

Aspekte eines technischen Schallausbreitungsmodells für große Entfernungen

Karl-Wilhelm Hirsch

Institut für Lärmschutz, Düsseldorf, E-Mail: kwhirsch@ifl-acoustics.de

Einleitung

Technische Schallausbreitungsmodelle dienen in der Lärmakustik zur rechnerischen Bestimmung von Immissionspegeln bei komplexen Prognoseaufgaben, die z. B. von einer Vielzahl von Quellen geprägt sind. Ihre Grundlage sind stark vereinfachende Modellbildungen aus der physikalischen Akustik, deren eigene Modelle für komplexe Prognoseaufgaben nicht anwendbar sind, weil sie z.B. zu lange Berechnungszeiten erfordern. Technische Schallausbreitungsmodelle spiegeln also nicht den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis wieder, sondern stellen einen Kompromiss zwischen einer möglichst korrekten Modellierung der Ausbreitungsphänomene und den Anforderungen der Lärmprognose dar.

Die technischen Modelle sind durch Randbedingungen geprägt, die die Gültigkeit bzw. die Zuverlässigkeit ihrer Prognose einschränken. Die DIN ISO 9613 beschreibt ein solches technisches Modell, das in vielen Prognoseaufgaben erfolgreich, d.h. zweckmäßig im Hinblick auf eine Lärmprognose, eingesetzt werden kann. Dieses Modell ist u.a. beschränkt auf A-bewertete Langzeit-(Schalldruck)-Mittelungspegel, günstige Schallausbreitungsbedingungen, bodennahe Quellen und Entfernungen deutlich kleiner als 1 km.

Die gesteigerte Rechenleistung, aber auch der wissenschaftliche Fortschritt im Verständnis der Schallausbreitung im Freien haben zu weiteren technischen Schallausbreitungsmodellen geführt, z.B. [1]. Dabei wird unter Beachtung des jeweiligen Anwendungsbereiches versucht, den Kompromiss zwischen „Physik und Praxis“ in Richtung Physik zu verschieben. Das Harmonoise Modell zielt auf eine verbesserte Prognose der Verkehrsgeräusche ab. Die Anwendung für hochliegende Quellen oder große Entfernungen spielt dabei keine Rolle. Hier wird ein Ansatz vorgestellt, der im Wesentlichen darauf abzielt, die Beschränkungen der DIN ISO 9613 im Hinblick auf große Entfernungen, hochliegende Quellen und auf günstige Schallausbreitungsbedingungen zu überwinden.

Eingang des Zustands der Atmosphäre

Die Atmosphäre hat weitreichenden Einfluss auf die Schallausbreitung. Die Schallausbreitung findet in einem bewegten Medium statt, die lokale Luftfeuchtigkeit beeinflusst die lokale Luftabsorption, die Turbulenz führt zu Schallstreuung, der lokale Schallgeschwindigkeitsgradient führt zur lokalen Richtungsänderung des Energieflusses, um die Wesentlichen zu nennen. Um die Beschränkung der DIN ISO 9613 auf günstige Ausbreitungsbedingungen im Grundsatz aufzuheben, muss der Zustand der Atmosphäre Eingang in das Modell finden.

Wenn man sich auf die Begriffsbildung einlässt, dass die nullte Näherung ein Modell ohne Berücksichtigung des Schallgeschwindigkeitsgradienten, die erste Näherung einen konstanten Gradienten, die zweite Näherung einen nur höhenabhängigen und höhere Näherungen allgemein ortsabhängige Gradienten kennzeichnet, benötigt man zumindest die erste Näherung, um den Zustand der Atmosphäre in ein Modell einzuführen. (Die Luftabsorption wird in der DIN ISO 9613 - im Sinne der oben verwendeten Begriffsbildung - bereits in erster Näherung beschrieben.)

Ein konstanter Gradient bedeutet eine konstante Krümmung; der Schallstrahl breitet sich in diesem Modellansatz auf einer Kreisbahn aus. Der Krümmungsradius ist also der Parameter, nach dem in einem solchen Modell die Schallausbreitungsbedingungen unterschieden werden können. Um den Radius zu bestimmen, kann man sich den Vorschlägen der ISO 1996 bedienen oder entsprechend andere, anwendungsorientierte Verfahren wählen. Eher ungeeignet für große Entfernungen und hochliegende Quellen ist der Ansatz in [1], bei dem der Radius mit dem Abstand zwischen Quelle und Empfangsort wächst. Allein schon die Einführung eines konstanten

Krümmungsradius bringt Aufgaben bei der Modellbildung mit sich, die sich nicht alle unmittelbar lösen lassen.

Zunächst ist die Berechnung der Geometrie nicht mehr trivial. Mögliche Verbindungen eines Quellorts mit einem Aufpunkt über Kreisstrahlen mit dem Radius R werden durch folgende Gleichungen angegeben (n ist die Anzahl der Bodenreflexionen; i zählt die Lösungen. Die Bedeutung der übrigen Formelzeichen wird aus Abbildung 1 deutlich).

$$d \pm 2n_i \sqrt{R^2 - z_i^2} \pm \sqrt{R^2 - (z_i + h_E)^2} \pm \sqrt{R^2 - (z_i + h_Q)^2} = 0 \quad (1)$$

$$x_{i,1} = \pm \sqrt{R^2 - z_i^2} \pm \sqrt{R^2 - (z_i + h_Q)^2} \quad (2)$$

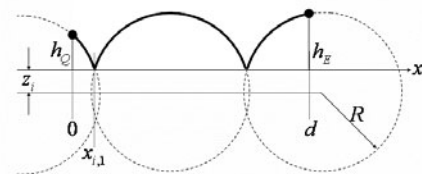


Abbildung 1: Geometrie im Kreisstrahlenmodell

Gleichung (1) ist nicht explizit lösbar. Es bedarf numerischer Verfahren, um die gültigen Schallwege zu ermitteln. Gleichung (2) gibt für jede Lösung den Abstand zum ersten Reflexionspunkt an.

Gleichung (1) liefert bei vielen Geometrien gerade über große Entfernungen Lösungen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Bodenreflexionen und – was genauso bedeutend ist – mit unterschiedlichen Einfallswinkeln. Denn die Bodenabsorption – hier ist der Verlust an Schallenergie an den Boden gemeint, nicht die Interferenzeffekte zwischen zwei sich kreuzenden Schallstrahlen – ist gerade bei flachen Einfallswinkeln stark vom Einfallswinkel abhängig. Die Bodenbeschaffenheit, auch die wetterbedingten Änderungen, trockener Boden, durchnässter Boden usw., haben einen starken Einfluss auf die Bodenabsorption. Die Einführung von Kreisstrahlen führt deshalb gleichzeitig zur Einführung der Parameter „Anzahl der Bodenreflexionen“ und „Einfallswinkel“.

Hinweise

Das Kreisstrahlenmodell kann die „Aufweitung oder Einschnürung eines Schallstrahls“ nicht beschreiben. Die dem Strahl zuzuordnende geometrische Dämpfung kann also nicht dadurch berechnet werden, dass man den Abstand zwischen zwei Kreisstrahlen betrachtet. Dazu benötigt man mindestens höhenabhängige Schallgeschwindigkeitsgradienten oder höherwertige Modelle. Das in [3] vorgestellte 3D-Strahlenmodell zeigt beispielsweise, dass sich nicht nur der Abstand zwischen benachbarten Strahlen im bewegten Medium ändert, sondern sich auch die Phasenflächen gegenüber der Ausbreitungsrichtung neigen und verzerren.

Die Einführung von Kreisstrahlen in ein Strahlenmodell ist allerdings nicht die Ursache dafür, dass die Zuteilung von Quellenergie auf die Strahlen vom Abgangswinkel abhängt. Bereits bei einem Modell nullter Ordnung - auch bei der DIN ISO 9613 - wird die zuzuweisende Quellenergie eines Strahls mit dem Sinus des Abgangswinkels kleiner, denn auch einfachste 2D-Strahlenmodelle bilden bereits die Schallausbreitung in einem Ausschnitt auf Strahlen in einer Ebene ab, vgl. Abbildung 2. Solange Strahlen mit ähnlichem Abgangswinkel betrachtet werden und der Abstand des Quellorts zum Aufpunkt deutlich kleiner ist als der Krümmungsradius, kann dies vernachlässigt werden. Unterstellt man aber, dass bei der Schallausbreitung über große Entfernungen Schallstrahlen mit deutlich unterschiedlichem Abgangswinkel beitragen, muss der Effekt berücksichtigt werden. Ähnliches gilt bei hochliegenden

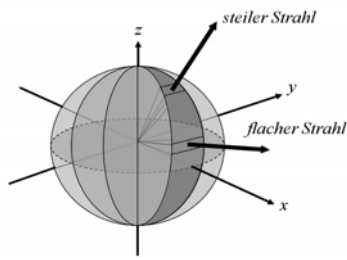


Abbildung 2: Modellbildung für einen Ausschnitt

Quellen, bei denen auch im Nahbereich Schalle unter unterschiedlichen Abgangswinkeln eine Rolle spielen.

Vergleich mit den Ergebnissen der DIN ISO 9613

Für den Vergleich des Kreisstrahlenmodells mit dem Modell der DIN ISO 9613 wurde in beiden Modellen der Einfluss der Interferenz - im Modell der DIN ISO 9613 das Bodenmeteorologiemass und im Kreisstrahlenmodell die sich durch die phasenverzögerte Überlagerung ergebende Schalldruckreduktion (Bodendip) - weggelassen. Es wurde ein Szenario bei einer Rechenfrequenz von 500 Hz, Quellhöhe 1 m und Empfangshöhe 3 m gewählt. Für die Bodenabsorption wurde ein Grasboden angenommen. Abbildung 3 zeigt die Pegeldifferenz zwischen den Prognosen des Kreisstrahlenmodells und des Modells der DIN ISO 9613. In Abbildung 3(a) (b) wurde der Krümmungsradius gleichmäßig von 500 m bis 2.000 m (3.000 m bis 7.000 m) variiert.

Das Kreisstrahlenmodell reproduziert die Prognose der DIN ISO 9613 in deren Gültigkeitsbereich im Rahmen ihrer Unsicherheit offensichtlich für alle Mitwind-Radien. Über 1.000 m hinaus prognostiziert das Kreisstrahlenmodell nicht nur deutlich kleinere Pegel, die Pegel hängen auch stark vom Krümmungsradius ab. Bei einem einzelnen Radius liefert das Kreisstrahlenmodell naturgemäß Sprünge in Abhängigkeit von Entfernung und Empfangshöhe, wenn die Geometrie gerade einen Strahl mehr oder weniger zulässt.

Jedem Mitwindmodell liegt wenigstens anschaulich die Vorstellung zugrunde, dass Schallstrahlen zum Boden hin gebrochen werden. Wenn das so ist, bleibt theoretisch die Schallenergie für sehr große Entfernungen in einer „erdnahen“ Schicht. Die geometrische Schallausbreitungsdämpfung geht dort $\sim 1/r$. Im Nahbereich einer Kugelschallquelle wird diese Schicht mit zunehmendem Abstand mit Energie gefüllt. Die geometrische Schallausbreitungsdämpfung ist hier $\sim 1/r^2$. Die geometrische Schallausbreitungsdämpfung geht also notwendigerweise mit dem Abstand von $1/r^2$ in $1/r$ über.

Beim DIN ISO 9613 Modell spricht vieles dafür, dass man $R = 5000$ m angenommen hat. Dann ist $1/r^2$ für Abstände deutlich kleiner als 1000 m eine gute Näherung für die geometrische Dämpfung. Im Kreisstrahlenmodell sorgt die Bodenabsorption dafür, dass diese verminderte geometrische Dämpfung zunächst kompensiert und dann mit weiter zunehmendem Abstand zum bestimmenden Dämpfungsterm wird. Die Übereinstimmung zwischen dem Kreisstrahlenmodell und dem Modell der DIN ISO 9613 ist also bei kleinen Abständen nicht verwunderlich, weil die Bodenabsorption dort nur eine untergeordnete Rolle spielt. Im mittleren Abstandsbebereich (500 m bis 1500 m) ist die Übereinstimmung nur deshalb in Grenzen erhalten, weil dort der Übergang zu $1/r$ beim Kreisstrahlenmodell durch die einsetzende Wirkung der Bodenabsorption (hier bei Gras) ungefähr zu $1/r^2$ kompensiert wird.

Man würde deshalb beispielsweise erwarten müssen, dass die DIN ISO 9613 im mittleren Entfernungsbereich die Pegel von hochliegenden Quellen tendenziell und systematisch unterschätzt, weil die Zahl der Bodenreflexionen bei gleicher Entfernung mit der Quellhöhe abnimmt.

In Abbildung 3 wird auf eine Mittelwertbildung der Pegel bei einer Entfernung verzichtet. Der hier der Einfachheit halber gewählte Ansatz einer gleichmäßigen Verteilung der Krümmungsradien ist rein willkürlich. Vermutlich ist eine Mittelung über die Krümmung wie in [1] sachgerechter. Abbildung 3 zeigt aber die deutlich zunehmende Spannweite der Empfangspegel in größeren Entfernun-

gen in Abhängigkeit des Radius. Damit liefert das Kreisstrahlenmodell wenigstens ansatzweise eine Aussage darüber, wann

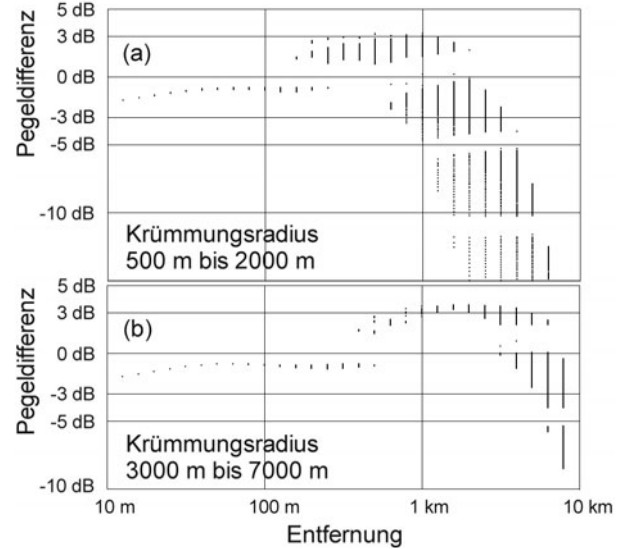


Abbildung 3: Pegeldifferenz zwischen den Prognosen des Kreisstrahlenmodells und dem Modell der DIN ISO 9613 (Randbedingungen siehe Text)

große Pegelschwankungen zu erwarten sind; eine Aussage, die bei der Prognose von Maximalpegeln an Bedeutung gewinnt.

Das Kreisstrahlenmodell trägt auch zur Erklärung der Schallausbreitung bei tiefen Frequenzen bei. Dort spielt die Luftabsorption keine Rolle und dennoch sind erhebliche Dämpfungen, die über die geometrische Abnahme hinausgehen, zu beobachten. Die Bodenabsorption wird nämlich zu tiefen Frequenzen in dem Maße ansteigen, in dem die Kopplung zwischen Luftschall und Oberflächenwellen im Erdboden zunimmt. Auch bei tiefen Frequenzen liefert also das Kreisstrahlenmodell einen Dämpfungsbeitrag, der die zu beobachtende Abnahme bei den tiefen Frequenzen erklären kann.

Anmerkung zur Schirmung

Die Schirmung ist ein wesentliches Phänomen der Schallausbreitung. Um weiterhin das Konzept der DIN ISO 9613 nutzen zu können, muss die Ausbreitungssituation wieder auf gerade Strahlen zurückgeführt werden. Dazu wird in [2] ein Vorschlag gemacht. Während die Schirmung in Modellen nullter Ordnung (gerade Strahlen) nur bei Hindernissen wirkt, ist sie im erweiterten Modell auch dafür verantwortlich, dass sich bei Gegenwindlagen (negative Krümmungsradien) keine Schattenzonen ausbilden. Hier wirkt auch die ebene Erdoberfläche als Schirm (vgl. ebenfalls [2]).

Ausblick

Die Problemfelder dieses Modells sind zweifellos die sachgerechte Bestimmung eines Krümmungsradius aus Wetterbeobachtungen und die zuverlässige Angabe der Bodenabsorption in Abhängigkeit von der Beschaffenheit und vom Einfallswinkel. Es erscheint nach jetzigem Kenntnisstand sinnvoll, für diese Parameter Variationsbereiche anzugeben und die sich ergebenden Pegelprognosen zu mitteln. Aus der Mittelung könnte auch ein Maß für die Verteilung der Pegel bei einer vorherrschenden Wetterlage abgeleitet werden. Letzteres ist entscheidend, um die Prognose von Maximalpegeln zu unterstützen.

Literatur

- [1] Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20
- [2] Hirsch, K.-W.: „Über einen Versuch zur Berücksichtigung der Geländeschirmung in Schallausbreitungsmodellen für große Entfernungen“, Fortschritte der Akustik, Hamburg, 2001
- [3] Zangers, J.; Hirsch, K.-W.: „Ray-Tracing in a 3-D Wind Field for Prediction Purposes of Shooting Noise“ Fortschritte der Akustik, Strasbourg, 2004