

# **Auswirkungen unterschiedlicher Schallausbreitungsmodelle auf die Lärmprognose**

**Astrid Ziemann**

## **Zusammenfassung:**

Eine wichtige Aufgabe des Umweltschutzes besteht in der Überwachung von Geräuschimmissionen. Die Grenzen der bisher verwendeten, operationellen Verfahren zeigen sich vor allem darin, dass der Einfluss der Atmosphäre auf die Schallausbreitung nur unzureichend berücksichtigt wird. In dieser Studie wird deshalb ein Modell aus dem Bereich der geometrischen Akustik zur Einbeziehung des Atmosphärenzustandes in die Schallprognose vorgestellt. Das Modell SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing) bestimmt die durch Schallstrahlenrefraktion modifizierten Schallausbreitungsbedingungen für ein Gebiet entsprechend der vorgegebenen thermischen Atmosphärenschichtung und den Vertikalprofilen von Windgeschwindigkeit und –richtung. Ein wichtiger Schritt bei der Weiterentwicklung von SMART war die Implementierung eines Refraktionsgesetzes, welches die Schallstrahlenbrechung an Schichtgrenzen in einem zweidimensional geschichteten, bewegten Medium exakt beschreibt. Die Unterschiede in der Schallstrahlenberechnung zwischen diesem Modell und früheren Simulationen machen sich insbesondere für Entfernungen von der Schallquelle zwischen 1 und 3 km bemerkbar. Da in diesem Bereich eine verstärkte Lärmbelastung gegenüber vorangegangenen Simulationen auftritt, wird die Verwendung des physikalisch exakten Refraktionsgesetzes für eine bewegte Atmosphäre im Rahmen von Lärmschutzuntersuchungen empfohlen.

## **Summary:**

An important problem regarding the environmental protection is the immission control of noise. The applicability of currently operational methods is limited because the influence of the atmosphere on the sound propagation is only insufficiently taken into account. Thus, a geometrical sound propagation model is presented in this study to include the state of the atmosphere into the forecast of noise immission.

The model SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing) calculates the modified sound propagation conditions due to sound-ray refraction for an area according to the given thermal stratification of the atmosphere and the vertical profiles of wind speed and wind direction. An important step during the further development of the model SMART was the implementation of a refraction law, that is exactly valid for the sound-ray refraction at the boundary between two layers with different properties inside a two-dimensional, stratified moving medium. Maximal differences between simulations with this model and former investigations occur at a distance of 1-3 km away from the sound source. A stronger noise immission is also notable in this area. Because of this result it is recommended to use the presented physically more exact refraction law for a moving atmosphere within the scope of noise immission control.

## **1 Einleitung**

Lärm ist eine der größten und gleichzeitig am meisten unterschätzten Umweltbelastungen für den Menschen. Nach einer aktuellen, bundesweiten Umfrage des Umweltbundesamtes (UBA, 2003) unter mehr als 10000 Bürgerinnen und Bürgern fühlen sich mehr als zwei Drittel der

Befragten von Lärm belästigt. Damit besteht ein Bedarf an genauen Lärmprognosen im Rahmen des gesetzlich vorgeschriebenen Umweltschutzes und der Gesundheitsvorsorge.

Die Lärmbelastung an einem Ort ist neben den Eigenschaften der Lärmquelle (z.B. Quellstärke) insbesondere von den Umgebungsbedingungen während der Schallübertragung abhängig. Zu diesen Bedingungen zählen die meteorologische Situation (vertikales Temperatur- und Windprofil, Turbulenz) und die Eigenschaften des Untergrundes (Bodeneigenschaften, Bewuchs, Hindernisse). Die Grenzen der existierenden Richtlinien für die Einbeziehung dieser Phänomene in die Schallausbreitungsberechnung (TA Lärm, 1998; VDI 2714, 1988) zeigen sich vor allem darin, dass die atmosphärischen Einflüsse auf die Schallausbreitung nur unvollständig berücksichtigt werden (Kühner, 1993, 1997). Insbesondere werden die Auswirkungen von vertikalen Temperatur- und Windgradienten auf die Refraktion von Schallstrahlen und die damit verbundene Änderung der Lärmimmission nicht in die Berechnungen einbezogen. Modellsimulationen, welche eine Schallstrahlenrefraktion bei der Berechnung der Schalldruckpegelverteilungen berücksichtigen, weisen jedoch deutlich darauf hin, dass Temperatur- und Windprofil einen großen Einfluss auf die Schallausbreitung und die Lärmimmission an einem Ort ausüben (Turton et al., 1988a, b).

Deshalb wurde in den vergangenen Jahren ein Modell entwickelt (Ziemann, 2000; Raabe et al., 1998, 2000), das einerseits diesen wichtigen Aspekt bei der Schallausbreitung berücksichtigt und andererseits auch operationell für die Beantwortung von Lärmschutzfragen einsetzbar ist. Eine Weiterentwicklung dieses Modells besteht in der Anwendung eines modifizierten Refraktionsgesetzes für die Schallstrahlenberechnung, um den Einfluss des Windvektors physikalisch exakt zu erfassen. Die Analyse der Auswirkungen dieser veränderten Schallstrahlsimulation auf die Lärmprognose im Vergleich zu Studien mit einem Brechungsgesetz, welches den Windeinfluss nur approximiert (z.B. Modell LARKHILL, Turton et al., 1988a, b), ist Inhalt der vorliegenden Studie.

Im folgenden Kapitel wird das Schallstrahlenmodell SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing) mit seinen Eigenschaften und Anwendungsgrenzen vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt die durchgeführten Rechnungen zur Schallausbreitung unter verschiedensten meteorologischen Bedingungen mit dem verbesserten Refraktionsgesetz. In den folgenden beiden Kapiteln werden die mit diesen Berechnungen durchgeführten Lärmprognosen vorgestellt und die Unterschiede zu früheren Ergebnissen diskutiert.

## **2 Schallstrahlenmodell SMART**

### **2.1 Modelleigenschaften**

Für die vorliegende Studie wird das zweidimensionale Schallstrahlenmodell SMART angewendet (siehe auch Ziemann, 2000, 2002; Ziemann et al., 2001). Ausgehend von einer Schallquelle, von der ein Schallstrahlenbündel ausgesendet wird, kann unter Anwendung des Refraktionsgesetzes der zurückgelegte Schallweg verfolgt werden.

Die vereinfachende Annahme einer geschichteten Atmosphäre führt zu einer vertikalen Einteilung der Modell-Atmosphäre in verschiedene Schichten. Unter der Voraussetzung, dass die Atmosphärenschichten nur eine sehr geringe vertikale Ausdehnung (ca. 10-50 cm) besitzen, können die meteorologischen Größen als konstant innerhalb dieser Schichten angesehen werden. Der Schallstrahl wird deshalb als Gerade innerhalb dieser Schicht bis zur Refraktion an der nächsten Schichtgrenze approximiert.

Die Schallstrahlenausbreitung mit großen Emissionswinkeln (in Bezug auf das Einfallslot des Schallstrahls) ist sehr sensitiv auf die meteorologischen Bedingungen (siehe Raabe et al. 1998; Ziemann, 2000). Bei einer Schallstrahlenmodellierung ist der Winkelbereich um 90° (Horizontalabstrahlung) deshalb besonders stark aufzulösen, da bereits kleinste Änderungen

der Emissionswinkelwerte zu großen Änderungen in der Reichweite eines Schallstrahles führen können.

Ein Beispiel für eine Schallstrahlenverfolgung mit unterschiedlichen Temperaturprofilen und einem Windprofil mit Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe bei konstanter Windrichtung ist in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Schallabstrahlung erfolgt sowohl in Windrichtung (Mitwind) als auch in Gegenwindrichtung.

Als Abstrahlwinkel von der Schallquelle (in Erdbodennähe) wurde ein Bereich von  $80^\circ$  bis  $89^\circ$  gewählt. Ein Schallstrahl kann entlang eines Wertes für den Emissionswinkel verfolgt werden.

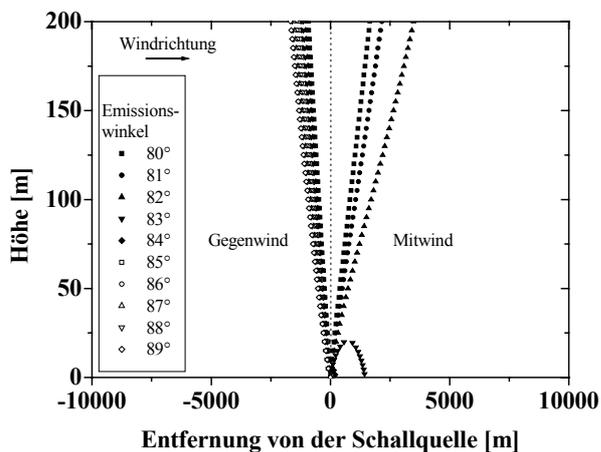


Abb. 1: Schallstrahlenverlauf (Emissionswinkel:  $80^\circ$ ... $89^\circ$ ) für eine Lufttemperaturabnahme um  $1\text{ K}/100\text{ m}$ .

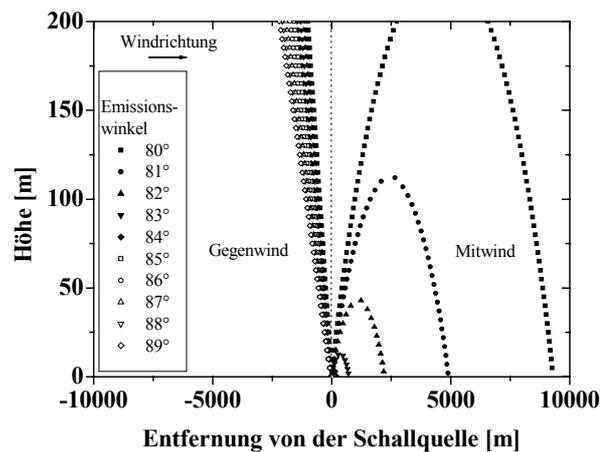


Abb. 2: Schallstrahlenverlauf (Emissionswinkel:  $80^\circ$ ... $89^\circ$ ) für eine Lufttemperaturzunahme um  $1\text{ K}/100\text{ m}$ .

Beim Vergleich der Abbildungen 1 und 2 zeigt sich, dass für die gewählte Kombination aus Temperatur- und Windprofil der Einfluss des vertikalen Windgradienten auf die Schallstrahlenausbreitung gegenüber dem Effekt des vertikalen Temperaturgradienten überwiegt.

Für beide Temperaturprofile entsteht in Gegenwindrichtung (negative Entfernung von der Schallquelle) eine Schallschattenzone, d.h., die Schallstrahlen werden von der Erdoberfläche weg gebrochen. In Mitwindrichtung (positive Entfernung von der Schallquelle) sind etwas größere Unterschiede zwischen Abbildung 1 und 2 zu erkennen. Bei einer Abnahme der Temperatur mit der Höhe werden nur Strahlen mit nahezu horizontalem Abgang von der Schallquelle (Emissionswinkel nahe  $90^\circ$ ) zur Erdoberfläche zurückgebrochen. Bei einer Temperaturzunahme (Inversion) sind diese lärmbegünstigten Zonen wesentlich ausgedehnter. Dieses einfache Beispiel zeigt die Notwendigkeit der gekoppelten Betrachtung von vertikaler Temperatur- und Windschichtung bei der Schallstrahlensimulation. Dieser Umstand wird in den aktuellen Richtlinien zur Schallausbreitungsberechnung (VDI 2714, 1988) bisher jedoch nur unzureichend berücksichtigt.

## 2.2 Weiterentwicklung des Modells

### 2.2.1 Refraktionsgesetz

In einem bewegten Medium stimmen, im Gegensatz zum unbewegten Medium, die Richtungen der Schallenergieausbreitung (Schallstrahlenrichtung) und der Wellenfrontnormalen nicht überein (unterschiedliche Refraktionswinkel). Dementsprechend muss zwischen einem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale und für den Schallstrahl selbst unterschieden werden (siehe Ostashev et al., 2001).

Unter Annahme eines geschichteten Mediums hängen die adiabatische Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Windgeschwindigkeit  $v$  (Komponente in Schallausbreitungsrichtung) nur von der Höhe  $z$  ab.

Für die Refraktion der Wellenfrontnormalen an einer Schichtgrenze zwischen zwei Schichten mit unterschiedlichen Werten für die Laplacesche Schallgeschwindigkeit,  $c_1$  und  $c_2$ , und für die horizontale Windgeschwindigkeit (Komponente in Schallausbreitungsrichtung),  $v_1$  und  $v_2$ , folgt aus dem Refraktionsgesetz von Rayleigh (Rayleigh, 1945) eine Gleichung für den Refraktionswinkel

$$\sin(\theta_2) = \frac{c_2 \sin(\theta_1)}{c_1 + \sin(\theta_1)(v_1 - v_2)}, \quad (1)$$

wobei der Einfallswinkel  $\theta_1$  und der Refraktionswinkel  $\theta_2$  die Winkel zwischen Wellenfrontnormale und Einfallslot auf die Schichtgrenze kennzeichnen. Die Laplacesche Schallgeschwindigkeit  $c$  ist von der Lufttemperatur  $T$  und der spezifischen Luftfeuchte  $q$  sowie der spezifischen Gaskonstanten für trockene Luft  $R_a$  und dem Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen für trockene Luft  $\kappa_a$  abhängig:

$$c = \sqrt{\kappa_a R_a T (1 + 0.513q)}. \quad (2)$$

Ein Refraktionsgesetz der Form (1) wurde z.B. von Gutenberg (1951) und Wöhle (1984) auch als Refraktionsgesetz für Schallstrahlen angewendet. In operationellen Anwendungen zur Lärmprognose (z.B. Müller, 2002) sowie in einer früheren Version des Modells SMART (Raabe et al., 1998; Ziemann et al., 2001) wurde die Approximation, Schallstrahl gleich Wellenfrontnormale, ebenfalls genutzt.

Das exakte Refraktionsgesetz für die Brechung eines Schallstrahls an einer Schichtgrenze in einem zweidimensional geschichteten, bewegten Medium wurde u.a. von Ostashev et al. (2001) abgeleitet (siehe auch Ziemann, 2002). Unter der Annahme einer kleinen Mach-Zahl,  $M = v/c$ , ergibt sich für die Schallstrahlenrefraktion an einer Schichtgrenze zwischen zwei Schichten mit unterschiedlichen Werten für die Laplacesche Schallgeschwindigkeit,  $c_1$  und  $c_2$ , und für die horizontale Windgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung,  $v_1$  und  $v_2$ , eine Gleichung für den Refraktionswinkel  $\alpha_2$ :

$$\sin(\alpha_2) = c_2 \left( \frac{\sin(\alpha_1) - M_1}{c_1} \right) + M_2, \quad (3)$$

mit den Mach-Zahlen  $M_1 = v_1/c_1$  und  $M_2 = v_2/c_2$  und dem Einfallswinkel  $\alpha_1$ , wobei alle Winkel in Richtung der Normalen zum Schallstrahl gemessen werden.

Wenn die meteorologischen Größen innerhalb der beiden Schichten sowie der Einfallswinkel des Schallstrahls auf die Schichtgrenze bekannt sind, kann mit Hilfe dieses Refraktionsgesetzes (3) der exakte Schallstrahlenverlauf in einem zweidimensional geschichteten, bewegten Medium dargestellt werden.

### 2.2.2 Schalldruckpegelberechnung

Da der Schallpegel umgekehrt proportional zum Querschnitt einer der Bahn folgenden Schallstrahlenröhre ist, kann mit Hilfe geometrischer Größen aus der zweidimensionalen Schall-

strahlensimulation eine Berechnung der Schallpegeldämpfung in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle erfolgen.

Unter der Voraussetzung von Energieerhaltung bei der Schallausbreitung wird in einem sich aufweitenden Flächenausschnitt, der durch zwei Schallstrahlen 1 und 2 (siehe Abb. 3) mit unterschiedlichen Emissionswinkeln beschrieben wird, ein und derselbe Betrag an Schallenergie transportiert. Die Änderung des Schallintensitätspegels (Dämpfungspegel) im Immissionsniveau  $z_i$  ist bei konstanter Schallabstrahlung nur vom Verhältnis der Querschnittsflächen (im zweidimensionalen Fall eine Gerade) der Schallröhre in einem Referenzabstand und in einem aktuellen Abstand von der Schallquelle abhängig (Brekhovskikh und Godin, 1992).

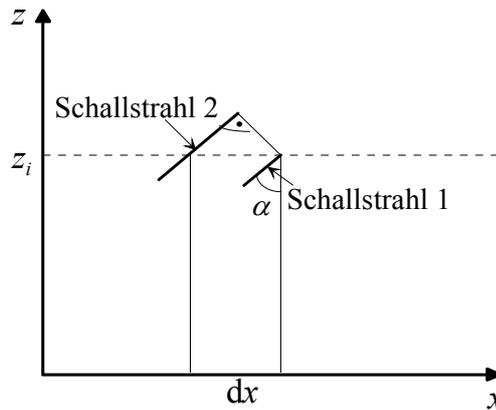


Abb. 3: Geometrie der Schallstrahlausbreitung zur Berechnung der Schallpegeldämpfung.

Die Änderung des Schallintensitätspegels  $I_i$  in Bezug auf einen Referenzpegel  $I_{ref}$  wird bestimmt aus:

$$L_{DI} = -10 \cdot \log\left(\frac{I_i}{I_{ref}}\right) = -10 \cdot \log\left(\frac{\cos\alpha_{ref} dx_{ref}}{\cos\alpha_i dx_i}\right). \quad (4)$$

Hierbei bezeichnen  $I_i$  die Schallintensität im Immissionsniveau,  $\alpha_i$  den Emissionswinkel (maximaler Winkel von beiden betrachteten Strahlen) und  $dx_i$  die horizontale Entfernung zwischen den Schnittpunkten der beiden betrachteten Schallstrahlen mit dem Immissionsniveau  $z_i$  (siehe Abb. 3). Für die Referenzwerte  $*_{ref}$  wird, in Übereinstimmung mit anderen Schallstrahlenmodellen (z.B. LARKHILL, Turton et al., 1988a, b), ein horizontaler Abstand von 1 m von der Schallquelle und außerdem eine ungestörte Schallausbreitung ohne den Einfluss von Vertikalgradienten meteorologischer Größen gewählt.

Die Dämpfungspegel werden nach Gleichung (4) in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle ermittelt und auf vorgegebene horizontale Abstandsintervalle (250 m bis 500 m, 500 m bis 750 m usw.) aufgeteilt. Falls in einem solchen Intervall mehrere Dämpfungswerte gesammelt werden, wird eine logarithmische Mittelung durchgeführt. Als Endergebnis erhält man einen Dämpfungspegelwert pro Abstandsintervall. Im Fall ohne meteorologischen Einfluss wird die bekannte Gesetzmäßigkeit der geometrisch bedingten Schallpegelabnahme um 3 dB bei Entfernungsverdopplung wiedergegeben.

Eine Umrechnung der Intensitätsdämpfung  $L_{DI}$  in eine Schalldruckpegeldämpfung erfolgt mit  $L_{Dp} = 2 \cdot L_{DI}$ .

Eine horizontale (x-y) Schallpegeldämpfungskarte entsteht durch die zweidimensionale (x-z) Berechnung der Schallstrahlen und Schallpegeldämpfungen entlang verschiedener horizontaler Blickrichtungen von der Schallquelle zum Immissionsort.

Bei den Berechnungen des Dämpfungspegels werden am Erdboden reflektierte Schallstrahlen nicht betrachtet, da hierfür die Bodeneigenschaften bekannt sein müssten. Darüber hinaus wurde von Kühner (1993) festgestellt, dass die Zusatzdämpfung für eine weitreichende Schallausbreitung in der Atmosphäre ( $> 2$  km) nicht durch die Interferenz zwischen direktem Strahl und am Erdboden reflektierten Schallstrahl zustande kommt, sondern allein durch die inhomogene Atmosphäre verursacht wird.

## 2.3 Anwendungsgrenzen

Die Ausbreitung von Schallwellen kann mit der Schallstrahlenapproximation beschrieben werden, wenn die Modellvorstellungen der geometrischen Akustik anwendbar sind. Obwohl die Anwendung der Schallstrahlentheorie mit Einschränkungen verbunden ist (z.B. bei der Schallfeldbetrachtung im geometrischen Schallschatten), bietet die geometrische Akustik gegenüber Wellenmodellen folgende Vorteile: Veranschaulichung der Schallausbreitung in der Atmosphäre durch Berechnung von Schallstrahlen und einfache Berücksichtigung von räumlichen Inhomogenitäten in den Atmosphärenparametern durch Anwendung des Refraktionsgesetzes.

Aus der Gleichung zur Beschreibung der Schallwellen im bewegten Medium kann eine Bedingung abgeleitet werden, bis zu welcher Grenzfrequenz  $f$  die Modellvorstellungen der geometrischen Akustik anwendbar sind (siehe Boone und Vermaas, 1991):

$$|\nabla(c(x, y, z) + \mathbf{v}(x, y, z) \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}| \ll 2\pi f . \quad (5)$$

Sowohl die Laplacesche Schallgeschwindigkeit  $c$  (in Abhängigkeit von der Lufttemperatur) als auch der Windvektor  $\mathbf{v}$  ( $\mathbf{n}$  ist der Einheitsvektor normal zum Schallstrahl) dürfen sich in Relation zur Schallfrequenz nur langsam ändern, damit Schallstrahlenmodelle angewendet werden können. Unter der Voraussetzung einer geschichteten Atmosphäre (Wind und Temperatur nur höhenabhängig) ergeben sich für eine vertikale Schallausbreitung die höchsten Grenzfrequenzen und für eine nahezu horizontale Schallausbreitung die geringsten Grenzfrequenzen, die für eine Anwendbarkeit der geometrischen Akustik eingehalten werden müssen. Da die Vertikalprofile der meteorologischen Größen üblicherweise in Bodennähe ihre größten Gradienten aufweisen, ist in diesem Bereich besonders auf die Einhaltung der Bedingung (5) zu achten. Eine Maximalwertabschätzung mit einer starken Temperaturabnahme von ca. 90 K/m in unmittelbarer Bodennähe ergibt z.B. eine Grenzfrequenz von 14 Hz. Unter mittleren Bedingungen am Tage, aber auch in der Nacht, liegen die Grenzfrequenzen jedoch weit unter diesem Wert, insbesondere dann, wenn größere Höhenniveaus (z.B. 2 m Höhe) betrachtet werden. In diesen Fällen ist die Anwendung von Schallstrahlenmodellen möglich. Der Frequenzinhalt des sich im Raum ausbreitenden Schallsignals muss dann für die Schallimmissionsprognose in Abhängigkeit von der Schallstrahlenrefraktion nicht weiter berücksichtigt werden.

## 3 Schallstrahlensimulationen

### 3.1 Datengrundlage

Die meteorologische Beeinflussung der Schallausbreitung, speziell der Schallstrahlenrefraktion, wird durch die vertikalen Gradienten der Temperatur, Luftfeuchte und des Windfeldes bestimmt. Eine Abschätzung zum Einfluss des vertikalen Luftfeuchtegradienten auf den Gradienten der Schallgeschwindigkeit zeigte, dass dieser Einfluss i.A. gegenüber dem von vertikaler Temperaturschichtung und Windscherung vernachlässigbar ist (siehe Ziemann, 2002).

Um die Schallausbreitungsbedingungen für eine Vielzahl meteorologischer Situationen zu berechnen, werden diese in verschiedene Klassen eingeteilt. Als Ergebnis von Sensitivitätsuntersuchungen (siehe Raabe et al., 2000, Ziemann et al., 2002) wurde eine Klasseneinteilung für die Gradienten von Lufttemperatur (5 Klassen), Windrichtung (24 Klassen) und Windgeschwindigkeit (13 Klassen) vorgenommen. Eine weitere Unterteilung erfolgt anhand von 2 Inversionsklassen, welche für die Temperaturprofilklassen 4 und 5 angewendet werden. Durch die Kombination von Temperatur- und Windprofilen entstehen 1551 Profilklassen. Die Schallausbreitungssituationen, die sich mit Hilfe dieser meteorologischen Profilklassen ergeben (siehe auch Raabe et al., 2000; Ziemann et al., 2001), unterscheiden sich signifikant voneinander, so dass die hohe Anzahl an Profilklassen gerechtfertigt ist (Ziemann et al., 2002).

### 3.2 Randbedingungen

Die Berechnungen der Schallstrahlen wurden mit dem Schallstrahlenmodell SMART in einem Modellgebiet mit einem Abstand bis zu 15 km Entfernung von der Schallquelle durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet wurde dabei mit einer horizontalen (radialen) Auflösung von 250 m und einer Winkelauflösung (Azimut) von  $10^\circ$  untersucht (siehe Raabe et al., 2000). Als Emissionsniveau wurde die Erdoberfläche angenommen. Das Immissionsniveau liegt wie bei den vorangegangenen Untersuchungen in einer Höhe von 2 m.

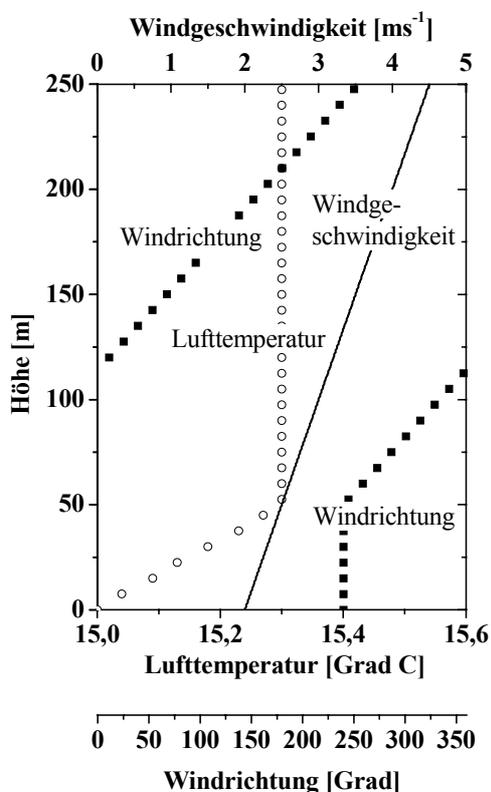


Abb. 4: Temperatur- und Windprofil der Profilkategorie Nr. 784.

Über 2000 Schallstrahlen in einem Emissionswinkelbereich von  $17,8^\circ$  bis  $89,998^\circ$  (zunehmende Schallstrahlendichte mit wachsendem Emissionswinkel) werden in ihrer vertikalen und horizontalen Ausbreitung verfolgt.

Eingangsdaten für die Simulationen waren die im Abschnitt 3.1 vorgestellten Profilklassen (Vertikalprofile von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung), wobei Profile der meteorologischen Größen mit einer Höhenauflösung von 0,5 m verwendet wurden. Ein Beispiel für eine solche Profilkategorie ist in der Abbildung 4 dargestellt. Die Lufttemperatur nimmt bis in eine Höhe von 50 m linear zu und ändert sich in größeren Höhen nicht mehr. Die Windgeschwindigkeit nimmt ebenfalls linear mit der Höhe zu. Außerdem dreht der Wind von südwestlichen über nordöstliche auf südwestliche Richtungen.

### 3.3 Ergebnisse

Die Profile dieser Profilkategorie dienen nun als Eingangsdaten für das Schallmodell SMART. Der Verlauf einiger Schallstrahlen (Emissionswinkel  $61^\circ$  bis  $88^\circ$ ) wird in der Abbildung 5 gezeigt. Der Winkel zwischen Schallausbreitungsrichtung und Windrichtung am Boden beträgt  $0^\circ$ , die Schallausbreitung erfolgt hier also direkt in Mitwindrichtung. Für die Abbildung 5a wurde das Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale (Gleichung 1) und für die Abbildung 5b das Refraktionsgesetz für den Schallstrahl (Gleichung 3) verwendet. Die meisten Schallstrahlen verlaufen für beide Simulationen sehr ähnlich. Nur in dem Bereich zwischen 3 und 5 km Entfernung von der Schallquelle, wo die Strahlen fokussiert werden und

sich teilweise schneiden, sind Unterschiede erkennbar. Dadurch entstehen unterschiedliche Auftreffpunkte der Schallstrahlen in Bodennähe, was in diesen Bereichen wiederum zu unterschiedlichen Lärmimmissionsprognosen führt.

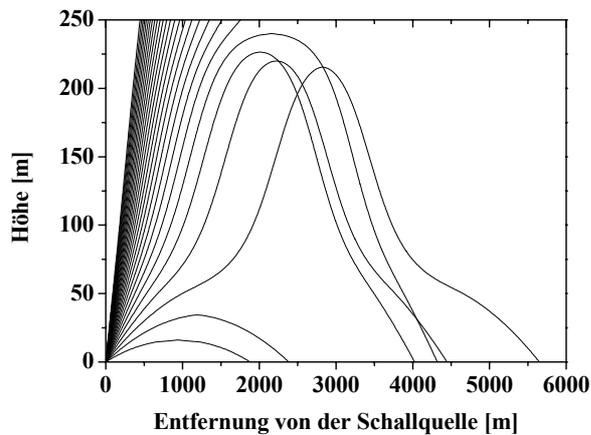


Abb. 5a: Schallstrahlenverlauf (Emissionswinkel:  $61^\circ, 62^\circ, \dots, 89^\circ$ ) berechnet mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale.

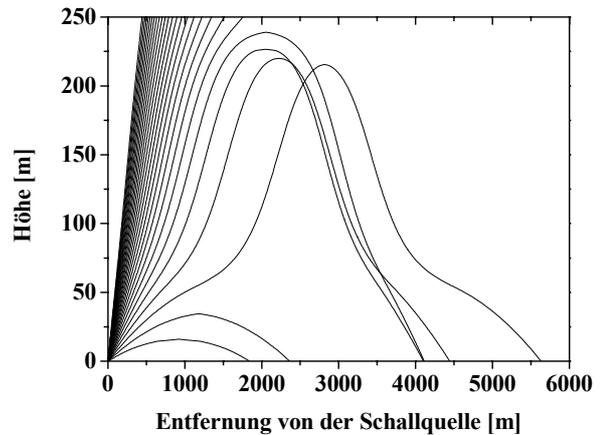


Abb. 5b: Schallstrahlenverlauf (Emissionswinkel:  $61^\circ, 62^\circ, \dots, 89^\circ$ ) berechnet mit dem Refraktionsgesetz für den Schallstrahl.

#### 4 Gegenüberstellung der Lärmprognosen

Ausgehend von den Schallstrahlenberechnungen für die 1551 meteorologischen Eingangsprofile wurden horizontale Schallpegelverteilungen für das Immissionsniveau in 2 m Höhe berechnet (siehe Abschnitt 2.2)

Die Ausgabedaten sind Schalldruckpegeldämpfungswerte infolge der modifizierten Wellendivergenz in Abhängigkeit von der Schallstrahlenrefraktion bis in eine Entfernung von 15 km von der Schallquelle und bezogen auf einen Referenzschalldruckpegel im Abstand von 1 m von der Schallquelle. Sehr hohe Dämpfungswerte kommen vor allem in den Schallschattenzonen zustande, in welche entsprechend der Schallausbreitung nach der geometrischen Akustik kein Schallstrahl eindringt. Hier wurde ein Grenzwert für die Dämpfung von 200 dB festgelegt, da ansonsten ein unendlich hoher Wert berechnet werden würde.

Ein Beispiel für die entsprechende Schalldämpfungsverteilung wird in Abbildung 6 gezeigt. Die meteorologischen Eingangsdaten für diese Dämpfungskarten sind in der Abbildung 4 und die dazugehörigen Schallstrahlenverteilungen in der Abbildung 5 dargestellt.

Diese Dämpfungskarten zeigen ausschließlich den Beitrag der Schallstrahlenrefraktion an, d.h., es wurde die Differenz zwischen einer Dämpfungskarte mit Wellendivergenz und Meteorologieeinfluss und einer Dämpfungskarte ausschließlich mit Wellendivergenz ohne eine refraktierende Atmosphäre gebildet. Die Darstellungen sind allgemein wie folgt zu lesen:

- Werte um Null dB kennzeichnen den fehlenden Einfluss einer Schallstrahlenrefraktion.
- Positive Werte stellen eine verstärkte Dämpfung (geringere Lärmbelastung durch eine Schallschattenzone, helle Flächen) dar.
- Negative Werte stellen eine verringerte Dämpfung (verstärkte Lärmbelastung, dunkle Flächen) des Schalldruckpegels infolge einer refraktierenden Atmosphäre dar.

Unter der Voraussetzung, dass das gesamte Gebiet betrachtet wird, kann eine ähnliche Wiedergabe der Schallausbreitungssituation durch die beiden Schallsimulationen mit den unterschiedlichen Refraktionsgesetzen festgestellt werden. Für verschiedene Bereiche in Mitwindrichtung (positive X-Werte), insbesondere beim Übergang in die geometrischen Schallschattenzonen (Dämpfung  $> 100$  dB), sind jedoch auch größere Unterschiede zwischen den Dämpfungskarten feststellbar.

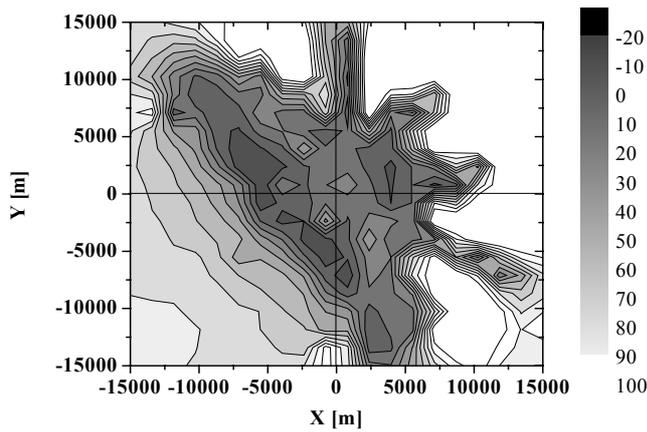


Abb. 6a: Meteorologisch bedingte Schalldruckpegeldämpfung in dB berechnet mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale.

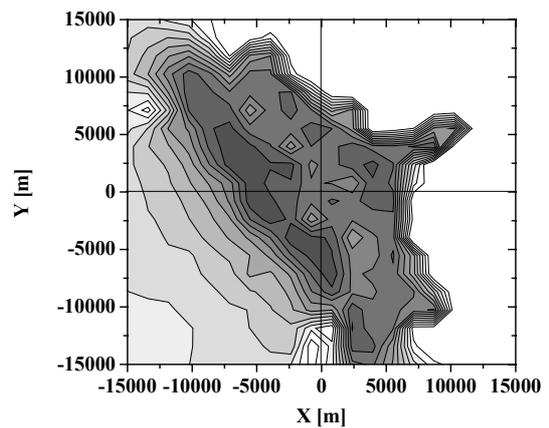


Abb. 6b: Meteorologisch bedingte Schalldruckpegeldämpfung in dB berechnet mit dem Refraktionsgesetz für den Schallstrahl.

Wenn alle Bildpunkte (Gesamtanzahl pro Bild: 2124) der oben dargestellten Dämpfungskarten miteinander verglichen werden, dann beträgt die relative Anzahl veränderter Bildpunkte (Abb. 6b gegenüber Abb. 6a) bei einem Schwellenwert von 5 dB für die Schallpegeldifferenz zwischen den Bildpunkten ca. 30% und bei einem Schwellenwert von 10 dB ca. 22% (siehe Abb. 7). Die prozentualen Anteile an veränderten Bildpunkten für alle anderen 1550 Eingangsprofilklassen liegen unterhalb dieser Werte und sind insbesondere vom Windgradienten abhängig. Bei den Profilklassen ohne einen höhenveränderlichen Wind sind die Dämpfungskarten gleich, da die Refraktionsgesetze (1 und 3) in diesem Fall ineinander übergehen.

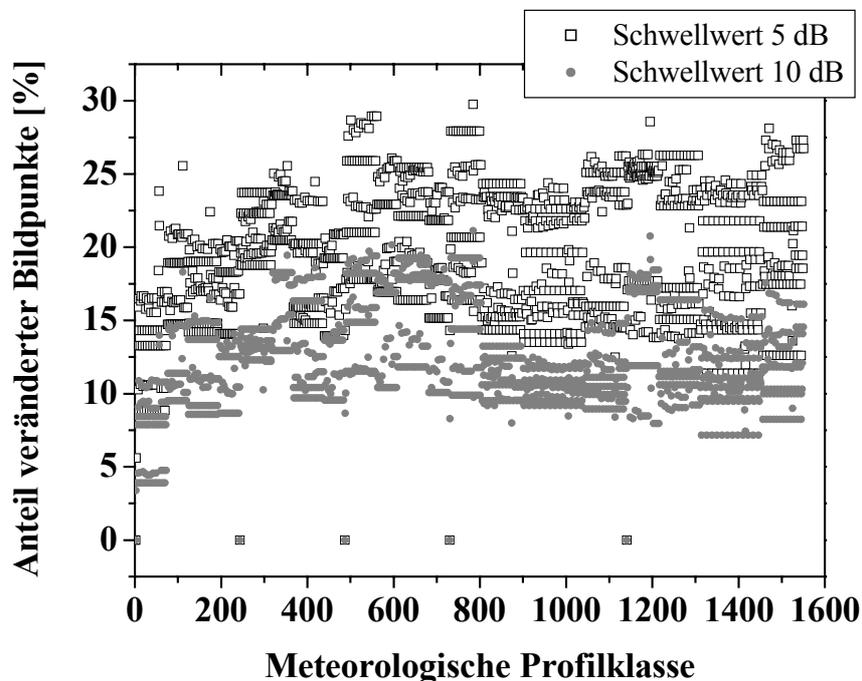


Abb. 7: Prozentualer Anteil veränderter Bildpunkte an der Gesamtanzahl von Bildpunkten bei der Simulation mit dem Refraktionsgesetz für Schallstrahlen gegenüber der Simulation mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale für 1551 meteorologische Profilklassen.

## 5 Diskussion

Die Ergebnisse der Simulationen mit unterschiedlichen Refraktionsgesetzen wurden hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Schalldruckpegeldämpfungen geprüft. Dabei wurden die gesamte Dämpfung (mit Wellendivergenz) und die meteorologische Dämpfung (ohne Wellendivergenz) durch Schallstrahlenrefraktion untersucht.

Kritische Gebiete hinsichtlich einer verstärkten Lärmbelastung sind durch negative Werte der meteorologisch bedingten Zusatzdämpfung gekennzeichnet. In diesem Fall wird der Schalldruckpegel infolge einer Schallstrahlenkrümmung weniger stark gedämpft als für den Fall einer Atmosphäre ohne vertikale Temperatur- und Windgradienten.

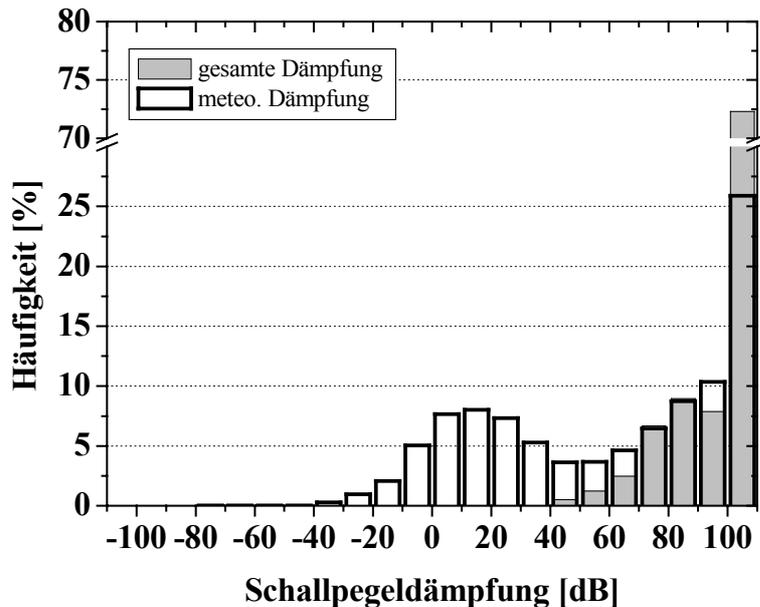


Abb. 8: Relative Häufigkeit des Auftretens bestimmter Werteklassen der Schallpegeldämpfung für die gesamte Dämpfung (modifizierte Wellendivergenz) und die meteorologisch bedingte Zusatzdämpfung (Schallstrahlenrefraktion) für Simulationen mit dem Refraktionsgesetz für Schallstrahlen.

ungefähr mit der gleichen Häufigkeit auf.

Demgegenüber zeigen sich größere Unterschiede zwischen den verschiedenen Simulationen, wenn die Häufigkeit des Auftretens eines negativen meteorologischen Dämpfungsbetrages in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle untersucht wird (Abb. 9). Hiermit wird bereits das in Abbildung 7 erzielte Ergebnis über die Anzahl an veränderten Bildpunkten unterstützt. Diese veränderten Bildpunkte treten offensichtlich auch in Bereichen der meteorologisch bedingten Lärmverstärkung auf und sind somit relevant für die Lärmprognose.

Die größten Unterschiede zwischen den verschiedenen Simulationen treten bei Entfernungen zwischen 1 und 3 km von der Schallquelle auf. Eine verstärkte Lärmbelastung infolge der Schallstrahlenrefraktion durch Temperatur- und Windgradienten tritt in diesem Entfernungsbereich ebenfalls am häufigsten auf. Dieses Ergebnis ist auf eine stärker ausgeprägte Refraktion von Schallstrahlen in Richtung Erdoberfläche (Totalreflexion) zurückzuführen. Damit wird besonders für den quellnahen Bereich durch die Verwendung des physikalisch exakten Refraktionsgesetzes (3) für bewegte Medien eine häufigere Lärmbelastung prognostiziert.

Eine statistische Auswertung des Auftretens dieser negativen Zusatzdämpfungen (meteo. Dämpfung, siehe Abb. 8) zeigt, dass diese Situationen nicht sehr häufig auftreten. Da diese Fälle aber gerade zu einer hohen Lärmbelastung im entsprechenden Raumsektor führen und außerdem negative Werte der Zusatzdämpfung (Verstärkung) von einigen 10 dB möglich sind, ist auf diese Situationen in der Praxis besonders zu achten. Die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Simulationsergebnissen mit verschiedenen Refraktionsgesetzen ist für diese Auswertung nicht signifikant, d.h., für beide Simulationsreihen treten die verschiedenen Schallpegeldämpfungen

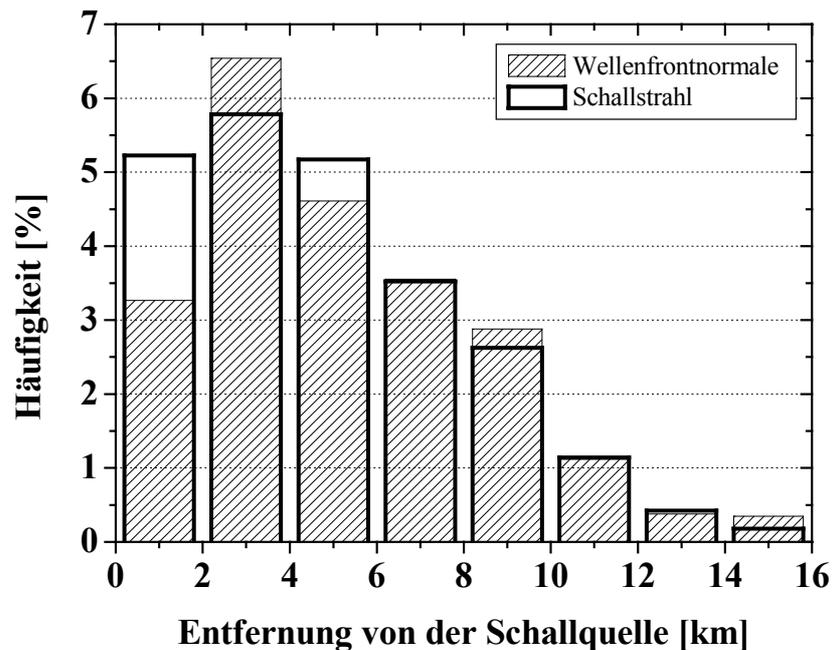


Abb. 9: Relative Häufigkeit des Auftretens negativer meteorologisch bedingter Schallpegeldämpfungen (verstärkte Lärmbelastung) für Simulationen mit dem Refraktionsgesetz für die Wellenfrontnormale bzw. für den Schallstrahl.

Für künftige Untersuchungen von Lärmschutzfragen, z.B. bei der Erstellung von Gutachten, sollte für die Schallausbreitungssimulation das Refraktionsgesetz für Schallstrahlen (3) Verwendung finden, um eine Maximalwertabschätzung für die mögliche Lärmbelastung eines bestimmten Gebietes richtig vornehmen zu können. Darüber hinaus sollten stets Temperatur- und Windprofile (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) in die Schallausbreitungsberechnung einfließen, da die vertikalen Gradienten der meteorologischen Größen und die damit verbundene Schallstrahlenrefraktion erheblichen Einfluss auf die Lärmprognose haben können (siehe u.a. Ziemann et al., 2001). Es wird als notwendig erachtet, diesen Ansatz auch in den gesetzlichen Bestimmungen bzw. Richtlinien (z.B. VDI-Richtlinie 2714) für die Schallausbreitungsberechnungen zu berücksichtigen, da die aktuelle Verfahrensweise (Zusammenfassung des „Meteorologieeinflusses“ in einer Maßzahl) zu fehlerhaften Berechnungen führen kann.

### Danksagung

Hiermit danke ich dem Bundesministerium für Verteidigung (Auftragsnummer: E/E91S/Z0520/X5114) für die finanzielle Unterstützung dieser Studie. Außerdem danke ich K. Hungershöfer für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

### Literatur

- Boone, M.M. und Vermass, E.A., 1991: A new ray-tracing algorithm for arbitrary inhomogeneous and moving media, including caustics. *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, 2109-2117.
- Brekhovskikh, L.M. und Godin, O.A., 1992: *Acoustics of layered media II. Point sources and bounded beams.* Springer Series on wave phenomena, Volume 13, Springer-Verlag, Berlin, 395 S..
- Gutenberg, B., 1951: Sound propagation in the atmosphere. In: *Compendium of meteorology.* Am. Meteorol. Soc., Boston, 366-375.

- Kühner, D., 1993: Schallausbreitung im klimatologischen Mittel. Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 19. Deutschen Jahrestagung für Akustik/DAGA 93, 299-308.
- Kühner, D., 1997: Berechnung des Bodenmeteorologiemasses mit einem parabolischen Schallstrahlenmodell. Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 23. Deutschen Jahrestagung für Akustik/DAGA 97, 171-177.
- Müller, W., 2002: Berücksichtigung der Wettereinflüsse in einem modernen Schallortungssystem. In: Nolte, B. (Hrsg.), Vortragszusammenfassungen 13. Arbeitstagung „Anwendungen der Akustik in der Wehrtechnik“ 24.-26.09.2002 in Meppen, 104-110.
- Ostashev, V.E., Hohenwarter, D., Attenborough, K., Blanc-Benon, Ph., Juvé, D. und Goeckede, G.H., 2001: On the refraction law for a sound ray in a moving medium. *Acustica* **87**, 303-306.
- Raabe, A., Ziemann, A., Jagusch, F. und Arnold, K., 1998: Studie: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Abschlußbericht zum Auftrag E/E91S/Y0922/X5114, 43 S..
- Raabe, A., Arnold, K. und Ziemann, A., 2000: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Abschlußbericht zum Auftrag E/F360/X5144, 52 S..
- Rayleigh, J.W.S., 1945: *The theory of sound*, Dover, New York.
- TA Lärm, 1998: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz § 48 BimSchG (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm), 26.08.1998. Gemeinsamen Ministerialblatt Nr. 26 des Bundes.
- Turton, J. D., Bennetts, D. A. und Nazer, D. J. W., 1988a: The Larkhill noise assessment model, Part I: Theory and formulation. *Meteorol. Magazine* **117**, 145-154.
- Turton, J. D., Bennetts, D. A. und Nazer, D. J. W., 1988b: The Larkhill noise assessment model, Part II: Assesment and use; *Meteorol. Magazine* **117**, 169-179.
- UBA, 2003: Internetseite <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/presseinformationen/pd12602.htm>
- VDI 2714, 1988: Schallausbreitung im Freien, Beuth Verlag, Berlin.
- Wöhle, W., 1984: Wind- und Temperatureinflüsse auf die Schallausbreitung. In: Fasold, W., Kraak, W. und Schirmer, W. (Ed.): *Taschenbuch Akustik*. VEB Verlag Technik, Berlin, 83-95.
- Ziemann, A., 2000: Eine theoretische Studie zur akustischen Tomographie in der atmosphärischen Grenzschicht, *Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig und Inst. für Troposphärenforschg. Leipzig* **19**, 141 S..
- Ziemann A., Arnold, K. und Raabe, A., 2001: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen beim Lärmschutz. *Wiss. Mitt. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig* **22**, 35-49.
- 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.
- Ziemann, A., Arnold, K. Raabe, A., und 2002: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Zwischenbericht zum Auftrag E/F360/X5144, 74 S..

**Adresse:**

Astrid Ziemann (ziemann@uni-leipzig.de)  
 Institut für Meteorologie  
 Universität Leipzig  
 Stephanstr. 3  
 04103 Leipzig