

# **Einfluss der vertikalen Auflösung der Eingangsprofile bei einem Schallstrahlenmodell**

**M. Wilsdorf, G. Fischer und A. Ziemann**

## **Zusammenfassung**

In der folgenden Ausarbeitung soll der Einfluss der vertikalen Auflösung der Eingangsprofile auf die Schallausbreitungsrechnungen eines Schallstrahlenmodells näher untersucht werden. Der Grund hierfür liegt in dem Auftreten eines „Schichtenproblems“ bei der Arbeit mit einem solchen Modell. Das bedeutet, dass je größer die vertikale Auflösung der Eingangsprofile ist, desto mehr weicht die mit dem ComputermodeLL bestimmte Lösung von der analytischen ab. Im folgenden Beitrag werden verschiedene vertikale Auflösungen untersucht und es wird gezeigt, dass eine höhere Auflösung dieses Problem lösen kann. Die Berechnungen erfolgen mit dem Schallstrahlenmodell SMART. Dieses Modell basiert auf der Berechnung des Weges, den der Schall in einer geschichteten Atmosphäre zurücklegt. Die Berechnungsgrundlage für das Strahlenmodell bilden dabei aus Radiosondendaten interpolierte, sowie klimatologisch klassifizierte Temperatur- und Windprofile. Diese Untersuchungen stellen eine notwendige Grundlage bei der Analyse und Interpretation der durch ein Strahlenmodell gewonnenen Dämpfungsberechnungen dar.

## **Summary**

In the following article, effects of the vertical resolution of input data on numerical sound attenuation simulations are investigated. The reason for this lies in the occurrence of a „layer problem“ during work with such a model. That means, even larger the vertical resolution of the input profiles is, so much more the calculated answer deviates from the analytic. Therefore, different vertical resolutions are examined. The analyzed results show that a higher resolution can solve this problem. Calculations are carried out using the sound ray model SMART which considers the dependency of sound ray propagation on stratified atmosphere. As a basis for calculating the sound ray paths interpolated and climatologically classified profiles of temperature and wind obtained from radiosonde data are utilized. These investigations provide a basis for the analysis and interpretation of attenuation calculations derived from a sound ray model.

## **1 Einleitung**

Die Lärmbelastung ist nach wie vor eine der größten und als Problem wenig wahr genommene Umweltbelastung unserer Zeit und sie wird voraussichtlich noch zunehmen. Schall wird in diesem Zusammenhang als Lärm bezeichnet, wenn er auf den Menschen belastend bzw. störend oder gar gesundheitsschädigend wirkt. Ein wichtiges

Gebiet im Umweltschutz besteht deshalb in der Überwachung und Prognose von Schallimmissionen.

Experimentelle Ergebnisse und numerische Berechnungen zeigen, dass es für gute Schallimmissionsprognosen wichtig ist, die Vertikalgradienten der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung in die Schallausbreitungsberechnungen einzubeziehen (z.B. Balogh et al., 2006 und Ziemann et al., 2007). Diese Faktoren bewirken Richtungs- sowie Geschwindigkeitsänderungen einer Schallwelle.

In einem Strahlenmodell, das mit verschiedenen Atmosphärenschichten arbeitet, wirken diese Faktoren in derselben Weise auf das Ausbreitungsverhalten der Schallstrahlen. Wie schnell diese den Schallweg verändernden Effekte vom Modell umgesetzt werden können, hängt im Wesentlichen von der vertikalen Auflösung der Schallausbreitungsrechnung mit einem Schallstrahlenmodell zu Grunde liegenden Eingangsprofile ab. Der Grund für dieses „Schichtenproblem“ liegt in der Natur dieses Strahlenmodells. Die Atmosphäre wird in ihm als ein horizontal homogen geschichtetes Medium betrachtet. Durch die Verwendung von geringen Schichtdicken ist es möglich, die für die Refraktion relevanten meteorologischen Größen (Temperatur und Windvektor) in den jeweiligen Schichten als konstant zu betrachten. Der Schallstrahl hat dadurch innerhalb einer Schicht einen geradlinigen Verlauf. Nur an den verschiedenen Grenzflächen der Schichten treten Refraktionen des Schallstrahls auf (siehe Ziemann, 2002; Ziemann, 2003). Das bedeutet, je dicker eine Schicht im Vergleich zu einer anderen ist, umso entfernungsmäßig ( $x$ -Richtung) später setzt die Refraktion an der Grenze zur nächsten Schicht ein. Damit ist dieses Problem kein physikalisches, sondern hat seine Ursachen vielmehr in der begrenzten numerischen Genauigkeit bei der Bestimmung des Brechungswinkels. Berechnet man den Strahlenverlauf analytisch, tritt dieser Fehler nicht auf, da hier keine vertikale Schichteneinteilung vorgenommen werden muss. Um diese Diskrepanz zwischen den beiden Lösungen zu minimieren, wurden in dieser Arbeit die vertikalen Auflösungen 0.5 m, 0.1 m und log 0.1 m miteinander verglichen, sowie ihre Vor- und Nachteile diskutiert.

## 2 Theorie von Strahlenmodellen

Bei dem zweidimensionalen Schallstrahlenmodell SMART (sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing) kann ausgehend von einer Schallquelle, von der ein Schallstrahlenbündel ausgesandt wird, unter Verwendung des Refraktionsgesetzes, die zurückgelegte Schallstrecke verfolgt werden. SMART wendet dabei ein Refraktionsgesetz speziell für die Schallstrahlbrechung in einem bewegten Medium an, da sich die Richtungen der Schallwellennormalen und des Schallstrahls in einem solchen Medium unterscheiden (Ostashev et al., 2001; Ziemann et al., 2002). Die Atmosphäre wird, wie oben erwähnt, als ein horizontal homogen geschichtetes Medium (mit geringen Schichtdicken) betrachtet.

Da Schallstrahlen verschiedener Emissionswinkel unterschiedlich auf die meteorologischen Effekte (Ziemann et al., 2001) und den Boden (Ziemann und Balogh, 2004) rea-

gieren, müssen möglichst viele Schallstrahlenverläufe berechnet werden, wobei die Winkelauflösung immer höher wird, je horizontaler die Schallausbreitung erfolgt. Unter der Annahme einer unbewegten Atmosphäre mit linearem Temperaturprofil bedeutet dies, dass die Schallstrahlen Kreisbögen mit dem Radius  $1/(\sin(\alpha_0)m)$  entsprechen. Damit ist es möglich, die Strahlverläufe wie folgt analytisch zu berechnen.

$$x(z) = \frac{\cot \alpha_0}{m} - \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0 (1 + m(z - z_0))^2}}{m \sin \alpha_0} \quad (1)$$

Die Höhe der Schallquelle (hier =0) wird durch  $z_0$  symbolisiert (Franck und Sager, 1974). Der Parameter  $m$  ist der mit der adiabatischen Schallgeschwindigkeit am Boden  $c_0$  normierte vertikale Schallgeschwindigkeitsgradient. Unter  $\alpha_0$  wird der Emissionswinkel (gegen die Vertikale) an der Schallquelle verstanden. Die Variable  $x$  steht für die horizontale und  $z$  für die vertikale Koordinate der Schallwegkurve.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Mit dem Schallstrahlenmodell SMART ist es möglich, verschiedenste vertikale Auflösungen der Eingangsprofile zu rechnen. Verglichen werden im Folgenden Auflösungen von 0.5 m (äquidistant), 0.1 m (äquidistant) sowie log 0.1 m (logarithmisch-äquidistant). Unter der letzten Auflösung ist zu verstehen, dass hierbei die erste 0.1 m – Schicht noch einmal stark verfeinert aufgelöst wird. Ausgehend von  $z=0$  m folgen zehn Schichten mit einer Auflösung von  $10^{-4}$  m (Schichthöhe: 0.0001 – 0.001 m), daran anschließend zehn Schichten mit einer Auflösung von  $10^{-3}$  m (Schichthöhe: 0.001 – 0.01 m) usw., bis man schließlich bei 0.1 m angelangt ist. Von da an erfolgt eine äquidistante Auflösung von 0.1 m (also 0.2, 0.3 m....) bis in die jeweilige Profilhöhe. Da das beschriebene Problem selbstverständlich am stärksten bei den Schallstrahlen mit einem Emissionswinkel nahe  $90^\circ$  auftritt, sind bei der zu führenden Untersuchung die ersten Schichten der Eingangsprofile von besonderem Interesse. Wichtig ist hierbei, dass sich die höhere Auflösung an und um der Quelle befindet. In der hier durchgeführten Untersuchung befindet sich die Quelle am Boden ( $z_0=0$  m).

Um das Problem zu veranschaulichen, sind in Abbildung 1 ausgewählte Strahlverläufe bei verschiedenen Auflösungen dargestellt. Betrachtet werden hier Profile, welche sich durch eine Temperaturabnahme mit der Höhe auszeichnen, da in einem solchen Fall der Temperaturgradient einen die Schallstrahlen nach oben brechenden Einfluss ausübt. Diesbezüglich wird der Einfluss der vertikalen Auflösung besonders deutlich. Untersuchungen mit abwärts brechenden Eingangsprofilen wurden von Kroll et al. (2008) durchgeführt.

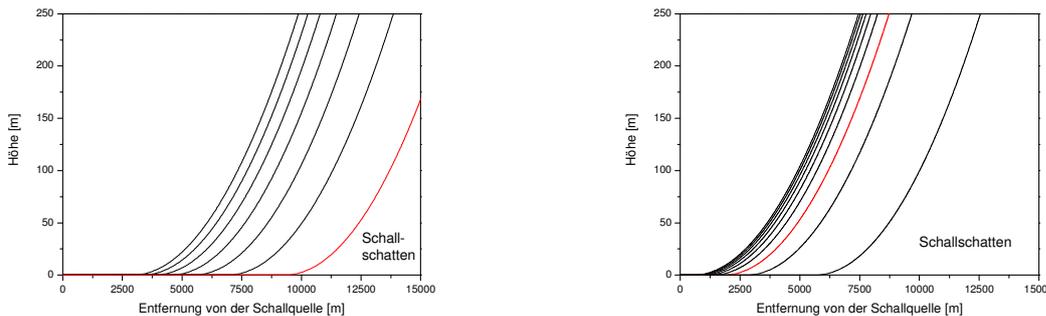


Abb.1.: Vergleichende Darstellung ausgewählter Strahlverläufe bei einer konstanten Temperaturabnahme von 0.6 K/100 m ohne Windeinfluss und einer Vertikalauflösung von 0.5 m (links) und 0.1 m (rechts).

Man erkennt in Abbildung 1 das jeweils letzte Strahlenbündel (Emissionswinkel:  $89.990^\circ - 89.999^\circ$ ), wobei der rote Strahl als Referenzstrahl ( $89.997^\circ$ ) fungieren soll. Diese Emissionswinkelauflösung wird derzeit für verschiedene Projekte verwendet. Im Strahlverlauf der höheren vertikalen Auflösung zeigt sich ein wesentlich ausgeprägter Schallschatten. Man erkennt dies sehr gut daran, dass in der rechten Abbildung sämtliche Strahlen deutlich innerhalb der horizontalen Begrenzung von 15 km die Profilhöhe verlassen.

Der Grund hierfür liegt darin, dass die Schallstrahlen wegen des bestehenden Temperaturverlaufes nach oben gebrochen werden. Dies geschieht bei der höheren Auflösung wesentlich schneller als bei der niedrigeren. Man erkennt das besonders anschaulich am roten Referenzstrahl. Bei der Auflösung von 0.5 m „verweilen“ die am horizontalsten abgestrahlten Strahlen wesentlich länger in der untersten Schicht als bei einer höheren Auflösung, ehe dann die Brechung an der Schichtgrenze einsetzt.

Dies führt unweigerlich zu der Frage, welches Brechungsverhalten physikalisch richtig ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Brechungsverhalten verschiedener Strahlen bezüglich der analytischen Lösung überprüft. Dazu wurden zunächst Profile mit unterschiedlichen vertikalen Temperaturgradienten analytisch untersucht. Exemplarisch werden hier die Untersuchungsergebnisse anhand der Gradienten  $-0.1 \text{ K}/100 \text{ m}$  und  $-0.6 \text{ K}/100 \text{ m}$  (Temperaturabnahme) veranschaulicht (vgl. Abb. 2).

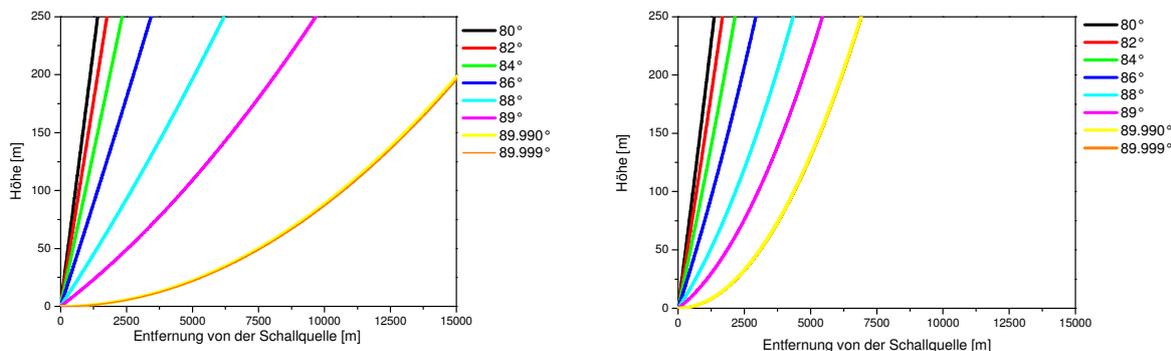


Abb.2.: Darstellung des analytischen Strahlverlaufes bei einem vertikalen Temperaturgradienten von  $-0.1 \text{ K}/100 \text{ m}$  (links) und  $-0.6 \text{ K}/100 \text{ m}$  (rechts).

Im Vergleich dazu ist in Abbildung 3 ein durch SMART berechneter Strahlverlauf, bei einer gleichbleibend konstanten Auflösung des zu Grunde liegenden Temperaturprofils von 0.1 m, grafisch dargestellt. Analog zu Abbildung 2 ist deutlich der Einfluss des stärkeren Temperaturgradienten sichtbar. Die Strahlen werden bei einem Gradienten von  $-0.6 \text{ K}/100 \text{ m}$  wesentlich eher nach oben gebrochen, was in der Praxis für einen ausgeprägteren Schallschatten sorgen würde.

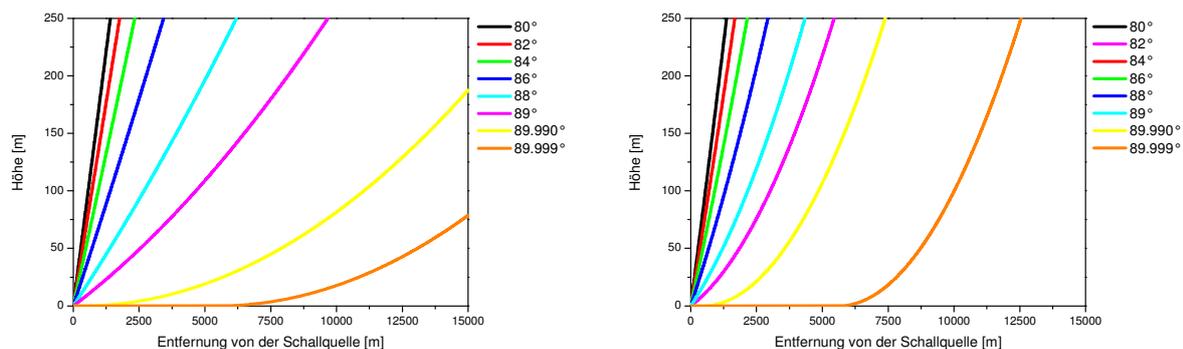


Abb.3.: Darstellung der mit SMART berechneten Strahlverläufe bei einer äquidistanten vertikalen Auflösung von 0.1 m für die Temperaturgradienten  $-0.1 \text{ K}/100 \text{ m}$  (links) und  $-0.6 \text{ K}/100 \text{ m}$  (rechts).

Das zweite wichtige Ergebnis, welches sich aus Abbildung 2 und 3 ergibt, ist die Differenz zwischen der numerischen und der analytischen Lösung. Bezogen wird diese Differenz auf den Punkt, wo der jeweilige Strahl das Immissionsniveau von 2 m durchläuft. Je kleiner diese Differenz ist, desto besser stimmt die computergestützt, auf einem Schichtenmodell beruhende, berechnete Lösung mit der analytischen Lösung überein. Interessant sind dabei wiederum die Strahlen, die besonders horizontal (große Emissionswinkel) abgestrahlt werden, da diese am stärksten vom betrachteten Schichtenproblem betroffen sind.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass bei einer vertikalen Auflösung von 0.1 m wesentlich bessere Übereinstimmungen bezüglich der analytischen Lösung erzielt werden als bei einer Auflösung von 0.5 m. In diesem Fall weisen selbst die Strahlen mit einem Emissionswinkel um  $89.99^\circ$  nur eine Abweichung von wenigen 100 m auf, was bei einer horizontalen Ausdehnung des betrachteten Gebietes von 15 km sowie einer horizontalen Auflösung von 250 m akzeptabel ist. Lediglich die letzten Strahlen mit einem Abstrahlwinkel größer als  $89.99^\circ$  rufen größere Unterschiede bis ca. 5 km bei  $89.999^\circ$  hervor. Aber selbst das stellt im Vergleich zu der vertikalen Auflösung von 0.5 m eine Verbesserung dar. Dies wird anschaulich, wenn man sich noch einmal Abbildung 1 vor Augen führt.

Um dieses gute Ergebnis noch weiter zu optimieren, wurde die oben beschriebene logarithmisch-äquidistante Auflösung eingeführt (vgl. Abbildung 4). Hier betragen die Unterschiede zwischen analytischer Lösung und dem von SMART berechnetem Strahlenverlauf einige Meter bis zu wenigen 10 m für die horizontalsten Emissionswinkel.

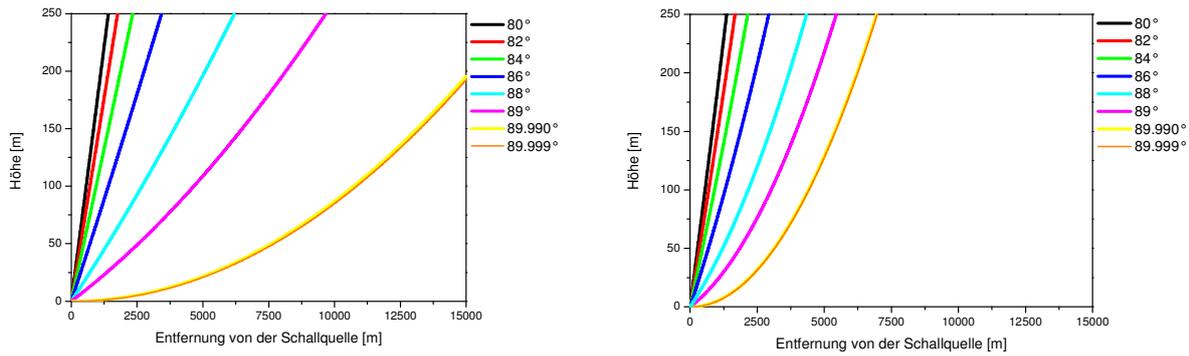


Abb.4.: Darstellung der mit SMART berechneten Strahlverläufe bei einer logarithmisch äquidistanten vertikalen Auflösung von 0.1 m für die verschiedenen Temperaturgradienten  $-0.1 \text{ K}/100 \text{ m}$  (links) und  $-0.6 \text{ K}/100 \text{ m}$  (rechts).

Die praktische Anwendung der dargestellten Untersuchungen mündet schließlich in den Schallausbreitungsrechnungen mit SMART und damit in Dämpfungskarten von bestimmten Orten zu bestimmten Zeiten. Exemplarisch sind in Abbildung 5 die Dämpfungskarten eines gemessenen (Radiosonden-) Profils aus Bergen vom 01.07.2002 (12 UTC) unter der Maßgabe unterschiedlicher vertikaler Auflösung des Eingabeprofiles veranschaulicht.

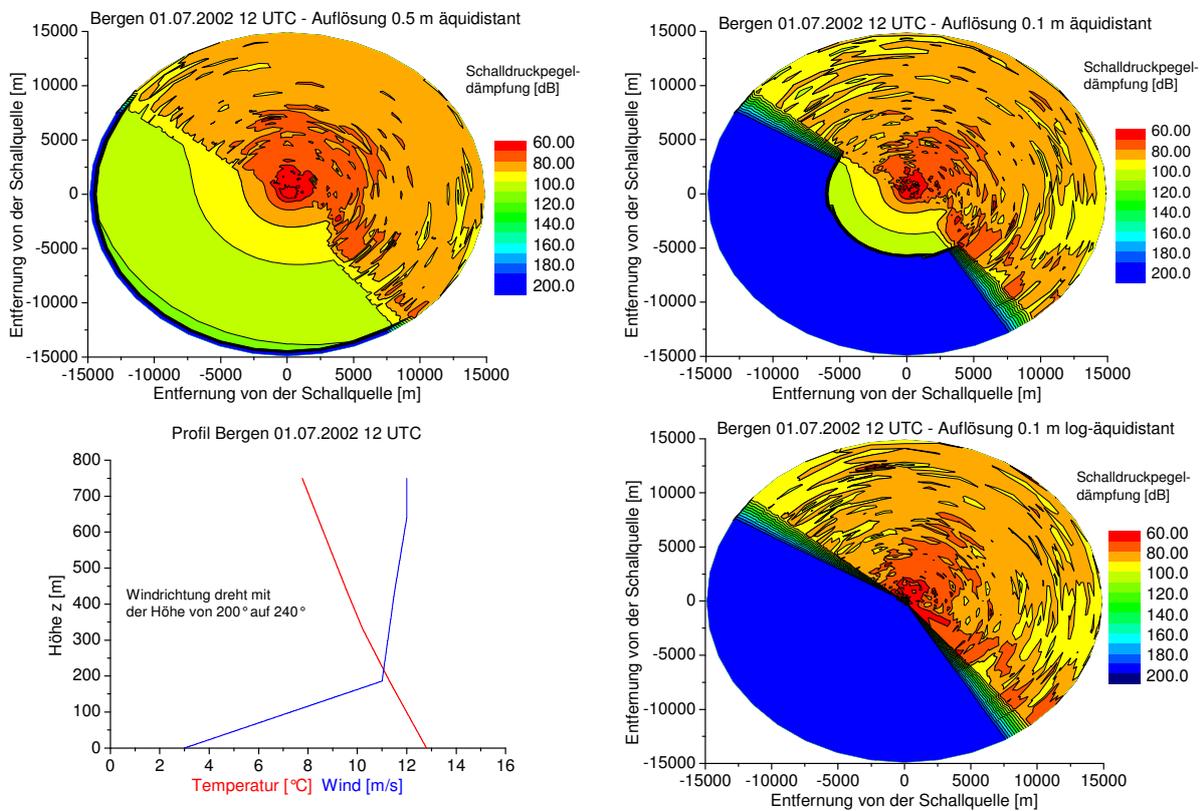


Abb.5.: Vergleich von Dämpfungskarten bei verschiedener vertikaler Auflösung der Eingangsprofile an einem speziellen Beispiel.

Man erkennt zunächst einmal sehr deutlich die systematische Übereinstimmung aller drei Dämpfungskarten. Weiterhin wird ein „vollkommener“ Schallschatten (200 dB) bei der 0.1 m- und der log-0.1 m Auflösung sichtbar. Das bedeutet, dass in diesem Bereich kein Schallstrahl mehr in das Immissionsniveau gelangt. Bei der Auflösung von 0.5 m ist ein derartiger Bereich auch feststellbar, allerdings liegen die Dämpfungswerte hier um die 100 dB. Dies liegt daran, dass in diesem Fall die am horizontalsten abgestrahlten Strahlen bis in 15 km Entfernung noch das Immissionsniveau erreichen (vgl. dazu Abb. 1). In der praktischen Anwendung dieser Ergebnisse bewirkt dieser Umstand allerdings keinen Unterschied, da eine 100 dB Dämpfung im Grunde auch einen Schallschatten darstellt.

Dies verdeutlicht auch Abbildung 6. Hier sind verschiedene SMART – Versionen anhand der am LIM entwickelten synthetischen 1551 Profilklassen (siehe Raabe et al., 2000 und Ziemann et al., 2002) untersucht worden, und zwar in der Art, dass jeder Dämpfungswert an jedem Bildpunkt einer Dämpfungskarte mit dem jeweils gleichen einer anderen Version verglichen worden ist. Sofern die Differenz der Dämpfungswerte zweier SMART – Versionen kleiner als bzw. gleich eine zuvor definierte Gleichheitsgrenze war, wurde dieser Bildpunkt gezählt. Sofern die Differenz der Dämpfungswerte zweier SMART – Versionen größer als die zuvor definierte Gleichheitsgrenze war, wurde dieser Bildpunkt nicht gezählt.

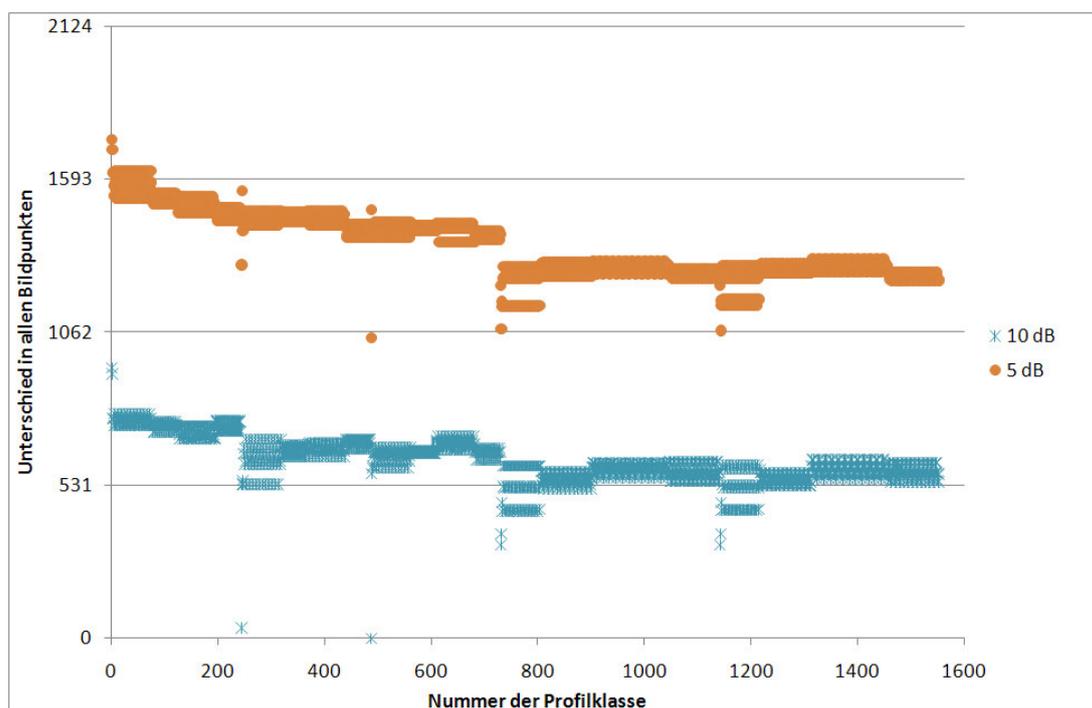


Abb.6.: Vergleich der Bildpunkte einer Dämpfungskarte bei verschiedenen SMART - Versionen

Die synthetisch entwickelten 1551 Klassen stellen eine Sammlung verschiedener möglicher Profilverteilungen der meteorologischen Parameter Temperatur, Wind und Windrichtung dar. Mit dieser Einteilung von Temperatur- und Windvektorprofilen können alle möglichen Vertikalverteilungen dieser meteorologischen Größen erfasst werden (siehe Raabe et al., 2000).

Die Gleichheitsgrenze lag bei 5 dB 10 dB. Zunächst einmal fällt auf, dass es einen grundsätzlichen Unterschied zwischen verschiedenen SMART-Versionen bei einer Grenze von 5 dB gibt. Der Unterschied bei 10 dB ist demgegenüber nur halb so groß und resultiert im Wesentlichen aus der verschiedenartigen Darstellung des Schallschattens. Damit kann diese Abbildung noch einmal als Untermauerung der vorher gemachten Aussagen verstanden werden. Man erreicht ähnliche Ergebnisse im Mitwindbereich und grundsätzliche Unterschiede im Bereich des Schallschattens.

Betrachtet man noch einmal die Dämpfungskarten in Abbildung 5 und dabei im Speziellen die der beiden fein aufgelösten Profile muss festgestellt werden, dass beide sehr gut übereinstimmen. Diese Übereinstimmung bezieht sich auf die Größe und Form des Schallschattens sowie auch auf den gesamten Mitwindbereich. Analog sind in Abbildung 7 die dazugehörigen meteorologischen Zusatzdämpfungen dargestellt. Das bedeutet, dass hier von den in Abbildung 5 bestimmten Dämpfungen durch die Atmosphärenstruktur die Dämpfung aufgrund der Kugelwellendivergenz (ohne Meteorologieeinfluss) abgezogen wird.

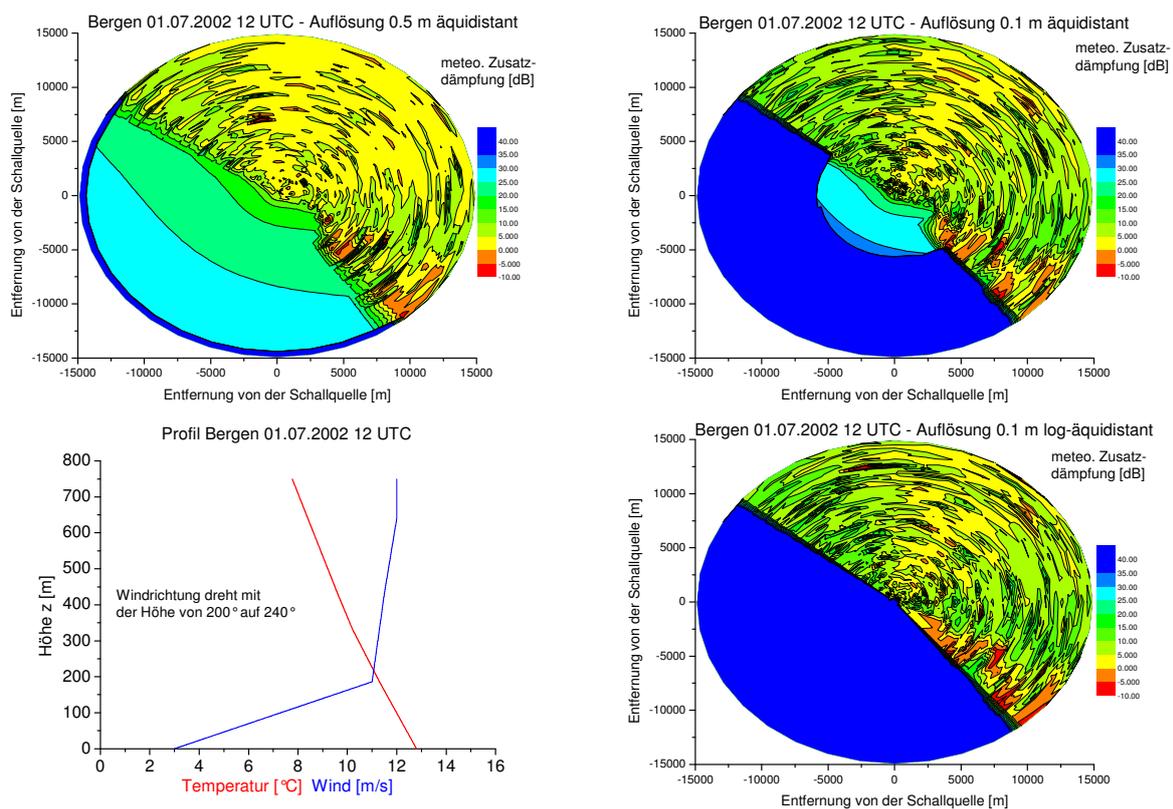


Abb.7.: Vergleich der meteorologischen Dämpfungskarten bei verschiedener vertikaler Auflösung der Eingangsprofile an einem speziellen Beispiel.

In diesen Abbildungen lassen sich besonders deutlich (rot) die Gebiete erhöhten Schalleintrages erkennen. Hierbei ist zu beachten, dass Größe und Form dieser Bereiche erhöhten Schalleintrages bei den einzelnen Dämpfungskarten in Abbildung 7 kaum variieren. Überdies ist vorstellbar, dass bei einer gewissen Glättung (Mittelung mehrerer aufeinander folgender Profile) gleiche oder zumindest ähnliche Ergebnisse

bei unterschiedlichen vertikalen Auflösungen erzielt werden. Diese Aussage bezieht sich auf den Mitwindbereich.

Das Problem der Form und Struktur des Schallschattens bleibt jedoch bestehen. Dieses Problem soll zunächst noch einmal verdeutlicht werden. Man hat gesehen, dass bei Berechnungen (mit SMART) mit einer vertikalen Auflösung von 0.5 m selbst in einer Entfernung von 15 km noch Schallstrahlen das Immissionsniveau erreichen (vgl. Abb. 1), wohingegen bei den feineren Auflösungen der Schallschatten durch den im Modell festgelegten 200 dB-Grenzwert charakterisiert ist. Diesen Unterschied in der Darstellung des Schallschattens aufzuweichen und damit eine im Modell wirklichkeitsnähere Definition des Schallschattens zu erreichen, ist das Ziel der folgenden Überlegungen.

Aus diesem Grund wurde versucht, den Schallschatten der 0.5 m Auflösung in Abbildung 5 nachzuvollziehen. Betrachtet man Abbildung 5 (oben links) erkennt man, dass im gesamten dritten Quadranten ( $180^\circ - 270^\circ$ ) ein Schallschatten besteht. Aus diesem Schatten wurde ein Strahl anhand seiner Koordinaten herausgegriffen und untersucht. Dabei wurde die Dämpfung aufgrund Kugelwellendivergenz (ohne Meteorologie) mit einem in der Literatur üblichen Wert (Dämpfungsaufschlag) von 20 dB addiert. Diese Werte wurden im Anschluss mit den durch SMART berechneten Werten verglichen, was Abbildung 8 exemplarisch zeigt.

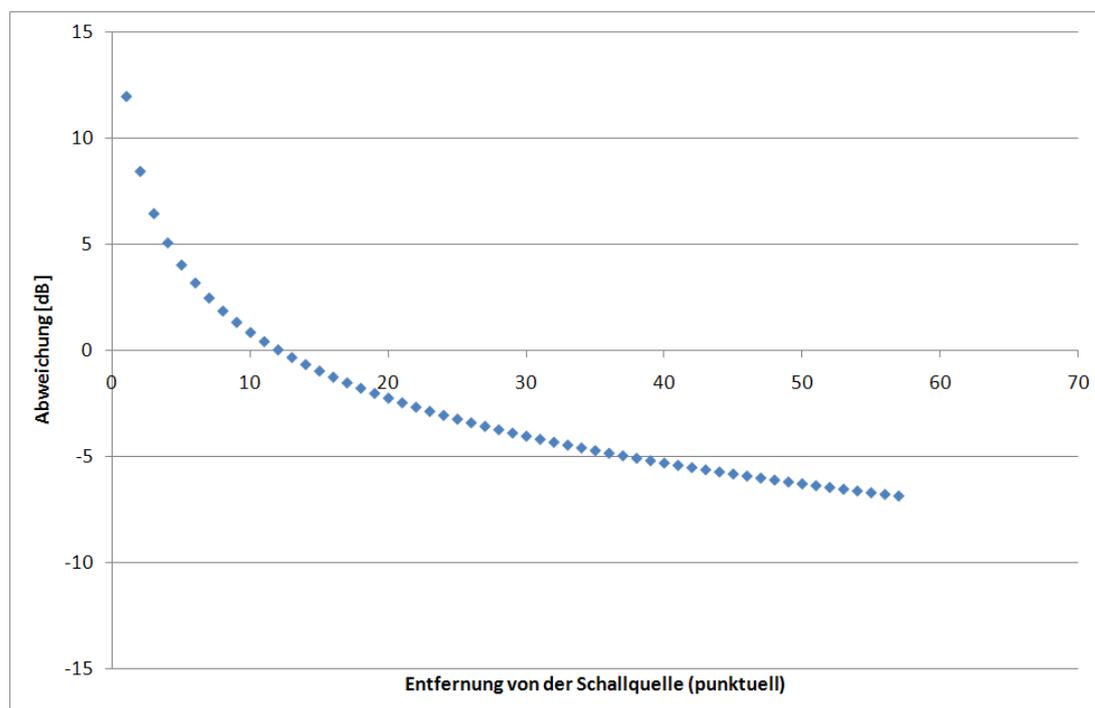


Abb.8: Vergleich eines mit SMART berechneten Strahles im Schallschatten mit der reinen Dämpfung aufgrund Kugelwellendivergenz addiert um einen in der Literatur (z.Bsp. Salomons, 2001) häufig verwendeten Dämpfungsaufschlag von 20 dB.

Man erkennt, dass die Abweichungen nicht sehr groß sind. Eine detailliertere Betrachtung ergibt, dass die Abweichungen nahe der Quelle ( $x$  gegen null) größer sind und der Dämpfungswert unterschätzt wird, wohingegen weit weg von der Quelle der Dämp-

fungswert überschätzt wird. Prinzipiell lässt sich damit feststellen, dass es mit dieser Rechnung möglich ist, den starren 200 dB Schallschatten aufzuweichen und durch die Zuhilfenahme der Dämpfung aufgrund Kugelwellendivergenz eine entfernungsabhängige Komponente der Dämpfung in die Darstellung der Dämpfung einzubeziehen.

#### 4 Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, den Einfluss der vertikalen Auflösung der Eingangsprofile auf die Schallausbreitungsrechnungen eines Schallstrahlenmodells, welches die vertikale Atmosphärenschichtung berücksichtigt, genauer zu untersuchen. Aus dieser Arbeit können folgende wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden. Es ist für eine exakte Wiedergabe der Schallstrahlwege durch die Atmosphäre unabdingbar, eine hohe vertikale Auflösung der vertikalen Schichtung der Eingangsprofile vorzusetzen. Unter „exakt“ ist in diesem Zusammenhang die Nähe des Strahlverlaufes zur analytischen Lösung zu verstehen. Die beste Übereinstimmung lieferte die 0.1 m-log-äquidistante Auflösung. Diese Auflösung ist jedoch auch mit dem höchsten Rechenaufwand verbunden. Auch sehr gute Ergebnisse in der Übereinstimmung lieferte die 0.1 m - äquidistante Auflösung. Bei Berechnungen mit einem solchen Strahlenmodell sollte deshalb der Unsicherheitsbereich in Abhängigkeit von der Größe des Modellgebietes der erzeugten Schalldruckpegeldämpfung abgeschätzt werden.

Die schlechtesten Ergebnisse bezüglich der analytischen Lösung lieferte die 0.5 m - äquidistante Auflösung. Dies bezieht sich vor allem auf die Form und Stärke des Schallschattens. Die Ursache hierfür liegt in der langen Verweildauer der am horizontalsten abgestrahlten Strahlen (hohe Emissionswinkel) in der ersten Schicht. Aus diesem Grund wurde versucht, den Schallschatten dieser Auflösung sozusagen zu replizieren. In einem ersten Versuch erfolgte ein Vergleich eines berechneten Schallschattens mit der reinen Dämpfung aufgrund Kugelwellendivergenz addiert um einen Dämpfungsaufschlag von 20 dB. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass es auf diesem Weg möglich ist, den Schallschatten etwas aufzuweichen, es aber nötig bleibt, speziell in diesem Gebiet weitere Untersuchungen vorzunehmen.

#### Literatur

**Balogh, K., Ziemann, A. und Daniel, D.,** 2006: Influence of Atmospheric Refraction on Pulse Propagation over a Flat Ground Surface. *Acta Acustica* 92, 848-852.

**Franck, H. und Sager, G.,** 1974: Zur Schallwegverteilung in der unteren Grundschicht bei Vorhandensein einer Bodeninversion. *Zeitschrift für Meteorologie* 24, 130-137.

**Kroll, K., Balogh, K., Ziemann, A. und Raabe, A.,** 2008: Einflussfaktoren auf die Schallimmission in einem bestimmten Gebiet. *Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig* 42, 59-74.

- Ostashev, V. E., Hohenwarter, D., Attenborough, K., Blanc-Benon, Ph., Juvé, D. und Goedecke, G. H., 2001:** On the refraction law for a sound ray in a moving medium. *Acustica* 87, 303-306.
- Raabe, A., Arnold, K. und Ziemann, A., 2000:** Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Abschlußbericht zum Auftrag E/F360/X5144, 46 S..
- Ziemann, A., Arnold, K., und Raabe, A., 2001:** Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen beim Lärmschutz, *Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig* 22, 35-49.
- Ziemann, A., Arnold, K. und Raabe, A., 2002:** Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Zwischenbericht zum Auftrag E/F360/X5144, 74 S..
- Ziemann, A., 2002:** Zum Einfluss vertikaler Gradienten meteorologischer Größen auf die Laufzeit von akustischen Signalen zwischen Schallquellen und Schallempfängern in der bodennahen Atmosphäre, *Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig* 26, 31-42.
- Ziemann, A., 2003:** Auswirkungen unterschiedlicher Schallausbreitungsmodelle auf die Lärmprognose, *Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig* 30, 61-72.
- Ziemann, A. und Balogh, K., 2004:** Schallimmissionsprognose über einer schallharten Oberfläche. *Wiss. Mit. Inst. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig* 34, S. 59-70.
- Ziemann, A., Balogh, K. und Arnold, K., 2007:** Modelling and measuring the atmospheric excess attenuation over flat terrain during night time conditions. *Meteorol. Z.* 16, 429-441.

### **Adressen der Autoren**

Michael Wilsdorf (mwils@uni-leipzig.de)  
Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig

Gabi Fischer (gfischer@uni-leipzig.de)  
Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig

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

Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der  
Universität Leipzig Bd. 45