

# Auswirkungen unterschiedlicher Schallstrahlenmodelle auf die Schallprognose

Astrid Ziemann, Kati Balogh

Universität Leipzig, Institut für Meteorologie, 04103 Leipzig, Deutschland, Email: [ziemann@uni-leipzig.de](mailto:ziemann@uni-leipzig.de)

## Einleitung

Die Lärmbelastung an einem Ort ist neben den Eigenschaften der Lärmquelle von den Umgebungsbedingungen während der Schallübertragung abhängig. Zu diesen Bedingungen zählt der aktuelle Zustand der Atmosphäre, insbesondere das vertikale Temperatur- und Windprofil. Das Modell SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing) berücksichtigt einerseits diesen wichtigen Aspekt des Atmosphäreinflusses auf die Schallausbreitung und ist andererseits auch operationell für die Beantwortung von Lärmschutzfragen einsetzbar.

Ziel dieser Studie ist die Abschätzung der Auswirkungen einer unterschiedlich simulierten Schallstrahlenrefraktion infolge von Temperatur- und Windgradienten auf verschiedene Schallparameter, z.B. die Laufzeit akustischer Signale zwischen einer Schallquelle und einem Immissionsort sowie die Zusatzdämpfung des Schallpegels infolge des gekoppelten Boden-Atmosphäre-Einflusses.

## Schallstrahlenmodelle

Für die vorliegende Studie wird das zweidimensionale Schallstrahlenmodell SMART angewendet [1]. Ausgehend von einer Schallquelle, von der ein Schallstrahlenbündel ausgesendet wird, kann unter Anwendung des Refraktionsgesetzes der zurückgelegte Schallweg verfolgt werden. Die meteorologische Beeinflussung der Schallstrahlenrefraktion wird dabei insbesondere durch die vertikalen Gradienten der Temperatur und des Windfeldes bestimmt. Mit Hilfe geometrischer Größen aus der Schallstrahlensimulation kann eine Berechnung der Schallpegeldämpfung in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle erfolgen.

Die Beschreibung der Schallausbreitung kann anschaulich mit den Richtungen der Wellenfrontnormalen bzw. des Schallstrahls vorgenommen werden. In einer bewegten Luftschicht stimmen die Schallstrahlenrichtung und die Richtung der Wellenfrontnormale nicht überein. Dementsprechend sollte zwischen einem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale und für den Schallstrahl selbst unterschieden werden [2].

Das Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale kann mit dem Refraktionswinkel  $\theta$  folgendermaßen dargestellt werden:

$$\frac{c}{\sin(\theta)} + v = \text{const.} \quad (1)$$

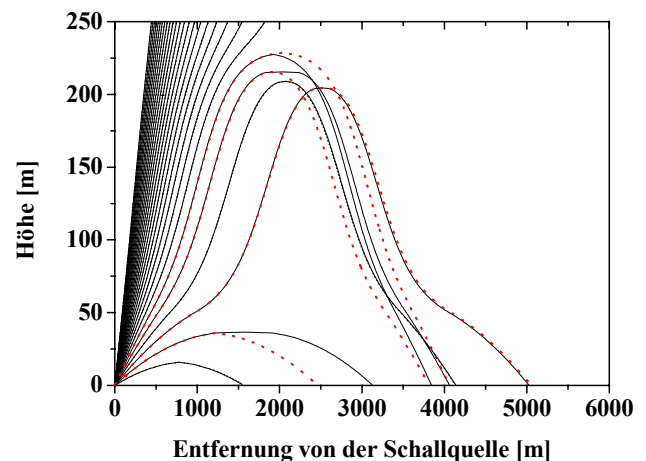
Dabei hängen in der vertikal geschichteten Atmosphäre die adiabatische Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Wind-

geschwindigkeit  $v$  (Komponente in Schallausbreitungsrichtung) nur von der Höhe  $z$  ab. Dieses Refraktionsgesetz wird auch für aktuelle Schallstrahlenuntersuchungen in einer bewegten Atmosphäre angewendet.

Ein Refraktionsgesetz für die Brechung eines Schallstrahls an einer Schichtgrenze in einem zweidimensional geschichteten, bewegten Medium wurde u.a. von Ostashev et al. [1] abgeleitet. Unter der Annahme einer kleinen Mach-Zahl,  $M = v/c$ , erhält man für den Refraktionswinkel  $\alpha$

$$\frac{\sin(\alpha)}{c \left(1 + \frac{M}{\sin(\alpha)}\right)} \cong \frac{\sin(\alpha)}{c} \left(1 - \frac{M}{\sin(\alpha)}\right) = \text{const.} \quad (2)$$

Der Verlauf einiger Schallstrahlen, die mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale (1) bzw. für den Schallstrahl (2) berechnet wurden, ist in der Abbildung 1 für eine vertikale Temperatur- und Windgeschwindigkeitszunahme dargestellt. Die meisten Schallstrahlen verlaufen für beide Simulationen sehr ähnlich. Nur im Bereich zwischen 2 und 5 km Entfernung von der Schallquelle entstehen unterschiedliche Auftreffpunkte der Schallstrahlen in Bodennähe, was in diesen Bereichen wiederum zu unterschiedlichen Lärmimmissionsprognosen führt.



**Abbildung 1:** Schallstrahlenverlauf für Mitwind berechnet mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale (durchgezogen) bzw. den Schallstrahl (gepunktet).

## Modellsimulationen

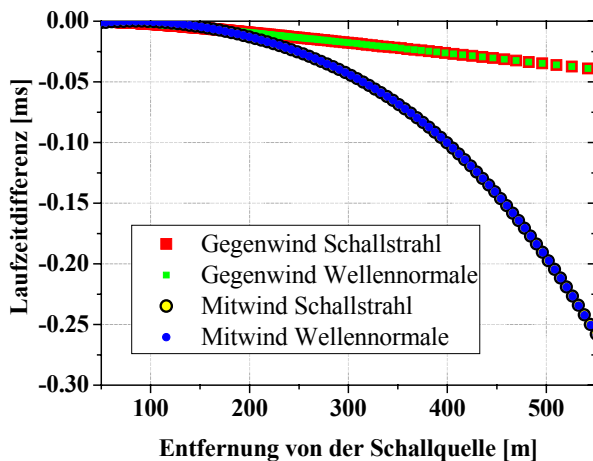
Um die Schallausbreitungsbedingungen für eine Vielzahl meteorologischer Situationen zu berechnen, werden diese in verschiedene Klassen eingeteilt. Durch die geeignete Kombination von Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsprofilen entstehen so 1551 Profilklassen. Die

Schallausbreitungssituationen, die sich mit Hilfe dieser meteorologischen Profilklassen ergeben, unterscheiden sich signifikant voneinander, so dass die hohe Anzahl an Profilklassen gerechtfertigt ist.

### Auswertung der akustischen Laufzeit

Für die Untersuchung der Schalllaufzeit zwischen einer Schallquelle in 1,6 m Höhe und einem Immissionsort in 2,1 m Höhe wurden die Schallstrahlen mit dem Modell SMART in einem Modellgebiet über einem schallharten Boden mit einem Abstand bis zu 550 m Entfernung von der Schallquelle berechnet.

In der Abbildung 2 werden exemplarische Laufzeitdifferenzen zwischen Schallstrahlen, die entsprechend der Temperatur- und Windgradienten (hier: vertikale Zunahme von Temperatur und Windgeschwindigkeit) refraktiert wurden, und den geradlinigen Schallausbreitungswegen verglichen. Entsprechend des Fermatschen Prinzips sind die Laufzeiten auf den gekrümmten Schallwegen kleiner als auf den geradlinigen Wegen (negative Differenzen).



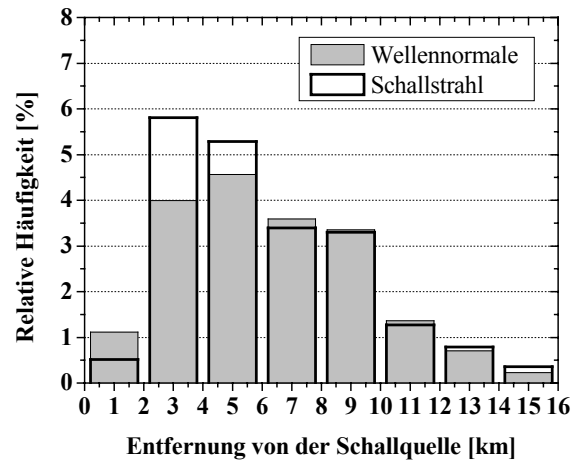
**Abbildung 2:** Laufzeitdifferenz zwischen dem gekrümmten und dem geradlinigen Schallstrahl für verschiedene Schallstrahlen (Entfernungen) und Refraktionsgesetze.

In der Mitwindrichtung werden die Schallstrahlen verstärkt zur Erdoberfläche hin refraktiert. In diesem Fall treten auch die größten Beträge der Laufzeitdifferenzen auf. Für vertikale Temperatur- und Windprofile, die sich in ihrer Wirkung auf die Schallstrahlenrefraktion gegenseitig verstärken, sollten dementsprechend die gekrümmten anstatt der geradlinigen Schallwege verwendet werden. Eine Anwendung findet dieses Ergebnis z.B. für Genauigkeitsabschätzungen der akustischen Laufzeitotomographie [3]. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Refraktionsgesetzen sind demgegenüber deutlich geringer.

### Auswertung der Zusatzdämpfung

Die Berechnungen der Schallstrahlen wurden nun mit dem Modell SMART in einem deutlich größeren Modellgebiet mit einem Abstand bis zu 15 km Entfernung von der Schallquelle über einem schallharten bzw. einem vollständig absorbierenden Boden durchgeführt. Als Emissionsniveau wurde die Erdoberfläche angenommen. Ausgehend von den

Schallstrahlenberechnungen für die 1551 meteorologischen Eingangsprofile wurden horizontale Schalldämpfungsverteilungen für das Immissionsniveau in 2 m Höhe berechnet. Negative Werte dieser Zusatzdämpfung zeigen eine gegenüber der ungestörten Schallausbreitung verringerte Dämpfung des Schalldruckpegels (verstärkte Lärmbelastung) infolge des gekoppelten Atmosphäre-Boden-Einflusses an.



**Abbildung 3:** Relative Häufigkeit des Auftretens negativer Zusatzdämpfungen (verstärkte Lärmbelastung) über einem vollständig absorbierenden Boden für Simulationen mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale bzw. für den Schallstrahl für 1551 meteorologische Profilklassen und 2124 Bildpunkte je Profilklassen.

Die relative Häufigkeit für eine zusätzliche Schallimmission infolge des Atmosphäreneinflusses ist in Abbildung 3 für einen vollständig absorbierenden Boden dargestellt. Diese Situationen treten zwar nicht sehr häufig auf, sind jedoch für Untersuchungen zum Lärmschutz von besonderem Interesse. Die größten Unterschiede zwischen den Simulationen mit verschiedenen Refraktionsgesetzen treten bei Entfernungen zwischen 3 und 5 km von der Schallquelle auf. Hier wird durch die Verwendung des Refraktionsgesetzes für den Schallstrahl (2) eine häufigere zusätzliche Lärmbelastung prognostiziert. Für künftige Untersuchungen von Lärmschutzfragen sollte deshalb das Refraktionsgesetz für Schallstrahlen (2) für die Schallausbreitungssimulation Verwendung finden, um eine Maximalwertabschätzung für die mögliche Lärmbelastung eines bestimmten Gebietes richtig vornehmen zu können.

### Literatur

- [1] Ziemann, A. und Balogh, K.: Schallimmissionsprognose über einer schallharten Oberfläche. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig **30** (2004), 59-70
- [2] Ostashov, V.E., Hohenwarter, D., Attenborough, K., Blanc-Benon, Ph., Juvé, D. und Goedecke, G.H.: On the refraction law for a sound ray in a moving medium. *Acustica* **87** (2001), 303-306
- [3] Ziemann, A., Arnold, K. und Raabe, A.: Acoustic tomography as a method to identify small-scale land surface characteristics. *Acustica* **87** (2001), 731-737