

Ein Bewertungsverfahren für Schallimmissionen unter Einbeziehung des Atmosphärenzustandes

R. Viertel, M. Wilsdorf und A. Raabe

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren vorgestellt, welches im Rahmen einer Projektbearbeitung für die Bundeswehr entwickelt wurde und die Einbeziehung des meteorologischen Einflusses auf die Schallausbreitung in die Schallimmissionsprognose auf relativ einfache Weise ermöglicht. Zunächst wurden alle denkbaren meteorologischen Situationen (Unterscheidung nach Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung) klassifiziert. Für die verschiedenen Klassen wurden Verteilungen der Schalldruckpegeldämpfung mit dem Schallausbreitungsmodell SMART (Sound Propagation Model for the Atmosphere using Ray Tracing) berechnet. Die Ergebnisse wurden in einer Datenbank zusammengefasst. Die Analyse und Bewertung dieser Prognosen, sowie der Zugriff auf die Datenbank erfolgt über das Visualisierungstool MetaVIS (Meteorological attenuation visualization). Damit ist eine schnelle Schallimmissionsprognose für aktuelle Schallausbreitungssituationen möglich.

Im Rahmen dieses Verfahrens ist die Regionalisierung eines Gesamtgebietes in schallklimatologisch ähnliche Teilgebiete möglich. Eine solche Untersuchung erfolgte durch die Analyse von Schalldruckpegeldämpfungskarten für eine Vielzahl von Atmosphärenstrukturen. Im Ergebnis konnte eine Karte zur Neustrukturierung der Beratungsräume der Bundeswehr, unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse auf die Schallausbreitung, erarbeitet werden.

Summary

A procedure is described, which has been developed within the framework of a project for the Bundeswehr. This method provides a relatively simple way to include meteorological influences on the sound propagation for forecasting sound immission. Therefore, at first, different meteorological situations (differentiation regarding temperature, wind speed, wind direction) have been classified. For the different classes the spatial distribution attenuation of sound level have been calculated using a model of sound propagation SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing). The results are stored in a database. The analysis and evaluation of this forecasts as well as the access to the database is realized using the visualization tool MetaVIS (Meteorological attenuation visualization). Therewith fast forecasts of sound immission for present meteorological situations are enabled.

Moreover, with this procedure a regionalization of an entire territory in areas with a similar sound climatology is possible. Such an estimation has been done by analysing maps of sound level attenuation for different atmospheric structures. As a result, a map for restructuring the consulting areas of the Bundeswehr, considering meteorological influences on the sound propagation, could be acquired.

1 Einleitung

Lärm zählt nach wie vor zu den größten Umweltbelastungen der heutigen Zeit. Schall wird als Lärm bezeichnet, wenn die Immissionen als störend oder belästigend empfunden werden. Ein wichtiges Gebiet im Umweltschutz besteht deshalb in der Überwachung und Prognose von Schallimmissionen, unter anderem auch auf Truppenübungsplätzen der Bw. Bisher verwendete Prognoseverfahren für die Schallausbreitung, beinhalten die Einflüsse der vertikal variierenden meteorologischen Größen (Temperatur, Windvektor) nur in stark vereinfachter Weise. Experimentelle Ergebnisse und numerische Berechnungen zeigen jedoch, dass es für gute Schallimmissionsprognosen wichtig ist, die Vertikalgradienten der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung in die Schallausbreitungsberechnungen einzubeziehen (Delany und Bazley, 1970). Neben der geometrischen Abnahme des Schalldruckpegels und den Zusatzdämpfungen durch die vertikale Gradienten im Wind- und Temperaturfeld spielt ferner der frequenzabhängige Bodeneinfluss für die Schallausbreitung im Freien eine Rolle.

Das entwickelte Verfahren ist in zwei Ebenen unterteilt. Die erste Ebene beinhaltet zunächst eine grundsätzliche Klassifizierung möglicher meteorologischer Bedingungen. Danach werden für jede Klasse die Schalldruckpegeldämpfungsverteilungen für ein entsprechendes Untersuchungsgebiet berechnet. Durch die Verwendung des Schallstrahlenmodells SMART (Sound Propagation Model for the Atmosphere using Ray Tracing) ist es möglich, Inhomogenitäten im Wind- und Temperaturfeld einzubeziehen.

Um für derartige Untersuchungen statistisch gesicherte Aussagen über den Einfluss der Atmosphärenstruktur auf die Schallausbreitung vornehmen zu können, ist es nötig, Messungen über einen hinreichend langen und damit klimatologisch relevanten Zeitraum auszuwerten. Die Grundlage bilden die Messungen von Temperatur und Wind durch Radiosondenaufstiege an 13 Standorten. Diese Daten und die Analyse der darauf basierenden Schalldruckpegeldämpfungskarten dienen auch zur Einteilung des Staatsgebietes der Bundesrepublik Deutschland in schallklimatologisch ähnliche Gebiete (Regionalisierung). Die zweite Ebene des Verfahrens umfasst die Darstellungssoftware MetaVIS (Meteorological attenuation visualization). MetaVIS ist eine Oberfläche, über die ein Bearbeiter durch Vorgabe eines aktuellen vertikalen Wind- und Temperaturprofils, welches entweder aus Prognosemodellen oder aus Beobachtungsdaten entnommen wird, auf das entsprechende Schalldruckpegeldämpfungsfeld und den für die entsprechende Region typischen Bewertungskatalog in der Datenbank zugreift und diese zusammen mit weiteren Informationen visualisiert. Der Vorteil dieser Struktur besteht darin, dass die Oberfläche unabhängig von den physikalischen Berechnungsverfahren arbeitet. Bei Weiterentwicklung des Berechnungsverfahrens, die zu einzelnen Änderungen in den archivierten Schallfeldern führen kann, kann diese Änderung durch eine einfache Aktualisierung der Datenbank erfolgen (Wilsdorf et al., 2006b).

2 Schallstrahlenmodell SMART

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 dabei als ein horizontal homogen geschichtetes Medium betrachtet. Durch die Verwendung von geringen Schichtdicken (wenige Zentimeter) 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 tritt eine Refraktion des Schallstrahls auf. Die Schallstrahlen, deren Verlauf vom Modell SMART simuliert wurden, werden anschließend zur Bestimmung der Schalldämpfungspegel verwendet (siehe Ziemann, 2002; Ziemann, 2003). Da Schallstrahlen mit unterschiedlichen Emissionswinkeln unterschiedlich auf die meteorologischen Effekte (Ziemann et al., 2001) und den Boden (Ziemann und Balogh, 2004) reagieren, müssen möglichst viele Schallstrahlenverläufe berechnet werden. Das Schallstrahlenmodell SMART rechnet mit 2009 Schallstrahlen, wobei die Winkelauflösung immer höher wird, je horizontaler die Schallausbreitung erfolgt.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Schallausbreitung im Freien ist der Bodeneinfluss. Man unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen schallhartem und schallweichem Boden. An einem schallharten Boden wird demnach die gesamte auftreffende Schallenergie reflektiert, wohingegen an einem schallweichen Boden die Energie reflektiert und "absorbiert" wird (Balogh und Ziemann, 2005). Die in dieser Arbeit angewendete Version des Schallstrahlenmodells SMART rechnet mit einem schallharten Boden und führt damit zu einer maximalen Verstärkung der Schallintensität bei mehrfacher Bodenreflexion.

3 Klimatologie und Regionalisierung

3.1 Klassen und Klasseneinteilung

Um die Schallausbreitungsbedingungen für verschiedene meteorologische Gegebenheiten berechnen zu können, werden diese in verschiedene Klassen eingeteilt. Als Ergebnis von Sensitivitätsuntersuchungen wurde eine Klasseneinteilung für die Gradienten von Lufttemperatur (5 Klassen), Windgeschwindigkeit (13 Klassen) und Windrichtung (24 Klassen) vorgenommen. Eine weitere Unterteilung erfolgt anhand von Inversionsklassen, so dass letztendlich insgesamt 7 Temperaturklassen unterschieden werden (siehe Raabe et

al., 2000 und Ziemann et al., 2002). Bei einer geeigneten Kombination der Einzelprofile ergibt das eine Einteilung in 1551 verschiedene Profilklassen (Schallausbreitungsklassen) (Ziemann et al., 2002).

Untersuchungen haben gezeigt, dass das Auftreten der Schallausbreitungsklassen an den verschiedenen Orten keinesfalls gleich verteilt ist und dass neben den regionalen Unterschieden auch Abhängigkeiten bezüglich der Tageszeit (00 UTC oder 12 UTC) sowie der Jahreszeit, bestehen (Wilsdorf et al., 2006a).

In einer solchen statistischen Klassenanalyse besteht eine Möglichkeit, eine schallklimatologische Regionalisierung vorzunehmen. Als schallklimatologische Einheiten werden Gebiete bezeichnet, in denen für bestimmte Zeitabschnitte annähernd die gleichen Schallausbreitungsbedingungen herrschen. Eine umfangreiche Klassenstatistik auf der Basis dieser Überlegungen ist ein wesentlicher Bestandteil der Visualisierungssoftware MetaVIS (Wilsdorf et al., 2006a).

Eine weitere Möglichkeit einer schallklimatologischen Ähnlichkeitsuntersuchung, umfasst eine statistische Analyse von Schalldruckpegeldämpfungskarten, sowie eine direkte Untersuchung der berechneten Schalldruckpegeldämpfungen. Ähnlichkeit im Sinne einer solchen Untersuchung ist dann gegeben, wenn sich die Schalldruckpegelverteilungen zwischen verschiedenen Gebieten (Standorten) hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens nicht signifikant unterscheiden. Ein grundsätzliches Problem dabei ist, wie bei allen statistischen Untersuchungen, jedoch immer die Datenverfügbarkeit.

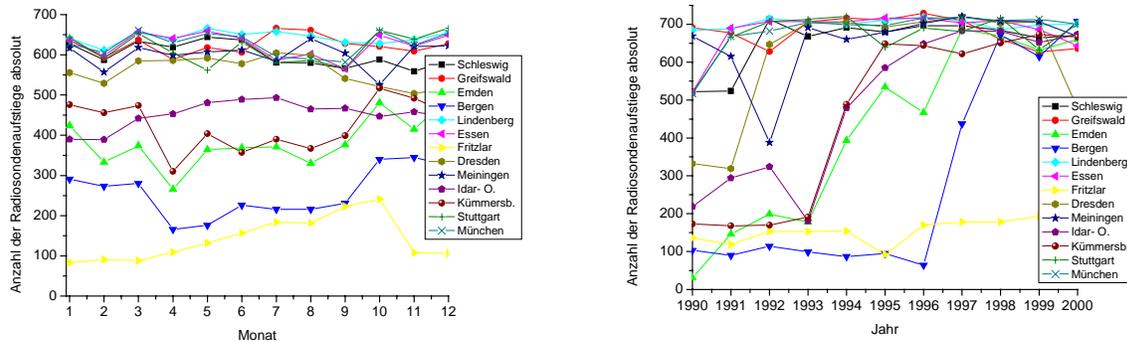
3.2 Datengrundlage und Datenverfügbarkeit

Grundlage der Berechnungen von SMART sind Daten aus Radiosondenaufstiegen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Bundeswehr (Bw) über einen klimatologisch relevanten Zeitraum von 11 Jahren (1990 bis 2000) an den obengenannten 13 Standorten Schleswig, Greifswald, Emden, Bergen, Lindenberg, Essen, Fritzlar, Dresden, Meiningen, Idar-Oberstein, Kümmersbruck, Stuttgart und München.

Die Radiosondendaten liefern für den Bereich Boden – Tropopause jeweils Werte auf den Standarddruckflächen (1000, 925, 900, 850 hPa ...), den Standardhöhen (500, 1000, 1500 m ...) und für weitere markante Punkte. Dabei erhält man für jedes Höhenniveau die meteorologischen Parameter: Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Diese Messungen sind nötig, da vor allem die Temperatur-, die Windgeschwindigkeitsprofile und damit auch die Windrichtungsprofile einen großen Einfluss auf die Schallausbreitung, speziell auf die Schallstrahlenrefraktion haben (Pierce, 1989).

Der gekoppelte Einfluss dieser vertikalen Gradienten wird durch ein einzelnes Profil nicht ausreichend beschrieben. Aus diesem Grund werden die Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsprofile getrennt betrachtet (siehe Raabe et al., 1998).

Um dabei statistisch abgesicherte Daten zu verwenden, wurde zunächst für jeden der 13 Standorte der Umfang der zur Verfügung stehenden Daten geprüft. Eine erste Prüfung erfolgte durch eine einfache Summation aller, je Ort zur Verfügung stehenden Daten.



a

b

Abb.1: (a) Vergleich der Anzahl der Radiosondenaufstiege an allen Standorten in Abhängigkeit vom Monat für den Zeitraum 1990 bis 2000, (b) Vergleich der Anzahl der Radiosondenaufstiege an allen Standorten in Abhängigkeit vom Jahr (Zeitraum 1990 - 2000) (Wildorf et al., 2005).

Zur weiteren Überprüfung der Datenbasis wurde für die ausgewählten Standorte die Anzahl der Radiosondenaufstiege pro Monat miteinander verglichen (siehe Abbildung 1a). Dabei ist festgestellt worden, dass nur geringfügige Schwankungen zwischen den einzelnen Monaten existieren, und somit die Variationsbreite der Anzahl der Radiosondenaufstiege im Wesentlichen durch die Gesamtanzahl der verfügbaren Daten bestimmt wird.

Eine besonders kleine Datenmenge ist an der Station Fritzlar aufgezeichnet worden. Die Datenmenge dieser Station liegt im Vergleich zu dem Ort mit der größten Datenverfügbarkeit Lindenberg bei etwas mehr als 20%. Die Abbildung 1b veranschaulicht, dass die Datenverfügbarkeit innerhalb des ausgewählten Zeitraumes zum Teil sehr starken Schwankungen in den einzelnen Jahren unterworfen ist. So liegen an einigen Radiosondenstationen für die Jahre von 1990 bis 1993 (Fritzlar) bzw. in Bergen bis 1996 nur wenige Daten vor. Erst zum Ende des Untersuchungszeitraumes konnte an fast allen Stationen eine nahezu vollständige Beobachtung realisiert werden.

Des Weiteren hat eine Untersuchung hinsichtlich der Tageszeit ergeben, dass keine markanten Unterschiede, in der Beobachtungsdichte an den Stationen, zwischen Tag (12 UTC) und Nacht (00 UTC) zu verzeichnen sind.

3.3 Analyse der Schalldruckpegelverteilungen

Für alle zur Verfügung stehenden Daten wurden zunächst mit dem Schallstrahlenmodell SMART die Gesamtschalldruckpegeldämpfungen in einem Gebiet von 15 km Radius um den Emissionsort berechnet. Als Emissionsniveau wurde die Erdoberfläche gewählt. Das Immissionsniveau wurde in einer Höhe von 2 m über dem Boden festgelegt. Berechnet

wurde die Schalldruckpegeldämpfung bezogen auf einen Referenzschalldruckpegel im Abstand von einem Meter von der Schallquelle in Abhängigkeit von der Schallstrahlenrefraktion und der Bodenreflexion.

Die Verteilungen der Dämpfung des Schalldruckpegels wurden über den betrachteten Zeitraum für die einzelnen Monate, für die einzelnen Jahreszeiten und die gesamten Jahre arithmetisch gemittelt. Weiterhin ist eine Unterscheidung bei der Untersuchung der einzelnen Orte nach der Tageszeit in tagsüber (12 UTC), nachtsüber (00 UTC) sowie tags- und nachtsüber (Mittelwert aus tagsüber und nachtsüber) vorgenommen worden. Für die vergleichende Beurteilung der errechneten Schalldruckpegeldämpfungen wurde die Darstellung mit Hilfe eines Krigingverfahrens (Interpolationsverfahren mit Microcal Origin™) als Isolinien – Abbildung gewählt.

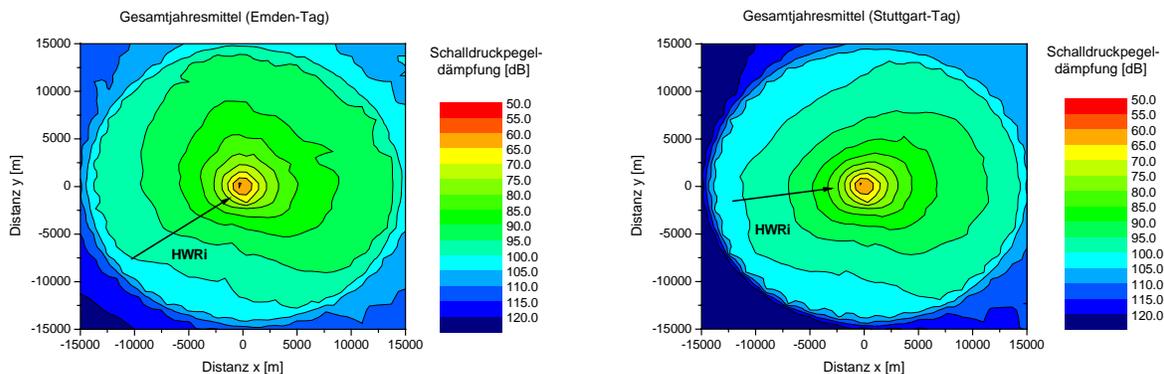


Abb.2: Vergleichende Darstellung der Gesamtschalldruckpegeldämpfungen im Gesamtjahresmittel für die Orte Emden (Hauptwindrichtung [HWRi] SW) und Stuttgart (Hauptwindrichtung [HWRi] W) im Zeitraum 1990-2000 (Schallquelle im Zentrum)(Wilsdorf et al., 2006b).

Exemplarisch ist in Abbildung 2 ein Vergleich der Schalldruckpegeldämpfungen (im Gesamtjahresmittel), der Orte Emden und Stuttgart, dargestellt.

Bei der Farbwahl für die Dämpfungskarten wurden rote und rötliche Farbtöne kleinen Schalldruckpegeldämpfungen zugeordnet. Mit zunehmender Dämpfung variiert der Farbton über grün zu blau (Wilsdorf et al., 2006b).

Derartige Schalldruckpegeldämpfungskarten lassen Aussagen über eine schallklimatologische Unterscheidung oder Ähnlichkeit von Ortschaften und Gebieten zu. Diese Karten ermöglichen aber auch Rückschlüsse auf den Einfluss meteorologischer Parameter auf die Schallausbreitung an einem Ort. Von einer Schallquelle ausgehende Schallstrahlen werden in Mitwindrichtung zum Erdboden hin und in Gegenwindrichtung vom Erdboden weg gebrochen (siehe z.B. Balogh et al., 2004). Demzufolge lassen sich aus diesen Karten Rückschlüsse auf die Hauptwindrichtung ziehen. Ein Vorherrschen von westlichen Windrichtungen ist üblich für Deutschland und spiegelt sich in den Dämpfungskarten wieder.

Sehr gut sind in Mitwindrichtung der Schallquelle Farbabstufungen zu erkennen, welche für eine geringere Dämpfung und damit für eine höhere Schallimmission stehen (siehe Abbildung 2, 3). In beiden Abbildungen ist aber auch ein deutlicher, regional bedingter, Unterschied zu erkennen.

Bei einem jahreszeitlichen Vergleich der Dämpfungskarten von einem Ort gelangt man zu der Erkenntnis, dass besonders im Frühling und Sommer höhere Dämpfungen des Schallpegels auftreten (siehe Abbildung 3, am Beispiel München).

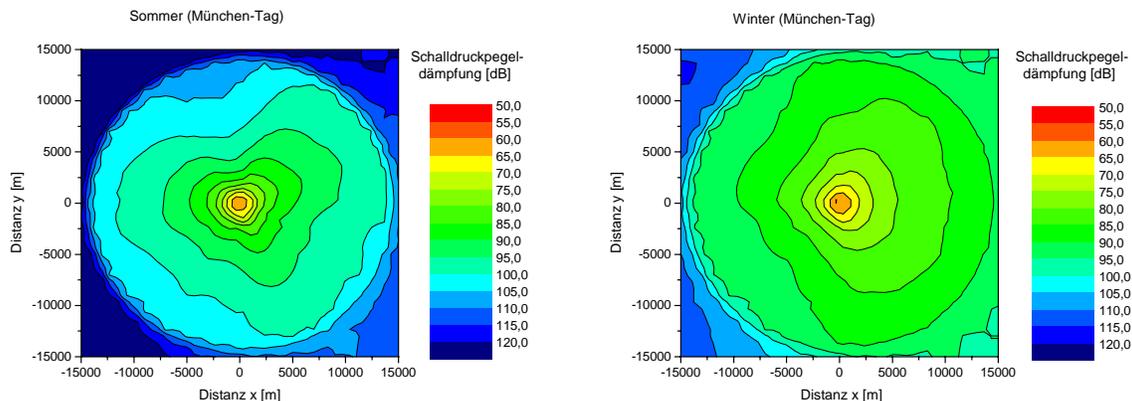


Abb.3: Vergleichende Darstellung der Gesamtschalldruckpegeldämpfungen im Sommer (Juni, Juli, August) und im Winter (Dezember, Januar, Februar) für den Ort München im Zeitraum 1990-2000 (Schallquelle im Zentrum) (Wilsdorf et al., 2006b).

Die Ursache dürfte in dem Einfluss des Temperaturgradienten liegen, da im Winter häufiger stabile Schichtungen in der bodennahen Atmosphäre auftreten. Bei stabiler Schichtung und geringem Windeinfluss werden die Schallstrahlen von der Atmosphäre in Richtung Erdoberfläche gebrochen. Das bedeutet eine geringere Dämpfung und damit eine größere Schallimmission (siehe z.B. Balogh et al., 2004).

Diese Ergebnisse finden sich ebenfalls in den Karten der meteorologisch bedingten Zusatzdämpfung wieder, welche für jeden verfügbaren Datensatz berechnet wurden, um den Einfluss der Atmosphäre zu verdeutlichen. Dies geschieht, indem man die Schalldruckpegeldämpfungen für eine Atmosphäre ohne Vertikalgradienten bestimmt und diese von den ermittelten Dämpfungen abzieht. Ebenfalls zu diesen Ergebnissen kommt man bei einer Untersuchung der jahreszeitliche Variation der Schalldruckpegeldämpfung (Differenz aus dem Mittel der Jahreszeit und dem Gesamtjahresmittel), sowie bei der monatliche Variation der Dämpfung (Differenz aus den Monatsmitteln und den Jahresmittel). Diese Darstellungen dienen damit zu einer feineren Herausarbeitung der regionalen und jahreszeitlichen Unterschiede bei der Schallausbreitung.

Ein anderer Weg zur schallklimatologischen Regionalisierung eines großen Gebietes, welches viele Messstationen mit unterschiedlichen Datenmengen beinhaltet, ist die direk-

te Untersuchung von berechneten Datenreihen der Schalldruckpegeldämpfungen. Die erarbeiteten Dämpfungskarten lassen sich dann als eine weitere Kontrolle verwenden. Bei allen Untersuchungen anhand berechneter Schalldruckpegeldämpfungen ist allerdings die unterschiedliche Datenverfügbarkeit zu berücksichtigen.

3.4 Regionalisierung anhand der Schalldruckpegeldämpfungen

Die Regionalisierung anhand der Schalldruckpegeldämpfungen erfolgt durch den Vergleich der Schalldruckpegeldämpfungen zweier Orte zu einem Zeitpunkt, jedoch werden etwaige Unterschiede oder Gemeinsamkeiten quantitativ ausgewertet.

Zunächst werden die Datenreihen, bestehend aus jeweils 2124 Werten zweier Orte paarweise subtrahiert. Die entstandene Differenz wird nun dahingehend untersucht, ob sie innerhalb (kleiner) oder außerhalb (größer) eines bestimmten Grenzwertes liegt. Dieser Grenzwert liegt im allgemeinen bei 3 dB. In der Literatur (z.B. ISO 9613-2, 1999) wird dieser Wert als geschätzte Pegelgenauigkeit für eine Schallausbreitungssituation mit einer mittleren Höhe von Sender und Empfänger zwischen 0 m und 5 m sowie einem Sender-Empfänger-Abstand von 100 m bis 1000 m angegeben. Unsere Berechnungen gelten für wesentlich größere Entfernungen, so dass ein Wert von ± 3 dB die Untergrenze darstellt. Danach erfolgt eine prozentuale Auswertung der Häufigkeit der Grenzwertüberschreitung. Sollte diese Auswertung ergeben, dass 75 % der Werte innerhalb der Grenze liegen, gelten die beiden untersuchten Orte als schallklimatologisch ähnlich. An dieser Stelle ist die unterschiedliche Datenverfügbarkeit der Messstationen zu berücksichtigen.

Unterschiedlich große Datenmengen werden über eine Korrektur des oben erwähnten 3dB-Grenzwertes wie folgt mit einbezogen. Man bestimmt zunächst das rechnerisch mögliche Optimum der Datenmenge. Das Optimum ergibt sich aus 365 Tagen mal 11 Jahre zu einem Wert von 4015 möglichen Messungen je Tageszeit. Weiterhin wurde festgestellt, wie viele Messungen pro Station durchgeführt worden sind. Damit erhält man eine Prozentverhältnis zum Optimum im entsprechend relevanten Zeitraum. Diese Art der prozentualen Überprüfung der Datenverfügbarkeit erfolgt für jeden Ort. Anschließend wird für jede Station deren spezieller Grenzwert bestimmt, indem die jeweiligen Prozente auf eins normiert und mit dem allgemeinen Grenzwert von 3 dB multipliziert werden. Abschließend werden die Grenzwerte für den Vergleich der Orte untereinander festgelegt. Dies geschieht durch einfache Mittelung des Grenzwertes von Ort A mit dem von Ort B. Dieser Vergleichsgrenzwert wird schließlich bei der Ähnlichkeitsbestimmung genutzt. Eine derartige Grenzwertkorrektur wurde in analoger Weise für die Messperioden Nacht (00 UTC) sowie Tag und Nacht (12 UTC + 00 UTC) durchgeführt. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die hier berechneten Grenzwerte, vor allem in ihrer Genauigkeit, keinesfalls absolute Dämpfungsunterschiede zwischen den Orten darstellen, sondern einen rein vergleichenden Charakter haben.

Aus der gesamten Ähnlichkeitsuntersuchung der Schalldruckpegeldämpfungen resultiert eine Regionalisierung des Staatsgebietes der Bundesrepublik Deutschland (siehe Abbildungen 4) in schallklimatologisch ähnliche Gebiete (Wilsdorf et al., 2006b).

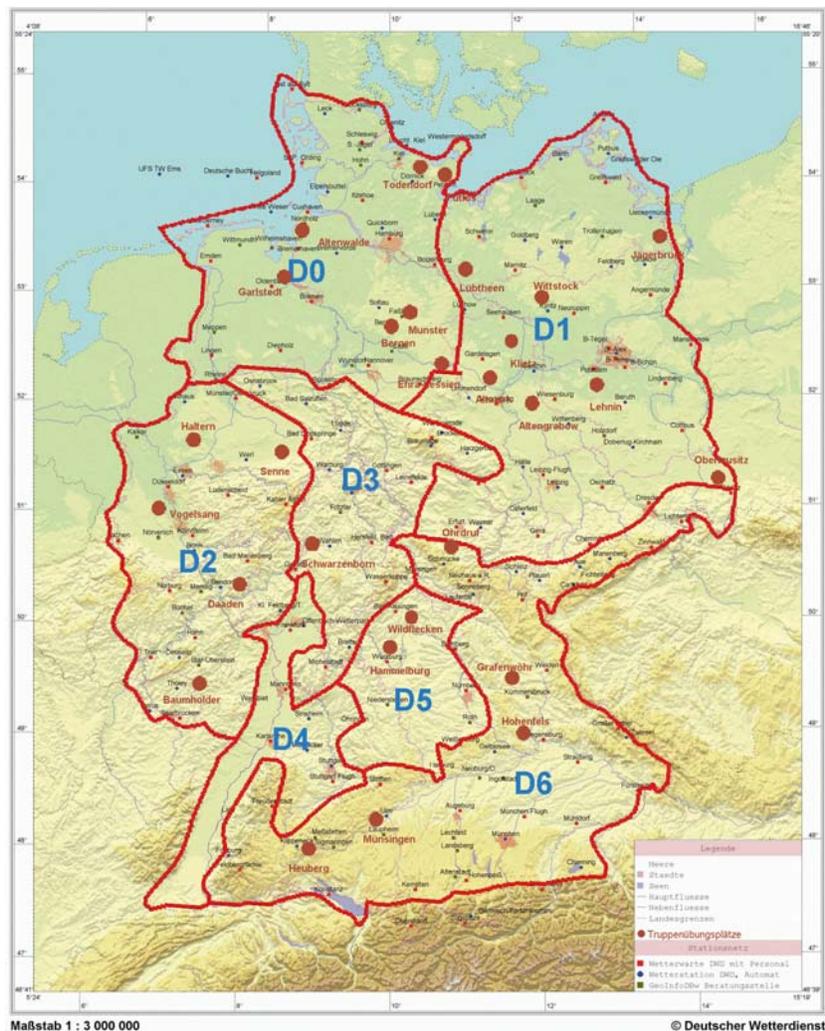


Abb.4: Darstellung der Regionalisierungskarte für „Tag und Nacht“ bei einer Ähnlichkeitsbedingung von 75 % (Wilsdorf et al., 2006b).

Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass für eine völlig neue und eigenständige Einteilung keinesfalls genug Messstationen zur Verfügung standen, so dass eine Anpassung an die Einteilung des Territoriums der Bundesrepublik Deutschland in Meteorologische Beratungsräume entsprechend des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (Karte SK-20-K/MBR) erfolgte.

Ein Ziel dieser Regionalisierung war die Verringerung der bestehenden Beratungsräume. Dies wird möglich, indem man bei festem Grenzwert die Ähnlichkeitsbedingung möglichst niedrig setzt. Bei einer Ähnlichkeitsbedingung von 50 % verringert sich die Anzahl der Beratungsräume von ehemals zehn deutlich. So ergibt sich für die Nacht eine Einteil-

lung in nur drei Gebiete. Für den Tag werden sieben Beratungsräume ermittelt. Dieser Umstand macht aber auch deutlich, dass zwischen Tag und Nacht starke Unterschiede in der Gebietseinteilung bestehen. Dieser Umstand ist eindeutig die Folge der voneinander abweichenden atmosphärischen Bedingungen (Temperatur- und Windprofil), welche zu den Messzeitzeiten 12 UTC und 00 UTC bestehen. Des weiteren ist die Einteilung bei einer Ähnlichkeitsbedingung von 50 % keineswegs zwingend, da es möglich bleibt, die verschiedenen Radiosondenstationen mehreren Beratungsräumen zuzuordnen.

Um eine fundierte Aussage zur Gebietseinteilung machen zu können, ist es daher notwendig die Ähnlichkeitsbedingung heraufzusetzen. Damit erreicht man auf der einen Seite eine eindeutigere Feststellung, welche Station in welches Gebiet gehört und damit eine Abgrenzung der Gebiete. Auf der anderen Seite erhöht sich bei einer Ähnlichkeitsbedingung von 75 % die Anzahl der Beratungsräume auf sechs in der Nacht und neun am Tag. Unter praktischen Gesichtspunkten, sowie aus Gründen der Übersichtlichkeit und einfacheren Handhabung ist schließlich eine Karte (s. Abbildung 4) für die Einteilung der Bundesrepublik Deutschland in schallklimatologisch ähnliche Gebiete entstanden, welche das endgültige Ergebnis darstellt. Diese Karte beinhaltet den gesamten Zeitraum "Tag und Nacht", und ergibt sich als ein Mittel aus der Auswertung "Tag" und "Nacht". Diese Karte stellt damit einen Kompromiss dar, da die gesamten Untersuchungen gezeigt haben, dass zwischen Tag und Nacht zum Teil erhebliche Unterschiede bestehen. Im Ergebnis ist sie jedoch unabhängig von der Tageszeit einsetzbar und die ursprünglichen zehn Beratungsräume sind auf sieben reduziert worden (Wilsdorf et al., 2006b).

4 Darstellungssoftware MetaVIS

MetaVIS – **M**eteorological **a**ttenuation **V**ISualization – ist eine plattformunabhängige, übersichtliche und intuitiv bedienbare Darstellungssoftware, die die rasche Bewertung einer aktuellen Schallausbreitungssituation ermöglicht. MetaVIS wurde in der sogenannten Expertenversion (s. Abbildung 5a) und einer Feldversion (s. Abbildung 5b), deren Funktionsumfang eingeschränkt wurde, programmiert. Der wesentliche Unterschied besteht, im auf die Bedürfnisse des Beratungsdienstes, reduzierten Funktionsumfang der Feldversion. Beispielsweise werden verschiedene statistische Zusatzinformationen und die meteorologischen Vertikalprofile nicht dargestellt und die Wiedergabe der Schalldämpfung wurde auf die maximale Auflösung fest eingestellt. Als Basis für MetaVIS dient eine Datenbank mit synthetischen und realen Vertikalprofilen von Wind und Temperatur und den daraus mit SMART errechneten Schalldruckpegeldämpfungen.

Nach der Vorgabe eines aktuellen Vertikalprofils von Temperatur und Wind gleicht MetaVIS dieses mit der Datenbank ab und stellt das entsprechende Feld der Schalldruckpegeldämpfung dar. Die implementierte Bewertung der Schallausbreitungssituation erfolgt einerseits über die statistische Beurteilung der Wettersituation an einem Ort, in Form der

Häufigkeit des Auftretens dieser Profilkategorie und andererseits über die Kennzeichnung kritischer Gebiete mit verstärkter Schallimmission (siehe Ziemann et al., 2004).

Damit ist es möglich, ohne die Schallausbreitung erneut zeitaufwändig zu berechnen, eine Bewertung der aktuellen Schallausbreitungssituation vorzunehmen. Aus diesem Grund eignet sich MetaVIS hervorragend zur Anwendung als Routineverfahren für akustische Messungen. Für detailliertere Informationen sei auf Wilsdorf et al., 2006b verwiesen.

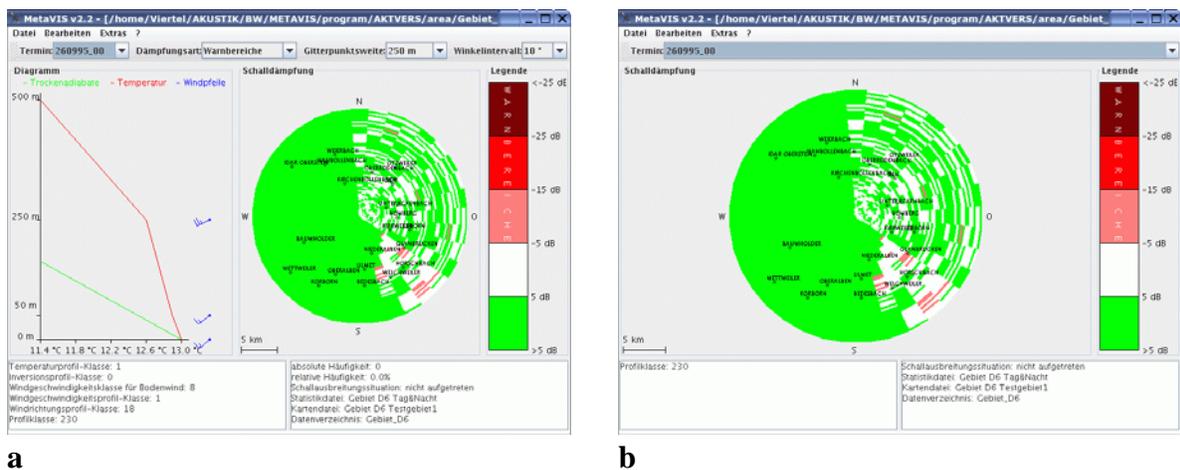


Abb.5: Beispielhafte Ansicht von MetaVIS in der Expertenversion (a) und in der Feldversion (b) (Wilsdorf et al., 2006b).

5 Validierung der Modellergebnisse

Für die Validierung der mit SMART errechneten Dämpfungspegel standen C-bewertete Schallpegel verschiedener Messungen auf dem Truppenübungsplatz Oberlausitz der Bundeswehr (Bw) zu Verfügung. Die Messungen wurden von einem Messtrupp der Bw im Zeitraum 03.08.1999 – 10.08.1999 durchgeführt und beinhalten Emissionssituationen mit verschiedenen Emittenten, Emissionsorten und Messreihenlängen. Im diesem Zeitraum wurden zwischen 05:00 UTC und 15:00 UTC zu jeder vollen Stunde Radiosonden zur Bestimmung der wesentlichen meteorologischen Größen gestartet. Die Messwerte liegen ebenfalls vor und dienen als Anfangswerte für die Berechnungen mit dem Schallstrahlmodell SMART.

5.1 Auswahl der Emissionssituationen und Mittelung

Für den Zeitraum der Messungen wurden 37 Emissionssituationen spezifiziert, für die bestimmte Konstellationen von bis zu sieben Messpunkten, Emissionsorten und Emittenten charakteristisch sind. Von diesen Emissionssituationen wurden diejenigen mit definiertem Emissionsort und mindestens drei Messpunkten mit verwertbaren Werten ausgewählt.

Letztendlich blieben 18 Emissionssituationen, die sich unter diesen Voraussetzungen für eine vergleichende Begutachtung der Modellwerte eigneten.

$$L_m = 10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \quad (1)$$

Zu den verschiedenen Emissionssituationen wurden jeweils zwei Messserien an unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Die einzelnen Messwerte (Schallpegel) der Messserien der jeweiligen Messpunkte wurden dem Messprotokoll entnommen und unter Verwendung von Gleichung (1) gemittelt. Den Messserien der Emissionssituationen wurden die zeitlich am nächsten erfolgten Radiosondenaufstiege zugeordnet.

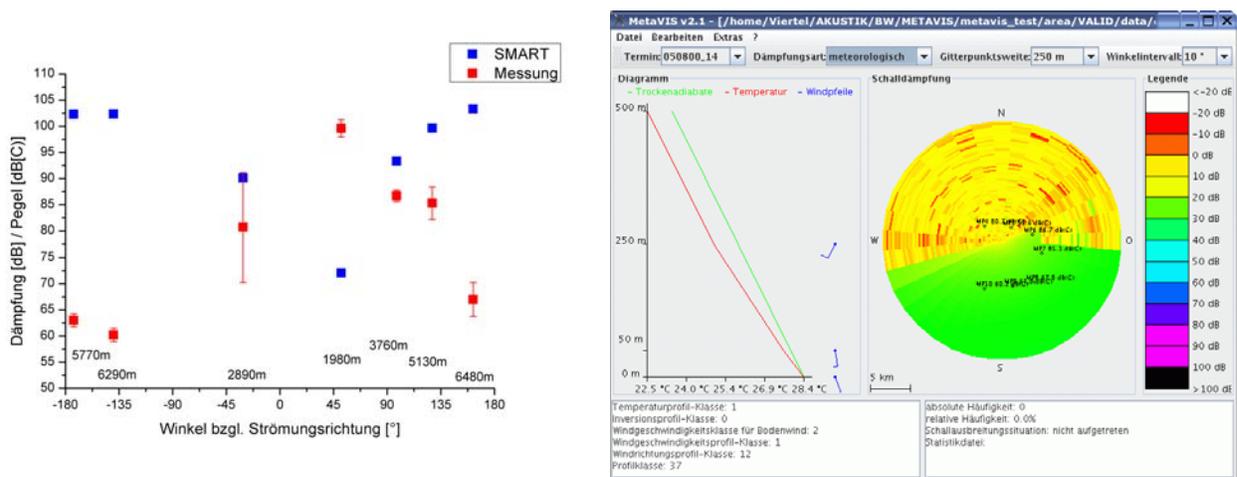
5.2 Vergleich der Messwerte mit den Modellwerten

Nach der Berechnung der Schallpegeldämpfungen mit SMART wurden anhand der Koordinatenabstände der Emissionsorte und der zugehörigen Messpunkte der jeweiligen Emissionssituation diejenigen Berechnungspunkte aus dem Dämpfungsfeld ausgewählt, die für die Messpunkte repräsentativ sind. Um die geringe Anzahl von Vergleichspunkten nicht noch weiter nennenswert zu dezimieren, mussten die Grenzen des akzeptierten Bereichs der horizontalen Koordinaten auf maximal ± 500 m festgelegt werden.

Daraus resultieren Wertepaare, deren Vergleichbarkeit erheblich erschwert ist. Einerseits können bewertete Gesamtschallpegel und Schalldämpfungen nicht quantitativ verglichen werden. Es ist nicht möglich, nachträglich auf einen unbewerteten Gesamtschallpegel zu schließen. Zudem stehen die Quellpegel nicht zur Verfügung. Andererseits wurden viele Messserien nicht im unmittelbaren Zeitraum der Radiosondenaufstiege aufgenommen. Durch den maximalen zeitlichen Abstand von 30 Minuten können in der atmosphärischen Grenzschicht wesentlich geänderte meteorologische Bedingungen auftreten. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Repräsentativität der Radiosondenaufstiege für alle Punkte der Messkonfigurationen gewährleistet ist.

Da die Validierung der Modellergebnisse nur qualitativ erfolgen kann, wurde eine graphische Auswertung gewählt. Zur Einbeziehung der Richtungsabhängigkeit der Schallausbreitung wurden für die jeweiligen Emissionssituationen und Messserien die Winkel der Messpunkte bezüglich des Emissionsortes und der Windrichtung am Boden berechnet. Ein Winkel von 0° bedeutet, dass der Messpunkt stromab des Emissionsortes liegt. Winkel von 90° und 180° bezeichnen Richtungen seitlich bzw. stromauf. Ebenso wurden die Entfernungen zwischen den Messpunkten und den Emissionsorten bestimmt. Die Darstellung der Schalldämpfung und Schalldruckpegel erfolgt in Abhängigkeit der errechneten Winkel. Zur besseren Beurteilung der Beträge der Einzelwerte wurden die Entfernungen zwischen den Messpunkten und den Emissionsorten in die Darstellung einbezogen.

In den Diagrammen sind die Datenpunkte der Messungen mit den aufgetretenen Spannweiten in Form von Fehlerbalken versehen. Aufgrund der Art der Validierung kann keine Aussage darüber getroffen, inwieweit die modellierten Werte im Bereich der Messungen liegen. Eine Aussage über die Genauigkeit der Modellergebnisse ist kaum möglich, da im Modell verschiedene Vereinfachungen und Annahmen zur Anwendung gelangen, deren Einfluss auf das Ergebnis separat betrachtet und deren Wirkung auf andere Vereinfachungen und Annahmen analysiert werden müsste. Beispielweise ist eine Betrachtung jeder einzelnen Gitterzelle nötig, da die Anzahl der dort ankommenden Schallstrahlen unterschiedlich ist. Weiterhin wird derzeit von SMART die Oberfläche des Bodens als homogen betrachtet. Neben der detaillierten Beschreibung der Oberfläche des Gebietes ist eine Analyse der Abweichung von Dämpfung und Reflexion der Schallstrahlen vom realen Verhalten nötig. Turbulenz spielt bei der Schallausbreitung eine nicht zu vernachlässigenden Rolle; wird aber derzeit in SMART nicht berücksichtigt (Wilsdorf et al., 2006b).



a

b

Abb.6: (a:) Beispielhafte Gegenüberstellung von Dämpfungs- und Schallpegel in Abhängigkeit der Richtung der Messpunkte (Winkel zur Windrichtung in 10 m, 0° - stromab, 180° - stromauf), Entfernung der Messpunkte zum Emissionsort, Messserie 05.08.1999 14:15-14:24 UTC, Radiosonde 14:00 UTC, Bodenwind 160° 4 kt, Daten: SMART, Bw; (b:) Darstellung des von SMART berechneten meteorologischen Dämpfungsfeldes dieser Emissionssituation in MetaVIS.

In Abbildung 6a sind beispielgebend die berechneten Dämpfungspegel und die gemessenen Schallpegel einer Emissionssituation dargestellt. Die Messserie erfolgte am 05.08.1999 in der Zeit von 14:15-14:24 UTC. Als Eingangsdaten für SMART wurden die Werte des Radiosondenaufstiegs von 14:00 UTC verwendet. Das Beispiel wurde infolge nur wenig veränderter meteorologischer Bedingungen in der atmosphärischen Grenzschicht (Wind 10 m: 160°, 4 kt; Wind 450 m: 205°, 10 kt; vertikaler Temperaturgradient ca. -1,1°C/100m) zwischen 14:00 und 15:00 UTC gewählt.

Als prinzipielle qualitative Aussage einer derartigen Form der vergleichenden Betrachtung gilt, dass einer hohen Schalldämpfung ein niedriger Schallpegel und umgekehrt gegenübersteht. Das bedeutet, dass sich bei abnehmendem Schallpegel die Dämpfung erhöhen muss. Bei zunehmendem Schallpegel sollte sich die Dämpfung verringern. Dies wird anhand Abbildung 6a sehr gut deutlich.

Weiterhin wird deutlich, dass für die Messpunkte stromaufwärts ($\pm 135^\circ$ - 180°) von SMART relativ hohe Dämpfungen berechnet wurden und gleichzeitig die Messung der Schallpegel relativ kleine Werte zeigt. Diese Wertepaare sind gut vergleichbar, da sie neben dem gleichen Richtungsbereich auch etwa in dem gleichen Entfernungsbereich zur Schallquelle liegen. Weiterhin ist die Winddrehung mit der Höhe moderat, sodass vom Modell der gesamte Richtungsbereich als Schallschatten berechnet wird. Abbildung 6b zeigt die graphische Darstellung des von SMART berechneten meteorologischen Dämpfungsfeldes dieser Emissionssituation in MetaVIS.

Zwei weitere gut vergleichbare Wertepaare liegen im Bereich von etwa $\pm 45^\circ$. Sowohl bei den Modellwerten als auch bei den Messungen beträgt die Differenz ca. 20 dB. Der hohe Schallpegel bei $+45^\circ$ kann mit der Winddrehung mit der Höhe nach rechts und dadurch begünstigte Schallausbreitung und der geringeren Entfernung zur Schallquelle begründet werden (siehe Abbildung 6b). Allerdings muss die große Streuung der Messwerte bei -45° berücksichtigt werden. Die beiden Wertepaare zwischen 90° und 135° sind schwieriger zu beurteilen, jedoch kann festgestellt werden, dass die Tendenz der Änderung des Dämpfungspegels in beiden Fällen entgegen der Tendenz des gemessenen Schalldruckpegels verläuft und somit vom Modell qualitativ richtig wiedergegeben wird.

5.3 Fazit

Anhand des genannten Beispiels wird deutlich, dass SMART gegebene Schallausbreitungssituationen sehr gut abbilden kann. Der Einfluss der Atmosphäre auf die Schallausbreitung wird deutlich und lässt sich sehr gut nachvollziehen. Allerdings lässt diese Art der Validierung der Modellergebnisse keine quantitativen Aussagen zu.

Daher ist es sinnvoll, eine Serie von Messungen speziell zu diesem Zweck durchzuführen. Neben einer ortsfesten Schallquelle mit konstantem Schallpegel ist ein möglichst dichtes Mikrofonmessnetz mit mindestens 10 Empfängern in verschiedenen Abständen und Richtungen zur Schallquelle wünschenswert. Der Untergrund sollte bezüglich der thermodynamischen und akustischen Eigenschaften möglichst homogen sein. Die Schallpegel sind unbewertet zu erfassen. Weiterhin sollte eine möglichst zeitlich und räumlich vertikal hoch aufgelöste Erfassung der vertikalen Profile von Temperatur und Windvektor erfolgen. Um die Ungenauigkeit der Berechnungen des Schallstrahlenmodells SMART abschätzen zu können, sollte eine umfangreiche Sensitivitätsstudie durchgeführt werden. Bei dieser Analyse wäre ein detailliertes Einbeziehen sowohl die meteorologischen Anfangswerte als auch die variablen Modellparameter, in die Untersuchung, sinnvoll.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen auf, dass es gelungen ist ein Verfahren zu entwickeln, welches die Einbeziehung der atmosphärischen Bedingungen in die Berechnung der Schallausbreitung und die routinemäßige Beurteilung der Schallausbreitungssituation ohne ständigen Rechenaufwand realisiert.

Es konnte festgestellt werden, dass mit der vorhandenen Anzahl an Radiosondenmessungen eine Regionalisierung hinsichtlich schallklimatologisch ähnlicher Gebiete für Deutschland möglich ist. Werden allerdings Schallausbreitungssituationen detaillierter betrachtet (z.B. differenziert nach Jahreszeiten und/oder Tag- und Nachtzeiten) wird deutlich, dass eine größere Anzahl an Radiosondenstationen genauere Unterscheidungen ermöglicht hätten.

Weiterhin wurde deutlich, dass das Schallstrahlenmodell SMART gegebene Schallausbreitungssituationen sehr gut abbilden kann. Unter komplexen meteorologischen und Umgebungsbedingungen nimmt allerdings die Genauigkeit des modellierten Abbildes der Schallausbreitungssituation deutlich ab. Die Ursachen dafür liegen z.B. in der derzeit nicht in SMART implementierten Berücksichtigung inhomogener Oberflächeneigenschaften des Bodens und des Einflusses der Turbulenz auf die Schallausbreitung.

7 Danksagung

Hiermit danken wir dem Bundesministerium für Verteidigung (Auftragsnummer: E/E 91 S/4A551/3F093) für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

8 Literatur

- Balogh, K., Ziemann, A., Arnold, K. und Raabe, A.,** 2004: Meteorologischer Einfluss auf die Schallausbreitung in einem bestimmten Gebiet, Tagungsbericht DACH, Karlsruhe
- Balogh, K. u. Ziemann, A.,** 2005: Einfluss von Atmosphäre und Boden auf die Schallausbreitung im Freien. Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 36, S.11-26
- Delany, M.E. und Bazley, E.N.,** 1970: Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Applied Acoustics 3, , 105-116.
- 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, S. 303-306.
- Pierce, A. D.,** 1989: Acoustics. An Introduction to its physical principles and applications. Acoustical Society of America, New York, 678 S..
- 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, 46 S..
- Wilsdorf, M., Ziemann, A., Balogh, K. und Arnold, K.,** 2005: Meteorologisches Beratungsverfahren für akustische Messungen bei der Bundeswehr. Zwischenbericht zum Auftrag E/E91S/4A551/3F093.
- Wilsdorf, M., Ziemann, A. und Balogh, K.,** 2006a: Regionale Unterschiede der Schallimmission durch den Einfluss von Wind und Temperatur. Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 37, S.89-99
- Wilsdorf, M., Viertel, R., Ziemann, A. und Raabe, A.,** 2006b: Meteorologisches Beratungsverfahren für akustische Messungen bei der Bundeswehr. Abschlussbericht zum Auftrag E/E91S/4A551/3F093.
- Ziemann, A., Arnold, K., und Raabe, A.,** 2001: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen beim Lärmschutz, Wiss. Mit. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 22, S. 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., Arnold K. und Armin R.,** 2004: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Abschlussbericht zum Auftrag E/F360/X5144, 74 S..
- 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.,** 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.

Adressen der Autoren

Michael Wilsdorf (mwils@uni-leipzig.de)
René Viertel (viertel@uni-leipzig.de)
Armin Raabe (raabe@uni-leipzig.de)