

Auswirkungen vertikaler Windkomponenten auf die Schallausbreitung – Berechnungen mit einem Euler-Modell

Reinhard Blumrich, Dietrich Heimann

DLR, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, D-82234 Weßling.

Einführung

Schallausbreitung in der atmosphärischen Grenzschicht ist stark beeinflusst von der Geländeform, Bodenbeschaffenheit und dem Zustand der Atmosphäre. Die Atmosphäre ihrerseits unterliegt ebenfalls topografischen Einflüssen. Diese direkte und indirekte Beeinflussung der Schallausbreitung durch Topografie und Atmosphäre muss bei einer Simulation durch eine konsistente Modellierung berücksichtigt werden.

Neuere Schallausbreitungsmodelle benutzen Daten von Strömungsmodellen oder meteorologischen Modellen, die eine dreidimensionale Berechnung der entsprechenden atmosphärischen Parameter ermöglichen. Dennoch werden in unterschiedlicher Weise topografische und atmosphärische Einflüsse vereinfacht. So muss z.B. bei Strahlenmodellen für die Beugung eine geeignete Parametrisierung gefunden werden.¹ Fast-Field-Programme benötigen eine horizontal homogene Atmosphäre.² PE-Modelle benutzen eine effektive Schallgeschwindigkeit, in die neben der Temperatur nur die Windgeschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung eingeht.³

Hier wird ein Ausbreitungsmodell basierend auf einer numerischen Integration der linearisierten Euler-Gleichungen benutzt. Dieses Euler-Modell beinhaltet die Beugung und ermöglicht eine volle dreidimensionale Inhomogenität der Atmosphäre, inklusive der vertikalen Komponenten des Windes. Auch hier kann ein Modell für die atmosphärischen Parameter vorgeschaltet werden.

Durch die weitgehende Berücksichtigung topografischer und atmosphärischer Einflüsse können mit dem Euler-Modell Fehler durch Vereinfachung der Meteorologie abgeschätzt werden. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen die Auswirkungen der vertikalen Windkomponenten am Beispiel der Schallausbreitung über eine Schallschutzwand unter Einfluss von verschiedenen Windgradienten.

Das Euler-Modell

Als Basis für den Modell-Algorithmus dienen die Bewegungsgleichung, die Kontinuitätsgleichung und der 1. Hauptsatz der Thermodynamik unter der Annahme einer rotations- und reibungsfreien Atmosphäre, sowie einer adiabatischen Wellenausbreitung.⁴

Nach einer Trennung der Skalen in meteorologische (\bar{u}, \bar{p}) und akustische (\bar{u}''', p''') Variable, einer Euler-Zerlegung, der Annahme eines stationären atmosphärischen Zustands und der Linearisierung der akustischen Skala resultiert folgendes Gleichungssystem:

$$\frac{\partial \bar{u}'''}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u}''' + (\bar{u}'' \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \left(\nabla p''' + \kappa \frac{p'''}{\bar{p}} \nabla \bar{p} \right)$$

$$\frac{\partial p'''}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla p''' + \bar{u}'' \cdot \nabla \bar{p} = -\kappa (\bar{p} \nabla \cdot \bar{u}''' + p''' \nabla \cdot \bar{u})$$

mit $\kappa = c_p/c_v$. Die Gleichungen werden auf einem orthogonalen Gitter schrittweise, numerisch integriert, um die zeitliche Entwicklung der Schallschnelle \bar{u}''' und des Schalldrucks p''' zu erhalten. Absorption und Turbulenz sind hier nicht berücksichtigt.

An den „offenen“ Rändern (seitlich und oben) wird zur Vermeidung von Reflexionen \bar{u}''' über eine Impedanzbedingung aus p''' berechnet. Die Bodenantwort ist von total absorbierend bis total reflektierend einstellbar. Eine komplexe Impedanz muss allerdings mit einer Bodenschicht nachgebildet werden. Im Rahmen der Gitterauflösung kann eine beliebige Topografie simuliert werden. Die Berechnungen sind 2D oder 3D, für eine oder mehrere Frequenzen durchführbar.

Berechnungen

Zur Untersuchung des Einflusses vertikaler Winde wurde die Schallausbreitung über eine Schallschutzwand bei verschieden starken Windgradienten betrachtet. Dieses Szenario wurde schon zur Validierung des Modells herangezogen.⁴

Die Störung des Windgradienten durch die Wand wurde mit einem Strömungsmodell, das auch auf den Euler-Gleichungen basiert, berechnet bis ein stationärer Zustand erreicht war. Der ungestörte Windgradient hat das logarithmische Profil $u(z) = u_0 \ln(1+z/z_0) / \ln(1+z_0/z_0)$. Hierbei sind $u_0 = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$ m/s die Windgeschwindigkeit in 9 m Höhe (im ungestörten Fall nur horizontal), $z_0 = 9$ m und $z_0 = 0,001$ m die Rauigkeitslänge des total reflektierenden Bodens.⁵ Die Berechnungen wurden zwei-dimensional für 3 verschiedene Oktavbänder durchgeführt, deren Mittenfrequenzen bei 250 Hz, 500 Hz und 1000 Hz lagen.

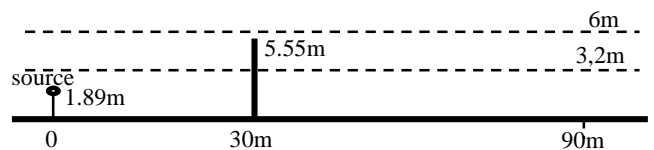


Abb.1: Skizze des fiktiven Aufbaus (nicht maßstabsge-recht). Die gestrichelten Linien geben die Horizontal-Schnitte für die Vergleiche an (s. Abb. 3 und 4).

Abb. 2 zeigt ein Beispiel für ein Windfeld, das durch die Wand gestört ist. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Gradienten speziell über und hinter der Wand verstärkt werden und dass vertikale Winde entstehen. Hinter der Wand ist eine Rückströmung zu erkennen.

Zur Untersuchung der Auswirkung vertikaler Winde auf die Schallausbreitung wurden Berechnungen mit vollständigen Windfeldern und Berechnungen ohne vertikale Windkomponenten miteinander verglichen. Zusätzlich wurde noch mit horizontal homogener (gemittelter) Atmosphäre gerechnet.

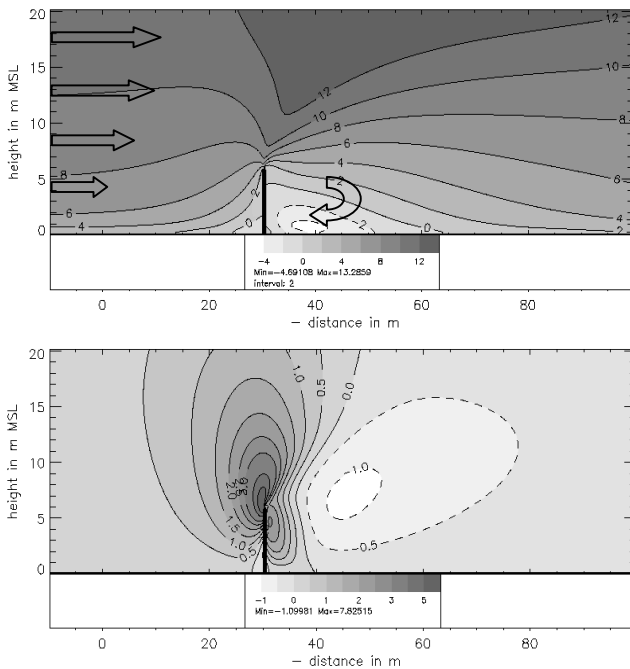


Abb.2: Beispiel eines durch die Wand gestörten Windfeldes (Isotachen in m/s, $u_g = 10$ m/s, oben horizontale Komponente u , unten vertikale Komponente w , gestrichelt < 0).

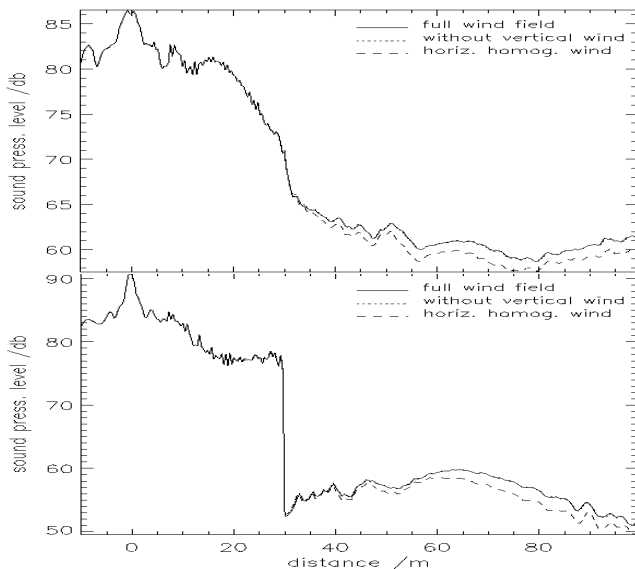


Abb.3: Horizontal-Schnitt durch die berechneten Schallfelder (oben 6m Höhe, unten 3,2m Höhe, $u_g = 4$ m/s, 250-Hz Oktavband, Angaben in dB re 20 μ Pa).

Gezeigt werden beispielhaft nur die Fälle für $u_g = 4$ m/s und 250-Hz Oktavband (Abb. 3), wo die Abweichungen relativ gering sind, sowie für $u_g = 14$ m/s und 1000-Hz Oktavband (Abb. 4), wo die Abweichungen relativ stark sind. Die Abweichungen sind eine Abschätzung für den Fehler bei vereinfachter Betrachtung der Windfelder.

Diskussion

Die Berechnungen mit horizontal homogener Atmosphäre führen zu relativ starken Abweichungen von bis zu 6 dB. Die Berechnungen unter Vernachlässigung der vertikalen Winde (aber horizontal inhomogen) führen hingegen nur zu geringen Abweichungen. Im ersten Fall (Abb. 3) sind sie über weite Bereiche $< 0,2$ dB (direkt hinter der Wand $< 0,4$ dB), im zweiten Fall (Abb. 4) $< 0,5$ dB (direkt hinter der Wand $< 1,3$ dB).

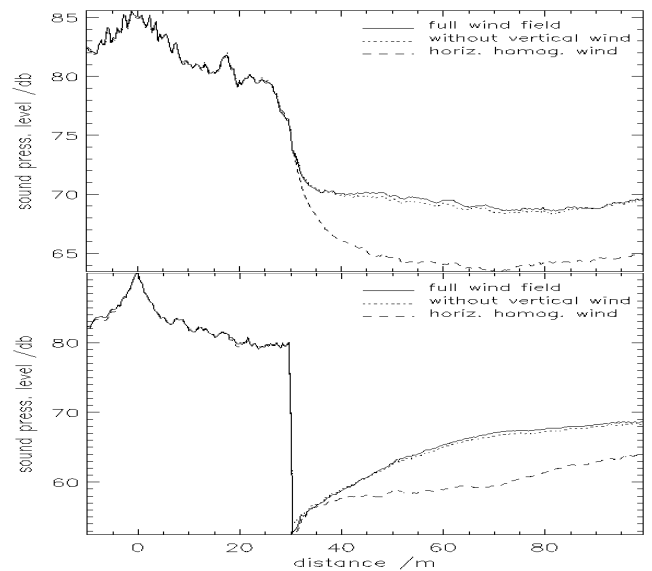


Abb.4: Horizontal Schnitt durch die berechneten Schallfelder (oben 6m Höhe, unten 3,2m Höhe, $u_g = 14$ m/s, 1000-Hz Oktavband, Angaben in dB re 20 μ Pa).

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vernachlässigung der vertikalen Windkomponenten in den untersuchten Beispielen keine signifikanten Fehler erzeugt. Trotz relativ starker vertikaler Winde (hier bis zu ca. 9 m/s) haben sie offensichtlich kaum Einfluss auf die Schallausbreitung. Eine Ursache hierfür könnten der kleine räumliche Anteil und die damit kurze „Wirkstrecke“ sein.

In einer ähnlichen Studie mit einem Lagrange-Partikel-Modell über Entfernungen von bis zu 500 m zeigt Heimann, dass eine alleinige Betrachtung der Windgeschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung (effektive Schallgeschwindigkeit) zu Abweichungen von 1 – 2 dB führt.⁶

- ¹ D. Heimann, G. Gross, "Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley", *Appl. Acoust.* **56**, 73-100 (1999).
- ² L.R. Hole, H.M. Mohr, "Modeling of sound propagation in the atmospheric boundary layer: Application of the MIUU mesoscale model", *J. Geophys. Res. D* **104**, 11891-11901 (1999).
- ³ M. West, Y. Lam, "Prediction of sound fields in the presence of terrain features which produce a range dependent meteorology using the generalised terrain parabolic equation (GT-PE) model", *Proceed. Internoise*, 2/943 (2000).
E. M. Salomons, K. B. Rasmussen, "Numerical computation of sound propagation over a noise screen based on an analytic approximation of the wind speed field", *Appl. Acoust.* **60**, 327-341 (2000).
- ⁴ R. Blumrich, D. Heimann, "An Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects", DLR-Inst. f. Physik d. Atmosphäre, Report No. 145, ISSN 0943-4471. Submitted to *J. Acoust. Soc. Am.*
- ⁵ E. M. Salomons, "Reduction of the performance of a noise screen due to screen-induced wind-speed gradients. Numerical computations and wind-tunnel experiments", *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 2287-2293 (1999).
- ⁶ D. Heimann, "Modeling the propagation of sound over irregular terrain", Long-Range Sound Propagation Symposium, The Hague, 14-15 September 2000.