

## Reflexion von Schall an seitlichen Hindernissen

FA 2.264

Forschungsstelle: Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Dresden

Bearbeiter: Hübelt, J. / Schulze, C.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: März 2007

### 1 Aufgabenstellung

Die Arbeit hat die Entwicklung eines verbesserten Berechnungsverfahrens zur effektiven Auslegung von umfangreichen Lärmschutzmaßnahmen zum Ziel.

Die Beschreibung der Ausbreitung von Verkehrslärm über impedanzbelegten Flächen (Böden, Fahrbahnen usw.) in der Umgebung von Hindernissen (schallharten, absorbierenden und/oder diffus reflektierenden Schallschirmen, Wällen usw.) erfordert die Berücksichtigung verschiedener Effekte, wie

- Ausbreitung von Kugelschallwellen,
- Luftabsorption,
- Bodenreflexion,
- Beugung der Schallwellen an Schirmen mit absorbierenden Flächen,
- diffuse Schallreflexion,
- Schallreflexion an Hindernissen endlicher Ausdehnung (Betongleitschutzwand) sowie
- Inkohärenz durch Beugung der Schallwellen aufgrund von Wind- und Temperaturprofilen sowie Turbulenz in der Atmosphäre.

Des Weiteren spielt die Modellierung der betrachteten Schallquelle (Lage, Quellstärke, Richtcharakteristik) eine wichtige Rolle.

Trotz dieser sehr komplexen akustischen Situation ist zur effektiven Auslegung von umfangreichen Lärmschutzmaßnahmen ein einfaches Berechnungsverfahren erforderlich.

Zur vollständigen oder auch teilweisen Beschreibung der akustischen Situation existiert eine Vielzahl von numerischen und "exakten" analytischen Modellen, die jedoch meist einen hohen Berechnungsaufwand benötigen und nicht als "einfache Verfahren" betrachtet werden können. Innerhalb der angestrebten Arbeit soll daher auf Näherungsverfahren zurückgegriffen werden.

Für die verschiedenen Effekte wurden relevante Verfahren gegenübergestellt und jeweils ein geeignetes Modell ausgewählt. Darauf aufbauend sind Schallausbreitungsberechnungen für verschiedene Quell-Empfänger-Geometrien an Lärmschutzaufbauten durchgeführt und die frequenzabhängige Schalldämpfung ermittelt worden. Die daraus gewonnenen Ergebnisse sollen helfen, ein vereinfachtes Rechenmodell zu finden. Gleichzeitig stellen sie einen wichtigen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dar.

### 2 Untersuchungsmethodik

Die folgenden Effekte wurden untersucht und bei den Schallausbreitungsberechnungen berücksichtigt.

#### 2.1 Luftabsorption

Für die Berechnung der Schalldämpfung durch Luftabsorption wurden die in ISO 9613-1 (ISO, 1993) festgelegten frequenzabhängigen Dämpfungswerte herangezogen.

#### 2.2 Bodenreflexion

Wird zur Vorhersage der Schallausbreitung über impedanzbelegten Flächen das Modell des Kugelschallfelds angesetzt, führt die Verwendung des Reflexionsfaktors für ebene Wellen besonders bei flachem Schalleinfall zu Ungenauigkeiten. Aus diesem Grund wurde die Reflexion von Kugelwellen mithilfe des sogenannten Kugelwellenreflexionsfaktors beschrieben. Hierzu existiert eine Reihe von asymptotischen Lösungen. Grundsätzlich hat sich jedoch das Verfahren nach Weyl-van der Pol (Van der Pol, 1935) durchgesetzt. Diese Modellbeschreibung wird z. B. in den Modellen SonRoad (Heutschi, 2005) und Nord2000 (Plovsing, 2001) eingesetzt und wurde daher auch innerhalb der vorliegenden Untersuchungen für die Schallausbreitungsberechnung angewendet.

#### 2.3 Schallausbreitung über impedanzbelegten Flächen mit Diskontinuitäten (Übergang Fahrbahn/Boden)

Zur Beschreibung der Schallausbreitung über Impedanzsprüngen können die Modelle nach Rasmussen (Rasmussen, 1982) und De Jong sowie das "Ray-Tracing-Verfahren" Anwendung finden. Diese Modelle erfordern jedoch für umfangreiche Immissionsprognosen einen zu hohen Rechenaufwand. Eine Alternative stellt hier das "Fresnel-Zonen-Modell" dar (Hothersall, 1995). Mithilfe dieses Modells wird der Einfluss der an der Reflexion beteiligten impedanzbelegten Flächenanteile zur Berechnung des resultierenden Schallfelds herangezogen. Das Modell wurde in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt (Boulangier, 1997; Plovsing, 2001). Dazu gehört die Berücksichtigung der exakten Flächenanteile der Fresnel-Zone (Ellipse). Eine weitere Entwicklung betraf die lineare Interpolation der durch die Teilflächen bestimmten Feldgrößen. Um das Ergebnis des energetischen Fresnel-Zonen-Modells phasenbehaltet in die Berechnung der Schallausbreitung einbeziehen zu können, wurde innerhalb der hier vorliegenden Arbeit eine Modifizierung des Fresnel-Zonen-Modells vorgenommen. Dabei ergeben sich Betrag und Phase des in die Berechnung einfließenden Kugelwellenreflexionsfaktors aus der energetischen Mittelung der Beträge der Einzelkugelwellenreflexionsfaktoren und dem Argument des Kugelwellenreflexionsfaktors der innerhalb der Fresnel-Zone flächenanteilig dominierenden Impedanz.

#### 2.4 Beugung an Schirmen mit absorbierenden Flächen (absorbierende Lärmschutzwand)

In den Modellierungen nach Lam (Lam, 1994) und Maekawa (Maekawa, 1968) wird der Einfluss eines Schallschirms mithilfe von mehreren Ausbreitungspfaden beschrieben. Jedoch berücksichtigen diese Methoden keinerlei Impedanzbelegungen des Schirms. Aus diesem Grund wurde die Feldbeschreibung nach Nord2000 (Plovsing, 2001) für die Schallausbreitungsberechnung herangezogen. Diese basiert auf der Modellierung eines keilförmigen Hindernisses nach Hadden (Hadden, 1981) und wurde um die zusätzliche Betrachtung eines quell- und empfängerseitigen Impedanzbelags erweitert.

## 2.5 Diffuse Reflexion an stark strukturierten Flächen (Lärmschutzwand, strukturierter Steilhang)

Für schallharte Oberflächen mit einer feinen Textur (z. B. schallharte Lärmschutzwand feiner Textur) kann die diffuse Reflexion nach Nord2000 (Plovsing, 2001) in Abhängigkeit von der Oberflächentextur näherungsweise angegeben werden. Für nicht schallharte Oberflächen dieser Art ist dies nicht möglich. In diesem Fall kann die diffuse Reflexion durch eine Modellierung der Reflexion von Einzelflächen für zur Wellenlänge kleine Strukturierungen mithilfe des "Fresnel-Zonen-Modells" berücksichtigt werden. Diese Methode ist jedoch sehr aufwendig. In Nord2000 wird das Reflexionsvermögen daher auf der Basis von Einzahlwerten des Schallabsorptionsgrads berechnet. Innerhalb der vorliegenden Untersuchungen wurde der Schallreflexionsfaktor für die verschiedenen Lärmschutzaufbauten aus in situ-Messungen des Schallabsorptionsgrads gewonnen. Dies ermöglichte für die Berechnung der Schallausbreitung die Verwendung eines frequenz- und richtungsabhängigen Schallreflexionsfaktors.

## 2.6 Reflexion an Hindernissen endlicher Ausdehnung (Betongleitschutzwand)

Im Gegensatz zur Reflexion an einem unendlich ausgedehnten Hindernis kommt es bei der Schallreflexion an Hindernissen endlicher Ausdehnung zur Verringerung der wirksamen Reflexionsfläche und damit zur Minderung des effektiven Reflexionsfaktors. Diese Minderung wurde durch Anwendung des Fresnel-Zonen-Ansatzes nach Nord2000 (Plovsing, 2001) modelliert. Dadurch ist es möglich, die Reflexion an einer Betongleitschutzwand mit nur geringer Höhe auf dem Mittelstreifen der Fahrbahn zu berücksichtigen.

## 2.7 Richtcharakteristik der Quelle

Die Richtwirkung von Fahrzeugen lässt sich anhand einer gezielten Anordnung von mehreren Punktschallquellen beschreiben. Hierzu wird in Nord2000 aufgrund nicht ausreichender experimenteller Ergebnisse zunächst nur die Berechnung einer horizontalen Richtcharakteristik vorgegeben. Die vertikale Richtwirkung kann beispielsweise durch eine entsprechende Modellierung der Quelle berechnet werden. Innerhalb dieser Untersuchungen wurde die vertikale Richtcharakteristik von Pkw und zwei- sowie mehrachsigen Lkw an der Autobahn A 4 zwischen Chemnitz und Dresden durch in situ-Messungen bestimmt. Dabei befanden sich sieben Mikrofone zur Bestimmung des Schalldruckpegels in horizontalem Abstand von 7,5 m zur Spurmitte des ersten Fahrstreifens und in einer Höhe von 1,2 m bis 8,4 m (konstanter Abstand von 1,2 m zueinander). Die Ergebnisse zeigen eine deutliche vertikale Richtwirkung der Fahrzeuge. Eine genaue Nachbildung der gemessenen Richtcharakteristik durch Simulationen konnte nicht zufriedenstellend erreicht werden. Ursachen für die Unterschiede zwischen den Ergebnissen von Simulation und Messung können die Fahrzeugbewegung und die Überlagerung mehrerer Schallquellen verschiedener Quellstärke sein. In den Schallausbreitungsberechnungen wurde die Richtcharakteristik daher wie in SonRoad (Heutschi, 2005) durch Interferenz der Wirkungen einer einzelnen Schallquelle in einer Quellhöhe von 0,5 m und den dazugehörigen Spiegelschallquellen der Reflexionspfade realisiert. Zur Berücksichtigung der frequenzabhängigen Quellstärke des Verkehrslärms kam das in DIN EN 1793-3 (DIN, 1997) beschriebene Standardisierte Verkehrslärmspektrum zum Einsatz.

## 2.8 Inkohärente Schallfeldanteile (Wind- und Temperaturprofil, Turbulenz)

Zur Berechnung der inkohärenten Schallfeldanteile existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen. Darin werden Modelle zur Vorhersage der Schallfeldanteile auf der Basis von Wind- und Tem-

peraturprofilen und der Verwendung statistischer meteorologischer Parameter beschrieben. Diese Modelle können nicht als "einfache" Berechnungsverfahren betrachtet werden. Daraus abgeleitete "einfachere" Verfahren stellen z. B. Nord2000 (Plovsing, 2001) und SonRoad (Heutschi, 2005) vor. Diese Modelle beinhalten die Definition eines Kohärenzfaktors, der eine Wichtung energetisch und phasenrichtig zu addierender Schallfeldanteile vornimmt. In Nord2000 wird für jeden Schallpfad ein eigener Kohärenzfaktor definiert, der sich aus verschiedenen Teilkomponenten zusammensetzt und teilweise die Kenntnis definierter meteorologischer Parameter erfordert. Zur weiteren Vereinfachung dieses Problems ist in SonRoad ein einziger, empirisch beschriebener Kohärenzfaktor definiert, dessen Koeffizienten anhand von in vielen Literaturstellen herangezogenen Messergebnissen nach Parkin und Scholes gefunden worden. Diese den Schallausbreitungsberechnungen zugrunde gelegte Methode erfordert einzig die Einordnung der einzelnen Schallausbreitungspfade in Bodenreflexions- und Nichtbodenreflexionspfade. Letztere sind alle Pfade, die nach der Definition in SonRoad mehr als eine Bodenreflexion oder mindestens eine nicht-schallharte Reflexion an links- und rechtsseitigen Hindernissen einschließen.

## 3 Untersuchungsergebnisse

Die ausgewählten mathematischen Modelle der beschriebenen Teileffekte der Schallausbreitung wurden implementiert und für verschiedene Quell-Empfänger-Geometrien die frequenzabhängige Schalldämpfung an Lärmschutzaufbauten wie

- Lärmschutzwand (LSW),
- strukturierter Steilhang (SSH) und
- Betongleitschutzwand (BSW)

ermittelt.

Dabei befanden sich die Schallemissionsquelle und der Immissionsort jeweils bei S(0; 0,5) m bzw. R(25; 4) m. Die Höhe der jeweiligen Lärmschutzaufbauten betrug für die LSW bzw. den SSH jeweils 5 m und für die BSW 1,15 m. Für die LSW und den SSH ist ein Keilwinkel von 0° bzw. 10° festgelegt worden. Es wurden alle Schallausbreitungspfade berücksichtigt, die maximal zwei Reflexionen zwischen den links- und rechtsseitig befindlichen Lärmschutzaufbauten einschließen.

Hinsichtlich der einzelnen Teileffekte der Schallausbreitung in der Umgebung von Schallschirmen ergaben die Schallausbreitungsberechnungen folgende Ergebnisse.

### 3.1 Luftabsorption

Dieser Effekt besitzt nur bei hohen Frequenzen und großen Schallpfadlängen einen Einfluss auf die Schalldämpfung.

### 3.2 Beugung an Schirmen mit absorbierenden Flächen

An einer Lärmschutzwand mit schallharter Impedanzbelegung konnte gezeigt werden, dass die Berechnung nach dem Modell von Hadden (Hadden, 1981) zu nahezu identischen Dämpfungen wie die Berechnung nach dem Modell von Maekawa (Maekawa, 1968) führt. Des Weiteren ergaben die Schallausbreitungsberechnungen, dass durch Erhöhung des Schallabsorptionsgrads einer schallharten Lärmschutzwand mit einer Höhe von 5 m und einem Keilwinkel von 0° eine Erhöhung der Schalldämpfung von bis zu 3 dB erreicht werden kann. Dabei spielt sowohl die quellseitige als auch die empfangsseitige Absorptionsbelegung der Lärmschutzwand eine Rolle. Bei einer schallharten Lärmschutzwand nimmt die Dämpfung bei konstanter Schirmhöhe mit größer werdendem Keilwinkel ab. Im Gegensatz dazu ist die Dämpfung durch eine total absorbierende Lärmschutzwand nahezu unabhängig vom Keilwinkel.

### 3.3 Diffuse Reflexion an stark strukturierten Flächen

Gegenüber der aufwendigen "Fresnel-Zonen"-Beschreibung stellt die Berechnung des Reflexionsvermögens anhand des Schallabsorptionsgrads ein einfaches Verfahren dar. Es wird daher empfohlen, für die verschiedenen Lärmschutzaufbauten feste, bauartenspezifische Kenndaten zu bestimmen, die den Schallausbreitungsberechnungen zugrunde gelegt werden können.

### 3.4 Reflexion an Hindernissen endlicher Ausdehnung

Bei der Beschreibung der Schallreflexion an einer niedrigen Betongleitschutzwand auf dem Mittelstreifen der Fahrbahn wurde bisher das einfache Spiegelquellenmodell (unendlich hohe BGSW) eingesetzt. Diese Verfahrensweise führt gegenüber des innerhalb dieser Untersuchungen angewendeten Fresnel-Zonen-Ansatzes zur Vorhersage einer um etwa 5 dB niedrigeren Schalldämpfung.

### 3.5 Richtcharakteristik der Quelle

Die Berechnungsergebnisse der freien Schallausbreitung über reflektierendem Boden für eine Quellhöhe von 0,5 m haben gezeigt, dass es bei Substitution des nahezu schallharten Fahrbahnbelags durch einen offenporigen Asphalt nicht zu der erwarteten Dämpfungserhöhung von etwa 4 dB bis 8 dB kommt.

Da der offenporige Asphalt mit dem Ziel ausgelegt wurde, den Schalldruckpegel des zwischen Reifen und Fahrbahnbelag entstehenden Rollgeräusches zu mindern, ergibt sich diese Dämpfung erst durch die Verlagerung der Emissionsschallquelle auf eine Quellhöhe von 0,001 m. Um die schallabsorbierende Wirkung eines eingebauten offenporigen Asphalts bei der Schallausbreitung zu berücksichtigen, ist es somit notwendig, die Emissionsschallquelle in mehrere Punktschallquellen zu zerlegen.

### 3.6 Inkohärente Schallfeldanteile

Anhand der freien Schallausbreitung über reflektierendem Boden konnte gezeigt werden, dass der Inkohärenzansatz bei Modellierung der vorgegebenen Quell-Empfänger-Geometrien (horizontaler Quell-Empfänger-Abstand von 25 m) nur eine untergeordnete Rolle spielt. Erst mit zunehmenden Schallpfadlängen wächst der Einfluss des Kohärenzfaktors auf die Schalldämpfung.

### 3.7 Vereinfachtes Rechenmodell

Die Berechnung der Schalldämpfung hängt sehr stark von der jeweiligen Quell-Empfänger-Geometrie und den vorhandenen Lärmschutzaufbauten sowie deren Positionen ab. Aus diesem Grund lässt sich kein verallgemeinertes einfaches Rechenmodell finden, das alle geometrischen Varianten abdeckt.

Jedoch konnten für die einzelnen Geometrien vereinfachte spezifische Berechnungsmodelle ermittelt werden, die den Berechnungsaufwand um bis zu zwei Drittel senken. Zu dieser Vereinfachung wurden nur die "relevanten" Schallpfade berücksichtigt. Diese ergaben sich aus spektralen Betrachtungen der Schalldämpfung und der Berechnung des A-bewerteten Dämpfungspegels. Als Vereinfachungskriterium wurde dafür eine maximal zulässige Pegeldifferenz von 0,5 dB zur Schalldämpfung bei Berücksichtigung aller Schallpfade festgelegt.

## Literatur

- Boulanger, P.; Waters-Fuller, T.; Attenborough, K.; Li, K. M. (1997): Models and measurements of sound propagation from a point source over mixed impedance ground, in: Journal of the Acoustical Society of America 102 (1997), Heft 3, S. 1432-1442.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) (November 1997): DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum.
- Hadden, J. W.; Pierce, A. D. (1981): Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations, in: Journal of the Acoustical Society of America 69 (1981), S. 1266-1276.
- Heutschi, K. (2005): SonRoad – Neues Schweizer Straßenlärmmodell, in: Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 52 (2005), Heft 6, S. 174.
- Hothersall, D. C.; Harriott, J. N. B. (1995): Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, in: Journal of the Acoustical Society of America 97 (1995), Heft 2, S. 918-926.
- Internationale Organisation für Normung (ISO) (1993): ISO 9613-1: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- Lam, Y. W. (1994): Using Maekawa's Charts to Calculate Finite Length Barriers Insertion Loss, in: Applied Acoustics, 42 (1994), S. 29-40.
- Maekawa, Z. (1968): Noise reduction by Screens, in: Applied Acoustics, 1 (1968), S. 157-173.
- Plovsing, B.; Kragh, J. (2001): Nord2000 – Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction. DELTA Acoustics & Vibration Report AV 1849/00.
- Rasmussen, K. B. (1982): A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens, in: Journal of Sound and Vibration, 84 (1982), Heft 4, S. 598-602.
- Van der Pol, B. (1935): Theory of reflection of light from a point source by a finitely conducting flat mirror with an application to radio waves, in: Physica, 2 (1935), S. 843-853.