

Einfluss einer turbulenten Atmosphäre auf die Lärmimmission - Simulationen mit einem linearisierten Euler Modell

Reinhard Blumrich, Dietrich Heimann

Institut für Physik der Atmosphäre, DLR – Oberpfaffenhofen, D-82234 Weßling; Email: reinhard.blumrich@dlr.de

Einführung

Der Einfluss meteorologischer Faktoren auf die Schallausbreitung im Freien ist hinlänglich bekannt und wird bei der Berechnung der Schallausbreitung mehr und mehr berücksichtigt. Zu diesen Faktoren zählen atmosphärische Absorption, Brechung durch sowohl Wind- als auch Temperaturgradienten und Streuung durch Turbulenz in der Atmosphäre. Die Streuung der Schallwellen an Turbulenz hängt stark vom Zustand der Atmosphäre und hierüber wegen der unterschiedlichen Ausdehnungen der einzelnen Wirbel stark von der Frequenz ab. Turbulenz kann u.a. durch

- Konvektion, d.h. aufsteigende Warmluft,
- topografische Unebenheiten (Berge, Gebäude, etc.), und
- die Bodenrauigkeit generiert werden.

Abbildung 1 zeigt schematisch die Erzeugung von akustisch relevanter Turbulenz durch Bodenrauigkeit und durch Hindernisse.

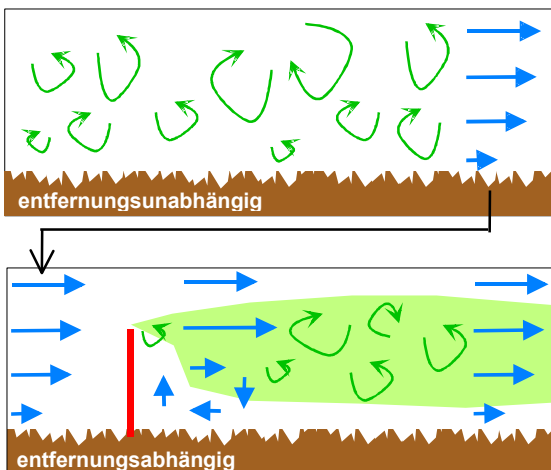


Abbildung 1: Schematische Darstellung von akustisch relevanter Turbulenz in der Grenzschichtströmung, erzeugt durch Bodenrauigkeit (oben) und Hindernisse (unten).

Während der Effekt von Turbulenz auf die Wellenausbreitung schon vor einiger Zeit untersucht wurde,¹ werden Simulationen hierzu allerdings erst in jüngerer Zeit durchgeführt² und sind noch nicht Stand der Technik. Auf die Lärmimmission hat die Streuung an Turbulenz im wesentlichen folgende Auswirkungen:

- Verringerung eventuell vorhandener Kohärenz und dadurch Verringerung von Interferenzeffekten.
- Streuung von Schallwellen bzw. Schallenergie in Schattenzonen bei Ausbreitung gegen den Wind.
- Streuung von Schallwellen bzw. -energie in abgeschattete Bereiche hinter z.B. Schallschutzwänden.

Im zuletzt genannten Fall kann Turbulenz zu einer Verringerung der Effizienz von Schallschutzwänden führen und sollte somit bei der Immissionsprognose mit berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Artikel wird eine Methode vorgestellt, mit der man die Schallausbreitung in inhomogener, turbulenter Atmosphäre mit dem kürzlich entwickelten linearisierten Euler (LE) Modell³ simulieren kann. Das LE Modell zeichnet sich dadurch aus, dass uneingeschränkt dreidimensionale Inhomogenitäten der Atmosphä-

re berücksichtigt werden können und bei der Topografie, im Rahmen der Gitterauflösung, keine wesentlichen Einschränkungen beachtet werden müssen. Im folgenden wird nun die Generierung der Turbulenz im LE Modell beschrieben und in einem Beispiel die Schallausbreitung in turbulenter Atmosphäre simuliert und die Auswirkung der Turbulenz auf die Immission diskutiert.

Erzeugung der Turbulenz

Das zu Grunde liegende Modellsystem basiert auf den Euler-Gleichungen für adiabatische Prozesse in einer reibungs-, rotations- und auftriebsfreien Atmosphäre. Das Modellsystem beinhaltet ein Strömungsmodell zur Berechnung des Windfeldes³ und das LE Modell zur Berechnung der Schallausbreitung in der Atmosphäre. Das Strömungsmodell berechnet neben dem mittleren Wind mit seinen Komponenten \bar{u} , \bar{v} und \bar{w} auch die lokale, mittlere turbulente kinetische Energie *TKE*:

$$TKE = 0,5 \cdot (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad \text{Gl. 1}$$

Aus dieser Größe können nun unter Berücksichtigung einer typischen spektralen Energiedichte turbulente Zustände des Windfeldes erzeugt werden. Der Turbulenzgenerator sollte hierbei quellenfreie Felder von u' , v' , w' erzeugen, die zufällig verteilt sind, lokal der *TKE* entsprechen und die spektrale Energiedichte von Turbulenz erfüllen (hier: Prandtl-Spektrum, Amplitude proportional $k^{-5/3}$).

Zur Umsetzung im LE Modell werden Wirbel verschiedener Größe mit Hilfe der Strömungsfunktion ϕ generiert. Für den 2D Fall gilt:

$$u'(x,z) = -\frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad w'(x,z) = +\frac{\partial \phi}{\partial x}. \quad \text{Gl. 2}$$

Die Größen der Wirbel liegen im Bereich zwischen der Auflösung des Berechnungsgitters und der Ausdehnung des betrachteten Gebietes. Die Positionen werden mit einem Zufallsgenerator bestimmt. Die Amplituden von ϕ werden in Abhängigkeit von der Wirbelgröße entsprechend dem Energiedichtespektrum und von der Position entsprechend der lokalen *TKE* gewichtet. Die so berechneten Wirbel werden dem mittleren Wind überlagert.

Um turbulente Fluktuationen in der Schallausbreitungsrechnung richtig zu simulieren, sind viele turbulente Zustände nötig. Hierzu gibt es 2 Berechnungsstrategien:

- Schallausbreitung in eingefrorener Turbulenz (viele Modellläufe mit verschiedenen turbulenten Zuständen, Mittelung über Läufe).
- Schallausbreitung in „transienter“ Turbulenz (eine Simulation in Zeitebene mit wechselnden Zuständen, Mittelung in Zeitebene).

Da das LE Modell im Zeitbereich rechnet, kann das Konzept der „transienten“ Turbulenz angewendet werden. Während der Gesamtsimulationszeit T wird jede n . Periode der maximalen Frequenz der Schallquelle ein neuer turbulenter Zustand berechnet. Die Anzahl der berücksichtigten turbulenten Zustände beträgt $N = T/(n f_{max})$. Zum Beispiel für $f_{max} = 500$ Hz, $T = 2.94$ s und $n = 3$ ergibt sich $N = 490$. Eine ausführliche Darstellung der Turbulenzgeneration im LE Modell ist an anderer Stelle nachzulesen.⁴

Bisher wurde eine Reihe von Simulationen der Schallausbreitung in verschiedenen turbulenten Situationen mit dem LE Modell durch-

geführt. In der Kürze dieses Artikels wird nur ein Beispiel gezeigt. Zusätzlich sei erwähnt, dass Vergleiche mit Ergebnissen anderer Autoren (z.B. Blanc-Benon et al.²) gute Übereinstimmung zeigten.

Das diskutierte Beispiel betrachtet ein Windfeld mit Turbulenz, erzeugt durch eine Schallschutzwand. In dieser turbulenten Atmosphäre breitet sich Schall in Windrichtung über die Wand aus. Den Aufbau des numerischen Experimentes zeigt Abbildung 2. Als Schallquelle dient eine kohärente Linienquelle 0,5 m über der Straße ($x = 0$, Straßenmitte). Die Wand ist schallhart, das Reflexionsverhalten der Straße und des Grasbodens ist über das Impedanzmodell im LE Modell⁵ an typische Impedanzen für Asphalt⁶ und Gras⁷ angepasst.

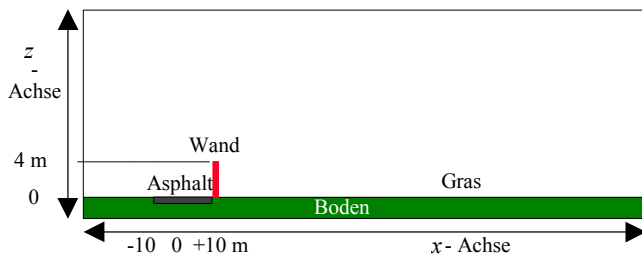


Abbildung 2: Aufbau des numerischen Experimentes zur Mitwindausbreitung über eine Wand in turbulenter Atmosphäre.

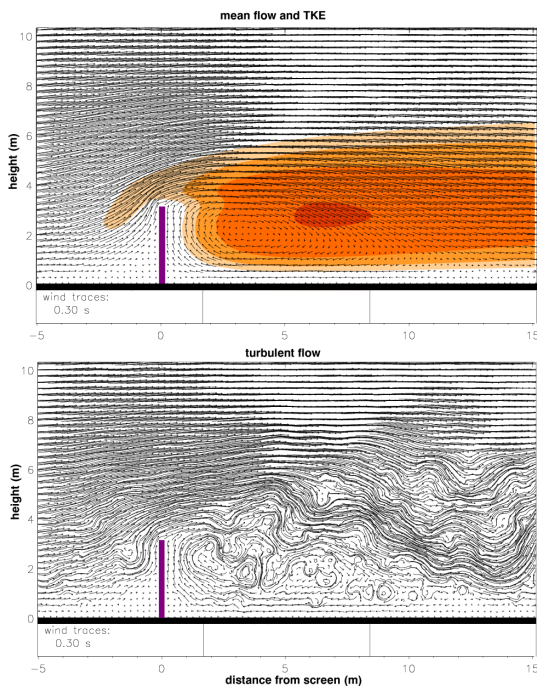


Abbildung 3: Windfeld, gestört durch eine Schallschutzwand. Oben: mittlere Strömung (Pfeile) und TKE (Isoflächen) berechnet mit dem Strömungsmodell. Unten: turbulente Strömung, erzeugt mit dem Turbulenzgenerator im LE-Modell.

In Abbildung 3 (oben) ist schematisch das mit dem Strömungsmodell berechnete Windfeld dargestellt. Die Schallschutzwand erzeugt verstärkte Gradienten und TKE im Windfeld. Aus dem mittleren Wind und der TKE wird mit dem Turbulenzgenerator im LE Modell das turbulente Windfeld erzeugt (unten).

Die Schallausbreitung hierzu wurde ohne Wind / ohne Turbulenz, mit Wind / ohne Turbulenz und mit Wind / mit Turbulenz mit dem LE Modell berechnet (Abbildung 4). Der Vergleich zeigt, dass durch den Windeinfluss die Immission hinter der Wand auf Grund stärkerer Abwärtsbrechung deutlich steigt. Durch die Turbulenz wird noch zusätzlich Schall in diesen Bereich hinein gestreut, so dass die Effizienz der Schallschutzwand noch weiter abnimmt.

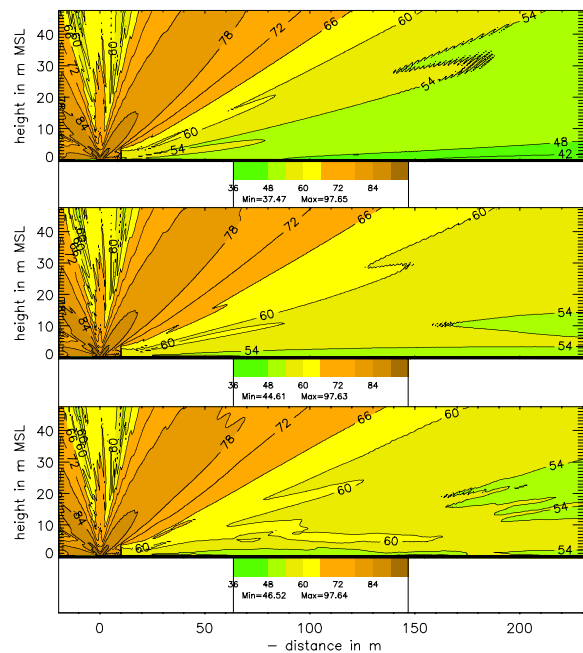


Abbildung 4: Berechneter Schallpegel (dB re. 20 μ Pa). Oben: ohne Wind, ohne Turbulenz. Mitte: mit Wind (Ausbreitungsrichtung), ohne Turbulenz. Unten: mit Wind, mit Turbulenz

Schlussfolgerung

Es hat sich gezeigt, dass das LE Modell gut geeignet ist, die Schallausbreitung in inhomogener, turbulenter Atmosphäre zu simulieren. Das Konzept der „transienten“ Turbulenz erlaubt eine effiziente Berechnung in der Zeitebene und Vergleiche mit Ergebnissen anderer Autoren bestätigen die Plausibilität der Ergebnisse. Es können typische Effekte der Turbulenz demonstriert und berechnet werden, wie z.B. Kohärenzverlust, Streuung in Schattenzonen und Streuung in abgeschattete Bereiche.

Das diskutierte Beispiel einer Mitwindausbreitung über eine Schallschutzwand bei turbulenter Atmosphäre zeigt, wie durch die Turbulenz Schallenergie in den Bereich hinter der Wand gestreut wird. Dadurch wird zusätzlich zum Windeffekt die Schallschutzwirkung der Wand weiter verringert.

- ¹ Tatarski, V.I., *The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation*, Israel Programm for Scientific Translations, Jerusalem., 1971.
- ² Wilson D.K., *A turbulence spectral model for sound propagation in the atmosphere that incorporates shear and buoyancy forcings*, J. Acoust. Soc. Am., 108, 2021-2038, 2000.
- Salomons E.M., Ostashev V.E., Clifford S.F., Lataitis R.J., *Sound propagation in a turbulent atmosphere near the ground: an approach based on the spectral representation of refractive-index fluctuations*, J. Acoust. Soc. Am., 109, 1881-1893, 2001.
- Blanc-Benon Ph., Dallois L., Juvé D., *Long range sound propagation in a turbulent atmosphere within the parabolic approximation*, Acta acustica, 87, 659-669, 2001.
- ³ Blumrich R., Heimann D., *A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects*, J. Acoust. Soc. Am., 112, 446-455, 2002.
- ⁴ Heimann D., Blumrich R., *Time-domain simulations of sound propagation through screen-induced turbulence*, submitted to Applied Acoustics, 2003.
- ⁵ Salomons E.M., Blumrich R., Heimann D., 2002: Eulerian time-domain model for sound propagation over a finite-impedance ground surface. Comparison with frequency-domain models. Acta Acustica, 88, 483-492.
- ⁶ Hamet J.F., Bérengier M., *Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model*, Proc. Internoise 1993 (Leuven, Belgium), 641-646, 1993.
- ⁷ Delany M.E., Bazley E.N., *Acoustic properties of fibrous absorbent materials*, Appl. Acoustics, 3, 105-116, 1970.