

Astrid Ziemann

Vom Humboldt-Effekt bis zu Fernsondierungsverfahren – Schallausbreitung in der Atmosphäre

1. Historische Entwicklung der Atmosphärenakustik

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ausbreitung und Streuung von Schallwellen in turbulenten Medien sind Ausgangspunkt für die modernen akustischen Fernmessverfahren in der Atmosphäre.

Bereits um 500 v.u.Z. begannen mit Pythagoras und seinen Untersuchungen zu schwingenden Saiten und der Fortpflanzung der Vibrationen in der Luft erste wissenschaftliche Analysen zur Akustik. Als „Vater der Akustik“ wird oft der französische Naturphilosoph Marin Mersenne bezeichnet, der um 1630 erste Messungen der Schallgeschwindigkeit bei einem Kanonenschuss vornahm und ebenfalls durch Experimente mit schwingenden Saiten eine Quantifizierung der Tonhöhe (Darstellung als Frequenz) ableitete. Die Beschreibung der mathematischen Theorie der Schallausbreitung begann mit Isaac Newton. Dessen Werk „Principia“ interpretierte 1686 Schall als Druckpulse, die sich durch benachbarte Fluid-Partikel ausbreiten. Newtons Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft scheiterte, da er eine isotherme Schallausbreitung annahm. Erst über hundert Jahre später erkannte Laplace im Jahr 1816, dass bei der Ausbreitung von Schall adiabatische Zustandsänderungen auftreten und leitete daraus die richtige Schallgeschwindigkeit für Luft ab. Substantielle Fortschritte bei der theoretischen Beschreibung von Schallwellen brachten im 18. Jahrhundert die Arbeiten von Euler, Lagrange und d’Alembert. So publizierte Euler im Jahr 1759 eine eindimensionale Wellengleichung für die Schallausbreitung, der bald eine dreidimensionale Gleichung folgte. Diese Gleichungen bilden den Ausgangspunkt für die Entwicklung der theoretischen Beschreibung der Schallausbreitung bis in die heutige Zeit (siehe auch Pierce, 1989¹).

1 Pierce, A.D., 1989: *Acoustics. An Introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America, New York.

Der Einfluss des Windes auf die Schallausbreitung ist seit dem Altertum bekannt. Die Vergrößerung der Hörbarkeitszone in der Mitwindrichtung und ihre Verringerung in der Gegenwindrichtung wurde jedoch erst in den ersten experimentellen Untersuchungen zur Schallausbreitung in der Atmosphäre im 19. Jahrhundert bestätigt, u.a. von Delaroché und Arago. Die korrekte qualitative Erklärung dieses Phänomens wurde durch Stokes 1857 geliefert. Stokes erkannte, dass der Wind mit der Höhe zunimmt und dass diese Zunahme bei einer Schallausbreitung in Gegenwindrichtung zu einer Aufwärtskrümmung der Schallstrahlen führt. Infolgedessen befindet sich ein Beobachter in Gegenwindrichtung bezüglich der Schallausbreitungsrichtung in einer Schallschattenzone. Der entgegengesetzte Effekt tritt in der Mitwindrichtung auf, wenn die Schallstrahlen in Richtung der Erdoberfläche gekrümmt werden. In diesem Fall kann ein Beobachter den Schall noch über eine größere Entfernung von der Schallquelle wahrnehmen. Neben dem richtungsabhängigen Windeinfluss wirkt sich die vertikale Temperaturverteilung auf die Schallausbreitung aus. Auch in diesem Fall war seit dem Altertum die Erscheinung bekannt, dass eine natürliche Schallquelle am Tage weniger weit zu hören ist als in der Nacht. Erst Alexander von Humboldt gelang eine qualitative Erklärung der später als „Humboldt-Effekt“ bezeichneten tagesperiodischen Variation der Schallintensität, die auch in einer Arbeit des Physikers und Geowissenschaftlers Hans Ertel (1955²) sowie in der jüngeren Vergangenheit mit einer audio-visuellen Installation (Velasco, 2000³) gewürdigt wurde. Humboldt beobachtete auf seinen Reisen zu Beginn des 19. Jahrhunderts, dass das „Gebrüll der Vulkane Cotopaxi und Guacamayo“ sowie das Rauschen der großen Wasserfälle des Orinoko in der Nacht dreimal so laut waren wie am Tage. Ganz richtig erläuterte Humboldt seine Beobachtungen in einem Vortrag vor der Akademie der Wissenschaften in Paris mit den unterschiedlichen Temperaturverhältnissen des Bodens und der Luft am Tage und in der Nacht. Die „nächtliche Verstärkung des Schalls“ wird durch eine „größere nächtliche Homogenisierung“ der Atmosphäre bedingt. Neben diesem Effekt der verringerten Schallstreuung an Temperaturinhomogenitäten in der nächtlichen atmosphärischen Grenzschicht ist insbesondere die Zunahme der Lufttemperatur mit der Höhe für die größere Schallintensität in Bodennähe verantwort-

- 2 Ertel, H., 1955: Ein Problem der meteorologischen Akustik (Die tagesperiodische Variation der Schallintensität). In: Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Klasse für Mathematik, Physik und Technik, Nr. 2.
- 3 Velasco, D., 2000: Island landscapes: Following in Humboldt's footsteps through the acoustic spaces of the tropics. *Leonardo Music Journal* 10, 21–24.

lich. Auf experimentellem Wege wies Reynolds 1874 diesen Zusammenhang zwischen Temperaturprofil und Schallstrahlenverlauf nach und konnte damit Humboldts Beobachtungen und Erkenntnisse bestätigen.

Rayleigh⁴ leitete die erste mathematische Beschreibung der Schallausbreitung in bewegten Medien ab und formulierte das Refraktionsgesetz für die Normale der Schallwellenfront in einer geschichteten Atmosphäre. Dieses Refraktionsgesetz benutzte Rayleigh auch, um die Richtungsänderungen des Schallstrahls in der bewegten Atmosphäre zu beschreiben. Die hierbei getroffene Annahme Rayleighs, eine Gleichsetzung der Richtungen des Schallstrahls und der Normalen zur Wellenfront, wurde jedoch bereits 1901 durch Barton widerlegt. Inzwischen existieren verschiedene Arbeiten bzw. Modelle, die ein spezielles Refraktionsgesetz für den Schallstrahl in einem bewegten, geschichteten Medium anwenden (z.B. Ostashev, 1997⁵; Ziemann, 2002⁶).

Zu den Pionieren bei der Untersuchung der Auswirkungen einer turbulenten Atmosphäre auf die Schallausbreitung zählt im 20. Jahrhundert der russische Akustiker Krasilnikov. Wichtige Arbeiten Krasilnikovs von 1945 bis 1950 beschäftigten sich u.a. mit der quantitativen Beschreibung von Schallfluktuationen in einer turbulenten Atmosphäre. Krasilnikov verwendete dafür das „Kolmogorov-Obukhov 2/3-Gesetz“ zur Darstellung der turbulenten Fluktuationen und lieferte damit den ersten Beweis für die Kolmogorov-Obukhov-Theorie. Diese grundlegenden Untersuchungen Krasilnikovs legten das Fundament für die bekannten Monographien von Tatarskii zur Beschreibung der Wellenausbreitung in turbulenten Medien zu Beginn der 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts. In dieser Zeit wurden auch erstmals experimentelle Untersuchungen zur Schallstreuung in der Atmosphäre vorgenommen, auf welche später die Entwicklung des SODAR (Sonic Detection and Ranging) als einer modernen akustischen Fernsondierungsmethode folgte. Mit einem SODAR können Informationen zur vertikalen Struktur der atmosphärischen Grenzschicht, insbesondere zum Windprofil und zur Höhe von Temperaturinversionen, gewonnen werden. Detaillierte Ausführungen zur Entwicklung des SODAR sind z.B. der Arbeit von Kallistratova (2000⁷) zu entnehmen.

4 Rayleigh, Lord, 1945: The theory of sound. Dover, New York.

5 Ostashev, V.E., 1997: Acoustics in moving inhomogeneous media. E & FN Spon, London.

6 Ziemann, A., 2002: Zum Einfluss vertikaler Gradienten meteorologischer Größen auf die Laufzeit von akustischen Signalen zwischen Schallquellen und Schallempfängern in der bodennahen Atmosphäre. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig 26, 31–42.

7 Kallistratova, M.A., 2000: Propagation and scattering of acoustic waves in the turbulent atmosphere. Proc. 10th ISARS, Auckland, New Zealand, 7–12.

2. Aktuelle Entwicklungslinien in der akustischen Modellierung und Fernsondierung

Für die Untersuchung des Atmosphäreneinflusses auf die Schallausbreitung wurden und werden verschiedene analytische und numerische Modelle entwickelt. Dafür bieten sich je nach der Aufgabenstellung und den vorgegebenen Randbedingungen verschiedene Arten von Modellen an. Einerseits können die Modelle direkt auf den Wellengleichungen beruhen und diese numerisch lösen. Andererseits kann die Schallausbreitung entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Akustik simuliert werden (z.B. Salomons, 2001⁸).

Wellenmodelle basieren meist auf der Lösung der Helmholtz-Gleichung, z.B. mit Hilfe der FFP(fast-field program)-Technik, der Wellenfeldextrapolations- oder der parabolischen Gleichungsmethode. Ein Nachteil dieser Modellklasse ist jedoch der relativ hohe Rechenzeitbedarf.

Besonders häufig werden Schallstrahlenmodelle wegen ihrer anschaulichen Darstellung der Schallausbreitung in der Atmosphäre anhand von Schallstrahlenverläufen angewendet. Die Ausbreitung des Schalls kann mit Schallstrahlen beschrieben werden, wenn kleine Wellenlängen im Vergleich zu den Ausmaßen des Untersuchungsobjektes bzw. große Wellenlängen gegenüber dem Gradienten des Refraktionsindex auftreten. Diese Anforderung beschränkt die Anwendbarkeit von Schallstrahlenmodellen auf den höherfrequenten Bereich des Schallwellenspektrums bzw. auf Atmosphärenstrukturen mit relativ geringen Temperatur- und Windgradienten. Trotz dieser Einschränkungen werden Schallstrahlenmodelle nach wie vor entwickelt und bieten besonders bei praxisorientierten Anwendungen große Vorteile wegen ihrer leichten Handhabbarkeit und des geringen Rechenzeitverbrauchs (z.B. Attenborough et al., 1995⁹).

Schallstrahlenmodelle werden momentan z.B. zur Untersuchung des Atmosphäreneinflusses auf die Schallausbreitung im Freien bei der Vereinheitlichung der europäischen Richtlinien zum Lärmschutz genutzt. Bisher sind entsprechende Schallausbreitungsrechnungen nach der DIN ISO 9613-2 (1999¹⁰) durchzuführen, wobei der Atmosphäreneinfluss hauptsächlich

8 Salomons, E.M., 2001: Computational atmospheric acoustics, Kluwer Academic Publishers.

9 Attenborough, K., Taherzadeh, S., Bass, H.E., Di, X., Raspet, R., Becker, G.R., Güdesen, A., Chrestman, A., Daigle, G.A., L'Espérance, A., Gabillet, Y., Gilbert, K.E., Li, Y.L., White, M.J., Naz, P., Noble, J.M., van Hoof und H.A.J.M., 1995: Benchmark cases for outdoor sound propagation models. *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 173–191.

10 DIN ISO 9613-2, 1999–10, Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Beuth-Verlag.

durch die Schallabsorption beschrieben wird. Modellergebnisse und Messungen zeigen jedoch Abweichungen von dieser DIN Norm, die insbesondere darauf zurückzuführen sind, dass die Vertikalprofile von Temperatur und Wind (Richtung und Betrag) in der Schallausbreitungsberechnung unberücksichtigt bleiben. Durch die gekoppelte Wirkung von Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsprofilen auf die Schallimmission an einem Ort muss dementsprechend eine größere Zahl an Atmosphärenzuständen untersucht werden, um parametrisierte Beziehungen für die Berücksichtigung des Atmosphärenzustandes in den künftigen Richtlinien abzuleiten. Solche Studien können nur mit einem Schallmodell mit geringer Rechenzeit durchgeführt werden. Hierfür bietet sich z.B. das Schallstrahlenmodell SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing; Ziemann, 2004¹¹) an. Dieses Modell berücksichtigt einerseits den Einfluss einer geschichteten Atmosphäre auf die Schallausbreitung (siehe Abb. 1) und ist andererseits auch operationell für die Beantwortung von Lärmschutzfragen einsetzbar.

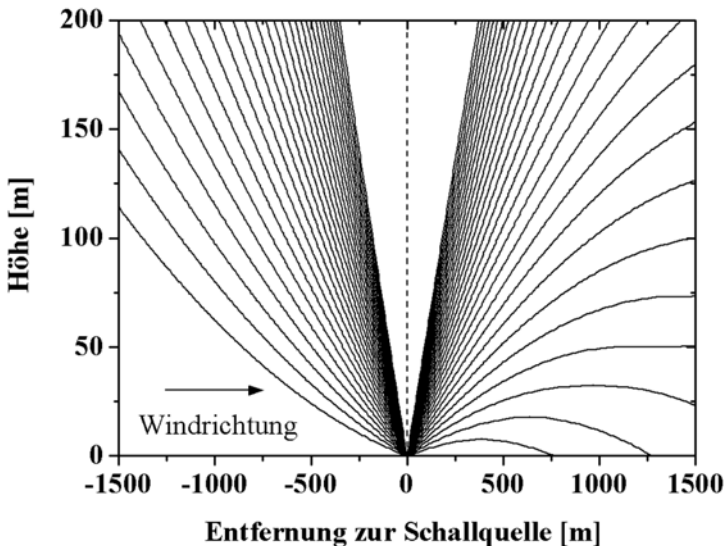


Abb. 1: Ausgewählte Schallstrahlenverläufe in Mit- und Gegenwindrichtung für eine Atmosphäre mit Wind- und Temperaturzunahme (Bodeninversion) mit zunehmender Höhe über einem schallabsorbierenden Boden.

11 Ziemann, A. und Balogh, K., 2004: Schallimmissionsprognose über einer schallharten Oberfläche. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig 34, 59–70.

Neben diesen Modellentwicklungen werden auch die bereits erwähnten akustischen Fernsondierungsverfahren weiterentwickelt. Akustische Fernmessverfahren, z.B. das SODAR, wenden aktiv ausgesendete Schallwellen und ihre Wechselwirkung mit der Atmosphäre zur Sondierung an. Hierbei wird die bekannte Tatsache genutzt, dass sich die raum-zeitlich variablen meteorologischen Größen auf verschiedene Schallausbreitungsparameter auswirken.

Das SODAR ist ein vertikales Sondierungsverfahren und wird genutzt, um die höhenabhängige Atmosphärenstruktur zu untersuchen. Für die Bereitstellung von Flächen- bzw. Volumenmittelwerten meteorologischer Größen wird jedoch ein eher horizontal sondierendes Fernmessverfahren benötigt. Dieses Verfahren wurde aus der Kombination einer tomographischen Aufzeichnung von Schallausbreitungsparametern mit einem speziellen Auswertungsalgorithmus in der akustischen Laufzeittomographie gefunden.

Erste theoretische Arbeiten auf dem Gebiet der Tomographie wurden von dem Mathematiker Radon¹² bereits 1917 publiziert. Die Methoden, die unter dem Begriff Tomographie zusammengefasst werden können, basieren größtenteils auf der Idee, dass ein gemessener Datensatz aus Linienintegralen einer physikalischen Größe, den sogenannten Projektionen, aufgebaut ist. Das Ziel der tomographischen Invertierungsmethoden besteht in der Rekonstruktion eines Modells dieser Untersuchungsgröße, so dass die mit dem Modell projizierten Daten möglichst gut mit den Messungen übereinstimmen. Als Messschemata mit einem besonderen Analysealgorithmus werden tomographische Verfahren inzwischen seit über zwanzig Jahren in Medizin und Geophysik nahezu routinemäßig genutzt. Für verschiedene Untersuchungen der bodennahen Atmosphäre wird die akustische Laufzeittomographie jedoch erst seit wenigen Jahren angewendet (z.B. Wilson und Thomson, 1994¹³).

Werden mehrere Schallausbreitungsstrecken in einem Gelände aufgebaut (siehe Abb. 2), dann können über die tomographische Auswertung aller aufgezeichneten Schallparameter zwischen verschiedenen Sende- und Empfangspunkten Informationen über den Zustand der sondierten Luftschicht abgeleitet werden. Die Schallgeschwindigkeit und somit die Schalllaufzeit sind sowohl von der Lufttemperatur als auch vom Windvektor abhängig. Demzufolge liefert die Methode der akustischen Laufzeittomographie, ausge-

12 Radon, J., 1917: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. Ber. Sächs. Akad. Wiss. 69, 262–277.

13 Wilson, D.K. und Thomson, D.W., 1994: Acoustic tomographic monitoring of the atmospheric surface layer. J. Atmosph. Ocean. Technol. 11, 751–769.

hend von Laufzeitmessungen akustischer Signale zwischen Sendern und Empfängern, ein Schnittbild des räumlich aufgelösten Temperatur- und Windfeldes in einer Atmosphärenschicht.

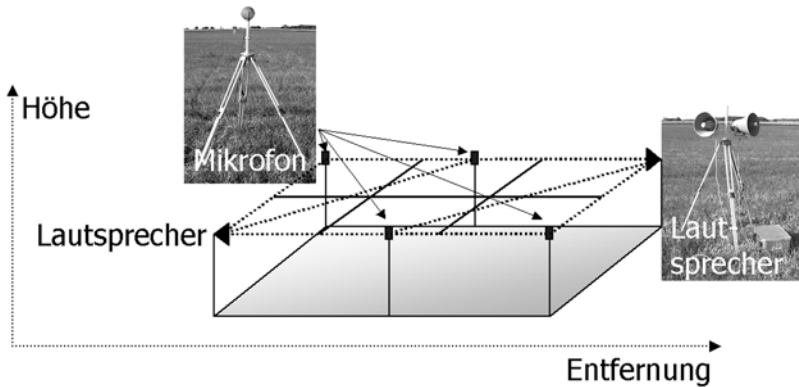


Abb. 2: Schematische Darstellung des Verfahrens der akustischen Laufzeit-tomographie. Über die Aufzeichnung der Laufzeit von Schallwellen entlang der Schallausbreitungswege (gestrichelte Linien) zwischen Druckkammerlautsprechern und Mikrofonen (mit Windschutz) kann auf die meteorologischen Größen Temperatur und Windvektor in räumlich aufgelöster Form (Gitterzellen, durchgezogene Linien) geschlossen werden.

Fotos: Klaus Arnold (Leipzig) während der STINHO-2-Messkampagne 2002.

3. Anwendung und Ergebnisse einer akustischen Laufzeit-tomographie

Das an der Universität Leipzig, Institut für Meteorologie entwickelte Messsystem (Arnold, 2000¹⁴) sowie der tomographische Invertierungsalgorithmus (Ziemann, 2000¹⁵) wurden in den vergangenen Jahren bei mehreren Feldexperimenten eingesetzt (siehe z.B. Ziemann et al., 2001¹⁶). Diese Sensitivitätsstudien haben gezeigt, dass mit dem Verfahren der akustischen Laufzeit-tomographie meteorologische Größen, wie die Lufttemperatur oder die Windgeschwindigkeit, mit einer Genauigkeit bestimmt werden können, die mindestens der anderer Fernerkundungsverfahren entspricht.

14 Arnold, K., 2000: Ein experimentelles Verfahren zur Akustischen Tomographie im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig 18 (Dissertationsschrift).

15 Ziemann, A., 2000: Eine theoretische Studie zur akustischen Tomographie in der atmosphärischen Grenzschicht. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig 19 (Dissertationsschrift).

16 Ziemann, A., Arnold, K. und Raabe, A.: 2001, Acoustic tomography as a method to identify small-scale land surface characteristics. *Acustica* 87, 731–737.

Die akustische Laufzeittomographie bietet u.a. die Möglichkeit, eine natürliche Oberfläche mit einer horizontalen Ausdehnung von bis zu $500 \times 500 \text{m}^2$ in einer Auflösung bis zu einigen Dekametern hinsichtlich des Inhomogenitätsgrades der meteorologischen Felder zu charakterisieren.

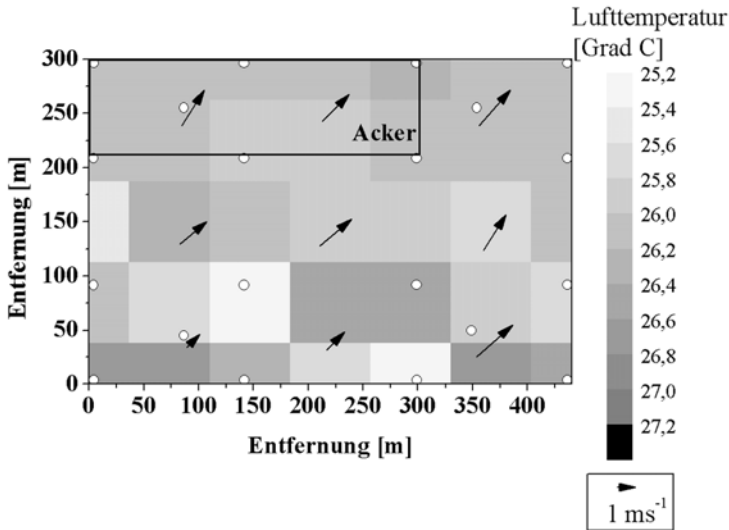


Abb. 3: Tomogramme (horizontale Schnittbilder) des Temperatur (Graustufen)- und Windfeldes (Pfeile) in einer Höhe von 2 m über Grund am 06.07.2002 um 14:10 UTC (10-Minuten-Mittelwerte) auf dem Grenzschichtmessfeld des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg (DWD). Die Kreise markieren die Standorte der 8 Schallsender und 12 Mikrofone.

Inwieweit die für mitteleuropäische Landschaften charakteristische Variabilität von Oberflächeneigenschaften (z.B. Vegetations- und Bodenarten) unterschiedlicher Skalenbereiche in den Energietransportgrößen festgestellt werden kann und damit für Wetter- und Klimamodelle parametrisiert werden muss, ist zur Zeit noch weitgehend ungeklärt. Im Rahmen des AFO-2000-Verbundprojektes VERTIKO (Vertikaltransporte von Energie und Spurenstoffen an Ankerstationen und ihre räumliche/zeitliche Extrapolation unter komplexen natürlichen Bedingungen) wurde zur Untersuchung dieser Fragestellung die Messkampagne STINHO-2 (Struktur des turbulenten Transports über inhomogener Unterlage) auf dem Gelände des Grenzschichtmessfeldes Falkenberg (Meteorologisches Observatorium Lindenberg, DWD) durchgeführt. Das Messfeld der akustischen Tomographie hatte eine Ausdehnung von $300 \times 440 \text{m}^2$ und erstreckte sich hauptsächlich über einer Grasfläche und nur

zu einem geringen Teil über einer Ackerfläche. Die in der Abb. 3 dargestellten Ergebnisse zeigen die relativ geringen Auswirkungen der kleinräumigen Oberflächenheterogenität auf das Temperatur- und Windregime in 2 m Höhe unter den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen (Wind aus südwestlichen Richtungen) bei gleichzeitig großen räumlichen Unterschieden in den thermischen Unterlageneigenschaften (Oberflächentemperatur) und damit verbundenen Differenzen der turbulenten fühlbaren Wärmeflüsse.

Mit Hilfe dieser flächenhaften Informationen aus den Tomographiemessungen können Aussagen zur räumlichen Repräsentativität von Punktmessungen der Energietransportgrößen über heterogenen Oberflächen getroffen werden. Darüber hinaus liefert die tomographische Methode Vergleichsdaten zu den Ausgabewerten mikroskaliger numerischer Atmosphärenmodelle, z.B. Large-Eddy Simulationsmodelle (siehe Weinbrecht et al., 2004¹⁷).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand verschiedener Beispiele aus Modellierung (siehe Abb. 2) und Messung (siehe Abb. 3) wurde gezeigt, welchen großen Einfluss Inhomogenitäten in der Atmosphärenstruktur auf die Schallausbreitung haben. Dieser Zusammenhang zwischen Atmosphäreneigenschaften und Schallfeldgrößen wurde bereits von Humboldt beobachtet sowie qualitativ erläutert und wird seit ca. 40 Jahren für die akustische Fernsondierung der bodennahen Atmosphäre genutzt. Solche Verfahren wie SODAR und akustische Laufzeitomographie haben gegenüber direkten Messverfahren den Vorteil, dass sie die Atmosphäre ohne eine selbst verursachte Störung des Untersuchungsobjektes sondieren können. Darüber hinaus sind solche Fernsondierungsverfahren auch über schwierig zugänglichen Gebieten einsetzbar (z.B. Seen). Tomographische Messmethoden können gegenüber konventionellen Punktmessungen als vorteilhaft charakterisiert werden, da sie eine nahezu synoptische Übersicht des gesuchten Parameters für ein größeres Messfeld liefern und damit eine größere räumliche Repräsentativität gerade für ein inhomogenes Gelände bieten.

Aktuelle Fragestellungen bei der Modellierung bzw. experimentellen Untersuchung der bodennahen Atmosphäre, die durch den Einsatz von SODAR und akustischer Laufzeitomographie gelöst werden können, sind u.a. die As-

17 Weinbrecht, S., Raasch, S., Ziemann, A., Arnold, K. und Raabe, A., 2004: Comparison of large-eddy simulation data with spatially averaged measurements obtained by acoustic tomography – presuppositions and first results. *Boundary-Layer Meteorol.* 111, 441–465.

simulation von Messdaten in numerische Atmosphärenmodelle sowie die raum-zeitliche Variabilität der Bodenschicht bzw. atmosphärischen Grenzschicht über einer inhomogenen Oberfläche.

Zukünftig sollten die Messdaten der akustischen Fernsondierungen außerdem dazu genutzt werden, um Zusammenhänge zwischen Atmosphären- und Schallausbreitungsparametern umfassender zu beschreiben. Ein Problem stellt hierbei die nächtliche Grenzschicht mit intermittenter, inhomogener und anisotroper Turbulenz dar, für welche die bisher entwickelten Turbulenzmodelle (z.B. Kolmogorov-Obukhov) und Schallstreuungsmodelle nicht anwendbar sind. Gerade die Eigenschaften der nächtlichen Atmosphäre als guter Schallleiter erfordern jedoch entsprechende Untersuchungen und die Umsetzung der erzielten Ergebnisse in verbesserten Richtlinien zum Lärmschutz.

Danksagung

Hiermit danke ich meinen Kollegen vom Leipziger Institut für Meteorologie, insbesondere Klaus Arnold und Armin Raabe, für die Unterstützung bei der Bereitstellung und Bearbeitung der experimentellen Daten. Die Untersuchungen mit der akustischen Laufzeitomographie wurden vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung im Rahmen von AFO2000 (Verbund-projekt VERTIKO, Projektnummer: 07 ATF 37) unterstützt.