# Berücksichtigung meteorologischer Daten in der Schallausbreitungsrechnung und Abgleich mit Messergebnissen

Manfred Liepert, Viktor Skowronek, Martin Crljenkovic[1], Arthur Schady, Katharina Elsen[2], Fabio Strigari, Wolfram Bartolomaeus, Michael Chudalla[3]

[1] *Möhler + Partner Ingenieure AG, 86153 Augsburg, E-Mail: manfred.liepert@mopa.de*
[2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 82234 Weßling, E-Mail: arthur.schady@dlr.de*
[3] *Bundesanstalt für Straßenwesen, 51427 Bergisch-Gladbach, E-Mail: ref-v3@bast.de*

## Zielstellung

Bei Planungen zum Neu- oder Ausbau von Straßenverkehrswegen werden die Beurteilungspegel der Straßenverkehrsgeräusche zum Vergleich mit den Immissionsgrenzwerten nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – Ausgabe 2019 – RLS-19 [1] berechnet. Nach der Anmerkung in RLS-19 gelten die so berechneten Beurteilungspegel für leichten Wind (etwa 3 m/s) von der Quelle zum Immissionsort und/oder Temperaturinversion, die beide die Schallausbreitung begünstigen. In der Situation vor Ort kann die Schallausbreitung aber abhängig von der Wetterlage (Wind, Temperaturgradient) besonders über größere Abstände stark schwanken. Diese Schwankungen können in mehr oder weniger komplexen Rechenmodellen mit unterschiedlicher Aussagekraft prognostiziert oder abgeschätzt werden.

Ziel einer Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) war es, einen Vorschlag für eine Methode zur einfachen Berücksichtigung meteorologischer Parameter bei der Schallausbreitung im Rahmen der RLS-19 zu unterbreiten. Diese soll anwenderfreundliche Zusatzinformationen zu Auswirkungen der Meteorologie bei der Schallausbreitung und somit eine ergänzende Hilfestellung bei Ermessensentscheidungen oder Machbarkeitsuntersuchungen in meteorologischen Sondersituationen bieten. Zur Ermittlung eines Vorschlags sollten vorhandene Rechenmethoden gesichtet und deren Berücksichtigung der Meteorologie in Testszenarien untersucht werden sowie Dauermessungen an einer Straße zur messtechnischen Ermittlung der Abhängigkeiten durchgeführt werden.

## Gängige Methoden zur Berücksichtigung der Meteorologie in der Schallausbreitung

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden bereits gängige Methoden zur Berücksichtigung von meteorologischen Einflussparametern bei der Schallausbreitungsrechnung vor allem an Straßenverkehrswegen recherchiert. Die Darstellung der Methoden kann dem Schlussbericht des Forschungsvorhabens FE 02.416/2017/IRB der BASt entnommen werden [2]. Dabei haben sich bei den Rechenmethoden drei Cluster unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung meteorologischer Daten herauskristallisiert:

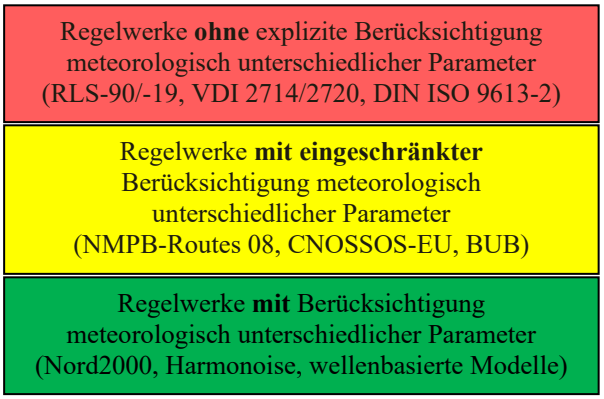


**Abbildung 1:** Bildung von drei Clustern unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung meteorologischer Daten

## Auswertung von Testszenarien

Zur Darstellung der Auswirkungen der unterschiedlichen Methoden zur Berücksichtigung meteorologischer Parameter bei der Schallausbreitungsrechnung wurden vier Testszenarien erstellt, anhand derer Variantenberechnungen durchgeführt wurden. Diese Testszenarien orientieren sich an einfachen Testaufgaben zur Qualitätssicherung von Software, beinhalten aber auch eine Testaufgabe mit einer realen Situation. Folgende vier Testaufgaben wurden untersucht:

- Schallausbreitung über ebenem Gelände
- Schallausbreitung bei Abschirmung
- Schallausbreitung mit Einwirkungen aus verschiedenen Richtungen
- Schallausbreitung im realen Gelände

Das erste Szenario dient dem Vergleich der unterschiedlichen Rechenmethoden bei der Schallausbreitung und dem Einfluss meteorologischer Parameter. Hierbei wurden (je nach Rechenmethode) gezielt auch Wind und Temperaturgradient variiert. Bei dem zweiten Szenario wurden die Einflüsse meteorologischer Parameter auf die Abschirmung durch Schallschutzmaßnahmen untersucht, während im dritten Szenario u.a. der Einfluss der Windrichtung bei gleichzeitiger Einwirkung aus verschiedenen Himmelsrichtungen untersucht wurde. Das letzte Szenario diente dem Vergleich bei realen Ausbreitungsbedingungen und dem Vergleich mit Messwerten.

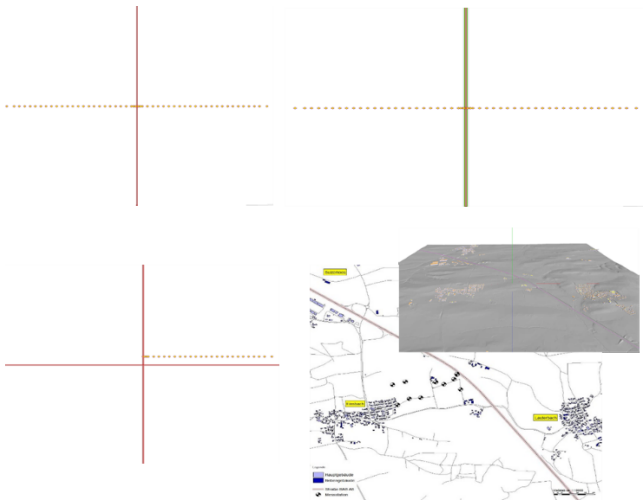

**Abbildung 2:** Darstellung der vier Testszenarien mit ebenem Gelände (oben links), Abschirmung (oben rechts), Einwirkungen aus verschiedenen Richtungen (unten links) und bei realem Gelände (unten rechts)

Bei den Rechenmethoden mit Berücksichtigung der Meteorologie haben sich aus den Testszenarien folgende wesentlichen Ergebnisse gezeigt:
Die Windrichtung hat den größten Einfluss auf die Schallausbreitung, so beträgt z.B. der Unterschied zwischen Mit- und Gegenwindfall (bei neutralem Temperaturgradient und leichtem Wind) ca. 13 dB(A) bei einer Entfernung von 200 m. Bei Variation der Windgeschwindigkeit sind die Unterschiede abhängig davon welche Windrichtung man betrachtet. Für den Mitwindfall beträgt der Unterschied zwischen geringer und mittlerer Windgeschwindigkeit bei neutralem Temperaturgradient und einer Entfernung von 200 m ca. 3 dB(A) im Gegenwindfall beträgt der Unterschied unter denselben Bedingungen ca. 5 dB(A). Der Einfluss der Stabilitätsklasse ist mit Unterschieden von < 1 dB(A) bei Entfernungen bis zu 1000 m unabhängig von der betrachteten Windrichtung vergleichsweise gering. Allerdings führen die nach unten gebeugten Schallstrahlen bei Inversion (stabil) zu einer Reduzierung der Abschirmwirkung durch Hindernisse. Dieser Effekt wird dann noch durch die Windgeschwindigkeit verstärkt.

## Dauermessungen zur Ermittlung der Abhängigkeiten von der Meteorologie

Für die messtechnische Ermittlung der Abhängigkeiten der Schallausbreitung von meteorologischen Parametern wurden Langzeitmessungen von Verkehrsmengen, Schall-immissionen und meteorologischer Parameter in Sulzemoos an der BAB A8 zwischen Augsburg und München durchgeführt. Die Messungen fanden zwischen dem 14.09.2018 und 14.12.2018 in der unmittelbaren Nähe einer Zählstelle der Autobahndirektion statt. Dauerhafte Messungen über den gesamten Messzeitraum fanden an zwei Dauermesspunkten (DMS) in etwa 200 m Abstand statt. Zusätzlich wurden Intensivmessungen (IMS) in verschiedenen Abständen zu gezielt ausgewählten Wettersituationen durchgeführt:

- Strahlungswetterlage; schwachwindig über eine Dauer von 24 h (labil tagsüber und stabil nachts)
- Mitwindwetterlage (Nordost) bei zwei verschiedenen Windsituationen (< 5 m/s und ca. 10 m/s)
- Gegenwindwetterlage (Südwest) bei zwei verschiedenen Windsituationen (< 5 m/s und ca. 10 m/s)
- Querwindwetterlage (Südost) bei zwei verschiedenen Windsituationen (< 5 m/s und ca. 10 m/s)

**Abbildung 3:** Lage der Dauermessstationen (DMS) und Intensivmessungen (IMS) in Sulzemoos an der BAB A8

Die Schallmessungen wurden bezüglich der Verkehrsmenge anhand der zeitlich im 1-Minuten-Takt aufgelösten Verkehrszähldaten korrigiert und somit von der Emission entkoppelt, so dass nur der Einfluss der Schallausbreitung verbleibt. Die Messdaten der Schallmessung und der Meteorologie wurden anschließend hinsichtlich der Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperaturgradient (Stabilität) klassifiziert. Die Windrichtung wurde in 90°-Sektoren in Mit-, Quer- und Gegenwind eingeteilt, die Windgeschwindigkeit und Temperaturgradiente in folgende Klassen:

Tabelle 1: Klassifizierung der Messdaten

| Windklasse | W0 | W1 | W2 | W3 | W4 |
|---|---|---|---|---|---|
| Grenzwerte (in m/s) | 0,0 - 0,2 | 0,2 - 1,0 | 1,0 - 3,0 | 3,0 - 6,0 | > 6,0 |
| | | | | | |
| Stabilitäts-klasse | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| Bezeichnung | sehr labil | labil | neutral | leicht stabil | stabil |
| Grenzwerte dT/dz (in K/100m) | < -0,8 | -0,8 bis -0,2 | -0,2 bis 0,2 | 0,2 bis 1,2 | > 1,2 |

Im folgender Abbildung 4 sind exemplarische Messergebnisse dargestellt. Die Diagramme geben die Differenzen des gemessenen Schalldruckpegels am Dauermesspunkt in 200 m Abstand zum Referenzwert bei homogenen Ausbreitungsbedingungen (W0S3: Windstille und neutrale Stabilitätsklasse) gemessen an den beiden Dauermessstationen für zwei verschiedene

Windgeschwindigkeitsklassen (oben W0 und unten W2) und die fünf Stabilitätsklassen über der Windrichtung auf der Abszisse wieder. In der oberen Darstellung erkennt man, dass bei geringer Windgeschwindigkeit bzw. Windstille (W0) erwartungsgemäß keine Windrichtungsabhängigkeit aber ein signifikanter Einfluss der Stabilitätsklasse vorhanden ist. Die stabilen Wetterlagen (Inversion) führen zu einer Erhöhung der Pegel. Bei der unteren Darstellung für leichten Wind (W2) ist der nun signifikante Einfluss der Windrichtung ersichtlich. Der Einfluss der Stabilitätsklasse ist nun abhängig von der Windrichtung. Bei Mitwind (0° bzw. 360°) ist der Einfluss der Stabilitätsklasse gesunken, während er sich bei Gegenwind (180°) vergrößert hat.

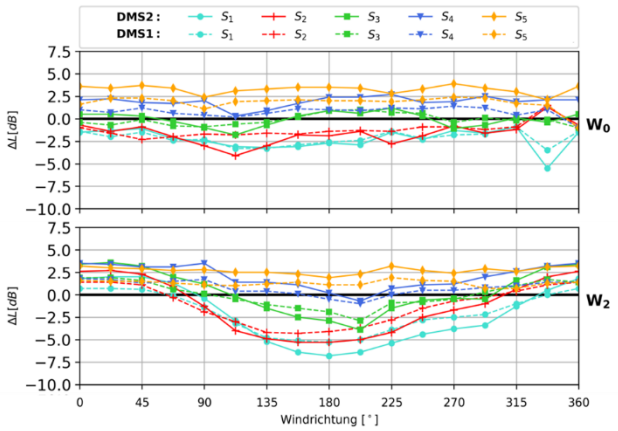


**Abbildung 4:** Schalldruckpegeldifferenzen zum Referenzwert (bei W0S3) gemessen an den Dauermessstationen für zwei verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen und die 5 Stabilitätsklassen

Zusammenfassend kann aus den Messungen geschlossen werden:

- Den zahlenmäßig größten Einfluss hat die Windrichtung.
- Der Einfluss der Stabilitätsklassen nimmt mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab.
- Der Einfluss der Windrichtung nimmt mit zunehmender Stabilität ab.
- Am lautesten ist es bei starkem Mitwind und stabiler Schichtung, am leisesten dagegen bei starkem Gegenwind und labiler Schichtung.

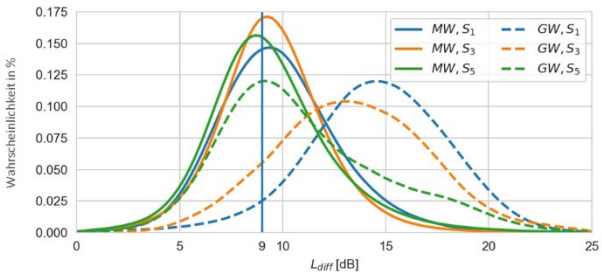


**Abbildung 5:** Dichteverteilungen für sechs Kombinationen aus Windrichtung und Stabilitätsklasse, unabhängig von der Windgeschwindigkeit am Beispiel der Station DMS1. MW = Mitwind, GW = Gegenwind, S1/S3/S5 = labil/neutral/stabil.

In Abbildung 5 sind die Dichteverteilungen der Messergebnisse getrennt nach meteorologischen Klassen dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Messergebnisse auch innerhalb der Klassen noch stark streuen und besonders bei Gegenwind und labiler Situation die Varianz noch weiter zunimmt. Die Darstellung wurde aus den Ergebnissen der Dauermessstationen in 200 m Abstand erstellt. In größeren Entfernungen ist mit noch höheren Varianzen zu rechnen.

## Methodenvorschlag zur Berücksichtigung der Meteorologie in der RLS-19

Um die Ergebnisse der Messungen und der Erkenntnisse aus den Testszenarien in ein einfaches Prognoseverfahren zur Berücksichtigung der Meteorologie einfließen zu lassen, wird vorgeschlagen bei der Schallberechnung den Boden- und Meteorologie-Dämpfungsterm ($D_{BM}$) nach RLS-90 [3] bzw. zwischenzeitlich Bodendämpfung ($D_{gr}$) nach RLS-19 [1] an verschiedene meteorologische Bedingungen anzupassen. Dazu wird nach der Berechnung des Mittelungspegels $L_m$ der Boden- und Meteorologie-Dämpfungsterms aus dem Verfahren „langer, gerader Fahrstreifen“ $D_{BM}$ von $L_m$ subtrahiert und stattdessen ein modifizierter Boden- und Meteorologie-Dämpfungsterm addiert. Voraussetzung für das Vorgehen ist das Vorliegen eines hinreichend geraden Straßenabschnitts mit konstanten Ausbreitungsbedingungen. Der modifizierte Boden- und Meteorologie-Dämpfungsterm basiert auf dem Dämpfungsterm aus dem Verfahren „langer, gerader Fahrstreifen“, da dieser besser an unterschiedliche Meteorologien angepasst werden kann:

$$f_{BM\perp}(x) = -\alpha \exp\left(-\left[\frac{h_m}{x}\left(\beta + \frac{\gamma}{x}\right)\right]^{\xi}\right)$$

Die Werte der Parameter α, β und ξ ergeben sich aus der Zuordnung der meteorologischen Situation, die berechnet werden soll, zu acht definierten Dämpfungsklassen. Diese acht Klassen beschreiben Zu- bzw. Abschläge bezüglich den RLS für verschiedene meteorologische Situationen. Die Klassen sind mit $p_2$, $p_1$, $p_0$, $m_1$, $m_2$, $m_3$, $m_4$ und $m_5$ bezeichnet, wobei „p“ für einen Zuschlag (plus) und „m“ für einen Abschlag (minus) steht. Die Klasse „$p_0$“ repräsentiert die Standardausbreitungssituation der RLS. Die Definition der Parameter für die acht Dämpfungsklassen sowie der für einen Abstand von 250 m resultierende Zu- bzw. Abschlag sind in folgender Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 2: Definition der Parameter α, β und ξ für die acht Dämpfungsklassen

| Dämpfungs-klasse | α | β | ξ | Zuschlag/ Abschlag in dB in 250 m |
|---|---|---|---|---|
| $p_2$ | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,7 |
| $p_1$ | 3,3 | 7,5 | 1,3 | 1,4 |
| $p_0$ | 4,8 | 10,0 | 1,1 | 0 |
| $m_1$ | 6,7 | 19,0 | 0,8 | -1,5 |
| $m_2$ | 8,7 | 32,0 | 0,7 | -2,8 |
| $m_3$ | 12,0 | 50,0 | 0,6 | -4,6 |
| $m_4$ | 20,0 | 120,0 | 0,5 | -7,5 |
| $m_5$ | 32,0 | 225,0 | 0,4 | -10,7 |

Soll eine bestimmte meteorologische Situation untersucht werden, ergibt sich die Zuordnung der Situation zu den Dämpfungsklassen aus der folgenden Tabelle 3:

Tabelle 3: Zuordnung der meteorologischen Situationen zu den Dämpfungsklassen

| Mitwind | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | W0 | W1 | W2 | W3 | W4 |
| S1 | $m_2$ | $m_1$ | $p_0$ | $p_1$ | $p_1$ |
| S3 | $p_0$ | $p_0$ | $p_1$ | $p_2$ | $p_2$ |
| S5 | $p_1$ | $p_1$ | $p_1$ | $p_2$ | $p_2$ |
| Querwind | | | | | |
| | W0 | W1 | W2 | W3 | W4 |
| S1 | $m_2$ | $m_2$ | $m_1$ | $m_1$ | - |
| S3 | $p_0$ | $m_1$ | $m_1$ | $p_0$ | - |
| S5 | $p_1$ | $p_0$ | $p_0$ | - | - |
| Gegenwind | | | | | |
| | W0 | W1 | W2 | W3 | W4 |
| S1 | $m_2$ | $m_3$ | $m_4$ | $m_4$ | - |
| S3 | $p_0$ | $m_1$ | $m_2$ | $m_3$ | - |
| S5 | $p_1$ | $p_1$ | $p_0$ | - | - |

Das vorgeschlagene Verfahren ist zum bisherigen Stand auf folgende Anwendungsfälle eingeschränkt:

- Emissionen des Straßenverkehrs
- Geradliniger Verlauf der Straße in ebenem Gelände
- Keine straßennahe Abschirmung vorhanden

## Vergleich mit den Messergebnissen

Zur Überprüfung des Prognoseverfahrens wurden die mit diesem Verfahren berechneten Pegel mit Messwerten für verschiedene Situationen verglichen.

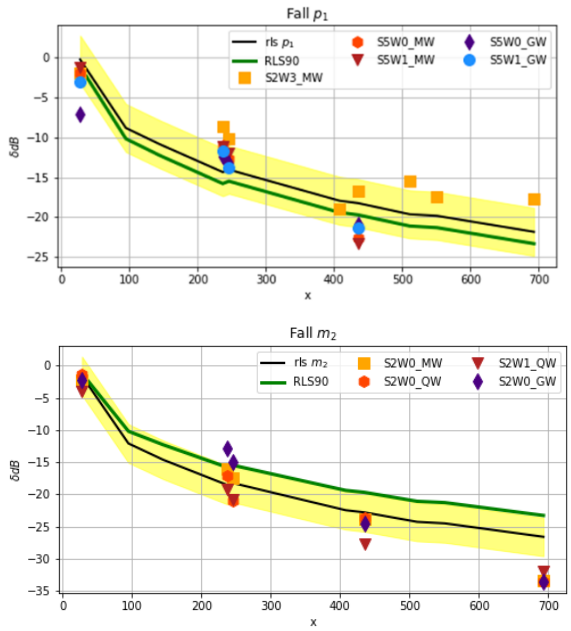


**Abbildung 6:** Anwendung zweier vorgeschlagener Dämpfungsklassen $p_1$ (oben schallausbreitungsgünstig) und $m_2$ (unten schallausbreitungsungünstig) auf das Untersuchungsgebiet Sulzemoos.
Dargestellt sind die Kurven der entsprechenden Dämpfungsklassen als schwarze Linie sowie die Standard-RLS-90 als grüne Linie. Die Messungen sind farblich sowie durch verschiedene Symbole dargestellt. Die gelb schattierte Fläche illustriert den typischen Interquartilsabstand der Messergebnisse von rund 6 dB. Die Abszisse gibt den Abstand von der Quelle an.

Der Vergleich zeigt, dass über alle Dämpfungsklassen hinweg die Messwerte teils deutlich von den Berechnungen abweichen, da die Messergebnisse auch innerhalb einer meteorologischen Situation deutlich schwanken (vgl. Abbildung 5). Dennoch zeigt sich, dass die Berechnung mit der vorgeschlagenen Korrektur einen teils deutlich geringeren Fehler (mittlere quadratische Abweichung zwischen Messung und Berechnung) aufweist als die unkorrigierte Berechnung. In vielen Fällen kann eine Verringerung des Fehlers von über 50 Prozent erreicht werden, wobei die Verbesserung umso deutlicher ist, je weiter die Dämpfungsklasse von $p_0$ abweicht.

## Weitere Schritte im Nachfolgevorhaben

Der Bericht zu dem Forschungsvorhaben ist bei der Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht [2]. Zwischenzeitlich ist ein Nachfolgevorhaben gestartet, in dem das vorgeschlagene Prognoseverfahren in der Praxis erprobt und validiert werden soll. Dabei werden zunächst exemplarische Anwendungsfälle recherchiert, anhand derer die rechnerische Korrektur sowohl erprobt als auch durch weitere Messungen an diesen Standorten validiert werden soll. Bei der Erprobung der rechnerischen Korrektur soll zum einen die Praxistauglichkeit abgeschätzt und zum anderen die Transparenz und Verständlichkeit geprüft werden.

Außerdem ist geplant den Anwendungsbereich der Korrektur durch die Betrachtung weiterer Dämpfungsklassen (insbesondere Wind > 6m/s) und die Berücksichtigung von Situationen mit quellnaher Abschirmung zu erweitern. Hierzu sollen vier praktische Anwendungsfälle realisiert werden.

Die diesem Manuskript zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen unter FE-Nr. 02.0416/2017/IRB durchgeführt.

## Literatur

[1] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen: RLS-90, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Ausgabe 1990, Berichtigter Nachdruck Februar 1992, Köln 1990

[2] Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen unter Einbeziehung von Geräuschemissionsdaten des Verkehrsträgers Straße und meteorologischer Daten; BASt-Bericht V 345; URL: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2022-2021/v345.html

[3] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen: RLS-19, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Ausgabe 2019, Köln 2019