

# Aspekte der Ausbreitung tieffrequenten Schalls durch die bewegte Atmosphäre

Till Kühner

Cervus Consult GmbH, 47877 Willich, E-Mail:kuehner@cervus.de

## Einleitung

Geht man von den Frequenzen des normalen Hörens zu tieferen Frequenzen, wird das Gehör immer unempfindlicher, bis es seine Fähigkeit verliert, Töne zu unterscheiden, und nur noch sehr hohe Pegel wahrgenommen werden können. Man spricht von Infraschall, und hat streng genommen den Bereich der Akustik verlassen, weil ein Hören im klassischen Sinn nicht mehr möglich ist.

Die Unterscheidung von Schall und Infraschall macht sich also zunächst nicht an physikalischen Effekten, sondern der Physiologie des Hörens fest, während die Physik der Schallwellen zunächst unverändert aussieht. Dennoch kommt es bei der Schallausbreitung im Freien zu qualitativen Unterschieden zwischen sehr tiefen und höheren Frequenzen.

Im Folgenden wird der Einfluss tiefer Frequenzen auf die Schallausbreitung unter schallausbreitungsgünstigen Witterungsbedingungen diskutiert.

## Luftabsorption

In Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck kann die Absorption von Schall in der Luft insgesamt größer oder kleiner sein, aber ganz generell sinkt sie mit fallender Frequenz. Abbildung 1 zeigt exemplarisch einen Absorptionsverlauf entsprechend ISO 9613-1 [1].

Für sehr tiefe Frequenzen wird die Luftabsorption offensichtlich unbedeutend.

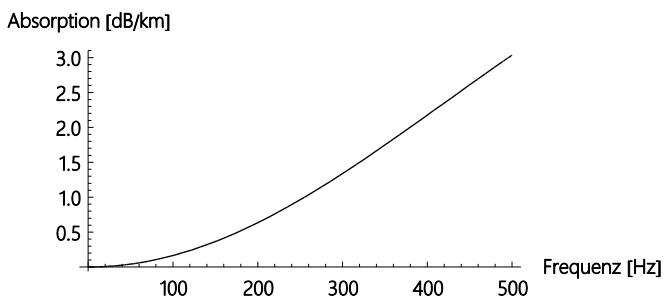


Abbildung 1: Die Luftabsorption pro km bei typischen Bedingungen.

## Bodenreflektion

Schall kann am Boden reflektiert werden. Dabei kann es zu Energieverlusten und Phasendrehungen kommen. Mit sinkender Frequenz wird der Boden zunehmend schallhart, d.h. die Energieverluste und Phasendrehungen bei der Reflektion werden klein.

In Abbildung 3 ist beispielhaft der Betrag der Impedanz gegen die Frequenz entsprechend dem Delany-Bazley Modell [2] aufgetragen. Dargestellt ist ein Wert proportional zu den Werten für konkrete Böden, die mehr oder weniger porös sein

können. In jedem Fall steigt die Impedanz stark an, wenn die Frequenz klein wird, der Boden wird schallhart.

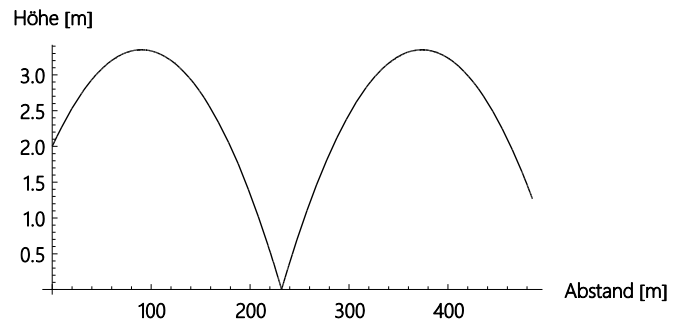


Abbildung 2: Einfache Bodenreflektion

Kommt der Schall wie in Abbildung 8 an einem Empfangspunkt auf zwei Ausbreitungswegen an, und die Bodenreflektion erfolgt dabei schallhart, dann erfolgt die Addition der Schalldrücke kohärent und phasengleich, d.h. durch die Bodenreflektion steigt der Pegel um 6 dB. Bei kleinen Frequenzen kann es dagegen durch Phasenunterschiede zu weniger konstruktiver Addition kommen, bis hin zur fast völligen Auslöschung des Signals.

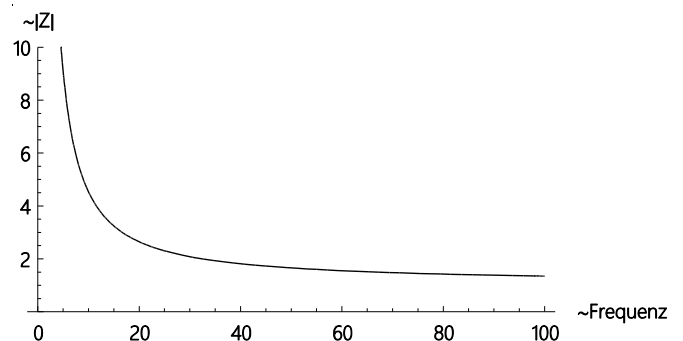


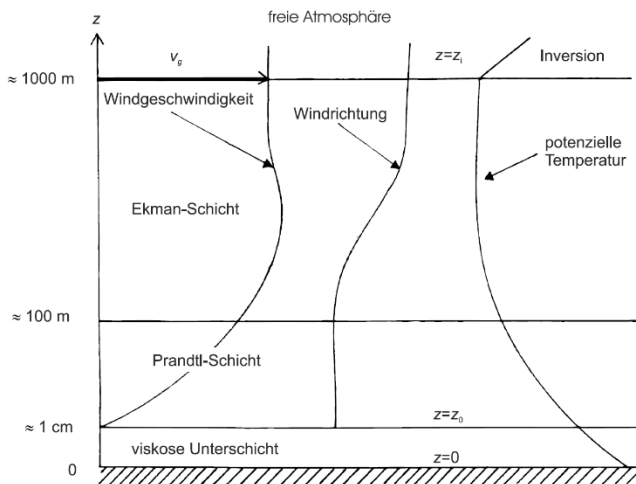
Abbildung 3: Bodenimpedanz in Abhängigkeit von der Frequenz.

## Mitwindbedingungen

Bei typischen Bedingungen steigt die Windgeschwindigkeit bis in die Nähe der Grenzschichthöhe, und wird dann konstant oder fällt wieder ab. In Abbildung 4 ist als Beispiel der höhenabhängige Verlauf der Windgeschwindigkeit aus der VDI 3782-8 dargestellt.

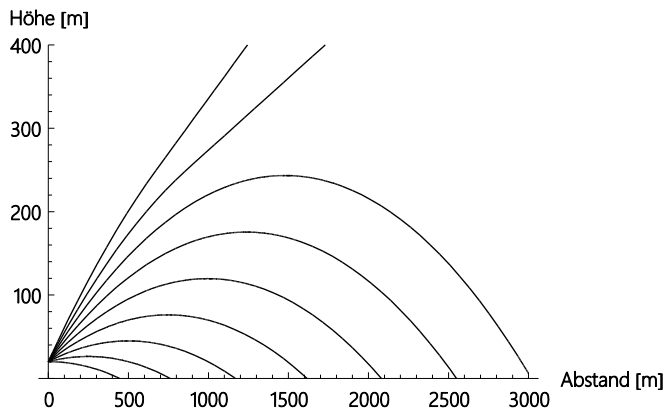
Findet die Schallausbreitung in Mitwindrichtung statt, dann führt der Wind zu einer effektiven Schallgeschwindigkeit, die mit der Höhe steigt. Da der Schall den schnellsten Weg nimmt, führt das Steigen der effektiven Schallgeschwindigkeit mit der Höhe dazu, dass die Strahlen (Linien des Energieflusses) nach unten gekrümmt werden. Für Abstrahlwinkel, in denen die effektive Schallgeschwindigkeit auch am höchsten Punkt des Strahls

noch weiter steigt, werden die Strahlen immer wieder zum Boden zurück gekrümmt (Abbildung 2).



**Abbildung 4:** Windgeschwindigkeit, -richtung und Temperatur in Abhängigkeit von der Höhe. VDI 3782-8, Bild 2

Kommt ein Strahl in eine Höhe, in der die effektive Schallgeschwindigkeit nicht weiter steigt, dann wird er dort nicht mehr nach unten gekrümmt, und geht in die freie Atmosphäre verloren.



**Abbildung 5:** Strahlen bei Mitwind und bis 250m steigender Windgeschwindigkeit. Die beiden oberen Strahlen werden ab 250m nicht mehr nach unten gekrümmt.

Die gleiche Betrachtung lässt sich auf alle Situationen übertragen, in denen in einer bodennahen Schicht die effektive Schallgeschwindigkeit mit der Höhe steigt. Also auch auf Inversion und Windstille, oder alle Mischungen aus Wind- und Temperaturverlauf, die zu einem Ansteigen der effektiven Schallgeschwindigkeit mit der Höhe führen.

Da die effektive Schallgeschwindigkeit in der freien Atmosphäre mit der Höhe sinkt, wird es immer eine Höhe geben, ab der Schall nicht mehr zum Boden zurück gebrochen wird. Diese kann mit der Grenzschichthöhe übereinstimmen, oder darunter liegen.

### Von drei zu zwei Dimensionen

Für die oben genannten Bedingungen geht steil nach oben abgestrahlte Energie in die freie Atmosphäre verloren, steil

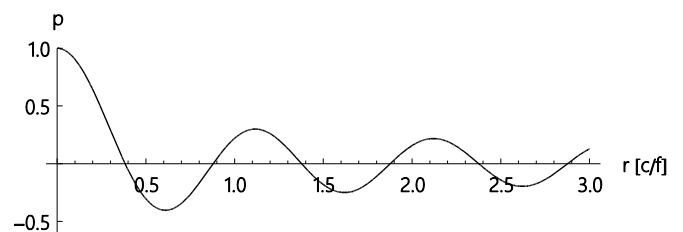
nach unten abgestrahlte Energie wird einmal am Boden reflektiert, und geht dann ebenfalls in die freie Atmosphäre verloren. Dazwischen gibt es einen Bereich flacher Abstrahlwinkel, in denen die Strahlen immer wieder zum Boden zurückgekrümmt werden (siehe z.B. Abb. 2). Da bei tiefen Frequenzen der Boden schallhart wird, wird damit die Energie zwischen Boden und der Höhe, bis zu der die Windgeschwindigkeit steigt, eingeschlossen.

Man kann die Betrachtung auch umdrehen: Unabhängig von der Frequenz bleibt aufgrund der Brechung in der Atmosphäre immer ein Teil der Strahlung in einer bodennahen Schicht. Da bei höheren Frequenzen die Bedeutung von Strahlen mit Mehrfachreflexionen schnell sinken kann, lässt sich dort die Annahme, dass der Energiefluss in dieser Schicht eingeschlossen bleibt, nicht anwenden.

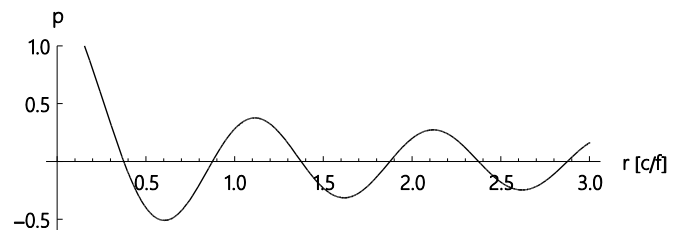
Da für tiefe Frequenzen ein Teil des Energieflusses in einer bodennahen Schicht eingeschlossen bleibt, wird für diesen Teil die Schallausbreitung effektiv zweidimensional. Was das bedeutet, und wie weit sich die Betrachtung als zweidimensionales Problem anwenden lässt, wird im Folgenden näher betrachtet.

### Punktquelle in zwei Dimensionen

Wenn das Problem tatsächlich als zweidimensional betrachtet werden kann, dann ist der Schalldruckverlauf nicht wie in zwei Dimensionen durch  $\sin/r$  gegeben, sondern durch die Besselfunktionen. Diese sehen mit von der Quelle zunehmendem Abstand  $\sin/\sqrt{r}$  immer ähnlicher. Bei einem Abstand von  $1 c/f$  liegt der Unterschied bei 3,6%, bei  $10 c/f$  nur noch 0,06%.



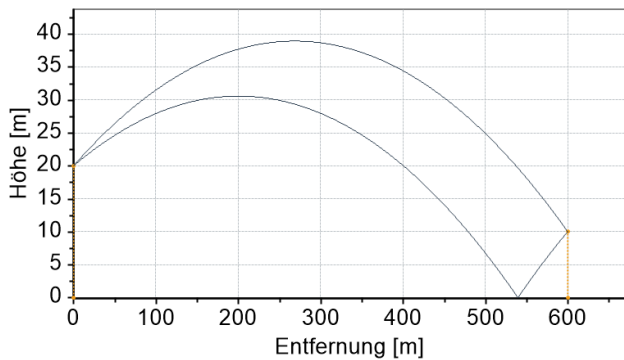
**Abbildung 6:** Besselfunktion (J)



**Abbildung 7:**  $\sin/\sqrt{r}$

Der Abstand zwischen den Nulldurchgängen geht für große Abstände von der Quelle gegen  $c/f$ , und entspricht dann dem Wellenlängenbegriff in drei Dimensionen.

Der Abstand zwischen dem 2. und dem 1. Nulldurchgang liegt bei  $0,992 c/f$ , zwischen dem 11. und 10. Nulldurchgang bei  $0,99987 c/f$ . Die Werte sind also nahe an der in drei Dimensionen erwarteten Wellenlänge, stimmen aber nicht exakt damit überein.



**Abbildung 8:** Empfänger auf 10m Höhe

Für den Bereich Umweltakustik ausreichend ist die Ähnlichkeit der Besselfunktionen zu  $\sin/\sqrt{r}$ . Das Schalldruckquadrat fällt statt mit  $1/r^2$  in zwei Dimensionen mit  $1/r$ . In dB ausgedrückt, ist die geometrische Dämpfung in zwei Dimensionen nur halb so groß wie in drei Dimensionen.

### Höhenabhängigkeit des Schalldrucks

Wenn sich die Schallausbreitung als zweidimensional betrachten lassen soll, dann müsste der Schalldruck unabhängig von der Höhe des Empfängers sein. Eine starke Höhenabhängigkeit des Schalldrucks wäre ein Hinweis, dass die Betrachtung als zweidimensionales Problem nicht passt.

Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Abstand zur Quelle groß genug ist, dass der Pegel nicht durch Strahlung bestimmt wird, die nicht in der bodennahen Schicht eingeschlossen bleibt, sondern letztlich in die freie Atmosphäre verloren geht.

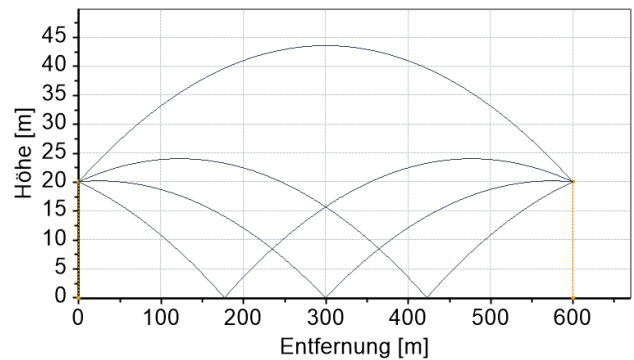
Beispielhaft sind in Abbildung 8 die möglichen Ausbreitungswege für eine Quelle auf 20m Höhe und einen Empfänger in 600m Abstand auf 10m Höhe dargestellt. Es gibt den Direktschall und eine Bodenreflektion. Diese beiden Wege gibt es – wenn keine Hindernisse im Weg sind – bei allen Abständen und Höhen.

In Abbildung 9 wurde nur die Höhe des Empfängers geändert. Für diese Situation gibt es zwei zusätzliche Wege mit jeweils einer Bodenreflektion. Das heißt, dass allein durch ändern der Höhe des Empfängers Schall auf doppelt so vielen Wegen zum Empfänger kommt, also eine deutliche Änderung des Pegels zu erwarten ist, wenn man die Höhe des Empfängers ändert.

Als Strahlenmodell betrachtet, ändern sich die Stellen der Bodenreflektion der beiden zusätzlichen Strahlen wenn man die Höhe des Empfängers ändert. An einer bestimmten Höhe berühren sich die Punkte der Bodenreflektion, und die zusätzlichen Strahlen verschwinden.

### Kaustik

Kommt es in einem Strahlenmodell zu einem Übergang, an dem Strahlengänge zusätzlich entstehen oder verschwinden, und dadurch einen Pegelsprung – oder gar divergierenden Pegel – voraussagen, dann nennt man die Stelle, an der das passiert eine Kaustik.



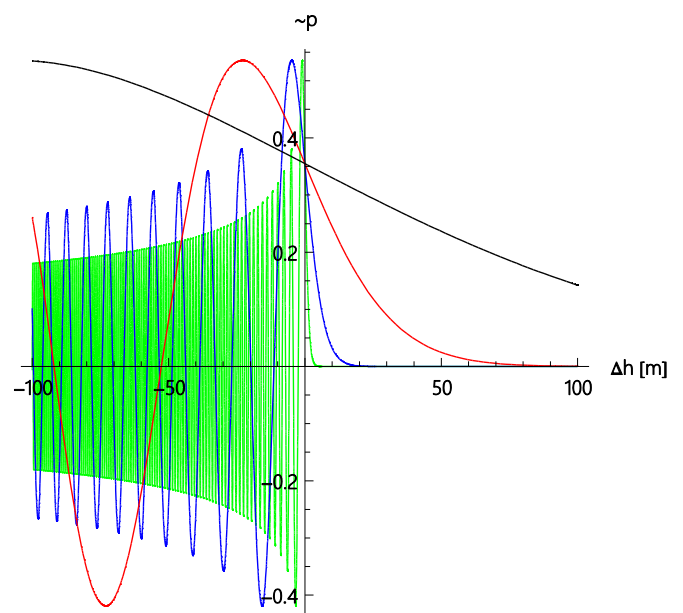
**Abbildung 9:** Empfänger auf 20m Höhe

Bei typischen Mitwindbedingungen treten solche Kaustiken bei Abständen ab ca. 400m auf.

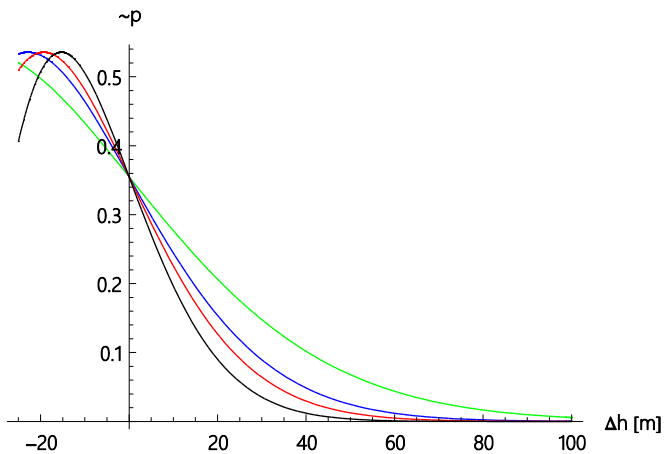
Grundlage von Strahlenmodellen ist im Allgemeinen die Eikonalapproximation, die voraussetzt, dass sich das Pegelfeld langsam und stetig ändert. Da dies an der Kaustik nicht erfüllt wäre, muss man die Betrachtung als Strahlenmodell für diesen Fall durch eine wellentheoretische ergänzen. [4][5]

Statt eines Sprungs oder einer Divergenz im Pegel am Durchgang durch die Kaustik, erhält man für den Beitrag der an der Kaustik beteiligten Strahlen einen weichen, von der Wellenlänge abhängigen Übergang.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf des Schalldrucks oberhalb und unterhalb der Kaustik für verschiedene Frequenzen bei einem Gradienten von  $0.3 \frac{m}{s}$  in der höhenabhängigen effektiven Schallgeschwindigkeit. Je höher die Frequenz, umso mehr ähnelt der Verlauf einem Sprung am Durchgang durch die Kaustik, je niedriger die Frequenz, um so weicher wird der Verlauf.



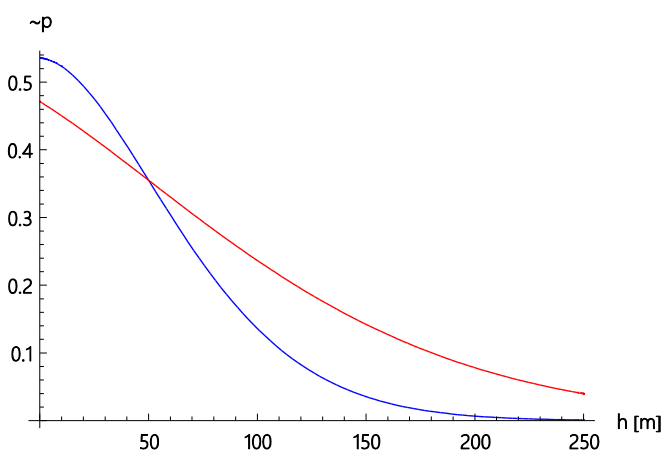
**Abbildung 10:** Schalldruckverlauf an der Kaustik, für 1000 Hz (grün), 100 Hz (blau), 10 Hz (rot), 1 Hz (schwarz).  $\Delta h$  ist der Höhenunterschied zur Kaustik



**Abbildung 11:** Schalldruckverlauf an der Kaustik, für 10 Hz und Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit von 0,1 (grün), 0,3 (blau), 0,5 (rot), 1 (schwarz)  $\frac{m}{s}/m$

In Abbildung 11 ist der Schalldruckverlauf bei 10 Hz für verschiedene Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit dargestellt. Je größer der Gradient, um so steiler wird der Verlauf. D.h., dass sich schwächere Gradienten sich auswirken wie tiefere Frequenzen, oder umgekehrt, dass z.B. bei hohen Windgeschwindigkeiten die Frequenzen tiefer sein müssen, um den gleichen Effekt zu haben.

In Abbildung 12 ist der Schalldruckverlauf für eine Kaustik auf 50m Höhe für 1 Hz und 3 Hz gegen die Höhe aufgetragen, bei einem Gradienten der eff. Schallgeschwindigkeit von  $0,3 \frac{m}{s}/m$ . Der Verlauf ist so langsam, dass die höhenabhängigen Pegelveränderungen für diesen Beitrag auch bei 3 Hz schwach sind, zumal bei Bildung des Gesamtpegels der Direktstrahl und die erste Bodenreflektion noch dazu kommen. Eine schwache Abhängigkeit des Pegels von der Höhe ist ein Indiz, dass die Annahme eines zweidimensionalen Problems gültig ist. Je tiefer die Frequenz, umso eher ist diese Annahme berechtigt.



**Abbildung 12:** Schalldruckverlauf für die an der Kaustik beteiligten Strahlen bei einer Kaustik auf 50m Höhe. 3 Hz (blau), 1 Hz (rot)

Für 1 Hz sieht man in Abbildung 12 allerdings auch, dass auch bei 250m Höhe noch ein wesentlicher Beitrag zu finden ist. D.h. man kommt bei tiefen Frequenzen irgendwann in den Bereich, in dem ein wesentlicher Teil des Feldes in Höhen

gestreut wird, in denen der Gradient der Schallgeschwindigkeit den Schall nicht mehr zurück zum Boden bricht. Das heißt, dass es aufgrund der tiefen Frequenz zu Verlusten in die freie Atmosphäre kommt, und die Schallausbreitung dadurch ungünstiger wird.

## Zusammenfassung

Bei tiefen Frequenzen wird die Schallausbreitung günstiger, weil

- die Luftabsorption kaum noch eine Rolle spielt,
- bei der Bodenreflektion wenig Energie verloren geht,
- am Boden reflektierter Schall nur kleine Phasendrehungen erfährt, und sich die Schalldrücke verschiedener Strahlen konstruktiv addieren.

Dadurch kann sich bei tiefen Frequenzen der zweidimensionale Aspekt der Schallausbreitung bei Mitwindbedingungen zeigen. Es ist eine deutlich erhöhte Reichweite zu erwarten, weil die geometrische Dämpfung halbiert wird.

Die Reichweitenunterschiede können sich erst bei Abständen zeigen, in denen es zu mehr als einer Bodenreflektion gekommen ist.

Bei sehr tiefen Frequenzen kommt es durch Kaustiken zu Streuverlusten in die freie Atmosphäre, und die Reichweite der Schallausbreitung sinkt wieder.

## Literatur

- [1] ISO 9613-1:1993
- [2] Delany, M.E. and Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Applied Acoustics 3, 1970, pp. 105-116
- [3] VDI 3783-8, Umweltmeteorologie - Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle
- [4] Kravtsov, Orlov: Caustics, Catastrophes and Wave Fields. Springer Series on Wave Phenomena
- [5] Kühner, T.: Kaustiken bei Schallausbreitung in der Atmosphäre, Fortschritte der Akustik, DAGA 2015, Nürnberg