

## Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen unter Einbeziehung von Geräuschemissionsdaten des Verkehrsträgers Straße und meteorologischer Daten

FA 2.416

Forschungsstellen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Wesseling  
Möhler + Partner Ingenieure AG, München

Bearbeiter: Liepert, M./Skowronek, V./Eberlei, G./CrIjenkovic, M./Schady, A./Elsen, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: April 2021

### 1 Zielsetzung

Das Forschungsprojekt zielt auf die Bestimmung der Einflüsse des Wetters auf die Schallausbreitung und deren Erfassung in Berechnungsverfahren (Normen, Standards, Vorschriften) und physikalischen Modellen ab.

In Form einer Literaturstudie werden verschiedene Verfahren und Modelle bezüglich ihrer Berücksichtigung meteorologischer Randbedingungen dargestellt und verglichen. Diese Untersuchungen ermöglichen Aussagen über den Mehrwert der Berücksichtigung meteorologischer Informationen und schließen Aussagen über die Eignung der Anwendbarkeit der Verfahren und Modelle in der Praxis ein. Die Untersuchungen beinhalten sowohl generische Szenarien als auch konkrete Anwendungen in einem ausgewählten, repräsentativen Untersuchungsgebiet. In dem Untersuchungsgebiet wird des Weiteren eine Langzeitmesskampagne zum Vergleich der Rechenergebnisse mit den aus der Messung gewonnenen Ergebnissen durchgeführt.

Ziel ist eine praktikable Ergänzung des vorhandenen empirischen Schallausbreitungsmodells (RLS-90 beziehungsweise RLS-19) für Straßenverkehrsgeräusche, um lokalklimatisch geprägte, meteorologische Einflüsse beziehungsweise besondere meteorologische Situationen besser berücksichtigen zu können.

### 2 Literaturstudie

Die Literaturstudie beinhaltet sowohl Standardverfahren als auch wissenschaftliche, strahlen- oder wellenbasierte Schallausbreitungsmodelle, wobei neben nationalen auch ausgewählte europäische Berechnungsverfahren einbezogen werden. Die Gesamtheit der untersuchten Verfahren lässt sich dabei einteilen in Regelwerke

- **ohne** explizite Berücksichtigung meteorologischer Parameter (Cluster 1),

- **mit eingeschränkter** Berücksichtigung meteorologischer Parameter (Cluster 2),
- **mit** Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter (Cluster 3).

Zum Cluster der Regelwerke ohne explizite Berücksichtigung meteorologischer Parameter zählen vor allem nationale Berechnungsmethoden (RLS-90, VBUS, VDI 2714/VDI 2720, DIN ISO 9613-2) sowie einige internationale Verfahren (RVS 04.02.11, SonRoad, das "FHWA – Traffic Noise-Modell", CRTN). Diese empirischen Ansätze unterteilen die Schallausbreitung auf Basis einer Emissionsgröße der Schallquelle in einzelne Korrektursummanden für Ausbreitungseinflüsse (Abstand, Bodeneffekt, Abschirmung, Reflexion etc.). Beim Einfluss der Meteorologie beschränken sich die meisten Verfahren auf schallausbreitungsgünstige Wetterlagen oder Mitwindwetterlagen mit ggfs. einer Korrektur der Windrichtungsstatistik zur Ermittlung eines Langzeitmittelungspegels (zum Beispiel Meteorologische Korrektur  $C_{met}$  in DIN ISO 9613-2).

Zum Cluster der Regelwerke mit eingeschränkter Berücksichtigung meteorologischer Parameter gehören die europäischen Verfahren NMPB-Routes und CNOSSOS-EU sowie deren deutsche Fassung BUB. Diese Verfahren unterscheiden die beiden Situationen "schallausbreitungsgünstig" und "homogen" (das heißt neutrale Schallausbreitung). Unter Zuhilfenahme von meteorologischen Statistiken können dann Langzeitmittelungspegel errechnet werden.

Zum dritten Cluster gehören Nord2000, Harmonoise sowie wellenbasierte Modelle, die jeweils unterschiedliche meteorologische Parameter berücksichtigen können. Verfahren aus diesem Cluster erfassen die physikalischen Prozesse weitaus detaillierter, erfordern jedoch auch entsprechend mehr und genauere Eingabeparameter. Bei der Nord2000 und Harmonoise gehen die Windgeschwindigkeit als Windgeschwindigkeitsklasse sowie die Windrichtung und der Temperaturgradient beziehungsweise Stabilitätsklasse in die Berechnung ein. Das wellenbasierte Modell berücksichtigt unter anderem das Temperatur- und Windprofil sowie Feuchtigkeit und die Turbulenzintensität.

Eine tabellarische Zusammenfassung wichtiger Kenngrößen und Eigenschaften der Verfahren und Modelle kann dem Schlussbericht zu diesem Vorhaben entnommen werden. Neben dem Grad der Berücksichtigung meteorologischer Ausbreitungsbedingungen werden hier auch weitere Eigenschaften, wie zum Beispiel die Berücksichtigung von Bodenart, Bebauung oder Vegetation, die spektrale Auflösung, die notwendigen Eingabeparameter, die Handhabbarkeit, eine Standardisierung beziehungsweise Standardisierbarkeit sowie Beschränkungen in der Anwendbarkeit, zusammengefasst.

### 3 Testsznarien

Um die Berechnungsmethoden der drei Cluster besser vergleichen zu können, werden Testsznarien entwickelt, welche mithilfe kommerzieller, qualitätsgesicherter Programme zur Schallimmissionsprognose umgesetzt und berechnet werden. Diese Testsznarien enthalten verschiedene meteorologische Situationen und werden hinsichtlich Geometrie und Quelldarstellung möglichst einfach gehalten, um Konfundierungen mit anderen Unterschieden der Rechenmethoden möglichst gering zu halten.

Es werden die folgenden drei Testaufgaben mit "einfacher" Geometrie untersucht:

- TA 1: Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände,
- TA 2: Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m),
- TA 3: Zwei sich kreuzende, lange, gerade Straßen auf ebenem Gelände.

Zusätzlich zu den einfachen Testsznarien werden zwei Testaufgaben mit "komplexer" Geometrie untersucht:

- TA 4a: Modell "Sulzemoos eben"; Modell des realen Messgebiets mit fiktivem ebenem Gelände,
- TA 4b: Modell "Sulzemoos"; Modell des realen Messgebietes mit tatsächlichem Geländemodell.

### 4 Vergleich der Berechnungsmethoden

Die Berechnungen werden entsprechend der drei Cluster bei standardisierten schallausbreitungsgünstigen Bedingungen ("Mitwind") (Cluster 1) und Vergleichsberechnungen mit schallausbreitungsgünstigen/-ungünstigen Bedingungen für verschiedene Normen analysiert (Cluster 2). Des Weiteren werden explizit für die Nord2000 Variantenberechnungen mit verschiedenen Stabilitätsklassen und Windrichtungen bei gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten sowie Variantenberechnungen mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibenden Stabilitätsklassen betrachtet (Cluster 3).

Regelwerke ohne Berücksichtigung meteorologischer Parameter (Cluster 1)

Bei den Berechnungen mit standardisierten schallausbreitungsgünstigen Bedingungen ("Mitwind") kann eine Unterscheidung der Normen anhand der unterschiedlichen Ansätze im Luftabsorptionsterm vorgenommen werden. Eine weitere Aufteilung ist durch einen Korrekturterm bedingt, der eine nach unten gebrochene Schallausbreitung bei Mitwindsituationen berücksichtigt.

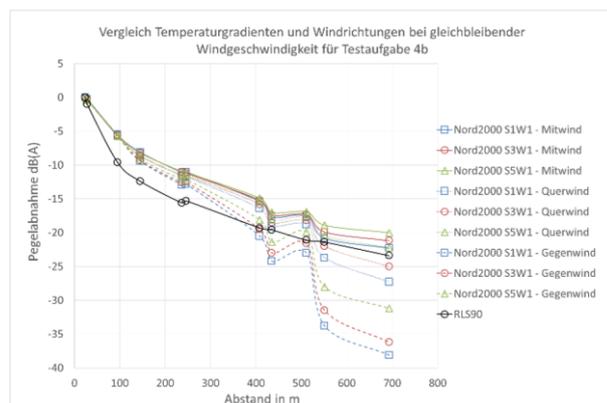
Bei den Vergleichsberechnungen mit schallausbreitungsgünstigen/-ungünstigen Bedingungen sind die Ergebnisse größtenteils davon abhängig wie schallausbreitungsgünstige beziehungsweise -ungünstige Bedingungen innerhalb der einzelnen Normen definiert sind. Hier kann im Allgemeinen zwischen zwei Gruppen unterschieden werden.

Zum einen gibt es innerhalb der untersuchten Normen solche, die meteorologische Situationen nur mittels Addition eines konstanten Korrekturterms berücksichtigen, wie die DIN ISO 9613-2. Hier wird die Mitwindsituation berechnet und ein Langzeitpegel mittels eines Abschlags durch einen Korrekturterm berücksichtigt. Dies resultiert in einem konstanten Verschiebung des Pegels um den ermittelten Korrekturterm. Bei den Testsznarien ergeben sich für die DIN ISO 9613-2 Verschiebungen um ca. 2 dB durch Berücksichtigung schallausbreitungsgünstiger Bedingungen bei der Bildung von Langzeitmittlungspegeln.

*Regelwerke mit eingeschränkter Berücksichtigung meteorologischer Parameter (Cluster 2)*

Die zweite Gruppe von Normen unterscheidet zwischen schallausbreitungsgünstigen und homogenen Bedingungen (BUB, NMPB). Ausbreitungsgünstige Bedingungen werden vereinfachend den homogenen Bedingungen gleichgesetzt. Es werden beide Fälle getrennt berechnet und im Nachhinein mit der Häufigkeit des Auftretens gewichtet. Die Gewichtung der schallausbreitungsgünstigen beziehungsweise homogenen Bedingungen kann hierbei über den Gewichtungsfaktor  $p$  eingestellt werden. Diese Normen gehen für schallausbreitungsgünstige Bedingungen von einem gebrochenen Schallweg und für homogene Bedingungen von einem geraden Schallweg aus. Beispielsweise ergeben sich für die BUB zwischen den schallausbreitungsgünstigen Bedingungen und den homogenen Bedingungen Unterschiede von bis zu 20 dB bei Testaufgabe 1 und bis zu 15 dB bei Testaufgabe 2.

*Regelwerke mit Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter (Cluster 3)*



**Bild 1: Abstandsabhängige Pegelabnahme für Testaufgabe 4b für unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit, für Berechnung nach Nord2000**

In den Variantenberechnungen mit verschiedenen Stabilitätsklassen und Windrichtungen bei gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten (siehe Bild 1) sowie in den Variantenberechnungen mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibenden Stabilitätsklassen wird die Nord2000 und die Harmonoise tiefgehend untersucht.

Zusammengefasst lassen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stabilität in der Nord2000 wie folgt beschreiben:

- Die Windrichtung hat den größten Einfluss. So beträgt zum Beispiel der Unterschied zwischen Mit- und Gegenwindfall für die meteorologische Klasse  $S_3W_2$  (isothermer Temperaturgradient, leichter Wind) ca. 13 dB(A) bei einer Entfernung von 200 m und ca. 31 dB(A) bei einer Entfernung von 1000 m.
- Innerhalb der Variation der Windgeschwindigkeit sind die Unterschiede abhängig davon, welche Windrichtung man betrachtet. So ergeben sich zum Beispiel für den Mitwindfall geringere Unterschiede als für den Gegenwindfall. Für den Mitwindfall zwischen  $S_3W_1$  und  $S_3W_3$  (isothermer Temperaturgradient bei geringer beziehungsweise mittlerer Windgeschwindigkeit) ergibt sich ein Unterschied von ca. 3 dB(A), welcher mit der Entfernung nahezu konstant bleibt. Im Gegenwindfall beträgt der Unterschied zwischen  $S_3W_1$  und  $S_3W_3$  etwa 5 dB(A) bei einer Entfernung von 200 m und ca. 11 dB(A) bei einer Entfernung von 1000 m.
- Im Vergleich zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit ist der Einfluss der Stabilitätsklasse, unabhängig von der betrachteten Windrichtung, sehr gering. Ein Unterschied lässt sich erst bei Entfernungen größer als 1000 m beobachten. Allerdings führt die Variation der Stabilitätsklasse bei Hinzunahme eines Hindernisses speziell im Mitwindfall dazu, dass die Erhöhung der Pegel aufgrund der durch den Wind nach unten gebrochenen Schallstrahlen früher eintrifft.

Die Berechnungen nach Harmonoise zeigen eine schwächere Pegelabnahme mit der Entfernung als die Nord2000. Dies passt zu den Erkenntnissen, die aus den Testaufgaben gezogen werden können. Dort erkennt man, dass Harmonoise sensitiver auf die Einstellung der Temperaturschichtung reagiert als Nord2000 und insbesondere für schallausbreitungsgünstige Fälle höhere Pegel ergibt als Nord2000.

#### *Praktische Anwendbarkeit*

Bei der Bewertung der Rechenmodelle hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit zeigt sich, dass die untersuchten Rechenmodelle in den Extremfällen gar keine zusätzlichen meteorologischen Daten benötigen oder im Fall der dritten Gruppe Angaben zur Häufigkeit des Auftretens von fünf Windstärke- und fünf Stabilitätsklassen in Verbindung mit der Windrichtung berücksichtigen können. Der Aufwand zur Ermittlung der meteorologischen Daten ist somit stark unterschiedlich und deren Anwendung im Hinblick auf den dadurch erzielbaren Zusatznutzen zu bewerten.

Bei Methoden ohne Berücksichtigung meteorologischer Parameter wird generell ein Rechenergebnis erreicht, das einen gemessenen Langzeitmittelungspegel überschätzt.

Methoden, die formal ausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen unterscheiden, ermitteln einen Langzeitmitte-

lungspegel anhand der Häufigkeit von ausbreitungsgünstigen Bedingungen in einem Langzeitintervall und der gewichteten Mittelung der beiden unterschiedenen Bedingungen. Eine Überschätzung des Langzeitpegels durch die Gleichsetzung ungünstiger Bedingungen mit den homogenen Bedingungen ist aufgrund der Pegeldominanz von ausbreitungsgünstigen Bedingungen eher gering. Statistiken für die Häufigkeit von ausbreitungsgünstigen Bedingungen über eine Langzeitmittelung sind meist verfügbar.

Eine differenzierte Betrachtung in je fünf Klassen der Windgeschwindigkeit und Stabilität ergänzt durch die Windrichtung erlaubt theoretisch die Unterscheidung von bis zu  $5 \times 5 \times 360$  Situationen, die in der Praxis unterschiedlich häufig auftreten. Entsprechende Regelwerke erscheinen demnach, aufgrund des höheren Rechenaufwands sowie der Notwendigkeit entsprechender Grundlagendaten, zur Berechnung von Langzeitmittelungspegeln, wie sie zum Beispiel für Planungsverfahren benötigt werden, eher ungeeignet. Sie können jedoch bei expliziten Fragestellungen zu speziellen meteorologischen Bedingungen wesentlich genauere und differenziertere Aussagen treffen.

## **5 Untersuchungsgebiet und Auswertung der Messdaten**

Die realen Einflüsse der meteorologischen Parameter auf die Schallausbreitung im Fall von Straßenverkehrsgeräuschen werden im Rahmen einer Dauermessung an einem ausgewählten Untersuchungsgebiet ermittelt. Durch den Vergleich von Berechnung und der im Folgenden dargestellten Messung können weitergehende Aussagen zum Einfluss der meteorologischen Parameter getroffen werden. Außerdem dienen die Messergebnisse als Basis für einen Vorschlag zur Erweiterung der Rechenmethode der RLS-90.

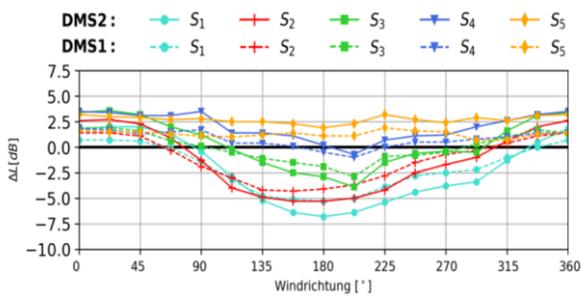
Bei der Wahl eines Untersuchungsgebiets für die messtechnischen Erhebungen wurde zum einen auf eine möglichst einfache Topografie und gerade Straßenführung und zum anderen auf das Vorhandensein einer Verkehrszählstelle zur zeitgenauen Ermittlung des Straßenverkehrs (Anzahl, Fahrzeugart, Geschwindigkeit) geachtet. Als Messort wird Sulzemoos bei München an der A 8 gewählt (vergleiche Bild 2). Zur Ermittlung der Schallausbreitung wird eine Kette von Messpunkten in unterschiedlichen Abständen (min. 29 m, max. 695 m) von der Straßenmitte eingerichtet. An den Messstationen werden sowohl der Schalldruckpegel mittels Mikrofon sowie an ausgewählten Messpunkten auch die meteorologischen Bedingungen (Windrichtung, Geschwindigkeit, Temperatur) gemessen. Zusätzlich werden COSMO-DE-Daten zur Bestimmung der atmosphärischen Schichtung genutzt. Für das Untersuchungsgebiet wird eine Datenbank aus den Messdaten aufgebaut, die die Geräuschemissionen der Straße, detaillierte Wetterdaten sowie die daraus errechneten Geräuschmissionen beinhaltet, um die vorliegenden Lärmsituationen wetterkorrigiert darstellen zu können.

Vor der eigentlichen Auswertung der Messdaten werden zunächst die Emissionswerte minutengenau aus den Fahrzeugdaten berechnet. Dabei wird auch die Geschwindigkeit der Fahrzeuge berücksichtigt. Anschließend werden sämtliche Immissionsdaten um den Emissionspegel bereinigt, sodass in der weiteren Auswertung lediglich die Pegeldifferenzen bezüglich des Emissionspunkts durch die Schallausbreitung betrachtet werden.



**Bild 2: Schematische Darstellung des Messgebietes mit Dauer- und Intensivmessstationen (rot) und Intensivmessstationen (grün)**

In der Auswertung der Immissionsdaten werden bezüglich der Meteorologie die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die atmosphärische Schichtung berücksichtigt. Dazu werden alle Daten nach diesen drei Parametern gefiltert, wobei Windgeschwindigkeit und Schichtung in je fünf Klassen und die Windrichtung in 16 Klassen unterteilt werden.



**Bild 3: Pegeldifferenzen bezüglich des Referenzschallpegels für die Windgeschwindigkeitsklasse  $W_2$  (1,0-3,0 m/s)**

In Bild 3 ist die Situation mit Windgeschwindigkeiten von 1,0 bis 3,0 m/s (Windklasse  $W_2$  nach Nord2000) für den Dauermesspunkt in 240 m Abstand dargestellt. Als Referenzschallpegel wird dabei der Mittelungspegel bei ausbreitungsneutralen Bedingungen (windstill, isotherm) verwendet. Gut erkennbar sind der Einfluss von Windrichtung und Schichtung ( $S_{1/2}$ =labil,  $S_3$ =isotherm,  $S_{4/5}$ =stabil). Während bei sehr stabiler Schichtung ( $S_5$ ) die Windrichtung (bei dieser Windstärke) noch keine Rolle spielt, ist ihr Einfluss bei labiler Schichtung signifikant (bei Gegenwind bis zu -10 dB im Vergleich zu Mitwind). Dieser Effekt wird in den Rechenmodellen allerdings nicht widerspiegelt. Bei Windstille ergibt sich an der gleichen Messposition für sehr stabile Bedingungen eine Zunahme bezüglich des Referenzpe-

gels von rund 3,5 dB beziehungsweise bei sehr labilen Verhältnissen eine Abnahme um rund 2,5 dB. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit verringert sich der Einfluss der Schichtung und der Einfluss der Windrichtung nimmt zu. Die Messdaten wurden mit den Ausbreitungsparametern der RLS-90 vergleichend bewertet.

## 6 Ergänzung der RLS-90 zur Berücksichtigung weiterer meteorologischer Einflüsse

Ausgehend von den oben vorgestellten Auswertungen der Test-szenarien sowie der Messungen wird schließlich ein Vorschlag zur Ergänzung der RLS-90 erarbeitet, welcher die Berücksichtigung weiterer meteorologischer Situationen ermöglichen soll. Dazu wird, auf Basis eines bereits in den RLS-90 bestehenden Boden- und Meteorologiedämpfungsterms, ein Korrekturterm entwickelt, welcher additiv zum bereits bestehenden Verfahren angewendet werden kann. Dies bedeutet auch, dass die bestehende Methode nicht verändert werden muss.

Zur Berücksichtigung abweichender meteorologischer Bedingungen nach den Stabilitäts- und Windklassen  $SW_j$  und Windrichtungen  $d$  kann ein um die Wettersituation korrigierter Mittelungspegel  $\tilde{L}_m$  aus dem Rechenwert für Mitwind  $L_m$  wie folgt berechnet werden:

$$\tilde{L}_m = L_m - \min\left(\frac{h_m}{s} + \left(34 + \frac{600}{s}\right) - 4,8, 0\right) - \alpha_{i,j,d} \exp\left(-\frac{h_m}{s} (\beta_{i,j,d} + \frac{100}{s})^{\xi_{i,j,d}}\right) \quad (1)$$

Dabei bezeichnen der erste Term  $L_m$  den Mittelungspegel nach RLS-90, der zweite Term den Boden- und Meteorologiedämpfungsterm entsprechend dem Teilstückverfahren und der dritte Term den neuen Dämpfungsterm. Letzterer ist bereits aus dem Verfahren langer, gerader Fahrstreifen bekannt und kann mithilfe der Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\xi$  an verschiedene meteorologische Situationen angepasst werden. Dabei wird auf 8 Dämpfungsklassen zurückgegriffen, welche Windrichtung, Windstärke sowie das Temperaturprofil berücksichtigen.

Nach Zuordnung der zu berechnenden Wettersituation in die entsprechende Stabilitäts- beziehungsweise Windgeschwindigkeitsklasse sowie der gegebenen Windrichtung können mithilfe entsprechender Tabellen die Dämpfungsklasse ermittelt und die zugehörigen Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\xi$  entnommen werden. Die dazu notwendigen Tabellen finden sich im Schlussbericht.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise ist geeignet für Situationen, die mit dem Verfahren "lange gerade Straße" ohne Abschirmung berechnet werden können.

Die vorgestellte Methode ist mithilfe der Messdaten validiert. Im Vergleich mit den Standard-Berechnungen nach RLS-90 kann eine signifikante Verbesserung bezüglich der mittleren quadratischen Abweichung erreicht werden. Der Fehler wird dabei in vielen Fällen sogar mindestens halbiert.