mit der Höhe ändern. Dies ist die verbreitete Vorstellung von „mittleren“ Profilen. Solange man solche Profile in die physikalischen Ausbreitungsmodelle einsetzt, wird man eine der oben beschriebenen Ausbreitungssituationen erhalten.

Anmerkung:

Die Annahme „mittlerer Profile“ ist in der Akustik der Schallausbreitung im Freien weit verbreitet. Das hat drei wesentliche Gründe: (1) In der Luftreinhaltung sind diese Profile Grundlage erfolgreicher Immissionsprognosen. Warum sollte sich das „akustische Wetter“ davon unterscheiden? (2) Die Profile lassen sich aus einfachen Modellen der Meteorologie grundsätzlich bestätigen. Der Einsatz weiter entwickelter Modelle der Meteorologie würde deren Komplexität in die Ausbreitungsrechnung eintragen und in der Praxis zu ungeheuren Rechenzeiten führen. (3) Es steht in der Regel einfach nichts Genaueres zur Verfügung.

(1) Die Annahme „mittlerer Profile“ sind in der Luftreinhaltung erfolgreich, weil die Ausbreitung von Partikeln in der Luft integral von ihnen abhängt: Zeitliche Schwankungen und Turbulenzen spielen eine untergeordnete Rolle; die Ausbreitung im Mittel wird tatsächlich durch das mittlere Windprofil geprägt. Die Schallausbreitung hängt aber nicht vom Windprofil und vom Temperaturprofil direkt ab, sondern von ihren Gradienten. Also ja, das akustische Wetter unterscheidet sich massiv vom Wetter der Luftreinhaltung.

In (2) wird auf komplexere meteorologische Modelle hingewiesen. Das Erdgrenzschichtprofil des Windes kann zeitliche Änderungen in unterschiedlichen Zeitskalen und Wirbelskalen abhängig von Bebauung, Geländeform und beispielsweise Vegetation einführen. Da das „mittlere Wetter“ nicht zum Mittelungspegel führt, muss jede konkrete Ausprägung in diesem Modell akustisch berechnet werden, um über die Pegelmittelung der Ausprägungen schließlich zu einer mittleren Pegelprognose zu kommen.

Die in (3) angesprochene Verfügbarkeit meteorologischer Eingangsdaten für Ausbreitungsmodelle stellt eine letztlich unlösbare Aufgabe dar. Für

eine zuverlässige Schallausbreitungsrechnung wäre die Kenntnis des Zustands der Atmosphäre in allen Höhen und Richtungen über den gesamten Ausbreitungspfad erforderlich.

An dieser Stelle muss also darauf hingewiesen werden, dass alle nachfolgend vorgestellten Ergebnisse massive Näherungen über den Zustand der Atmosphäre anwenden (müssen). Es wird nicht nur eine geschichtete Atmosphäre angenommen. Die nur durch wenige Abtastpunkte festgelegten Profile des Windes und der Temperatur werden zudem durch ein Interpolationsverfahren ergänzt, das in Bodennähe zwar sinnvolle Werte ergibt, das aber selbst kaum validiert werden kann.

Und dennoch: Trotz der massiven Näherungen ist die Nutzung von Profilprognosen eines anerkannten Wetterdienstes (s. u.), der auf dem Stand Technik der Wettermodelle diese Prognosen erwirtschaftet, ein wesentlicher Schritt, um in der akustischen Ausbreitungsrechnung über die Langzeit-Wetterprofile der Luftreinhaltung hinauszugehen.

Abbildung 3 skizziert exemplarisch eine Atmosphäre, in der die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zunächst kleiner wird, um dann in einen Höhenbereich einzutreten, in dem sie wieder zunimmt. Ab einer gewissen Höhe nimmt sie dann wieder ab. Eine solche Atmosphäre führt zur Situation Überreichweite. Diese Atmosphäre wird sich ausbilden, wenn eine nächtliche Inversionswetterlage durch die ersten Sonnenstrahlen aufgelöst wird. Dabei wird sich zunächst die bodennächste Schicht erwärmen, weil sich der Boden durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. In der unteren Bodenschicht bildet sich dann eine Standard-Ausbreitungssituation aus, eine „normale“ Situation mit Mitwind- und Gegenwindausbreitungsphänomenen. In dieser Phase bleibt aber eine Schicht mit Inversion in mittlerer Höhe noch eine Zeitlang bestehen, bis auch dort die Erwärmung durchgreift.

In diese Phase sieht eine Schallausbreitung gegen den aufkommen Wind in Bodennähe aus wie Abbildung 4 skizziert. Der Schallstrahl wird in der bodennahen Schicht nach oben gebrochen, um dann in der übrig gebliebenen Inversion doch wieder zurückgebrochen zu werden. Er kann nicht wieder ganz bis zum Erdboden durchdringen, weil er wieder in den bodennahen Gegenwindbereich eintritt. Die Konsequenz ist die Ausbildung eines Ausbreitungskanals, in dem sich der Schall ohne dämpfende Bodenrefle-

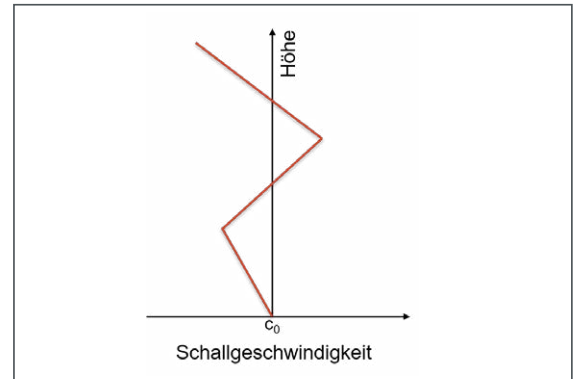


Abb. 3: Profil der Schallgeschwindigkeit mit Potential zur Überreichweite

xion in Gegenwindrichtung ausbreiten kann. Dies geschieht so lange, wie die Atmosphäre entlang seines Ausbreitungspfades einen solchen Zustand aufrechterhält.

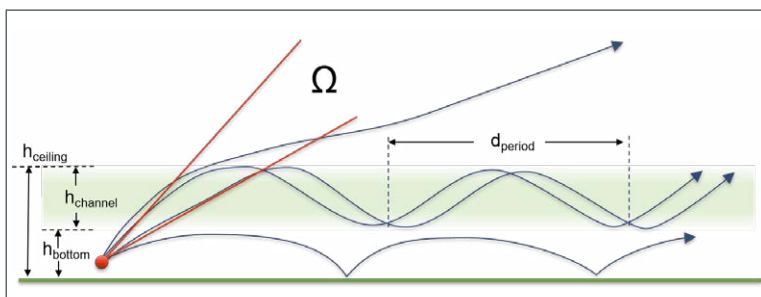
Die Frage, ob eine Atmosphäre Überreichweiten erlaubt, ist allein auf der Basis der lokalen Profilprognose zu beantworten. Dazu ist eine geschichtete Atmosphäre mit den gegebenen Profilen anzunehmen (das bedeutet, die Profile gelten ortsunabhängig) und eine Schallausbreitungsrechnung durchzuführen. Falls es Strahlen gibt, die von der Quelle aus in einen Kanal eintreten und dort verbleiben können, gibt es die Option Überreichweite. Da mit einer geschichteten Atmosphäre gerechnet wird, gilt das dann für alle Abstände.

Für die zweite – und natürlich ebenfalls entscheidende – Frage, wie lang solche Kanäle sind, hängt die Antwort nicht allein vom lokalen Profil ab. Entscheidend ist, über welche Abstände diese Atmosphäre stets die gleichen bzw. vergleichbaren Verhältnisse anbietet, damit die Annahme einer geschichteten Atmosphäre zutrifft.

Die erste Frage nach der Tendenz zu Überreichweiten kann also für ein gegebenes Wetterprofil durch eine Schallausbreitungsrechnung qualitativ beantwortet werden. Folgende Hypothese führt zu einer Quantifizierung: Je breiter der Kanal ist, bzw. je größer der Winkelbereich, der von der Quelle abgehenden Strahlen ist, umso wahrscheinlicher wird es sein, dass in den Kanälen auch signifikant akustische Energie transportiert werden kann. Es werden folgende Kenngrößen eingeführt, vgl. Abbildung 4:

- Boden- und Deckenhöhe des Überreichweitenkanals als Abmessungen des Kanals
- Überreichweitenindex als ein Maß für den Winkelbereich des Abgangswinkels der Schallstrahlen von der Quelle, die in diesen Kanal eindringen können
- Kanalperiode als Abstand zwischen den Orten, bei denen die Schallstrahlen wieder die Bodennähe erreichen.

Abb. 4: Zur Definition der Kenngrößen von Überreichweiten



Der Überreichweitenindex ist der Anteil des Schalls des Winkelbereichs, der in den Überreichweitenkanal bezogen auf den gesamten Winkelbereich von -90° bis 90° der Abgangswinkel von einer Punktquelle, multipliziert mit dem Faktor 1.000, eintritt. Aus dem Überreichweitenindex folgt der Winkelbereich selbst durch Multiplikation mit $0,18^\circ$. Einem Überreichweitenindex von 20 entspricht ein Winkelbereich von $3,6^\circ$.

Berechnung von Überreichweiten

Die folgende statistische Analyse beruht auf 8.712 stundenspezifischen Prognosen des jeweiligen Wind- und Temperaturprofils für einen Ort im Münsterland für 364 Tage im Zeitraum August 2016 bis August 2017 als Grundgesamtheit. Solche Profilprognosen werden im Zusammenhang mit der Prognose des so genannten Schallwetters benötigt. In [6] werden die Grundlagen hierzu erläutert, vgl. auch [7], [8], [9]. Die Auswahl des Ortes und des Zeitraums erfolgte ohne besondere Auswahlkriterien aus dem Katalog des zur Verfügung stehenden Datenbestandes. Die Stärkewindrose in Abbildung 5 dokumentiert die für diese Lage in Deutschland typische Häufigkeit von südwestlichen Winden.

Beispiel einer Schallausbreitungssituation mit Überreichweite

Der Vorstellung der Auswertung der Statistik von Überreichweiten wird die Diskussion eines Beispiels vorangestellt. Dazu wurde eine Stundenprognose aus der Grundgesamtheit gewählt, die zu einer typischen Situation mit einer bodennahen Überreichweite in die gewählte nord-östliche Himmelsrichtung von 30° führt. Der Wind ist eher schwach, dreht aber signifikant mit der Höhe von Ost nach Südost, Abbildung 6. Gleichzeitig zeigt das Temperaturprofil, Abbildung 7, eine sich auflösende Inversionswetter-

Abb. 6: Windgeschwindigkeitsprofil (Blau), Windrichtungsprofil (Rot) und Windgeschwindigkeitskomponente (Grün) in 30° Himmelsrichtung am 10.11.2016, 7 Uhr

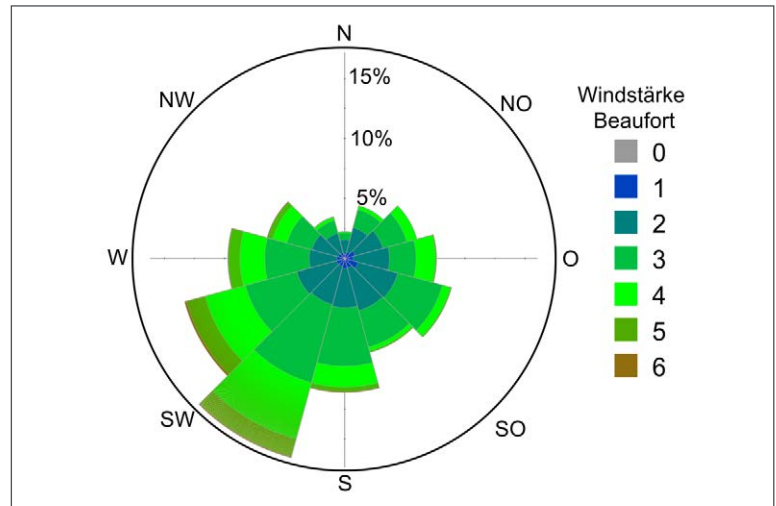
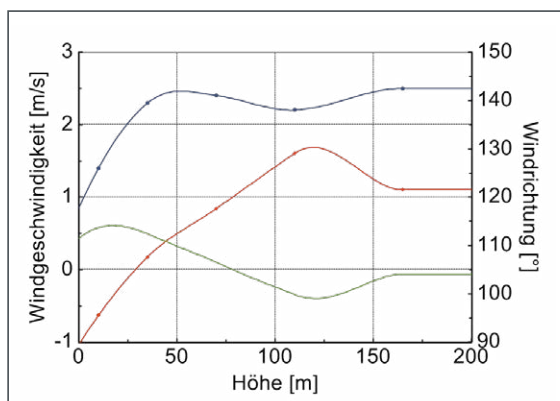


Abb. 5: Stärkewindrose der Grundgesamtheit in der 30° Auflösung in der nominellen Höhe 10 m

Anmerkung:

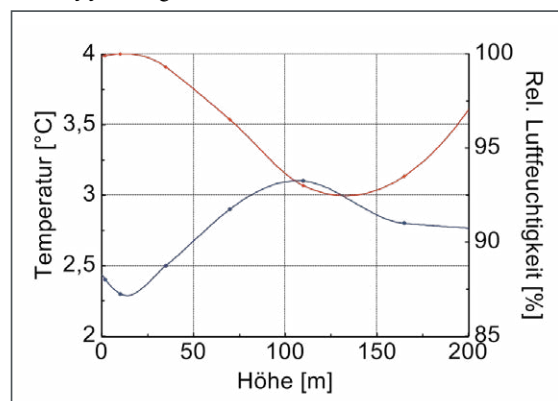
Die Berechnungen wurden mit dem Programm SoundWeather der Cervus Consult GmbH durchgeführt. Dieses Programm ist für wissenschaftliche Zwecke frei verfügbar.

lage. Bis ca. 15 m Höhe fällt die Temperatur bereits mit der Höhe; darüber herrscht noch Inversion bis zu einer Höhe von mehr als 100 m. Nach einer wohl klaren Nacht mit Inversion werden der Erdboden und damit die bodennahen Luftschichten durch die einsetzende Sonneneinstrahlung erwärmt, während die bodenferneren Schichten noch eine Inversion zeigen. Die Inversion löst sich also vom Boden ansteigend auf.

Für die Brechung in der Atmosphäre ist das effektive Schallgeschwindigkeitsprofil bzw. dessen Gradient (bzgl. der Höhe) verantwortlich. Abbildung 8 stellt diese Profile einerseits in der Profilrichtung der Stundenprognose und andererseits projiziert auf die Himmelsrichtung von 30° dar.

Den sich in dieser Atmosphäre unter der Himmelsrichtung von 30° ausbildenden Überreichweitenkanal

Abb. 7: Temperaturprofil (Blau) und Profil der relativen Luftfeuchtigkeit (Rot) am 10.11.2016, 7 Uhr



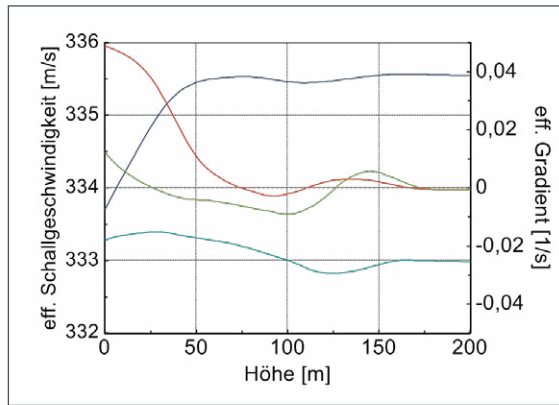


Abb. 8: Effektive Schallgeschwindigkeit und ihr Gradient am 10.11.2016, 7 Uhr
Profilprognose (Blau bzw. Rot) und unter 30° Himmelsrichtung (Cyan bzw. Grün)

nal dokumentiert Abbildung 9. Dargestellt sind nur die Strahlen, die in den Kanal hineinführen. Dies ist der Winkelbereich von $-1,5^\circ$ bis $1,3^\circ$, der hier mit einer Auflösung $0,1^\circ$ abgetastet wird.

Die Höhe des Ausbreitungskanals beträgt auf der Basis der hier gezeigten Strahlen ungefähr 25 m. Seine Kanalperiode kann aus der Periodizität der Strahlenverläufe auf 2.600 m abgeschätzt werden. Man kann erkennen, dass die Kanalperiode im hier eingeführten Sinne als Erwartungsorte für die Abfolge nächster Erdbodennähe kein eindeutig definierbarer Parameter ist.

Anmerkung:

Die Periodizität ist eine notwendige Folge der Annahme einer geschichteten Atmosphäre, die durch ortsunabhängige Profile gekennzeichnet ist.

Die Strahlenschar für negative Abgangswinkel unterscheidet sich von der Schar mit positivem Abgangswinkel. Es ist eher die Aussage gerechtfertigt, dass im Bereich von 1.000 m bis 1.800 m kaum mit Schallbeiträgen aus dem Kanal zu rechnen ist, weil alle Strahlen höher als 14 m verlaufen. Gäbe es nur diese Strahlen, lägen in diesem Bereich Immissionsorte tiefer als 14 m in einem Schallschatten. In dem Bereich 2.000 m bis 3.600 m verlaufen alle Strahlen unterhalb von 10 m. Dort ist mit Beiträgen in Immissionsorten von 4 m bis 10 m aus dem Kanal zu rechnen.

Anmerkung:

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass dies trotz der „bekannten“ Atmosphäre und der zuverlässig prognostizierten Strahlen eine praxisferne Betrachtung ist. Die Wetterbedingungen werden nicht über die relevanten Entfernungen gleich sein. Die Annahme einer geschichteten Atmosphäre ist für jeden Einzelfall eine zu grobe Annahme.

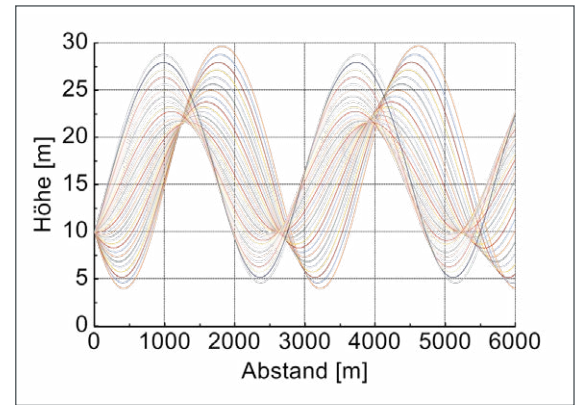


Abb. 9: Strahlenverlauf 10.11.2016, 7 Uhr unter 30° Himmelsrichtung
Quellhöhe 10 m, Abgangswinkel $-1,5^\circ$ bis $1,3^\circ$ mit einer Schrittweite von $0,1^\circ$

Ergebnisse

Die Auswertung nach Tagesstunden beantwortet die Frage, zu welcher Tageszeit Überreichweiten auftreten. Falls die Hypothese richtig ist, dass Inversionswetterlagen eine maßgebliche Rolle spielen, ist zu erwarten, dass solche Situationen vermehrt in der Nacht und am Morgen auftreten.

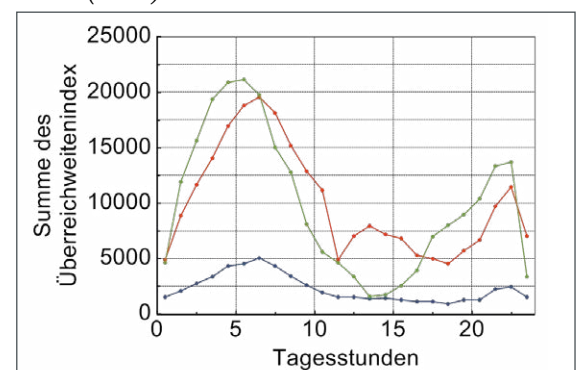
In den Abbildungen zu dieser Auswertung werden die Ergebnisse für die hier untersuchten drei Quellhöhen (1 m, 10 m und 100 m) gemeinsam dargestellt. Diese Gegenüberstellung ermöglicht jeweils den direkten Vergleich und somit eine Analyse des Einflusses dieses Parameters.

Als Kenngröße der „Stärke“ der Überreichweite werden die Summen des Überreichweitenindex der einzelnen Stunden dargestellt. Diese Summe ist ein indirektes Maß für die Energie, die in die Überreichweite (in den sich bildenden Überreichweitenkanal) abgestrahlt wird.

Betrachtet man unter diesem Aspekt die in Abbildung 10 dargestellten Ergebnisse für die drei Quell-

Abb. 10: Summe des Überreichweitenindex in den Tagesstunden

Datenbasis: Grundgesamtheit (364 Tage); Quellhöhe 1 m (Blau), Quellhöhe 10 m (Rot) und Quellhöhe 100 m (Grün)



höhen, wird die Bedeutung der Überreichweiten gerade für die späten Nachtstunden und die Morgenstunden signifikant belegt. Weiterhin ist zu erkennen, dass an Überreichweiten von bodennahen Quellen weniger Energie beteiligt ist als bei größeren Quellhöhen.

In Abbildung 11 wird die gleiche Auswertung wie in Abbildung 10 gezeigt. Datenbasis ist nun nicht mehr die Grundgesamtheit, sondern sind nur noch die Situationen, die einen Überreichweitenindex von mehr als 20 aufweisen. Aus Abbildung 11 geht wegen der Skalierung nicht hervor, dass es auch für die Quellhöhe von 1 m tatsächlich eine Situation (19 Uhr) gibt, die einen Überreichweitenindex von 22,2 aufweist. Es kommt allerdings klar zum Ausdruck, dass „energiereiche“ Überreichweiten signifikant von der Quellhöhe abhängen. Es kann daraus auch abgeleitet werden, dass energiereiche Überreichweiten bei bodennahen Quellen tatsächlich äußerst selten sein werden.

Es wird allgemein angenommen, dass in den Sommermonaten weniger Wettersituationen mit Temperaturinversion auftreten. Deshalb werden im Folgenden die Ergebnisse nach Maßgabe ihrer Zugehörigkeit zu den Jahreszeiten dargestellt. Für die Jahreszeiten gelten die meteorologischen Definitionen: Winter = Monate 12, 1 und 2, Frühling = Mo-

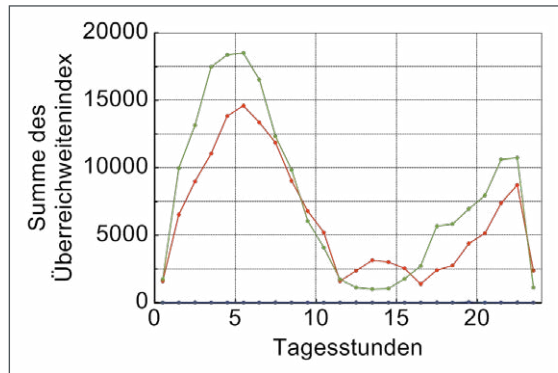


Abb. 11: Summe des Überreichweitenindex in den Tagesstunden

Datenbasis: Grundgesamtheit, Überreichweitenindex > 20; Quellhöhe 1 m (Blau), Quellhöhe 10 m (Rot) und Quellhöhe 100 m (Grün)

nate 3 bis 5, Sommer = Monate 6 bis 8 und Herbst = Monate 9 bis 11. Die Ergebnisse in Abbildung 12 erlauben eine Antwort auf die oben gestellte Frage: Die Hypothese lässt sich so nicht halten. Es ist eher so, dass sich die Überreichweiten über die Stunden anders verteilen. Im Winter reichen die Stunden mit ausgeprägten Überreichweiten im Mittel weiter in den Tag hinein. Eine Erklärung dafür liefert der frühere Sonnenaufgang im Sommer, der deutlich früher

Das Ganze sehen.



Ihre unabhängigen Experten für das ganze Spektrum der Schall- und Schwingungstechnik

Messung · Planung · Berechnung · Beratung · Gutachtenerstellung · Troubleshooting

Maschinendynamik:

- Anlagenschwingungen
- Dauerüberwachung
- Schwingungsisolierungen

Erschütterungen:

- Bauwerksdynamik
- Rammarbeiten
- Dauerüberwachung

Strömungstechnik:

- Pulsationen
- Mengemessfehler
- Strömungssimulation

Immissionsschutz:

- Lärminderungsplanung
- Verkehrslärm
- Gewerbe-/Freizeitlärm

Pulsationsstudien:

- Rohrleitungsschwingungen
- Kolben- und Turbokompressoren
- Kolbenpumpen

Windenergie:

- Prognosen (Schall & Schattenwurf)
- Schalltechnische Messungen
- Konstruktionsakustik

Technische Akustik:

- Forschung & Entwicklung
- Technischer Schallschutz
- Konstruktionsakustik

Bauphysik:

- Bauakustik
- Raumakustik
- Bauteilprüfung

www.koetter-consulting.com



SoundCam macht die Welt leiser

Scan mich
und finde heraus warum
SoundCam die Welt leiser macht



CAE Software und Systems GmbH

Tel.: +49 5241/21142-0 | Fax: +49 5241/21142-29

info@cae-systems.de | www.cae-systems.de

CAE
Software & Systems

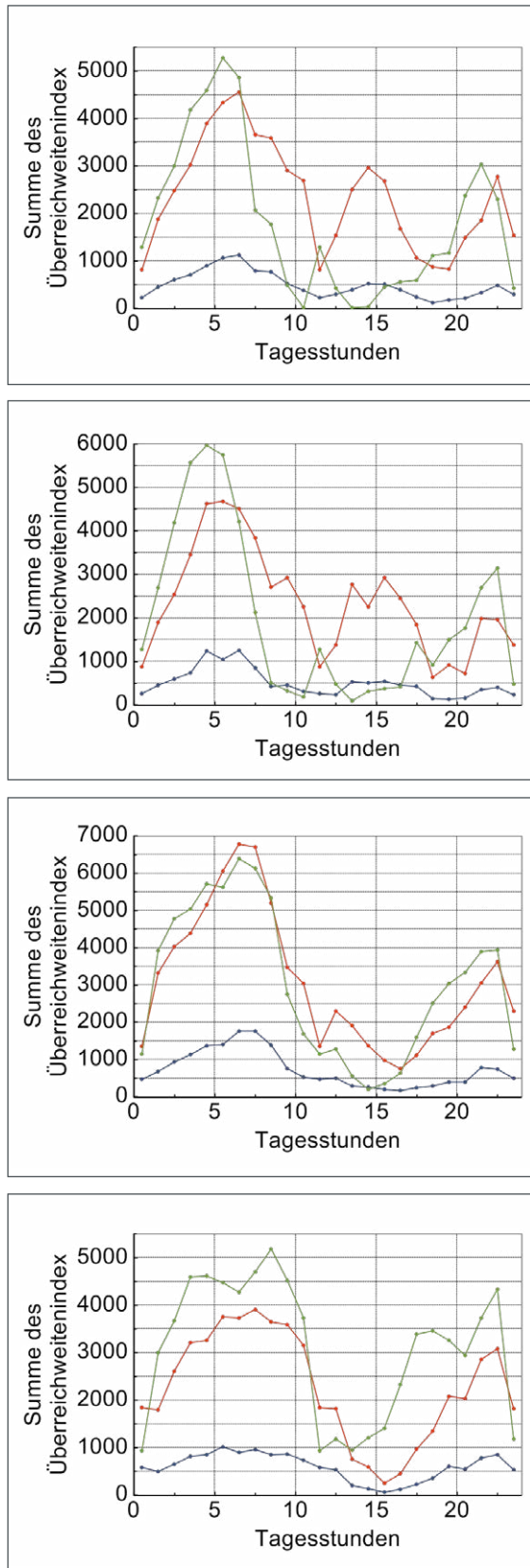


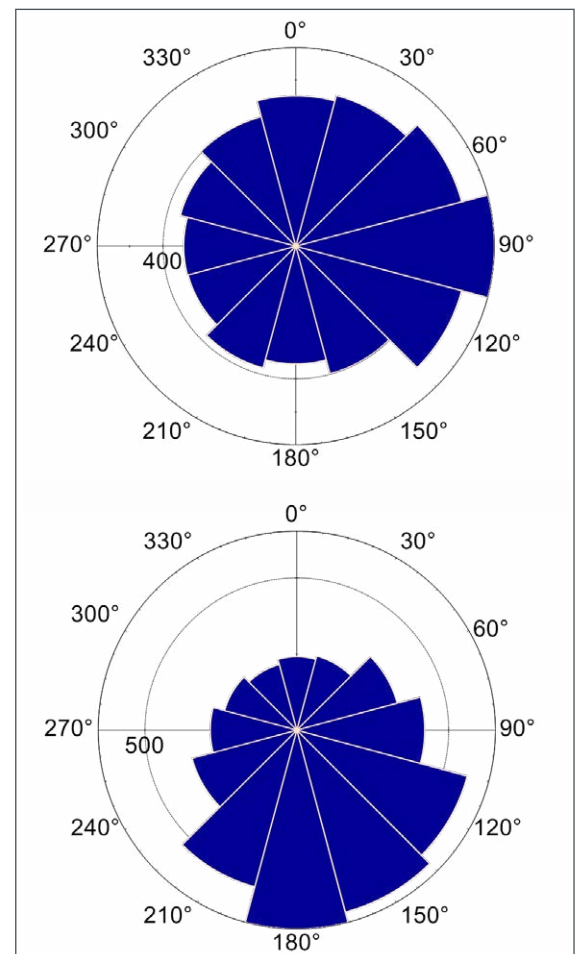
Abb. 12: Summe des Überreichweitenindex in den Tagesstunden
 Datenbasis: jeweilige Jahreszeit in der Grundgesamtheit (von oben nach unten: Frühling, Sommer, Herbst und Winter);
 Quellhöhe 1 m (Blau), Quellhöhe 10 m (Rot) und Quellhöhe 100 m (Grün)

nächtliche Inversionen ausräumt als im Winter. Bei der Darstellung des Überreichweitenindex unterscheidet sich der Sommer ebenfalls von den drei anderen Jahreszeiten bei der Form der Verteilung. Überreichweiten sind ausgeprägt (hoher Überreichweitenindex) in der zweiten Nachthälfte, insbesondere zwischen 6 Uhr und 7 Uhr. Absolut gesehen unterscheidet sich der Überreichweitenindex im Sommer rund um die Mittagszeit aber nicht von den übrigen Jahreszeiten.

Überreichweitsituationen und ihre Einschätzung über Häufigkeit und Signifikanz sind abhängig von der Himmelsrichtung. Exemplarisch stellt Abbildung 13 eine besondere Analyse vor. Sie belegt, dass sich Überreichweiten in den Tagesstunden, hier definiert als der Zeitraum von 6 Uhr bis 18 Uhr, im Mittel in andere Richtungen ausprägen, als in den Nachtstunden, hier definiert als der Zeitraum von 18 Uhr bis 6 Uhr.

In den Tagesstunden, hier 6 Uhr bis 18 Uhr, stimmt die Richtung der Überreichweiten eher mit der vor-

Abb. 13: Rose der Anzahl der Tage mit Überreichweite
 Datenbasis: Grundgesamtheit (364 Tage), gefiltert nach Tagesstunden, Quellhöhe 1 m
 oben: Stunden 6 Uhr bis 18 Uhr,
 unten: Stunden 18 Uhr bis 6 Uhr



herrschenden Windrichtung überein, vgl. Abbildung 5. In den übrigen Stunden herrschen südöstliche Richtungen vor.

Die Kanalperiode gibt Hinweise darüber, in welchem Abstand damit zu rechnen ist, dass schon leichte Störungen in der Atmosphäre dazu führen können, dass der Schall doch den Boden wieder erreicht. Abbildung 14 zeigt die Verhältnisse für alle Stunden der Grundgesamtheit. Die Kanalperiode ist nicht gleichverteilt, sondern hat für die 1 m-Quellhöhe ein Maximum bei 600 m bis 800 m. In Überreichweiten-situationen ist es also dort am wahrscheinlichsten, dass der Schall wieder zu Immissionen am Boden beiträgt.

Mit der Quellhöhe wächst die Periode deutlich an. Bei 100 m-Quellhöhe liegt das Verteilungsmaximum zwischen 3 km und 4 km.

Schlussfolgerungen

- Der Einsatz weit entwickelter, physikalischer Schallausbreitungsmodelle in Verbindung mit realen (aber immer noch prognostizierten) Wetterprofilen kann nachweisen, dass es bei der Schallausbreitung im Freien zu Überreichweiten kommen muss.
- Überreichweiten sind nicht, wie zunächst vermutet, „selten“. Sie kommen sogar recht häufig vor. (Ungefähr an einem Drittel aller Tage)
- Überreichweiten sind richtungselektiv. Das heißt, dass eine Überreichweitesituation in der Regel auf einen Winkelbereich kleiner 60° beschränkt ist.
- Misst man die „Stärke“ einer Überreichweite mit dem Überreichweitenindex, wird eine Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit solcher Situationen möglich.
- Überreichweiten treten häufig nachts eher in Querwindrichtungen, am Tage eher in der vorherrschenden Windrichtung auf.
- Durch die Kanalperiode lässt sich zumindest abschätzen, in welchen Abständen und Höhen Beiträge aus den Überreichweitenkanälen zur Immission zu erwarten sind.
- Überreichweiten sind stark tageszeitabhängig. Sie treten häufiger in der zweiten Nachthälfte und in den Morgenstunden auf, als am Tage.

Literatur

- [1] unbekannter Autor: Die Hörweite des Kanonendonners. Naturwissenschaften Band 3(33), S. 434, 1916.
<https://doi.org/10.1007/BF01546181>
- [2] Trendelenburg, F.: Einführung in die Akustik. Springer-Verlag 1950. ISBN 987-3-642-53261-0
- [3] Osteroth, R.: Verdun: Das große Dröhnen.

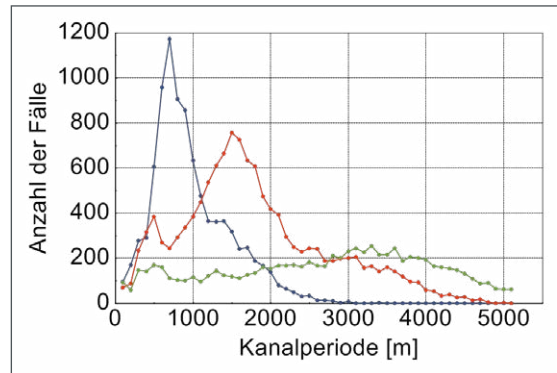


Abb. 14: Verteilung der Kanalperiode des Überreichweitenkanals

Datenbasis: Grundgesamtheit; Quellhöhe 1 m (Blau), Quellhöhe 10 m (Rot) und Quellhöhe 100 m (Grün)

Zeitschrift DIE ZEIT, Nr. 9, 3. März 2016.

- [4] Waxler, R.: An Overview of Infrasound Propagation. Proceedings Internoise 2016, Hamburg.
- [5] Proceedings „Symposium on Long Range Sound Propagation“. <https://ncpa.olemiss.edu/long-range-sound-propagation-lrsp/>
- [6] Hirsch, K.-W.: Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 9 (2014), Nr. 6, S. 267–275
- [7] Hirsch, K.-W.: Schallwetter. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2014, 40. Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, S. 842f
- [8] Hirsch, K.-W.: Schallwetter – oder wie laut es morgen wird. Vortrag auf dem 9. ExtremWetter-Kongress, Hamburg, 2014.
- [9] Hirsch, K.-W.: Sound weather – methods and applications. Proceedings Internoise 2016, 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, pp. 1.911–1.917, Hamburg. ■



**Dr.-Ing.
Karl-Wilhelm
Hirsch**
Freier Mitarbeiter
der Cervus Consult
GmbH, Willich