

Auf der Suche nach einem „best practice model“ für die Schallausbreitung oder wie vergleicht man Schallausbreitungsmodelle

Karl-Wilhelm Hirsch¹, Berthold Vogelsang²

¹*Cervus Consult, Willich, consult@cervus.de*

²*Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz, Hannover, Berthold.Vogelsang@mu.niedersachsen.de*

Einleitung

Die Berechnung der Schallausbreitung im Freien ist unter verschiedenen, gegebenenfalls widerstrebenden Gesichtspunkten eine bleibende Herausforderung. Physikalische Beschreibungen der Schallausbreitung führen zu komplexen Modellen mit detaillierten Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Eingangsdaten bezüglich Orografie, Atmosphäre, Boden und Quelleigenschaften. Die langen Rechenzeiten beschränken ihren Einsatz auf besondere Fragestellungen bzw. auf Einzelpunktberechnungen. Technische Modelle hingegen nutzen einfache Ansätze zur Berücksichtigung der physikalischen Phänomene, pauschalisieren ihre wenigen Eingangsgrößen und liefern nach kürzester Rechenzeit Ergebnisse mit zweckgemäßer Zuverlässigkeit. Solche Modelle sind damit auch für die Berechnung von Lärmkarten geeignet, wie sie z. B. die Umgebungslärmrichtlinie vorschreibt; Sie werden aber auch im Rahmen eines ‚Integrativen Lärmmanagements‘ – ein Lärmmanagement, das mehrere unterschiedliche Geräuschquellenarten, die von einer Anlage ausgehen, berücksichtigt - benötigt. Wie aber lassen sich die verschiedenen Schallausbreitungsmodelle hinsichtlich ihres Anwendungszweckes untereinander vergleichen? Und wie kann ein solcher Vergleich das „best practice model“ liefern?

Um Modelle überhaupt vergleichen zu können, muss die Schallausbreitungssituation so beschrieben werden, dass daraus die Eingangsdaten für alle Modelle abzuleiten sind; Und zwar unabhängig davon, ob sie z. B. zur Beschreibung der Brechung in der Atmosphäre einen Krümmungsradius oder die Windkomponente in 10 m Höhe oder ein Schallgeschwindigkeitsprofil in Anlehnung an die Klassierung der TA Luft benötigen.

Es gibt nicht nur ein „best practice model“. Es hängt vom Zweck und dem Ziel seines Einsatzes ab. Für die Anwendung im Bereich der Umgebungslärmrichtlinie sind Langzeit-Mittelungspegel zu berechnen; für ein Lärmmanagement Mittelungspegel für Tagesabschnitte mit gleichen Schallausbreitungsbedingungen.

Ziel dieses Beitrags ist es deshalb nicht, ein „best practice model“ zu ermitteln, sondern eine Methode aufzuzeigen, mit der Kriterien für die Auswahl eines solchen Modells bereitgestellt werden.

Modellunabhängige Beschreibung einer Schallausbreitungssituation

Beim Vergleich von Modellen ist die modellunabhängige Beschreibung der Schallausbreitungssituation unverzichtbare Voraussetzung. Diese Beschreibung erfolgt in Kategorien und Unterkategorien (s. Tabelle 1), um die Aspekte der Schallausbreitung phänomenologisch zu gruppieren.

Kategorie	Unterkategorien		
	Quelle	Signalform	Richtwirkung
Geometrie	Quellstärke	Empfängerhöhe	Abstand
Atmosphäre	Quellhöhe	Luftabsorption	Streuung
Topographie	Refraktion	Geländerauigkeit	Schirmung
	Bodenabsorption		

Tabelle 1 Die wesentlichen Kategorien und Unterkategorien zur Beschreibung einer Schallausbreitungssituation

Die Festlegung jeder Unterkategorie definiert die Situation. Diese Festlegung kann zunächst nur in einer Metaebene erfolgen, weil die zu vergleichenden Modelle u.U. unterschiedliche Eingangsparameter zur ihrer quantitativen Festlegung haben. In der Metaebene werden die Angaben klassiert und textlich gekennzeichnet.

Die Unterkategorie ‚Refraktion‘, die hier stellvertretend für alle ‚eindimensional‘ und ‚dichte‘ klassierbaren Unterkategorien (auch Quellstärke, Luft- und Bodenabsorption, Streuung, Geländerauigkeit) angeführt wird, erhält die 7 Klassen nach Tabelle 2. Die Klassierung ist eindimensional, weil sich die Klassen durch einen Grob-/Kleiner-Vergleich ordnen lassen. Sie ist dicht, weil sich alle Refraktionen einordnen lassen: Die Klassenbreiten ergeben sich aus der Bedeutung der Nachbarklassen.

Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5	Klasse 6	Klasse 7
mitwind (nach unten)			umlaufend	gegenwind (nach oben)		
stark	moderat	schwach	schwach	stark	moderat	schwach

Tabelle 2 Eindimensionale, dichte Klassierung
Beispiel: Unterkategorie ‚Refraktion‘

Für die Unterkategorien der Kategorie Geometrie lässt sich ohne Weiteres keine ‚dichte‘ Klassierung angeben. Mit Blick auf den Modellvergleich werden diese Unterkategorien in der Metaebene durch eine sachgerechte Anzahl von Klassen klassiert.

Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
sehr nah	nah	mittel	weit	sehr weit

Tabelle 3 Eindimensionale, nicht dichte Klassierung
Beispiel: ‚Abstand‘

Welcher Abstand z. B. unter der Klasse ‚nah‘ beim Modellvergleich zu betrachten ist, hängt naturgemäß von der Anwendung des Modelle ab, s.u. Bei dieser Klassierung muss die Klassenbreite angegeben werden. Die ‚Unsicherheit der Beobachtung‘ ist eine typische Festlegung der Breiten in der Metaebene.

Die verbleibenden Unterkategorien Schirmung, Signalform und Richtwirkung sind bei der hier eingeführten Wortwahl weder eindimensional noch dicht zu klassieren. Entscheidend ist für diese Unterkategorien, dass ihre Klassierung für den Modellvergleich sachgerechte Testfälle liefert. Wieder liefern die ‚Unsicherheit der Beobachtung‘ die Klassenbreiten.

Klassierungen für die Unterkategorien Signalform, Richtwirkungen Streuung und alle der Kategorien Atmosphäre und Topographie haben eine Klasse ‚keine/nicht‘, die festlegt, dass die Unterkategorie keine Rolle spielt.

Eine Schallausbreitungssituation ist festgelegt, wenn für jede Unterkategorie eine Klasse gewählt wurde. Unterstellt man jeweils 5 Klassen bei den 12 Unterkategorien nach Tabelle 1 ergeben sich bereits $12^5 = 248.832$ Schallausbreitungssituationen in der Metaebene, die jeweils Testfälle für den Modell-Vergleich darstellen.

Anwendungsspezifische Klassierung

Modellvergleiche werden in der Regel für bestimmte Anwendungsfälle benötigt. Ein Vergleich von Modellen für Windkraftanlagen-geräusche wird sich von einem Vergleich für Straßenverkehrslärm grundsätzlich unterscheiden. Die Bedeutung der Klassen der nicht dichten Klassierungen ist deshalb anwendungsspezifisch. Für die beiden oben genannten Geräuscharten ist die Klasse ‚nah‘ der Unterkategorie Abstand sicher jeweils anders zu beschreiben. Ein wesentlicher Schritt zur Vorbereitung des Modellvergleichs ist deshalb die anwendungsspezifische Engführung, die für alle nicht vollständigen Klassierungen durchgeführt werden muss. Dazu sind auch die Klassenbreiten der unvollständig klassierten Unterkategorien einzubeziehen.

Modellspezifische Umsetzung der Klassierung

Die Umsetzung der Bedeutung der Klassen und der Klassenbreiten ist grundsätzlich modellspezifisch; sie ist ein Teil der Modellbildung, also der Umsetzung von Beobachtungen in Eingangsparameter des jeweiligen Modells. Während diese Modellbildung bei den geometrischen Unterkategorien trivial erscheint, weil sie modellübergreifend metrisch angegeben werden kann, ist die bei der Unterkategorie ‚Refraktion‘ z. B. durchaus eine komplexe Aufgabe.

Die im unteren Beispiel aufgenommen Modelle benötigen jeweils andere quantifizierbare Angaben zur Beschreibung der Refraktion. Das Kreisstrahlenmodell (CRM) benötigt einen Krümmungsradius. Das Harmonisemodell zwei Parameter für den Schallgeschwindigkeitsgradienten, das Modell der DIN ISO 9613-2 kennt nur die Einstellung ‚schallausbreitungsgünstig‘. Völlig unterschiedlich wird auch die Unterkategorie Bodenabsorption in den Modellen umgesetzt. Das CRM benötigt zwei komplexe Parameter eines Modells der Bodenimpedanz, Harmonoise einen Index, der aus einer textlichen Spezifizierung der Bodenart folgt und die DIN ISO 9613-2 die Angabe des Anteils ‚schallweichen‘ Bodens in den drei Bereichen ‚Quellnähe‘, ‚Ausbreitungspfad‘, ‚Empfängernähe‘.

Zweifellos ist eine tiefere Kenntnis der Modelle erforderlich, um die Umsetzung einer Klassenangabe mit Klassenbreite in Parameterbereiche ihrer Eingangsparameter sachgerecht durchzuführen. Diese Aufgabe fällt aber stets an, wenn man ein Modell anwendet.

Das Ergebnis aller Modelle für eine durch die Klassierung festgelegte Schallausbreitungssituation ist nicht ein einzelner Pegelwert sondern eine Pegelverteilung. Der Vergleich der Modelle je Schallausbreitungssituation führt also zu einem Vergleich von Verteilungen, die dann auch Aussagen darüber enthalten, die unsicher oder ‚präzise‘ ein Klassenmittelwert ist und welche Perzentile auftreten.

Diskussion eines Beispiels

Das hier diskutierte Beispiel stammt aus einer breiter angelegten, noch laufenden Studie, die 5 Modelle für die Verwendung in einem Lärmmanagement in unterschiedlichen, für den betrachteten Anlagenlärm relevanten Schallausbreitungssituationen vergleicht. Hier wird exemplarisch das Ergebnis einer einzigen Schallausbreitungssituation herausgegriffen, um das Verfahren zu beleuchten, nicht etwa, um den Vergleich zweckgerichtet zu diskutieren. Es soll hier auch nicht erläutert werden, warum diese Modelle ausgewählt wurden. Die in diesen Vergleich einbezogenen Modelle die DIN ISO 9613-2 und ihr alternatives Verfahren (ISO 9613 alt), das Harmonoise Modell (P2P-DLL Version 2.02), das CRM und das WinLarm Modell unterscheiden sich in vielen Aspekten durch ihrer Eingangsparameter zur Kennzeichnungen der Unterkategorien.

Es wird die Schallausbreitungssituation für eine ‚bodennahe‘ Industriequelle in einem ‚mittleren‘ Abstand in ‚mittlerer‘ Empfängerhöhe bei ‚mittlerer‘ Luft- und Bodenabsorption bei ‚moderatem Mitwind‘ betrachtet. Die Geometrie und die Luftabsorption wird modellübergreifend umgesetzt: Abstand 480 m bis 520 m, Quellhöhe 1 m bis 3 m, Empfängerhöhe 4 m bis 6 m, relative Luftfeuchtigkeit 70% bis 90%. (Die Klassenbreite für die beiden Höhen mögen nicht dem Prinzip der Beobachtungsunsicherheit entsprechen. Es sei aber angemerkt, dass eine Industriequelle in der Regel signifikant ausgedehnt ist und die Empfängerhöhe auch die Unsicherheit der Annahme eines ebenen Geländes auf dem Ausbreitungsweg berücksichtigt.)

Die moderate Mitwindrefraktion wird im CRM durch den Bereich des Krümmungsradius von 2 km bis 10 km, bei Harmonoise durch den Bereich 0,01 bis 0,06 des linearen (A) und, 0,00 bis 0,02 des logarithmischen (B) Koeffizienten des Schallgeschwindigkeitsgradienten, in WinLarm durch Mitwind 3 m/s bis 5 m/s umgesetzt. Die beiden ISO 9613 Modelle kennen nur die betrachtete Refraktionsklasse. Für den Boden werden die komplexen Koeffizienten des Impedanzmodells des CRM von $A = 0,03 e^{0,34j}$ bis $0,03 e^{0,42j}$ und $B = 0,09 e^{1,21j}$ bis $0,11 e^{1,47j}$ variiert; für Harmonoise der Bodenindex 4 bis 6 und für das bodensensitive ISO 9613 Modell $G = 0,7$ bis $0,9$ für alle drei G. Für den Vergleich wurde der $L_{Aeq,1s}$ gewählt, eine

Zielgröße, die alle Modelle als Mittelwert berechnen können; lediglich das WinLarm-Modell prognostiziert von vorneherein den Mittelwert des 10er Perzentils.

Abbildung 1 zeigt die sich für die 5 Modelle ergebenden Pegelverteilungen für 1000 Rechnungen der betrachteten Schallausbreitungssituation, wenn die Eingangsparameter bei Unterstellung jeweils einer Rechteckverteilung zufällig festgelegt werden.

Der Vergleich der Modelle beschränkt sich bei diesem Verfahren keineswegs auf die Gegenüberstellung von Differenzen der Mittelwerte der Prognosen. Es ist zu entnehmen, dass die beiden Modelle der DIN ISO 9613 und das WinLarm Modell eher weniger auf die Variation der Eingangsparameter reagieren. Das CRM und Harmonoise zeigen beide eine signifikant breitere und keineswegs ‚gaußsche‘ Verteilung. Der Median des CRM liegt deutlich unter dem von Harmonoise; dagegen liegt das 10er Perzentil des CRM Modells wiederum deutlich höher als beim Harmonoise Modell.

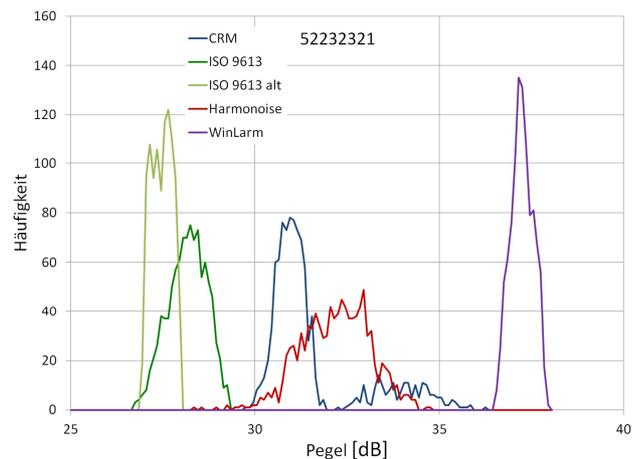


Abbildung 1 Verteilung der Prognosepegel, Klassenbreite 0,1 dB

Die Erfahrung bei einer Messung der Pegel bei der gegebenen Schallausbreitungssituation legt die Annahme nahe, dass eine Standardabweichung von 3 bis 5 dB zu erwarten ist. Das CRM Modell und das Harmonoisemodell prognostizieren anscheinend eine solche Schwankungsbreite deutlich besser als die DIN ISO 9613 Modelle. Dafür sind die DIN ISO 9613 Modelle signifikant präziser.

Zusammenfassung

Das vorgestellte Vergleichsverfahren für Schallausbreitungsmodelle nutzt eine Klassierung von Kategorien und Unterkategorien der Ausbreitungsphänomene, um in einer Metaebene eine Sammlung von Testfällen für den Vergleich bereitzustellen. Auf der Basis dieser Beschreibung können Schallausbreitungsmodelle auch mit unterschiedlichen Anforderungen an ihre Eingangsparameter ‚dieselbe‘ Schallausbreitungssituation berechnen.

Das Ergebnis der Berechnung einer klassierten Schallausbreitungssituation ist grundsätzlich eine eine Pegelverteilung. Diese Verteilungen liefern eine breite Grundlage für den Vergleich: Neben Einzelvergleichen können Perzentile, arithmetische und energetische Mittelwerte und andere Kenngrößen der Verteilung einbezogen werden. Suche nach einem zweckorientierten ‚best practice model‘ wird durch dieses Verfahren sachgerecht unterstützt.

Aus der Vergleich von Modellprognosen mit Messungen wird deutlich aussagekräftiger. Nicht nur, weil die Eigenschaften der Verteilung der Einzelmesswerte direkt mit den Aussagen der Modelle verglichen werden können. Die Metaebene liefert auch eine Vorlage zur Klassierung der Schallausbreitungsbedingungen während einer Messung. In der Praxis zeigt sich erfahrungsgemäß, dass eine stärker ins Detail gehende Beschreibung als die oben vorgestellte Klassierung auch durch eine messtechnische Beobachtung der Ausbreitungsbedingungen häufig nicht möglich ist. Würde man eine solche Klassierung standardisieren, wären Messungen und Modelle vergleichbarer und Ringversuche dazu möglich.