

Überreichweiten bei der Schallausbreitung im Freien

Karl-Wilhelm Hirsch, Christian Kleinhenrich, Manuel Sunkel

Cervus Consult, consult@cervus.de

Einleitung

Der Begriff ‚Überreichweite‘ ist in der Funktechnik gebräuchlich. Er bezeichnet die Situation, in der 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. In der älteren akustischen Literatur spricht man bei Überreichweiten von ‚Zonen abnormalen Hörens‘, die sich mit ‚Zonen des Schweigens‘ abwechseln. Mit akustischen Überreichweiten werden also hier Schallausbreitungssituationen im Freien bezeichnet, bei denen Schall über größere Entfernungen als üblich zu empfangen ist.

Die Beschreibung der Schallausbreitung im Freien – zumindest im Zusammenhang mit der Lärmakustik bzw. den technischen Modellen der Verwaltungsakustik – erfolgt zunächst textlich. Man spricht von Mitwind-, Gegenwind- und Querwindausbreitung und von Inversion, als Ausprägungen von ausbreitungsgünstigen, -ungünstigen bzw. neutralen Schallausbreitungsbedingungen. Implizit beziehen sich diese klassierten Aussagen auf bodennahe Verhältnisse in der Atmosphäre, also auf eine Schicht bis ca. 10 m, für die Angaben zur Windstärke, zur Windrichtung, zur Temperatur und zur Luftfeuchte gemacht werden. Implizit wird aber auch unterstellt – und das wird häufig übersehen, dass mit dieser Klassierung auch die Annahme monotoner Schallgeschwindigkeitsprofile verbunden ist, die zu diesen einfachen Brechungsverhältnissen bei der Schallausbreitung führen. 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 abnormale 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.

Weiterführende Hintergrundinformationen zum Phänomen der Überreichweite, auch über sehr große Entfernungen (mehrere 100 km), findet man in [1].

Bedingung für Überreichweiten

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 ändert. 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.

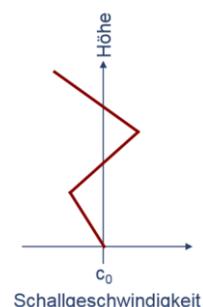


Abbildung 1: Profil der Schallgeschwindigkeit mit Potential zur Überreichweite

Abbildung 1 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. Sie 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 dieser Phase sieht eine Schallausbreitung gegen den aufkommenden Wind in Bodennähe aus, wie Abbildung 2 skizziert. Der Schallstrahl wird in der bodennahen Schicht nach oben gebrochen um dann in der übrig gebliebenen Inversion doch wieder zurückgebogen 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 Bodenreflexion in Gegenwindrichtung so lange ausbreiten kann, wie die Atmosphäre entlang seines Ausbreitungspfades einen solche Zustand aufrechterhält.

Berechnung von Überreichweiten

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), um 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, sondern davon, über welche Abstände diese Atmosphäre stets die gleichen bzw. ähnliche Verhältnisse anbietet, also 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 2:

- 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

Der Überreichweitenindex ist der Anteil des Winkelbereichs, der in den Überreichweitenkanal bezogen auf den gesamten Winkelbereich von -90° bis 90° der Abgangswinkel von einer Punktquelle eindringt, multipliziert mit dem Faktor 1000. Aus dem Überreichweitenindex folgt der Winkelbereich selbst durch Multiplikation mit 0,18. Ein Überreichweitenindex von 20 entspricht einem Winkelbereich von $3,6^\circ$.

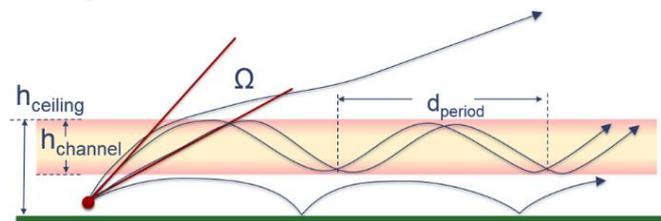


Abbildung 2: Zur Definition der Kenngrößen von Überreichweiten

Die folgende statistische Analyse beruht auf 8712 stundenspezifischen Stundenprognosen des jeweiligen Wind- und Temperaturprofils für einen Ort im Münsterland für 363 Tage im Zeitraum August 2016 bis August 2017 als Grundgesamtheit. Solche Profilprognosen werden im Zusammenhang mit der Prognose des so genannten Schallwetters benötigt. In [2] werden die Grundlagen hierzu erläutert, vgl. auch [3]. Die Auswahl des Ortes und des Zeitraums erfolgte griffweise. Die Berechnungen wurden mit dem Programm SoundWeather der Cervus Consult GmbH durchgeführt.

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 nordöstliche Himmelsrichtung von 30° führt: Der Wind ist eher schwach, dreht aber signifikant mit der Höhe von Ost nach Südost, Abbildung 4. Gleichzeitig zeigt das Temperaturprofil, Abbildung 5, eine sich auflösende Inversionswetterlage. 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 wird 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.

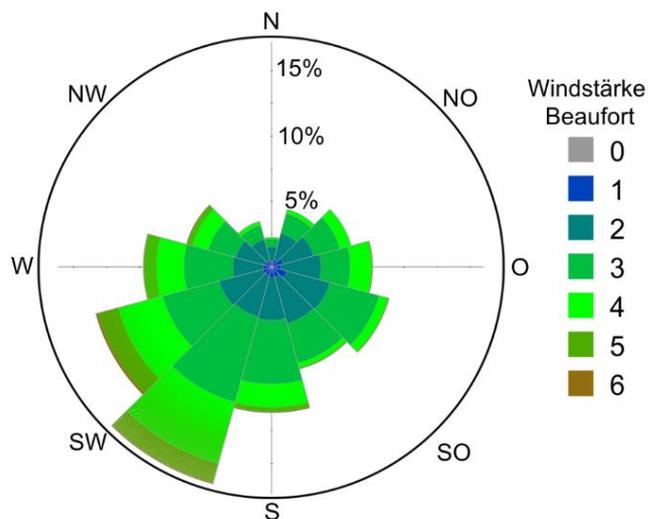


Abbildung 3: Stärkewindrose der Grundgesamtheit in der 30° Auflösung in der nominellen Höhe 10 m

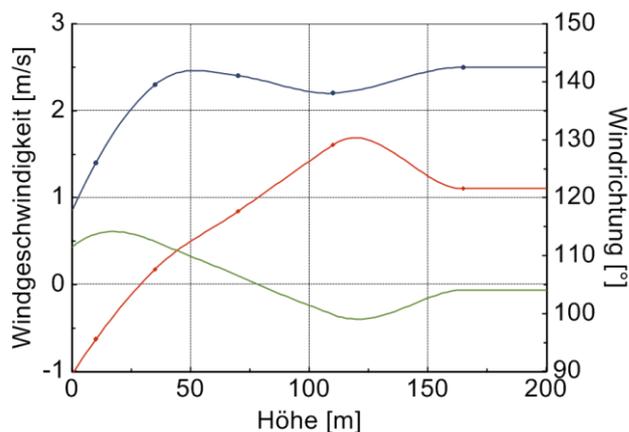


Abbildung 4: Windgeschwindigkeits- (blau) und -Windrichtungsprofil (rot) am 10.11.2016 7 Uhr und Windgeschwindigkeitskomponente (grün) in 30° Himmelsrichtung

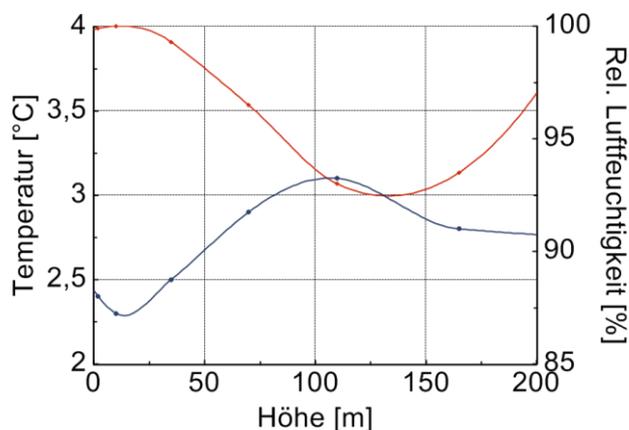


Abbildung 5: Temperaturprofil (blau) und Profil der relativen Luftfeuchtigkeit (rot) am 10.11.2016 7 Uhr

Für die Brechung in der Atmosphäre ist das effektive Schallgeschwindigkeitsprofil bzw. dessen Gradient verantwortlich. Abbildung 6 stellt diese Profile einerseits in der Profilrichtung der Stundenprognose (Windvektor) und andererseits projiziert auf die Himmelsrichtung von 30° dar.

Den sich in dieser Atmosphäre unter der Himmelsrichtung von 30° ausbildenden Überreichweitenkanal dokumentiert Abbildung 7. Dargestellt sind nur die Strahlen, die in den Kanal hineinführen. Dies ist der Winkelbereich von -1,5° bis 1,4°, der hier mit einer Auflösung 0,1° abgetastet wird.

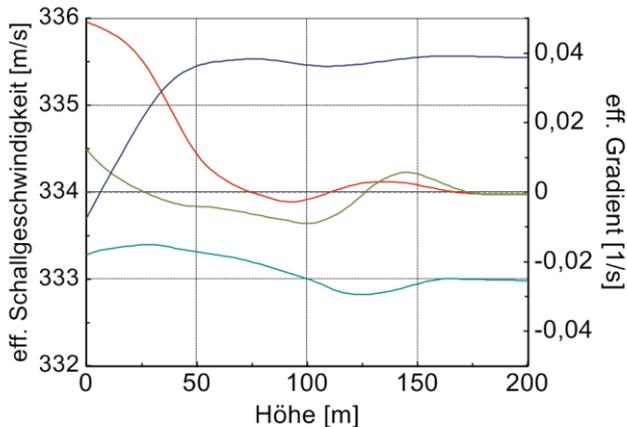


Abbildung 6: Effektive Schallgeschwindigkeit und ihr Gradient am 10.11.2016 7 Uhr in Profilrichtung (Blau bzw. Rot) und in 30° Himmelsrichtung (Cyan bzw. Grün)

Die Höhe des Ausbreitungskanals beträgt auf der Basis der hier gezeigten Strahlen ungefähr 25 m. Seine Kanalperiode kann auf 2600 m abgeschätzt werden. Man kann erkennen, dass die Kanalperiode - im hier eingeführten Sinne als Erwartungsorte für die Abfolge nächste Erdbodennähe - kein eindeutig definierbarer Parameter ist: Die Strahlenschar für negative Abgangswinkel unterscheidet sich von der Schar mit positivem Abgangswinkel. Es ist eher die Aussage gerechtfertigt, dass im Bereich von 1000 m bis 1800 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 2000 m bis 3600 m verlaufen alle Strahlen unterhalb von 10 m. Dort ist mit Beiträgen an Immissionsorten von 4 m bis 10 m aus dem Kanal zu rechnen.

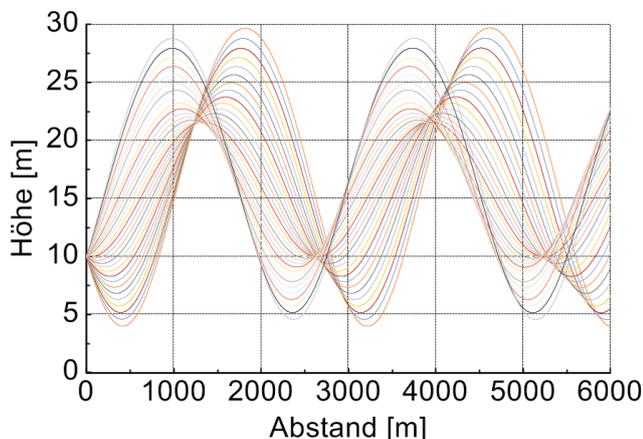


Abbildung 7: Strahlenverlauf 10.11.2016 7 Uhr unter 30° Himmelsrichtung.

Quellhöhe 10 m, Abgangswinkel -1,5° bis 1,3°, Schrittweite 0,1°

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.

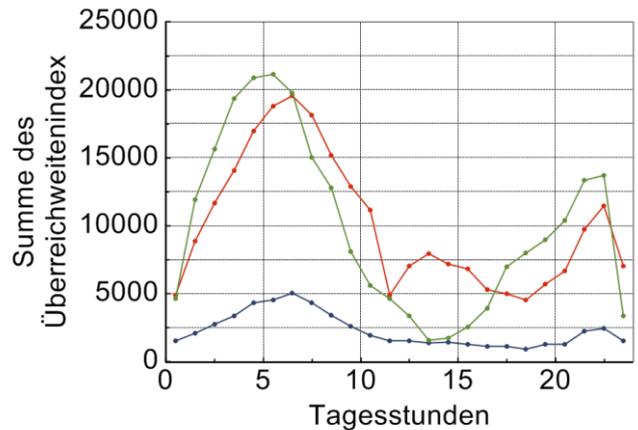


Abbildung 8: Summe des Überreichweitenindex über die Tagesstunden

Datenbasis: Grundgesamtheit (364 Tage)

Quellhöhe 1 m (Blau), 10 m (Rot), 100 m (Grün)

In den Abbildungen zu dieser Auswertung werden grundsätzlich die Ergebnisse für die hier untersuchten drei Quellhöhen (1 m, 10 m und 100 m) gemeinsam dargestellt. Und zwar so, dass das Ergebnis für 1 m Quellhöhe oben und die Ergebnisse für die beiden anderen Quellhöhen nebeneinander mit halber Größe darunter gezeigt werden. Diese Gegenüberstellung ermöglicht 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 8 dargestellten Ergebnisse für die drei Quellhöhen 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 9 wird die gleiche Auswertung wie in Abbildung 8 gezeigt. Datenbasis ist nun nicht mehr die Grundgesamtheit, sondern sind nur noch die Situationen, die einen Überreichweitenindex von mehr als 20 aufweisen. In Abbildung 9 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.

Überreichweiten sind jahreszeitabhängig. Abbildung 10 zeigt die Verhältnisse für die Sommermonate (Juni, Juli, August); Abbildung 11 die Verhältnisse für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar). Die Abhängigkeit drückt sich weniger in der Summe der Überreichweitenindizes aus, sondern in der

Form der Verteilung: Die Wahrscheinlichkeit sinkt massiv mit dem Zeitpunkt des Sonnenaufgangs; ein Indiz dafür, dass das Auflösen von Temperaturinversionen einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit hat.

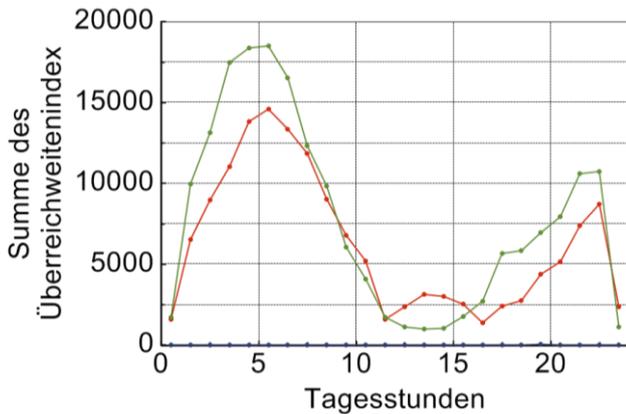


Abbildung 9: Summe des Überreichweitenindex in den Tagesstunden

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

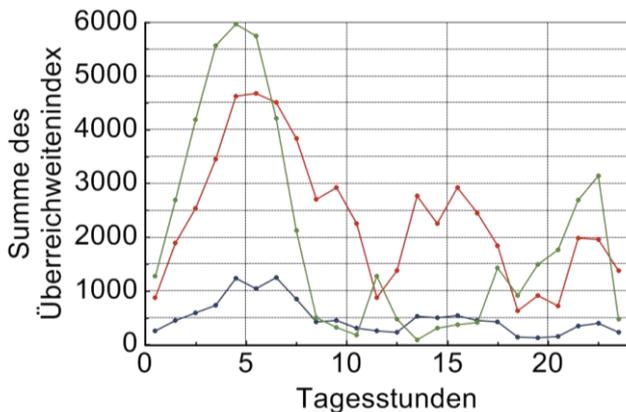


Abbildung 10: Summe des Überreichweitenindex in den Tagesstunden, Datenbasis: Sommer
Quellhöhe 1 m (Blau), 10 m (Rot), 100 m (Grün)

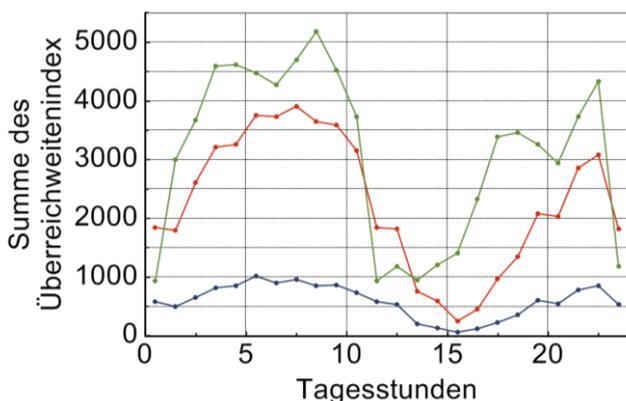


Abbildung 11: Summe des Überreichweitenindex in den Tagesstunden, Datenbasis: Winter
Quellhöhe 1 m (Blau), 10 m (Rot), 100 m (Grün)

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 12 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 Überreichweitesituationen 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 Verteilungmaximum zwischen 3 km und 4 km.

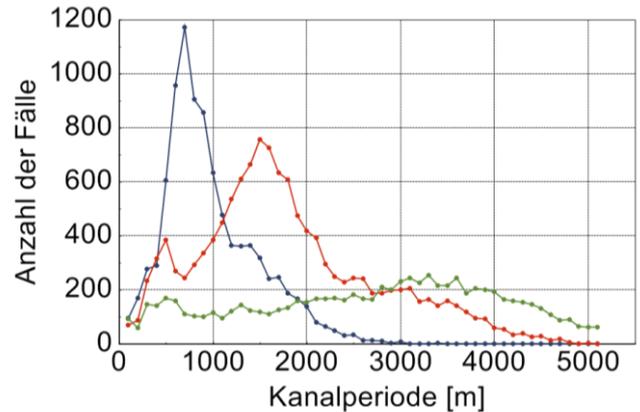


Abbildung 12: Verteilung der Kanalperiode

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

Schlussfolgerungen

- Der Einsatz moderner 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‘, sondern sie kommen sogar recht häufig vor. (Ungefähr an einem Drittel aller Tage)
- Überreichweiten sind richtungsselektiv. 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 des Risikos 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 Beiträge von Schall 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.

Verweise

- [1] Proceedings „Symposium on Long Range Sound Propagation“, <https://ncpa.olemiss.edu/long-range-sound-propagation-1rsp/>, abgerufen am 20.12.2017
- [2] Hirsch, K.-W.: „Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters“, Lärmbekämpfung Bd. 9 (2014) Nr. 6 - November, S. 267-275
- [3] Hirsch, K.-W.: „Schallwetter“, Fortschritte der Akustik, DAGA'2014, DEGA e.V., Oldenburg