

Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exem- plarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissions- daten der Straße und meteorologischen Daten

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 345

bast

Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exem- plarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissions- daten der Straße und meteorologischen Daten

von

Manfred Liepert
Viktor Skowronek
Geske Eberlei
Martin Crljenkovic
Sarah Müller

Möhler + Partner Ingenieure AG
Augsburg

Arthur Schady
Katharina Elsen

Institut für Physik der Atmosphäre
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Weßling

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 345

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 02.416

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

Fachbetreuung

Fabio Strigari

Referat

Umweltschutz

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331

ISBN 978-3-95606-594-1

Bergisch Gladbach, Juli 2021

Kurzfassung – Abstract

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

Die gesetzliche Lärmvorsorge und auch die Lärmsanierung an Straßenverkehrswegen erfolgt in Deutschland auf Basis von berechneten Schallpegeln an schutzbedürftiger Bebauung und deren Vergleich mit Grenz- oder Auslösewerten. Verbindliche Rechenverfahren (insbesondere RLS-90 bzw. RLS-19) legen für die Berechnung eine schallausbreitungsgünstige Wetterlage zugrunde. Jedoch können Immissionspegel und somit die Intensität der Lärmbelastung auch von den momentanen Wetterbedingungen im Ausbreitungsweg abhängen. Diese meteorologischen Ausbreitungsbedingungen sind somit situationsabhängig individuell unterschiedlich und werden in diesen Rechenverfahren nicht individuell berücksichtigt.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es daher, den Stand der Technik und der Wissenschaft bei der Berücksichtigung der Einflüsse des Wetters auf die Schallausbreitung in Rechenverfahren zu ermitteln und darzustellen, die in den Rechenverfahren erzielten Ergebnisse durch Langzeitmessungen zu verifizieren und schließlich ein praktikables und einfaches Verfahren zur Beachtung des Einflusses der Meteorologie vorzuschlagen. Der Vorschlag nutzt als Grundlage das Berechnungsverfahren nach RLS-90 bzw. RLS-19 und ermöglicht in Einzelfällen bei Bedarf eine der Wettersituation angepasste Lärmprognose.

Dafür wurden zuerst Ergebnisse einer Literaturstudie zu den verschiedenen vorhandenen Methoden der Ausbreitungsrechnung und der darin enthaltenen (oder nicht enthaltenen) Berücksichtigung von meteorologischen Randbedingungen dargestellt und systematisch miteinander verglichen. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Methoden bei der Ausbreitungsrechnung sind unter Variation der Meteorologie in vier rechnerischen Testszenarien quantifiziert und die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen in Diagrammen dargestellt worden. Die Testszenarien gliedern sich in drei modellierte Fälle einfacher Geometrie (gerade Straße ohne Topografie, gerade Straße mit Abschirmung und zwei sich kreuzende Straßen) und die Modellierung eines re-

alistischen Falls. Der realistische Fall ist die Modellierung eines Untersuchungsgebiets an der Bundesautobahn 8 westlich von München, an dem Langzeitmessungen des Schalls und der meteorologischen Randbedingungen in unterschiedlichen Entfernungen durchgeführt wurden. Anhand der Langzeitmessungen wurden die Ergebnisse der Rechenverfahren zur Berücksichtigung der Meteorologie mit realen Messdaten und den zugehörigen Wetterbedingungen verglichen.

Dabei wurden die Wetterbedingungen in Klassen der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und des Temperaturgradienten (Stabilität) unterteilt und deren Kombinationen anhand der Auswirkung auf die Schallausbreitung dargestellt. Es zeigt sich übereinstimmend, sowohl anhand fortgeschrittener Rechenmethoden als auch anhand der Messungen, dass die Windrichtung die Schallausbreitung am maßgeblichsten beeinflusst, die Windgeschwindigkeit (wiederum abhängig von der Richtung) einen geringeren Einfluss ausübt und schließlich der Temperaturgradient (Stabilität) erst bei großen Abständen und in Verbindung mit Abschirmungen relevante Einflüsse auf die Schallausbreitung ausübt. Anhand dieser Ergebnisse wurde ein Methodenvorschlag erarbeitet, mit dem man die Einflüsse von Wind und Temperaturgradient im Vergleich zum Regelfall der RLS-90/RLS-19 für spezielle Betrachtungen berücksichtigen kann. Im Einzelfall kann so eine ergänzende Hilfestellung für eine wetterkorrigierte Lärmbewertung herangezogen werden. Eine Berechnung eines Langzeitmittelungspegels ist damit zwar grundsätzlich auch möglich, der damit verbundene Aufwand im Hinblick auf die Relevanz der schallausbreitungsgünstigen Bedingungen auf den Langzeitmittelungspegel jedoch erheblich. Die Möglichkeit, bestimmte meteorologische Situationen separat zu betrachten, ist der intendierte Hauptanwendungsfall des Vorschlags. Zur Absicherung dieses Vorschlags sind aber noch weitere Validierungen in unterschiedlichen Regionen nötig.

Die Ergebnisse der Langzeitmessungen und der Berechnungen in den Testszenarien wurden in einer Datenbank zusammengestellt, die nun erlaubt für das betrachtete Untersuchungsgebiet wetterkorrigierte Immissionspegel für spezifische meteorologische Situationen abzuleiten. Eine Ausweitung bzw. der Transfer auf andere Untersuchungsgebiete ist perspektivisch möglich.

Establishment of a database to calculate exemplary noise situations, including noise emission data from road transport and meteorological data

The legal noise prevention and also the noise remediation at road traffic routes in Germany is based on calculated noise levels at buildings in need of protection and their comparison with limit or trigger values. Binding calculation methods (especially RLS-90 and RLS-19) are based on a weather situation with favorable sound propagation. However, immission levels and thus the intensity of the noise pollution can also depend on the current weather conditions in the propagation path. These meteorological propagation conditions are therefore individually different depending on the situation and are not individually considered in these calculation methods.

Therefore, the aim of the present research project is to determine and present the state of the art and science in the consideration of the influence of weather on sound propagation in calculation methods, to verify the results obtained in the calculation methods by long-term measurements and finally to propose a practicable and simple method to consider the influence of meteorology. The proposal uses the calculation method according to RLS-90 or RLS-19 as a basis and allows in individual cases, if necessary, a noise forecast adapted to the weather situation.

For this purpose, first results of a literature study on the different existing methods of propagation calculation and the consideration of meteorological boundary conditions contained (or not contained) therein were presented and systematically compared. The effects of the different methods of dispersion calculation were quantified under variation of meteorology in four computational test scenarios and the results of the comparative calculations were presented in diagrams. The test scenarios are divided into three modelled cases of simple geometry (straight road without topography, straight road with shielding and two intersecting roads) and the modelling of a realistic case. The realistic case is the modeling of a test area at the federal highway 8 west of Munich, where long-term measurements of sound and meteorological boundary conditions were performed at different distances. On the basis of the long-term measurements, the results of the computational procedures for the consideration of meteorology

were compared with real measured data and the corresponding weather conditions.

The weather conditions were divided into classes of wind direction, wind speed and temperature gradient (stability) and their combinations were presented according to their effect on sound propagation. It can be shown unanimously, both by means of advanced calculation methods and by measurements, that the wind direction has the most significant influence on sound propagation, the wind speed (again depending on the direction) has a smaller influence and finally the temperature gradient (stability) has a relevant influence on sound propagation only at large distances and in connection with shielding. Based on these results, a method proposal was developed, with which the influences of wind and temperature gradient can be considered for special considerations in comparison to the standard case of RLS-90/RLS-19. In individual cases, a supplementary aid for a weather-corrected noise assessment can thus be used. A calculation of a long-term average level is thus also possible in principle, but the associated effort with regard to the relevance of the sound propagation conditions to the long-term average level is considerable. The possibility to consider certain meteorological situations separately is the intended main application of the proposal. However, further validations in different regions are necessary to secure this proposal.

The results of the long-term measurements and the calculations in the test scenarios were compiled in a database, which now allows to derive weather-corrected immission levels for specific meteorological situations for the considered study area. An extension or transfer to other investigation areas is possible in the future

Summary

Establishment of a database to calculate exemplary noise situations, including noise emission data from road transport and meteorological data

1 Project objective

In the present research project, the influence of meteorological conditions on sound propagation and its consideration in selected calculation methods and scientific models are investigated.

The extent to which different models and methods are actually considering meteorological effects is analyzed and compared within a literature review. Based on this, we can assess the benefits of taking into account meteorological information and evaluate the applicability and suitability of the above methods in practical use. We are analyzing idealized scenarios as well as real world examples within a selected, representative investigation area. Long term measurements are performed in this investigation area and are analyzed and compared to different computations.

Our goal is to suggest a functional enhancement to the existing empirical sound propagation model for the computation of road traffic noise (RLS-90 and RLS-19) that offers a solution for the consideration of non-standard meteorological conditions.

2 Literature review

The literature review is considering national and international standard methods as well as more advanced ray- or wave-based methods. Based on their consideration of meteorological effects, we can distinguish calculation methods

- without explicit consideration of meteorological effects (cluster 1),
- with partial consideration of meteorological effect (cluster 2),
- with consideration of different meteorological effects (cluster 3).

Within the first cluster of methods that do not explicitly consider meteorological effect we find

mostly national Norms (RLS-90, VBUS, VDI 2714, VDI 2720, DIN ISO 9613-2) but also some international methods (RVS 04.02.11, SonRoad, CRTN). These empirical approaches are based on the computation of an emission level and compute the respective immission levels using deductive terms for sound propagation effects like distance from the source, ground effects, shielding, reflection or meteorology. Concerning meteorological effects, most of these methods are restricted to advantageous sound propagation conditions and tail wind, partially with a correction with respect to the wind direction for the computation of the long term immission level (e.g. meteorological correction term C_{met} in DIN ISO 9613-2).

The second cluster contains methods with partial consideration of meteorological effects and contains the European methods NMPB-Routes and CNOSSOS-EU as well as its German versions BUB. These methods distinguish advantageous and homogenous (i.e. neutral) propagation conditions. The long time averaged level can be determined by making use of meteorological statistics.

Nord2000, Harmonoise as well as wave-based methods belong to the third cluster and all consider different meteorological parameters and effects. The underlying physical processes are captured much more detailed but the methods also require more and very precise input parameters. Both, Nord2000 and Harmonoise, take into account the parameters wind speed, stratification and wind direction. The wave based model, among others, takes into account temperature- and wind-profiles, humidity as well as turbulence intensity.

Important parameters and characteristics of all methods are summarized in the final report. Apart from the consideration of meteorological effects, further properties like soil characteristics, buildings, or vegetation, but also required input parameters, usability, standardization, or limitations of usage are addressed there.

3 Test scenarios

The calculation methods of the three above clusters are compared using a set of test scenarios where the respective computations are carried out using commercial, quality controlled sound propagation software. To avoid interactions caused by other

differences between the software packages, the test scenarios are constructed using simple geometry and sound source and mainly aim to evaluate their treatment of different meteorological situations.

The following three scenarios with simple geometry are investigated:

- TA 1: Long, straight stretch of road in flat terrain,
- TA 2: Long, straight stretch of road with flat topography and screening effect (wall, 6 m height),
- TA 3: Intersection of two long and straight roads in flat terrain.

In addition also two cases with more complex topography are studied:

- TA 4a: Model "Sulzemoos flat"; model of the investigation area but with flat terrain,
- TA 4b: Model "Sulzemoos"; model of the investigation area with real terrain.

4 Comparison of calculation methods

All computations were carried out under standardized meteorological conditions (tailwind) and compared to additional computations that were performed under favorable/unfavorable propagation conditions using selected norms. Additional computations were carried out using the Nord2000 norm.

Norms without explicit consideration of meteorological effects (cluster 1)

The class of computation methods with standardized sound propagation conditions (tailwind) can be subdivided depending on the implementation of the air absorption term. Another subdivision can be concluded from the way in which downward refraction is considered.

The results of the computations carried out under favorable/unfavorable sound propagation conditions mainly depend on the definition of a favorable/unfavorable situation within the different norms. Here, two main groups can be distinguished.

There are norms like e.g. DIN ISO 9613-2 that compute the immission levels under favorable/tailwind conditions only. For the estimation of the

long term average immission level, a meteorological correction term is added which leads to a reduction of the computed sound pressure level that is constant everywhere. In case of DIN ISO 9613-2 this reduction of the immission level due to the additional consideration of unfavorable sound propagation conditions is 2 dB.

Norms with partial consideration of meteorological effect (cluster 2)

In the second group of norms (BUB, NMPB), favorable and homogenous conditions are distinguished and the resulting immission levels are weighted afterwards, where the weighting can be adapted using the factor p . These norms assume a downward diffracted sound path for favorable conditions and a direct (linear) sound path for homogenous conditions. In case of the BUB, differences between favorable and homogenous conditions can be as high as 20 dB in test case 1 and up to 15 dB in test case 2.

Norms with consideration of different meteorological effects (cluster 3)

Moreover, variant calculations with different combinations of wind speed, stratification and wind direction, where either wind speed or stratification was kept constant (see also figure 1), are performed using the norms Nord2000 and Harmonoise. In the following, the results of these variant calculations for the Nord2000 norm are briefly summarized:

- Wind direction is the main influence parameter. In case of isothermal stratification and slight wind (S_3W_2), the difference between tail- and

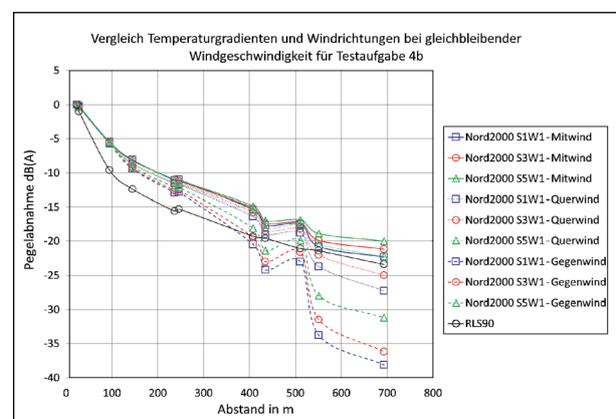


Fig. 1: Distance dependent sound level decrease for test scenario 4b for different stratification and wind direction, with constant wind speed, calculated for the Nord2000 norm

headwind is around 13 dB(A) and 31 dB(A) for a distance of 200 m and 1,000 m, respectively.

- The influence of wind speed is stronger in case of head wind than it is for tail wind. In case of an isothermal stratification (S_3), the sound pressure level in tailwind conditions is about 3 dB(A) higher compared to moderate wind speeds (W_3) than for very calm winds (W_1), whilst this difference is about 5 dB(A) in case of tailwind, the distance from the source being 200 m. Increasing the distance to 1,000 m, the difference is still around 3 dB(A) for tailwind but 11 dB(A) for headwind conditions.
- Compared to wind speed and direction, the effect of stratification is relatively small and also independent of the wind direction. Significant differences are visible only for distances larger than 1,000 m from the source. However, in case of additional screening effects, in particular in case of tail wind, the effect of downward diffraction sets in earlier.

Generally, the distance-dependent sound level decrease is found to be less strong in the computations done with Harmonoise with respect to the Nord2000 results. This is in accordance with the results found in test scenario 1 where the influence of stratification is stronger in Harmonoise than in Nord2000, resulting in higher sound pressure levels in particular in case of stable stratification.

Practical applicability

Whilst some of the models investigated throughout this study do not require additional meteorological input, information about the prevalence of certain wind speed or stratification classes is needed for others. Therefore the amount of meteorological data needed varies strongly between the different norms.

Methods that do not distinguish different meteorological situations generally overestimate the averaged immission level.

Methods distinguishing favorable and homogenous conditions determine the long term averaged level depending on the frequency of the respective conditions within the averaging period. The overestimation of the long term averaged level is less strong in this case. Meteorological statistics on the required data are available.

A differentiated approach with five classes for wind speed and stratification, complemented by wind direction theoretically allows the distinction of $5 \times 5 \times 360$ meteorological situations that, however, are not all equally likely in practice. Norms falling in this category are suitable in explicit cases with special meteorological questions as they allow very detailed and accurate computations, but have the drawback of being computationally expensive and require a lot more input data.

5 Investigation area and evaluation of measurements

The actual influence of different meteorological conditions on traffic induced sound propagation was analyzed in detail using long term measurements in a selected investigation area. Comparing computations with the measurements that are explained in the following, substantial conclusions concerning the impact of meteorological parameters can be made. Moreover, the measurement results were used in the development and validation of an extension to the RLS-90.

For on-site measurements an investigation area is chosen for which traffic data (number and type of vehicles and velocity) are provided, and which is characterized by a flat topography and a sufficiently long, straight stretch of motorway. Sulzemoos (near Munich) fulfills these above criteria (see also figure 2).

The sound propagation is studied using a chain of noise measuring stations placed at distances between 29 m and 695 m from the middle of the road and approximately perpendicular to it. In



Fig. 2: Schematically presentation of the investigation area with permanent (red) and intensive measuring stations (green) (© OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

addition, meteorological data (wind direction, wind speed and temperature) is recorded at selected points and complemented by COSMO-DE data which is used to determine the stability of the atmosphere throughout the measurement period. All measurement results in the investigated are made available in the form of a database which contains the sound emissions of the street, detailed meteorological data and the calculated sound immission in order to represent the corrected noise immission level.

Prior to the actual evaluation of the measured noise data, sound emission levels had to be reconstructed using traffic data which is done based on the RLS-90 norm, but with some adaptations with respect to temporal and spatial resolution. Hereby also the vehicles velocity is considered. In the following, all measured sound immission levels are normalized using the computed sound emission levels, making it possible to evaluate only the now traffic-independent sound level differences. These are then filtered by the respective wind speed, vertical temperature gradient (stratification) and wind direction, where wind speed and stratification were each discretized using five classes whilst for the wind direction a total of 16 classes are evaluated.

We define the reference sound pressure level (at a constant position) to be the sound pressure level measured throughout neutral sound propagation conditions, i.e. isothermal temperature profile and (approximately) zero wind speed. For that constant position the dependency of the sound immission level for varying meteorological conditions can then be evaluated with respect to this reference sound level as can be seen in figure 3 for the wind speed class W_2 and a distance from the source of 240 m. The influence of stratification ($S_{1/2}$ =unstable,

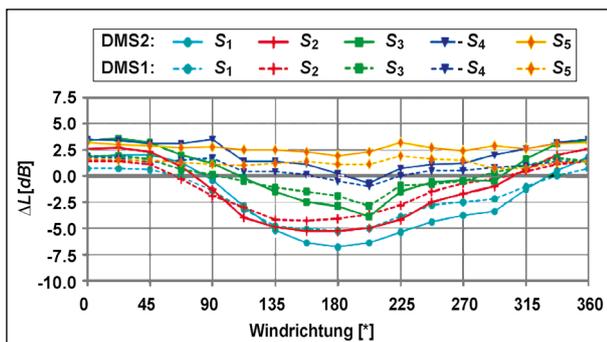


Fig. 3: Noise level differences in terms of the reference sound level for the wind speed class W_2 (1,0-3,0 m/s)

S_3 =neutral, $S_{4/5}$ =stable) and wind direction is well visible. Whilst in case of very stable stratification (S_5) the influence of the wind direction is negligible in this wind speed class, it is significant in case of unstable stratification (S_1), leading to sound immission levels that are up to -10 dB less in case of head wind with respect to tail wind. However, not all engineering models can replicate this effect. In windless conditions, the immission sound level varies from +3,5 dB (S_5) to -2,5 dB (S_1). With increasing wind speeds the effect of stratification is decreasing, whereas the influence of wind direction is gaining significantly more importance. Finally, the measurements were also compared to the calculations performed using the RLS-90 norm.

6 Enhancement to the RLS-90 for additional meteorological conditions

Starting from the evaluations of calculations and measurements discussed above, a proposal for the consideration of additional meteorological conditions within the RLS-90 is made. The main idea behind the proposed approach is that it allows a supplementary correction of the sound immission level, i.e. no change of the current method is necessary, and it is based on the damping term for ground and meteorology which is already part of the method.

Hence, to allow differing meteorological conditions, a correction of the averaged sound pressure level L_m , depending on the meteorological classes S_i and W_j as well as wind direction d , is proposed. The resulting corrected average sound pressure level \tilde{L}_m can be computed as follows

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

where the first term, L_m , is the standard average sound pressure level following the RLS-90, the second term is its original damping term following the "Teilstückverfahren" and the last term is the new damping term, which is essentially the damping term of the method for long straight stretches of road. By choosing α , β and ξ , equation (1) can be adapted to a wide range of meteorological conditions. Altogether, eight damping classes, with

different values for α , β and ξ , are available, where the classification of the damping class depends on wind direction, wind speed and stratification.

To compute the corrected sound pressure level one first must classify the meteorological situation under consideration using the respective stratification and wind speed classes as well as the desired wind direction. From this classification the attenuation class can be determined using the according tables which then define the parameters needed in formula 1.

This proposal is suitable for calculations in which the procedure for long, straight roads without screening effects can be applied.

The proposal is tested using the data from the investigation area. Over all, a significant improvement of the mean squared error between standard RLS-90-computations and our measurements, in many cases with an error reduced by more than 50%, is achieved.

Inhalt		4 Testaufgaben für Ausbreitungsberechnungsverfahren	30
1 Aufgabenstellung	13	4.1 Generelle Vorgehensweise	30
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik	13	4.2 Darstellung der Testaufgaben	30
1.2 Zielstellung	13	4.2.1 Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände	31
1.3 Methodik der Untersuchung	14	4.2.2 Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)	31
2 Übersicht zu vorhandenen Ausbreitungsberechnungsverfahren	15	4.2.3 Zwei kreuzende, lange gerade Straßen auf ebenem Gelände	32
2.1 Regelwerke ohne explizite Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter	16	4.2.4 Modell „Sulzemoos eben“; Modell des Messgebiets mit fiktiv ebenem Gelände	32
2.1.1 Nationale Berechnungsmethoden (RLS-90, VBUS, VDI 2714/VDI 2720, DIN ISO 9613-2)	16	4.2.5 Modell „Sulzemoos“; realitätsnahes Modell des Messgebiets	32
2.1.2 RVS 04.02.11	17	5 Berechnungsergebnisse	34
2.1.3 SonRoad	18	5.1 Alle Methoden bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind)	35
2.1.4 FHWA-Traffic Noise Modell	19	5.2 Methoden mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie bei schallausbreitungsgünstigen und -ungünstigen Bedingungen	38
2.1.5 Calculation of road traffic noise (CRTN)	19	5.3 Methoden mit Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter	40
2.2 Regelwerke mit eingeschränkter Berücksichtigung meteorologischer Parameter	20	5.3.1 Einfluss des Temperaturgradienten und der Windrichtung bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit	40
2.2.1 NMPB-Routes 08	20	5.3.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung bei gleichbleibendem Temperaturgradienten	43
2.2.2 CNOSSOS-EU/BUB	22	5.3.3 Vergleich von Nord2000 und Harmonoise	46
2.3 Regelwerke mit Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter	22	5.4 Fazit aus den Berechnungsergebnissen	47
2.3.1 Nord2000	22	5.5 Testrechnungen mit einem wellenbasierten 3D-Modell	49
2.3.2 Harmonoise	24	5.6 Bewertung der Rechenmodelle hinsichtlich praktischer Anwendbarkeit	52
2.3.3 Wellenbasierte Modelle	25		
2.4 Zusammenfassender Überblick	26		
3 Auswahl eines Untersuchungsgebietes	27		
3.1 Auswahlkriterien	27		
3.2 Wahl des Messquerschnitts	29		

5.6.1	Zusatznutzen durch die Berücksichtigung meteorologischer Parameter hinsichtlich Langzeitmittelungspegel.	52	8	Vorschlag eines einfachen Prognosemodells bezüglich meteorologischer Einflüsse	80
5.6.2	Handhabbarkeit der Rechenverfahren	54	8.1	Parametrisierung des Verfahrens.	80
5.6.3	Fazit	55	8.1.1	Der Boden- und Meteorologiedämpfungsterm im Verfahren „langer, gerader“ Fahrstreifen	81
6	Messungen im Untersuchungsgebiet Sulzemoos.	56	8.1.2	Der Boden- und Meteorologiedämpfungsterm im Teilstückverfahren.	82
6.1	Messaufbau und Durchführung der Messung.	56	8.1.3	Anpassung des Boden- und Meteorologiedämpfungsterms an verschiedene meteorologische Bedingungen	82
6.2	Beschreibung der verwendeten Messgeräte und Datensätze	58	8.2	Ausformulierung eines Vorschlags.	87
6.2.1	Dauermessstellen.	58	8.3	Verifizierung durch Anwendung auf das Untersuchungsgebiet.	87
6.2.2	Verkehrszählstation	59	8.4	Anwendungsgrenzen des Vorschlags	89
6.2.3	DWD-COSMO-DE Wetterdaten	60	9	Aufbau einer Datenbank mit Emissionen, Ausbreitung und Immissionen aus einem Messgebiet	90
6.3	Darstellung der vorhandenen Daten	60	9.1	Rohdaten	90
7	Auswertung des Einflusses meteorologischer Parameter.	64	9.2	Aggregierte Messdaten	91
7.1	Berechnung der Emission der Schallquelle	64	9.3	Ergebnisdaten der Testaufgaben	91
7.2	Filterung der Messdaten nach meteorologischen Parametern – Grundlagen.	67	10	Schlussfolgerung und Ausblick	92
7.3	Schallpegelabnahme mit zunehmender Distanz zur Quelle für ausgewählte meteorologische Situationen	70	Literatur.	93	
7.3.1	Filterung der Messdaten bezüglich schall- ausbreitungsgünstiger Bedingungen anhand der Kriterien AG ₁ , AG ₂ und AG	70	Bilder	95	
7.3.2	Filterung der Messdaten nach Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen in Anlehnung an die Berechnungsmethoden Nord2000 und Harmonoise	73	Tabellen	97	
7.4	Zusammenhang zwischen Windrichtung und Schallpegelabnahme.	75			
7.5	Einfluss der zeitlichen Auflösung auf die Auswertung.	79			

1 Aufgabenstellung

1.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Schallausbreitung zwischen dem Emissionsort (Straße) und Immissionsorten im Entfernungsbereich ab etwa 50 m bis 100 m wird von den atmosphärischen Bedingungen (Wetter) und den Eigenschaften des Bodens bestimmt. Messtechnische Erhebungen sind daher z. B. nach A.3 der TALAärm [1] ab 200 m nur bei Mitwind durchzuführen. Die physikalischen Prozesse, die hierbei eine Rolle spielen (z. B. Absorption, Reflexion, Refraktion), sind komplex, frequenzabhängig und treten vielfach in Kombination auf [2]. Der Einfluss der wechselnden atmosphärischen Bedingungen (Windprofil, Temperaturschichtung, Luftfeuchte) bewirkt Schwankungen der Pegeldämpfung auf dem Ausbreitungsweg von bis zu 25 dB (in 1.000 m Entfernung von der Straße, vgl. Bild 1 aus VDI 2714 [3]). Auch wechselnde Bodenbedingungen (Bodenfeuchte, saisonaler Bewuchs, Schneebedeckung) bewirken solche Schwankungen, allerdings ändern sich die Bodeneigenschaften weniger häufig und langsamer als die meteorologischen Bedingungen [4]. Hindernisse (z. B. Lärmschutzwände) wirken durch Abschirmungseffekte direkt auf die Schallausbreitung, ändern gleichzeitig aber auch das lokale Windfeld und wirken somit aufgrund der hierdurch geänderten Refraktion auch indirekt auf das Schallfeld. Dies kann die Wirkung einer Lärmschutzwand mindern oder verstärken [5].

Bei den Grenzwertregelungen werden häufig im gleichen Zug auch die Prognoseverfahren für die Ermittlung der Quellemission und noch häufiger der Schallausbreitung verbindlich vorgeschrieben (vgl. RLS-90 [6], Schall 03 [7], CNOSSOS-EU [8] etc.). Um diese komplizierten Zusammenhänge im Alltag eines Planers oder Ingenieurs handhabbar zu halten, haben sich empirische Ansätze zur Schallausbreitungsprognose durchgesetzt. Diese berücksichtigen die Atmosphäre und den Boden zumeist in sehr einfacher und pauschaler Weise mit eingeschränkter Differenzierung. Spezielle meteorologische Situationen (z. B. Inversionswetterlagen über Flusstälern oder Gegenwind) beschreiben diese Verfahren nicht ausreichend. Die Zielrichtung dieser Verfahren ist jedoch auch eher die Vorhersage eines Langzeitmittelungspegels, der mit Grenzwerten zu vergleichen ist.

Wellenbasierte numerische Modelle erfassen die physikalischen Prozesse dagegen weitaus detaillierter, sind aber entweder sehr rechenaufwendig oder beschränken sich auf ausgewählte Prozesse und werden daher fast ausschließlich für akademische Studien herangezogen. Einen Überblick über verschiedene Modelle liefert SALOMONS [9].

Die empirischen Modelle 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 insbesondere der älteren Verfahren (DIN ISO 9613-2 [10], RLS-90 [6], VDI 2714 [3]) auf schallausbreitungsgünstige Wetterlagen oder Mitwindwetterlagen mit ggfs. einer Korrektur zur Ermittlung eines Langzeitmittelungspegels (z. B. meteorologische Korrektur C_{met} nach DIN ISO 9613-2). In der zwischenzeitlich zurückgezogenen VDI 2714 werden einschränkend Schwankungen der gemessenen Schalldruckpegel für unterschiedliche Windrichtungen angegeben (siehe Bild 1 in [3]): Eine weiterführende Korrektur im Falle spezieller meteorologischer Bedingungen wird jedoch nicht verwendet.

Neuere empirische Methoden oder auch andere europäische Methoden (CNOSSOS-EU [8], NMPB-Routes-08 [11]) unterscheiden die beiden Situationen „schallausbreitungsgünstig“ und „homogen“ (d. h. neutrale Schallausbreitung). Unter Zuhilfenahme von meteorologischen Statistiken können dann Langzeitmittelungspegel errechnet werden. Eine weitere Differenzierung meteorologischer Situationen ist jedoch auch hier nicht vorgesehen.

Von den empirischen Methoden lassen lediglich die skandinavische Nord2000 [12] und das Modell Harmonoise [13] eine detaillierte Differenzierung der Meteorologie zu.

1.2 Zielstellung

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. Dabei werden die Verfahren und Modelle in Hinblick auf ihre diesbezüglichen Eigenschaften untersucht und miteinander verglichen. Diese Untersuchungen ermöglichen Aussagen über den Mehrwert der Berücksichtigung mete-

orologischer Informationen und schließen Aussagen über die Eignung der Anwendbarkeit der Verfahren und Modelle in der Praxis ein, d. h. Aussagen über den Aufwand, die Komplexität und die Genauigkeit. Die Untersuchungen werden sich sowohl auf generische Szenarien, wie auch auf konkrete Anwendungen in einem ausgewählten, repräsentativen Untersuchungsgebiet an einer Straße stützen, in dem öffentlich verfügbare und eigene, gemessene Daten zum Verkehr (Schallemission), zur Meteorologie und zur Akustik (Schallimmission) zusammengeführt werden.

Aus den Ergebnissen der Analyse von bestehenden Methoden und den durch eigene Messung gewonnenen Daten wird eine praktikable Ergänzung des im deutschen Immissionsschutzrecht verbindlichen empirischen Schallausbreitungsmodells für Straßenverkehrsgeräusche um lokalklimatisch geprägte, meteorologische Einflüsse oder auch bei besonderen meteorologischen Situationen vorgeschlagen.

1.3 Methodik der Untersuchung

In einem ersten Schritt wurden in einer Recherche vorhandene Richtlinien, die sich mit der Berechnung der Schallimmission im Umfeld von Straßen unter Berücksichtigung von Ausbreitungsvorgängen (insbesondere dem meteorologischen Einfluss) befassen, gesichtet und verglichen. Dabei war es zunächst unerheblich, ob und wenn ja, mit welchem Detaillierungsgrad die meteorologischen Einflüsse in die Verfahren eingehen.

Die Recherche richtete sich sowohl auf Standardverfahren (z. B. VDI 2714, DIN ISO 9613-2) als auch auf wissenschaftliche, strahlen- oder wellenbasierte Schallausbreitungsmodelle. Ausgehend von deutschen Verfahren zum Straßenverkehr (RLS-90, VBUS [14]) wurden auch ausgewählte europäische (NMPB-Routes-08 [11], Harmonoise [13], CNOSSOS-EU [8] etc.) und internationale Verfahren (z. B. das FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model [14]) einbezogen.

Ziel der Recherche war eine Dokumentation, die letztlich zu einer tabellarischen Übersicht wichtiger Kenngrößen und Eigenschaften der Verfahren und Modelle zusammengeführt wurde. Die Verfahren wurden hinsichtlich Berücksichtigung meteorologischer Einflussfaktoren klassifiziert, wobei grundsätzlich zwischen empirischen Berechnungsverfahren

(in der Regel basierend auf einer Addition von prozess- und situationsabhängigen Pegelzuschlägen und -abschlägen) und deterministischen, numerischen Modellen (z. B. wellenbasierten Verfahren) unterschieden wird. Anhand der zusammengestellten Kenngrößen wurden die Verfahren und Modelle einer Bewertung unterzogen, bei der die Anwendbarkeit dem Aufwand gegenübergestellt und bewertet wird.

Neben dem methodischen Vergleich der Verfahren wurden die Auswirkungen verschiedener Ausbreitungsmodelle bei standardisierten und nicht-trivialen meteorologischen Randbedingungen auf die errechneten Immissionspegel anhand von Testszenarien dargestellt und interpretiert. Bei den Ausbreitungsmodellen wurde eine Auswahl der wichtigsten Vertreter unterschiedlicher Rechenansätze zur Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse getroffen (einige Rechenmethoden wählen vergleichbare Ansätze). Diese wurden mit den zu erstellenden Testszenarien in kommerziell erhältlichen qualitätsgesicherten Programmen zur Schallimmissionsprognose getestet und verglichen.

Damit Konfundierungen mit anderen Unterschieden der Rechenmethoden möglichst gering gehalten werden können, wurden die Testszenarien hinsichtlich der Geometrie und der Quelldarstellung möglichst einfach gehalten. Die Unterschiede zwischen den Rechenmethoden wurden zunächst für standardisierte meteorologische Bedingungen (z. B. Mitwindwetterlage) herausgearbeitet. Diese dienten dann bei den weiteren Bearbeitungen, bei denen die meteorologischen Bedingungen variiert werden, als eine Art Offset, der auf andere Einflussparameter zurückgeführt werden muss. Die Ergebnisse der Testszenarien wurden für mehrere in Reihe angeordnete Immissionsorte berechnet, für die insbesondere abstandsabhängige Effekte herausgearbeitet wurden. Für einzelne Fragestellungen wurden auch gezielt Testszenarien berechnet. Für solche Fragestellungen wurden fallweise ergänzende Simulationen mit dem wellenbasierten numerischen Modell durchgeführt.

Zusätzlich zu den einfachen Testszenarien wurde ein Rechenmodell erstellt, welches das Untersuchungsgebiet nachmodelliert, in dem im nächsten Schritt eine Langzeitmesskampagne durchgeführt wurde. Dieses Modell diente bei den Testaufgaben dazu, die berechneten Einflüsse der Meteorologie auch in einem komplexen Modell zu überprüfen und zum Vergleich der Rechenergebnisse mit den durch Messung gewonnenen Ergebnissen.

Die untersuchten Rechenmethoden wurden im Rahmen der Bearbeitung der Testszenarien durch Berechnungen mit physikalisch basierten Rechenmodellen ergänzt. Während die empirischen Verfahren die meteorologischen Einflüsse sehr vereinfacht darstellen, z. B. durch die Annahme kreisförmiger Schallstrahlen, können strahlen- oder wellenbasierte numerische Modelle die meteorologischen Bedingungen, wie z. B. Inversionen, sehr viel realistischer auch in Kombination mit Hindernissen (z. B. Lärmschutzwände) beschreiben. Beim Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt stehen solche Modelle zur Verfügung, mit denen für ausgewählte, komplexe meteorologische Testszenarien vergleichende Simulationen durchgeführt wurden.

Die realen Einflüsse der meteorologischen Parameter auf die Schallausbreitung im Fall von Straßenverkehrsgeräuschen wurden im Rahmen einer Dauermessung an einem ausgewählten Untersuchungsgebiet ermittelt. Dazu wurden in einem Untersuchungsgebiet mit freier Schallausbreitung über möglichst ebenem Gelände an einer Autobahn Messungen der Schallimmissionen in verschiedenen Abständen von der Quelle und der meteorologischen Randbedingungen durchgeführt. Da nur der Einfluss der Meteorologie auf die Schallausbreitung und nicht die unterschiedlichen Geräuschemissionen der Straße untersucht werden sollten, wurden die Einflüsse des Verkehrs anhand von Zählraten kontrolliert und rechnerisch neutralisiert.

Für die Ermittlung der Schallausbreitung wurden zwei Langzeitmessstellen für eine Messdauer von etwa 2,5 Monaten eingerichtet. An diesen beiden Stationen wurden auch die meteorologischen Bedingungen (Windrichtung, Geschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte) aufgezeichnet. Neben den Langzeitmessungen wurden an bestimmten ausgewählten Tagen zusätzlich „Intensivmessungen“ zur Bestimmung der Immissionen in verschiedenen Abständen bei ausgewählten Wettersituationen durchgeführt. Aus den erhaltenen Messdaten wurden die Einflüsse der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und des Temperaturgradienten ermittelt und quantifiziert.

Die gewonnenen Daten wurden statistisch derart aufbereitet, dass der jeweilige Einfluss der meteorologischen Größen parametrisiert werden kann. Das Ergebnis der Parametrisierung ist dann der zu erwartende Effekt einer meteorologischen Situation auf die Schallausbreitung mit Angabe einer zugehörigen Aussagesicherheit. Diese Ergebnisse mündeten

dann in einem Vorschlag zur Ergänzung des Prognosemodells der RLS-90 um meteorologischer Einflüsse. Der Vorschlag soll keine eigene Methode zur Ausbreitungsberechnung darstellen, sondern eine abstandsabhängige Modifikation für verschiedene meteorologische Situationen. Abschließend wurde die vorgeschlagene Ergänzung und die jeweiligen Korrekturen auf verschiedene Situationen im Untersuchungsgebiet angewendet und das Verfahren durch Vergleich mit den Messwerten verifiziert.

Die aus den Messungen und Rechenmodellen gewonnenen Daten wurden dokumentiert und zusammengefasst. Es wurde eine Datenbank erzeugt und für alle Situationen mit den Schallemissionsdaten, den meteorologischen Daten, der Wetterklasse und der Schallimmission gefüllt, sowie für alle Wetterklassen mit den wetterklassenspezifischen Schallpegeln ergänzt.

2 Übersicht zu vorhandenen Ausbreitungsberechnungsverfahren

In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Verfahren zur Schallausbreitungsrechnung dargestellt und miteinander verglichen. Dabei werden eingeführte Verfahren aus der Normung oder Gesetzgebung betrachtet, die sich mit der Berechnung der Schallimmission vorwiegend im Umfeld von Straßen befassen, aber auch quellunabhängige Ausbreitungsverfahren. Hinsichtlich der Berücksichtigung meteorologischer Parameter lassen sich dabei drei unterschiedliche Herangehensweisen an die Meteorologie erkennen, die eine Gruppierung der Methoden nahelegen. Die untersuchten Rechenverfahren werden daher in drei Cluster unter-



Bild 2-1: Cluster unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung meteorologischer Daten

schiedlicher Methoden zur Berücksichtigung meteorologischer Daten eingeteilt (s. Bild 2-1).

Die verschiedenen Regelwerke werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Ausbreitungsmodelle verglichen.

2.1 Regelwerke ohne explizite Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter

2.1.1 Nationale Berechnungsmethoden (RLS-90, VBUS, VDI 2714/VDI 2720, DIN ISO 9613-2)

Die nationalen Berechnungsmethoden RLS-90 [6], VBUS [14], VDI 2714 [3]/VDI 2720 [17] und DIN ISO 9613-2 [10] werden im Folgendem gemeinsam beschrieben. In allen Fällen basieren die Methoden auf ähnlichen Modellen, die sich in einzelnen Abwandlungen voneinander unterscheiden. Die Formeln zur Ausbreitungsrechnung sind zumeist ineinander umformbar oder aufgrund spezifischer Voraussetzungen abgewandelt.

Anwendung

Die genannten Rechenmethoden sind verbindlich eingeführte Rechenmethoden im deutschen Immissionsschutzrecht. Die RLS-90 (Straßenverkehr), die VDI 2714 und VDI 2720 (Sportanlagenlärm) und DIN ISO 9613-2 (Gewerbelärm) werden in den quellspezifischen Verordnungen zum Schallschutz (d. h. die Verkehrslärmschutzverordnung [18], Sportanlagenlärmschutzverordnung [19] und Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm [1]) als verbindliche Rechenvorschrift genannt. Die VBUS ist lediglich eine Abwandlung der RLS-90 zur Berechnung des Straßenverkehrslärms im Rahmen der Lärmkartierung für die EU-Umgebungslärmrichtlinie [20]. Diese wurde jedoch zwischenzeitlich durch die nationale Umsetzung BUB [21] der harmonisierten Rechenvorschrift CNOSSOS-EU (siehe Kapitel 2.2.2) ersetzt.

Spezifikation

Die Richtlinien basieren auf einem Modell von Punkt, Linien- und Flächenschallquellen, die für die Schallausbreitungsrechnung in Punktschallquellen zerlegt werden. Bei den RLS-90 und der VBUS sind Emissionsberechnungsmethoden angegeben, die sich auf Straßenverkehr als Linienschallquelle be-

ziehen. Die beiden anderen Modelle sind bezüglich der Quellen nicht eingeschränkt.

Die Schallausbreitung erfolgt von jeder der entstehenden Punktschallquellen durch Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen auf dem Schallstrahl zwischen Quelle und Empfänger. Die Berechnung erfolgt im Falle der RLS-90 und VBUS mit dem A-bewerteten Summenpegel und bei den beiden Methoden VDI 2714/2720 und DIN ISO 9613-2 in Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8 kHz.

Schallausbreitung

Die Schallausbreitung erfolgt in allen Regelwerken unter Berücksichtigung der prinzipiell gleichen Dämpfungsterme. Es werden Minderungen durch Abstand, Luftabsorption, Bodendämpfung und Hindernisse sowie ggf. durch Bewuchs oder pauschaler Bebauungsdämpfung berücksichtigt.

Auswirkungen meteorologischer Randbedingungen ergeben sich bei der Luftabsorption, bei der zwar verschiedene Koeffizienten zur Berücksichtigung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit möglich sind, jedoch für Planungszwecke von den Standardwerten von 10 °C und 70 % relativer Luftfeuchte auszugehen ist.

Die Berechnung von Abschirmungen enthält eine Korrektur für Witterungseinflüsse (K_W), die eine nach unten gebrochene Schallausbreitung bei Mitwindwettersituationen oder Inversionswetterlagen berücksichtigt.

Meteorologie

Die Schallausbreitungsrechnung erfolgt in allen genannten Rechenvorschriften zunächst anhand der Annahme einer schallausbreitungsgünstigen Wetterlage. Die DIN ISO 9613-2 konkretisiert dies durch Angabe eines Gültigkeitsbereiches für die Windrichtung innerhalb eines Winkels von $\pm 45^\circ$ und für die Windgeschwindigkeit zwischen 1 m/s und 5 m/s.

Die VDI 2714 und die DIN ISO 9613-2 bieten zusätzlich die Möglichkeit, einen Langzeitmittlungspegel zu berechnen, der auch andere meteorologische Situationen berücksichtigt. In der VDI 2714 wird unter Annahme einer Gleichverteilung aller Windrichtungen ein pauschaler abstandsabhängiger Abschlag unter Berücksichtigung des Abstands s_0 nach folgender Formel berechnet:

$$D_{Lang} = \frac{3}{10^5 \cdot \left(\frac{S_0}{2}\right)^2 + 1,6} \text{ dB} \quad (1)$$

In der DIN ISO 9613-2 erfolgt die Berechnung des Langzeitmittlungspegels durch die meteorologische Korrektur in Abhängigkeit vom Abstand d_p , der Quellhöhe h_s und der Empfängerhöhe h_r nach folgender Formel:

$$C_{met} = 0 \text{ wenn } d_p \leq 10(h_s + h_r) \quad (2)$$

$$C_{met} = C_0 \left[1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p} \right] \text{ wenn } d_p > 10(h_s + h_r) \quad (3)$$

Der entscheidende Faktor C_0 wird dabei anhand von örtlichen Wetterstatistiken für Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie Temperaturgradient ermittelt. Eine konkrete Vorgehensweise ist jedoch nicht aufgeführt.

Auch die RLS-90 haben schallausbreitungsgünstige Bedingungen als Grundlage (Mitwind (ca. 3 m/s) und/oder Temperaturinversion) und rechnet „auf der sicheren Seite“. Variationen oder Langzeitmittlungspegel unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ausbreitungsbedingungen sind hier nicht vorgesehen.

2.1.2 RVS 04.02.11

Anwendung

Die RVS 04.02.11 [22] ist eine Richtlinie der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV). Sie ist eine Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen durch Straßenverkehr im bebauten und unbebauten Bereich und eine Planungshilfe für Schallschutzmaßnahmen.

Spezifikation

Die Richtlinie basiert auf einem Modell der Straße als Linienschallquelle, die für die Ausbreitungsrechnung nach einem Winkelkriterium in Punktschallquellen zerlegt wird. Die Schallausbreitung erfolgt von jeder der entstehenden Punktschallquellen durch Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen auf dem Schallstrahl zwischen Quelle und Empfänger. Die Berechnung verwendet den A-bewerteten Summenpegel, eine Berücksichtigung einer Schallausbreitung in Oktavbändern ist anhand eines normierten Verkehrslärmspektrums zulässig.

Alternativ wird zur oben beschriebenen sog. „Rechnung in Abschnitten“ mit der Punktschallquellenzer-

legung auch wie in den RLS-90 ein vereinfachtes Verfahren „lange, gerade Straße“ beschrieben.

Schallausbreitung

Grundlage für die Schallausbreitung ist der nach einem angegebenen Verfahren zu berechnende Emissionsschallpegel in 1 m Abstand von der Emissionslinie. Bei der Rechnung in Abschnitten werden für jeden Schallstrahl zwischen Punktquelle und Immissionsort folgende Korrekturen vorgenommen:

$$L_{A,eq} = L_{A,eq}^1 + 10 \lg \left(\frac{\Phi}{180} \right) + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_v + \Delta L_b + \Delta L_s + \Delta L_{rx} \text{ [dB]} \quad (4)$$

Die Korrekturen berücksichtigen die Richtwirkung (mit dem Winkel φ bezogen auf die Fahrbahnachse), den Abstand (ΔL_d), die Luftabsorption (ΔL_a), die Vegetationsdämpfung (ΔL_v), die Bodendämpfung (ΔL_b), Effekte durch Abschirmung (ΔL_s) und ein Flächenreflexionsmaß (ΔL_{rx}) bei Spiegelschallquellen.

Die Anteile aus den verschiedenen Punktquellen werden am Immissionsort anschließend energetisch aufaddiert.

Meteorologie

In der Regelanwendung der Rechenvorschrift sind keine Anpassungen des Ergebnisses aufgrund meteorologischer Situationen vorgesehen. Vielmehr wird ausgeführt, dass die Korrektur für die Meteorologie nach ISO 9613-2 zu bestimmen ist und der Faktor C_0 (der die schallausbreitungsgünstigen Bedingungen gewichtet) mit 0 festzulegen ist. Somit werden für die Berechnungen immer schallausbreitungsgünstige Bedingungen (Mitwind bzw. bodennahe Inversion) zugrunde gelegt. Damit sollen die Berechnungen für den vom Verkehrslärm betroffenen Bürger „auf der sicheren Seite“ durchgeführt werden.

Informativ wird aufgeführt, dass Langzeitmessungen in 70 m bis 220 m Abstand zu einer Autobahn zu einer Schwankungsbreite von bis zu 10 dB geführt haben (diese Schwankungsbreite kann mit den in Kapitel 3 beschriebenen Messungen verifiziert werden) und dass Windstärke und -richtung, Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Inversion die Schallausbreitung bestimmen.

An bestehenden Straßen können ergänzend Schallpegelmessungen zur Anpassung der Rechenwerte durchgeführt werden, um die tatsächlich gefahre-

nen Geschwindigkeiten berücksichtigen zu können. Diese Messungen sind jedoch nur bis zu einem Abstand von 25 m zulässig, um meteorologische Einflüsse ausschließen zu können.

Das Schirmmaß ΔL_S für abschirmende Hindernisse ist gemäß Richtlinie auf $-20 \text{ dB} \leq \Delta L_S \leq 0 \text{ dB}$ begrenzt. Bei besonderen Abschirmsituationen (z. B. hohe Wände, Doppelschirme, Galerien etc.) können Werte unter -20 dB angewendet werden, wenn diese „unter besonderer Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse“ begründet werden. Konkrete Hinweise zur Begründung werden jedoch nicht genannt.

2.1.3 SonRoad

Anwendung

Das Berechnungsverfahren SonRoad [23] ist das in der Schweiz verbindliche Verfahren für den Vollzug der Lärmschutzgesetzgebung. Das Verfahren stellt sowohl die Berechnung der Emission von Straßenverkehrswegen als auch der Schallausbreitung zur Verfügung.

Spezifikation

Die Richtlinie basiert bezüglich der Schallausbreitung auf dem Modell der ISO 9613-1 und 9613-2. Lediglich bei der Bodendämpfung wird von der Norm abgewichen. Straßen werden als Linien-schallquelle modelliert, die für die Ausbreitungsrechnung möglichst fein in Punktschallquellen zerlegt werden. Die Schallausbreitung erfolgt von jeder der entstehenden Punktschallquellen durch Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen auf dem Schallstrahl zwischen Quelle und Empfänger. Die Ausbreitungsrechnung wird spektral getrennt in Terzbändern von 50 Hz bis 10 kHz durchgeführt.

Schallausbreitung

Grundlage für die Schallausbreitung ist der Schallleistungspegel der Punktschallquellen, die in 0,45 m über der Fahrbahnoberfläche angenommen werden. Die Ausbreitungsrechnung wird durch folgende zentrale Gleichungen vorgenommen:

$$L_f = L_{w,f} - A_f \quad (5)$$

$$A_f = A_{\text{div},f} + A_{\text{atm},f} + A_{\text{gr}/\text{bar}/\text{refl},f} + A_{\text{fol},f} \quad (6)$$

Die Korrekturen berücksichtigen den Abstand (A_{div}), die Luftabsorption (A_{atm}), den Bodeneffekt, Hinder-

niswirkung und Reflexion ($A_{\text{gr}/\text{bar}/\text{refl}}$) sowie zusätzliche Effekte (A_{fol}).

Die Anteile aus den verschiedenen Punktquellen werden am Immissionsort anschließend energetisch aufaddiert.

Meteorologie

Die Rechenanwendung ist entsprechend der Kurzfassung zur Berechnung von Straßenverkehrsräuschen bei kleinen bis mittleren Abständen vorgesehen. Die Berücksichtigung von Wettereinflüssen ist explizit nicht beabsichtigt. Die in der ISO 9613-2 vorgesehene Berechnung eines Langzeitmittlungspegels durch meteorologische Korrektur C_{met} wurde mit dem Hinweis auf den abweichenden Absatz für die Bodendämpfung nicht übernommen.

Lediglich bei der Luftabsorption werden die Absorptionskoeffizienten in Terzen für eine in der Schweiz gültige mittlere Temperatur von $8 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine mittlere relative Luftfeuchtigkeit von 76 % angegeben. Diese seien im typischen Einsatzbereich gültig.

Beim Bodeneffekt wird von der Vorgehensweise der ISO 9613-2 abgewichen. Die Ausbreitungsdämpfung wird durch einen kombinierten Dämpfungsterm für den Bodeneffekt, Hindernisse und Reflexionen beschrieben. Hier wird ein eigenes Verfahren unter Berücksichtigung der Laufwegeunterscheide mehrerer Ausbreitungsanteile (d. h. unter Berücksichtigung von betrag- und phasenrichtiger Addition) angewendet. Bei der phasengenauen Addition der Beiträge aus mehreren Ausbreitungsweegen (Wege um Hindernisse, Reflexionen am Boden und Hindernissen etc.) ist von Bedeutung, dass die Signale als kohärent angesehen werden können. Ist dies nicht der Fall (d. h. die Signale sind stochastisch) wird einfach wie üblich energetisch addiert.

Zur Entscheidung, ob Kohärenz vorliegt, wird ein Kohärenzfaktor K berechnet, der entsprechend den Hinweisen auch von der Temperaturschichtung, der Stärke von Konvektion und Wind abhängt. Vereinfachend wird jedoch eine von diesen Faktoren unabhängige Formel für den Kohärenzfaktor angegeben.

Für die Ausbreitungswege, die über Hindernisse führen, wird die Hinderniswirkung D_z identisch wie in der ISO 9613-2 berechnet. Dies beinhaltet somit auch die sog. „Witterungskorrektur“ K_{met} im Falle von gekrümmter (nach unten gebrochener) Schallausbreitung. Bei neutralen (homogenen) Bedingun-

gen mit geradliniger Schallausbreitung wird K_{met} als 1 angenommen (d. h. keine Korrektur). Welcher Wert anzusetzen ist, ist aus dem Text zunächst nicht ersichtlich. In den Anwendungshinweisen wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Berücksichtigung von Mitwind und Inversion bei Hindernissen damit möglich ist und diese für Berechnung im Nachtzeitraum empfohlen wird.

Im Ausblick wird die Möglichkeit der Erweiterung des Modells durch Berücksichtigung eines meteorologieabhängigen Bodeneffekts und der Berücksichtigung der Hinderniswirkung bei schallausbreitungsungünstigen Witterungsbedingungen (aufwärts gebrochene Schallausbreitung) angesprochen.

2.1.4 FHWA-Traffic Noise Modell

Anwendung

Das Straßenlärmmodell TNM (Traffic Noise Modell) der Federal Highway Administration [16] wurde Ende der 90er Jahre in den USA eingeführt und löste das bis dahin verwendete Modell STAMINA ab. Das TNM wird in nahezu allen US-amerikanischen Autobahnprojekten zum Einsatz gebracht. Eine Softwareumsetzung des Modells wurde von der Firma Foliage Software Systems Inc. entwickelt.

Spezifikationen

In dem TNM wird der Verkehr in fünf Fahrzeugkategorien (Pkw, leichte Lkw, schwere Lkw, Bus, Motorrad) mit separaten Emissionswerten unterteilt. Die Emissionen der einzelnen Fahrzeugkategorien werden auf zwei unterschiedliche Höhen aufgeteilt (0 m und 1,5 m für Pkw, leichte Lkw, Busse und Motorräder bzw. 0 m und 3,66 m für schwere Lkw). Als Einflussparameter werden Geschwindigkeit, Belag (vier Typen), Steigung (ja/nein) sowie der Verkehrsfluss (gleichförmig/beschleunigt) berücksichtigt.

Schallausbreitung

Grundlage für das Ausbreitungsmodell ist der Emissionspegel einer Fahrzeugkategorie, welcher als maximaler Vorbeifahrtspegel in 15 m Abstand interpretiert werden kann. Die so ausgewiesenen A-Pegel haben die folgende Geschwindigkeitsabhängigkeit:

$$L_{\text{max},15\text{m},A}(v) = 10 \log(C + Bv^A) \quad (7)$$

mit den Konstanten A, B C und der Geschwindigkeit v .

Das Ausbreitungsmodell wird in eine horizontale und vertikale Geometrie aufgeteilt. Hierzu wird die Straße in kleine Teilstücke aufgeteilt, die dann jeweils durch eine Punktquelle dargestellt werden. Für jedes Teilstück wird dann eine Quellenstärke bestimmt und anschließend die Vertikalkomponente in den Quellenpunkten und den Empfängerpunkten untersucht. Die Dämpfungen bei der Ausbreitung werden in Terzen berechnet und berücksichtigen die folgenden Aspekte: geometrische Verdünnung, Luftabsorption, Bodeneffekt, Abschirmung durch Wände und Wälle, Abschirmung durch Häuserzeilen, Dämpfung durch Wald, Pegelerhöhung durch Einfachreflexion an Wänden und Pegelerhöhung durch Mehrfachreflexion zwischen parallelen Wänden.

Meteorologie

Ausgehend von einer homogenen, neutralen Atmosphäre werden meteorologische Einflüsse von der TNM weitestgehend ignoriert.

2.1.5 Calculation of road traffic noise (CRTN)

Anwendung

Die CRTN [24] ist die 1988 vom „Department of Transport, Welsh Office“ in Großbritannien veröffentlichte Rechenmethode zur Berechnung des Straßenverkehrslärms und ersetzt bzw. erweitert die 1975 vom „Department of the Environment“ veröffentlichte Rechenmethode.

Es wird sowohl eine Rechenmethode als auch eine Messvorschrift beschrieben.

Spezifikation

Das Verfahren geht von typischen gleichbleibenden Verkehrs- und Schallausbreitungsbedingungen mit mäßigen ungünstigen bzw. nachteiligen (Mitwind) Windgeschwindigkeiten und -richtungen während der betrachteten Zeitperiode aus (ungünstig bzw. nachteilig bedeutet hier jedoch in Bezug auf die Betroffenen nicht auf die Schallausbreitung). Alle Schallpegel werden als $L_{10 \text{ stündlich}}$ dB(A) oder $L_{10(18\text{-Std.})}$ dB(A) angegeben. Der Wert $L_{10 \text{ stündlich}}$ dB(A) entspricht dem Geräuschpegel, der in gerade noch 10 % der Zeitdauer innerhalb der betrachteten Stunde überschritten ist. Der Wert $L_{10(18\text{-Std.})}$ dB(A)

entspricht dem arithmetischen Mittel der Werte $L_{10 \text{ stündlich}}$ dB(A) für jede der 18 Ein-Stunden-Perioden zwischen 06:00 Uhr und 24:00 Uhr. Die Verkehrslärmquelle (Linienquelle) wird 0,5 m über der Fahrbahnoberfläche und 3,5 m vom nächstgelegenen Fahrbahnrand entfernt angenommen.

Schallausbreitung

Die Rechenmethode zerlegt die Straßen in akustisch möglichst homogene Teilsegmente. Dann wird für jedes Teilsegment der Grundgeräuschpegel in einem Abstand von 10 m zum nächstgelegenen Fahrbahnrand ermittelt. Unter Berücksichtigung der Abstandsminderung und Abschirmung der Quelle werden die Geräuschpegel am Immissionsort beurteilt und mit Korrekturen für die örtlichen Gegebenheiten wie Reflektion durch Gebäude bzw. Fassaden versehen. Die Beiträge der einzelnen Segmente werden dann am Immissionsort energetisch addiert.

Meteorologie

In der Rechenmethode sind keine Korrekturen für meteorologische Einflüsse vorgesehen. Wie bereits erwähnt geht das Verfahren von gleichbleibend mäßig ungünstigen bzw. nachteiligen (Mitwind) Windgeschwindigkeiten und -richtungen aus und gilt nur für eben solche.

Des Weiteren werden in der beschriebenen Messmethode die Messungen an bestimmte physikalische Bedingungen geknüpft, die während der Messung vorherrschen sollten. Hierzu zählt z. B., dass die Straßenoberfläche während der Messung trocken ist.

An die Windverhältnisse werden folgende Bedingungen gestellt:

1. Die Windrichtung sollte jeweils so sein, dass die Geschwindigkeitskomponente vom nächsten Fahrbahnabschnitt zum Empfangspunkt stets größer ist als die Geschwindigkeitskomponente parallel zur Straße.
2. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 1,2 m in der Mitte zwischen Straße und Empfänger sollte nicht mehr als 2 m/s in Richtung von der Straße zum Empfänger sein.
3. Die Windgeschwindigkeit am Messmikrofon sollte in keiner Richtung 10 m/s überschreiten.

Des Weiteren wird angemerkt, dass Messungen nur durchgeführt werden, wenn die maximalen Aus-

schläge der Windgeräusche 10 dB(A) oder mehr, unter dem zu messenden Werten von $L_{10 \text{ stündlich}}$ dB(A) liegen.

2.2 Regelwerke mit eingeschränkter Berücksichtigung meteorologischer Parameter

2.2.1 NMPB-Routes 08

Anwendung

Der Guide NMPB-Routes 08 [11] ist eine Richtlinie für die rechnerische Prognose von Straßenverkehrsgeräuschen im Freien unter Berücksichtigung von meteorologischen Randbedingungen. Er ist in zwei Dokumente unterteilt. Teil 1 beschreibt die Emissionsberechnungen von Straßenverkehrswegen, Teil 2 die Schallausbreitungsberechnung. Die Richtlinie dient zur Berechnung der Langzeitschallimmissionen durch Straßenverkehr in Abständen von bis zu 800 m (angegebene Gültigkeitsgrenze der Berechnung). Sie wird sowohl für den Vergleich mit nationalen Grenzwerten für Tag (06 Uhr – 22 Uhr) und Nacht (22 Uhr-06 Uhr) als auch für Berechnungen im Rahmen der Umgebungslärmrichtlinie nach EU-RL2002/49/EG für drei Tageszeiträume Tag (06 Uhr – 18 Uhr), Abend (18 Uhr – 22 Uhr) und Nacht (22 Uhr – 06 Uhr) verwendet.

Spezifikation

Die Richtlinie basiert auf einem Modell der Straße als Linienschallquelle. Für die Ausbreitungsrechnung wird diese nach einem Abstandskriterium in Punktschallquellen zerlegt. Die Schallausbreitung erfolgt von jeder der entstehenden Punktschallquellen durch Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen auf dem Schallstrahl zwischen Quelle und Empfänger. Die Berechnung wird spektral getrennt bei einer Unterteilung in 18 Terzen zwischen 100 Hz und 5 kHz durchgeführt.

Schallausbreitung

Ausgehend von dem Schalleistungspegel der einzelnen Punktquellen werden mehrere Ausbreitungsrechnungen je Quellpunkt zu einem Immissionsort durchgeführt. Die Ausbreitungsberechnungen werden grundsätzlich für zwei Situationen getrennt durchgeführt: eine Ausbreitungsrechnung wird unter Berücksichtigung von schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (abwärts gebrochene

Schallstrahlen, Index F) und homogenen Bedingungen (geradlinige Schallausbreitung, Index H) durchgeführt. Die Schallausbreitungsberechnung für diese beiden Ausbreitungssituationen erfolgt nach folgenden Formeln:

$$L_{i,F} = L_{Awi} - A_{i,F} \quad (8)$$

$$L_{i,H} = L_{Awi} - A_{i,H} \quad (9)$$

$$A_{i,F} = A_{div} + A_{atm} + A_{front,F} \quad (10)$$

$$A_{i,H} = A_{div} + A_{atm} + A_{front,H} \quad (11)$$

Die Korrekturen A_i berücksichtigen in beiden Situationen dieselben Effekte. Dies sind der Abstand (A_{div}), die Luftabsorption (A_{atm}) und Grenzeffekte (A_{front}). Wie aus der Indizierung ersichtlich, unterscheidet sich auch nur der letzte Korrekturfaktor A_{front} bei den beiden Situationen. Diese Korrektur setzt sich wiederum aus Bodeneffekten (A_{sol}), Abschirmungen durch Hindernisse (A_{dif}) und Abschirmungen durch Böschungen (A_{talus}) zusammen.

An den jeweiligen Immissionsorten werden die beiden Ergebnisse für beide Situationen (schallausbreitungsgünstig und homogen) anhand der Auftrittshäufigkeit gewichtet, zu einem Langzeitmittlungspegel gemittelt:

$$L_{i,LT} = 10 \log_{10} (p_i 10^{L_{i,F}/10} + (1 - p_i) 10^{L_{i,H}/10}) \quad (12)$$

Dabei bedeutet der Gewichtungsfaktor p_i (der für jede Ausbreitung zwischen Punktschallquelle i und Immissionsort getrennt ermittelt werden muss) die langzeitige Wahrscheinlichkeit des Auftretens schallausbreitungsgünstiger Bedingungen. Für alle anderen Ausbreitungsbedingungen (aufwärts gebrochene Schallstrahlen, Gegenwind, homogen etc.) werden rechnerisch die Ergebnisse für homogene Bedingungen angesetzt, obwohl diese Ergebnisse die tatsächlichen Immissionen für ausbreitungsungünstige Bedingungen überschätzen. Diese Überschätzung wird bewusst in Kauf genommen, da dadurch die Anwohner besser geschützt werden.

Die Langzeitmittlungspegel werden anschließend für jeden Immissionsort aus den jeweiligen Terzen, unterschiedlichen Ausbreitungswegen (direkt, gebeugte und reflektierte Wege) und den verschiedenen Anteilen der Punktschallquellen zu einem Gesamtwert aufaddiert.

Meteorologie

Unterschiedliche meteorologische Ausbreitungsbedingungen werden durch die beiden Ausbreitungsmodelle (ausbreitungsgünstig und homogen) berücksichtigt. Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden nur bei der Luftabsorption A_{atm} berücksichtigt. Dabei werden jedoch keine unterschiedlichen Werte zugelassen. Die angegebene Korrektur für Luftabsorption gilt für 15 °C und 70 % relative Feuchte.

Als schallausbreitungsgünstige Witterungsbedingungen werden dabei Inversionswetterlagen und Mitwindwetterlagen zusammengefasst, die beide zu nach unten gebrochenen Schallstrahlen führen. Das Modell für homogene Bedingungen gilt streng genommen nur für den Grenzfall, dass der Temperaturgradient (dT/dz) verschwindet, d. h. die Temperatur in allen (relevanten) Höhenschichten gleich ist. Dieser Fall kann sich auch dadurch ergeben, dass sich Temperaturgradient und Wind gegenseitig so aufheben, dass geradlinige Schallausbreitung auftritt. Alle anderen Ausbreitungssituationen mit negativem Temperaturgradienten (abnehmende Temperatur mit zunehmender Höhe über Grund, d. h. aufwärts gebrochene Schallstrahlen), die sich aus sehr unterschiedlichen Kombinationen aus Gegenwind und Temperaturgradient ergeben können, werden nicht berechnet und stattdessen vereinfachend durch homogene Ausbreitungsbedingungen repräsentiert. Dabei können gerade diese Bedingungen stark streuende Ergebnisse der Schallimmissionen v. a. mit hohen Minderungswerten ergeben.

Die Gewichtung p_i der beiden Situationen, d. h. die Auftrittswahrscheinlichkeit für schallausbreitungsgünstige Bedingungen, wird für Langzeitbedingungen bestimmt. Diese können den Tabellenwerten des Anhangs der NMPB-Routes-08 entnommen, durch Messung (über mindestens ein Jahr), Auswertung existierender meteorologischer Daten (mindestens 10 Jahre, idealerweise 30 Jahre) oder durch Annahme vorgegebener ungünstiger Werte (d. h. überwiegend schallausbreitungsgünstiger Bedingungen) ermittelt werden.

Die Ausbreitungsmodelle unterscheiden sich bei den beiden Korrekturfaktoren des Bodeneffekts (A_{sol}) und der Abschirmung (A_{dif}). In beiden Fällen werden die Korrekturen nach den prinzipiell gleichen Verfahren ermittelt. Sie unterscheiden sich jedoch dadurch, dass die geometrischen Ausgangsparameter für die Berechnungen in einem Fall

(schallausbreitungsgünstig) mit abwärts gebogenem Schallstrahl und im anderen Fall (homogene Bedingungen) mit geradem Schallstrahl bestimmt werden.

Beim Bodeneffekt erfolgt dies dadurch, dass die Quell- und Immissionsorthöhen über der gedachten mittleren Ausbreitungsebene durch einen Zuschlag, der die Krümmung des Schallstrahls berücksichtigt, erhöht werden. Dadurch resultiert rechnerisch eine geringere Minderung durch Bodenabsorption. Bei homogenen Bedingungen erfolgt keine Korrektur.

Bei Abschirmungen wird die Korrektur maßgeblich durch den Umweg des gebeugten Schallstrahls um ein Hindernis bestimmt. Dieser wird durch die Differenz zwischen direkter Verbindung und umgelenkter Verbindung berechnet. Für schallausbreitungsgünstige Bedingungen wird ein gebogener Schallstrahl zugrunde gelegt, für homogene Bedingungen ein gerader Schallstrahl.

Die Differenz zwischen direktem Schallweg und gebeugtem Schallweg fällt somit bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen geringer aus und die Schallpegelminderung durch Abschirmung ebenfalls geringer.

2.2.2 CNOSSOS-EU/BUB

Anwendung

CNOSSOS-EU (Common Noise Assessment Methods in Europe) [8] ist die verbindliche Nachfolgemethode der Interimsmethoden im Rahmen der Lärmkartierung nach EU-RL2002/49/EG [20]. Sie enthält Rechenmethoden für die Emissionen von Straßenverkehr, Schienenverkehr und Industrieanlagen, das zugehörige Schallausbreitungsmodell und ein eigenständiges Modell für Flugverkehrsgeräusche inklusive Ausbreitung. Die nationale Umsetzung von CNOSSOS-EU ist in Deutschland die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (BUB für Straßenverkehr, Schienenverkehr und Gewerbelärm) [21].

Spezifikation

Die Richtlinie CNOSSOS-EU ersetzt die bislang empfohlenen Berechnungsmethoden, die im Anhang II der EU-Umgebungslärmrichtlinie genannt sind. Bisher war für Straßenverkehrslärm die französische Methode NMPB-Routes-96 sowohl für die Emission als auch die Schallausbreitung benannt.

In CNOSSOS-EU wurde nun die Rechenmethode NMPB-Routes-08 sowohl für die Schallemission von Straßenverkehr als auch für die Schallausbreitung von bodennahen Quellen adaptiert. Die Schallausbreitung nach CNOSSOS-EU ist nahezu identisch mit der Ausbreitungsmethode der NMPB-Routes-08. Lediglich die Abschirmung durch Böschungen (A_{talus}) wurde in CNOSSOS-EU und damit auch in der BUB nicht übernommen.

Die sonstige Vorgehensweise ist vollständig adaptiert: Eine Ausbreitungsrechnung wird unter Berücksichtigung von schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (abwärts gebrochene Schallstrahlen, Index F) und homogenen Bedingungen (geradlinige Schallausbreitung, Index H) durchgeführt. Die Schallausbreitungsberechnung für diese beiden Ausbreitungssituationen und die gewichtete Mittelung erfolgt nach denselben Formeln wie in der NMPB-Routes-08 (siehe Formeln (8) bis (12)).

Meteorologie

Sämtliche meteorologische Ausbreitungsbedingungen werden identisch wie bei NMPB-Routes-08 berücksichtigt. Lediglich bei der Luftabsorption A_{atm} wird in der nationalen Umsetzung BUB der angegebene Korrekturwert für Luftabsorption für 10 °C und 70 % relative Feuchte vorgegeben.

2.3 Regelwerke mit Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter

2.3.1 Nord2000

Anwendung

Nord2000 [12] gehört einer neuen Modellgeneration an, die meteorologisch unterschiedliche Parameter berücksichtigt, und löst damit das alte (nordische) Modell aus den 70er und 80er Jahren ab. Es berechnet, basierend auf der Schallstrahlen-Theorie, Vorhersagen für Schalldruckpegel in Terzbändern (von 25 Hz bis 10 kHz als Langzeitmittelwert) indem die Schalldämpfung zwischen Quelle und Empfänger berechnet wird. Neben komplexer Topografie und Untergrund (Impedanz) können auch nahezu alle Wetterbedingungen berücksichtigt werden. Das Modell ist anwendbar für die Schallausbreitung im Freien, ohne signifikante Schallbrechung mit quellspezifischen Vorhersagemethoden für Straße und Schiene. Ziel des Modells war es,

gute Ergebnisse bis zu einer Entfernung von der Quelle von 1.000 m sowie akzeptable Ergebnisse für Entfernungen bis zu 3.000 m zu liefern, wobei keine präzisen Definitionen für „gut“ und „akzeptabel“ festgelegt wurden. Das Modell wurde allerdings nur für Entfernungen von bis zu 200 m von der Quelle validiert. In diesem Bereich konnte eine sehr gute Genauigkeit von +/- 2 dB erzielt werden. Umgesetzt wurde es im Rahmen einer kommerziell verfügbaren Software, aber auch eine frei zugängliche Software mit 30 ausgewählten Testfällen ist verfügbar.

Spezifikation

Während die Ergebnisse früherer Modelle stark von der jeweiligen Erfahrung des Nutzers abhingen (beispielsweise bezüglich der Interpretation von Geländedaten), kommen in Nord2000 explizite Prozeduren zum Einsatz, wodurch unerwünschte Variationen im Ergebnis bei Anwendung durch unterschiedliche Nutzer vermieden werden. Zusätzlich führte die Einführung des Fresnelzonenkonzeptes zu deutlichen Verbesserungen im Vergleich zu vorhergehenden Methoden.

Für die Berücksichtigung komplexer Topografie wird ein vertikaler Geländeschnitt mittels linearer Segmente approximiert und der Einfluss von Untergrund und Abschattung über die Segmente gemittelt. Insgesamt acht verschiedene Untergründe von moosartig (bzw. schneebedeckt) bis sehr hart (z. B. Asphalt) werden unterschieden.

Bei der Berechnung der Quellstärke werden leichte, mittelschwere und schwere Fahrzeuge unterschieden, wobei jedes Fahrzeug durch zwei (leichte Fahrzeuge) oder drei Quellen (schwere Fahrzeuge) charakterisiert wird (0,01 m, 0,30 m, 0,75 m oder 3,50 m). Dies ermöglicht die Differenzierung von Antriebs- und Abrollgeräuschen, berücksichtigt wird zudem der Horn-Effekt. Einen zusätzlichen Korrekturterm gibt es für leichte Fahrzeuge (Autos) bei nasser Straßenoberfläche, während für schwere Fahrzeuge entsprechende Daten fehlen.

Die Schalleistungspegel werden standardmäßig für 20 °C berechnet, für davon abweichende Temperaturen werden Korrekturen für das Abrollgeräusch angegeben. Des Weiteren werden im Fall von Beschleunigung (positiv oder negativ) und Gefälle Korrekturterme für das Antriebsgeräusch angegeben.

Meteorologie

Zur Ermittlung eines Jahresdurchschnittswertes werden die Lärmpegel für 25 verschiedene Wetterklassen berechnet und die Ergebnisse bezüglich der Häufigkeit ihres Auftretens gemittelt. Jede dieser Klasse wird durch ein Schallgeschwindigkeits-Profil als Funktion der Höhe über Grund sowie die Krümmung der Schallstrahlen charakterisiert. Die Einteilung in je fünf Klassen für Wind und Stabilität basiert auf Harmonoise (siehe Kapitel 2.3.2) wobei in realen Berechnungen vermutlich nicht alle 25 Kombinationen benötigt werden. Richtungen werden analog zur Windrichtung definiert (Nord = 0°, Ost = 90°, etc.), d. h. 0° Unterschied zwischen Wind- und Schallausbreitungsrichtung entsprechen direktem Mitwind und umgekehrt entsprechen 180° Unterschied direktem Gegenwind.

In der Berechnung der statistischen Gewichte wird der Effekt der Meteorologie auf die Schallausbreitung berücksichtigt, indem das vertikale Schallgeschwindigkeitsprofil durch eine Lin-Log-Beziehung angenähert wird:

$$C_{(z)} = C_0 + A \ln \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) + B \quad (13)$$

Jedes Parameterpaar A , B beschreibt dabei eine spezifische Schallausbreitungssituation. Durch Einteilung der Parameter in je fünf Klassen werden wiederum genau 25 verschiedene Situationen abgebildet. Falls vertikale Profile von Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Temperatur bekannt sind, kann das vertikale Profil der effektiven Schallgeschwindigkeit direkt berechnet und die Parameter A und B mittels Kurvenanpassung abgeleitet werden. Andernfalls werden die Parameter aus Windgeschwindigkeit (10 m über Grund) und Wolkenbedeckung/Stabilitätsklasse approximiert.

Die statistischen Gewichte für jede der 25 meteorologischen Klassen werden in je drei monatlichen Tabellen (je eine für Tag, Abend und Nacht) im 10°-Rhythmus angegeben (d. h. alle 10° ausgehend von 0° bis hin zu 350° je ein Gewicht pro Meteorologiekategorie). Dabei werden die absoluten und relativen Häufigkeiten in zwei verschiedenen Tabellen angegeben. Zusätzlich werden pro Meteorologiekategorie und Windrichtungskategorie jeweils die mittlere Feuchte sowie die Temperatur angegeben.

Insgesamt werden also (mindestens) die folgenden Daten benötigt: Orts-Koordinaten, Datum, Tages-

zeit, Windgeschwindigkeit und -richtung (jeweils in 10 m Höhe), Wolkenbedeckung, relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur. Für die Bodenimpedanz kann zusätzlich die Schneebedeckung berücksichtigt werden. Im Falle von Reflexion können für einen gegebenen Reflexionsweg vor und nach dem Reflexionspunkt unterschiedliche meteorologische Koeffizientenpaare A_1, B_1 und A_2, B_2 berücksichtigt werden. Schwankende Koeffizienten A und B können durch Berücksichtigung der jeweiligen Standardabweichung in gewissem Maße berücksichtigt werden.

Zur Erstellung der Tabellen wird empfohlen, die Daten der letzten 10-Jahres-Periode zu verwenden. Soweit keine stündlichen Daten vorliegen, werden die fehlenden Daten mittels Interpolation ermittelt. Zusätzliche Daten, wie z. B. der Effekt von Schnee im Winter, unterschiedliche Vegetation im Jahresverlauf, unterschiedliche Straßenverhältnisse (trocken, nass, schneebedeckt), Bereifung der Fahrzeuge (Winter/Sommer) etc. können, soweit bekannt und unter der Annahme, dass sie innerhalb eines Monats konstant sind, in den monatlichen Daten berücksichtigt werden und gehen damit auch in das Jahresmittel ein.

2.3.2 Harmonoise

Einige neuere nationale Berechnungsmethoden (Imagine/Harmonoise, Nord2000) versuchen die Genauigkeit der Lärmkartierung zu erhöhen, indem viele Details und Techniken einbezogen werden (mehrere Quellhöhen, schmale Frequenzbänder, kohärente Überlagerung, Fresnelzonenkonzept, Meteorologie usw.). Dies erhöht die Genauigkeit, verringert jedoch die Transparenz der Verfahren und verschlechtert die Performance der Rechenprogramme. Das Harmonoise-Modell [13], basiert auf mehr physikalischen Formulierungen, erfordert jedoch genauere Eingabeparameter, wie zum Beispiel Informationen zur Schichtung, also die Temperatur in verschiedenen Höhen und benötigt relativ hohe Rechenzeiten, die auf das 50-fache im Vergleich zu denen anderer Modelle geschätzt werden [25], [26].

Genauigkeit, Präzision, hohe Rechengeschwindigkeit und Flexibilität des Modells sind die Voraussetzungen für ein effizientes Modell in Verbindung mit seiner Eignung zur Erstellung von Lärmkarten.

Harmonoise [13] ist ein Modell zur Vorhersage von Umgebungsgeräuschen, das dem Nord2000-Modell

sehr ähnlich ist. Harmonoise berechnet den Schalldruckpegel in Terzbändern von 25 Hz bis 10 kHz als Langzeitmittelwert. Darüber hinaus beachtet es unterschiedliche Wetterbedingungen und ist auch für bodennahe Quelltypen wie Straße oder Eisenbahn anwendbar.

Im Gegensatz zum Nord2000-Modell definiert Harmonoise nicht für jedes Segment einen Rauheitsparameter. In Harmonoise werden die Eigenschaften der Bodenoberfläche durch die akustische Impedanz des Bodens bestimmt. Die Bodenimpedanz wird auf der Grundlage des Delany- und Bazley-Impedanzmodells berechnet [27], das durch den Strömungswiderstand jedes Bodensegments charakterisiert wird.

Das Dämpfungsmaß (Access Attenuation) durch die Wirkung von Boden, Meteorologie, Hindernisse und Luftabsorption wird über sogenannte Standard-P2P-Modelle für homogene Atmosphäre berechnet. Wie bei dem Modell Nord2000 ermöglicht Harmonoise unterschiedliche Wetterbedingungen, indem das vertikale Schallgeschwindigkeitsprofil durch eine Lin-Log-Beziehung angenähert wird. Die atmosphärische Refraktion wird bei diesen beiden Methoden jedoch unterschiedlich gehandhabt. Harmonoise verwendet gerade Strahlen und krümmt den Boden in entgegengesetzter Richtung, wenn Strahlen gekrümmt sind. Der Krümmungsradius wird aus der maximalen Höhe der Kurve berechnet. Dies ist eine einfachere Methode als die in Nord2000 verwendete. Der Streueffekt durch atmosphärische Turbulenzen wird berücksichtigt, indem der überschüssigen Dämpfung ein Streuterm hinzugefügt wird. Dieser Term nimmt mit zunehmender Entfernung zu. Der Einfluss der Luftabsorption wird mit DIN ISO 9613-1 berechnet.

Meteorologie

Zur Ermittlung eines Jahresdurchschnittswertes werden wie in Nord2000 die Lärmpegel für 25 verschiedene Wetterklassen berechnet und bezüglich ihrer Häufigkeit gemittelt. Die Einteilung in je fünf Klassen für Wind und Stabilität erfolgt gemäß Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2.

In der Harmonoise-Richtlinie werden die o. g. Stabilitätsklassen über den Bewölkungsgrad bei Tag und bei Nacht bestimmt und dabei wird unterstellt, dass diese in direkter Beziehung zu der thermischen Schichtung, also dem vertikalen Temperaturgradienten stehen.

Windklasse	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Grenzwerte	0,0 – 1,0 m/s	1,0 – 3,0 m/s	3,0 – 6,0 m/s	6,0 – 10,0 m/s	> 10,0 m/s

Tab. 2-1: Klassifizierung der Windgeschwindigkeiten

Stabilitätsklasse	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Bezeichnung	sehr labil	labil	neutral	leicht stabil	stabil
Bewölkungsgrad	0 – 2/8	3/8 – 6/8	> 6/8	4/8 – 8/8	0/8 – 4/8

Tab. 2-2: Klassifizierung der Stabilitätsklassen

Für spätere Einteilungen und Auswertungen innerhalb des Projektes wurden konkrete Grenzwerte dT/dz definiert (siehe dazu Kapitel 7.3).

Ebenso wurde die Einteilung zur Auswertung der Windbedingungen etwas geändert, um Windstille besser zu repräsentieren. Da es während der Messphase kaum Windgeschwindigkeiten > 10 m/s gab, wurde auf W_5 verzichtet.

2.3.3 Wellenbasierte Modelle

Im Gegensatz zu den vorher vorgestellten Regelwerken, Richtlinien und Vorschriften werden in wissenschaftlichen Studien Modelle benutzt, die die Physik der Schallausbreitung sehr genau nachbilden. Diese Schallausbreitungsmodelle werden für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet, um den Einfluss komplexer Geländestrukturen (Täler, Straßenschluchten, Vegetation, usw.) unter realistischen meteorologischen Bedingungen zu studieren.

Der Nachteil dieser wellenbasierten Modelle ist, dass sie je nach Gebietsgröße, Gitterauflösung und Frequenzbereich sehr rechenintensiv sind und unter Umständen viele Eingabedaten benötigen.

Neben anderen Codes zur Berechnung der Schallausbreitung, die auf der Lösung der linearisierten Euler Gleichungen beruhen, ist das vom DLR entwickelte linearisierte Euler-Modell AKU3D [28], [29] gut geeignet um sehr spezielle Fragenstellungen in diesem Projekt zu bearbeiten. Es basiert auf den prognostischen Gleichungen für den Schalldruck und die Schallschnellekomponenten. Sie werden numerisch gelöst (zwei- oder dreidimensional) mithilfe von Verfahren höherer Ordnung.

Im Detail werden folgende Gleichungen gelöst:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (14)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla)p = -\gamma p \nabla \quad (15)$$

Wobei t die Zeit, u die Vektorkomponenten der Windgeschwindigkeit darstellen, ρ die Dichte der Luft, γ ist das Verhältnis von c_p/c_v , der spezifischen Wärmekapazität von konst. Druck und Volumen und p den Luftdruck. Die Variablen $\mathbb{Q} = (u, p, \rho)$ werden danach aufgespalten in $\mathbb{Q} = \mathbb{Q} + \mathbb{Q}' + \mathbb{Q}''$ in ihren mittleren Anteil, die turbulenten Schwankungen und die akustischen Anteile Schalldruck p'' und Schallschnellekomponenten u'' , um deren Lösung es hier geht. Dann folgen aus den obigen Gleichungen die prognostischen, linearisierten Euler-Gleichungen für die Schallschnellekomponenten und den Schalldruck:

$$\frac{\partial u''}{\partial t} = -(\bar{u} \cdot \nabla)u'' - \frac{1}{\rho} \nabla p'' + \text{Diffusionsterm} \quad (16)$$

und

$$\frac{\partial p''}{\partial t} = -(\bar{u} \cdot \nabla)p'' - \gamma \bar{p} \nabla \cdot u'' \text{ mit } \rho = \frac{\bar{p}_0}{R_L \bar{T}} \quad (17)$$

Das Modell berücksichtigt optional meteorologische Effekte (mittlere Strömung u und Temperatur T , turbulente Fluktuationen), topografische Effekte, vollständig oder teilweise reflektierende Hindernisse und den Boden mit einer endlichen Impedanz. Durch die Variation dieser Eingabedaten kann im Modell der Einfluss dieser Größen auf die Schallausbreitung untersucht werden.

Typischerweise berechnet man Gebiete die eine horizontale Ausdehnung von ca. 1.000 x 300 m und eine Höhe von 300 m haben. Die Auflösung der Gitterpunkte richtet sich nach der höchsten Frequenz der Schallwelle, die man berechnen möchte und beträgt etwa 1/5 der Wellenlänge. Für Schallwellen mit einer Frequenz von 100 Hz, also einer Wellenlänge von 3,4 m ergibt dies im obigen Beispiel eine Gitteranzahl von: ca. 280 Mio. Gitterpunkten.

Man kann sich leicht vorstellen, dass die Berechnung der gesuchten Größen an jedem Gitterpunkt innerhalb des Untersuchungsgebietes und für sehr viele Zeitschritte innerhalb der Zeit, die die Schallwellen brauchen, um das Untersuchungsgebiet zu durchlaufen, sehr rechenintensiv ist. Auf einem Hochleistungsrechner kann ein solches Gebiet dennoch innerhalb von einigen Stunden berechnet werden.

Die speziellen Eigenschaften von AKU3D sind:

- Als Quellen können Punktschallquelle, Linienschallquelle oder beliebige Geometrie (Präprozessor) eingestellt werden. Die Definition des Schalldrucks erfolgt über die Frequenz und Amplitude, oszillierend oder als pulsartige Anfangsstörung (Anfangsbedingung) mit definierbarer Auslenkung und Breite.
- Die Meteorologie wird aus speziellen Simulationen oder der Experimentalgeometrie vorgege-

ben, mit Temperaturprofil (inkl. Bodeninversion), Schallgeschwindigkeitsprofil und verschiedenen Windprofilen. Somit gehen Windfeld und Dichte (= indirekt Temperatur bzw. Schallgeschwindigkeit) in die akustische Simulation mit ein. Luftabsorption ist nicht implementiert, aber eine nachträgliche Korrektur der Ergebnisse ist möglich.

- Orografie, Boden mit endlicher Impedanz und totalreflektierende oder teilabsorbierende Hindernisse sowie die Geometrie der Hindernisse sind im Rahmen der numerischen Auflösbarkeit beliebig.

2.4 Zusammenfassender Überblick

Eine Zusammenfassung der Rechenmethoden und deren Berücksichtigung meteorologischer Parameter werden im Folgenden in einer tabellarischen Form gegeben (siehe Tabellen 2-3 und 2-4).

	RLS-90/VBUS/ VDI2714 /DIN ISO 9613-2	RVS 04.02.11	SonRoad	FHWA-Traffic Noise Modell	Calculation of road traffic noise (CRTN)
Berücksichtigung des Einflusses von ...					
Temperatur	Für Planungszwecke bei 10 °C	Keine Angabe	8 °C	Keine Angabe	Keine Angabe Luftabsorption nach ISO 9613-1
Luftfeuchtigkeit	Für Planungszwecke bei 70 % r. F.	Keine Angabe	76 % r. F.	Keine Angabe	Keine Angabe Luftabsorption nach ISO 9613-1
Windrichtung	Mitwind	Mitwind	Mitwind	Mitwind	Kein Wind
Windgeschwindigkeit	1 m/s bis 3 m/s (VDI 2720) 1 m/s bis 5 m/s (DIN ISO 9613-2)	Keine Angabe	Keine Angabe	nicht mehr als 2 m/s in Richtung von der Straße zum Empfänger (bei Messung)	Keine Angabe
Bodenbeschaffenheit	Nur bei spektralem Verfahren der DIN ISO 9613-2 unterschiedliche Bodeneigenschaften möglich	Unterscheidung zwischen absorbierend und reflektierend	Keine Angabe	Unterscheidung zwischen Beton und Bitumen sowie zwischen durchlässig und undurchlässig	Bodenreflektion und zusätzlich zwei Arten von Boden- unstetigkeiten (Geländeknicke und eine sich ändernde Bodenimpedanz)
Vertikaler Temperaturgradient	Inversion	Inversion	Keine Angabe	Keine Angabe	Homogene neutrale Atmosphäre (verschwindende Gradienten)
Schichtung der Atmosphäre	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe

Tab. 2-3: Übersicht über die verwendeten meteorologischen Parameter bei Regelwerken ohne explizite Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter

	CNOSSOS-EU	NMPB-Routes 08	Nord2000	Harmonoise
Berücksichtigung des Einflusses von ...				
Temperatur	15 °C (andere Werte erlaubt)	15 °C andere Werte außerhalb der Richtliniengültigkeit möglich	20 °C Korrektur Abrollgeräusch für abweichende Temperaturen	10 °C andere Werte außerhalb der Richtliniengültigkeit möglich
Luftfeuchtigkeit	70 % (andere Werte erlaubt)	70 % andere Werte außerhalb der Richtliniengültigkeit möglich	Keine Angabe	70 % andere Werte außerhalb der Richtliniengültigkeit möglich
Windrichtung	Keine Angabe	Nur innerhalb der Modelle ausbreitungs- günstig oder homogen	5 Windklassen (definiert über Richtung und Geschwindigkeit)	5 Windklassen (definiert über Richtung und Geschwindigkeit)
Windgeschwindigkeit	Keine Angabe	Nein	5 Windklassen (definiert über Richtung und Geschwindigkeit)	5 Windklassen (definiert über Richtung und Geschwindigkeit)
Bodenbeschaffenheit	Kap. VI.4.3: $G_{\text{path}} = 0,1$	$G = 0,1$; unterschiedliche Wirkung bei ausbreitungs- günstigem oder homogenem Modell	Keine Angabe	$G = 0 \dots 1$
Vertikaler Temperaturgradient	Durch ausbreitungs- günstiges oder homogenes Modell	Durch ausbreitungs- günstiges oder homogenes Modell	Keine Angabe	Keine Angabe
Schichtung der Atmosphäre	Keine Angabe	Keine Angabe	5 Stabilitätsklassen	5 Stabilitätsklassen

Tab. 2-4: Übersicht über die Verwendung meteorologischen Parameter bei Regelwerken mit (eingeschränkter) Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter

3 Auswahl eines Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet an einer stark befahrenen Straße dient zum einen der Langzeitmessung der tatsächlichen Einflüsse meteorologischer Parameter auf die Schallausbreitung und zum anderen dem Vergleich der Messergebnisse mit den vorhandenen Rechenmethoden, indem das Gebiet in einer Testaufgabe nachgebildet wird. Das Gebiet ist somit die Testplattform zum direkten Vergleich zwischen Messung und Berechnung. Da der Fokus des Vergleichs auf den Wettereinflüssen lag, wurde ein Gebiet ausgewählt, bei dem andere Einflussfaktoren (Abschirmung, Bewuchs, Gelände o. Ä. möglichst gering sind.

3.1 Auswahlkriterien

Wichtige Voraussetzungen für die Auswahl des Messgebietes waren eine relativ flache Topografie, keine Lärmschutzwände, sonstige störende Bebauung oder Bewuchs im untersuchten Bereich und

aufgrund der Messkampagne eine passende Infrastruktur wie Zugänglichkeit und Stromversorgung. Wegen der Häufung von Ost- und Westwind in Deutschland wurde nach einer Straße mit Nord-Süd-Orientierung gesucht. Die Straße sollte eine repräsentative Verkehrsmenge mit möglichst klaren Verkehrsströmen (z. B. keine Anschlussstelle) aufweisen. Ferner sollten auch möglichst wenige sonstige Lärmquellen im Umfeld vorhanden sein. Essenziell waren zudem das Vorhandensein einer Dauerzählstelle zur Erfassung der Verkehrsstärke auf der Straße sowie die Nähe zu einer Wettermessstation.

Die Suche des Untersuchungsgebiets wurde anhand der Überschneidung der Lage von Zählstellen, der Lage von Wettermessstationen (vgl. Bild 3-1) und den weiteren obengenannten akustischen und meteorologischen Kriterien durchgeführt.

Anhand des Kartenmaterials wurde eine Vorauswahl von potenziellen Messstellen getroffen. Die Kriterien für die Auswahl der möglichen Messstellen sind in Tabelle 3-1 nochmals mit Gewichtung dargestellt.

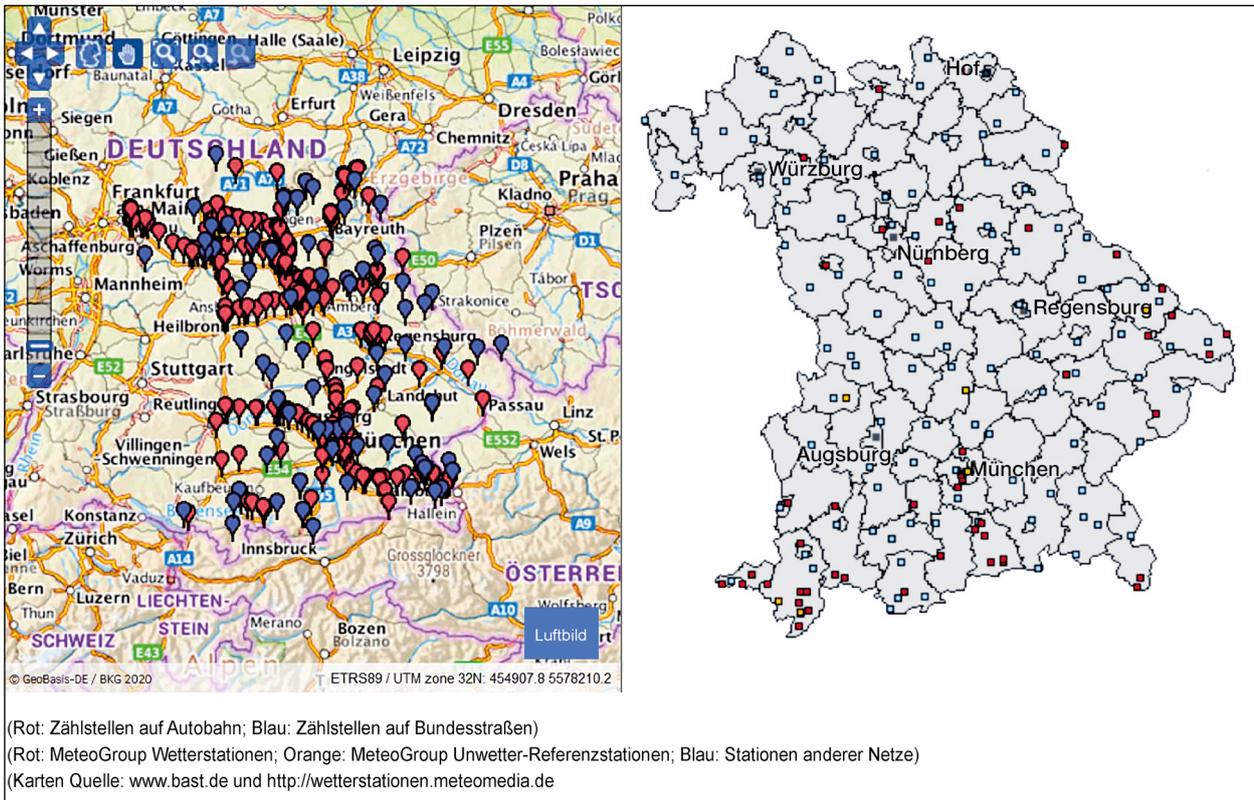


Bild 3-1: Lage der Zählstellen und der Wettermessstationen in Bayern

Anhand dieser Kriterien wurde eine Vorauswahl getroffen und anschließend wurden diese Gebiete durch das Team vor Ort hinsichtlich der Eignungskriterien bewertet:

- BAB 8 bei Altomünster,
- BAB 8 bei Maisach,
- BAB 8 bei Sulzemoos,
- B 17 bei Klosterlechfeld,
- BAB 9 bei Gelbelsee,
- BAB 9 bei Kösching,
- BAB 9 bei Freystadt-Oberndorf.

Nach der Begutachtung vor Ort wurde anhand der Kriterien in Tabelle 3-1 Sulzemoos an der BAB 8 als Messort gewählt.

Kriterium	Wichtigkeit
Ebenes Gelände	+++
Klare Verkehrsströme (keine Beschleunigungsstreifen, Anschlussstellen)	+++
Verkehrsmenge	+++ (fast immer vorhanden)
Nord-Süd-Orientierung der Straße (wg. Häufung von Ost- und Westwind in Deutschland)	++
keine Störung durch Rand- bebauung (Schallschutzwände, Häuser)	++
Lage der Zählstelle in der Nähe	++
Zugänglichkeit	++
Wetter (DWD-Station in der Nähe)	+
Bewuchs	o (Messung nach Erntezeit)

Tab. 3-1: Auswahlkriterien bei der Gebietsuche

3.2 Wahl des Messquerschnitts

Das Messgebiet liegt nahe der Gemeinde Sulzemoos in Bayern, südwestlich der Autobahn BAB 8. Diese Stelle wurde u. a. ausgesucht, weil hier eine Verkehrszählstelle (Zählstelle 9003 an der BAB 8 Sulzemoos) existiert und bzgl. der Himmelsrichtungen ausgeprägte Mitwind- und Gegenwindwetterlagen zu erwarten waren (vgl. Bild 3-2).

Als optimal hat sich der Bereich am Ortsrand von Einsbach auf Höhe der Zählstelle erwiesen, teilweise auf Privatgrund knapp 500 m südwestlich der BAB 8 (siehe Bild 3-2).

Eigenschaften/Vorgeschichte der Region bezüglich Lärm und Meteorologie

Für das Messgebiet können Hintergrundinformationen bezüglich der Lärmbelastung und der typischen meteorologischen Situationen herangezogen werden.

Lärmkartierungsergebnisse

In der Internetanwendung zum Lärmbelastungskataster Bayern (LBK Bayern) sind die Ergebnisse der vom LfU durchgeführten Lärmkartierung entlang der Hauptverkehrsstraßen außerhalb der Ballungsräume, kostenlos abrufbar (siehe UmweltAtlas Bayern: Lärmbelastungskataster [30]). Entlang der Hauptverkehrsstraßen wurden in einem 10 m x 10 m Raster und in einer Höhe von 4 m über dem Gelände die Lärmindizes L_{DEN} und L_{Night} ermittelt. Bei der Berechnung nach VBUS wurden neben dem Gelände, der Bebauung und den Lärmschutzeinrichtungen die Verkehrszusammensetzung, Geschwindigkeiten und Fahrbahnoberflächen als wesentliche schalltechnische Einflussgrößen berücksichtigt. Anhand dieser Berechnungsergebnisse der Umgebungslärmkartierung 2012 wurde der mögliche Einflussbereich der Autobahn abgeschätzt und das Untersuchungsgebiet abgegrenzt.

Meteorologische Daten

Zur Einschätzung der meteorologischen Bedingungen wurde eine Windstatistik basierend auf Messwerten zwischen 05/2013 – 01/2019 täglich von 7:00 bis 19:00 Uhr lokaler Zeit der Firma WindFinder.com GmbH & Co. KG herangezogen (vgl. Bild 3-3). Das Gebiet ist demnach aus meteorologischer Sicht durch eine NW-Anströmung, wobei aber auch häufig NO-Fälle auftreten, geprägt.



Bild 3-2: Messgebiet bei Sulzemoos (Kartenquelle: OpenStreetMap, Lizenz: CC-BY-SA 2.0)

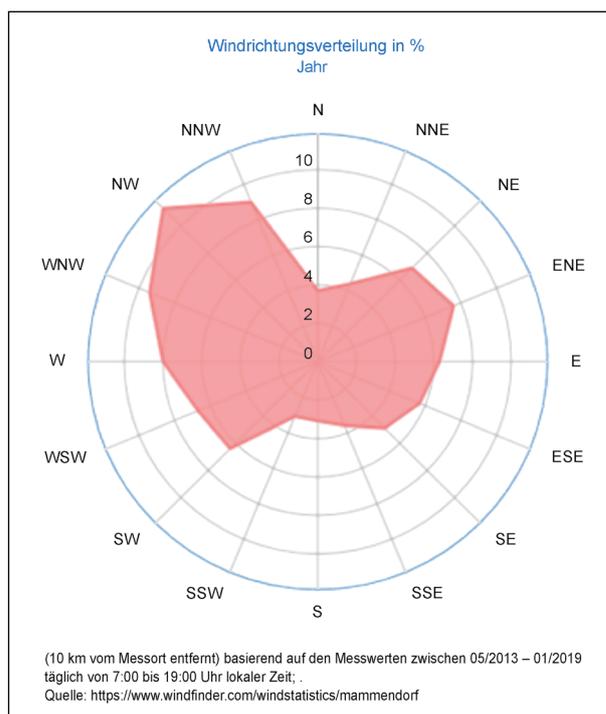


Bild 3-3: Windrichtungsstatistik für Station Mammendorf

Die Langzeitmesskampagne (ca. drei Monate) hatte zum Ziel die Einflüsse verschiedener Wettersituationen auf die Schallausbreitung zu quantifizieren. Der Übergang vom Spätsommer zum Herbst bis in den Spätherbst enthält sehr unterschiedliche Wettersituationen wie z. B. Spätsommertage mit starker Sonneneinstrahlung und labiler/konvektiver Schichtung, ruhiges Herbstwetter mit neutraler Schichtung, aber auch Frontdurchgänge mit labiler Schichtung und stärkeren Winden aus unterschiedlichen

Richtungen. Daher wurde die Messkampagne in den Zeitraum von September bis Mitte Dezember gelegt.

4 Testaufgaben für Ausbreitungsberechnungsverfahren

Der bisherige Vergleich der Rechenverfahren, wie er in Kapitel 2 beschrieben ist, stellt zunächst die unterschiedlichen Vorgehensweisen anhand deren Beschreibung dar. Um eine Abschätzung dafür zu erhalten, welchen quantitativen Unterschied diese verschiedenen Vorgehensweisen zum Ergebnis haben, sind vergleichende Berechnungen notwendig. Hierfür eignet sich besonders die Methode von Testaufgaben, die geometrische Randbedingungen und eine Quelle definieren und somit den quantitativen Vergleich von Rechenergebnissen ermöglichen.

4.1 Generelle Vorgehensweise

Auswirkungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Berücksichtigung meteorologischer Parameter lassen sich am besten anhand von Testaufgaben mit definierten, einfachen Randbedingungen untersuchen und vergleichen. Die Übereinstimmung bzw. Abweichung vom messtechnisch ermittelten Einfluss meteorologischer Parameter werden an einer Testaufgabe, die das Untersuchungsgebiet der Messungen nachbildet, untersucht.

Insgesamt wurden vier Testaufgaben entwickelt und in Rechenmodellen umgesetzt. Folgende Rechenverfahren wurden dabei untersucht:

- RLS-90/VBUS,
- VDI 2714,
- DIN ISO 9613-2,
- CNOSSOS-EU/BUB,
- NMPB-Routes 08,
- Nord2000,
- Harmonoise.

Die Verfahren wurden in den Testaufgaben in kommerziell erhältlichen qualitätsgesicherten Programmen zur Schallimmissionsprognose verglichen. Für

diesen Arbeitsschritt wurde bei der Möhler + Partner Ingenieure AG das Softwareprogramm SoundPLAN für alle Ausbreitungsmodelle außer Harmonoise verwendet. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. verwendete das Programm CadnaA für die Ausbreitungsrechnung nach Harmonoise.

Zunächst wurden vereinfachte Testaufgaben mit konstruierten Modellsituationen berechnet. Diese Testaufgaben lehnen sich in Ihrer Komplexität an gängigen Testaufgaben an. In diesen Testaufgaben wurde der Einfluss der sonstigen auf dem Ausbreitungsweg relevanten Korrekturwerte (für den Boden (Geländeform), Abschirmungen und Reflexionswege) möglichst gering gehalten. Weiterhin wurde eine Testaufgabe erstellt, die die Situation im Untersuchungsgebiet abbildet, um einen Vergleich mit den Messwerten an der Dauermessstation herstellen zu können. Diese Testaufgabe wurde mit zwei Untervarianten erstellt: mit dem vorhandenen natürlichen Gelände und mit einem fiktiven ebenen Gelände.

Um bei den Testaufgaben die unterschiedliche Ausbreitungsrechnung mit verschiedenen meteorologischen Bedingungen vergleichen zu können, wurde die Emission bei allen Testaufgaben neutralisiert. D. h. die Emission der Straße wurde derart angepasst, dass bei Standard-Ausbreitungsbedingungen (schallausbreitungsgünstig entsprechend der Definition der DIN ISO 9613-2) an dem Rechenpunkt in 25 m Abstand von der Fahrbahnmitte identische Immissionspegel errechnet werden (eine Vereinheitlichung auf identische Emissionskenngrößen ist aufgrund der unterschiedlichen Emissionsgrößen bei den Rechenverfahren nicht möglich). Alle weiteren Rechenergebnisse werden im Folgenden als Abweichungen von diesem Rechenwert dargestellt.

4.2 Darstellung der Testaufgaben

Für die vorliegende Untersuchung wurden drei Testaufgaben mit „einfacher“ Geometrie und zwei Testaufgaben mit „komplexer“ Situation erstellt.

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

- „Komplexe“ Situation
 - TA 4a: Modell „Sulzemoos eben“; Modell des realen Messgebietes mit fiktivem ebenem Gelände,
 - TA 4b: Modell „Sulzemoos“; Modell des realen Messgebietes mit tatsächlichem Geländemodell.

Die Testaufgaben werden im Folgenden dargestellt.

4.2.1 Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände

Ein Vergleich des unterschiedlichen Einflusses der Meteorologie in unterschiedlichen Rechenmodellen mit den geringsten Störeinflüssen auf die Schallausbreitung lässt sich am deutlichsten in einem einfachen Testmodell mit ebenem Gelände anstellen. Die einfachste Situation ist eine lange gerade Straße mit einer Reihe von Berechnungspunkten in einem orthogonal verlaufenden Messquerschnitt. In diesem Messquerschnitt werden Berechnungspunkte in einem von der Fahrbahnmitte gemessenen Abstandsrastrer von 25 m bis zu einem Abstand von 100 m und ab 100 m in einem Abstandsrastrer von 100 m bis zu einem Abstand von 2.500 m angeordnet. Die Berechnungspunkte befinden sich in einer Höhe von 2 m über dem Gelände.



Bild 4-1: TA1 – Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände

4.2.2 Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)

Bei der Ausbreitungsrechnung ist weiterhin der Vergleich des unterschiedlichen Einflusses der Meteorologie auf die Berechnung der Abschirmung durch Hindernisse von Interesse, weil die verschiedenen Berechnungsvorschriften insbesondere im Zusammenhang mit dem Einfluss der Meteorologie diesen Fall sehr unterschiedlich abhandeln. Daher wurde die vorangegangene Testaufgabe 1 in der folgenden Testaufgabe 2 durch eine beidseitige Abschirmung in Form eines parallel zur Quelle verlaufenden Walls ergänzt. Der Wall wurde hier mit einer Kronenhöhe von 6 m, einer Kronenbreite von 1 m und einem Gefälle von 2/3 gewählt, sodass sich eine Fußbreite von 19 m ergibt.

In gleicher Weise wurden die Berechnungspunkte in einem orthogonal verlaufenden Messquerschnitt in einem von der Fahrbahnmitte gemessenen Abstandsrastrer von 25 m bis zu einem Abstand von 100 m und ab 100 m in einem Abstandsrastrer von 100 m bis zu einem Abstand von 2.500 m angeordnet. Die Berechnungspunkte befinden sich in einer Höhe von 2 m über dem Gelände.

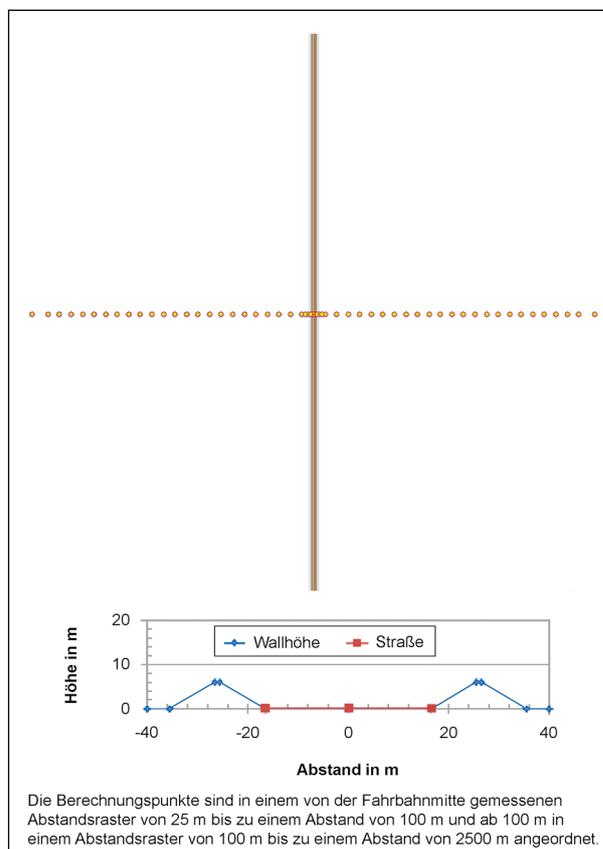


Bild 4-2: TA 2 – Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)

4.2.3 Zwei kreuzende, lange gerade Straßen auf ebenem Gelände

Da in Deutschland das Straßennetz relativ engmaschig ist, gibt es lange gerade singuläre Quellen eher selten. Deswegen wurde eine weitere Testaufgabe erzeugt, die den Einfluss schallausbreitungsgünstiger bzw. -ungünstiger Bedingungen aus verschiedenen Himmelsrichtungen beleuchtet. Während bei Rechenmodellen, die schallausbreitungsgünstige Bedingungen zugrunde legen, diese für Quellen aus allen Himmelsrichtungen gelten, sind bei Modellen, die eine Windrichtung berücksichtigen, für Quellen aus verschiedenen Richtungen unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen zu rechnen. Diese Situation wird anhand einer Testaufgabe untersucht, die eine Situation mit orthogonal kreuzenden, langen und geraden Straßen darstellt. Dabei werden die Berechnungspunkte in Messquerschnitten orthogonal zur „primären“ Straße angeordnet.

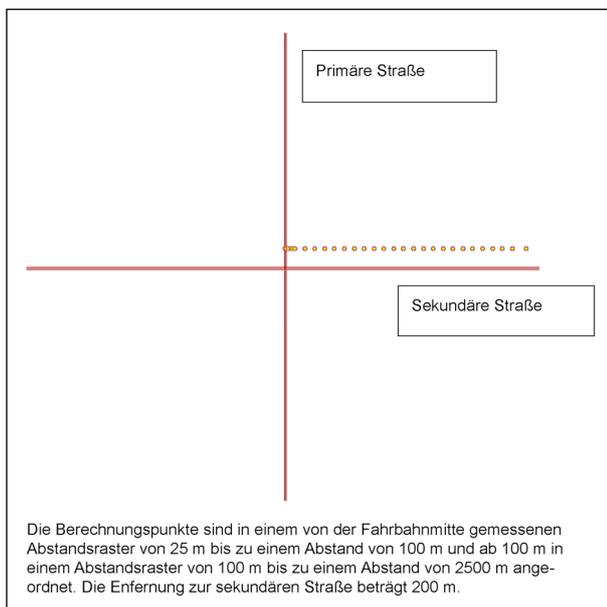


Bild 4-3: TA 3 – Zwei kreuzende, lange gerade Straßen auf ebenem Gelände

4.2.4 Modell „Sulzemoos eben“; Modell des Messgebiets mit fiktiv ebenem Gelände

Das Modell „Sulzemoos eben“ stellt auf Grundlage des amtlichen Katasterkartenwerks einen 5 km x 5 km großen Ausschnitt um den Messquerschnitt der Dauermessungen an der BAB 8 bei Sulzemoos dar. Ziel dieser Testaufgabe ist es das Testgebiet im Modell als perfekte Ebene darzustellen und somit den Einfluss des Geländes vorerst auszublenden. Demzufolge wurde für dieses Modell kein Gelände entsprechend der vorliegenden Situation in Sulzemoos angenommen, sondern ein ebenes Gelände. Die Immissionspunkte liegen 2 m über Grund (Bild 4-4).

4.2.5 Modell „Sulzemoos“; realitätsnahes Modell des Messgebiets

In dieser Testaufgabe wurden alle Einflüsse im Untersuchungsgebiet Sulzemoos auf lokale Schallpegel so gut es geht beachtet, das sind: Geländemodell, Bebauung und je nach Rechenvorschrift Meteorologie. Es wird erwartet, dass hier die geringste Differenz zwischen Modell und Messung auftritt, wenn die Umgebungsbedingungen in Modell und Realität so ähnlich wie möglich gehalten werden. Um die Auswirkungen des Geländes zu untersuchen, wurde in dieser Variante das Modell „Sulzemoos“ mit dem entsprechenden Gelände in Sulzemoos versehen. Das Gelände wurde als Triangulation aus Höhenpunkten im 1 m x 1 m Raster im direkten Umfeld der Messpunkte (1.000 m x 1.000 m) und im 10 m x 10 m Raster im äußeren Umfeld erzeugt (Bild 4-5).

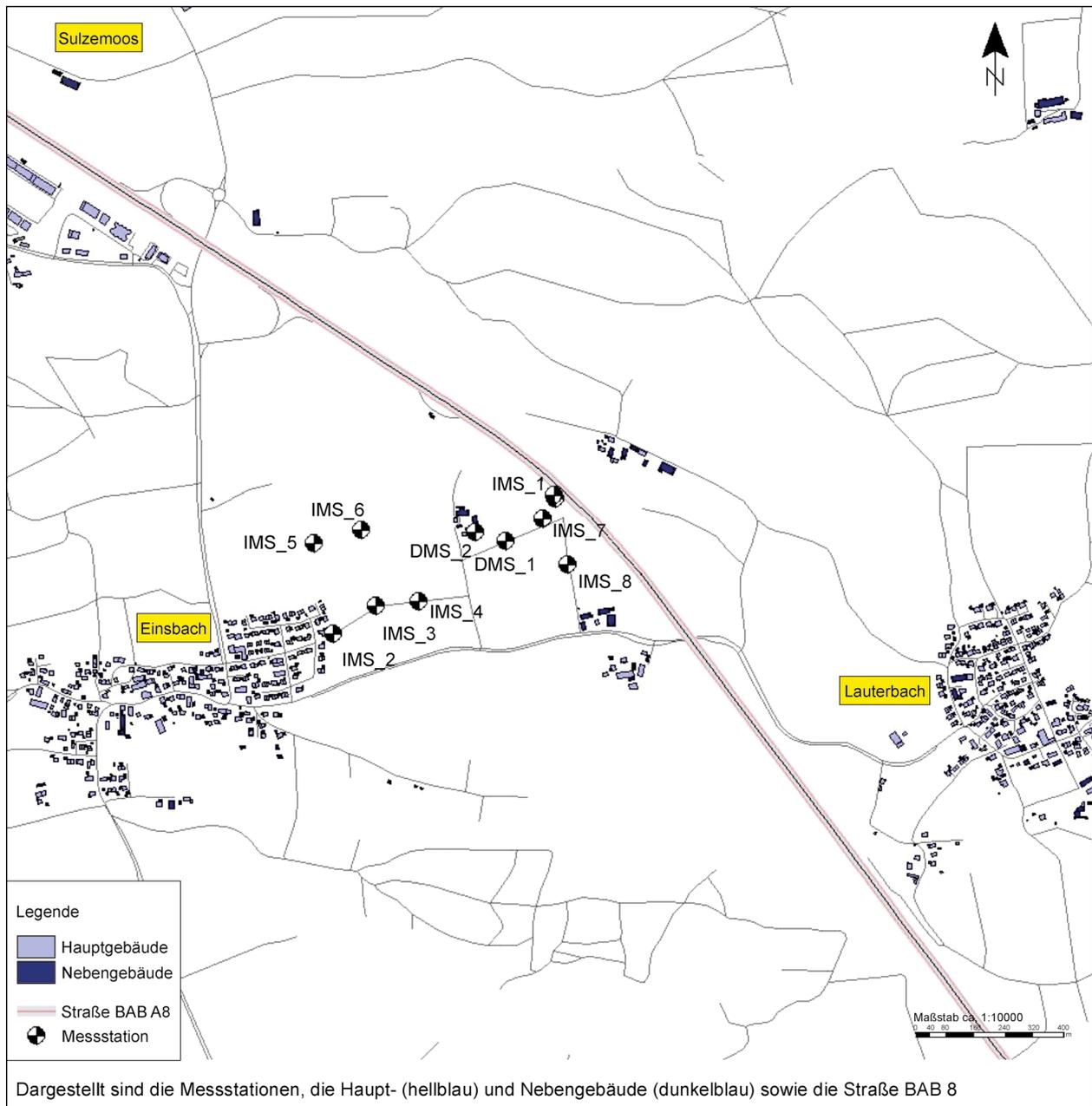


Bild 4-4: TA 4a – Modell „Sulzemoos eben“

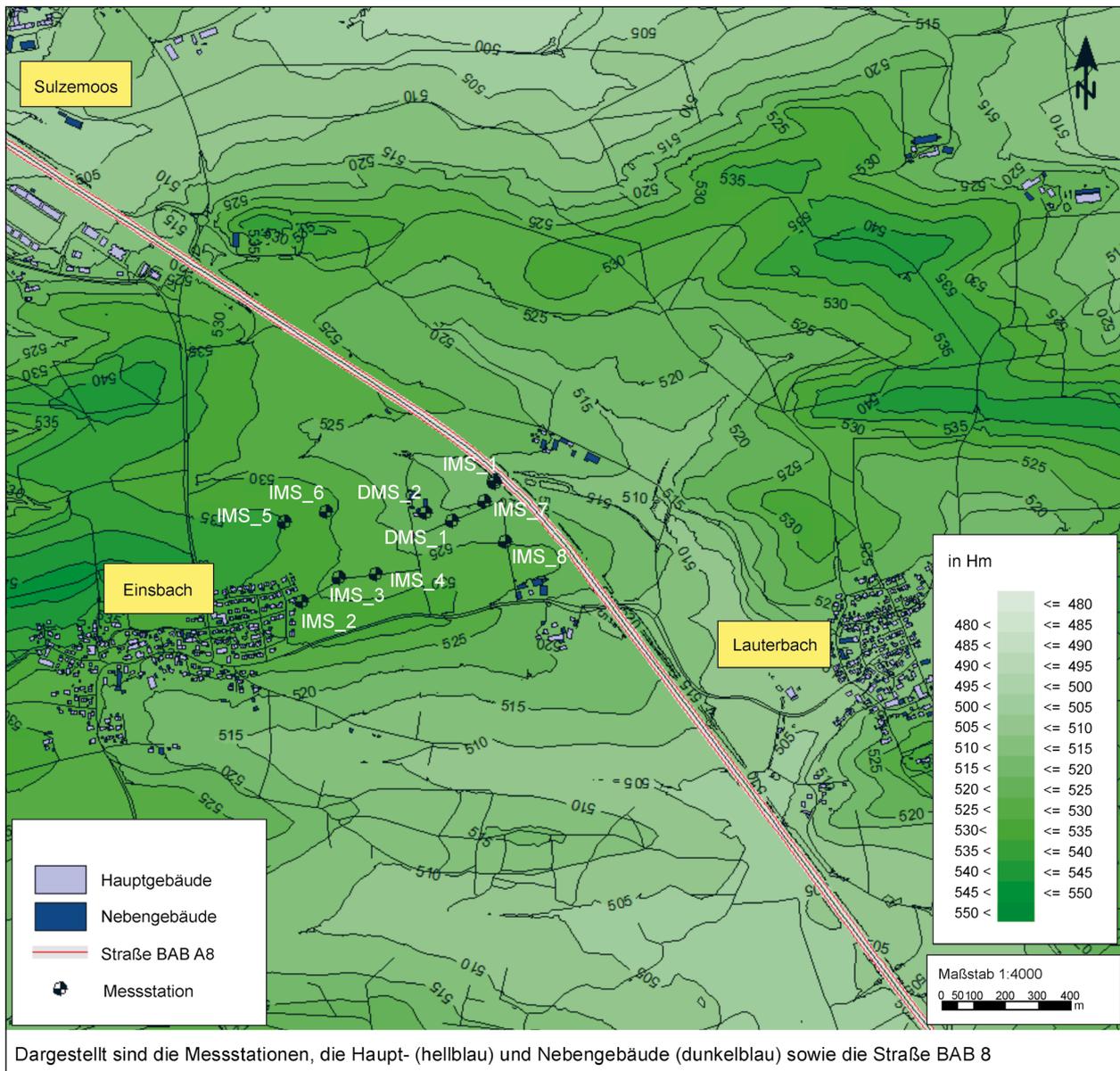


Bild 4-5: TA 4b – Darstellung des realistischen Modell „Sulzemoos“ mit Höhenlinien

5 Berechnungsergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln sind die Berechnungsergebnisse für die Testaufgaben 1 bis 4 mit verschiedenen Rechenverfahren dargestellt. Hierbei wurden abhängig von der jeweils betrachteten Norm schallausbreitungsgünstige Bedingungen (siehe Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4) sowie abweichende meteorologischen Randbedingungen (schallausbreitungsgünstig, Berücksichtigung verschiedener Stabilitäts- und Windklassen) auf die errechneten Immissionspegel dargestellt und interpretiert. Die Unterschiede der verschiedenen Rechenverfahren werden für unterschiedliche Abstände diskutiert.

Um die Einflüsse der Unterschiede bei der Emissionsmodellierung auszuklammern, wurde ein Referenzpunkt in 25 m Abstand von der Schallquelle gewählt. Der Immissionspegel, der sich nach den jeweiligen Rechenverfahren bei Mitwind und ohne Abschirmung ergibt, wird jeweils als Referenzwert für alle Rechenverfahren gewählt und die Ergebnisse an weiteren Berechnungspunkten als Abweichung von diesem Wert dargestellt.

5.1 Alle Methoden bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind)

Die folgenden Grafiken zeigen die Abhängigkeit des Pegels vom Abstand bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind) für die verschiedenen Testszenarien. Folgende Rechenmodelle werden hierbei miteinander verglichen:

- RLS-90,
- VBUS,
- VDI 2714,
- DIN ISO 9613-2,
- CNOSSOS-EU/BUB,
- NMPB-Routes 08,
- Nord2000.

Die VDI 2714 und die DIN ISO 9613-2 enthalten keine Quellmodellierung, da sie nicht auf Straßenverkehr begrenzt sind. Bei diesen Verfahren wurde die Straße als Linienquelle mit A-bewerteten Summenpegeln bei einer Mittenfrequenz von 500 Hz modelliert. Diese Festlegung ergibt sich aus der Anmerkung 1 aus dem Anwendungsbereich der DIN ISO 9613-2. Demnach ist das Verfahren auch für Straßenverkehr anwendbar, wobei in dem Fall, in dem nur A-bewertete Schalleistungspegel der Schallquellen bekannt sind, die Dämpfungstherme bei 500 Hz verwendet werden können. Das standardisierte Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 [31] würde zwar auch eine andere Oktave als Hauptanteil nahelegen, der Einfluss einer spektralen Berücksichtigung der Emission soll im Weiteren jedoch noch separat betrachtet werden. Für die weiteren Rechenverfahren mit Emissionsbeschreibung für Straßenverkehr wurde eine Straßenquelle nach der jeweiligen Norm angesetzt und berechnet. In Bild 5-1 ist die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 1 für alle Rechenverfahren bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind) dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Rechenverfahren lassen sich grob in vier Gruppen unterteilen.

Die erste Gruppe bilden die Normen VDI 2714, DIN ISO 9613-2. Die VDI 2714 und die DIN ISO 9613-2 basieren auf einem vergleichbaren Rechenmodell, sodass hier ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind. Die zweite Gruppe bilden die BUB und die NMPB-Routes-08. Die BUB stellt eine leichte Abwandlung der NMPB-Routes-08 dar, sodass auch zwischen

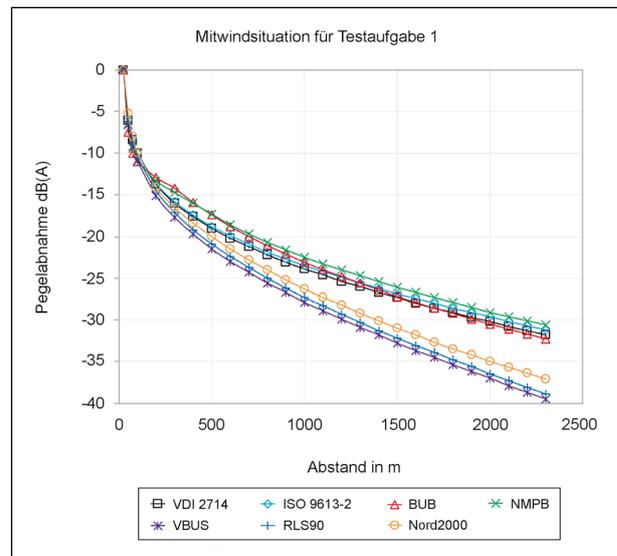


Bild 5-1: Testaufgabe 1: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand bei Mitwindsituation

diesen beiden Normen keine großen Unterschiede zu erwarten sind.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der VDI 2714 und der DIN ISO 9613-2 und den Ergebnissen der BUB und der NMPB-Routes-08 resultieren hier aus den unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten für Luft. Es zeigt sich u. a., dass die BUB und die NMPB-Routes-08 bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen ähnliche Ergebnisse liefern wie die VDI 2714 und die DIN ISO 9613-2.

Die dritte Gruppe bilden die Normen RLS-90 und VBUS. Auch hier ist eine Ähnlichkeit zu erwarten, da die VBUS lediglich eine Abwandlung der RLS-90 darstellt. Allerdings wird in der VBUS der Einfluss der Langzeitwitterungsbedingungen (D_{met}) berücksichtigt, was den Unterschied zu den RLS-90 erklärt.

Die Unterschiede zwischen der ersten und der dritten Gruppe resultieren ebenfalls größtenteils aus den unterschiedlichen Ansätzen im Luftabsorptionsterm. So ist beispielsweise nach RLS-90 ein frequenzunabhängiger Dämpfungsfaktor von 0,005 dB/m anzusetzen, während die DIN ISO 9613-2 z. B. mit 0,002 dB/m bei 500 Hz rechnet.

Die vierte Gruppe bildet die Nord2000, welche den Luftabsorptionseffekt auf Basis der DIN ISO 9613-2, mit spektraler Betrachtung, berechnet.

In Bild 5-2 sind vergleichend hierzu die Berechnungsergebnisse für die Mitwindsituation bei spektraler Betrachtung der DIN ISO 9613-2 und der VDI

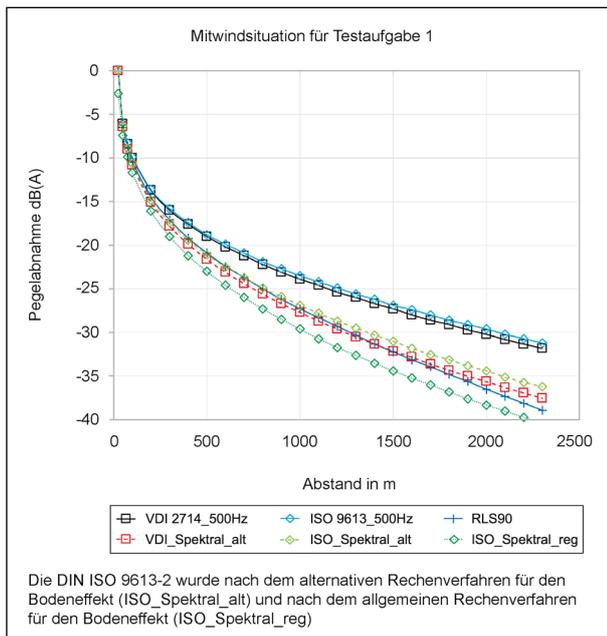


Bild 5-2: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Mitwindsituation und spektrale Betrachtung der DIN ISO 9613-2 und der VDI 2714

2714 dargestellt. Als Spektrum wird das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus der DIN-EN-1793-3 [31] verwendet. Die DIN ISO 9613-2 wird hier einmal mit dem allgemeinen Rechenverfahren für den Bodeneffekt und einmal mit dem alternativen Rechenverfahren dargestellt. Die VDI 2714 kennt nur ein Rechenverfahren für den Bodeneffekt, welches dem alternativen Verfahren in der DIN ISO 9613-2 entspricht. Informativ sind auch die Rechenergebnisse für die DIN ISO 9613-2 und die VDI 2714 bei 500 Hz, sowie für die RLS-90 dargestellt.

Der Vergleich der drei Berechnungsarten für die DIN ISO 9613-2 ergibt eine maximale Differenz von ca. 17 dB zwischen der Berechnung bei 500 Hz und der spektralen Berechnung mit allgemeinem Rechenverfahren für den Bodeneffekt. Die Differenz zwischen der Berechnung bei 500 Hz und der spektralen Berechnung mit alternativer Rechenverfahren für den Bodeneffekt beträgt ca. 10 dB(A).

Für die VDI 2714 ergibt der Vergleich der spektralen Berechnung mit der Berechnung bei 500 Hz einen Unterschied von ca. 10 dB(A).

Wie zu erwarten nähern sich die Berechnungsergebnisse der DIN ISO 9613-2 und der VDI 2714 bei spektraler Betrachtung den Ergebnissen der RLS-90 an, da hier das typische Verkehrslärmspektrum zugrunde liegt.

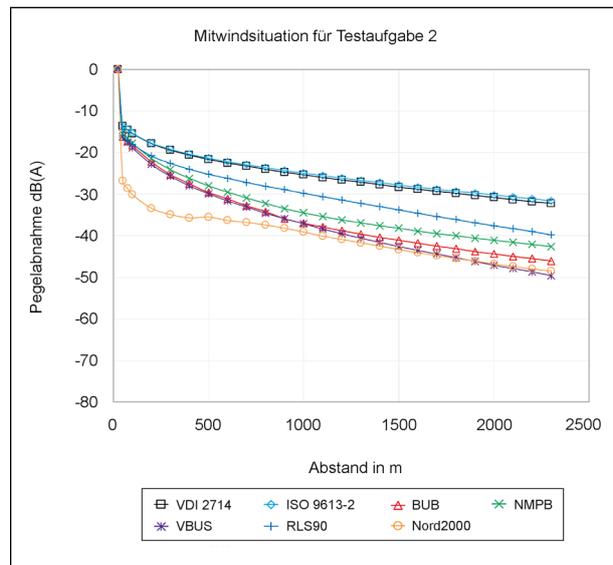


Bild 5-3: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand bei Mitwindsituation

In Bild 5-3 wird die Auswirkung auf die Pegelabnahme durch Hinzufügen eines Walls näher betrachtet. Die VDI 2714, DIN ISO 9613-2 und RLS-90 enthalten bei der Berücksichtigung von Abschirmungen eine Korrektur für Witterungseinflüsse, die eine nach unten gebrochene Schallausbreitung bei Mitwindwittersituation berücksichtigt. Dies führt dazu, dass die Schallstrahlen bei hohen Abständen (ab ca. 1.500 m) wieder zusammenfallen und die Dämpfung durch Abschirmung bei hohen Abständen nur noch gering ist. Die VBUS enthält im Gegensatz zu den RLS-90 eine Korrektur für Langzeitmittelungspegel (D_{met}), was hier den Unterschied zu den RLS-90 erklärt. Die BUB und NMPB enthalten keine zusätzliche Korrektur für Witterungseffekte bei Abschirmung, gehen jedoch bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen grundsätzlich von einem gebeugten Schallweg aus. Die Nord2000 hat ihr eigenes Berechnungssystem basierend auf dem Fresnelzonenkonzept.

In Bild 5-4 ist die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 3 für die Mitwindsituation dargestellt. Bis auf Pegelunterschiede von ca. 5 dB(A) verhalten sich alle Normen ähnlich. Ab einer Entfernung von ca. 500 m von der senkrechten Straße dominiert der Einfluss der waagerechten Straße den Pegel. Ein besonderer Effekt durch meteorologische Einflüsse lässt sich hier nicht erkennen. Zu beachten ist bei dieser Testaufgabe, dass die Mitwindsituation für alle Himmelsrichtungen berechnet und somit für beide Straßen berücksichtigt wird. In der Realität würde Mitwind nur für eine der

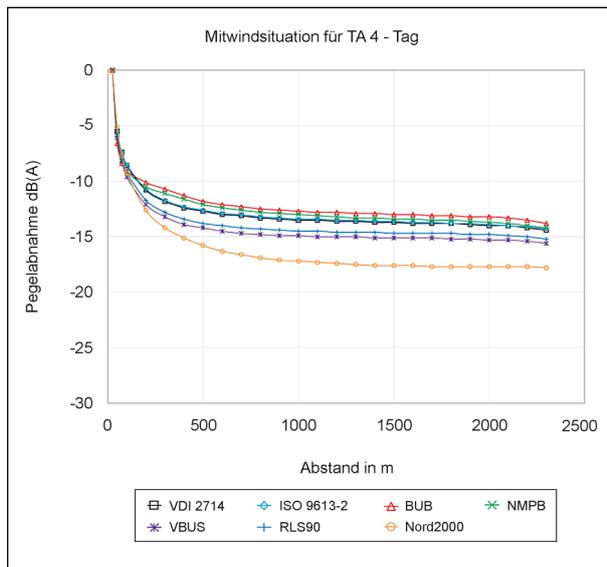


Bild 5-4: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Mitwindsituation

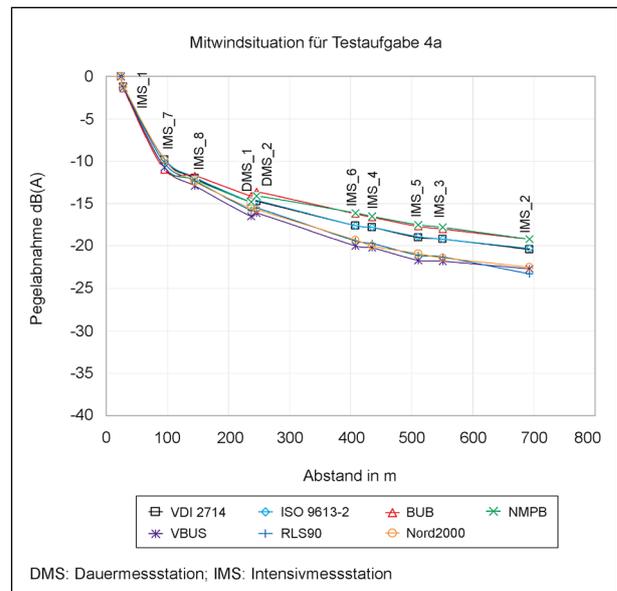


Bild 5-5: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Mitwindsituation

beiden Straßen auftreten, während die andere im Querwind liegt.

Bild 5-5 und Bild 5-6 zeigen die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 4a sowie für die Testaufgabe 4b bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen. Der Abstand wird hier für jeden Messpunkt durch den kürzesten orthogonalen Abstand zur Straße definiert.

Wie auch bei der Testaufgabe 1 lassen sich hier die unterschiedlichen Normen in Gruppen analog zu Testaufgabe 1 unterteilen. Die Pegelunterschiede bei der VBUS, den RLS-90 und Nord2000 im Vergleich zur VDI 2714, DIN ISO 9613-2, BUB und NMPB-Routes-08 rühren von den unterschiedlichen Ansätzen im Luftabsorptionsterm her, was insbesondere bei großen Entfernungen zutage tritt. Die Unterschiede zwischen der Gruppe mit VDI 2714 und DIN ISO 9613-2 und der Gruppe mit BUB und NMPB-Routes-08 resultieren wieder aus den unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten für Luft. Die Abweichungen zwischen VBUS und RLS-90 sind durch die Korrektur für den Langzeitmittelungspegel (D_{met}) bei der VBUS bedingt. Somit ähnelt das Verhalten der Graphen in Testaufgabe 4a dem der Graphen in der vereinfachten Darstellung der langen, geraden Straße in Testaufgabe 1.

Durch die Hinzunahme des Geländes (vgl. Bild 5-6) ergibt sich für die VDI 2714, DIN ISO 9613-2 und Nord2000 eine geringere Pegelabnahme im Vergleich zu Testaufgabe 4a. Die BUB weist hingegen

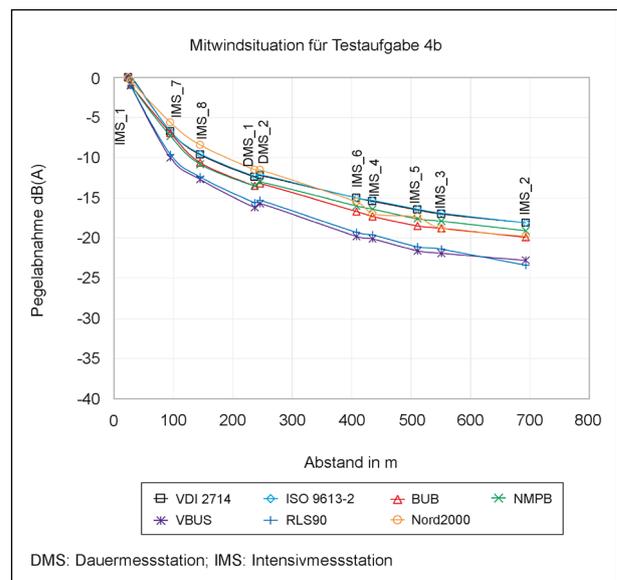


Bild 5-6: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand bei Mitwindsituation

eine höhere Pegelabnahme auf. Für die RLS-90, NMPB-Routes-08 und VBUS zeigt sich hier durch Hinzunahme des Geländes fast keine Änderung.

Der Knick zwischen DMS_1 und DMS_2 bei ca. 250 m lässt sich auf die Nähe des Messpunktes (DMS_2) zum Heishof und die abschirmende Wirkung der dortigen Gebäude zurückführen. Die Stufen zwischen IMS_6 und IMS_4 sowie zwischen IMS_5 und IMS_3 sind topografisch bedingt und lassen sich darauf zurückführen, dass einerseits die Quelle gebogen verläuft und andererseits darauf, dass die

Immissionsorte nicht in einer Linie verlaufen. Die Hinzunahme des Geländes führt vor allem bei der Nord2000 zu einer deutlicher ausgeprägten Stufe.

5.2 Methoden mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie bei schallausbreitungsgünstigen und -ungünstigen Bedingungen

Im Folgenden werden Regelwerke mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie untersucht. Es werden allerdings bei BUB und NMPB-Routes-08 keine gewichteten Mittelungen von schallausbreitungsgünstiger und -ungünstiger Witterung vorgenommen, sondern die beiden Fälle schallausbreitungsgünstig und schallausbreitungsgünstig getrennt betrachtet. Im Fall der DIN ISO 9613-2 wird zwischen einer Korrektur für den Langzeitmittelungspegel C_{met} mit einem Witterungsfaktor $C_0 = 0$ und mit $C_0 = 2$ unterschieden. Diese Fälle sind jedoch nicht einem schallausbreitungsgünstigen oder -ungünstigen Fall gleichzusetzen, sondern geben einen über ausschließlich günstige ($C_0 = 0$) oder gemischte Ausbreitungsbedingungen ($C_0 = 2$) gemittelten Langzeitmittelungspegel wieder.

Im Folgenden ist die Abhängigkeit der Pegelabnahme vom Abstand bei schallausbreitungsgünstigen und -ungünstigen (bzw. homogenen) Bedingungen für die verschiedenen Testszenarien dargestellt. Folgende Rechenmodelle werden hierbei miteinander verglichen:

- DIN ISO 9613-2,
- CNOSSOS-EU/BUB,
- NMPB-Routes 08.

In Bild 5-7 ist die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 1 für schallausbreitungsgünstige und -ungünstige (bzw. homogene) Bedingungen, für die Normen mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie, dargestellt.

Der Unterschied bei der DIN ISO 9613-2 zwischen $C_0 = 0$ und $C_0 = 2$ resultiert in einer Verschiebung des Graphen um ca. 2 dB(A) ab einem Abstand von ca. 100 m. Dabei entspricht $C_0 = 0$ und $C_0 = 2$ in der DIN ISO 9613-2 nicht der Unterscheidung zwischen schallausbreitungsgünstigen und homogenen Ausbreitungsbedingungen wie in den anderen Normen

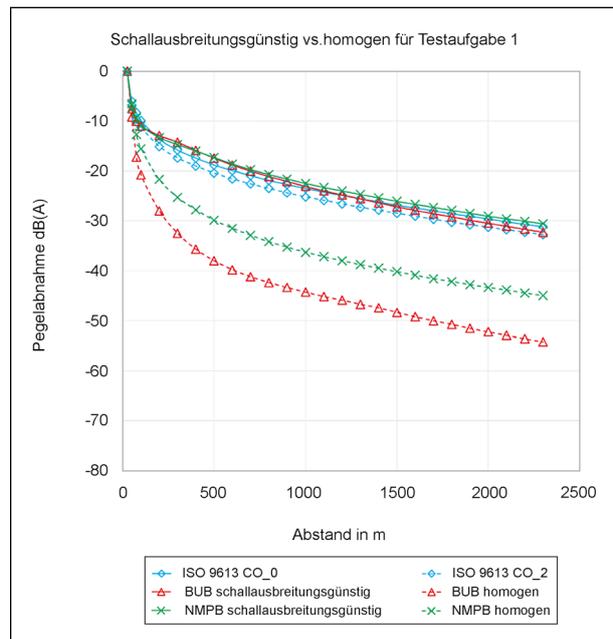


Bild 5-7: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen

(BUB und NMPB-Routes-08). Vielmehr berücksichtigt der Faktor C_0 örtliche Wetterstatistiken (d. h. Langzeitbeobachtungen) für Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie Temperaturgradienten. Die meteorologische Korrektur C_{met} impliziert somit bereits die Langzeitmittelung zwischen günstigen und homogenen Bedingungen. Eine getrennte Berücksichtigung ausschließlich homogener oder ungünstiger Ausbreitungsbedingungen würde somit eine größere Differenz zu den ausbreitungsgünstigen Bedingungen liefern.

Dies zeigt sich hier bei den beiden anderen Rechenverfahren BUB und NMPB-Routes-08: Im Vergleich zur schallausbreitungsgünstigen Berechnung bewirkt die homogene Variante eine zusätzliche Pegelabnahme von bis zu 20 dB(A).

Bild 5-8 zeigt die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 2 für schallausbreitungsgünstige und -ungünstige (bzw. homogene) Bedingungen, dargestellt für die Berechnung nach Normen mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie.

Die DIN ISO 9613-2 zeigt nach Hinzunahme eines Walls keinen weiteren Effekt zwischen dem schallausbreitungsgünstigen ($C_0 = 0$) und dem homogenen ($C_0 = 2$) Fall. Der Unterschied zwischen beiden Fällen resultiert analog zu Testaufgabe 1 lediglich in einer Verschiebung des Graphen um ca. 2 dB(A) ab einem Abstand von ca. 100 m.

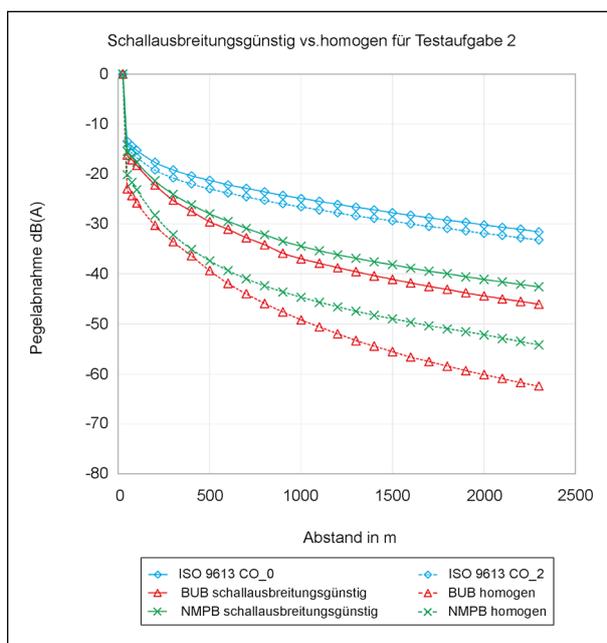


Bild 5-8: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen

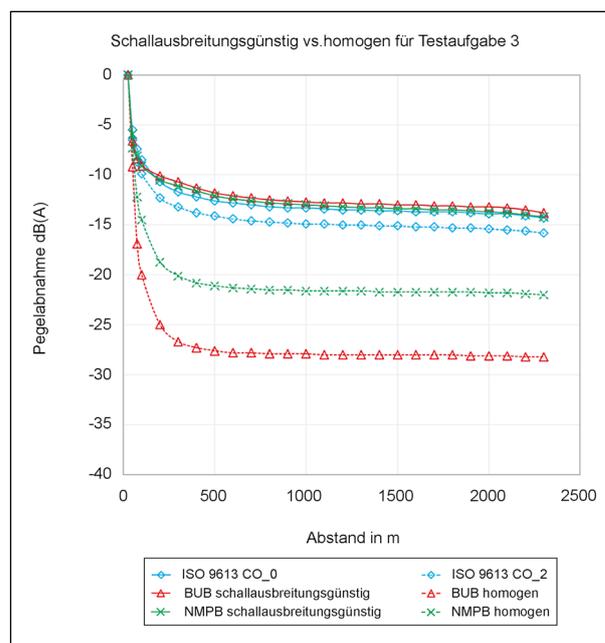


Bild 5-9: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen

Die BUB und die NMPB-Routes-08 gehen für schallausbreitungsgünstige Bedingungen von einem gebeugten Schallstrahl und von einem geraden Schallstrahl für homogene Bedingungen aus, somit fällt die Schallminderung durch Abschirmung für schallausbreitungsgünstige Bedingungen im Bereich unter 500 m geringer aus. Bei großen Abständen nimmt der Einfluss der meteorologischen Parameter auf den Abschirmeffekt ab.

Bild 5-9 ist die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 3 für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen, dargestellt für die Berechnung nach Normen mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie.

Wie schon in Kapitel 5.1 ist ein zusätzlicher meteorologischer Effekt durch Hinzunahme der zweiten Straße nicht zu erkennen. Der Pegel wird ab einer Entfernung von ca. 500 m zur senkrechten Straße nur noch von der waagerechten Straße bestimmt.

Erneut ist hier zu beachten, dass sowohl die schallausbreitungsgünstige als auch die homogene Situation für alle Himmelsrichtungen und somit für beide Straßen gilt, was in der Realität nur für den homogenen Fall oder bei Inversion in Verbindung mit Windstille möglich ist.

Bild 5-10 und Bild 5-11 zeigen die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 4a

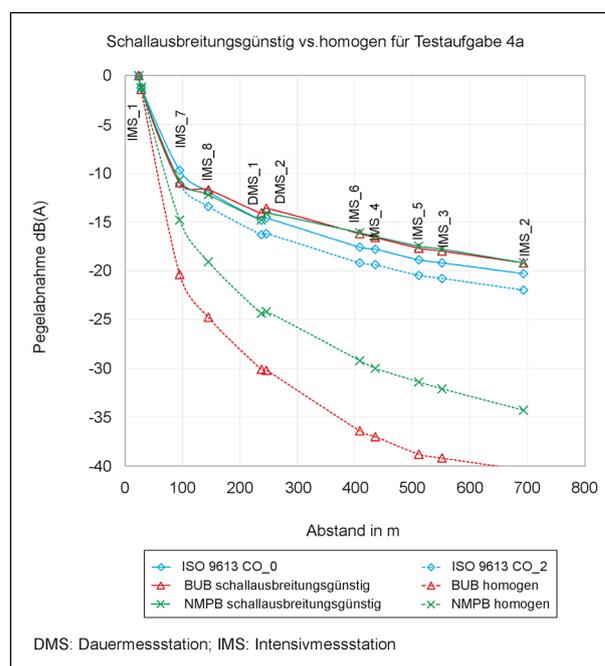


Bild 5-10: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen

sowie für das Testaufgabe 4b für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen.

Die DIN ISO 9613-2 zeigt in Testaufgabe 4a und 4b einen ähnlichen Verlauf. Erneut resultiert der Unterschied zwischen $C_0 = 0$ und $C_0 = 2$ in einer Verschiebung des Graphen um ca. 2 dB(A) ab einem

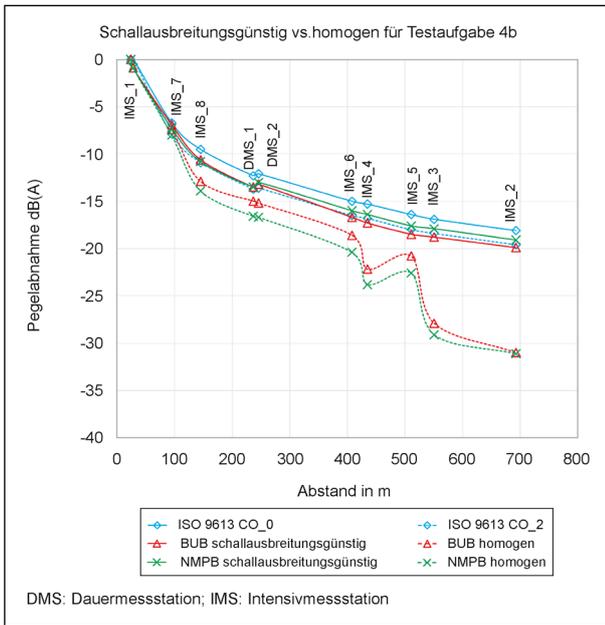


Bild 5-11: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen

Abstand von ca. 100 m. Der Knick zwischen DMS_1 und DMS_2 bei ca. 250 m, lässt sich wieder auf die Nähe des Messpunktes (DMS_2) zum Heishof und die abschirmende Wirkung der dortigen Gebäude zurückführen.

Die BUB und NMPB-Routes-08 weisen ebenfalls einen ähnlichen Verlauf auf. Im Vergleich zum schallausbreitungsgünstigen Fall bewirkt die homogene Variante eine zusätzliche Pegelabnahme um bis zu 20 dB(A). Bei homogener Schallausbreitungsberechnung treten zudem die Auswirkungen durch das Gelände (vgl. Bild 5-11) deutlicher hervor, was z. B. die Auffälligkeit bei der Entfernung von ca. 500 m (IMS_4, IMS_5 und IMS_3) erklärt. Dies erscheint nachvollziehbar, da bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen durch die gebogenen Schallstrahlen (und die damit resultierende mittlere Höhe über Grund) ein geringerer Einfluss des Bodeneffekts bzw. von Geländeabschirmungen zu erwarten ist.

5.3 Methoden mit Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter

Die Rechenverfahren mit Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter Nord2000 und Harmonoise ähneln sich hinsichtlich der berücksichtigten fünf Klassen des Temperaturgradienten

Einfluss der Stabilität bzw. Temperaturgradient bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit $W_1 = 0,8 \text{ m/s}$		
S_1 (labil)	S_3 (neutral)	S_5 (stabil)
-1 K/100 m	0 K/100 m	1,4 K/100 m
Einfluss der Windgeschwindigkeiten bei gleichbleibendem Temperaturgradient $S_1 = -1 \text{ K/100 m}$		
W_1	W_2	W_3
0,8 m/s	2 m/s	5 m/s

Tab. 5-1: Übersicht der betrachteten Klassen für die Kombinationen aus vertikalem Temperaturgradient (bzw. Stabilität) in K/100 m und Windgeschwindigkeit in m/s für die Nord2000

ten und der Windgeschwindigkeit. Aus diesen Klassen ergeben sich bereits 25 Kombinationsmöglichkeiten, die sich unter Berücksichtigung der Windrichtung mindestens noch um den Faktor drei (bei einer Einteilung der Windrichtung in Mit-, Quer- und Gegenwind) erhöhen. Daher werden die dargestellten Klassen reduziert und deren Betrachtung zunächst nur anhand der Nord2000 durchgeführt. Im Anschluss werden die Nord2000 und die Methode nach Harmonoise anhand von Testaufgabe 1 verglichen. Tabelle 5-1 zeigt die Auswahl der untersuchten Klassen aus Temperaturgradient/Stabilität und Windgeschwindigkeit.

Zur Darstellung des Einflusses meteorologischer Parameter wird zunächst die Stabilität (Temperaturgradient) bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit variiert und anschließend die Windgeschwindigkeit bei gleichbleibender Stabilität geändert. Bei der Auswahl der Stabilitätsklassen werden jeweils die beiden Extremfälle (S_1 für labil und S_5 für stabil) sowie der neutrale Fall (S_3) gewählt. Die Zwischenstufen S_2 (leicht labiler Fall) und S_4 (leicht stabiler Fall) werden aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Für die Windgeschwindigkeiten werden die drei am häufigsten vorkommenden Klassen (W_1 , W_2 und W_3) ausgewählt. Zum Vergleich enthalten die Graphen zusätzlich die Kurve der RLS-90.

5.3.1 Einfluss des Temperaturgradienten und der Windrichtung bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

Bild 5-12 zeigt die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 1 für unterschiedliche Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit.

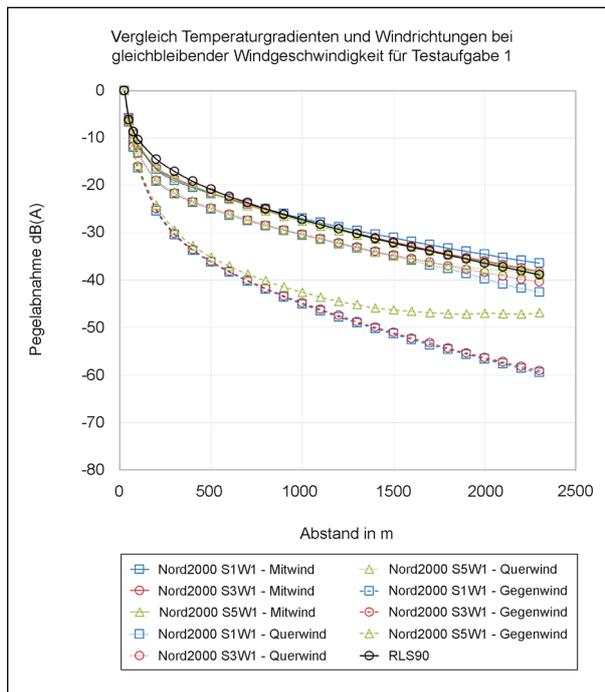


Bild 5-12: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

Demnach spielt der Temperaturgradient nur für den Gegenwindfall eine größere Rolle und führt zu einer Abspaltung der Situation S_5W_1 ab einer Entfernung von ca. 500 m, während sich die Situationen S_1W_1 und S_3W_1 annähernd gleich verhalten.

Der Vergleich mit den RLS-90 zeigt bei Testaufgabe 1 vor allem für die Mitwindsituationen eine gute Übereinstimmung mit der Nord2000. Da die RLS-90 ebenfalls von einer Mitwindsituation ausgehen, entspricht dies den Erwartungen. Demzufolge weisen die Quer- und Gegenwindsituationen der Nord2000 eine höhere Pegelabnahme als die RLS-90 auf.

Bild 5-13 zeigt die Situation für Testaufgabe 2 mit der zusätzlichen Abschirmung. Sobald diese zusätzlich vorhanden ist, lässt sich der Einfluss des Temperaturgradienten auch in der Mit- und Querwindsituation erkennen. Bei Mitwind tritt ab einem bestimmten Abstand aufgrund der durch den Wind nach unten gebeugten Schallstrahlen eine Erhöhung der Pegel nach dem Hindernis auf. Bei neutraler Stabilitätslage S_3 tritt dieser Effekt etwa bei 700 m Abstand auf. Bei stabiler Wetterlage S_5 (starke Beugung nach unten aufgrund von Wind und Temperaturgradient) tritt dieser Effekt bereits bei etwa 600 m auf und bei labiler Wetterlage S_1 (weniger starke Beugung nach unten aufgrund von Wind

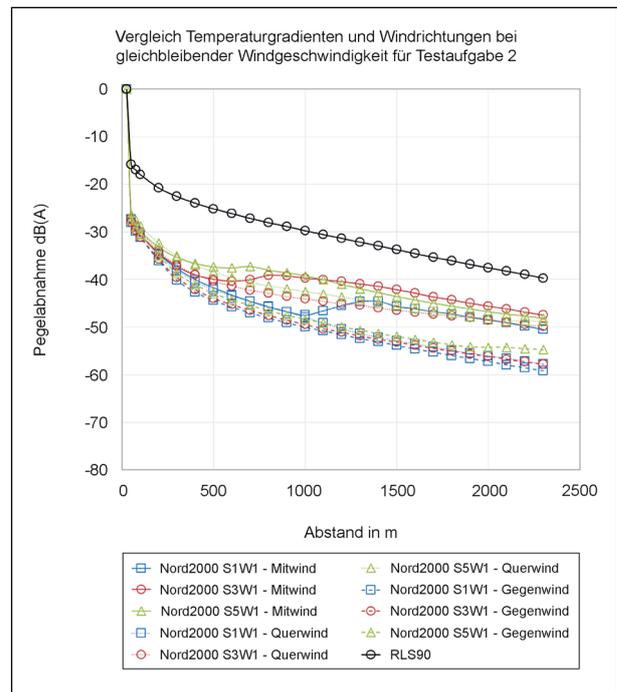


Bild 5-13: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

und gegenläufigem Temperaturgradient) ab etwa 1.000 m.

Bei Quer- und Gegenwind tritt dieser Effekt nicht auf. Hier verhindert offensichtlich die Windsituation eine nach unten gebeugte Schallausbreitung in der Schnittebene zwischen Quelle und Empfänger.

Der Vergleich mit den RLS-90 zeigt, dass durch die Hinzunahme des Walls die Nord2000 in allen betrachteten Fällen weit unterhalb den RLS-90 liegt. Der Unterschied zwischen Nord2000 und RLS-90 beträgt in etwa 10 dB(A) für den Mit- und den Querwindfall und bis zu 20 dB(A) im Gegenwindfall.

In Bild 5-14 ist die Pegelabnahme bei Testaufgabe 3 mit zwei kreuzenden Straßen für unterschiedliche Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit dargestellt. Die Bezeichnungen der Windsituation beziehen sich dabei jeweils auf die senkrechte Straße.

Analog zu Bild 5-4 und Bild 5-9 wird der Pegel ab einem gewissen Abstand zur senkrecht verlaufenden Straße nur noch von der waagrecht verlaufenden Straße dominiert. Im vorliegenden Fall lässt sich aber gut erkennen, dass sich der Endwert der Pegelabnahme in Abhängigkeit von der Windrichtung unterschiedlich schnell einstellt. Bei Querwind,

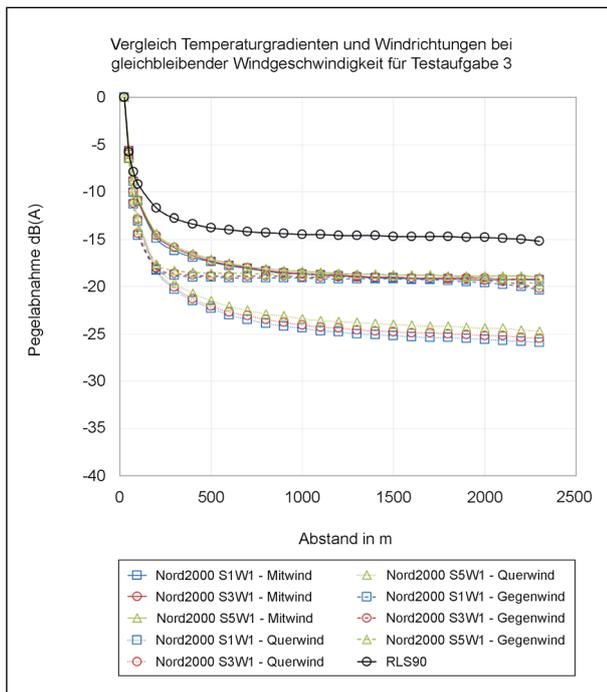


Bild 5-14: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

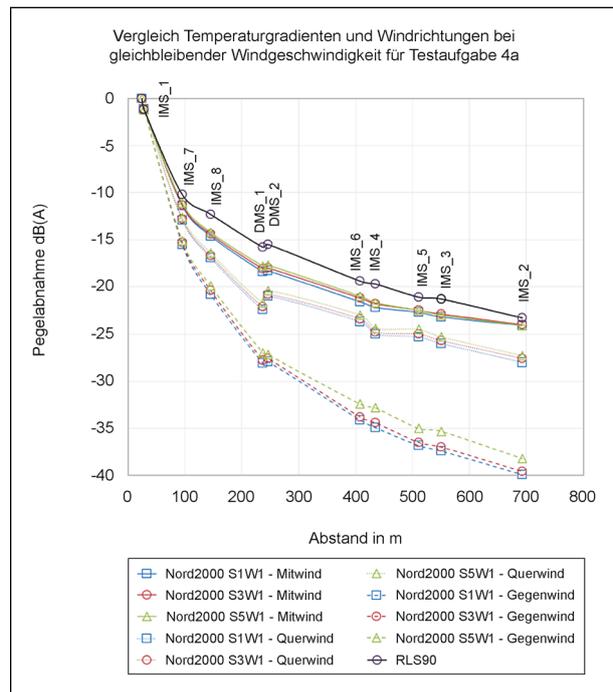


Bild 5-15: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

der für die waagrecht verlaufende Straße Gegenwind darstellt, ergibt sich erst bei größeren Abständen ein konstanter Pegel. Dieser Effekt tritt bei Testaufgabe 3 nur bei der Rechenmethode Nord2000 auf, da nur diese die Windrichtung jeweils im geometrisch korrekten Zusammenhang für verschiedene Ausrichtungen der Quelle als Mit-, Quer- oder Gegenwind interpretiert.

Der Einfluss des Temperaturgradienten ist wie schon in Bild 5-12 nur für die Gegenwindsituation von Bedeutung.

Im Vergleich zu den RLS-90 zeigen die Kurven der Nord2000 für alle drei Windrichtungen eine deutlich höhere Pegelabnahme, was vor allem daran liegt, dass die RLS-90 für beide Quellen, also sowohl für die senkrecht verlaufende Straße als auch für waagrecht verlaufende Straße, Mitwind rechnen und sich somit ein höherer Pegel ergibt.

Bild 5-15 und Bild 5-16 zeigen die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 4a sowie Testaufgabe 4b. Verglichen werden wiederum unterschiedliche Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit.

Für den Fall mit ebenem Gelände (Testaufgabe 4a) spielt der Temperaturgradient bei Mit- und Quer-

wind erst bei großen Abständen eine Rolle. Ein relevanter Unterschied der Pegel auch bei geringeren Abständen ist nur für die Gegenwindsituation erkennbar. Die kleine Stufe zwischen DMS_1 und DMS_2 bei ca. 250 m lässt wieder auf die Nähe des Messpunktes (DMS_2) zum Heishof und die abschirmende Wirkung der dortigen Gebäude zurückführen. Die Höhe der Stufe hängt hier aufgrund der geometrischen Situation stark von der Windrichtung ab, so ist sie am größten bei Querwind und dagegen bei Gegen- und Mitwind weniger stark ausgeprägt.

Der Vergleich mit den RLS-90 zeigt, dass die RLS-90 in allen Fällen eine geringere Pegelabnahme aufweisen als die Nord2000 und somit „auf der sicheren Seite“ rechnen.

Wie zu erwarten, führt die Hinzunahme des Geländes (Testaufgabe 4b in Bild 5-16) zu einer geringeren Pegelabnahme für die Situation mit Mit- und Querwind und zu einer höheren Pegelabnahme für die Situation mit Gegenwind. Auswirkungen, die durch das Gelände hervorgerufen werden, wie z. B. die Auffälligkeit bei der Entfernung von ca. 500 m (IMS_4, IMS_5 und IMS_3), sind ebenfalls abhängig von der Windrichtung und Stabilitätsklasse. Des Weiteren lässt sich in Testaufgabe 4b für alle drei Windrichtungen eine Aufspaltung der Pegel in Ab-

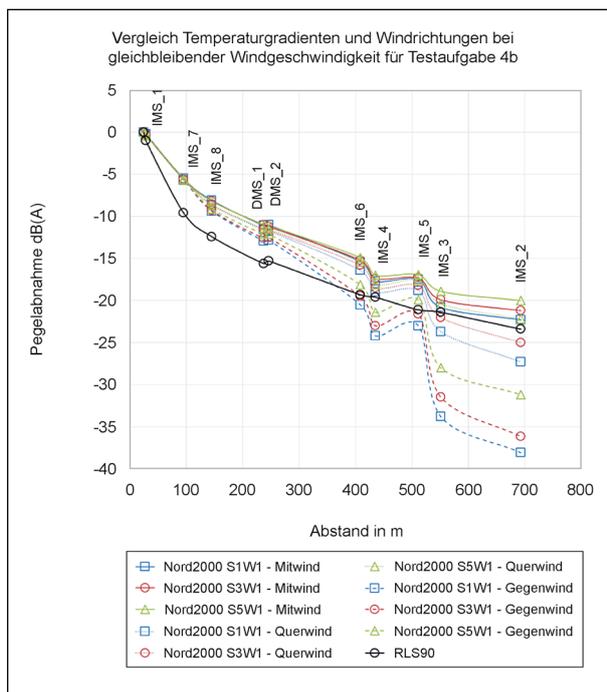


Bild 5-16: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

hängigkeit des Temperaturgradienten erkennen, wobei diese in der Situation mit Gegenwind am meisten ausgeprägt ist.

Vergleicht man hier wieder die Nord2000 mit den RLS-90, fällt ein wesentlicher Unterschied zur Testaufgabe 4a auf. Vor allem im Nahbereich bis ca. 350 m weisen die RLS-90 eine höhere Pegelabnahme auf und würden somit zu niedrigeren Beurteilungspegeln führen. Erst ab einer Entfernung von ca. 350 m und nur im Gegenwindfall fallen die Kurven der Nord2000 unter die Kurve der RLS-90. Die Kurven der Nord2000 für Mitwind liegen im gesamten betrachteten Bereich oberhalb der Kurve der RLS-90. Da dieser Effekt erst bei Hinzunahme des Geländes auftritt, lässt er sich auf den unterschiedlichen Umgang mit Geländeeffekten innerhalb beider Normen zurückführen und nicht auf meteorologische Effekte.

5.3.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung bei gleichbleibendem Temperaturgradienten

In den folgenden Bildern werden die Windgeschwindigkeitsklassen und die Windrichtung variiert, während der Temperaturgradient gleichbleibend mit der Situation neutral (S_3) berücksichtigt wird. Bild 5-17

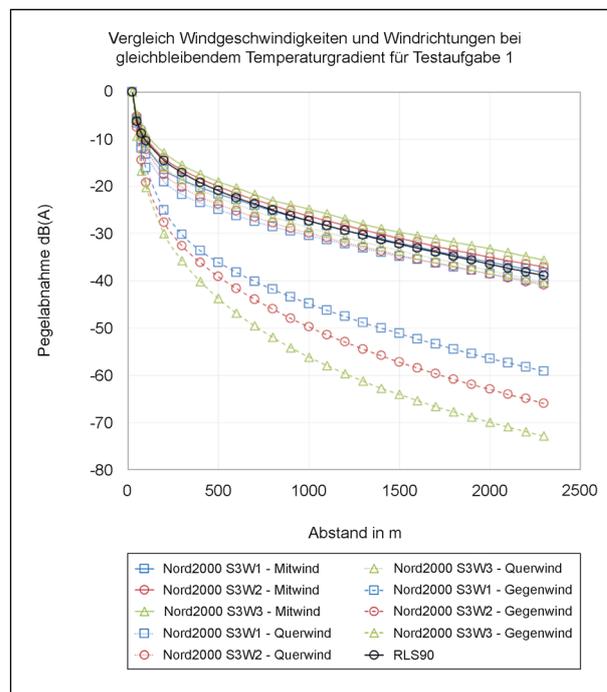


Bild 5-17: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten

zeigt die Situation in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgabe 1.

Man erkennt, dass die Windgeschwindigkeit vor allem für die Gegenwindsituation zu einer großen Aufspaltung der Differenzpegel führt. Starker Gegenwind (W_3) führt zu zusätzlichen Pegelminderungen von bis zu ca. 40 dB(A) gegenüber Mitwind, während schwacher Gegenwind (W_1) etwa 20 dB(A) zusätzliche Pegelminderung verursacht.

Analog zu Bild 5-12 zeigt der Vergleich mit den RLS-90 bei Testaufgabe 1 für die Mitwindsituationen eine gute Übereinstimmung der RLS-90 mit der Nord2000. Die Quer- und Gegenwindsituationen der Nord2000 weisen erneut höhere Pegelabnahmen als die RLS-90 auf.

Bild 5-18 zeigt die Situation für Testaufgabe 2 mit der zusätzlichen Abschirmung. Diese führt bei der Mit- und Querwindsituation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit zu einer größeren Aufspaltung in der Pegelabnahme als in der vorhergehenden Situation ohne Abschirmung. Bei der Mitwindsituation im Bereich von ca. 500 m bis ca. 1.500 m lässt sich ein ähnlicher Effekt der Abschirmung wie bei der Variation des Temperaturgradienten in Bild 5-17, diesmal jedoch abhängig von der Windgeschwindigkeit feststellen. Auch hier kommt es bei

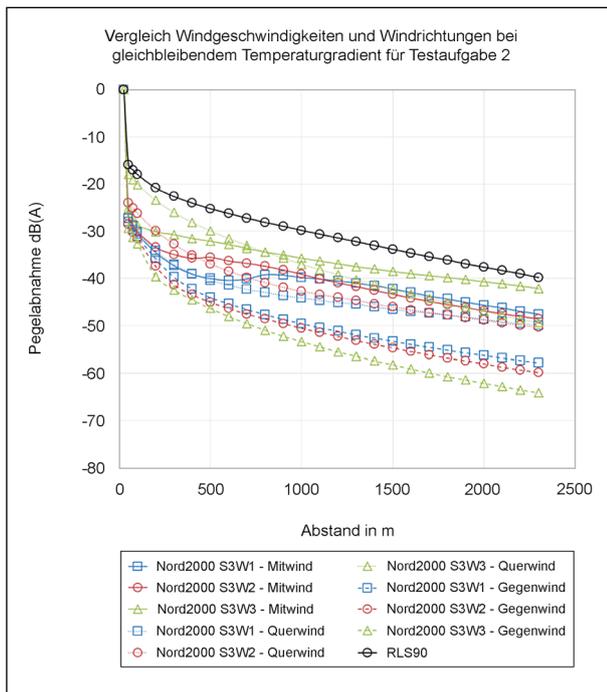


Bild 5-18: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten

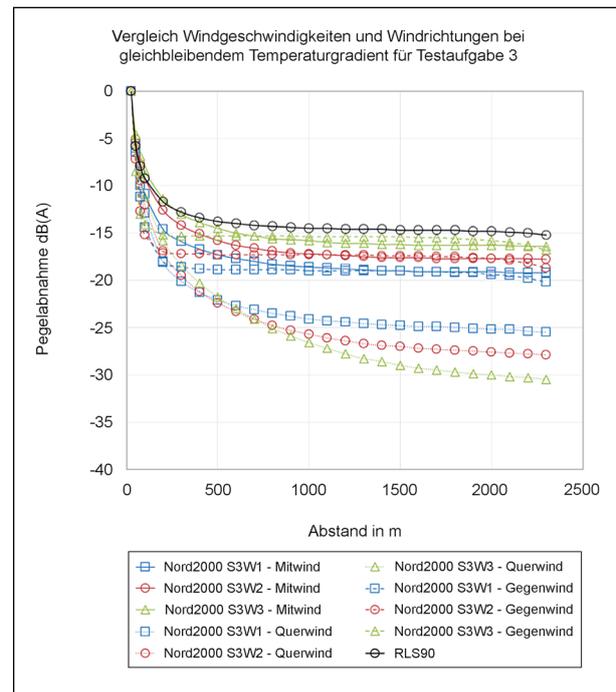


Bild 5-19: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten

Mitwind zu nach unten gebeugter Schallausbreitung, daher ergibt sich ab einem bestimmten Abstand wieder eine Erhöhung des Pegels, welche abhängig vom Radius des gebogenen Schallstrahls ist. Je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto kleiner der Radius des gebogenen Schallstrahls und desto früher kommt es zu einer Erhöhung des Pegels. Bei Quer- und Gegenwind tritt dieser Effekt nicht auf, da hier die Schallstrahlen nach oben gebeugt werden.

In Testaufgabe 2 führt die Hinzunahme des Walls analog zu Bild 5-13 dazu, dass die Nord2000 in allen betrachteten Fällen weit unterhalb der RLS-90 liegt. Der Unterschied zwischen Nord2000 und RLS-90 beträgt bis zu 10 dB für den Mit- und den Querwindfall und bis zu 20 dB im Gegenwindfall.

Bild 5-19 zeigt die Situation für die Testaufgabe 3 mit zwei kreuzenden Straßen für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten tagsüber.

Im Vergleich zur Betrachtung mit variierendem Temperaturgradienten in Bild 5-14 ist der Einfluss der Windgeschwindigkeiten größer als der des Temperaturgradienten, was zu einer breiteren Auffächerung der Pegeldifferenzen durch die Erhöhung der

Windgeschwindigkeit führt. Auch der Einfluss der Windrichtungen auf den Endwert der Pegelabnahme (waagrecht verlaufende Straße dominiert) ist deutlicher als der in Bild 5-14 ermittelte Einfluss des Temperaturgradienten.

Auch hier stellt der Querwind für die waagrecht verlaufende Straße Gegenwind dar, daher ist der durch die waagrechte Straße verursachte Endwert bei „Querwind“ niedriger. Mit- und Gegenwind für die senkrechte Straße bedeuten wiederum Querwind für die waagrechte Straße, somit stellt sich hier ein höherer Endwert ein.

Wie bei der Variation des Temperaturgradienten in Bild 5-14 zeigt der Vergleich zu den RLS-90, dass die Nord2000 für alle drei Windrichtungen eine deutlich höhere Pegelabnahme ermittelt, da nicht wie bei den RLS-90 zugrunde liegend für beide Straßen gleichzeitig Mitwind auftreten kann. In der Nord2000 werden die Windrichtungen geometrisch korrekt berücksichtigt, womit immer höchstens für eine der beiden Straßen Mitwind berücksichtigt wird.

Bild 5-20 und Bild 5-21 zeigen die Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für die Testaufgaben 4a und 4b für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten.

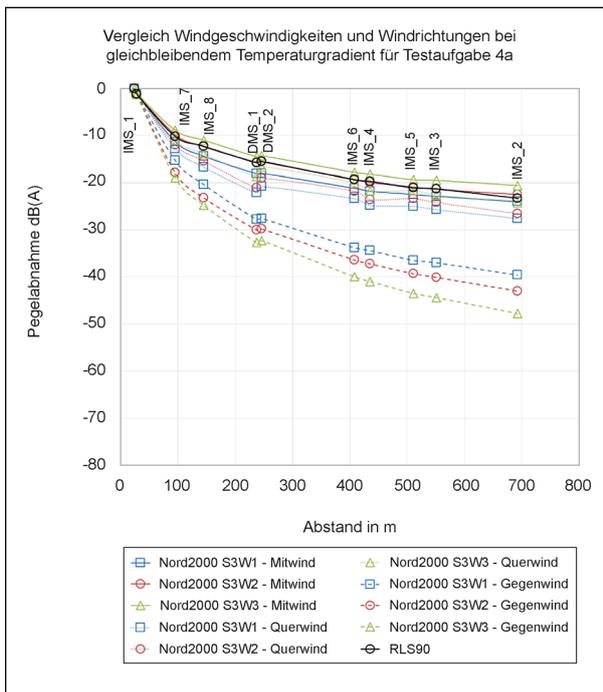


Bild 5-20: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten

Für den Fall mit ebenem Gelände in Testaufgabe 4a führt der Einfluss der Windgeschwindigkeit zu einer Aufspaltung der Pegel. Bei Gegenwind nimmt der Pegel mit zunehmender Windgeschwindigkeit mit dem Abstand stärker ab. Bei Mitwind dreht sich dieser Effekt um, mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird die Pegelabnahme mit dem Abstand geringer. Dazwischen erfolgt ein Übergang dieser Effekte, wobei bei Querwind die abstandsbedingte Pegelabnahme mit zunehmender Windgeschwindigkeit noch geringer wird. Die Stufe zwischen DMS_1 und DMS_2 bei ca. 250 m lässt wieder auf die Nähe des Messpunktes DMS_2 zum Heishof und die abschirmende Wirkung der dortigen Gebäude zurückzuführen. Die Höhe der Stufe hängt hier stark von der Windrichtung und Windgeschwindigkeit ab, so ist sie am größten bei Gegenwind und dagegen bei Mitwind kaum zu erkennen.

Der Vergleich mit den RLS-90 zeigt ähnliche Ergebnisse wie bei Variation des Temperaturgradienten in Bild 5-15. Besonders auffallend ist jedoch, dass die Kurve der RLS-90 mit der Nord2000 Kurve für den Fall S₃W₂ nahezu deckungsgleich verläuft. Dies erscheint nachvollziehbar, da der S₃W₂ genau den Fall darstellt den die RLS-90 abbilden, nämlich Mitwind bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s und einer neutralen Wetterlage. Für höhere Wind-

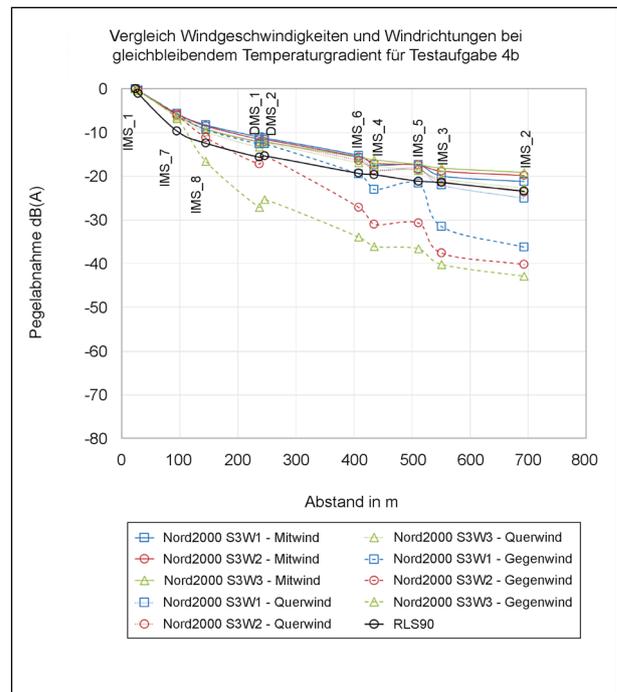


Bild 5-21: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten

geschwindigkeit ergibt sich nach Nord2000 auch ein höherer Pegel als nach RLS-90, so liegt die Kurve der Nord2000 für den Fall S₃W₃ in etwa um 2 dB(A) über der Kurve der RLS-90.

Bei Betrachtung mit dem realen Gelände (vgl. Bild 5-21) ist das Verhalten für die verschiedenen Windgeschwindigkeiten analog. Auch hier sieht man eine Auffälligkeit bei einer Entfernung von ca. 500 m (IMS_4, IMS_5 und IMS_3), die auf das Gelände zurückzuführen ist und je nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit verschieden stark ausgeprägt ist.

Auch hier verläuft der Vergleich mit den RLS-90 analog zu Bild 5-16 bei variierendem Temperaturgradienten. Die Hinzunahme des Geländes führt erneut dazu, dass die Graphen der Nord2000 im Nahbereich über der RLS-90 liegen. Vor allem für die Gegenwindsituation wird der Abstand, bei dem sich die beiden Graphen schneiden, und somit die Pegelabnahme der Nord2000-Kurven, größer als die der RLS-90 und hängt stark von der Windgeschwindigkeit ab.

5.3.3 Vergleich von Nord2000 und Harmonoise

Der Einfluss von meteorologischen Parametern wird bei Harmonoise durch ähnliche Klassen der Windgeschwindigkeit und des Temperaturgradienten parametrisiert wie bei der Nord2000. Daher werden die Untersuchungen zu diesen Einflüssen im Folgenden auf einen Vergleich zur Nord2000 anhand des einfachen Falls einer langen geraden Straße beschränkt. Testaufgabe 1 eignet sich daher gut, um die meteorologischen Einflüsse und Unterschiede der beiden Rechenvorschriften zu vergleichen. Wissenschaftlich wurden Harmonoise und Nord2000 in der Vergangenheit schon verglichen, wobei der Schwerpunkt der Vergleiche selten den Entfernungsbereich betrifft, der hier relevant ist (siehe dazu [25]).

In Bild 5-22 wird die Schallpegelabnahme mit der Entfernung von der Quelle bei Windstille oder sehr geringem Wind bei variierendem Temperaturgradienten dargestellt. Die Windrichtung sollte hier untergeordnet sein, dennoch sind bei Nord2000 Unterschiede zwischen Mitwind und Gegenwind zu erkennen, wohingegen bei Harmonoise diese Unterschiede nicht auftreten. Der Temperaturgradient wiederum verursacht bei Harmonoise größere Unterschiede als bei Nord2000. Tendenziell ist unter S_5 (stabile Schichtung) eine schwächere Schallpegelabnahme mit der Entfernung zu beobachten als

unter S_1 (labile Schichtung). Der Kurvenverlauf bei Harmonoise S_1W_1 erscheint jedoch sehr extrem zu sein. In 1.000 m Entfernung hat der Pegel der Quelle bereits um über 50 dB(A) abgenommen. Für die neutrale (S_3) und die stabile Schichtung (S_5) liegen die Werte der Harmonoise bei Entfernungen über 1.000 m über 5 dB(A) oberhalb der nach Nord2000 berechneten Werte. Das bedeutet, dass in Harmonoise sich der schallausbreitungsgünstige Temperaturgradient stärker bemerkbar macht als in Nord2000.

Der Vergleich von Nord2000 und Harmonoise für unterschiedlich starke Windverhältnisse wird in Bild 5-23 und Bild 5-24 gezeigt. Der Temperaturgradient wird hier konstant gehalten und wurde auf neutral (S_3) eingestellt.

Man erkennt, dass bei Nord2000 die Mit- und Querwindfälle für alle Windgeschwindigkeiten relativ nahe beisammen liegen. Erst bei Gegenwind ist ein Effekt auf die Schallpegelabnahme mit der Entfernung erkennbar. Je stärker der Gegenwind, desto mehr nimmt der Pegel ab.

Die Pegelabnahme mit der Entfernung bei Harmonoise liegt ähnlich zu Nord2000 für Mitwind und Querwind nahe beisammen, wobei aber eine zunehmende Windgeschwindigkeit W_2 und W_3 eine

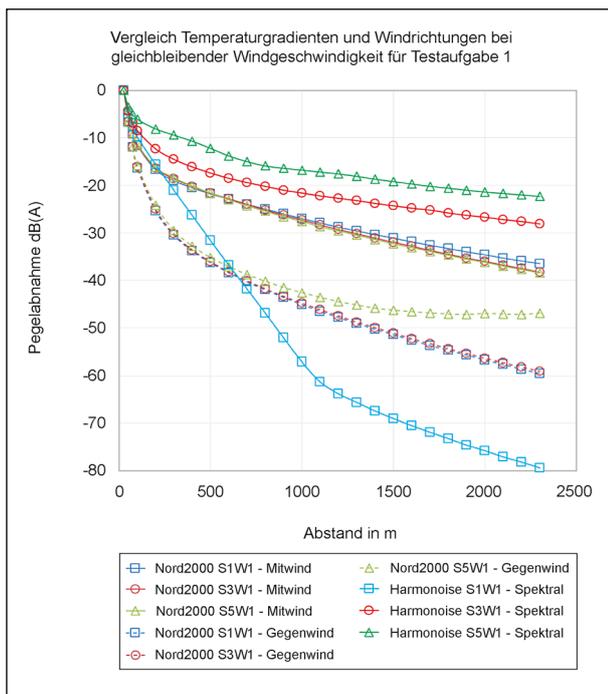


Bild 5-22: Testaufgabe 1 – Vergleich von Nord2000 und Harmonoise hinsichtlich Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für verschiedene Bedingungen

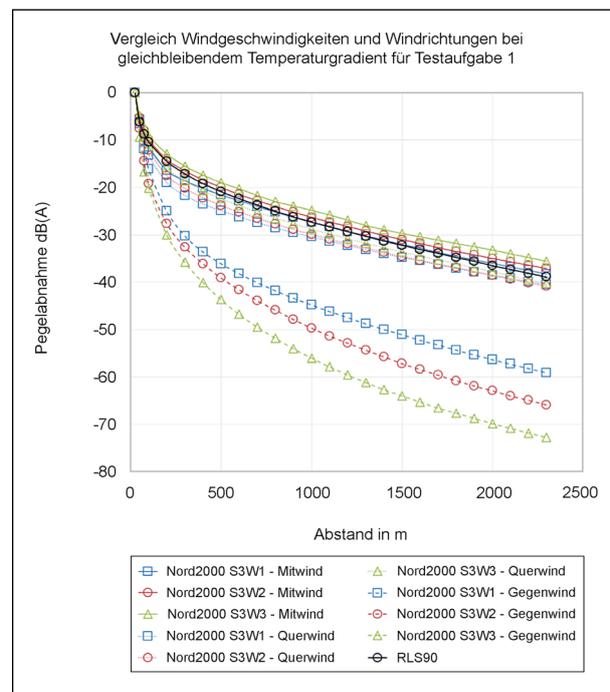


Bild 5-23: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand mit Berücksichtigung unterschiedlicher Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Nord2000

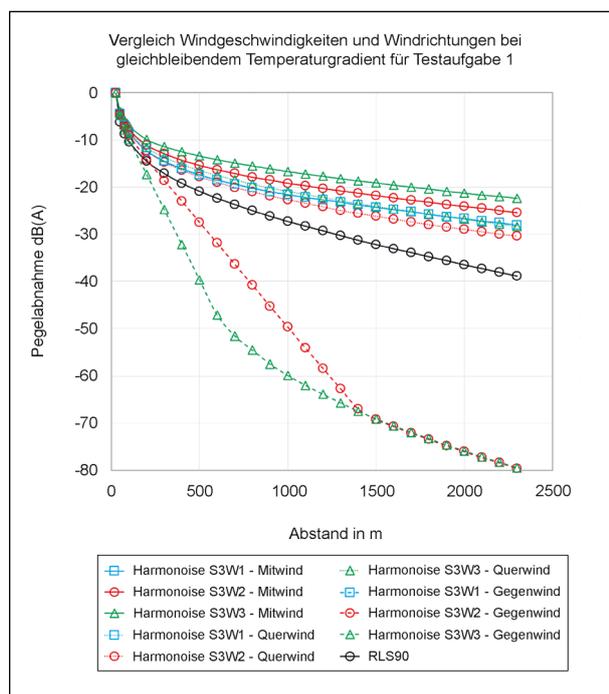


Bild 5-24: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand mit Berücksichtigung unterschiedlicher Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Harmonoise

Abschwächung der Pegelabnahme um 1 bis 2 dB(A) in 2.000 m Entfernung bewirkt. Bei stärkerem Mitwind ist der Pegel der Quelle somit erhöht, was den Erwartungen entspricht. Bei stärkerem Gegenwind nimmt der Pegel mit der Entfernung erwartungsgemäß stärker ab. Der annähernd lineare Kurvenverlauf für S_3W_2 und die Angleichung ab ca. 1.300 m an den Verlauf von S_2W_3 kann jedoch hier nicht geklärt werden. Betrachtet man die ersten 500 m, so liegt die Pegelabnahme bei Gegenwind W_3 (3 – 6 m/s) bei ca. -40 dB(A) im Bereich von Nord2000, wo der Wert ca. -45 dB(A) beträgt (siehe Bild 5-23).

5.4 Fazit aus den Berechnungsergebnissen

In diesem Kapitel wurden Berechnungen bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind) und Vergleichsberechnungen mit schallausbreitungsgünstigen/-ungünstigen Bedingungen für verschiedene Berechnungsverfahren analysiert. Des Weiteren wurden explizit für die Nord2000 Variantenberechnungen mit verschiedenen Stabilitätsklassen und Windrichtungen bei gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten sowie Variantenberechnungen mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Wind-

richtungen bei gleichbleibenden Stabilitätsklassen betrachtet.

Berechnungen aller Methoden mit schallausbreitungsgünstigen Bedingungen

Bei den Berechnungen mit schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind) lassen sich die unterschiedlichen Normen im Grunde in zwei mal zwei verschiedene Gruppen aufteilen. Eine Unterscheidung der Normen kann 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.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze im Luftabsorptionsterm lassen sich in Testaufgabe 1 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände) erkennen, woraus ein maximaler Unterschied von ca. 10 dB bei einer Entfernung von ca. 2.000 m zwischen den untersuchten Normen resultiert.

Die nach unten gebrochene Schallausbreitung kommt erst in Testaufgabe 2 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)) durch die Hinzunahme einer Abschirmung zur Geltung, was in einem maximalem Unterschied von ca. 18 dB bei einer Entfernung von ca. 2.000 m zwischen den untersuchten Normen resultiert.

Aus der Testaufgabe 3 lassen sich bei den Berechnungen mit standardisierten schallausbreitungsgünstigen Bedingungen (Mitwind) nur bedingt spezifische Effekte herauslesen. Hier dominiert die zusätzliche Straße den Pegelverlauf. Der maximale Pegelunterschied zwischen den untersuchten Normen beträgt ca. 5 dB.

Vergleichsberechnungen mit schallausbreitungsgünstigen/-ungünstigen Bedingungen

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

Zum einem gibt es innerhalb der untersuchten Normen solche, die meteorologische Situationen nur durch einen Langzeitmittelungspegel berücksichti-

gen wie die DIN ISO 9613-2. Hier wird die Mitwindsituation berechnet und ein Langzeitmittelungspegel mittels eines Abschlags durch einen Korrekturterm berücksichtigt. Wird die meteorologische Situation nur dadurch berücksichtigt, resultiert dies in einem konstanten Verschiebung des Pegels um eben diesen Wert.

Die zweite Gruppe von Normen unterscheidet zwischen schallausbreitungsgünstigen und homogenen, Bedingungen (BUB, NMPB). Hier werden beide Fälle getrennt berechnet und im Nachhinein gewichtet gemittelt. Die Gewichtung der schallausbreitungsgünstigen bzw. homogenen Bedingungen kann hierbei über den Gewichtungsfaktor p eingestellt werden. Für Normen, die eine Unterscheidung zwischen schallausbreitungsgünstig und homogen treffen, lassen sich wesentlich größere Auswirkungen beim Vergleich der getrennten Ergebnisse von schallausbreitungsgünstigen und -ungünstigen Bedingungen feststellen. Diese Normen gehen für schallausbreitungsgünstige Bedingungen von einem gebeugten Schallweg und für homogene Bedingungen von einem direkten Schallweg aus. In Testaufgabe 1 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände) ergibt sich z. B. für die BUB ein Unterschied von bis zu 20 dB beim Vergleich von schallausbreitungsgünstiger und -ungünstiger Ausbreitung. Bei Testaufgabe 2 und Testaufgabe 3 beträgt der Unterschied maximal 15 dB.

Variantenberechnungen mit verschiedenen Temperaturgradienten, Stabilitätsklassen und Windrichtungen

In den Variantenberechnungen mit verschiedenen Stabilitätsklassen und Windrichtungen bei gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten wurde vor allem die Nord2000 untersucht. Bei Betrachtung der beiden Extremfälle, Mit- und Gegenwind, sind die Pegelunterschiede wie zu erwarten am stärksten ausgeprägt. In Testaufgabe 1 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände) beträgt der Pegelunterschied zwischen Mit- und Gegenwind bis zu ca. 23 dB. Zusätzlich lässt sich ein Einfluss der Stabilitätsklassen feststellen, welcher aber wesentlich geringer ausgeprägt ist als der Einfluss der Windrichtung. Für Mitwind lässt sich der Einfluss der Stabilitätsklassen erst ab einer Entfernung von ca. 1.000 m erkennen und führt zu einer Pegeldifferenz von ca. 3 dB. Bei Gegenwind tritt der Effekt schon früher (ca. 500 m) auf und führt zu einer Pegeldifferenz von bis zu ca. 11 dB.

In Testaufgabe 2 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)) beträgt der Pegelunterschied zwischen den beiden Extremsituationen (Mit-, Gegenwind) bis zu 10 dB. Bei Mitwind kommt es durch die nach unten gebeugten Schallstrahlen zu einem Effekt, der zu einer Reduzierung der Abschirmwirkung direkt nach der Abschirmung zur Folge hat. Abhängig von der Stabilitätsklasse und dem daraus resultierendem Beugungsverhalten tritt dieser Effekt bei unterschiedlichen Abständen auf. Die Pegelunterschiede, die innerhalb einer betrachteten Windrichtung in Abhängigkeit der Stabilitätsklasse auftreten, betragen bis zu ca. 4 dB.

Auch in den Variantenberechnungen mit verschiedenen Stabilitätsklassen und Windrichtungen bei gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten stellt sich bei der Testaufgabe 3 ab einem gewissen Abstand ein Endwert des Pegels durch die zusätzliche Straße ein. Bei der Rechenmethode Nord2000 lässt sich jedoch erkennen, dass je nach Windrichtung der Endwert unterschiedlich schnell erreicht wird, da nur in dieser Methode die Windrichtung im geometrisch korrekten Zusammenhang zur Ausrichtung der Quelle steht. Der größte Pegelunterschied ergibt sich hier für die Mit- und die Querwindsituation und beträgt ca. 5 dB.

In den nächsten Variantenberechnungen wurden bei gleichbleibenden Stabilitätsklassen die Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen variiert. Die Mitwind- und die Gegenwindsituation stellen, wie in den vorherigen Variantenberechnungen bei variierender Stabilitätsklasse, die Situationen mit den größten Unterschieden dar. Für Testaufgabe 1 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände) beträgt der Pegelunterschied zwischen beiden Situationen bis zu ca. 38 dB. Wie zu erwarten steigt der Pegel mit Erhöhung der Windgeschwindigkeit für Mitwind an und sinkt mit Erhöhung der Windgeschwindigkeit bei Gegenwind.

In Testaufgabe 2 (Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)) beträgt der Pegelunterschied zwischen den beiden Extremsituationen (Mitwind, Gegenwind) bis zu 20 dB. Auch hier lässt sich der durch die gebeugte Schallausbreitung hervorgerufene Effekt erkennen, welcher wiederum zu einer Reduzierung der Abschirmwirkung nach der Abschirmung führt. Je höher die Windgeschwindigkeit, desto früher tritt dieser Effekt auf. Pegelunterschiede, die nur auf eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit zurückzuführen sind, be-

tragen hier bis zu ca. 8 dB und sind am meisten ausgeprägt für die Querwindsituation.

Wie auch schon in den Variantenberechnungen bei gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten wird bei den Variantenberechnungen mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibenden Stabilitätsklassen in der Testaufgabe 3 ab einem bestimmten Abstand ein Endwert der Pegelabnahme erreicht, da die zusätzliche Straße ab einem bestimmten Punkt den Pegel bestimmt. Im Vergleich zu den variierenden Stabilitätsklassen, lässt sich bei Variation der Windgeschwindigkeiten eine größere Aufspaltung der Pegeldifferenz innerhalb einer Windrichtung feststellen. Die maximalen Pegeldifferenzen innerhalb einer Windrichtung treten für Querwind auf und betragen ca. 5 dB. Zwischen der Mitwind- und der Querwindsituation ergibt sich eine Pegeldifferenz von bis zu ca. 14 dB.

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 z. B. der Unterschied zwischen Mit- und Gegenwindfall für S_3W_2 (neutraler Temperaturgradient, leichter Wind), ca. 13 dB(A) bei einer Entfernung von 200 m und ca. 31 dB(A) bei einer Entfernung von 1.000 m (vgl. Bild 5-17).
- Innerhalb der Variation der Windgeschwindigkeit sind die Unterschiede auch abhängig davon welche Windrichtung man betrachtet, so ergibt sich z. B. für den Mitwindfall zwischen S_3W_1 und S_3W_3 (neutraler Temperaturgradient bei geringer bzw. mittlerer Windgeschwindigkeit) 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 in etwa 5 dB(A) bei einer Entfernung von 200 m und ca. 11 dB(A) bei einer Entfernung von 1.000 m (vgl. Bild 5-17).
- Im Vergleich zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit ist der Einfluss der Stabilitätsklasse mit Unterschieden von < 1 dB(A) bei Entfernungen bis zu 1.000 m, unabhängig von der betrachteten Windrichtung, sehr gering. Ein Unterschied lässt sich erst bei Entfernungen größer als 1.000 m beobachten (vgl. Bild 5-12). Allerdings führt die Variation der Stabilitätsklasse bei Hinzunahme eines Hindernisses speziell im Mit-

windfall dazu, dass die Reduzierung der Abschirmwirkung aufgrund der durch den Wind nach unten gebeugten Schallstrahlen verschieden schnell eintrifft (vgl. Bild 5-13).

Die Berechnungen nach Harmonoise zeigen immer eine schwächere Pegelabnahme mit der Entfernung als Nord2000. Dies passt zu den Erkenntnissen, die in Testaufgabe 1 entstanden sind (siehe Bild 5-22). Dort erkennt man, dass Harmonoise sensitiver auf die Einstellung der Temperaturschichtung reagiert als Nord2000 und insbesondere, dass Harmonoise für schallausbreitungsgünstige Fälle höhere Pegel ergibt als Nord2000.

5.5 Testrechnungen mit einem wellenbasierten 3D-Modell

In wissenschaftlichen Studien werden Modelle benutzt, die die Physik der Schallausbreitung sehr genau nachbilden. Diese Schallausbreitungsmodelle werden für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet, um den Einfluss komplexer Geländestrukturen (Täler, Straßenschluchten, Vegetation, usw.) unter realistischen meteorologischen Bedingungen zu studieren. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen mit einem wellenbasierten 3D-Modell dargestellt. Dabei wird insbesondere der Einfluss der Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf die Schallausbreitung untersucht und die Ergebnisse mit denen der ebenfalls verwendeten Modelle empirischen Modelle verglichen. Grundsätzlich eignen sich wellenbasierte Modelle aufgrund des sehr hohen Rechenaufwands eher zur Simulation der Schallausbreitung im Nahfeld der Quelle sowie für tiefe Frequenzen, hier wurde jedoch bis zu einer Entfernung von 700 m von der Quelle simuliert. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurde daher bei einer Bandmittelfrequenz von 100 Hz nur zweidimensional gerechnet. Da die Quelle als Linienschallquelle definiert wurde, entspricht die durchgeführte zweidimensionale Simulation, unter der Annahme einer langen, geraden Straße und konstanten meteorologischen Parametern entlang dieser Fahrbahn, einem Vertikalschnitt durch eine entsprechende dreidimensionale Simulation.

Die Quellhöhe in allen Simulationen beträgt 0.5 m über Grund, die horizontale sowie vertikale Maschenweite beträgt je 0.5 m. Das Rechengebiet hat eine Größe von 700 m x 300 m (x/z). Die Simulationen wurden jeweils für Mit- und Gegenwind sowie

für die Windgeschwindigkeitsklassen W_0 , W_1 , W_2 und W_3 durchgeführt. Die in den Simulationen angenommenen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe lassen sich aus Tabelle 5-2 entnehmen. Es wurde ein logarithmisches Windprofil mit einem Rauigkeitsparameter von 0,1 m angenommen. Alle Simulationen wurden unter isothermen Bedingungen (S_3 , ausbreitungsneutral) durchgeführt.

In Bild 5-25 ist exemplarisch die Schallausbreitung, wie sie mit dem wellenbasierten Modell simuliert wurde, im Vertikalschnitt dargestellt. Im oberen Bild ist zum Vergleich die Schallausbreitung im Falle einer ausbreitungsneutralen Atmosphäre dargestellt. Das mittlere bzw. untere Bild zeigt die Schallausbreitung im Mitwind- bzw. Gegenwindfall, jeweils für

Windklasse	W_0	W_1	W_2	W_3
Windgeschwindigkeit	0,0 m/s	0,65 m/s	2,6 m/s	5,9 m/s

Tab. 5-2: Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für die mit dem wellenbasierten Modell durchgeführten Simulationen

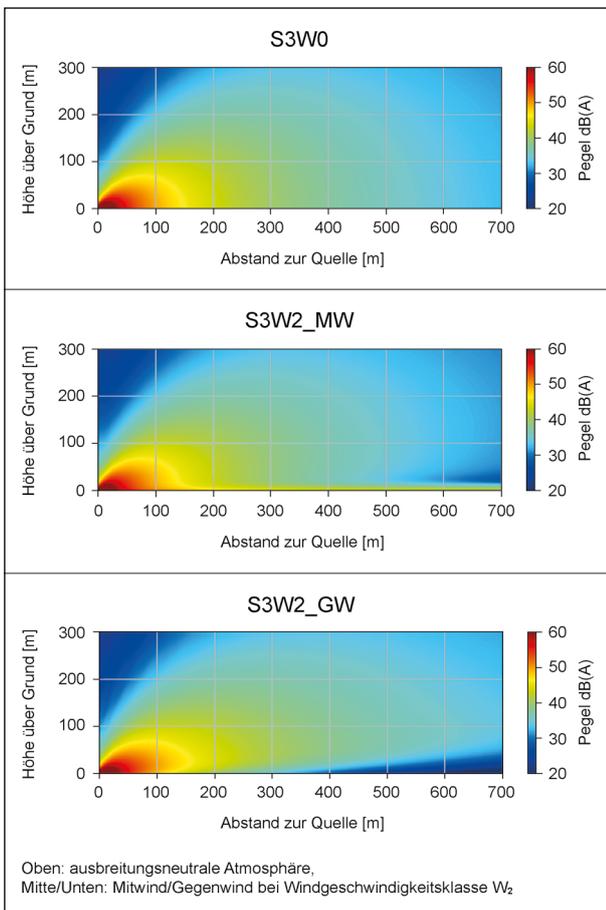


Bild 5-25: Schallausbreitung simuliert mit dem wellenbasierten Modell im Vertikalschnitt

die Windgeschwindigkeitsklasse W_2 . Im Mitwindfall ist der erhöhte Schalldruckpegel in Bodennähe aufgrund von Abwärtsbrechung gut zu erkennen, während im Gegenwindfall die Ausbildung einer Schattzone in Bodennähe deutlich wird.

Wie auch aus Bild 5-25 deutlich wird, kommt es aufgrund der Abwärtsbrechung im Mitwindfall in einer Entfernung von 695 m zu einem, im Vergleich zum ausbreitungsneutralen Fall, um 9,4 dB höheren Schalldruckpegel. Dagegen liegt der Schalldruckpegel im Gegenwindfall aufgrund von Aufwärtsbrechung in der gleichen Entfernung um 17,4 dB unter dem Referenzpegel bei ausbreitungsneutralen Bedingungen.

Bild 5-26 zeigt im Detail die Erhöhung (oben) bzw. Verringerung (unten) des Schalldruckpegels in Bodennähe (bis 60 m) bei Mit- bzw. Gegenwind im Vergleich zur Referenzsituation. Gut zu erkennen sind zusätzlich die Verringerung des Pegels oberhalb von rund 10 m im Mitwindfall sowie die leichte Erhöhung des Pegels oberhalb der Schattenzone im Gegenwindfall (jeweils im Vergleich zum Referenzfall). Dies lässt sich durch die Umverteilung der Schallenergie aufgrund der Wellenbrechung in der Atmosphäre erklären.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Simulationen mit dem wellenbasierten Modell noch mit den entsprechenden Ergebnissen aus Nord2000 verglichen. Dazu sind in Bild 5-27 die abstandsabhängige Veränderung des Schalldruckpegels in 2 m Höhe über Grund für beide Modelle, sowie deren Differenzen (wellenbasiertes Modell – Nord2000),

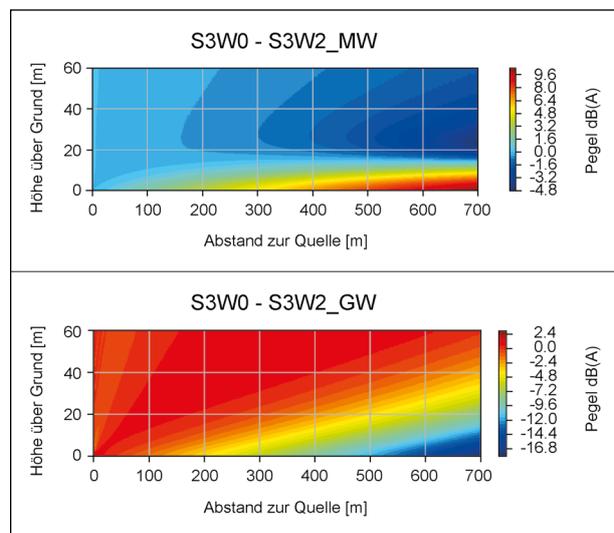


Bild 5-26: Pegeldifferenzen zum Referenzschalldruckpegel für die Windgeschwindigkeitsklasse W_2 , jeweils bei Mit- und Gegenwind, ermittelt mit dem wellenbasierten Modell

dargestellt. Die Messpositionen aus dem Feldversuch sind durch schwarze Kreuze gekennzeichnet. Der Referenzfall mit ausbreitungsneutraler Meteorologie ist der Fall S_3W_0 , MW bezeichnet eine Mitwindsituation und GW entsprechend eine Gegenwindsituation. Auf der x-Achse sind die Entfernungen von der Quelle aufgetragen, während auf der y-Achse die Differenzschallpegel zum Emissionspegel dargestellt sind.

Im Mitwindfall (links) nimmt der Pegel in den Situationen S_3W_2 und S_3W_3 im wellenbasierten Modell zunächst etwas schneller ab, als es bei Nord2000 der Fall ist, im Verlauf kreuzen sich dann aber die jeweiligen Kurven, sodass im Fernfeld durch das wellenbasierte Modell etwas höhere Pegel vorhergesagt werden. Dabei verschiebt sich der Kreuzungspunkt mit zunehmender Windgeschwindigkeit immer weiter Richtung Quelle. Im Fall S_3W_1 liegt der mit dem wellenbasierten Modell prognostizierte Pegel im Ausbreitungsgebiet praktisch immer unter

dem von Nord2000 prognostizierten Pegel. Die Differenz zwischen den beiden Methoden beträgt dabei maximal 2,5 dB im Fernfeld. Im Fall S_3W_3 liegt dagegen der mit dem wellenbasierten Modell prognostizierte Pegel nur in direkter Quellnähe unterhalb des mit Nord2000 prognostizierten Pegels. Insgesamt schätzt also Nord2000 im Nahfeld den Schalldruckpegel etwas konservativer ab, als mit dem wellenbasierten Modell für diesen Fall simuliert. Im Fernfeld werden dagegen mit dem wellenbasierten Modell in der Regel höhere Schalldruckpegel vorhergesagt.

Im Gegenwindfall kehrt sich dies um, d. h. speziell im Nahfeld fällt die mit dem wellenbasierten Modell simulierte Schallpegelreduktion geringer aus, als mit Nord2000 prognostiziert. In der Klasse S_3W_1 liegt der mit Nord2000 ermittelte Schalldruckpegel immer unterhalb des mit dem wellenbasierten Modell prognostizierten. Für Entfernungen > 300 m von der Quelle liegt diese Differenz relativ konstant

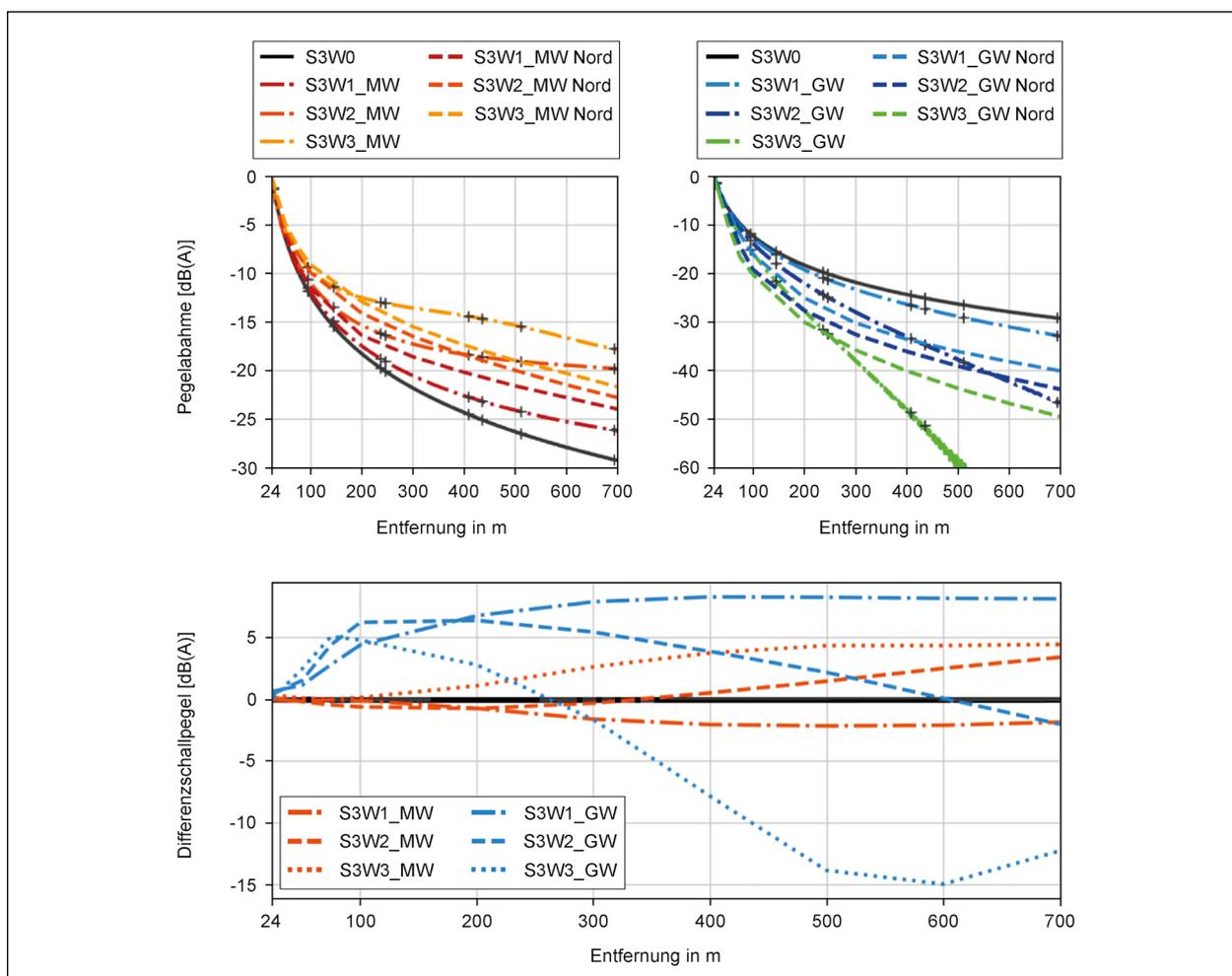


Bild 5-27: Vergleich zwischen den mit dem wellenbasierten Modell und Nord2000 durchgeführten Simulationen für die Testaufgabe TA1, Links oben für Mitwind und rechts oben für Gegenwind Unten: Differenzen (wellenbasiertes Modell – Nord2000) zwischen den beiden Methoden für die jeweilige Situation

bei etwa 8 dB. Für den Fall S_3W_2 liegt der mit Nord2000 prognostizierte Schalldruckpegel bis zu einer Entfernung von rund 550 m unterhalb dem des wellenbasierten Modells. Im Fall von S_3W_3 liegt der Kreuzungspunkt bei rund 250 m. Der von Nord2000 prognostizierte Pegel nimmt dabei insbesondere im Nahfeld stark ab, anschließend flacht die Kurve deutlich ab. Die mit dem wellenbasierten Modell prognostizierten Pegel liegen im Nahfeld deutlich über denen von Nord2000, im Fernfeld reduziert sich der Schalldruckpegel dann aber schnell, wobei die Abnahme bei einer Entfernung von 500 m bereits fast 60 dB beträgt. Im Gegenwindfall werden also die Schalldruckpegel speziell im Nahfeld durch das wellenbasierte Modell konservativer abgeschätzt als mit Nord2000. Die Differenzen zwischen den beiden Modellen betragen bei Mitwind für die Windklassen $W_1/W_2/W_3$ bis zu 2,2 / 3,4 / 4,5 dB und bei Gegenwind bis zu 8,3 / 6,4 / 14,9 dB wie aus Bild 5-27 (unten) entnommen werden kann.

Gut zu erkennen ist außerdem, dass die Unterschiede zum Referenzschallpegel bei Gegenwind deutlich größer sind als bei Mitwind. So liegt der Schalldruckpegel in 500 m Entfernung von der Quelle bei Mitwind in Klasse W_3 rund 10 dB oberhalb des Referenzwerts, während er bei Gegenwind gut 35 dB darunter liegt und damit die Schallquelle praktisch nicht mehr hörbar ist, bzw. im Hintergrundgeräusch untergeht.

Es ist im Rahmen dieses Methodenvergleichs allerdings zu beachten, dass das vertikale Windprofil, das der Nord2000 zugrunde liegt, nicht bekannt ist. Ein direkter Vergleich von Ergebnissen, die zwar in die gleiche Windgeschwindigkeitsklasse fallen, für die aber nicht bekannt ist ob die Windgeschwindigkeiten – auch im Vertikalprofil – übereinstimmen lässt ist daher grundsätzlich kritisch zu betrachten.

5.6 Bewertung der Rechenmodelle hinsichtlich praktischer Anwendbarkeit

5.6.1 Zusatznutzen durch die Berücksichtigung meteorologischer Parameter hinsichtlich Langzeitmittelungspegel

Die bisher untersuchten Rechenmodelle berücksichtigen Meteorologie entweder pauschal, unterscheiden nach ausbreitungsgünstigen/homogenen Bedingungen oder nach fünf Windstärkeklassen, fünf Stabilitätsklassen und Windrichtung. Der Be-

darf an meteorologischen Daten ist somit entsprechend unterschiedlich und auch in der Prognose mit unterschiedlichem Aufwand einzuholen:

a) Keine Unterscheidung

Bei dieser Methode wird ein Rechenergebnis erreicht, welches einen Langzeitmittelungspegel generell überschätzt. Daher wird diese Methode überwiegend in Genehmigungsverfahren im deutschen Immissionsschutzrecht (RLS-90, Schall 03) angewendet, die einem lärmbeeinträchtigten Anwohner einen Schutz vor Verkehrslärm verschaffen sollen. Entsprechend sind die Berechnungen zugunsten der Betroffenen auf der sicheren Seite liegend ausgelegt.

b) Unterscheidung nach ausbreitungsgünstig/homogen

Diese Methoden unterscheiden formal in ausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen. Ein Langzeitmittelungspegel wird anhand der Häufigkeit von ausbreitungsgünstigen Bedingungen in einem Langzeitintervall und der gewichteten Mittelung der beiden Bedingungen ermittelt. Vereinfachend werden ausbreitungsgünstige Bedingungen rechnerisch den homogenen Bedingungen zugeordnet. Die daraus folgende Überschätzung des Langzeitpegels ist entsprechend der Pegeldominanz der ausbreitungsgünstigen Bedingungen gering. Statistiken für die Häufigkeit von ausbreitungsgünstigen Bedingungen über einen Langzeitmittelung sind in der Regel verfügbar.

Die Zeiträume, in denen eine der beiden Klassen als konstant angesehen werden kann, übersteigt zudem meist die Dauer der gesetzlichen Beurteilungszeiträume (Tag 16 h, Nacht 8 h), so dass eine getrennte Berechnung in diesem Zusammenhang auch sinnvoll erscheint.

c) Unterscheidung in Windstärkeklassen, Stabilitätsklassen und Windrichtungen

Die differenzierte Betrachtung in jeweils fünf Klassen der Windgeschwindigkeit und der Stabilität, ergänzt durch die Windrichtung, erlaubt theoretisch die Unterscheidung in zahlreiche unterschiedliche Situationen (bis zu $5 \times 5 \times 360$ unterscheidbare Situationen), die in der Praxis deutlich unterschiedlich häufig auftreten. Zudem ist die Dauerhaftigkeit der Situationen speziell im Bezug zum Wind (Richtung und Geschwindigkeit)

keit) häufig nur von sehr kurzer Dauer und deutlich geringer als die gesetzlich zu betrachtenden Beurteilungszeiten (z. B. 16 h am Tag oder 8 h in der Nacht).

In der Prognose werden daher entweder Kurzzeitmittelungspegel für bestimmte Situationen ermittelt oder es müssen statistische Daten der Häufigkeit verschiedener Situationen für eine gewichtete Mittelung verwendet werden. Wie stark sich dann die Berücksichtigung eine Häufigkeitsstatistik am gewichteten Langzeitmittelungspegel auswirkt, soll im Folgenden betrachtet werden.

Hierfür werden die gemessenen meteorologischen Daten während der Messperiode der Langzeitmessung in Sulzemoos statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse der Berechnungen nach Nord2000 für Testaufgabe 4b (Sulzemoos mit realem Gelände) werden anschließend mit der Häufigkeitsverteilung der Klassen W und S (vgl. Tabelle 7-11) und der Windrichtungsstatistik (vgl. Bild 6-9) an der Mess-

station DMS_1 gewichtet zu einem Langzeitmittelungspegel gemittelt.

Tabelle 5-3 bis Tabelle 5-5 zeigen anhand der Testaufgabe 4b die Pegeldifferenzen am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt in 25 m Abstand für Mit-, Quer- und Gegenwind für die unterschiedlichen Klassen der Windgeschwindigkeit und des Temperaturgradienten. Die Windklasse W_5 wird hier nicht berücksichtigt, da diese hohen Windgeschwindigkeiten im betrachteten Messzeitraum praktisch nicht vorgekommen sind.

Die Variation der Pegeldifferenzen für den Mitwind- und den Querwindfall ist ziemlich gering und beträgt in etwa 1 dB. Bei Gegenwind hingegen liegt die Variation der Pegeldifferenzen zwischen den meteorologischen Klassen deutlich höher.

Um einen Langzeitmittelungspegel zu berechnen, werden die berechneten Ergebnisse aus den obigen Tabellen mit der Häufigkeit des Auftretens der

Stabilitäts- klasse Windklasse	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
W ₁	-11,1	-11,1	-11,2	-11,2	-11,1
W ₂	-11,4	-11,4	-11,5	-11,5	-11,5
W ₃	-12,1	-12,1	-12,1	-12,0	-12,0
W ₄	-12,1	-12,1	-12,1	-12,0	-12,0

Tab. 5-3: Pegeldifferenz am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt der Testaufgabe 4b für Mitwind

Stabilitäts- klasse Windklasse	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
W ₁	-11,6	-11,6	-11,5	-11,5	-11,5
W ₂	-12,0	-11,9	-12,0	-12,0	-12,0
W ₃	-12,4	-12,4	-12,4	-12,0	-12,3
W ₄	-12,6	-12,5	-12,5	-12,5	-12,4

Tab. 5-4: Pegeldifferenz am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt der Testaufgabe 4b für Querwind

Stabilitäts- klasse Windklasse	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
W ₁	-12,8	-12,6	-12,5	-12,3	-12,1
W ₂	-15,7	-15,5	-15,3	-14,9	-14,7
W ₃	-25,8	-25,5	-25,3	-24,9	-24,5
W ₄	-28,7	-28,6	-28,6	-28,5	-28,3

Tab. 5-5: Pegeldifferenz am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt der Testaufgabe 4b für Gegenwind

jeweiligen meteorologischen Situation (Kombination aus Windgeschwindigkeitsklasse W, Temperaturgradientenklasse S und Windrichtung) gewichtet und gemittelt. Hierbei werden die Häufigkeiten der Klassen W_0 und W_1 zusammengefasst und die Windrichtungen in die drei Klassen Mitwind ($0^\circ - 90^\circ$), Gegenwind ($180^\circ - 270^\circ$), und Querwind ($90^\circ - 180^\circ$ und $270^\circ - 360^\circ$) eingeteilt. Situationen mit Windstille (in etwa 21,7 % der Messzeit) werden über die vier Richtungssektoren als gleichverteilt angenommen.

Die aus den Messungen ermittelte Häufigkeitsverteilung der Klassen W und S kann Tabelle 5-6 entnommen werden.

Die aus der Windrichtungsstatistik ermittelte Häufigkeit der Windrichtungen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen ist in Tabelle 5-7 dargestellt.

Nach der mit der Häufigkeitsverteilung der Klassen W und S und der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen gewichteten Mittelung der Rechenergebnisse nach Nord2000 ergibt sich am Immissionsort DMS_1 eine Pegeldifferenz zum Referenzpunkt von -12,2 dB(A).

Der Wert für die Situation Mitwind in der Kombination S_3W_2 (Mitwind bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s und neutraler Temperaturschichtung), wie ihn z. B. die RLS-90 benutzen, beträgt im Vergleich dazu -11,5 dB(A). Der Unterschied durch die

aufwendige Ermittlung der meteorologischen Situation und deren gewichtete Mittelung beträgt in diesem Fall in Sulzemoos im Langzeitmittelungspegel gerade mal 0,7 dB(A) unter dem Wert der RLS-90.

Mithilfe eines Abschlags, wie es z. B. durch der Korrekturterm C_{met} in der DIN ISO 9613-2 geschieht, könnte mit zumindest rechnerisch deutlich geringerem Aufwand eine gute Näherung des Langzeitmittelungspegels berechnet werden. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die meteorologischen Situationen der schallausbreitungsgünstigen Witterungsbedingungen bei der energetischen, gewichteten Mittelung den größten Einfluss auf die Höhe des Langzeitmittelungspegels aufweisen. Eine einfache Korrektur zur Ermittlung des Langzeitmittelungspegels wie das C_{met} der DIN ISO 9613-2 verursacht wesentlich weniger Aufwand und Eingaben meteorologischer Daten und führt zu einem ähnlichen Ergebnis.

5.6.2 Handhabbarkeit der Rechenverfahren

Die verschiedenen Rechenverfahren erfordern unterschiedlich detaillierte Eingabeparameter hinsichtlich Meteorologie, verursachen aber darüber hinaus auch unterschiedliche Rechenzeiten. Die Eingaben meteorologischer Daten für die verschiedenen Rechenverfahren in die Software-Programme werden im Folgenden tabellarisch verglichen. Testaufgabe 4b ist ein realistisches Rechenmodell,

Stabilitäts- klasse Windklasse	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
W ₁	4,5	5,4	3,8	8,6	13,9
W ₂	12,2	10,9	6,3	8,3	13,1
W ₃	3,3	3,8	0,9	1,3	1,8
W ₄	0,7	1,1	0,1	0,05	0,05

Tab. 5-6: Gemessene Häufigkeitsverteilung der Klassen W und S in Sulzemoos in %

Stabilitäts- klasse Windklasse	0° – 90°	90° – 180°	180° – 270°	270° – 360°
W ₁	10,2	8,4	8,4	8,8
W ₂	18,1	5,4	6,0	3,5
W ₃	11,7	1,2	10,0	0,4
W ₄	0,9	0,2	6,7	0

Tab. 5-7: Gemessene Häufigkeitsverteilung der Windrichtungssektoren in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen in Sulzemoos in %

wie es auch in der Praxis verwendet wird. Für diese Testaufgaben erfolgten Berechnungen von Immisionsrastern mit identischen Rasterweiten und -höhen sowie jeweils mit den für das Verfahren geforderten Referenzeinstellungen. Anhand der Rechenzeiten für ein Raster können die verschiedenen Methoden vom Rechenaufwand miteinander verglichen werden. Alle Rechenverfahren werden mit derselben Software (Soundplan® 8.1) gerechnet.

Tabelle 5-8 zeigt die durchschnittlichen Rechenzeiten für die jeweilige Norm und listet zusätzlich erforderliche meteorologische Eingaben auf.

Der Vergleich der Rechenzeiten spiegelt deutlich die Aufteilung der einzelnen Rechenmethoden in drei Cluster je nach Detailgrad der Berücksichtigung meteorologischer Daten wider.

So weisen Normen, die meteorologische Einflüsse wenig oder gar nicht betrachten (RLS90, VBUS, VDI 2714 und DIN ISO 9613-2), die kürzesten Rechenzeiten auf. Die Rechenzeiten innerhalb dieser Normen reichen von knapp über 2 min für die VDI 2714 sowie die DIN ISO 9613-2 bis hin zu ca. 4 min bei der VBUS. Eine spektrale Betrachtung bei VDI 2714 und DIN ISO 9613-2 führt ungefähr zu einer Verdopplung der Rechenzeit.

Im zweiten Cluster mit Regelwerken mit eingeschränkter Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter, zu denen die Vertreter NMPB-Routes-08 sowie die BUB gehören, liegen die Rechenzeiten zwischen ca. 8 min und ca. 14 min. Die Dauer hängt hier mit der Einstellung des Gewichtungsfaktors p_j zusammen. So betragen die

Rechenzeiten für den schallausbreitungsgünstigen Fall, d. h. $p_j = 100$, bei der NMPB Routes-08 ca. 8 min und bei der BUB 2018 ca. 10 min. Im homogenen Fall, d. h. $p_j = 0$, liegen die Rechenzeiten für beide Normen bei ca. 14 min, was einer Zunahme von ca. 50 % entspricht.

5.6.3 Fazit

Bei den Regelwerken, die unterschiedliche meteorologische Parameter berücksichtigen, wie z. B. die Nord2000, lässt sich eine extreme Zunahme der Rechenzeit im Vergleich zu Normen innerhalb der anderen beiden Cluster feststellen. Die durchschnittliche Rechenzeit für eine Rasterlärnkarte der Testaufgabe 4b mit Nord2000 liegt im Bereich von ca. 5 h mit einer Schwankungsbreite von ca. 1 h je nach Wahl der Stabilitätsklasse, Windgeschwindigkeit und/oder Windrichtung. Zu beachten ist hier allerdings, dass die enorme Erhöhung der Rechenzeit nicht allein auf die Einführung meteorologischer Parameter zurückzuführen ist, sondern auch darauf, dass zusätzliche Methoden wie die Unterteilung in mehrere Quellhöhen, eine spektrale Betrachtung, Einführung des Fresnelzonenkonzepts etc. Betrachtung finden und somit ebenfalls zur Erhöhung der Rechenzeit beitragen.

Regelwerke mit Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter, wie z. B. Nord2000, erscheinen demnach, wegen des höheren Rechenaufwands, zur Berechnung von Langzeitmittelungspegeln unverhältnismäßig aufwendig. Wenn jedoch konkrete meteorologische Situa-

	durchschnittliche Rechenzeit	zusätzlich erforderliche meteorologische Eingaben
RLS90	3 min	
VBUS	4 min	
VDI 2714	2 min	
VDI 2714 Spektral	4,5 min	
DIN ISO 9613-2 C=2	3 min	Meteorologiekonstante C_0
DIN ISO 9613-2 Spektral C=2	7,5 min	
NMPB-Routes 08 homogen	14 min	Gewichtungsfaktor p_j
NMPB-Routes 08 schallausbreitungsgünstig	8 min	Gewichtungsfaktor p_j
BUB 2018 homogen	14 min	Gewichtungsfaktor p_j
BUB 2018 schallausbreitungsgünstig	10 min	Gewichtungsfaktor p_j
Nord 2000 (S3W2)	5 h 18 min	Stabilitätsklasse, Windgeschw. und -richtung

Tab. 5-8: Übersicht der durchschnittlichen Rechenzeiten einer Rasterlärnkarte für Testaufgabe 4b und der zusätzlich erforderlichen Eingabeparameter für verschiedenen Rechenvorschriften

tionen betrachtet werden sollen, zeigt sich, dass bereits bei Entfernungen von 200 m Abweichungen von der standardisierten Mitwindsituation von bis ca. 10 dB(A) im Vergleich zu Mitwindsituationen und von ca. 20 dB(A) im Vergleich zu Gegenwindsituationen auftreten können. Für Betrachtungen dieser konkreten Situationen wären auch die Verfahren wie die NMPB-Routes-08 oder die BUB nicht geeignet. Um schallausbreitungsungünstige meteorologischen Situationen bewerten zu können, muss bislang auf die Verfahren der Nord2000 oder Harmonoise zurückgegriffen werden.

6 Messungen im Untersuchungsgebiet Sulzemoos

Der tatsächliche Einfluss meteorologischer Parameter auf die Schallausbreitung wurde im Folgenden anhand von Langzeitmessungen im Untersuchungsgebiet Sulzemoos an der BAB 8 zwischen Augsburg und München ermittelt. Das Untersuchungsgebiet wurde bereits als Testaufgabe 4 bei der Untersuchung der verschiedenen Rechenmethoden modelliert und ist bzgl. der Randbedingungen in Kapitel 3 beschrieben. Durch den Vergleich von Berechnung und der im Folgenden dargestellten Messung können weitergehende Aussagen zum Einfluss der meteorologischen Parameter getroffen werden. Außerdem soll abschließend ein Vorschlag für eine Erweiterung der Rechenmethode der RLS-90 auf Basis der Messergebnisse unterbreitet werden.

6.1 Messaufbau und Durchführung der Messung

Die Langzeitmessungen in Sulzemoos wurden aufgrund der beabsichtigten Messung möglichst unter-

schiedlicher Wetterlagen bei trockener Fahrbahn in den Spätsommer bis Spätherbst gelegt. Die Messphase begann am 14.09.2018 und endete am 14.12.2018. Über die gesamte Messdauer wurden zwei Langzeitmessstellen in etwas weniger als 250 m Abstand von der Autobahn betrieben, die kombinierte Messstation DMS_1 aus Schallpegelmesser (DMS_1-Schall) und Wetterstation (DMS_1-Wetter) und die DMS_2, die Schall und Meteorologie gleichzeitig misst. Neben den Dauermessungen wurden an zusätzlichen Tagen „Intensivmessungen“ zur Bestimmung der Immissionen bei ausgewählten Wettersituationen durchgeführt. Bei den Intensivmessungen wurde neben den beiden Langzeitmessstellen eine Messkette mit bis zu sechs weiteren Mikrofonen (IMS 1-8) in unterschiedlichen Abständen eingerichtet. Die erste Intensivmessung fand am 20.09.2018 statt, weitere Intensivmessungen wurden am 23.10.2018, 25.10.2018, 29.10.2018, 15.11.2018 und am 14.12.2018 durchgeführt. Der Zeitpunkt der Intensivmessungen wurde kurzfristig auf Grundlage der Wettervorhersage gewählt, mit dem Ziel folgende Wettersituationen abzubilden:

- 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).

Die Positionen der Mikrofone und Aufstellzeiten an den jeweiligen Intensivmessstagen sind zur Übersicht in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Station	GK4	UTM	WGS 84	Höhe	hüG	Aufstellzeit	Bemerkung
DMS 1	4446672; 5348605	32U 669183; 5349170	48,27312; 11,28014	523 m	2	14.09. bis 14.12.	237 m Abstand (Langzeit)
DMS 2	4446637; 5348649	32U 669147; 5349213	48,27351; 11,27967	523 m	2	14.09. bis 14.12.	246 m Abstand (Langzeit)
Dabei bedeuten:							
GK4: Koordinaten in GK4		hüG: Höhe über Gelände					
UTM: Koordinaten in UTM		Aufstellzeit: Datum der Aufstellzeit der Messstationen					
WGS 84: Koordinaten in WGS 84		Bemerkung: zusätzliche Bemerkung z. B. Abstand zur Quelle etc.					
Höhe: Höhe über Meeresspiegel							

Tab. 6-1: Positionen und Aufstellzeiten der Messstationen

Station	GK4	UTM	WGS 84	Höhe	hüG	Aufstellzeit	Bemerkung
IMS 1	4446853; 5348729	32U 669361; 5349302	48,27426; 11,28258	518 m	2	(20.09., 23.10., 29.10., 15.11., 14.12.)	28 m Abstand Quelle BAB 8
IMS 2	4446231; 5348384	32U 668753; 5348933	48,27110; 11,274247	532 m	2	(20.09., 25.10., 29.10., 15.11., 14.12.)	693 m Abstand (Ortsrand)
IMS 3	4446363; 5348467	32U 668881; 5349020	48,27185; 11,276009	529 m	2	(29.10., 15.11., 14.12.)	551 m Abstand
IMS 4	4446534; 5348469	32U 669052; 5349030	48,27189; 11,278318	527 m	2	(29.10., 15.11., 14.12.)	435 m Abstand
IMS 5	4446191; 5348640	32U 668703; 5349187	48,27339; 11,273675	535 m	2	(25.10.)	511 m Abstand (Hügel)
IMS 6	4446326; 5348672	32U 668836; 5349224	48,27370; 11,275489	531 m	2	(29.10., 15.11., 14.12.)	408 m Abstand (Hügel)
IMS 7	4446812; 5348675	32U 669322; 5349246	48,27376; 11,282040	522 m	2	(20.09., 23.10., 25.10.)	95 m Abstand
IMS 8	4446881; 5348522	32U 669397; 5349097	48,27240; 11,282987	526 m	2	(29.10., 15.11.)	145 m Abstand

Dabei bedeuten:

GK4:	Koordinaten in GK4	hüG:	Höhe über Gelände
UTM:	Koordinaten in UTM	Aufstellzeit:	Datum der Aufstellzeit der Messstationen
WGS 84:	Koordinaten in WGS 84	Bemerkung:	zusätzliche Bemerkung z. B. Abstand zur Quelle etc.
Höhe:	Höhe über Meeresspiegel		

Tab. 6-1: Fortsetzung

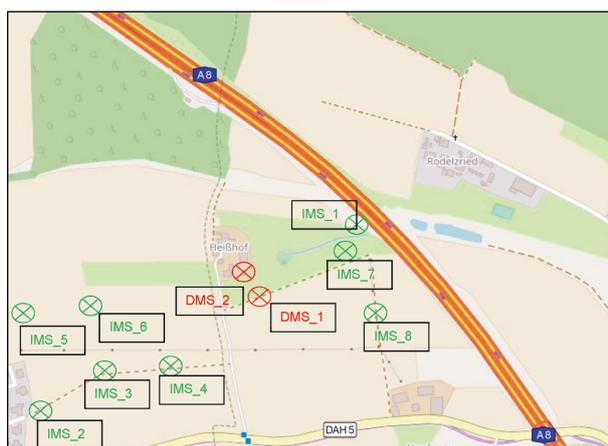


Bild 6-1: Position der beiden Dauermessstationen DMS_1 und DMS_2 sowie die Positionen der einzelnen IMS Messstationen 1-8 (©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Die Wetterlagen während der Dauermessung und der Intensivmessphasen

Aus den eigenen Meteorologie-Messwerten als auch aus den Daten des DWD können die verschiedenen Wetterlagen innerhalb der Messperiode entnommen werden.

Während zu Messbeginn Mitte September noch Spätsommerwetter vorherrschte, welches durch einen deutlichen Temperaturtagesgang gekennzeichnet ist, traten am Ende der Messphase schon winterliche Wettererscheinungen mit Frost und teilweise einer dünnen Schneedecke auf. Dazwischen gab es auch einige stürmische Tage und Nächte mit Windstärken von über 8 Bf oder 90 km/h (siehe dazu Bild 6-8).

Neben den Dauermessungen wurden zusätzliche „Intensivmessungen“ zur Bestimmung der Immissionen bei ausgewählten Wettersituationen durchgeführt. Diese Tage unterscheiden sich aus meteorologischer Sicht deutlich voneinander und es wurde

		Wetter					
Datum	Uhrzeit	Temperatur	Schichtung	Höhen-inversion	Wind-richtung	Wind-geschwindig-keit	Windprofil (DWD)
20.09.2018	06:00	ca. 14 °C	stabil (bis 300 m)	nein	SSW	ca. 2 – 4 m/s	
20.09.2018	09:00	ca. 20 °C	labil/neutral	nein	SW	ca. 2 m/s	Jet (200 – 400 m) 5 m/s
23.10.2018	09:30	ca. 10 °C	labil (bis 500 m)	nein	W	ca. 7 m/s	
25.10.2018	13:00	Ca. 10 °C	labil (bis 500 m)	nein	WSW	ca. 4 m/s	
29.10.2018	13:00	ca. 8 °C	labil (bis 200 m)	ja (200 – 500 m)	O	ca. 5 m/s	Inhomogen
15.11.2018	13:00	ca. 5 °C	labil/neutral	ja (500 – 1000 m)	NO	2 m/s	
14.12.2018	10:00	ca. – 2 °C	labil/neutral	ja (800 – 1200 m)	O	ca. 3 m/s	

Tab. 6-2: Meteorologische Einordnung der Intensivmesstage zu einer festen Tageszeit

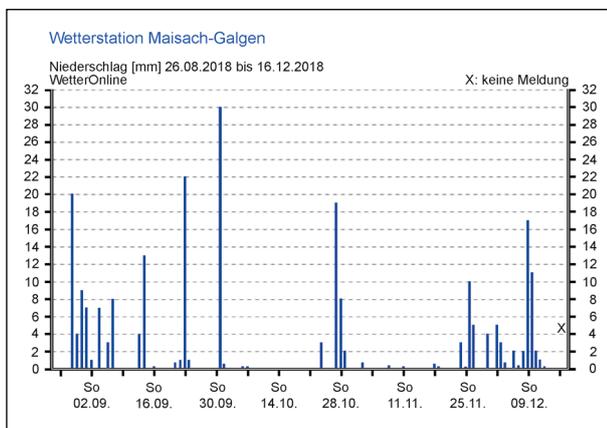


Bild 6-2: Niederschlagstage und Mengen in der Nähe von Sulzemoos an der Station Maisach-Galgen (www.wetteronline.de)

erwartet, dass sich die Immissionsmessungen an den zusätzlichen Stationen dann ebenso deutlich voneinander unterscheiden. Ferner wird durch eine genauere Betrachtung der Wettersituation an den Intensivmesstagen auch der Pegelverlauf an den Dauermessstationen besser verstanden. Tabelle 6-2 zeigt die meteorologischen Charakteristika dieser speziell ausgewählten Tage, wonach die angestrebten Hauptunterscheidungen bzgl. Windrichtung (O-W und NO-SW), unterschiedliche Windgeschwindigkeiten als auch unterschiedliche thermische Schichtungen erfasst wurden. Auch Windstrahlströme (sog. Jets oder Jetstreams) in bestimmten Höhen über Grund wurden registriert. Solche Jets können wegen der verstärkten vertikalen Windgradienten durch zusätzliche Brechungseffekte auch einen wichtigen Einfluss auf die Schallausbreitung haben.

Bei den meteorologischen Erhebungen wurde ebenfalls der Niederschlag erfasst, da insbesonde-

re auch die Emission durch die nasse Fahrbahn beeinflusst wird. Messtage mit Niederschlag wurden besonders gekennzeichnet und ggfs. Von der Auswertung ausgeschlossen.

6.2 Beschreibung der verwendeten Messgeräte und Datensätze

Zur Erstellung einer lokalen Datengrundlage für das Untersuchungsgebiet werden im Projekt neben den eigenen Schallmessstationen und zur Meteorologie noch verschiedene öffentlich verfügbare Quellen herangezogen. Im Folgenden werden die verwendeten Geräte und Quellen näher beschrieben.

6.2.1 Dauermessstellen

Die Dauermessstation wurde vom 14.09.2018 bis zum 14.12.2018 betrieben.

Dauermessstation 1 (DMS_1)

Die kombinierte Messstation besteht aus einem Schallpegelmonitoringgerät zur Schallmessung (Sinus Messtechnik TangoNMS) in 2 m über Gelände mit folgenden Spezifikationen (siehe Tabelle 6-3).

An derselben Stativkonstruktion ist eine Wetterstation (Davis Vantage Pro2 Wetterstation mit integrierter Sensoreinheit) in 5 m über Gelände mit Temperatursensor, Niederschlagssammler, Feuchtigkeitssensor und Anemometer mit den folgenden Spezifikationen (Tabelle 6-4).

Die Daten der Schallpegelmessung wurden über eine Mobilfunkverbindung kontinuierlich auf einen Server übertragen und konnten ständig online über

Messwerte	<ul style="list-style-type: none"> • Schalldruckpegel L_{AF}, L_{AS} • Maximalschallpegel L_{AFmax}, L_{ASmax} • Minimalschallpegel L_{AFmin}, L_{ASmin} • Dauerschallpegel L_{Aeq}, L_{Ceq} • Taktmaximal Pegel L_{Atm5} • Uhrzeit/Messzeit/Überschreitungszeit
Frequenzbewertung	• A + C
Zeitbewertung	• F = Fast, S = Slow
Frequenzanalysator-Terz-Mode	• 10 Hz – 20 kHz
Messbereich	• 25 bis 140 dB (L_{Aeq})
Auflösung	• 0,1 dB
Mikrofon	• 1/2" Messmikrofon, dauerpolarisiert

Tab. 6-3: Spezifikation des Monitoringgeräts Tango NMS

Messwerte	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur (innen, außen) • Taupunkt • Windchill • Windgeschwindigkeit • Windrichtung • Druck • Relative Feuchtigkeit/Luftfeuchtigkeit
Temperaturparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturauflösung und -einheiten: 1 °F oder 1 °C • Temperaturbereich: -40 °C bis +150 °C Fahrenheit bzw. -40 °C bis 65 °C • Sensorgenauigkeit: +/- 0,5 °F (+/- 0,3 °C)
Feuchtigkeitsparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung und Einheit: 1 % • Bereich: 1 bis 100 % relative Feuchte • Genauigkeit +/- 2 % • Drift: bis zu +/- 2 % pro Jahr
Aktualisierungsintervalle	<ul style="list-style-type: none"> • Windgeschwindigkeit: 2,5 bis 3 sek. • Windrichtung: 2,5 bis 3 sek. • Gesamtniederschlag: 20 bis 24 sek. • Niederschlagsrate: 20 bis 24 sek. • Außentemperatur: 10 bis 12 sek. • Außenluftfeuchtigkeit: 50 bis 60 sek.

Tab. 6-4: Spezifikation der Wetterstation Davis Vantage Pro2

Datum/Zeit	qKfz	qPkw	qLkw	vPkw	vLkw
2018-09-14 12:00:00	87	71	16	135,75	88,75
2018-09-14 12:01:00	114	93	21	124,85	87,90
2018-09-14 12:02:00	121	105	16	132,30	87,75
2018-09-14 12:03:00	99	79	20	133,29	88,25
2018-09-14 12:04:00	105	94	11	137,32	91,91
2018-09-14 12:05:00	106	85	21	127,06	88,43
2018-09-14 12:06:00	93	79	14	134,44	93,07
2018-09-14 12:07:00	130	109	21	124,03	89,81

Dabei bezeichnen qKfz, qPkw und qLkw die Anzahl der Kfz, Pkw bzw. Lkw und vPkw sowie vLkw die gemittelten Geschwindigkeiten der Pkw bzw. Lkw.

Tab. 6-5: Beispieldatensatz der Rohdaten aus der Verkehrszählstation

eine Webseite als csv-Datei zur weiteren Verwendung ausgegeben werden. Zusätzlich zu den Schallpegelwerten stehen auch Audiodateien der Station zur Verfügung.

Dauermessstation 2 (DMS_2)

Die Station SV187 (SVANTEK Monitoring 979) misst den Schall (1/3 Oktavbänder) in 2 m über Gelände und gleichzeitig Meteorologie-Parameter: Temperatur (T), Windgeschwindigkeit (v), Windrichtung (Dir), Druck (p), und die relative Feuchtigkeit/ Luftfeuchtigkeit (f_{rel}) mit einer Abtastrate von 1 Hz.

6.2.2 Verkehrszählstation

Als Grundlage für die Berechnung des Verkehrslärms wurden Daten der Zentralstelle für Informationssysteme (ZIS) bei der Autobahndirektion Südbayern herangezogen. Im Speziellen die Daten der Zählstelle 9003 der BAB 8 in Sulzemoos. Die Daten sind als Textdatei abrufbar und enthalten auf eine Minute gemittelte Daten. Diese beinhalten Angaben über Datum und Uhrzeit sowie die Anzahl der Fahrzeuge, gegliedert in Pkw und Lkw, sowie die jeweils gemittelte Geschwindigkeit. Tabelle 6-5 zeigt einen Beispielrohdatensatz der Zählstelle 9003 der BAB 8 in Sulzemoos. Dabei bezeichnen qKfz, qPkw und qLkw die Anzahl der Kfz, Pkw bzw. Lkw innerhalb einer Minute, wobei gilt, dass $qKfz = qPkw + qLkw$ und vPkw sowie vLkw sind die über eine Minute gemittelten Geschwindigkeiten der Pkw bzw. Lkw im selben Zeitraum.

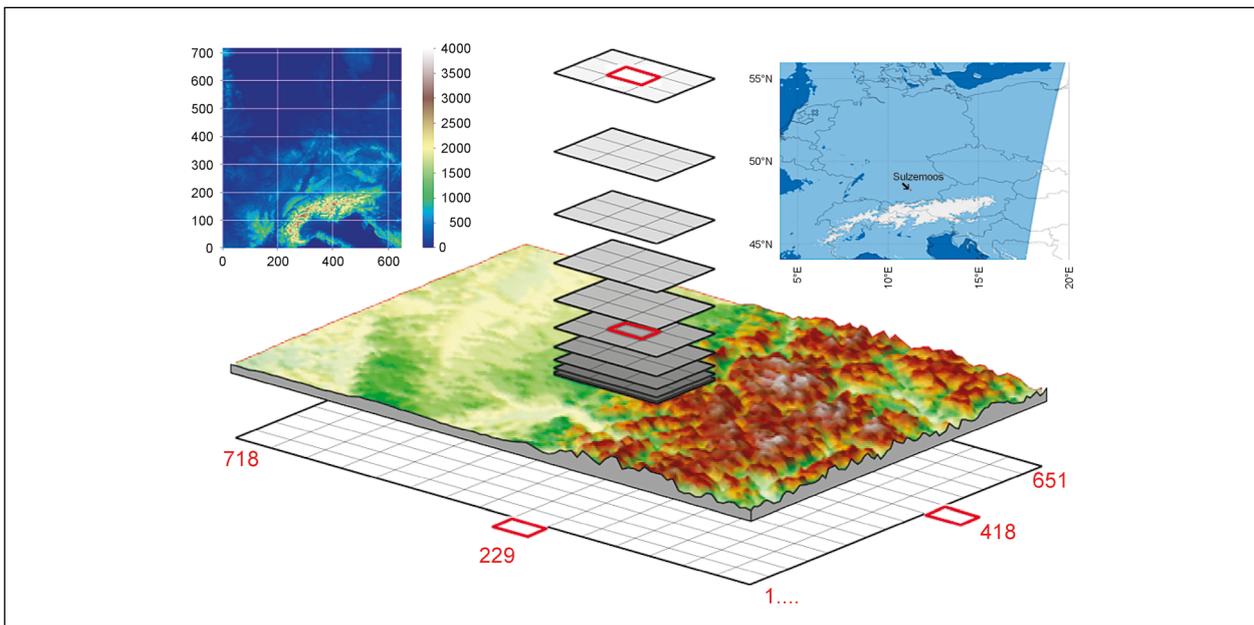


Bild 6-3: Lage der Gitterzellen nahe Sulzemoos in dem COSMO-DE Gitter – horizontale Gitterzelle mit den Ortskoordinaten 418/229 schematisch dargestellt; links oben das COSMO-Gitter mit Topografie, rechts oben die Lage von Sulzemoos in Deutschland)

6.2.3 DWD-COSMO-DE Wetterdaten

Während der gesamten Messphase werden Daten von dem DWD-Wettermodell COSMO-DE [32] bezogen und abgespeichert, um eine übergeordnete Einordnung der Wetterlage zu dokumentieren, die weniger durch die lokalen Gegebenheiten geprägt ist als die in-situ-Messungen an den Messstationen. Dazu sind neun Gitterzellen aus der Modelldomäne extrahiert worden, die Daten vom Boden bis in eine Höhe von 12 km enthalten. Für die Auswertung wurde dann die mittlere Gitterzelle bis in eine Höhe von 2.000 m benutzt. Die Lage der Gitterzelle ist in Bild 6-3, zur besseren Einordnung, noch einmal dargestellt.

Die DWD-Daten enthalten Datum und Uhrzeit, Temperatur in °C, Druck in bar, Windgeschwindigkeit in m/s und Windrichtung in verschiedenen Höhen im 3h-Takt (die Daten stellen keine Mittelung über 3 h, sondern die jeweils in 3h-Abständen momentanen Werte dar).

6.3 Darstellung der vorhandenen Daten

Nachfolgend sind einige Beispiele aus den gemessenen Daten dargestellt, um einen Eindruck über die ermittelten Daten zu vermitteln.

Beispieltag 1: 18.09.2018

Das erste Beispiel zeigt einen typischen Werktag mit einem deutlich durch den Berufsverkehr beeinflussten Schallpegelverlauf. Dargestellt sind in Bild 6-4 der Schalldruckpegel im Tagesverlauf, sowohl im 1Hz-Takt (Gelb) als auch als 10-Minuten-Mittel (Pink). Darunter in der gleichen Abbildung sind zunächst das Frequenzspektrum und anschließend ausgewählte meteorologische Daten dargestellt (Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit).

Der A-bewertete Pegel in Bild 6-4 oben zeigt zunächst die typische Pegelzunahme durch Berufsverkehr am Morgen sowie eine kurzzeitige Pegelabnahme gegen 07:20 Uhr, welche zeitlich mit einer regelmäßig von Anwohnern beobachteten Verkehrsverlangsamung korreliert. Auffällig ist an diesem Tag die abrupte Pegelabnahme gegen 08:00 Uhr, welche zeitlich mit einer deutlichen Temperaturzunahme in Bodennähe sowie einer Zunahme der Windgeschwindigkeit bei relativ konstanter Windrichtung zusammenfällt. Dies lässt auf einen Übergang von stabiler zu labiler Luftschichtung schließen, welcher sich ebenfalls in den Vertikalprofilen der COSMO-DE-Daten (siehe Bild 6-5) zeigt. Die typische, durch Berufsverkehr bedingte, Pegelzunahme am Nachmittag ist nur sehr gering ausgeprägt, zeitgleich wird eine weitere Zunahme der Windgeschwindigkeit (bei weiterhin konstantem

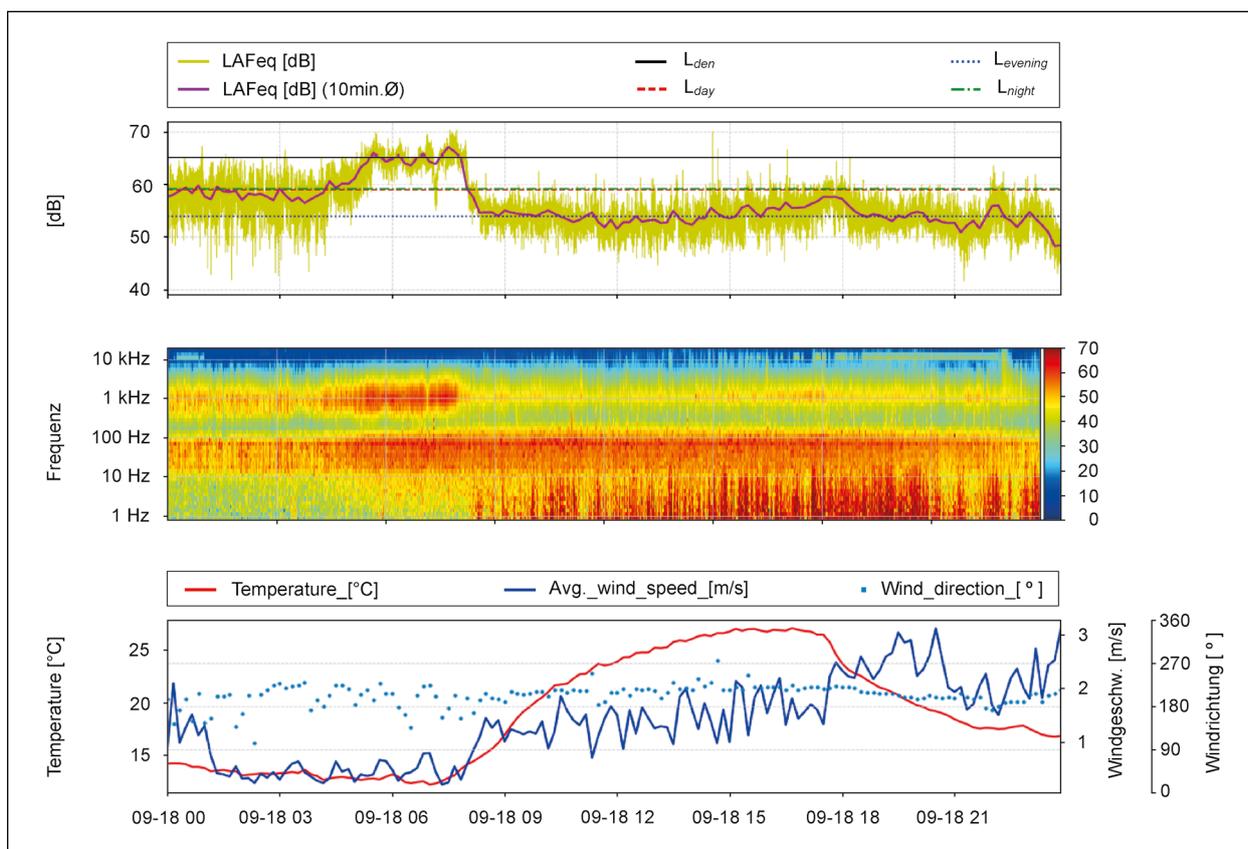


Bild 6-4: Pegel (oben), Spektrogramm (Mitte) und Wettersituation am Dienstag, 18. Sept. 2018 00:00-23:59 Uhr

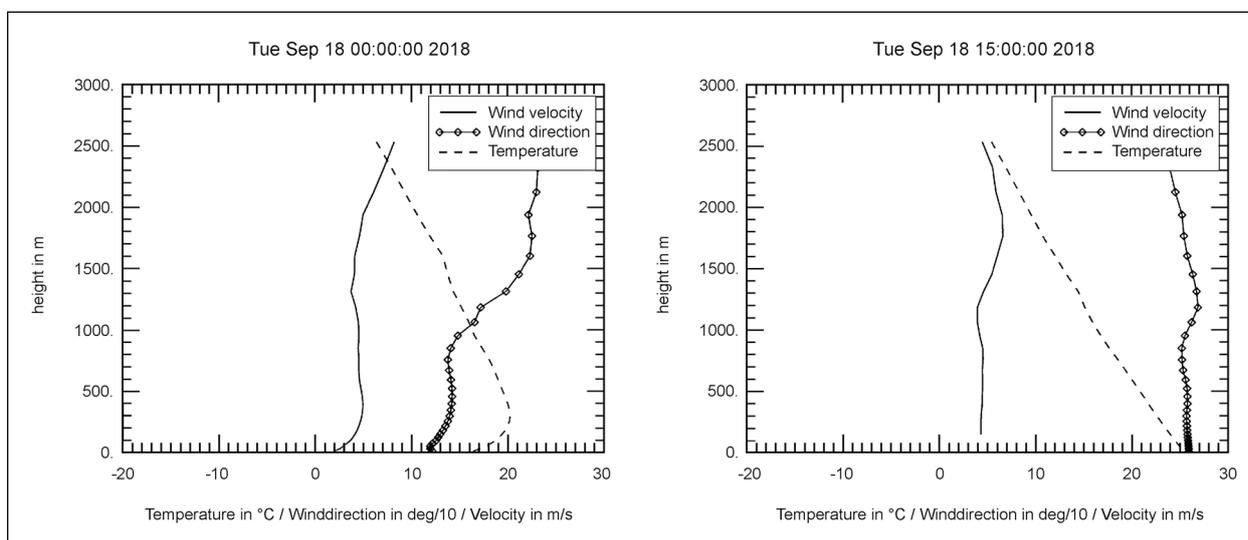


Bild 6-5 Vertikalprofile von Wind und Temperatur; erhoben am 18.09.2018 um 0:00 UTC (links) und 15:00 UTC (rechts) aus den DWD-Daten, des COSMO-DE Modells [29]

Gegenwind) beobachtet. Kausale Zusammenhänge zwischen dem sich ändernden Schalldruckpegel und der meteorologischen Bedingungen lassen sich hier allerdings noch nicht herleiten.

Insgesamt ist zu beobachten, dass an diesem Tag der Mittelungspegel für die Zeit von 00:00-04:30

Uhr signifikant über dem in der Zeit von 08:30-23:59 Uhr gemessenen Pegel liegt, während die gemittelten Verkehrsdaten (siehe Bild 7-1) grundsätzlich einen gegenteiligen Verlauf erwarten lassen (unter der Annahme einer lärmneutralen Wetterlage).

Im Spektrogramm stechen drei Bänder hervor. Dies sind zum einen ein Frequenzspektrumband von etwa 500 Hz-4 kHz, welches das typische Frequenzspektrum von Straßenlärm abdeckt und zum anderen zwei tieffrequenter Bereiche von etwa 16 Hz-200 Hz bzw. 1 Hz-10 Hz (wobei es sich zumindest bei Letzterem um induzierte Windgeräusche handelt).

An den Vertikalprofilen aus dem COSMO-DE Modell (vgl. Bild 6-5) erkennt man, dass am 18.09.2018 ein deutlicher Unterschied zwischen Tag- und Nachtschichtung herrscht. Dieser Spätsommertag ist gekennzeichnet durch schwache Bewölkung und entsprechend starke Strahlungseffekte. Dadurch hat man große Temperaturunterschiede in Bodennähe (nachts ca. 12 °C und tags über 25 °C). Auch im bodennahen Windprofil ist um 00:00 Uhr ein deutlicher vertikaler Gradient erkennbar. Die Windverhältnisse am 18.09. entsprechen für die Schallausbreitung von der BAB 8 in Richtung Messstelle meistens Gegenwind, also einer verstärkten Pegelabnahme mit der Entfernung.

Beispieltag 2: 01.10.2018, Abhängigkeit des Pegels von der Windrichtung

Im zweiten Beispiel wird der Einfluss der Windrichtung, zunächst ohne Berücksichtigung weiterer meteorologischer Parameter, auf den Immissions-schallpegel dargestellt. Hierzu wird ein sogenannter Hexbin-Plot genutzt, in dem sich im Gegensatz zu einem normalen Scatter-Plot auch die Häufigkeit/Dichte eines Ereignisses in zwei Dimensionen (hier Windrichtung und Schalldruckpegel) darstellen lässt. Dies entspricht einem zweidimensionalen Histogramm. Dabei wurde die Windrichtung mit 4° und der Schalldruckpegel mit 2 dB aufgelöst. Dies ist in Bild 6-6 dargestellt.

Zusätzlich wurde die mittlere Pegelstärke in 4°-Schritten berechnet, also alle 4° ein Mittelungspegel, und hier als rote Kurve dargestellt. Die weißen Linien bezeichnen den minimalen und maximalen Mittelungspegel. Für diesen Plot wurden die sekundlichen Daten vom 01.10.2018 verwendet, da an diesem Tag sämtliche Windrichtungen in ausreichender Häufigkeit vertreten waren. Wie auch in der Windstatistik weiter unten zu erkennen, herrschen im Allgemeinen nordöstliche und südwestliche Winde vor.

Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Mittelungspegel bzgl. der Windrichtung beträgt an diesem Tag rund 6 dB, wobei der minimale Pegel

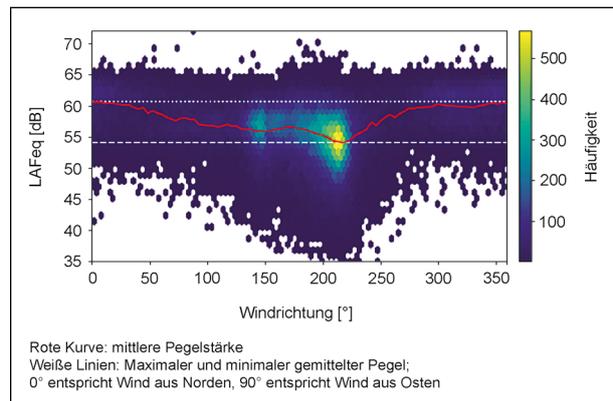


Bild 6-6: Hexbin-Plot (2-dimensionales Histogramm) der Pegelstärke in Abhängigkeit von der Windrichtung mit einer Auflösung von 4° und 2 dB

bei etwa 220° erreicht wird. Dies entspricht der direkten Gegenwindlage. Des Weiteren fällt eine deutliche Häufung der Messwerte für südwestliche Windrichtungen auf, welche im Messzeitraum typisch für das Messgebiet waren (vgl. Bild 6-9). Der deutliche Unterschied zwischen den in Bild 3-3 und Bild 6-9 dargestellten Windrichtungsstatistiken ergibt sich daraus, dass die Messstation Mammendorf in rund 10 km Entfernung zum Messgebiet Sulzemoos liegt. Unterschiede ergeben sich des Weiteren durch die unterschiedlichen Mittelungszeiten (nur tagsüber) und die mehrjährige Mittelungsdauer, die dem Bild 6-9 zugrunde liegt. Es ist zu beachten, dass die Daten noch nicht bezüglich des Verkehrsaufkommens bereinigt wurden. Da nachts, d. h. bei gleichzeitig minimalem Verkehrsaufkommen, eine Gegenwindlage vorherrschte, finden sich Lärmpegel bis etwa 40 dB praktisch nur in Gegenwindrichtung. Auch in diesem Beispiel ist die Datenlage zur Herstellung eines kausalen Zusammenhangs zwischen Lärmpegel und Windrichtung noch nicht ausreichend, eine grundsätzliche Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Windrichtung ist aber zu erkennen.

Langzeitmessung an Dauermesspunkt 1 (DMS_1)

In Bild 6-7 ist der Pegelzeitverlauf $L_{Aeq,10min}$ an der DMS_1-Schall über den Messzeitraum vom 17.09.2018 bis zum 18.11.2018 dargestellt. Man erkennt darin, dass Minimalpegel selten unter 50 dB fallen und der Maximalpegel bis zu 70 dB betragen kann. Häufig treten Pegelwerte zwischen 60 und 65 dB auf.

Die Wettermessstation wurde vom 29.09.2018 bis zum 14.12.2018 betrieben. Die Daten wurden als

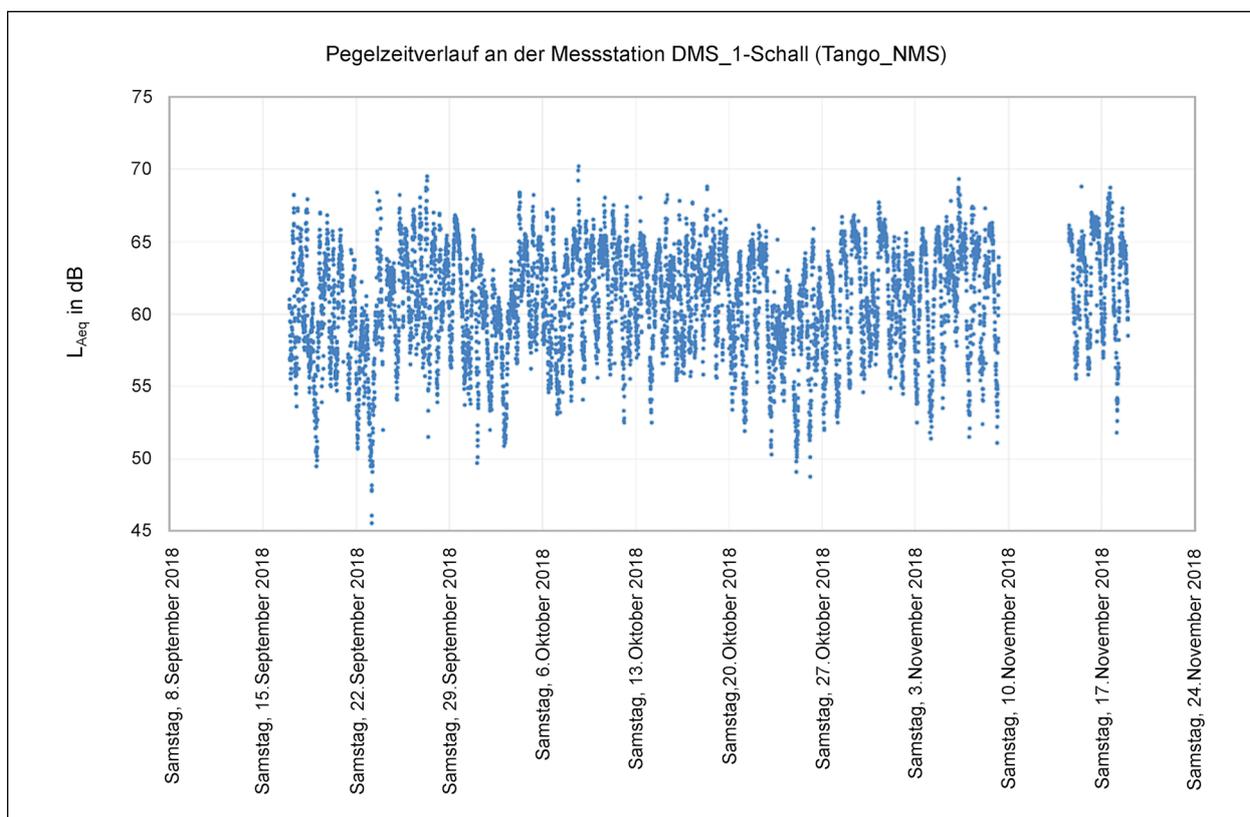


Bild 6-7: Pegelzeitverlauf L_{Aeq} mit 10 min-Mittelwerten an der DMS_1-Schall (Tango_NMS) für den Zeitraum 17.09.2018 bis zum 18.11.2018

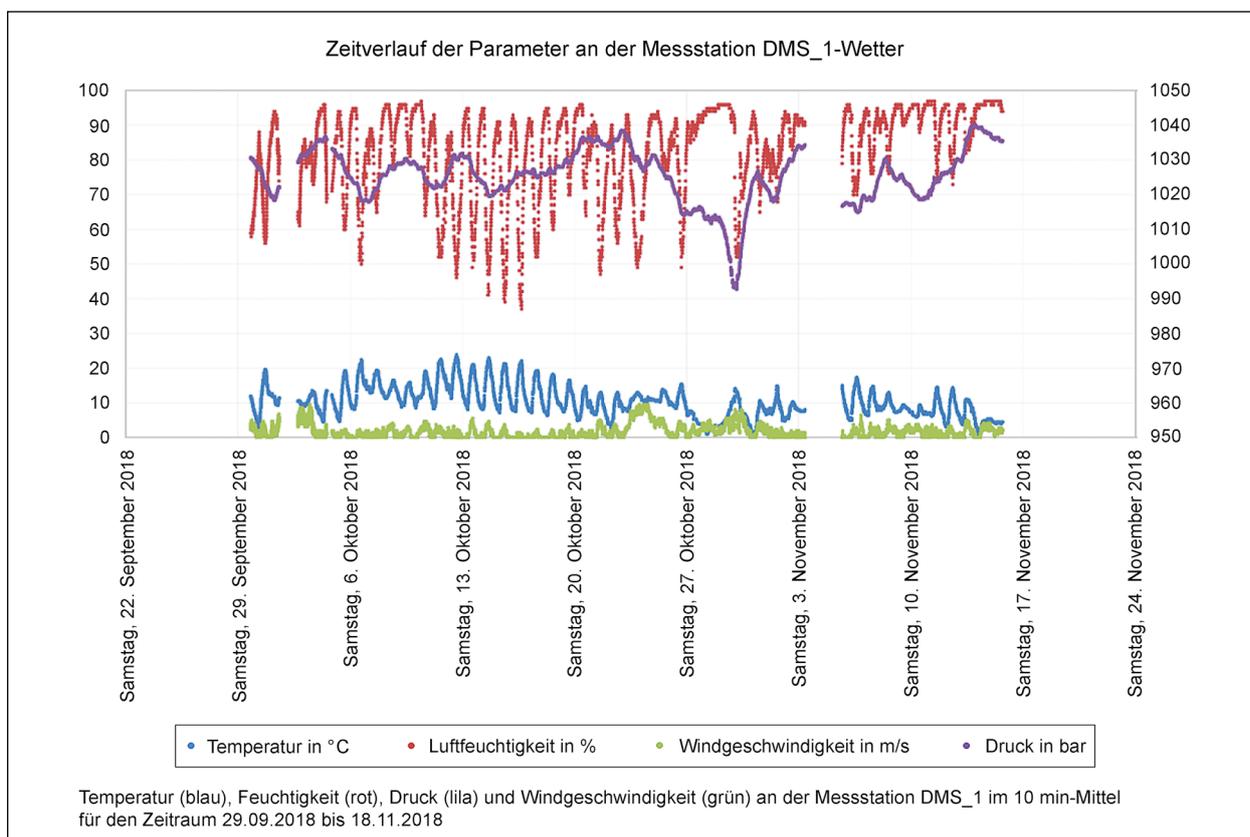


Bild 6-8: Zeitverläufe der gemessenen Parameter

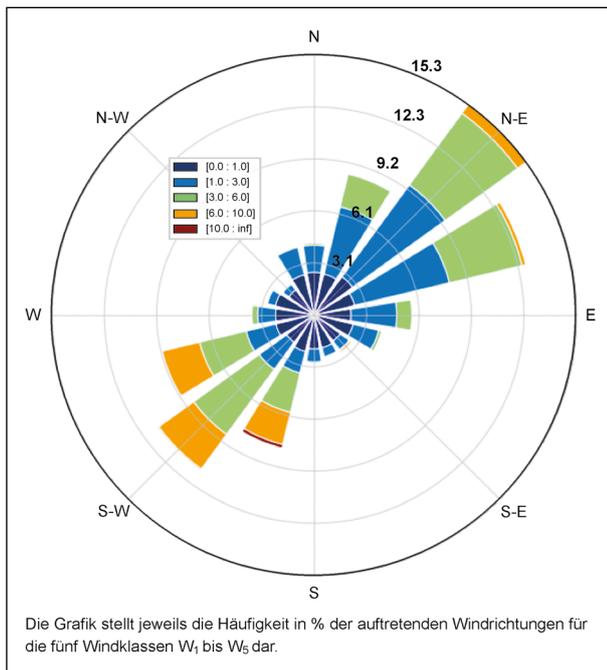


Bild 6-9: Windrichtungsstatistik an der Messstation DMS_1 für den Zeitraum 29.09.2018 bis 18.11.2018

10 min-Mittel abgespeichert und einmal wöchentlich ausgelesen. Die Daten wurden in Form von txt-Dateien ausgegeben. Die Zeitverläufe der aufgezeichneten Wetterparameter (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Druck) an der DMS_1-Wetterstation für den exemplarischen Zeitraum 29.09.2018 bis zum 18.11.2018 sind in Bild 6-8 dargestellt.

Zur Erstellung einer Windrichtungshäufigkeitsverteilung wurde die Windrichtung in 16 Sektoren unterteilt (N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW). In Bild 6-9 ist die aus den Daten der DMS_1-Wetterstation resultierende Windstatistik für den gesamten Messzeitraum dargestellt.

7 Auswertung des Einflusses meteorologischer Parameter

Mit den Messungen in Sulzemoos liegt ein umfangreicher Datensatz zu verkehrsbezogenen, akustischen und meteorologischen Daten im Untersuchungsgebiet vor. Dieser Datensatz wird im Weiteren zu einer Datenbank zusammengefasst (siehe Kapitel 9), soll aber zunächst vor allem dazu dienen, den Einfluss der Meteorologie auf die Schallausbreitung zu quantifizieren. Dazu werden akustische Daten unter Berücksichtigung der Emission

gezielt nach meteorologischen Parametern klassiert und verglichen.

7.1 Berechnung der Emission der Schallquelle

In der Beurteilung der Messdaten hinsichtlich des Einflusses verschiedener meteorologischer Parameter spielt die Abschätzung der entsprechenden Emissionswerte eine wichtige Rolle. Die gemessenen Immissionswerte hängen sowohl von den Emissionswerten als auch von der Schallausbreitung ab. Die Beurteilung der Abhängigkeit des Immissionspegels von den meteorologischen Bedingungen ist daher nur möglich, wenn die Messdaten von Emissionspegeln bereinigt sind. Diese Emissionsberechnung wurde basierend auf den RLS-90 durchgeführt.

Dabei stellt sich jedoch die Frage, in welcher zeitlichen Auflösung sowohl die Emission als auch die Meteorologie betrachtet werden soll. Von der Autobahndirektion Südbayern liegen Verkehrsdaten im Minutentakt vor. Diese beinhalten – für alle Fahrstreifen – die Gesamtanzahl der Fahrzeuge, den Lkw-Anteil sowie die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeugklassen, was eine, gegenüber stündlichen Daten, genauere Berechnung der Schallemission ermöglicht. Die RLS-90 sind allerdings nur für Geschwindigkeiten bis 130 km/h definiert. Darüber hinaus sind die unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen der Verkehrs- und Schallpegelmessungen, sowie kurzfristige Schwankungen der Daten, die nicht zwangsläufig in beiden Datensätzen abgebildet werden, zu beachten. Aus diesem Grund werden im Folgenden verschiedene Berechnungsalternativen vorgestellt und miteinander verglichen:

- RLS-90 mit 1-Minuten Auflösung, wobei drei Fahrstreifen auf je einen Fahrstreifen pro Fahrtrichtung aufsummiert werden. Als Geschwindigkeit wird je Fahrzeugklasse die zulässige Höchstgeschwindigkeit genutzt, d. h. maximal 130 km/h für Pkw bzw. 80 km/h für Lkw. Anschließend werden die für die beiden Fahrspuren berechneten Pegel zu einem Gesamtpegel addiert. Diese Variante wird im Folgenden mit „RLS-90“ bezeichnet.
- RLS-90 mit maximaler räumlicher und zeitlicher Auflösung, d. h. 1-Minuten-Daten für jeden einzelnen Fahrstreifen, sowie die gemessenen Geschwindigkeiten, auch wenn diese 130 km/h überschreiten. Anschließend werden die für die

sechs individuellen Fahrspuren berechneten Pegel zu einem Gesamtpegel addiert. Diese Variante wird im Folgenden zusätzlich mit dem Suffix „o“ von der Basisvariante oben unterschieden.

- Für beide Varianten wurde zusätzlich noch mittels 5-Minuten-Mittelung (Suffix „5m“) bzw. einem gleitenden Mittel (moving average, Suffix „ma“) geglättet, sodass sich insgesamt vier Berechnungsvarianten ergeben.

Im Anschluss wurden für die oben genannten Alternativen die Korrelationen zwischen berechneten Emissionswerten und gemessenen Immissionswerten (Dauermessung in ca. 250 m Entfernung zur Autobahn) berechnet und verglichen, ob es zwischen den Methoden signifikante Unterschiede gibt und falls ja, welche Methode für die weiteren Analysen am besten geeignet ist. Dazu wurde mithilfe von zwei statistischen Tests (Kolmogorov-Smirnov und Mann-Whitney-U) überprüft, ob die Dichteverteilungen der Korrelationskoeffizienten je zweier verschiedener Berechnungsmethoden signifikant voneinander abweichen. Die entsprechende Nullhypothese H_0 kann damit wie folgt definiert werden:

- H_0 : Die Dichteverteilungen der Korrelationskoeffizienten zwischen gemessenen Immissions- und mittels zwei verschiedener Berechnungsmethoden ermittelten Emissionswerten weichen nicht signifikant voneinander ab.

Das Ziel statistischer Tests ist die Ablehnung der Nullhypothese und damit die Annahme der Alternativhypothese H_1 . In diesem Fall würde die Alternativhypothese aussagen, dass die aus den Korrelationsberechnungen resultierenden Dichteverteilungen signifikant voneinander abweichen. Es ist allerdings zu beachten, dass eine Ablehnung der Alternativhypothese H_1 nicht bedeutet, dass die Nullhypothese bewiesen ist. Dazu wird zunächst der sogenannte p-Wert berechnet. Dieser gibt an, wie wahrscheinlich das erhaltene oder ein extremeres Ergebnis unter der Annahme der Nullhypothese ist. Je kleiner der p-Wert, umso signifikanter ist das Ergebnis. Die Nullhypothese wird abgelehnt, wenn der p-Wert kleiner als das vorher festgelegte Signifikanzniveau α (häufig 0,05) ist. Dabei bezeichnet α die maximale Irrtumswahrscheinlichkeit (auch als Fehler 1. Art bezeichnet), also die Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese abzulehnen, obwohl sie richtig ist.

Die Verkehrsdaten zeigen im Tagesverlauf einen typischen Tagesgang mit zwei Maxima (dem Berufsverkehr) an den Wochentagen Montag-Freitag und einen etwas anderen Verlauf am Wochenende, samstags und sonntags mit verändertem Lkw-Anteil. Dazu ist in Bild 7-1 der Gesamtmissionspegel sowie die Emissionspegel für die Klassen Pkw und Lkw jeweils als Monatsmittel pro Wochentag berechnet. Daraus lässt sich folgendes schlussfolgern:

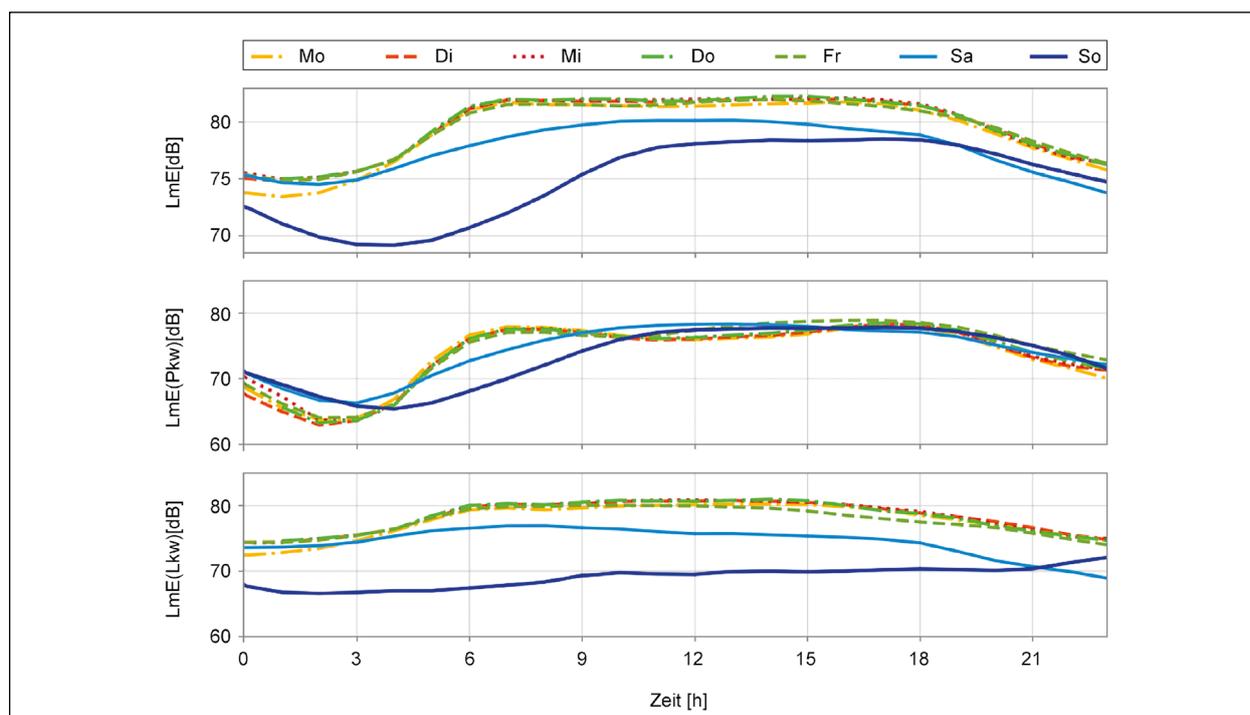


Bild 7-1: Wochentagweise gemittelte Verkehrsemissionsberechnungen (Oben: Gesamtmission (Pkw und Lkw); Mitte: Geräuschemission durch Pkw; Unten: Geräuschemission durch Lkw)

- Emissionspegel Pkw (25 m Abstand)
Hier ist an Wochentagen deutlich der Einfluss des Berufsverkehrs erkennbar. Der Emissionspegel ist nachts wesentlich geringer (rund 7 dB), morgens und am späten Nachmittag sind deutlich höhere Geräuschpegel zu beobachten als in der Mittagszeit. Samstags werden die höchsten Pegel zwischen Vormittag und Mittag erreicht, während am Sonntag die Maximalwerte zum Nachmittag hin verschoben sind.
- Emissionspegel Lkw (25 m Abstand)
Der Lkw-Pegel nimmt im Vergleich zu den Pkw nachts weniger stark ab (rund 5 dB geringer als tagsüber), insgesamt sind die Schwankungen im Tagesverlauf geringer. Am Wochenende (insbesondere sonntags) liegen die Werte dann erwartungsgemäß deutlich unter den Wochentagwerten (teilweise > 10 dB)
- Gesamtemissionspegel (25 m Abstand)
Wird insbesondere unter der Woche deutlich durch Lkw dominiert.

Dadurch stellt sich die Frage, wie stark die Tagesgänge der Immissionsmessungen schwanken und ob eine tagesgenaue Analyse signifikante Vorteile beispielsweise gegenüber einer unspezifischen oder wochentags-genauen Analyse hat. Dazu wurden die folgenden Tests durchgeführt:

- Korrelation aller gemessenen Tagesgänge untereinander, aber nicht mit sich selbst. Die resultierende – im Wesentlichen normalverteilte – Verteilung kann als Kontroll-Verteilung (zufällige Verteilung) angesehen werden;
- Wochentagsspezifische Korrelation der gemessenen Immissionstagesgänge mit den berechneten Emissions-Tagesgängen, d. h. Korrelation der Immissionswerte aller Montage mit den Emissionsrechnungen aller Montage usw.;
- Tagesspezifische Korrelation (Suffix „ds“) der gemessenen Immissionstagesgänge mit den zugehörigen berechneten Emissions-Tagesgängen.

Es zeigt sich, dass die dritte Variante, also die tagesspezifische Betrachtung, den anderen beiden signifikant überlegen ist. Die entsprechenden p-Werte sind in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 dargestellt. Im direkten Vergleich der entsprechenden Verteilungen (analog zu Bild 7-2) würde man sehen, dass jeweils die Verteilung bei spezifischerer Betrachtung gegenüber der unspezifischeren nach

Test	p-Wert	H ₀
Kolmogorov-Smirnov	1,40e-81	abgelehnt
Mann-Whitney-U	1,09e-128	abgelehnt

Die beiden Verteilungen sind signifikant verschieden, die Null-Hypothese muss abgelehnt werden.

Tab. 7-1: Vergleich von zufälliger Verteilung (Korrelation der Emissionen aller Tage untereinander, aber nicht mit sich selbst) und der Verteilung der Korrelationskoeffizienten bei wochentags-spezifischer Korrelation von Emissions- und Immissionswerten

Test	p-Wert	H ₀
Kolmogorov-Smirnov	4,67e-3	abgelehnt
Mann-Whitney-U	5,00e-4	abgelehnt

Auch hier sind die beiden Verteilungen signifikant verschieden, die Null-Hypothese muss auch hier abgelehnt werden.

Tab. 7-2: Vergleich der Verteilung der Korrelationskoeffizienten bei wochentags-spezifischer Korrelation von Emissions- und Immissionswerten mit der Verteilung die man bei einer tages-spezifischen Korrelation erhält

rechts verschoben ist und damit besser korreliert. Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 zeigen, dass diese Unterschiede auch signifikant sind.

Die beiden Verteilungen sind signifikant verschieden, die Null-Hypothese muss abgelehnt werden (Tabelle 7-1).

Auch hier (Tabelle 7-2) sind die beiden Verteilungen signifikant verschieden, die Null-Hypothese muss auch hier abgelehnt werden.

Die Verteilung der Korrelationskoeffizienten für die verschiedenen Varianten der tagesspezifischen Betrachtung/Korrelation ist nachfolgend dargestellt (vgl. Bild 7-2). Im linken Bild wurden die berechneten Emissionswerte – RLS-90 (Blau) und RLS-90_o (Orange), jeweils mit gleitendem Mittel (Suffix „ma“) geglättet – mit den gemessenen Immissionswerten korreliert. In beiden Tests war RLS-90_o signifikant besser als RLS-90 wie auch an der Rechtsverschiebung der Verteilung zu sehen ist. Im rechten Bild wurde die Korrelation der Immissionswerte mit den insgesamt drei Varianten der RLS-90_o abgebildet. Es zeigt sich, dass die geglätteten Daten signifikant besser korrelieren als die ungeglätteten (Blau) wohingegen die mittels gleitendem Mittelwert (Grün) geglätteten Daten nur minimal besser abschneiden als die 5-Minuten-Mittel (Orange). Im Folgenden wurde daher die Variante RLS-90_{o,ma} zur Emissionsberechnung genutzt.

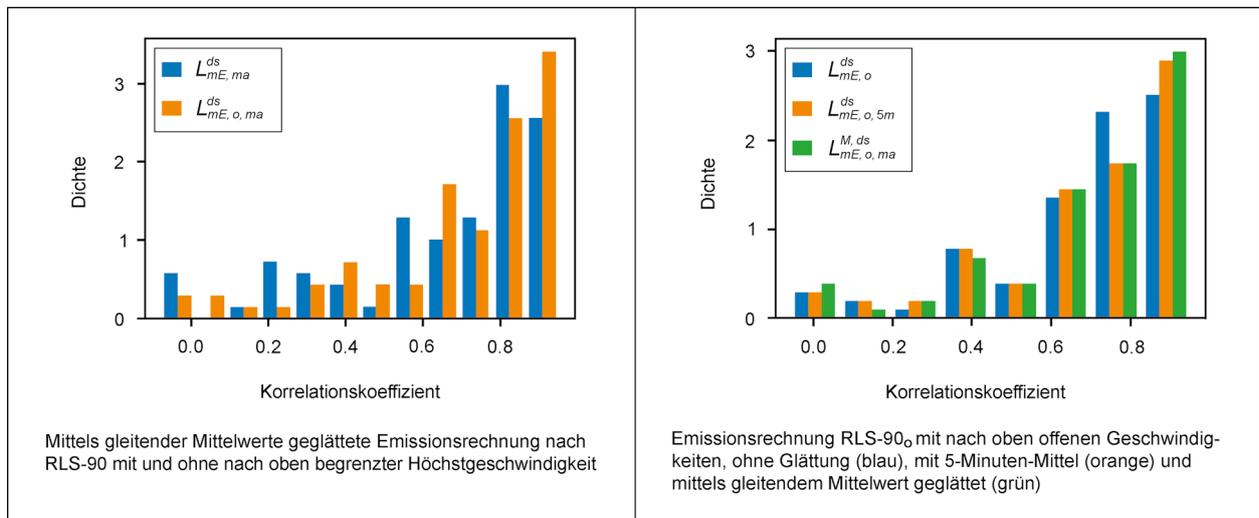


Bild 7-2: Verteilung der Korrelationskoeffizienten für Kombinationen aus tagesspezifischen Messwerten und verschiedenen Emissions-Berechnungsmethoden

7.2 Filterung der Messdaten nach meteorologischen Parametern – Grundlagen

Nach Berechnung der Emissionswerte können nun die um die Emission bereinigten Differenzschallpegel zwischen der berechneten Emission (in 25 m Abstand) und den verschiedenen Messstationen berechnet werden, welche zur Analyse des Wettereinflusses nötig sind. Dabei werden im Rahmen dieses Projektes die Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie die Temperatur bis zu einer Höhe von 200 m über Grund betrachtet. Messungen, die bei Temperaturen unter 0 °C bzw. bei Regen aufgezeichnet wurden, gehen in die Betrachtung nicht ein, da es unter diesen Bedingungen zu einer deutlich veränderten Emission und Schallausbreitung kommt. Für eine detaillierte Analyse der beiden letztgenannten Parameter alleine liegen nicht genügend Daten vor.

Des Weiteren ist zu beachten, dass der Fokus der Intensivmessungen auf Mitwindwetterlagen lag, da diese zu grundsätzlich höheren Immissionspegeln führen als dies bei den übrigen Windrichtungen der Fall ist. Daher konnten an den Intensivmessstationen Quer- und Gegenwindwetterlagen meist nicht ausgewertet werden. An den Dauermessstationen war dies nicht der Fall, sodass ausreichend Daten für alle Windrichtungen vorliegen. Dies spiegelt sich auch in einigen der in diesem Kapitel folgenden Tabellen wieder. Ein Querstrich in einem Tabellenelement bzw. ein leeres Tabellenelement bedeutet dabei, dass für diesen Fall keine oder nicht ausreichend Daten vorliegen.

Im Folgenden wurden die im Messzeitraum gewonnenen Daten unter Berücksichtigung verschiedener meteorologischer Parameter ausgewertet. Die Hauptziele dieser Auswertung waren:

- Bereitstellen einer exemplarischen Lärmdatenbank (bzgl. Messdaten);
- Auswertung der Schallpegelabnahme mit zunehmender Distanz zur Quelle für ausgewählte meteorologische Situationen und Windrichtungen, insbesondere im Vergleich mit den Ergebnissen verschiedener Rechenverfahren;
- Herleiten des Zusammenhangs zwischen Windrichtung und Schallpegel für verschiedene statistische Auswertung der Wettersituationen im Messzeitraum.

Diese Auswertung wurde mithilfe einer sogenannten Filterung durchgeführt. Dazu werden zunächst einige Begriffe genauer definiert:

Parameter

Als Parameter wird jedes Merkmal bezeichnet, das geeignet ist, ein spezifisches System zu charakterisieren bzw. zu definieren. Parameter sind beliebig, aber fest, und unterscheiden sich dadurch von Konstanten, da sie nur für einen gerade betrachteten Fall konstant sind, für den nächsten Fall aber variieren können. Parameter können direkt oder indirekt abhängig voneinander sein.

- z. B. Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Stabilität

Klasse

Die Menge aller Werte, die für einen spezifischen Parameter im Messzeitraum gemessen wurden, wird als Wertemenge bezeichnet. Als Klasse wird eine sinnvolle Teilmenge der Wertemenge eines Parameters bezeichnet. Die Schnittmenge aller Klassen muss leer sein, während die Vereinigung aller Klassen die Wertemenge ergeben muss.

- z. B. Windgeschwindigkeitsklassen W_i , Stabilitätsklassen S_j

Klassifizierung

Als Klassifizierung wird die Einteilung der Wertemenge eines Parameters in Klassen bezeichnet; dies entspricht dem Festlegen der Klassengrenzen.

Situation

Eine Situation ist eine spezifische Kombination von Klassen der unterschiedlichen Parameter, die zusammen das System beschreiben. Sei nun n_i die Anzahl der Klassen des Parameters P_i und sei m die Anzahl der Parameter, die ein System beschreiben, dann ergeben sich insgesamt $s = n_1 \cdot n_2 \cdots n_m$ verschiedene Situationen.

- z. B. die Kombination S_3W_2 + Windrichtung

Filterung (Klassierung)

Das Einordnen der gewonnenen Daten in die verschiedenen Situationen wird als Filterung oder auch Klassierung bezeichnet.

Um eine sinnvolle Filterung der gewonnenen Daten zu ermöglichen, wurde die Auswahl und Klassifikation der meteorologischen Parameter so getroffen, dass einerseits eine möglichst große Bandbreite an lärmrelevanten Situationen repräsentiert wird, während gleichzeitig die einzelnen Klassen noch so stark besetzt sind, dass eine anschließende Auswertung möglich ist. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit den verschiedenen Berechnungsmethoden zu gewährleisten, muss dieser Vorgang für die unterschiedlichen Berechnungsmethoden entsprechend angepasst werden.

Für Nord2000 und Harmonoise wurden, angelehnt an das Vorgehen in den beiden Berechnungsmethoden, die beiden Parameter Windgeschwindigkeit und Stabilität (Schichtung) gewählt, wobei die Stabilität in fünf Klassen und die Windgeschwindigkeit

in sechs Klassen unterteilt wurde. Die zusätzliche Windgeschwindigkeitsklasse im Vergleich zur Berechnungsmethode ergibt sich durch Aufsplitten der niedrigsten Klasse W_1 (0 – 1 m/s) in eine neue Klasse W_0 (Windstille, 0 – 0,2 m/s) und die dann reduzierte Klasse W_1 (0,2 – 1 m/s). Die zusätzliche Klasse W_0 wurde eingeführt, da zwar die Unterschiede im Pegel zwischen W_0 und W_1 klein sind, in W_1 – im Gegensatz zu W_0 – aber ein signifikanter Einfluss der Windrichtung messbar ist. Die zusätzliche Klasse W_0 erlaubt daher die Beurteilung des schallausbreitungsneutralen Falles (Windstille und isotherme Schichtung, d. h. keine Brechung des Schalls). Die Windklasse W_5 , wie sie in Harmonoise definiert ist, wurde hier nicht berücksichtigt, da für diese hohen Windgeschwindigkeiten im betrachteten Messzeitraum (14.09.-05.11.) praktisch keine Daten existieren. Die Stabilitätsklassen wurden – abweichend von den beiden Berechnungsmethoden – nicht mithilfe des Bedeckungsgrades, sondern über das Temperaturprofil bis 200 m Höhe hergeleitet, da dies eine präzisere Beurteilung der thermischen Schichtung und damit der Schallbrechung erlaubt. Zudem lässt diese Methode auch neutrale sowie stabile Fälle tagsüber und labile Fälle nachts zu, was in der Realität auftritt, bei der Beurteilung mittels Bedeckungsgrad aber ausgeschlossen ist. In dieser Auswertung werden praktisch alle Daten berücksichtigt, sodass für alle möglichen Situationen der Immissionsschallpegel für alle Windrichtungsklassen angegeben werden kann. Ein Überblick über die verschiedenen Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen sowie die zugehörigen Klassengrenzen ist in Tabelle 7-3 beziehungsweise Tabelle 7-4 gegeben.

In Tabelle 7-5 ist für diese Klassifizierung nach Windgeschwindigkeit, Stabilitätsklasse und Windrichtung in 22,5°-Sektoren, beispielhaft die Filterung der Messdaten der Intensivmessstation IMS_5 dargestellt. Für eine Auswahl an Situationen (d. h. Kombination von W_i , S_i und Windrichtung) sind die jeweilige Häufigkeit (Anzahl n) sowie der Differenzschallpegel inklusive Standardabweichung (σ) angegeben. Für die Differenzschallpegel wurden die Differenzen zwischen gerechneter Emission ($RLS-90_{o,mAvg}$) und gemessenem Immissionsschalldruckpegel ($LAF_{eq, 1Hz-Samplingrate}$) innerhalb der einzelnen Windrichtungssektoren und Situationen gemittelt. Die Häufigkeit einer Situation zusammen mit der Standardabweichung des Pegels erlaubt Rückschlüsse auf die Signifikanz/Güte eines Mittelungspegels. Dabei spricht eine große Häufig-

Windklasse	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4
Grenzwerte	0,0 – 0,2 m/s	0,2 – 1,0 m/s	1,0 – 3,0 m/s	3,0 – 6,0 m/s	> 6,0 m/s

Tab. 7-3: Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in Windgeschwindigkeitsklassen

Stabilitätsklasse	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Bezeichnung	sehr labil	labil	neutral	leicht stabil	stabil
Grenzwerte dT/dz (in K/100 m)	< -0,8	-0,8 bis -0,2	-0,2 bis 0,2	0,2 bis 1,2	> 1,2

Tab. 7-4: Klassifizierung der Atmosphärischen Stabilität in Stabilitätsklassen

Anzahl/ Pegel	W_i	S_i	0°	22,5°	45°	67,5°	90°	112,5°	135°	157,5°	180°	202,5°	225°	247,5°	270°	292,5°	315°	337,5°
n	0	5	2	1	5	2	34	44	18	32	38	34	57	82	18	13	10	2
$L\Delta/\sigma$	0	5	20,84/ 0,11	23,02/ 0,0	22,6/ 0,34	22,6/ 0,28	22,99/ 0,6	23,12/ 0,97	22,88/ 1,74	22,24/ 1,49	21,72/ 1,83	21,02/ 1,92	20,87/ 2,36	19,36/ 1,79	19,59/ 1,53	22,34/ 1,42	22,85/ 1,6	23,38/ 0,61
n	2	2	4	1	12	31	327	565	1.070	1.753	1.527	369	60	8	5	2	5	6
$L\Delta/\sigma$	2	2	24,67/ 0,33	24,63/ 0,0	24,9/ 2,35	23,1/ 1,12	25,67/ 2,79	27,27/ 3,46	27,74/ 3,32	27,16/ 3,31	25,62/ 2,29	25,45/ 1,85	25,71/ 1,04	24,72/ 0,26	24,96/ 0,27	24,97/ 0,3	24,45/ 0,32	24,57/ 0,3
N	3	2	0	0	461	2.400	0	0	0	0	0	0	0	994	0	0	0	0
$L\Delta/\sigma$	3	2			16,72/ 0,91	16,68/ 1,26								25,44/ 3,38				
N	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	360	7534	0	0	0	0
$L\Delta/\sigma$	4	1										27,74/ 0,7	25,47/ 1,32	25,17/ 1,81				

Dargestellt sind für ausgewählte Fälle der Differenzschallpegel in dB (SPL) sowie die Standardabweichung σ . Dabei bezeichnet Anzahl (n) die Häufigkeit einer Situation. Eine Situation setzt sich zusammen aus der entsprechenden Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklasse (W_i und S_i) sowie der Windrichtung in 22,5°-Sektoren. Für die Differenzpegel wurden die Differenzen zwischen gerechneter Emission (RLS-90_{o,mAvg}) und gemessenem Immissionsschalldruckpegel (LAF_{eq}, 1Hz-Samplingrate) innerhalb der einzelnen Windrichtungssektoren und Situationen gemittelt.

keit in Kombination mit einer niedrigen Standardabweichung für eine hohe Güte des Ergebnisses und, andersherum, eine niedrige Häufigkeit in Kombination mit einer hohen Standardabweichung für ein eher zufälliges Ergebnis. Auf der anderen Seite können aber auch Situationen mit einer geringen Häufigkeit im Ergebnis berücksichtigt werden, wenn die Standardabweichung gering ist und der Mittelungspegel im Vergleich mit den Pegeln direkt benachbarter Windrichtungssektoren plausibel erscheint. Die Filterungen, wie in Tabelle 7-5 auszugsweise dargestellt, finden sich für alle Messstationen in der Datenbank.

Für die übrigen Berechnungsmethoden, welche maximal schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen zulassen, wurden in Anlehnung an zwei Kriterien für schallausbreitungsgünstige Bedingungen hergeleitet (AG₁ und AG₂). Diese Kriterien, welche in Tabelle 7-7 aufgeführt sind, wurden so gewählt, dass sie eine möglichst große Überein-

stimmung mit den Definitionen in Tabelle 7-6 erreichen und damit repräsentativ für die Berechnungsmethoden sind. Zusätzlich wurde für Vergleichszwecke ein Kriterium für schallausbreitungsgünstige Bedingungen (AU) definiert. Für die Kriterien AG₁ und AG₂ müssen jeweils alle Bedingungen erfüllt sein, d. h. es gibt je Parameter nur eine Klasse und es werden nur solche Daten genutzt, für die alle Parameter innerhalb der festgelegten Klassengrenzen variieren. Analog zur RLS-90 können die Kriterien AG₁ und AG₂ zu einem Kriterium (AG) kombiniert werden. Dieses ist erfüllt, falls entweder die Bedingungen von AG₁ oder AG₂ oder die Bedingungen von AG₁ und AG₂ erfüllt sind.

Bei geringen Windgeschwindigkeiten in Verbindung mit einer sehr stabilen Schichtung (Inversion, repräsentiert durch Stabilitätsklasse S₅) kommt es trotz Gegenwind zur Abwärtsbrechung des Schalls und damit (schwach) ausbreitungsgünstigen Bedingungen. Dies wird in Kriterium AG₂ berücksichtigt, wo-

Norm	DIN ISO 9613-2/ VDI2714	RLS-90	CRTN	NMPB/ CNOSSOS
Windgeschwindigkeit	1 m/s – 5 m/s	~ 3 m/s	$\varnothing < 2$ m/s am Empfänger: u, v, w < 10 m/s	--
Windrichtung	Mitwind $\pm 45^\circ$	Mitwind	Mitwind $\pm 45^\circ$	--
und/oder				
Schichtung	--	Inversion	--	--
$\partial c/\partial z$	--	--	--	> 0,07 /s

Tab. 7-6: Übersicht über die Definitionen einer schallausbreitungsgünstigen meteorologischen Situation in den verschiedenen Normen

Kriterium	AG ₁	AG ₂	AU
Windgeschwindigkeit	1 bis 5 m/s	≤ 3 m/s	1 bis 5 m/s
Windrichtung	Mitwind $\pm 45^\circ$	--	Gegenwind $\pm 45^\circ$
Schichtung	--	S ₅	$\leq S_4$
Es müssen alle Bedingungen eines Kriteriums erfüllt sein.			

Tab. 7-7: Kriterien für schallausbreitungsgünstige/-ungünstige Bedingungen

Kriterium	ALL	AG	AG ₁	AG ₂	AU
Häufigkeit	7.320.047	2.489.241	1.999.972	1.148.204	1.838.050
Mittlerer Differenzschallpegel	13,20	11,10	10,65	11,68	15,43

Tab. 7-8: Häufigkeiten und mittlerer Differenzschallpegel zwischen Emission und Immission für verschiedene meteorologische Bedingungen am Beispiel der Station DMS1

bei die Windgeschwindigkeit 3 m/s nicht überschreiten sollte. Bei höheren Windgeschwindigkeiten und Gegenwind kommt es trotz Inversion/stabiler Schichtung zur Aufwärtsbrechung des Schalls und damit zu ausbreitungsungünstigen Bedingungen. Bei der Berechnung/Bestimmung der Stabilitätsklasse ist auch die Höhe der Inversionsschicht zu beachten, da die relevante Höhe der Inversionsschicht auch von der Entfernung zwischen Quelle und Empfänger abhängt. Insgesamt ist zu erwarten, dass das windrichtungsabhängige Kriterium AG₁ deutlich schärfer ist als AG₂.

7.3 Schallpegelabnahme mit zunehmender Distanz zur Quelle für ausgewählte meteorologische Situationen

7.3.1 Filterung der Messdaten bezüglich schallausbreitungsgünstiger Bedingungen anhand der Kriterien AG₁, AG₂ und AG

Im Folgenden wird auf die Schallpegelabnahme unter schallausbreitungsgünstigen Bedingungen eingegangen. Dabei werden auch die Unterschiede

zwischen den drei oben vorgestellten Kriterien herausgearbeitet. Dazu sind in Bild 7-4, in Form von Dichtefunktionen, exemplarisch für die beiden Dauermessstationen DMS1 und DMS2 (rund 200 m Entfernung zur Quelle) sowie für drei Intensivmessstationen (25 m, rund 400 m und rund 700 m Entfernung zur Quelle), die Verteilungen der Differenzschallpegel ($L_{\text{diff}} = \text{gerechnete Emission} - \text{gemessene Immission}$) berechnet entsprechend der Kriterien AG, AG₁, AG₂ und AU, angegeben. Es ist zu beachten, dass die Dichtefunktion nicht absolute Häufigkeiten, sondern die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Differenzschallpegels (L_{diff}) innerhalb der zugrunde liegenden Grundgesamtheit wiedergibt. Die zugehörigen absoluten Häufigkeiten sind exemplarisch für die Dauermessstation DMS1 in Tabelle 7-8 angegeben.

Die Dichtefunktion, in die alle Zeitpunkte, unabhängig von den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen, eingehen, ist mit „all“ bezeichnet. Die hellblaue vertikale Linie bezeichnet die theoretische abstandsabhängige Schallpegelabnahme zwischen Quelle und Empfänger.

Im Fall der Dauermessstation DMS1 nehmen die Dichtefunktionen der drei schallausbreitungsgünsti-

gen Fälle ihr Maximum bei rund 9 dB an. Dies entspricht der theoretischen abstandsbedingten Schallpegelabnahme für Linien-schallquellen, welche wie folgt berechnet werden kann:

$$\Delta L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (18)$$

wobei r_1 und r_2 jeweils den orthogonalen Abstand zweier Immissionsorte I_1 und I_2 zu einer Linien-schallquelle bezeichnen (vgl. Bild 7-3).

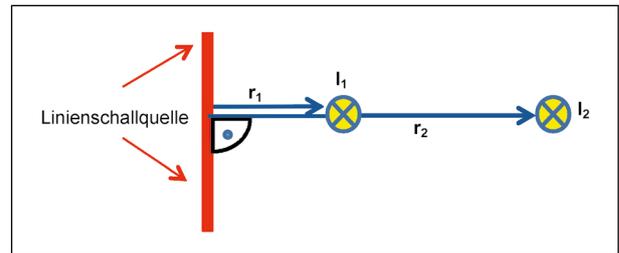


Bild 7-3: Theoretische abstandsbedingte Schallpegelabnahme für Linien-schallquellen

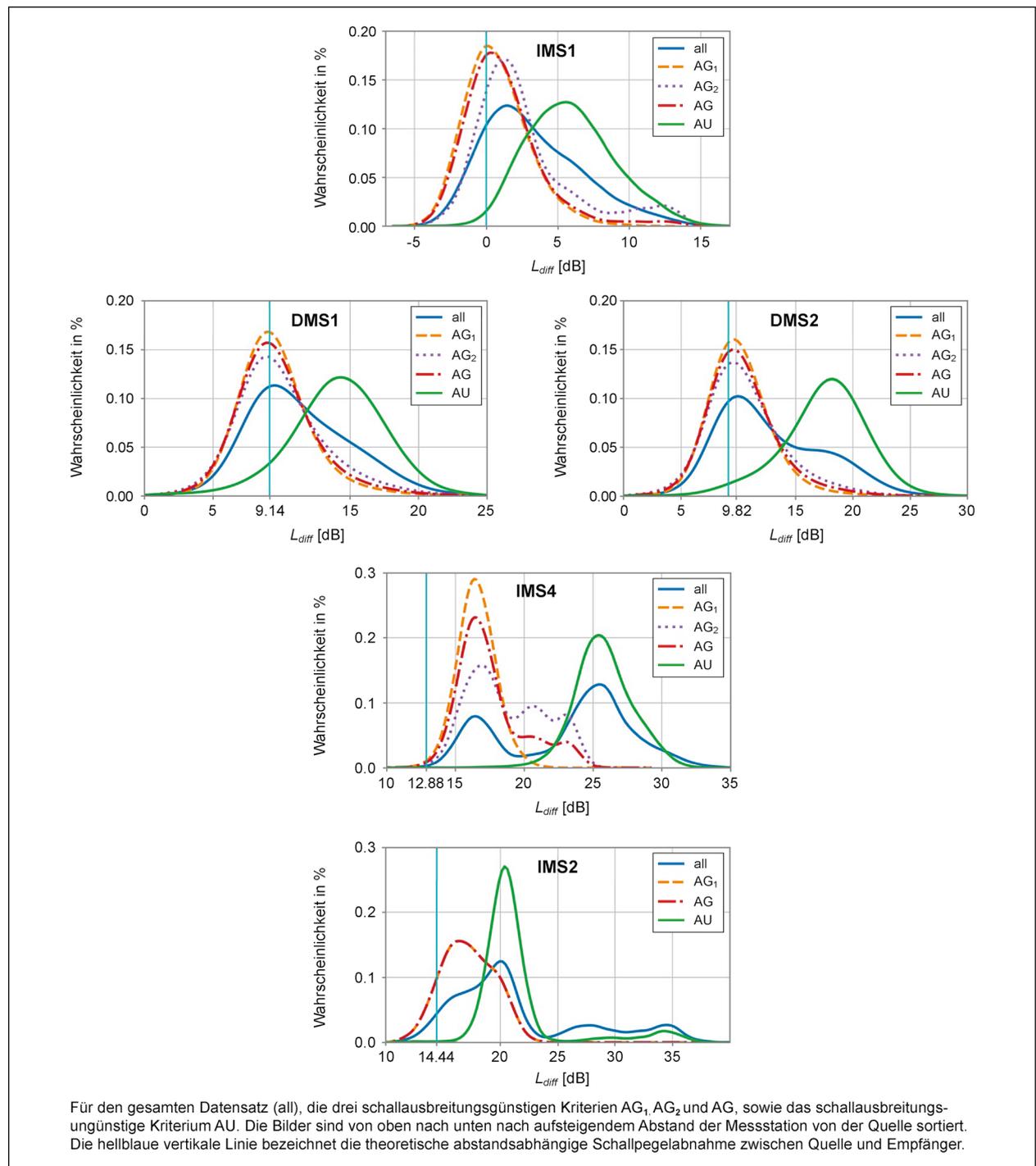


Bild 7-4: Vergleich der Dichtefunktionen der Differenzschallpegel zwischen Quelle und den verschiedenen Immissionspunkten

Im Falle der DMS1 mit einer Entfernung von $r_2 = 246$ m zur Quelle und $r_1 = 25$ m (Entfernung zwischen berechneter Emission nach RLS-90_{o,avg} und Quelle) erhält man damit eine theoretische Abnahme des Pegels von $\Delta L_p = 9,14$ dB. Allgemein ergibt sich aus Formel (18) die Faustregel einer Abnahme von 3 dB pro Abstandsverdopplung. Bei dreifacher Abstandsverdopplung ($d = 25 \text{ m} \times 2^3 = 200 \text{ m}$) ergäbe sich mithilfe der Faustformel eine Abnahme von 9 dB.

Für die zweiten Dauermessstation DMS2 ergibt sich, entsprechend zur etwas weiteren Entfernung von der Quelle, eine theoretische Schallpegelabnahme von 9,82 dB. Tatsächlich liegt der Peak der ausbreitungsgünstigen Dichtefunktionen leicht rechts von der Referenzlinie, was durch die leicht abgeschattete Lage hinter einer Scheune zu erklären ist. Die bei IMS4 (DLR) gemessenen Pegel liegen deutlich unter dem zu erwartenden Referenzpegel, d. h. der Peak bei ausbreitungsgünstigen Bedingungen liegt rechts von der Referenzlinie, die theoretische Abnahme des Pegels liegt hier bei 12,88 dB

Für die Station mit der größten Entfernung zur Schallquelle, die Intensivmessstation IMS2, ergibt sich eine theoretische Pegelabnahme von 14,44 dB.

Die tatsächlich gemessenen Pegel liegen in der Regel deutlich darunter, wie auch am Peak der Dichtefunktionen leicht zu erkennen ist. Für schallausbreitungsgünstige Bedingungen liegen diese um über 5 dB rechts von der Referenzlinie.

Die Emissionsmessung wurde mit der Station IMS1 in einem Abstand von 25 m zur Quelle durchgeführt ($r_2 = r_1$, $\Delta L_p = 0$), dementsprechend liegt die Referenzlinie hier bei 0 dB. Bei allen fünf Messstationen beträgt die Differenz zwischen ausbreitungsgünstigen und -ungünstigen Bedingungen zwischen 5 und 10 dB.

Wie zu erwarten, erweist sich das Kriterium AG₂ als teilweise deutlich unschärfer als Kriterium AG₁. Dies trifft insbesondere auf die Station IMS 4 zu. Es ist dabei zu beachten, dass die Messzeiträume aller betrachteten Messstationen mehr oder weniger stark voneinander abweichen, sodass dies auf viele Gegenwindfälle bei gleichzeitig hoher Stabilität (S_4/S_5) am Messtag zurückzuführen ist. Für alle vier betrachteten Stationen fällt auf, dass der Peak in der Dichtefunktion für das Kriterium AG₁ über dem von AG₂ liegt, gleichzeitig weist die Funktion im letzteren Fall eine deutlichere Rechtschiefe auf. Dies ist auf Gegenwindfälle mit, im Verhältnis zum gewählten Wertebereich, hohen Windgeschwindigkeiten zurückzuführen.

In Tabelle 7-9 sind für alle Messpunkte die Differenzschallpegel in dB zum berechneten Emissionsschallpegel für die drei ausbreitungsgünstigen Kriterien aufgeführt. Hier fällt zunächst auf, dass das Kriterium AG₂ nur an drei Messstationen, zwei davon die beiden Dauermessstationen, ausgewertet werden konnte. Dies liegt, wie eingangs bereits erwähnt, an der Auswahl der Intensivmesstage. Da die Emissionsmessung aus topografischen Gegebenheiten nicht nach Norm durchgeführt werden konnten – die Messstation stand unterhalb des Fahrbahnniveaus – unterscheiden sich die gemessenen Emissionswerte in Abhängigkeit von der Meteorologie teils deutlich von den berechneten Emissionswerten. Vergleichsmessungen mit einem rund 2 m höher und damit näherungsweise auf Fahr-

Name	Abstand	Kriterium AG ₁	Kriterium AG ₂	Kriterium AG
IMS1	28	1,5	4,9	2,5
IMS7	95	6,3	--	6,3
IMS8	145	9,3	--	9,3
DMS1	237	10,7	11,7	11,1
DMS2	246	11,4	13,1	12,3
IMS6	408	14,2	--	14,2
IMS4	435	13,9	--	13,9
IMS5	511	--	--	--
IMS3	551	14,3	--	14,3
IMS2	693	14,0	--	14,0

Tab. 7-9: Differenzschallpegel in dB für schallausbreitungsgünstige Bedingungen entsprechend der Kriterien AG₁, AG₂ und AG, berechnet für alle verfügbaren Messstationen

bahniveau platzierten Messgerät ergaben einen um 1-2 dB höheren Wert bei Mitwindbedingungen.

Die nach dem Kriterium AG_2 ermittelten Differenzschallpegel liegen bei allen drei Messstationen unter den nach Kriterium AG_1 berechneten. Bei der Ermittlung eines Immissionsschallpegels mittels Kriterium AG ist daher zu berücksichtigen, dass das Verhältnis von Messungen unter Mitwindbedingungen und Bedingungen mit stabiler Schichtung (einschließlich Gegenwindfälle) das Ergebnis beeinflusst.

In Bild 7-5 wird beispielhaft für die Station DMS1 die Dichteverteilungen für sechs verschiedene Kombinationen aus Windrichtung und Stabilität dargestellt, ohne die Windgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Dabei werden Mitwindfälle mittels durchgezogener und Gegenwindfälle mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet. In Blau, Orange und Grün sind jeweils die Stabilitätsklassen S_1 , S_3 und S_5 dargestellt. In dieser Betrachtung wird deutlich, dass die Dichtefunktionen bei Mitwind deutlich steiler als im Gegenwindfall sind, dies ist darauf zurückzuführen, dass bei gleichbleibender Windrichtung und Stabilität die Windgeschwindigkeit bei Gegenwind den Differenzschallpegel stärker beeinflusst als bei Mitwind. Während sich die Peaks der Mitwind-Dichtefunktionen im Bereich der 9 dB-Linie bewegen, weichen die Peaks der Gegenwind-Dichtefunktionen mit abnehmender Stabilität zunehmend davon ab, d. h. die Differenzschallpegel werden größer, es wird also mit abnehmender Stabilität leiser. Lediglich bei stabiler Schichtung (S_5) befindet sich der Peak der Dichtefunktion auf 9 dB-Niveau. Die deutliche Rechtsschiefe ergibt sich aus der Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, da es bei höheren Windgeschwindigkeiten und Gegenwind trotz

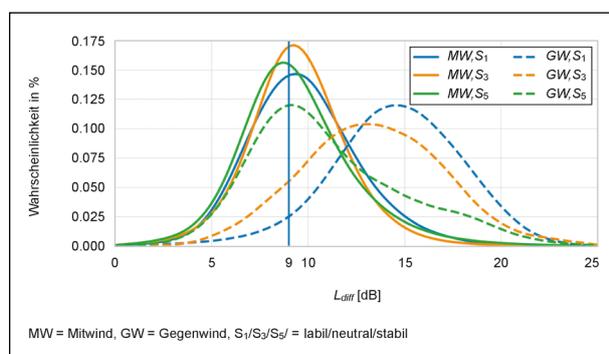


Bild 7-5: Dichteverteilungen für sechs Kombinationen aus Windrichtung und Stabilitätsklasse, unabhängig von der Windgeschwindigkeit am Beispiel der Station DMS1. MW = Mitwind, GW = Gegenwind, $S_1/S_3/S_5$ = labil/neutral/stabil

Inversion/stabiler Schichtung zur Aufwärtsbrechung des Shalls kommt. Bei der Auswahl der Kriterien für schallausbreitungsgünstige Bedingungen wurde daher das Kriterium AG_2 auf Windgeschwindigkeiten ≤ 3 m/s eingegrenzt.

7.3.2 Filterung der Messdaten nach Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen in Anlehnung an die Berechnungsmethoden Nord2000 und Harmonoise

Aus den in der Datenbank enthaltenen und bereits in Kapitel 7.2 beschriebenen Filterungen kann für eine konkrete Situation – in Tabelle 7-10 ist dies für die Situation W_2/S_2 dargestellt – und die gewünschte Windrichtung, hier Mitwind (45°), Querwind (135°) und Gegenwind (225°), die abstandsabhängige Abnahme des Schalldruckpegels entnommen werden. Da die Intensivmessungen an ausgewählten Tagen mit vornehmlich Mitwindbedingungen durchgeführt wurden, sind für Quer- und Gegenwind nur Daten ausgewählter Messstationen verfügbar. Die gemessenen Emissionswerte lagen wie bereits in Kapitel 7.3.1 dargelegt etwas unterhalb der berechneten Werte. Dies ist auf die topografischen Gegebenheiten am Emissionsort zurückzuführen. Gut zu erkennen sind die Abnahme des Schalldruckpegels mit zunehmender Entfernung vom Emissionsort, sowie die deutlich stärkere Abnahme des Pegels bei Querwind- und insbesondere Gegenwindbedingungen.

Im Folgenden wird für die Situation W_2/S_3 die gemessene abstandsabhängige Schallpegelreduktion mit den, mittels Nord2000 und Harmonoise berechneten Ergebnissen, verglichen und diskutiert.

In Bild 7-6 werden zunächst die Messwerte für Mitwindbedingungen der Langzeitmessung mit den Ergebnissen der Berechnungsverfahren Nord2000 und Harmonoise verglichen. Es ist zu erkennen, dass an manchen Punkten die Abweichungen unter 2 dB(A) liegen, wohingegen an anderen Punkten Unterschiede von über 5 dB(A) zu beobachten sind. Die Berechnung nach Harmonoise liegt generell oberhalb der Messwerte und auch oberhalb der Berechnung nach Nord2000, die wiederum unterhalb der letzten beiden Messpunkte liegt. Insbesondere bei dem Punkt bei 400 m (IMS_4), der die stärkste Pegelabnahme der gesamten Reihe aufzeigt, weicht Harmonoise deutlich vom Messwert ab. Für den Rahmen dieser Untersuchung kann die Übereinstimmung von Berechnung und Messung dennoch für beide Methoden als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Name	Abstand in m	L_{diff} in dB für Mitwind (45°)	L_{diff} in dB für Querwind (135°)	L_{diff} in dB für Gegenwind (225°)
IMS1	28	1,6	4,0	2,8
IMS7	95	6,1	--	--
IMS8	145	9,5	--	--
DMS1	237	13,4	15,1	16,0
DMS2	246	11,7	17,4	19,2
IMS6	408	18,2	--	--
IMS4	435	16,3	28,6	--
IMS5	511	--	--	--
IMS3	551	17,5	--	--
IMS2	693	16,7	--	--

Tab. 7-10: Differenzschallpegel L_{diff} in dB ($L_{diff} = Emission_{gerechnet} - Immission_{gemessen}$) für die Situation W_2/S_2 bei Mitwind, Querwind und Gegenwind für alle verfügbaren Messstationen. Abstand = Abstand zur Quelle in m

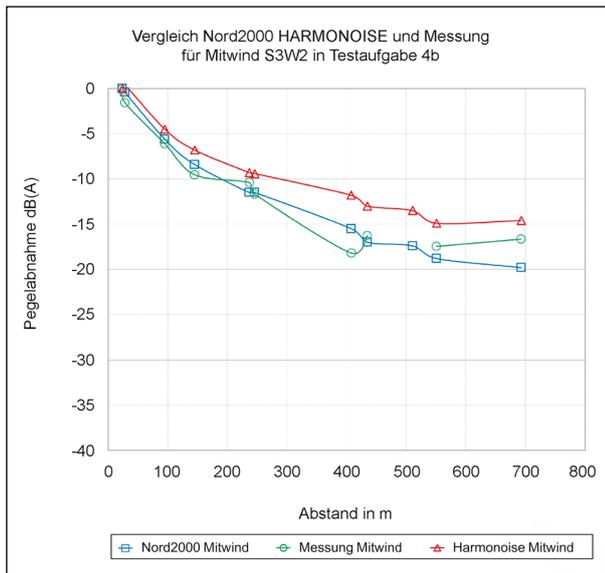


Bild 7-6: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Testaufgabe 4b für Mitwind (schallausbreitungsgünstig), für Normen mit Berücksichtigung der Meteorologie und Vergleich zu Messwerten

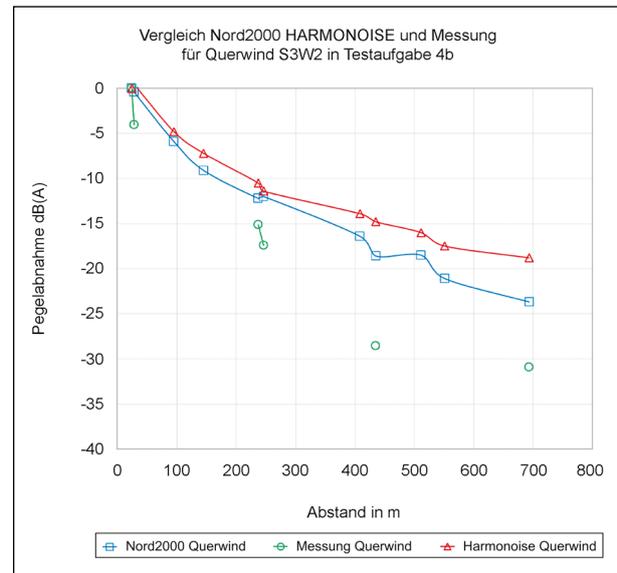


Bild 7-7: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Testaufgabe 4b für Querwind, für unterschiedliche Normen und Vergleich zu Messwerten

In Bild 7-7 werden die Messwerte der Langzeitmessung für Wind aus Nordwest, was Querwindbedingungen entspricht, einer Windgeschwindigkeit von 1-3 m/s, und einer annähernd neutralen Schichtung mit den Ergebnissen der Berechnungsverfahren Nord2000 und Harmonoise (S_3W_2) verglichen. Querwind ist innerhalb der Intensivmessungen sehr selten aufgetreten, weswegen hier wenige Messwerte vorliegen und die Messunsicherheit dadurch größer ist. Bei Querwind sollte gemäß der Theorie hauptsächlich die Temperaturschichtung für eine Pegelabnahme mit der Entfernung relevant sein und somit sensibler als der Mitwind und Gegenwindfall bezüglich der Schichtung sein. Die Einord-

nung der Messbedingungen in die Schichtungs-kategorie S_3 erfolgte aus den COSMO-DE-Modelldaten des DWD. Diese Daten repräsentieren immer den Mittelwert aus den gegebenen Gitterzellen über einer Fläche von 2,2 x 2,2 km und einen Zeitraum von drei Stunden. Es ist möglich, dass durch lokale Gegebenheiten und innerhalb eines kürzeren Zeitraumes eine labilere Schichtung an dieser Stelle am Messtag aufgetreten ist und somit der Schallpegel mit der Entfernung in der Realität innerhalb der Messzeit stärker abnimmt als im Modell. Die Abweichungen der Modelle Nord2000 und Harmonoise von den Messwerten sind hier größer als bei Mitwind und schwanken zwischen 2 und etwas über

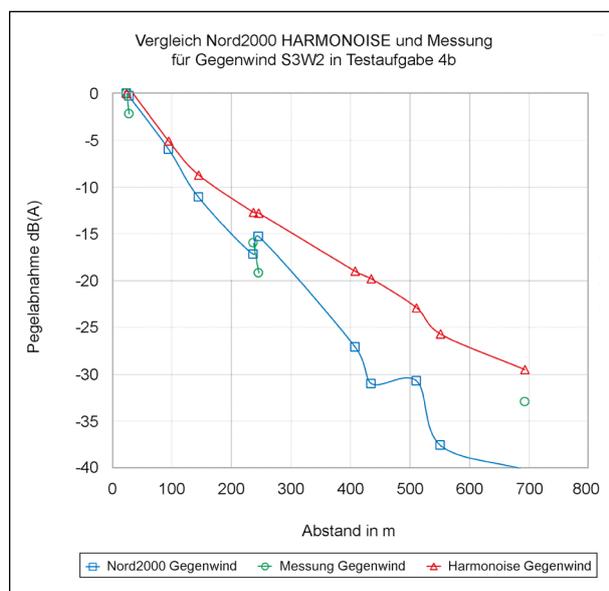


Bild 7-8: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Testaufgabe 4b für Gegenwind (schallausbreitungsgünstig) für unterschiedliche Normen und Vergleich zu Messwerten

12 dB(A) bei 430 m und 700 m. Tendenziell scheint Nord2000 die Messwerte etwas besser zu reproduzieren als Harmonoise, welche auch hier wieder oberhalb aller Messwerte und oberhalb der Nord2000 Ergebnisse liegen. Diese Abweichung kann aber über eine Abweichung der Temperaturschichtung zwischen Modell und Messung erklärt werden. Wenn in dem Schallausbreitungsmodellen nämlich eine stabilere Schichtung angenommen wird, als in der Realität während der Messzeit aufgetreten ist, nimmt im Modell der Schallpegel mit der Entfernung weniger stark ab.

In Bild 7-8 werden die Messwerte für Gegenwindbedingungen der Langzeitmessung mit den Ergebnissen der Berechnungsverfahren Nord2000 und Harmonoise verglichen. Gegenwind ist wie Querwind innerhalb der Intensivmessungen selten aufgetreten, weswegen auch hier nur wenige Messwerte vorliegen und die Unsicherheit der Messwerte groß ist. Auch unter Gegenwindbedingungen liegen die Ergebnisse nach Harmonoise immer oberhalb der Nord2000 Ergebnisse und auch oberhalb der Messwerte. Die Ergebnisse nach Nord2000 dagegen liegen eher unterhalb der Messwerte. Die Messwerte liegen dementsprechend zwischen den Berechnungen von 2 dB(A) bis etwas über 5 dB(A). Die Abweichung der Ergebnisse zwischen den beiden Modellen ist auch im Gegenwindfall auffallend groß und beträgt in 700 m Entfernung etwa 10 dB(A).

Fazit

Ein Vergleich von Messdaten mit den Ergebnissen der zwei Berechnungsmethoden Nord2000 und Harmonoise unter Beachtung aller Umgebungsbedingungen im Modell sollte zu einer bestmöglichen Übereinstimmung aller Werte führen. Trotz der Ähnlichkeit der Berechnungsvorschriften zwischen Nord2000 und Harmonoise und trotz der bestmöglichen Anpassung der Modelle an die realen Messbedingungen treten zum Teil deutliche Unterschiede in den Ergebnissen auf.

Die Berechnungen nach Harmonoise zeigen immer eine schwächere Pegelabnahme mit der Entfernung als Nord2000. Dies passt zu den Erkenntnissen, die in Testaufgabe 1 entstanden sind (siehe Bild 5-22). Dort erkennt man, dass Harmonoise sensitiver auf die Einstellung der Temperaturschichtung reagiert als Nord2000 und dazu, dass Harmonoise für die Fälle S_3 und S_5 – also für schallausbreitungsgünstige Fälle – höhere Pegel ergibt als Nord2000. Für diesen Vergleich innerhalb der Testaufgabe 4b, bei denen S_3W_2 (neutraler Temperaturgradient, leichter WIND) mit den Richtungen Mitwind, Querwind oder Gegenwind zugrunde gelegt wurde, spielt die Einteilung der Stabilität, die sich aus COSMO-DE-Daten ergibt, eine wichtige Rolle. Die größte Abweichung von Messwerten zu Berechnungsergebnis ergibt sich in dem Querwindfall, der besonders von der Temperaturschichtung geprägt wird.

7.4 Zusammenhang zwischen Windrichtung und Schallpegelabnahme

Im Folgenden wurde – mithilfe meteorologischer Daten aus dem DWD-Modell Cosmo-DE – zunächst für die beiden Dauermessstationen die Abhängigkeit der Schallpegelabnahme von den oben erwähnten meteorologischen Bedingungen untersucht. Dazu wurden die Daten zunächst nach Windgeschwindigkeit und Stabilität der atmosphärischen Schichtung gefiltert. Anschließend konnte für jede meteorologische Situation (d. h. Kombination aus Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklasse) die Schallpegelabnahme in Abhängigkeit von der Windrichtung dargestellt werden. Die Bestimmung der Stabilitätsklassen erfolgte mithilfe von COSMO-DE-Temperaturprofilen und ist somit für die Schallausbreitung eigentlich genauer als eine Einteilung gemäß Harmonoise. Laut Harmonoise würde die Stabilität gemäß der beobachteten Bewölkung und

der Tageszeit festgesetzt werden. Dennoch entsprechen die Häufigkeiten der Klassen von S_1 - S_5 weitestgehend einer Einteilung wie sie sich aus Harmonoise ergäbe. Es gilt nach Harmonoise, dass die Klassen S_1 bis S_3 (labil bis neutral) nur tagsüber (6 – 18 Uhr) und die Klassen S_4 und S_5 (stabil bis sehr stabil) nur nachts (18 – 6 Uhr) vorkommen, also in der Summe jeweils 50 % ausmachen. Dieses Ergebnis ergibt sich auch aus der Einteilung über die Temperaturprofile.

Tabelle 7-11 zeigt die kombinierte Häufigkeitsverteilung für die Klassen W und S in Prozent. Anhand dieser Tabelle kann man erkennen, dass bestimmte Kombinationen von Windklassen und Stabilitätsklassen nicht ganz unabhängig voneinander sind. Es gibt Kombinationen, die zusammen fast nicht auftreten (S_1W_0 oder S_5W_4) und andere, welche deutlich häufiger vorkommen (S_1W_2). Insgesamt entfallen auf die Stabilitätsklassen S_1 bis S_3 53,1 % und auf die Klassen S_4 bis S_5 46,9 % der Daten.

Bezüglich der Windgeschwindigkeitsklassen ist wie zu erwarten der Anteil an Daten in den Klassen W_0 und W_4 am geringsten (zusammen 3,6 %), wohingegen die Klassen W_1 und W_2 mit insgesamt 85,3% am häufigsten vertreten sind.

Insgesamt wurden 2.781.834 Sekunden an akustischen Daten ausgewertet. Damit ist die Datenlage für die beiden häufigsten Klassen sehr gut. Auch in der Klasse W_0 kann die Datenlage als ausreichend gut bezeichnet werden, da durch die geringe Windgeschwindigkeit in Kombination mit der geringe Schwankungsbreite der Windgeschwindigkeit von 0,0 – 0,2 m/s auch die Schwankungsbreite in den

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Summe
W_0	0,1	0,4	0,2	0,3	0,7	1,7
W_1	4,4	5,0	3,6	8,3	13,2	34,6
W_2	12,2	10,9	6,3	8,3	13,1	50,7
W_3	3,3	3,8	0,9	1,3	1,8	11,1
W_4	0,7	1,1	0,1	< 0,1	< 0,1	1,9
Summe	20,7	21,2	11,2	18,2	28,7	100,0

Tab. 7-11: Kombinierte Häufigkeitsverteilung für die Klassen W und S in Prozent

Stabilitätsklasse	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Schallpegelabnahme in W_0	-16,3 dB	-15,8 dB	-14,1 dB	-12,1 dB	-10,7 dB

Tab. 7-12: Mittlere Schallpegelabnahmen gegenüber den berechneten Emissionswerten in 250 m Entfernung von der Autobahn für die Windklasse W_0 und die Stabilitätsklassen S_1 bis S_5

gemessenen Pegeln relativ gering ist. In den beiden Klassen W_3 und W_4 ist die Datenlage aufgrund der größeren Varianzen sowohl in Bezug auf die Windgeschwindigkeit – wir betrachten hier Bereiche von 3 – 6 m/s bzw. > 6 m/s – als auch bezüglich der Immissionsdaten nicht mehr ausreichend, um den Einfluss der Windrichtung auf die Schallausbreitung bestimmen zu können. Es zeigt sich aber, dass grundsätzlich mit zunehmender Windgeschwindigkeit der Einfluss der Atmosphärensichtung abnimmt. An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die Häufigkeitsverteilung der meteorologischen Situationen keinen direkten Einfluss auf die folgende Auswertung hat, da jede Situation für sich untersucht wurde. Einflüsse ergeben sich lediglich bezüglich der Genauigkeit der Ergebnisse, da grundsätzlich die Ergebnisse sehr häufiger Situationen weniger fehlerbehaftet sind (Ausreißer haben geringeren Einfluss).

Allgemein wird in der Klasse W_0 die Schallausbreitung lediglich durch die Stabilität der Atmosphäre bestimmt, wobei für die hier betrachteten Distanzen die unteren 200 m ausschlaggebend sind. Daher kann in dieser Klasse der Differenzschallpegel für die einzelnen Stabilitätsklassen über alle Windrichtungen gemittelt werden und man erhält die mittlere Abnahme des Schallpegels für die einzelnen Stabilitätsklassen welche in Tabelle 7-12 zusammengefasst sind.

Als schallausbreitungsneutrale Situation kann die Kombination (W_0, S_3), d. h. windstill und neutrale Schichtung der Atmosphäre angenommen werden. Bild 7-9 illustriert die Abweichung von der mittleren gemessenen Pegelabnahme in rund 250 m Entfernung von der Quelle bei schallausbreitungsneutraler Wettersituation. Diese mittlere Pegelabnahme für Situation (W_0, S_3) wird als Referenzwert herangezogen, was bedeutet, dass $\Delta L(W_0, S_3)$ im Mittel gleich null ist und alle anderen Kurven die Abweichung von der ausbreitungsneutralen Schallpegelabnahme in rund 250 m Entfernung von der Schallquelle kennzeichnen. Es ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung der Wettermessungen an DMS-1 die Analyse ausschließlich mit denen vom DLR gewonnenen Wetterdaten der Station DMS-2 durchgeführt wurde.

In Bild 7-9 zeigt sich für die Windklasse W_0 eine klare Abhängigkeit der Schallpegeldifferenz von der Stabilitätsklasse. So kommt es bei einer stabilen Atmosphärensichtung zu einer geringeren Schallpegelabnahme und damit zu höheren gemessenen Schallpegeln. Im Gegensatz dazu kommt es bei labiler beziehungsweise labil-neutraler Schichtung zu einer stärkeren Abnahme des Schallpegels, es wird also leiser. Die Unterschiede zwischen S_1 und S_2 (0,5 dB) sind dabei weniger signifikant als die zwischen S_4 und S_5 (1,4 dB). Darüber hinaus sieht man aber auch die verhältnismäßig starke Varianz in den Daten, die sich v. a. durch den relativ kleinen Datensatz für diese Windklasse erklären lässt.

Während in W_1 die Schallpegelabnahmen in den Stabilitätsklassen S_4 und S_5 vergleichbar mit denen in W_0 sind und eine Windrichtungsabhängigkeit

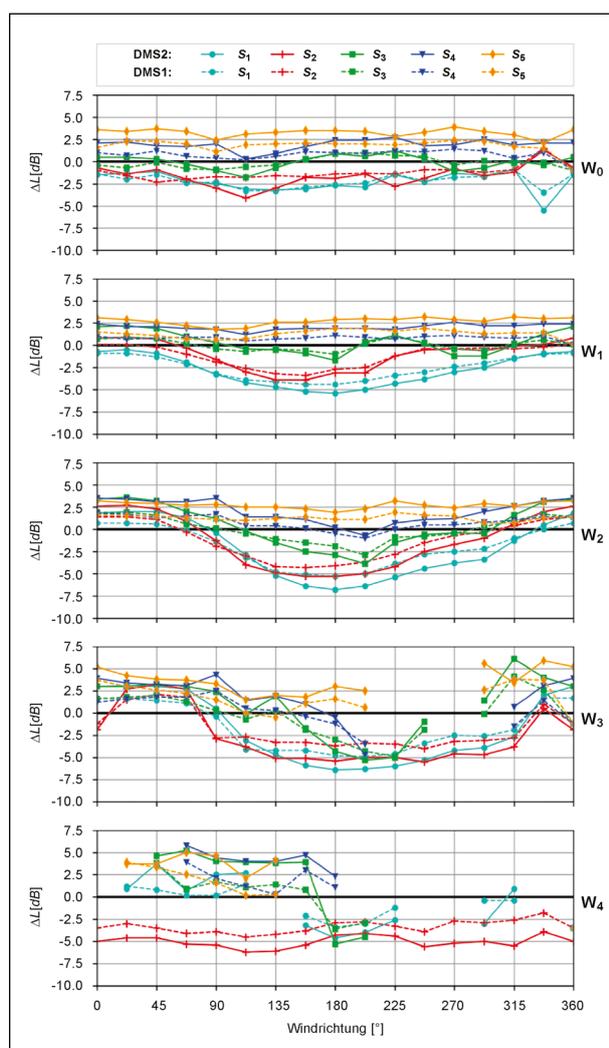


Bild 7-9: Abweichung von der mittleren gemessenen Pegeldifferenz in rund 250 m Entfernung von der Quelle bei schallausbreitungsneutraler Wettersituation. Mitwind ist hier bei 0° , entsprechend liegt Gegenwind bei 180°

nicht erkennbar ist, zeigt sich für S_1 und S_2 eine eindeutige Windrichtungsabhängigkeit mit einer Reduktion des Schallpegels von bis zu 5 dB bei direktem Gegenwind (180°) und einer Zunahme des Schallpegels um etwa 1 dB bei Mitwind im Fall von S_1 (jeweils gegenüber (W_0, S_3)). Während für S_1 die Schallpegelabnahme bei Mitwind (d. h. bei schallausbreitungsgünstigen Windbedingungen) stärker als bei schallausbreitungsneutralen Bedingungen ist und damit der Immissionsschallpegel niedriger als bei schallausbreitungsneutralen Bedingungen ist, kommt es im Fall von S_2 bereits zu einer geringeren Schallpegelabnahme gegenüber neutralen Bedingungen, es wird also lauter. Auch im Fall von S_3 ist eine leichte Windrichtungsabhängigkeit zu erkennen.

In der Windklasse W_2 findet man schließlich für alle Stabilitätsklassen eine mehr oder weniger ausgeprägte Windrichtungsabhängigkeit. Während sich diese für S_3 lediglich im Bereich um etwa 1,5 dB bewegt, findet man für S_1 Unterschiede von bis zu 8,5 dB zwischen Gegenwind- und Mitwindlage. Bei Mitwind ist es nun in allen Stabilitätsklassen lauter als unter schallausbreitungsneutralen Bedingungen.

Die Windklassen W_3 und insbesondere W_4 waren im Messzeitraum nur schwach besetzt, sodass die Werte hier nur bedingt aussagekräftig sind. Dies ist auch an den relativ großen Schwankungen im Vergleich zu W_1 und W_2 zu erkennen. Die negativen Schalldruckpegel im Mitwindfall der Klasse S_4W_4 resultieren vermutlich aus einer Kombination von gemittelter Windrichtung und gleichzeitig geringer Datenlage. Die minimalen und maximalen Abweichungen vom mittleren, ausbreitungsneutralen Schallpegel sind in Tabelle 7-13 zusammengefasst.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einfluss der Stabilitätsklassen mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt und der Einfluss der Windrichtung mit zunehmender Stabilität abnimmt. Am lautesten ist es generell bei starkem Mitwind und stabiler Schichtung, am leisesten dagegen bei starkem Gegenwind und labiler Schichtung.

Wie stark die Messwerte aufgrund verschiedener meteorologischer Situationen variieren können, zeigt auch Bild 7-10, in welcher die Mittelungspegel von 19 verschiedenen meteorologischen Situationen, gemessen im Messgebiet Sulzemoos im Vergleich zur berechneten Schalldruckpegelabnahme nach RLS-90 dargestellt sind. Die Mittelungspegel

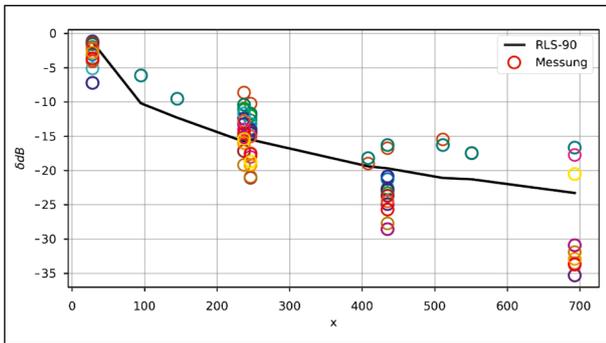


Bild 7-10: Mittelungspegel von 19 verschiedenen meteorologischen Situationen, gemessen im Messgebiet Sulzemoos (farbige Ringe) im Vergleich zur berechneten Schalldruckpegelabnahme nach RLS-90 (schwarz)

sind durch farbige Ringe gekennzeichnet (auf eine ausführlichere Legende wurde hier bewusst verzichtet), die Pegelabnahme nach RLS-90 durch die schwarze Kurve. Gut zu erkennen ist die starke Schwankungsbreite der gemessenen Mittelungspegel in Abhängigkeit von der meteorologischen Situation. So schwanken die Messwerte bereits am Emissionspunkt um rund 6 dB, dies ist unter anderem durch die etwas ungünstige Messposition unterhalb der Straßenhöhe zu erklären, sodass bereits in kurzer Entfernung von der Quelle ein deutlicher Einfluss der Meteorologie erkennbar ist. In 237 m / 246 m Entfernung betragen die Unterschiede bereits über 10 dB bzw. ca. 12.5 dB. Am entferntesten Immissionspunkt in rund 700 m Entfernung von der Quelle konnte schließlich eine Schwankungsbreite von rund 19 dB nachgewiesen werden. Da die RLS-90 die Schallausbreitung für moderate Mitwindbedingungen bzw. stabile Schichtung prognostizieren, kann diese Schwankungsbreite dort nicht abgebildet werden. Dies ist insbesondere interessant für solche Messwerte, die deutlich oberhalb der nach Norm berechneten Schallausbreitungskurve liegen (+ 8 dB bei einer Entfernung von 237 m), sodass, je nach Häufigkeit der entsprechenden meteorologischen Situation im Immissionsort, gemessene Mittelungspegel deutlich oberhalb des prognostizierten Langzeitmittels auftreten könnten.

Schließlich soll noch kurz auf die Pegeldifferenzen zwischen den Messstationen DMS-1 und DMS-2 eingegangen werden. Die Differenz zwischen diesen beiden Messstationen betrug 9 m, im Vergleich dazu waren teils deutliche Unterschiede in den Schalldruckpegeln zu erkennen.

Bild 7-11 illustriert die Pegeldifferenzen zwischen den beiden Dauermessstationen. Die Station DMS-1 stand im freien Feld und die DMS-2 wurde

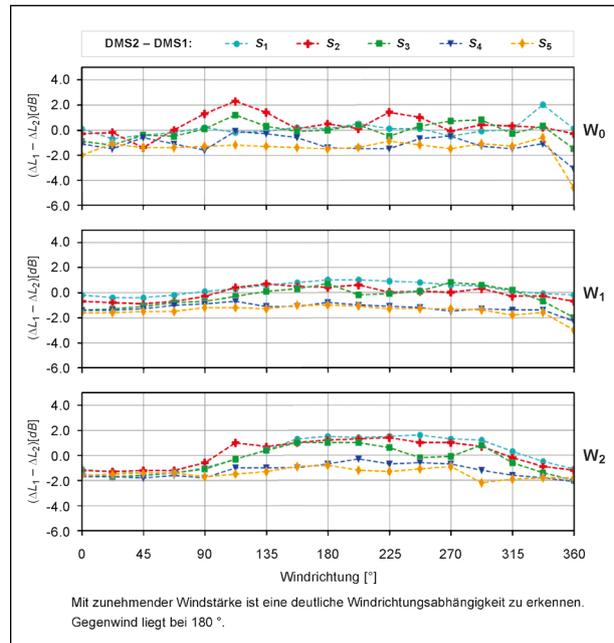


Bild 7-11: Pegeldifferenzen zwischen den beiden Dauermessstationen. Mitwind ist hier bei 0°, entsprechend liegt Gegenwind bei 180°. Mit zunehmender Windstärke ist eine deutliche Windrichtungsabhängigkeit zu erkennen, liegt Gegenwind bei 180°

DLR		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
W ₀	min	-5,5	-4,1	-1,8	0,3	2,1
	max	-0,8	1,3	1,2	2,7	3,9
W ₁	min	-5,3	-3,9	-1,7	1,2	1,8
	max	-0,5	0,9	2,2	2,6	3,2
W ₂	min	-6,8	-5,3	-3,9	-0,7	1,9
	max	2,0	2,7	3,6	3,5	3,2
MoPa						
W ₀	min	-3,5	-2,3	-1,0	-1,0	-1,0
	max	-0,9	1,5	1,0	1,4	2,4
W ₁	min	-4,4	-3,4	-1,0	0,1	0,1
	max	-0,9	0,1	1,0	1,1	1,9
W ₂	min	-5,3	-4,3	-2,9	-1,0	0,7
	max	0,7	1,4	1,9	1,8	1,9

Tab. 7-13: Minimale und maximale Abweichungen vom mittleren Schallpegel [dB] unter schallausbreitungsneutralen Wetterbedingungen für die Windklassen W₀ bis W₂, jeweils für beide Dauermessstellen und alle Stabilitätsklassen

durch eine Scheune leicht abgeschattet. Bei Windstille (keine Windrichtungsabhängigkeit) ist zu erkennen, dass die DMS-2 im Mittel etwas geringere Pegel misst, als die DMS-1. Dabei scheint auch die Schichtung eine gewisse Rolle zu spielen. Während bei labiler Schichtung beide Messstationen einen

praktisch identischen Pegel aufzeichnen, misst die DMS-2 bei stabiler Schichtung einen etwa 2 dB niedrigeren Pegel. Letzteres gilt im Fall einer stabilen Schichtung auch bei höheren Windgeschwindigkeiten für alle Windrichtungen, während bei labiler Schichtung die Windrichtungsabhängigkeit zunimmt und für die DMS-2 im Fall von W_2 bei Gegenwind sogar lautere Pegel als bei der DMS-1 gemessen werden. Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass die bei der DMS-2 gemessenen Pegel aufgrund der Abschattung geringer ausfallen als die bei der DMS-1 gemessenen.

7.5 Einfluss der zeitlichen Auflösung auf die Auswertung

Im Folgenden wird erörtert, ob eine sekundengenaue Betrachtung der Daten Vorteile gegenüber der von 1- bzw. 10-Minuten-Mitteln hat. Dazu wurde die in Kapitel 7.4 durchgeführte Analyse (vgl. Bild 7-9) zusätzlich mit entsprechenden 1- und 10-Minuten Mittelwerten der DLR-Daten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 7-12 dargestellt. Dabei bezeichnen „1 sec“ die 1-Sekunden DLR-Originaldaten und „1 min“ sowie „10 min“ die auf eine beziehungsweise zehn Minuten gemittelten DLR-Daten. Für die Auswertung wurden jeweils die Ergebnisse der 1-Sekunden-Analyse von den Ergebnissen der Mittelwert-Analysen abgezogen, d. h. es wurde für jede Situation und Windrichtung die Differenz der Differenzschallpegel der gemittelten und der hochaufgelösten Daten gebildet. Negative Werte bedeuten also einen gegenüber den 1-Sekunden-Daten niedrigeren Schallpegel. Auch hier wurde die Abhängigkeit der Schallpegelreduktion von Windstärke, Stabilitätsklasse und Windrichtung untersucht.

Zunächst fällt auf, dass die gemittelten Kurven deutlich stärker variieren und weniger glatt sind als die Kurven bei sekunden-genaue Betrachtung. Des Weiteren fällt die Pegelabnahme deutlich stärker aus (-2 bis -4 dB) als bei Betrachtung der Sekundendaten. Es zeigt sich, dass bis auf wenige Ausnahmen die beiden Mittelungspegel deutlich unter dem 1-Sekunden-Pegel liegen. Dies trifft insbesondere auf die Windklassen W_1 und W_2 zu. Der Mittelungspegel unterschätzt also bei dieser Betrachtung den tatsächlichen Pegel. Die Ursache dessen liegt in der Zusammensetzung der gemittelten Windklassen. Innerhalb eines Mittelungszeitraumes (hier 1 oder 10 Minuten) ist die Windgeschwindigkeit respektive Windgeschwindigkeits-Klasse nicht

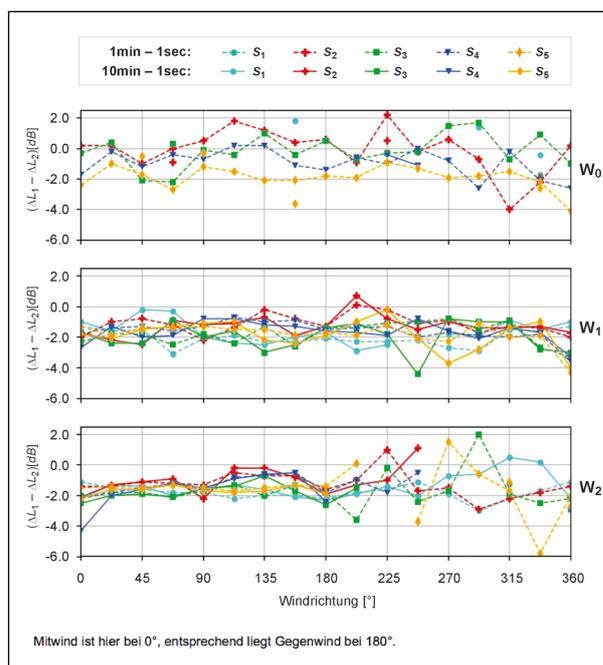


Bild 7-12: Differenzen zwischen auf 1 Minute und 10 Minuten gemittelten und 1-Sekunden-Daten. Mitwind ist hier bei 0° , entsprechend liegt Gegenwind bei 180°

konstant; vielmehr werden Pegel gemittelt, die beim Filtern der 1-Sekunden-Daten eigentlich in verschiedene Klassen fallen würden. Bei der Auswertung der Sekundendaten (vgl. Bild 7-9) wurde bereits gezeigt, wie sich die Pegel bei zunehmender Windgeschwindigkeit ändern. Im Fall von Gegenwind ist – bei gleichbleibender Stabilitätsklasse – die Abnahme des Pegels umso größer, je höher die Windgeschwindigkeit ist. Je nachdem wie nun die Zusammensetzung der Windklassen innerhalb der Mittelungsperiode ausfällt, wird auch der Mittelungspegel beeinflusst. Erhält man beispielsweise bei einem 10-Minuten-Mittel eine Windklasse W_1 , so werden sich in der Mittelungsperiode in der Regel Werte aus den Windklassen W_0 , W_1 und W_2 finden, möglicherweise auch noch weitere. So entfallen im Falle der 10-Minuten-Mittel in der gemittelten Windklasse W_1 79,1 % der Werte tatsächlich auf W_1 , 4,7 % der Werte auf W_0 , 16,2 % auf W_2 und weniger als 0,1 % der Werte auf W_3 .

Einen vergleichbaren Effekt sieht man auch für die gemittelte Windrichtung: Bezeichnet man als Mitwindbereich den Windbereich von $\pm 56,25^\circ$ um direkten Mitwind herum und analog den Bereich von $\pm 56,25^\circ$ bzgl. direktem Gegenwind als Gegenwindbereich, so entfallen bei Betrachtung der auf 10 Minuten gemittelten Windrichtung im Falle von Mitwind ca. 60 % der Sekundendaten tatsächlich auf diesen Bereich, wohingegen die übrigen ca.

40 % auf Gegen- und Querwind entfallen. Dies führt ebenfalls zu einem im Vergleich mit Sekundendaten geringeren Schallpegel.

Fazit

Das Bewusstsein über den Einfluss der Mittelung unter den entsprechenden Bedingungen hilft dabei bei der Einordnung von Pegeldifferenzen. Je nach Fall muss unterschieden werden, ob man eine stärkere Mittelung akzeptieren kann oder nicht. Dies betrifft insbesondere Situationen mit stark wechselhaften Bedingungen. Für die Auswertung in diesem Kapitel wurden aufgrund der besseren Aussagekraft gegenüber gemittelten Daten die Ergebnisse der hochaufgelöste 1Hz-Daten dargestellt.

Anhand der hoch aufgelösten Messwerte wurde der Einfluss verschiedener meteorologischer Parameter auf die Schallausbreitung analysiert. Dazu wurden die Messwerte nach meteorologischen Situationen gefiltert und bzgl. den RLS-90 bzw. Nord2000/Harmonoise aufbereitet. Dabei konnten in einer Entfernung von rund 250 m von der Quelle Unterschiede im Pegel von bis zu 12.5 dB nachgewiesen werden. Die weitaus größten Pegeldifferenzen zum Referenzschallpegel wurden dabei bei Gegenwind beobachtet. Es zeigte sich über alle Windrichtungen eine Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Windgeschwindigkeit, wobei diese speziell bei Gegenwind überproportional zur Zunahme der Windgeschwindigkeit ist. Des Weiteren zeigte sich auch ein deutlicher Einfluss der Temperaturschichtung auf die Schallausbreitung; so variiert der Pegel bei Windstille allein aufgrund der Schichtung um etwa 6 dB. Diese starken Schwankungen können durch die RLS-90 nicht abgebildet werden. Für die Beantwortung von Fragestellungen zu spezifischen meteorologischen Situationen müssen daher bislang komplexere Rechenmethoden – wie beispielsweise die Nord2000 – herangezogen werden. Im Vergleich zu den RLS-90 benötigen diese Verfahren jedoch selbst zur Berechnung einer einzelnen Situation eine um ein Vielfaches höhere Rechenzeit. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob die RLS-90 um einen Korrekturterm zur Berücksichtigung verschiedener meteorologischer Situationen erweitert werden können.

8 Vorschlag eines einfachen Prognosemodells bezüglich meteorologischer Einflüsse

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgeschlagen, die RLS-90 bzw. RLS-19 [32] um ein einfaches Prognoseverfahren zu ergänzen, das es ermöglicht, die Schallausbreitung unter Berücksichtigung spezieller meteorologischer Situation abzuschätzen. Ziel dieses Verfahrens ist es dabei explizit nicht, durch die zusätzliche Berücksichtigung meteorologischer Statistiken einen Langzeitmittlungspegel zu errechnen.

Das vorgeschlagene Verfahren zur Ergänzung der RLS ist vielmehr dazu geeignet, die explizite Schallsituation bei bestimmten Witterungsbedingungen durch eine Korrektur vorherzusagen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es Aussagen zu treffen, welche abweichende Schallbelastung bei bestimmten (weil z. B. örtlich bedingt häufig auftretenden) Witterungsbedingungen gegenüber der ausbreitungsgünstigen Situation auftritt. Ohne aufwendige Simulationen kann somit auch die Spannweite der witterungsbedingt unterschiedlichen Schallbelastungen abgeschätzt werden.

8.1 Parametrisierung des Verfahrens

Im Folgenden wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie in den RLS-90 durch Variation des Boden- und Meteorologiedämpfungsterms verschiedene meteorologische Situationen berücksichtigt werden können. Grundsätzlich stehen in den RLS-90 ein Verfahren für „lange, gerade“ Fahrstreifen, sowie das Teilstückverfahren zur Verfügung, wobei ersteres in den neuen Norm RLS-19 obsolet wird. Im Verfahren für „lange, gerade“ Fahrstreifen wird der Mittelungspegel L_m wie folgt berechnet:

$$L_m = L_{m,E} + D_{s\perp} + D_{BM\perp} + D_{B\perp} \quad (19)$$

wobei der Term $L_{m,E}$ den Emissionspegel für das Teilstück, der Term $D_{s\perp}$ die Pegeländerung zur Berücksichtigung des Abstandes und der Luftabsorption, der Term $D_{BM\perp}$ die Pegeländerung zur Berücksichtigung der Boden- und Meteorologiedämpfung und der Term $D_{B\perp}$ die Pegeländerung durch topografische Gegebenheiten und bauliche Maßnahmen beschreibt. Im Teilstückverfahren werden für alle Teilstücke i mit Länge l_i und Abstand zwischen Emissions- und Immissionsort s_i die Mittelungspegel $L_{m,i}$ für jedes Teilstück wie folgt berechnet:

$$L_{m,i} = L_{m,E} + D_l + D_s + D_{BM} + D_B \quad (20)$$

wobei hier $L_{m,E}$ der Emissionspegel für das Teilstück D_l die Korrektur zur Berücksichtigung der Teilstücklänge ($D_l = 10 \lg(l)$), D_s die Pegeländerung zur Berücksichtigung des Abstandes und der Luftabsorption, D_{BM} Pegeländerung zur Berücksichtigung der Boden- und Meteorologiedämpfung und D_B die Pegeländerung durch topografische Gegebenheiten und bauliche Maßnahmen beschreibt. Anschließend werden die einzelnen Terme energetisch zum Mittelungspegel L_m zusammengefasst, d. h.

$$L_m = 10 \lg \sum_i 10^{0,1L_{m,i}} \quad (21)$$

Die beiden Boden- und Meteorologiedämpfungsterme $D_{BM\perp}$ und D_{BM} sind dabei wie folgt definiert:

$$D_{BM\perp} = -4,8 \exp \left(- \left[\frac{h_m}{s_{\perp}} \left(8,5 + \frac{100}{s_{\perp}} \right) \right]^{1,3} \right) \quad (22)$$

für das Verfahren „lange gerade Straße“, bzw.

$$D_{BM} = \frac{h_m}{s} \left(34 + \frac{600}{s} \right) - 4,8 \leq 0 \quad (23)$$

für das Teilstückverfahren, wobei h_m den mittleren Abstand zwischen dem Grund und der Verbindungslinie zwischen Emissionsort und Immissionsort und s dem Abstand zwischen Emissionsort und Immissionsort darstellt.

Da D_{BM} und $D_{BM\perp}$ für einen hinreichend geraden Straßenabschnitt nur von h_m und s abhängen, können diese Terme für einen (auch aus verschiedenen Teilstücken bestehenden) solchen Abschnitt als näherungsweise konstant betrachtet werden. Dazu sei:

$$\tilde{L}_{m,i} = L_{m,i} - D_{BM} \quad (24)$$

und damit:

$$L_m = 10 \lg \sum_i 10^{0,1[L_{m,i} + D_{BM}]} = D_{BM} + 10 \lg \sum_i 10^{0,1\tilde{L}_{m,i}} \quad (25)$$

Für einen hinreichend geraden Straßenabschnitt verhält sich der Boden- und Meteorologiedämpfungsterm also additiv zum verbleibenden Term. Auch im Luftabsorptionsterm ist die leichte Mitwind-situation berücksichtigt. Dieser Anteil ist jedoch so gering, dass er im Vergleich zur Meteorologiedämpfung vernachlässigt werden kann. Um in den RLS-90 von den Standardbedingungen abweichende meteorologische Situationen berechnen zu können, kann daher – für hinreichend gerade Straßenab-

schnitte und bei konstanter Meteorologie – nach der Berechnung des Mittelungspegels L_m der Term D_{BM} von L_m subtrahiert und anschließend ein modifizierter Boden- und Meteorologiedämpfungsterm addiert werden.

8.1.1 Der Boden- und Meteorologiedämpfungsterm im Verfahren „langer, gerader“ Fahrstreifen

Für eine genauere Analyse des Boden- und Meteorologiedämpfungsterm im Verfahren „langer, gerader“ Fahrstreifen werden zunächst die vier Parameter des Dämpfungsterms der RLS-90 (vgl. Gleichung 22) wie folgt bezeichnet:

- $\alpha = 4,8$;
- $\beta = 8,5$;
- $\gamma = 100$;
- $\xi = 1,3$.

Damit lässt sich der Dämpfungsterm $D_{BM\perp}$ als Funktion von x mit den Parametern α , β , γ und ξ wie folgt schreiben:

$$f_{BM\perp}(x) = -\alpha \exp \left(- \left[\frac{h_m}{x} \left(\beta + \frac{\gamma}{x} \right) \right]^{\xi} \right) \quad (26)$$

Mit dem mittleren Abstand zwischen dem Grund und der Verbindungslinie zwischen Emissionsort und Immissionsort h_m .

Eine Analyse von $f_{BM\perp}$ zeigt:

- der Grenzwert für $x \rightarrow \infty$ ist $-\alpha$,
- von β und ξ hängt ab, wie schnell dieser Grenzwert erreicht wird (je größer β /je kleiner ξ desto langsamer die Zunahme),
- γ definiert, ab welcher Entfernung von der Quelle der Dämpfungsterm aktiv wird.

Die mittlere Höhe über Grund h_m ist eine geometrische Größe, die von der Höhe der Quelle und des Immissionsorts über Grund sowie dem Verlauf des Geländes zwischen Quell- und Immissionspunkt abhängt. Damit wird der Einfluss des Bodeneffekts im Term berücksichtigt.

8.1.2 Der Boden- und Meteorologiedämpfungs- term im Teilstückverfahren

Auch für den Boden- und Meteorologiedämpfungs-
term im Teilstückverfahren wurden die Konstanten
parametrisiert, wobei

- $\alpha = 4,8$,
- $\beta = 34$,
- $\gamma = 600$,

sodass sich D_{BM} als Funktion von x wie folgt
schreibt:

$$f_{BM} = \frac{h_m}{x} \left(\beta + \frac{\gamma}{x} \right) - \alpha \leq 0 \quad (27)$$

Mit dem mittleren Abstand zwischen dem Grund
und der Verbindungslinie zwischen Emissionsort und
Immissionsort h_m .

Im Gegensatz zu $f_{BM\perp}$ ist die Wirkung der Parameter
 α , β und γ in f_{BM} nicht so klar trennbar. Eine Analyse
von f_{BM} zeigt:

- α , β und γ bestimmen ab welcher Entfernung
von der Quelle der Dämpfungsterm aktiv wird,
- β bestimmt maßgeblich, wie stark die Dämpfung
zunimmt (d. h. wie schnell der Grenzwert $x \rightarrow \infty$
erreicht wird, je größer β desto langsamer die
Zunahme),
- der Grenzwert für $x \rightarrow \infty$ ist $-\alpha$.

8.1.3 Anpassung des Boden- und Meteorolo- giedämpfungsterms an verschiedene meteorologische Bedingungen

Im Folgenden werden die Parameter der Boden-
und Meteorologiedämpfungsterme der zwei Verfah-
ren mittels der Suffixe „TS“ (Teilstückverfahren)
bzw. „LGF“ (Verfahren langer, gerader Fahrstreifen)
gekennzeichnet. Durch Variation der Parameter
 α_{LGF} , β_{LGF} und ξ_{LGF} kann $D_{BM\perp}$ so angepasst wer-
den, das $\tilde{D}_{BM\perp} \approx D_{BM}$ wobei $\tilde{D}_{BM\perp}$ den angepassten
Dämpfungsterm beschreibt. Dies wurde mithilfe ei-
ner Kurvenanpassung (mathematische Optimie-
rungsmethode aus der Numerik) durchgeführt. Die
resultierenden Parameter sind dabei:

- $\alpha_{LGF} = 4,8$;
- $\beta_{LGF} = 10,0$;
- $\gamma_{LGF} = 100$;
- $\xi_{LGF} = 1,1$.

Ein Vergleich zwischen $D_{BM\perp}$ und D_{BM} ist in Bild 8-1
dargestellt. Die mittlere quadratische Abweichung
(MSE) zwischen $\tilde{D}_{BM\perp}$ und D_{BM} beträgt 0,016. Durch
eine Parametervariation lässt sich also D_{BM} durch
 $D_{BM\perp}$ sehr gut annähern.

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie der Boden-
und Meteorologiedämpfungsterm mittels Parame-
tervariation an verschiedene meteorologische Be-

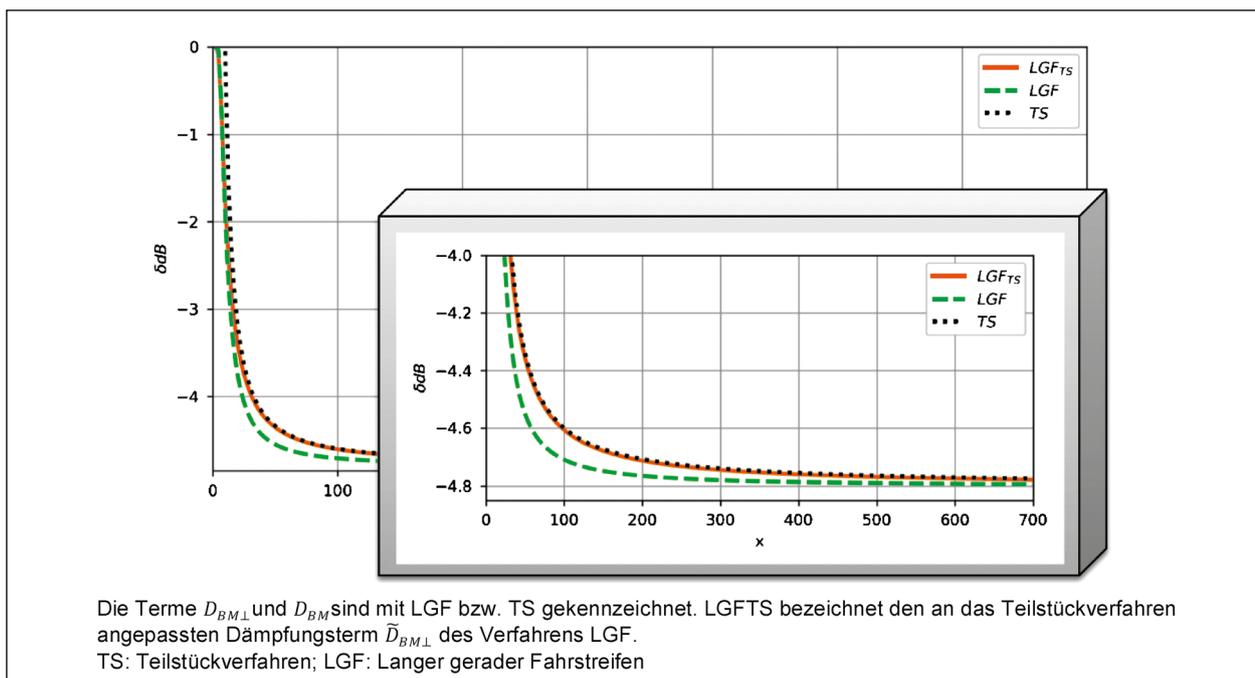


Bild 8-1: Vergleich zwischen verschiedenen Dämpfungstermen

dingungen angepasst werden kann. Da D_{BML} grundsätzlich flexibler und besser an verschiedene meteorologische Situationen anpassbar ist als D_{BM} , wird diese Anpassung für D_{BML} durchgeführt. Zunächst wurden dazu, ausgehend von den Messwerten der Dauermessstationen DMS1 und DMS2 (vgl. Tabelle 8-1), den Nord2000 Rechnungen sowie der Simulationen mit dem wellenbasierten Modell, acht Dämpfungsklassen definiert. Die Messungen an den Intensivmessstationen wurden hier nicht berücksichtigt, da die Messzeiträume der einzelnen Situationen verhältnismäßig kurz waren, sodass hier mögliche kurzfristige Phänomene nicht herausgemittelt und somit die Messungen verzerrt werden können. Diese Daten werden stattdessen in der Validierung der Methode verwendet. Ziel der acht Dämpfungsklassen ist es einerseits einen weiten Bereich an meteorologischen Situationen abdecken zu können während gleichzeitig der rechnerische Aufwand im Vergleich zu den 25 Klassen nach Nord2000/Harmonoise gering gehalten wird. Dies lässt sich auch dadurch rechtfertigen, dass die Pegelabweichungen zwischen verschiedenen Nord2000-Klassen häufig recht gering ausfallen, sodass ähnliche meteorologische Situationen gut in einer Klasse zusammengefasst werden können. Zudem wurde darauf geachtet, die Klassen eher konservativ zu wählen, um eine Unterschätzung des Pegels möglichst zu vermeiden. Die acht Klassen beschreiben Zubzw. Abschläge bezüglich den RLS-90 für verschiedene meteorologische Klassen. Die Klassen sind mit p_2 , p_1 , p_0 , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 und m_5 bezeichnet, wobei „p“ einen Zuschlag (plus) und „m“ einen Abschlag (minus) bezeichnet. Die Klasse p_0 entspricht dabei den RLS-90 (Teilstückverfahren). Um die volle Kompatibilität mit dem Teilstückverfahren zu er-

Dämpfungs-klasse	α	β	ξ	Zuschlag/ Abschlag in dB
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

reichen werden für die Klasse p_0 statt der Parameter aus dem Verfahren LGF die mittels Kurvenanpassung ermittelten Parameter α , β und ξ verwendet. Die Unterschiede zum Verfahren LGF sind allerdings minimal. Die Parameter für die acht Dämpfungsklassen, sowie beispielhaft die Auf- und Abschläge in 250 m Entfernung von der Quelle, sind in Tabelle 8-1 dargestellt. Der Parameter γ wurde nicht variiert und ist konstant 100. Die Klasse p_2 entspricht (für Entfernungen bis 1.000 m) einer Anpassung an die lauteste Klasse nach Nord2000. Bei der Zusammenstellung der Klassen wurde des Weiteren berücksichtigt, dass sich die Meteorologiedämpfung nicht linear zur Windgeschwindigkeit verhält, sondern die Dämpfung bei zunehmender Windgeschwindigkeit überproportional ausfällt. Die Dämpfungsklassen wurden dann so gewählt, dass der Zuschlag/Abschlag in 250 m Entfernung möglichst nah an den Messwerten der Dauermessstation liegt und gleichzeitig der Kurvenverlauf möglichst das Verhalten der mit Nord2000 und dem wellenbasierten Modell simulierten Kurven entspricht.

Vorschläge für eine Einteilung meteorologischer Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen, jeweils für Mit-, Quer- und Gegenwind, sind in Tabelle 8-2, Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4 gegeben. Diese Einteilung basiert auf den Messergebnissen an den Dauermessstationen in Kombination mit den Simulationsergebnissen und schließt – besonders dort wo Messergebnisse und Simulation nicht übereinstimmen – auch theoretische Überlegungen mit

Mitwind						
	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
S_1	m_2	m_1	p_0	p_1	p_1	-
S_3	p_0	p_0	p_1	p_2	p_2	-
S_5	p_1	p_1	p_1	p_2	p_2	-

Tab. 8-2: Einteilung der meteorologischen Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen für Mitwind

Querwind						
	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
S_1	m_2	m_2	m_1	m_1	-	-
S_3	p_0	m_1	m_1	p_0	-	-
S_5	p_1	p_0	p_0	-	-	-

Tab. 8-3: Einteilung der meteorologischen Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen für Querwind

Gegenwind						
	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
S ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₄	-	-
S ₃	p ₀	m ₁	m ₂	m ₃	-	-
S ₅	p ₁	p ₁	p ₀	-	-	-

Tab. 8-4: Einteilung der meteorologischen Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen für Gegenwind

ein. Für die Windklasse W₄ wurde aufgrund der geringen Datenlage nur für Mitwind eine Einteilung vorgenommen, für W₅ wurde für keine Windrichtung eine Einteilung vorgenommen, da entsprechende Daten fehlen.

Dazu sei $\alpha_{i,j,d} = \alpha^{p_k/m_k}$ der Parameter α zur Meteorologiekategorie S₁W_j bei Windrichtung d, entsprechend der Dämpfungskategorie p_k bzw. m_k. Für die Meteorologiekategorie S₁W₃ und Gegenwind wäre dies $\alpha_{1,3,GW} = \alpha^{m^4} = 20$. Analog ergeben sich die neuen Parameter $\beta_{i,j,d}$ und $\xi_{i,j,d}$. Der neue Mittelungspegel \tilde{L}_m ergibt sich dann aus L_m wie folgt:

$$\tilde{L}_m = L_m - \min\left(\frac{h_m}{s}\left(34 + \frac{600}{s}\right) - 4,8; 0\right) - \alpha_{i,j,d} \exp\left(-\frac{h_m}{s}\left(\beta_{i,j,d} + \frac{100}{s}\right)^{\xi_{i,j,d}}\right) \quad (28)$$

wobei h_m die mittlere Abstand zwischen dem Grund und der Verbindungslinie zwischen Emissionsort und Immissionsort und s dem Abstand zwischen Emissionsort und Immissionsort darstellt.

Wenn Informationen zur Häufigkeit der einzelnen meteorologischen Situationen inklusive der Windrichtung bekannt sind lässt sich daraus die Häufigkeit der einzelnen Dämpfungsklassen herleiten und aus dieser Verteilung wiederum ein korrigierter Mittelungspegel berechnen.

In Bild 8-2 ist für die Testaufgabe 1 der Vergleich zwischen den RLS-90, mit an die meteorologische Situation angepasstem Dämpfungsterm, und der Nord2000 dargestellt. Für eine bessere Einordnung sind zusätzlich zur jeweiligen Dämpfungskategorie (durchgezogene Kurve) auch die nächsthöhere bzw. -niedrigere Klasse dargestellt (gepunktet bzw. gestrichelt). Die in die entsprechenden Klassen fallenden simulierten Nord2000 Fälle sind farblich dargestellt. Im Folgenden sollte beachtet werden, dass die Nord2000 nicht für große Entfernungen von der Quelle validiert wurde. Daher sind insbesondere die Ergebnisse für Entfernungen < 500 m interessant. In

den Dämpfungsklassen m₂ bis p₂ fällt hier eine sehr gute Übereinstimmung der Nord2000-Simulationen mit den entsprechenden variierten RLS-90-Kurven auf. Insbesondere wird auch die laut Nord2000 (S₅W₃-Mitwind) lauteste Situation für Entfernungen < 500 m gut wiedergegeben. In den Dämpfungsklassen m₃ sowie m₄ sind dagegen deutliche Unterschiede zu erkennen, d. h. die Nord2000-Simulationen prognostizieren einen deutlich niedrigeren Schalldruckpegel als die variierten RLS-90. Dies liegt zum einen an der eher konservativen Wahl der Dämpfungsklassen, aber v. a. auch daran, dass so starke Dämpfungen in den Messungen nicht nachgewiesen werden konnten und daher keine entsprechend niedrige Dämpfungskategorie definiert wurde. Grundsätzlich können aber die mit Nord2000 simulierten Fälle sinnvoll durch die definierten Dämpfungsklassen wiedergegeben werden.

Für die Testaufgabe 4b ist dieser Vergleich in Bild 8-3 dargestellt. Auch hier sind für eine bessere Vergleichbarkeit zusätzlich zur jeweiligen Dämpfungskategorie (durchgezogene Kurve) die nächsthöhere bzw. -niedrigere Klasse dargestellt (gepunktet bzw. gestrichelt). Die in die entsprechenden Klassen fallenden simulierten Nord2000 Fälle sind farblich dargestellt. Im Vergleich zur einfachsten Geometrie (lange, gerade Straße) in Testaufgabe 1 fallen die Übereinstimmungen hier deutlich geringer aus. Während die Übereinstimmungen in den Klassen p₁ und p₂ noch gut sind, nimmt die Übereinstimmung in den Klassen p₀ bis m₄ speziell im Nahfeld deutlich ab. Im Fernfeld lassen sich dennoch relativ gute Übereinstimmungen erreichen. Dies lässt darauf schließen, dass hier weitere nicht-meteorologische Effekte eine Rolle spielen, die in den RLS-90 nicht erfasst werden. So bleibt beispielsweise in den Fällen m₂ bis m₄ der Schalldruckpegel in der Nähe des Emissionsortes zunächst konstant, während er im Falle der RLS-90 sofort deutlich abnimmt. Bis zur Entfernung von etwa 100 m ist dann die Pegelabnahme im Falle der RLS-90 stärker ausgeprägt als bei der Nord2000. Für Entfernungen > 100 m kehrt sich dies dann zunächst um und ist im weiteren Verlauf vergleichbar. Dieses Verhalten lässt sich nicht durch eine reine Änderung des Meteorologiedämpfungstermes erreichen. Entscheidend bei der Beurteilung überdurchschnittlich lauter Situationen sind jedoch die Klassen p₁ sowie insbesondere p₂ welche eine durchwegs gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Nord2000-Simulationen zeigen. Die leichte Unterschätzung der Nord2000-Pegel in p₁ lässt sich mit Hinblick auf die Ergebnisse aus

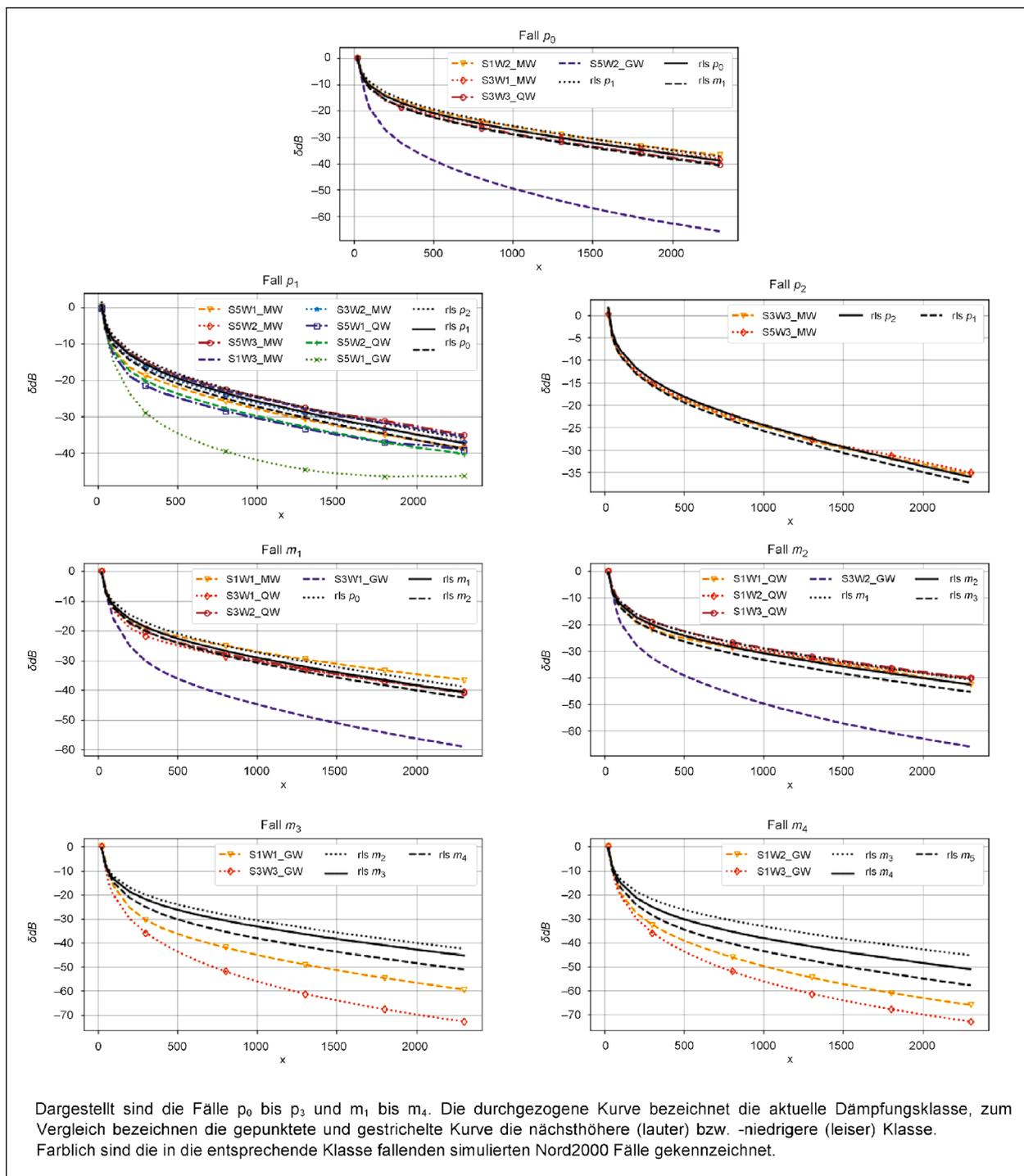


Bild 8-2: Vergleich zwischen RLS-90 und Nord2000 für Testaufgabe 1

Testaufgabe 1, für die in dieser Klasse eine etwas bessere Übereinstimmung gefunden wurde, am ehesten durch nicht in den RLS-90 erfassten (nicht-meteorologische) Effekte erklären.

Um das Verfahren nicht zu kompliziert zu gestalten, wurde die Anzahl der Dämpfungsklassen auf 8 begrenzt. Aus der Nord2000 ist bekannt, dass dort

theoretisch viele meteorologische Situationen sehr ähnliche Dämpfung aufweisen, deren Unterscheidung nicht unbedingt nötig ist. Zudem sind die Berechnungen der Nord2000 (bereits ohne Meteorologie) deutlich detaillierter als im Falle der RLS-90, sodass eine nachträgliche sehr feine Unterscheidung meteorologischer Situationen nicht sinnvoll erschien. Des Weiteren konnten die teils sehr star-

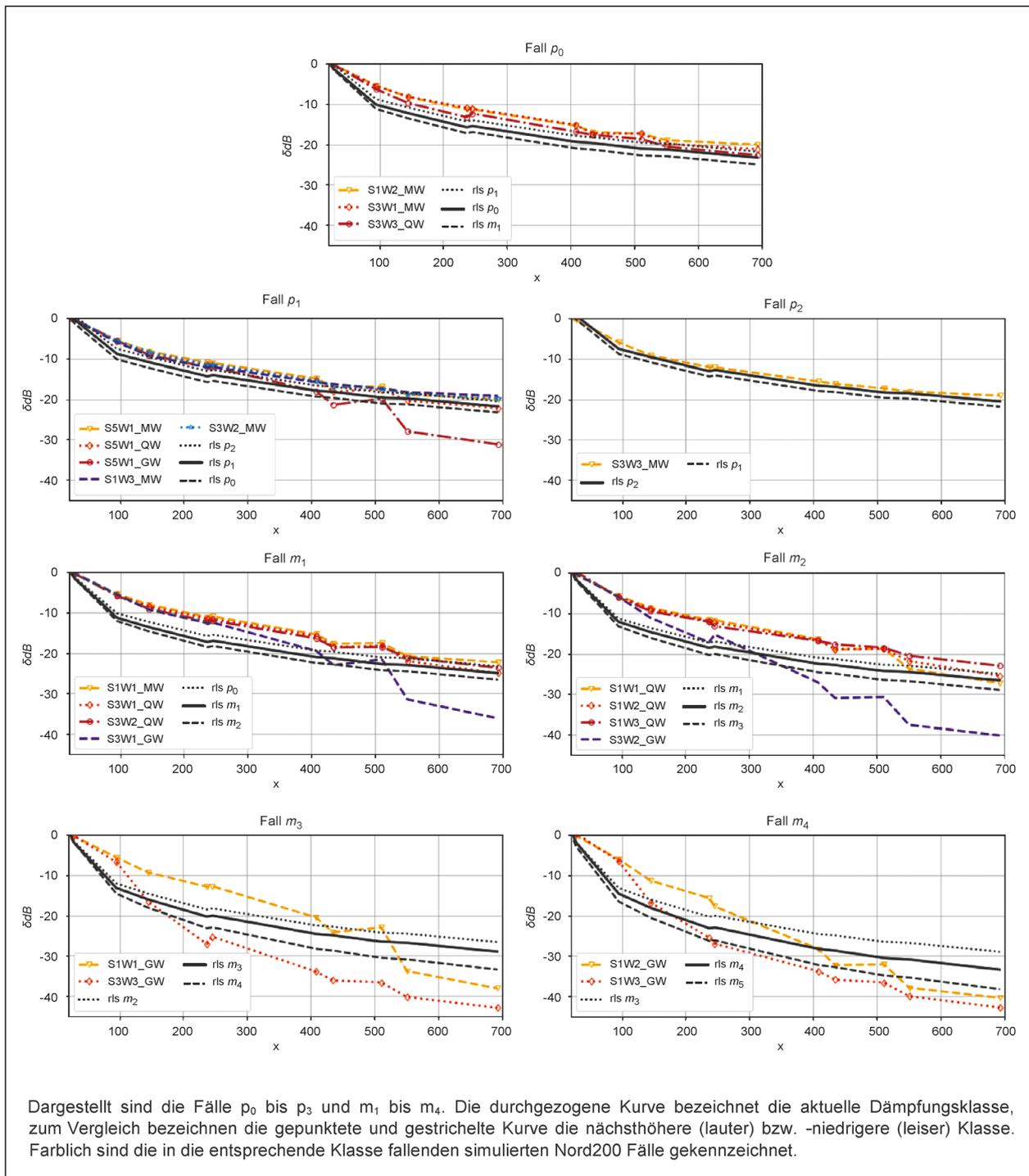


Bild 8-3: Vergleich zwischen RLS-90 und Nord2000 für Testaufgabe 4b

ken Dämpfungen bei Gegenwind wie sie in der Nord2000 berechnet werden im Feldversuch nicht nachgewiesen werden. Diese sehr starken Dämpfungen wurden daher im Vorschlag nicht berücksichtigt. Die Zusammenstellung der Dämpfungsclassen erfolgt zum einen aus theoretischen Überlegungen sowie anhand der Messwerte an der Dauermeßstation. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit bei Gegenwind steigt die Dämpfung nicht-

linear an. Daher wurden für Gegenwind bei zunehmender Windgeschwindigkeit größere Classenabstände gewählt. Damit steigt aber auch die Variation innerhalb der Classen an. Um den Pegel nicht zu unterschätzen wurden die Classengrenzen dabei eher konservativ gewählt. Bei der theoretischen Betrachtung (Vergleich der Dämpfungsclassen mit der Nord2000, Bild 8-2) ist weiterhin zu beachten, dass die maximale Entfernung von der Quelle mit

2.500 m sehr groß ist und in diesem Bereich ohnehin keine große Aussagekraft/Genauigkeit erwartet werden kann. Die Verfahren und Dämpfungskurven sind (in beiden Verfahren) für deutlich kürzere Distanzen optimiert.

8.2 Ausformulierung eines Vorschlags

Als Ergänzung wird die folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

Zur Berücksichtigung abweichender meteorologischer Bedingungen nach den Meteorologieklassen $S_i W_j$ und Windrichtungen d , kann der neue Mittelungspegel \tilde{L}_m aus L_m nach Formel (28) berechnet werden. Nach Zuordnung der zu berechnenden Wettersituation in die Stabilitäts- bzw. Windgeschwindigkeitsklasse nach Tabelle 2-1 bzw. Tabelle 2-2 und der gegebenen Windrichtung kann mithilfe der Tabelle 8-2, Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4 die Dämpfungsklasse ermittelt werden und anschließend die zugehörigen Parameter aus Tabelle 8-1 entnommen werden.

Im folgenden Rechenbeispiel wird dieses Vorgehen kurz erläutert. Dazu sei L_m der berechnete Mittelungspegel bei standardisierten meteorologischen Bedingungen in $s = 500$ m Entfernung von der Quelle und einer beliebigen Höhe h_m . Nun soll der korrigierte Pegel \tilde{L}_m aus bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s bei neutraler Schichtung und Mitwindbedingungen berechnet werden. Laut Tabelle 8-2 (Dämpfungsklassen bei Mitwind) fallen diese meteorologischen Bedingungen in die Dämpfungsklasse p_1 . Damit sind laut Tabelle 8-1 die folgenden Parameter anzunehmen: $(\alpha, \beta, \xi) = (3,3; 7,5; 1,3)$. Der korrigierte Pegel wird nun nach Formel (28) wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_m &= L_m - \min\left(\frac{h_m}{s}\left(34 + \frac{600}{s}\right) - 4,8; 0\right) - \alpha \exp\left(-\frac{h_m}{s}\left(\beta + \frac{100}{s}\right)^\xi\right) \\ &= L_m - \min\left(\frac{h_m}{500}\left(34 + \frac{600}{500}\right) - 4,8; 0\right) - 3,3 \exp\left(-\frac{h_m}{500}\left(7,5 + \frac{100}{500}\right)^{1,3}\right) = \\ &= L_m - \min(0,0704h_m - 4,8; 0) - 3,3 \exp(-0,02841h_m) \end{aligned}$$

Für exemplarische Höhen $h_m = 0,5$ m, $1,0$ m, $2,0$ m erhalten wir:

$$\tilde{L}_m(0,5) \approx L_m(0,5) + 1,511 \text{ dB},$$

$$\tilde{L}_m(1,0) \approx L_m(1,0) + 1,541 \text{ dB},$$

$$\tilde{L}_m(2,0) \approx L_m(2,0) + 1,558 \text{ dB}.$$

Der korrigierte Pegel in 500 m Entfernung von der Quelle liegt also unter den oben genannten Voraussetzungen rund 1,511 dB bis 1,558 dB über dem nach RLS-90 berechneten Pegel.

8.3 Verifizierung durch Anwendung auf das Untersuchungsgebiet

Zur Verifizierung der vorgeschlagenen Methode wurde diese auf das Untersuchungsgebiet angewendet und die Ergebnisse mit den Messwerten verglichen. Dazu werden die Ergebnisse zunächst grafisch dargestellt. Anschließend folgt ein rechnerischer Vergleich der RLS-90 mit und ohne Variation des Dämpfungsparameters, wozu jeweils die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Messergebnissen und den Rechnungen ermittelt wurde.

Bild 8-4 zeigt die Anwendung der Dämpfungsklassen auf die RLS-90 für einen Teil der in Sulzemoos durchgeführten Messungen. Dargestellt sind die Kurven der entsprechenden Dämpfungsklassen als durchgezogene Linie sowie die Standard-RLS-90 als grüne durchgezogene Linie. Die Messungen sind farblich sowie durch verschiedene Symbole dargestellt. Eine Auswertung der 25 und 75 Perzentilen der Messungen ergab (relativ unabhängig von der meteorologischen Situation) einen typischen Interquartilsabstand von rund 6 dB. Dies ist in den Abbildungen durch die gelb schattierte Fläche illustriert, welche den Bereich von ± 3 dB um die Kurve der Dämpfungsklasse bezeichnet. Damit kann abgeschätzt werden, ob sich die Abweichung zwischen Messung und Berechnung im typischen Schwankungsbereich der Messung befindet (nicht gleichbedeutend mit Streuung/Varianz, der Interquartilsabstand bezieht sich nicht auf den Mittelwert, sondern Median und berücksichtigt auch nicht die Stichprobengröße).

Es zeigt sich über alle Dämpfungsklassen hinweg, dass die Messwerte teils deutlich von den Berechnungen abweichen und die Abweichung auch innerhalb einer meteorologischen Situation deutlich schwanken kann (d. h. die Messwerte liegen für einige Messstationen teils sehr nah an der berechneten Kurve und weichen an anderen Messpunkten weit davon ab). Allein aus dem Bild kann daher nicht bestimmt werden, ob die vorgeschlagene Methode Vorteile gegenüber der Standard-RLS-90 hat.

Um das Standardverfahren mit dem variierten Verfahren vergleichen zu können, wurde deshalb für

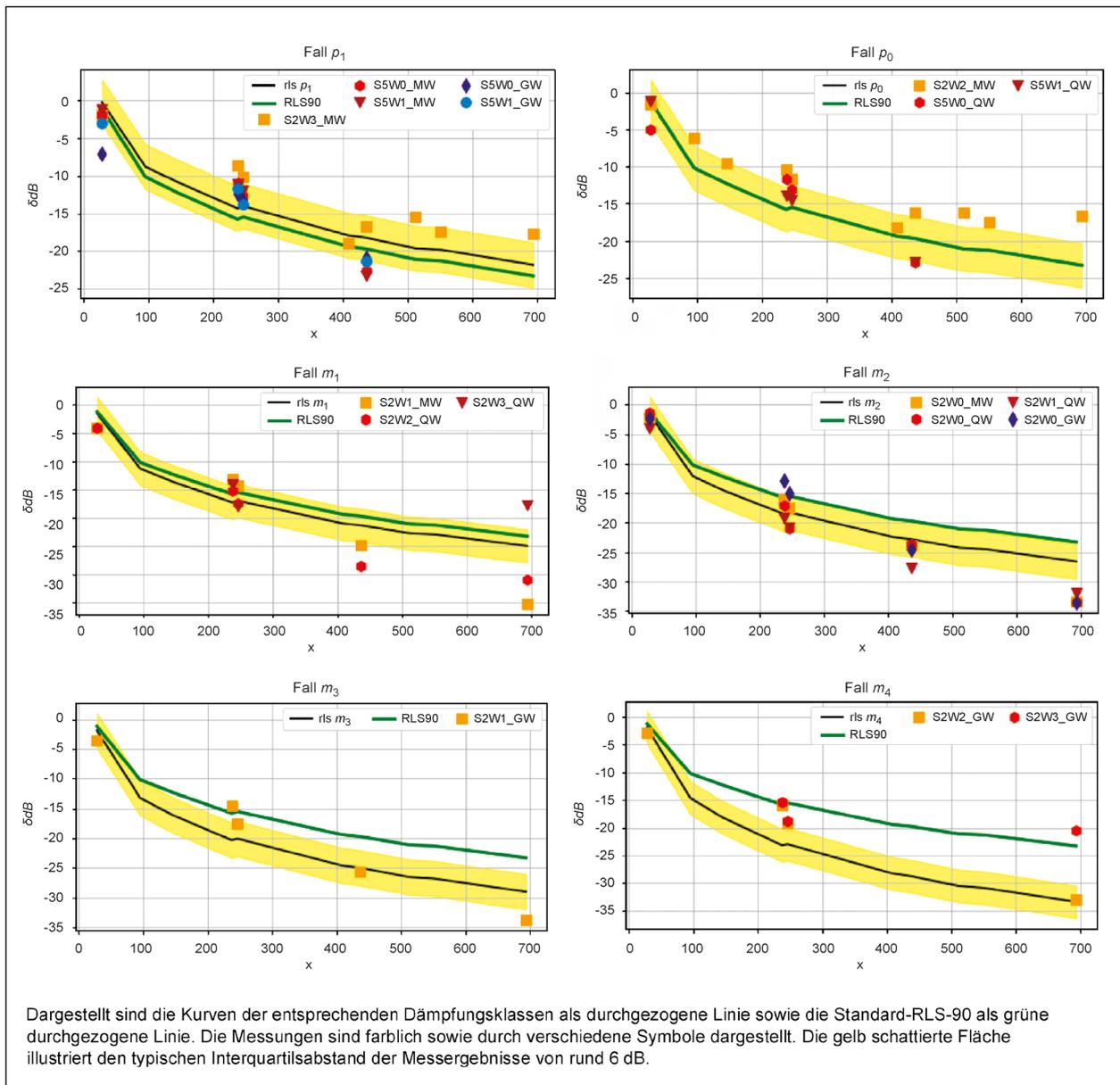


Bild 8-4: Anwendung der vorgeschlagenen Dämpfungsklassen auf das Untersuchungsgebiet Sulzemoos

beide Verfahren die mittlere quadratische Abweichung (MSE) zwischen Messung und Berechnung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-5 dargestellt. Dabei bezeichnet der Suffix „var“ die RLS-90 Variante mit an die Meteorologie angepasstem Dämpfungsterm, während der Suffix „RLS90“ die Standardberechnung nach RLS-90 bezeichnet. In der letzten Spalte ist die Differenz zwischen MSE_{var} und MSE_{RLS90} gegeben, d. h. eine negative Differenz bedeutet, dass die Berechnung mit variiertem Dämpfungsterm einen geringeren Fehler zwischen Berechnung und Messung aufweist, während ein positives Vorzeichen bedeutet, dass die Berechnung mittels RLS-90 weniger stark von der Messung abweicht, als die Variante.

Insgesamt zeigt sich, dass die Berechnung mit der neuen Variante in den meisten Fällen einen teils deutlich geringeren Fehler aufweist als die Standard-Rechenmethode. In vielen Fällen kann eine Verringerung des Fehlers von über 50 Prozent erreicht werden. Wie zu erwarten fällt die Verbesserung umso deutlicher aus, je weiter die Dämpfungsklasse von ρ_0 abweicht. Die starke Abweichung im letzten Fall (S_2W_3 GW) kann nicht abschließend erklärt werden. Am wahrscheinlichsten ist hier aber entweder ein Messfehler oder ein Störgeräusch. Die Fälle S_2W_3 GW und S_2W_2 GW weichen an den ersten Messpunkten kaum voneinander ab, am letzten Messpunkt ist es dafür bei S_2W_3 GW deutlich lauter (~ 15 dB). Dies erscheint unwahrschein-

Dämpfungsklasse	Meteorologie	MSE _{var}	MSE _{RLS90}	MSE _{var} – MSE _{RLS90}
p ₁	S ₂ W ₃ MW	11,7	20,8	-9,1
	S ₅ W ₀ MW	8,8	10,1	-1,3
	S ₅ W ₁ MW	10,2	11,6	-1,4
	S ₅ W ₀ GW	14,7	13,5	+1,2
	S ₅ W ₁ GW	5,9	6,3	-0,4
p ₀	S ₂ W ₂ MW	16,4	16,4	0
	S ₅ W ₀ QW	12,0	12,0	0
	S ₅ W ₁ QW	3,4	3,4	0
m ₁	S ₂ W ₁ MW	29,8	37,4	-7,6
	S ₂ W ₂ QW	19,7	29,8	-10,1
	S ₂ W ₃ QW	21,7	13,6	+8,1
m ₂	S ₂ W ₀ MW	10,8	24,7	-13,9
	S ₂ W ₀ QW	11,8	30,9	-19,1
	S ₂ W ₁ QW	13,1	37,5	-24,4
	S ₂ W ₀ GW	19,1	27,9	-8,8
m ₃	S ₂ W ₁ GW	13,0	31,4	-18,4
m ₄	S ₂ W ₂ GW	16,8	27,1	-10,3
	S ₂ W ₃ GW	82,1	6,0	+76,0

Der Suffix „var“ bezeichnet die RLS-90 mit an die Meteorologie angepasstem Dämpfungsterm, während der Suffix „RLS90“ die Standard RLS-90 bezeichnet.

Tab. 8-5: Mittlere quadratische Abweichung (MSE) zwischen Messung und den beiden Normvarianten

lich, da es bei der gegenüber S₂W₂ GW höheren Windgeschwindigkeit bei Gegenwind eigentlich zu einem geringeren Pegel kommen müsste.

Die Validierung wurde für Entfernungen bis rund 700 m von der Quelle durchgeführt. Dabei wurden 5 Stabilitätsklassen, 3 Windrichtungsklassen (Mitwind, Querwind und Gegenwind) sowie 6 Windgeschwindigkeitsklassen (W₀ bis W₅) berücksichtigt. An den Dauermessstationen konnten dabei von den 90 (5x3x6) theoretisch möglichen Fällen rund die Hälfte ausgewertet werden. An den Intensivmessstationen ist die Anzahl der auswertbaren Fälle aufgrund des wesentlich kürzeren Messzeitraums deutlich geringer. Im Vergleich dazu wurde die Nord2000 mit rund 500 Fällen [34] validiert. Die durchgeführte Validierung kann daher nur ein erster Anhaltspunkt für die Güte des vorgeschlagenen Verfahrens sein. Des Weiteren ist zu beachten, dass, obwohl bei der Wahl des Messgebietes auf eine möglichst ungestörte Schallausbreitung sowie eine ebene Topografie geachtet wurde, grundsätzlich jeder Messort unter anderem aufgrund seiner spezifischen Topografie, Bebauung, Bewuchs und Meteorologie einzigartig ist und damit lokale Phänomene welche die Schallausbreitung beeinflussen nicht ausgeschlossen werden können. Durch Messungen an verschiedenen Orten können diese Effekte aber herausgemittelt werden.

8.4 Anwendungsgrenzen des Vorschlags

Im Rahmen des Projektes wurde eine exemplarische Datenbank aufgebaut und basierend darauf ein Vorschlag für eine Erweiterung der RLS erarbeitet. Der Vorschlag gilt für den Fall einer langen, geraden Straße; nur so konnte eine Erweiterung der RLS erarbeitet werden, die einfach in der Anwendung ist bzw. keine Änderung der bestehenden Rechenvorschrift verlangt. Zudem erlaubt der Boden- und Meteorologiedämpfungsterm des Verfahrens langer, gerader Fahrstreifen (LGF) eine deutlich bessere Anpassung an verschiedene meteorologische Bedingungen, als der Dämpfungsterm des Teilstückverfahrens (TS).

Gleichzeitig können die Parameter des Dämpfungsterms im Verfahren LGF so angepasst werden, dass die Dämpfungskurve der des TS-Verfahrens entspricht (vgl. Kapitel 8.1.3 sowie Bild 8-1). Sollen verschiedene meteorologische Bedingungen berücksichtigt werden, so müssen diese je Teilstück des entsprechenden Straßenabschnittes angepasst werden, da mit einer Änderung der Straßenführung in der Regel auch mindestens eine Änderung der Windrichtung auftritt. Insofern werden aus meteorologischer Sicht ohnehin jeweils nur gerade Teilabschnitte betrachtet. Im Falle komplexerer Straßenführungen müssen alle Teilstücke mit unterschiedlicher Meteorologie einzeln betrachtet werden (vgl. Kapitel 8.2). Damit ist das Verfahren nach Modifika-

tion der Parameter auch auf das TS-Verfahren und im Weiteren auch auf die zukünftig zu verwendende RLS-19 anwendbar, die kein Verfahren nach LGF vorsieht.

Weiterhin wurden mit dem erhaltenen Datensatz keine Ergebnisse in Situationen mit straßennaher Abschirmung (z. B. Schallschutzwände) ermittelt. Um den Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf das Abschirmmaß (insbesondere die darin enthaltene Witterungskorrektur zur Berücksichtigung der Strahlenkrümmung) zu ermitteln, müssten vergleichbare Messungen in einem Messgebiet mit Abschirmung durchgeführt werden.

Der Anwendungsbereich des Verfahrens ist auf Straßenverkehrslärm als Schallquelle beschränkt. Emissionen von anderen Schallquellen können aufgrund abweichender spektraler Verteilung (z. B. überwiegend hochfrequenter Schienenverkehrsgerausche oder tieffrequente Geräusche aus anderen Quellen) mit diesem Verfahren zwar grundsätzlich berücksichtigt werden, jedoch müssten die Parameter entsprechend angepasst werden.

Zusammenfassend ist das vorgeschlagene Verfahren auf folgende Anwendungsfälle eingeschränkt:

- Emissionen des Straßenverkehrs,
- geradliniger Verlauf der Straße in ebenem Gelände,
- keine straßennahe Abschirmung vorhanden.

Insgesamt ist zu beachten, dass das hier vorgeschlagene Verfahren, sowie die Einteilung der Dämpfungsklassen, wie bereits in Kapitel 8.1 und Kapitel 8.3 geschildert, auf den Messungen eines einzelnen Messortes sowie einiger ergänzender Simulationen beruht. Des Weiteren konnten speziell starkwindige Situationen nicht ausgewertet werden, da diese im Messgebiet nur sehr selten vorkommen. Die in Kapitel 8.3 durchgeführte Validierung zeigt zwar Verbesserungen bei Berücksichtigung konkreter meteorologischer Einzelereignisse gegenüber der RLS-90 ohne explizite Berücksichtigung verschiedener meteorologischer Situationen, dies garantiert aber noch keine Übertragbarkeit auf andere Messgebiete, da die Parameter in Hinblick auf die Messungen im Messgebiet Sulzemoos optimiert wurden. Bevor das hier vorgeschlagene Verfahren in die praktische Anwendung kommen kann muss, um die Korrektheit des Verfahrens zu überprüfen, eine umfangreiche Validierung erfolgen. Dies muss bei Bedarf auch eine Korrektur der Para-

meter sowie der Einteilung der meteorologischen Situationen in die Dämpfungsklassen enthalten. Dabei sollte auch der geplante zukünftige Anwendungsbereich der vorgeschlagenen Methode (d. h. bis zu welchem Abstand von der Quelle die Methode gültig sein soll) berücksichtigt werden.

9 Aufbau einer Datenbank mit Emissionen, Ausbreitung und Immissionen aus einem Messgebiet

Für das Untersuchungsgebiet wurde eine Datenbank im csv- bzw. Excel-Format aus den Messdaten aufgebaut, die Geräuschemissionen der Straße, detaillierte Wetterdaten sowie die daraus errechneten Geräuschimmissionen beinhaltet, um die vorliegenden Lärmsituationen wetterkorrigiert darstellen zu können. Dazu wurden die Daten aus den einzelnen Quellen gesammelt, „zeitlich synchronisiert“ und in aggregierter Form in Excel-Tabellen aufbereitet. Des Weiteren stehen, mit Ausnahme der von der Autobahndirektion Südbayern zur Verfügung gestellten Verkehrsdaten, alle Rohdaten im Sekundentakt zur Verfügung.

9.1 Rohdaten

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die Rohdaten-Tabelle gegeben werden.

Die Rohdatentabelle enthält die folgenden Daten: Datum und Uhrzeit, Schallpegel der Dauer- und Intensivmessstationen im Sinne eines LAF_{eq} (IMS_1-6 sowie DMS_1 und DMS_2) sowie Temperatur (in °C), Druck (in hPa), Luftfeuchte (in %), Windgeschwindigkeit (in m/s), Windrichtung (in °) und Niederschlag, von beiden Dauermessstationen (DMS_1, DMS_2). Die Auflösung der Windrichtungsdaten der DMS_1 beträgt dabei 22,5°. Das Kürzel IMS_1H bezeichnet die Vergleichsmessung am Messpunkt IMS_1, allerdings auf rund 4 m Höhe, was etwa der Höhe der Fahrbahn entspricht. Zusätzlich liegen die Emissionsrechnungen in den vier betrachteten Varianten vor. Nicht vorhandene Daten werden mit NaN bezeichnet. Meteorologische Daten mit dem Kürzel DMS1 sind im Messzeitraum größtenteils als 10-Minuten-Mittel gemessen worden. Die Verkehrsdaten lagen als 1-Minuten-Mittel vor, sodass auch die berechneten Emis-

sionswerte als 1-Minuten-Mittel vorliegen. Gemittelte Daten wurden daher über den Mittelungszeitraum als konstant betrachtet; in der .csv-Datei stehen an dieser Stelle duplizierte Werte. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die weiteren Eigenschaften der Rohdaten-Tabelle gegeben werden. Diese Informationen helfen insbesondere beim Einlesen der Daten und sind zusätzlich als readme verfügbar.

- Trennzeichen durch Semikolon (;)
- Dezimaltrennung durch Punkt (.)
- Header (Spaltennamen): die konkreten Bezeichnungen sind im readme verfügbar
- Zeitformat: Y-m-d H:M:S, Datum und Zeit sind in der ersten Spalte (Date_time) gespeichert.
- Encoding: utf-8
- Emissionsberechnungen: Die letzten vier Spalten enthalten die berechneten Emissionswerte nach RLS-90, bzw. mittels leicht modifizierter RLS-90, wie im Schlussbericht beschrieben. Dabei bezeichnen:
 - LmE: Emissionswert streng nach RLS-90 berechnet,
 - LmE_open: Emissionswert nach RLS-90 aber mit tatsächlichen Geschwindigkeiten, diese können über der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h liegen,
 - LmE_MAvg: Emissionswert streng nach RLS-90 berechnet und mit 5-Minuten gleitendem Mittel geglättet,
 - LmE_open_MAvg: Emissionswert nach RLS-90 aber mit tatsächlichen Geschwindigkeiten berechnet und mit 5-Minuten gleitendem Mittel geglättet.

Zusätzlich wird ein Python-Skript zum Einlesen der Rohdaten-Tabelle zur Verfügung gestellt. Das Skript benötigt lediglich das Modul pandas. Die Funktionsweise des Skriptes ist in selbigem als Kommentar ausführlich erläutert.

9.2 Aggregierte Messdaten

Die Messdaten werden zusätzlich zur Rohdaten-Tabelle auch in aggregierter Form zur Verfügung gestellt. Dies ermöglicht einen schnellen Vergleich der Mittelungspegel bei verschiedenen meteorolo-

gischen Situationen an allen Messpunkten. Dazu wurden die Daten wie in Kapitel 7.3.2 beschrieben gefiltert und anschließend an jedem Messpunkt und für jede Messstation der Mittelungspegel berechnet. Diese aggregierten Daten liegen in Form eines Excel-Worksheets vor. Jeder Reiter entspricht dabei einem Messpunkt. Die Tabellen enthalten die Differenz-Schalldruckpegel zur Referenzschallquelle (ΔL), die Anzahl der 1-Sekunden-Messwerte (n) für die konkrete Situation, sowie die Standardabweichung (σ) je Windrichtungsintervall für alle Kombinationen aus Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklasse, wie bereits in Tabelle 7-7 dargestellt. In der Kopfzeile jedes Reiters finden sich die folgenden Informationen:

- Station = Messstation (z. B. IMS1, DMS2),
- Emission: Informationen zur berechneten Emission. Dabei bedeutet RLS90_{o,mavg} dass die Emission nach RLS-90, mit nach oben offener Geschwindigkeit berechnet und mit einem gleitendem Mittel geglättet wurde,
- Stab.-source: Quelle für die Berechnung der Stabilitätsklasse (hier COSMO-DE),
- Meteo: Quelle für die Meteorologie (MoPa/(DLR) bedeutet: DMS1-Daten wurden, wo nicht vorhanden, durch DMS2-Daten ergänzt),
- Time-resolution: Zeitliche Auflösung der Daten aus denen die aggregierten Daten gewonnen wurden (hier 1 Sekunde).

Mithilfe dieser aggregierten Daten (Differenzschallpegel + Häufigkeit) können auch die Mittelungspegel anderer Normen berechnet werden indem die jeweiligen Situationen (z. B. alle ausbreitungsgünstigen Situationen), mit Berücksichtigung der Häufigkeit n , gemittelt werden.

9.3 Ergebnisdaten der Testaufgaben

Die Ergebnisse der Testaufgaben aus Kapitel 5 liegen ebenfalls in Form eines Excel-Worksheets vor. Die Tabellen enthalten die Bezeichnung der Testaufgabe, die Bezeichnung der verwendeten Rechenvorschrift, den Abstand zur Quelle in m, die Schalldruckpegel in dB(A), die Differenzschalldruckpegel in dB(A), Angaben zur Windrichtung, zur Windsituation, zur Windgeschwindigkeitsklasse und zur Stabilitätsklasse sowie in einigen Fällen eine Bemerkung und die Bezeichnung der Immissionsorte für Testaufgabe 4a und 4b.

Im Excel Worksheet entspricht jeder Reiter einer Testaufgabe. Die Kopfzeile eines Reiters enthält die folgenden Informationen:

- Testaufgabe: Bezeichnung der Testaufgabe (z. B. TA 1, TA 4a),
- Vorschrift: Bezeichnung der verwendeten Rechenvorschrift (z. B. VDI 2714, NORD2000),
- Abstand zur Quelle: vertikaler Abstand zwischen Quelle und Immissionsort in m,
- Pegel: Schalldruckpegel in dB(A),
- Pegel, diff : Differenzschalldruckpegel in dB(A) bezogen auf den jeweiligen Referenzpunkt wie in Kapitel 5 beschrieben,
- Windrichtung: Windrichtung in °, 0° entspricht hierbei Wind aus Norden, 90° entspricht Wind aus Osten,
- Windsituation: Bezeichnung der Windsituation (z. B. homogen, Gegenwind),
- Windgeschwindigkeitsklasse: Bezeichnung der verwendeten Windgeschwindigkeitsklasse nach NORD2000 oder Harmonoise,
- Stabilitätsklasse: Bezeichnung der verwendeten Stabilitätsklasse nach NORD2000 oder Harmonoise,
- Bemerkung: zusätzliche Bemerkung z. B. zum verwendeten Spektrum oder Rechenverfahren für Bodeneffekte,
- Bezeichnung IO: Bezeichnung der in Testaufgabe 4 verwendeten Immissionsorte (z. B. IMS1, DMS2).

Zusätzlich werden die Ergebnisdaten der Testaufgabe als csv-Datei zur Verfügung gestellt.

10 Schlussfolgerung und Ausblick

In der vorliegenden Untersuchung wurden zunächst die vorhandenen Rechenmethoden zur Schallausbreitung gesichtet und hinsichtlich deren Berücksichtigung meteorologischer Ausbreitungsparameter klassifiziert. Dabei zeigte sich eine offensichtliche Dreiteilung in Methoden ohne explizite Berücksichtigung meteorologischer Parameter, Methoden mit deren eingeschränkter Berücksichtigung und Methoden mit deren Berücksichtigung.

Die Berechnungen der Testaufgaben mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren hat gezeigt, dass der Einfluss der Witterungsbedingungen bei sonst gleichen Randparametern kann bei Entfernungen ab ca. 200 m jedoch schon 10 bis knapp unter 20 dB(A) betragen kann, sodass eine Quantifizierbarkeit des Einflusses durchaus wünschenswert ist. Es besteht für den Einzelfall also ein Bedarf an einfachen, empirischen Prognosemethoden zur Berücksichtigung meteorologischer Parameter basierend bzw. aufsetzend auf die in Planungsverfahren verbindlichen Rechenmethoden der RLS-90 bzw. RLS-19.

Ausgangsbasis für den in dieser Untersuchung unterbreiteten Vorschlag für ein Prognosemodell sind Dauermessungen und stichprobenartige Messreihen bei speziellen meteorologischen Bedingungen in dem Untersuchungsgebiet Sulzemoos an der Bundesautobahn 8. Das Untersuchungsgebiet kommt dabei einer Situation einer langen, geraden Straße (entsprechend RLS-90) näherungsweise gleich. Die Parametrisierung des Verfahrens durch Anpassung an die bei unterschiedlichen Bedingungen gemessenen Schallausbreitungskurven lässt nun eine einfache abstandsabhängige Prognose der Schallausbreitung mittels acht Dämpfungsklassen für unterschiedlichste Witterungsbedingungen zu.

Die vorgeschlagene Methode lässt Prognosen für linienförmige, gerade Schallquellen in überwiegend ebenem Gelände bei ungehinderter (d. h. nicht durch Hindernisse unterbrochene) Schallausbreitung zu. Die zugrunde liegende spektrale Geräuschverteilung des Straßenverkehrs lässt zunächst keine Übertragung auf andere Lärmquellen mit davon abweichendem Spektrum zu, da die Parametrisierung für A-bewertete Summenpegel ermittelt wurde. Die Methodik ließe sich jedoch bei Vorliegen von Messdaten auch an andere Geräuschquellen mit abweichenden Parametern anpassen. Ebenso ist eine Adaption an die Rechenmethode der RLS-19 denkbar, wenn die Bedingungen einer geraden Straße mit ungehinderter Ausbreitung zutreffen und die Anpassung in Form einer Korrektur des aus dem Teilstückverfahren aufsummierten Schallimmissionspegels am Berechnungspunkt umformuliert wird.

Das vorgeschlagene Verfahren sollte durch Messungen und Rechnungen an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen verifiziert werden. Damit ließe sich

gleichzeitig die Aussagesicherheit des vorgeschlagenen Verfahrens erhöhen. Das Rechenverfahren der RLS-90 ist ein in Planrechtsverfahren verwendetes Verfahren mit einer statistisch abgesicherten Grundlage. Von daher sollte auch eine (wenn auch nicht verbindliche) Ergänzung des Verfahrens eine vergleichbare statistische Absicherung der eingesetzten Parameter aufweisen. Um eine Validierung vergleichbar mit der Nord2000 zu erreichen (500 ausgewertete Fälle, siehe [34]) müssten Messungen an mindestens 6-7 topografisch einfachen, jedoch meteorologisch möglichst unterschiedlichen Standorten durchgeführt werden. Dies ergibt sich aus der Anzahl möglicher Situationen je Messort (3 Windrichtungen x 5 Stabilitätsklassen x 6 Windgeschwindigkeitsklassen = 90 Fälle), wobei zu berücksichtigen ist, dass nicht alle dieser Fälle in der Praxis messbar sind da sich einige Kombinationen gegenseitig ausschließen. Zudem sind die lokalen meteorologischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. So wird man an der Küste verhältnismäßig viele starkwindige Tage finden, während es in Süddeutschland vergleichsweise schwachwindig ist. Die Messdaten zur Validierung sollten dabei möglichst mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Hz vorliegen, da, wie bereits in Kapitel 7.5 erläutert, eine Mittelung der Daten zu einem deutlich weniger genauen Ergebnis führt. Für die Validierung des Verfahrens sowie einer mögliche Korrektur der Parameter und Einteilung der Dämpfungsklassen ist jedoch eine hohe Genauigkeit nötig. Darüber hinaus wären je Messort Langzeitmessungen an mindestens 2, besser jedoch 3 Positionen mit unterschiedlicher Distanz zur Quelle (Emission, ca. 240 m Entfernung zur Quelle, Fernfeld) empfehlenswert um einen möglichst guten Fit der Daten mit den Berechnungen zu erreichen.

Außerdem wäre eine Vertiefung der Methode durch Einbeziehung von Situationen mit Abschirmungen durch Hindernisse (insbesondere Schallschutzwände) oder nicht ebenes Gelände wünschenswert. Hierfür wären jedoch weitere Messreihen notwendig.

Mit dem resultierenden Verfahren ergibt sich die Möglichkeit, auf Basis des vorhandenen Rechenverfahrens der RLS-90 bzw. zukünftig RLS-19 durch ein einfaches empirisches Verfahren die Schallbelastung bei jeder beliebigen (von der der RLS zugrundeliegenden Mitwindsituation abweichenden) meteorologischen Situation zu ermitteln. Diese Zusatzinformation ermöglicht eine bessere Einordnung der Rechenergebnisse der verbindlichen Verfahren der RLS.

Literatur

- [1] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)
- [2] OSTASHEV, V. E.: Acoustics in moving inhomogeneous media, E&FN Spon, 1997, ISBN 0-419-22430-0
- [3] VDI 2714:1988-01; Schallausbreitung im Freien
- [4] ATTENBOROUGH, K.: Sound Propagation in the Atmosphere. In: ROSSING, T. D. (Ed.), Springer Handbook of Acoustics, 2007, ISBN: 978-0-387-30446-5
- [5] HEIMANN, D.; BLUMRICH, R.: Anwendungsbeispiele numerischer Schallausbreitungssimulationen mit konsistenter Berücksichtigung der Atmosphäre und des Bodens. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 49 (2002)
- [6] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen: RLS-90, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Ausgabe 1990, Berichtigter Nachdruck Februar 1992, Köln 1990
- [7] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV), Anlage 2 (zu § 4) Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03)
- [8] KEPHALOPOULOS, S.; PAVIOTTI, M.; ANFOSSO-LÉDÉE, F.: Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU); Report EUR 25379 EN, 2012
- [9] SALOMONS, E. M.: Computational Atmospheric Acoustics, Springer, 2001, ISBN 978-94-010-0660-6
- [10] DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, Beuth-Verlag, 1996
- [11] Road noise prediction 2 -Noise propagation computation method including meteorological effects (NMPB 2008); Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements; Juni 2009

- [12] Nord2000: Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model, DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, 2000
- [13] Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning; Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20; 20 January 2005
- [14] SALOMONS, E.; van MAERCKE, D.; DEFRANCE, J.; de ROO, F.: The Harmonoise sound propagation model, *Acta acustica united with acustica*, 97(1):62-74, 2011
- [15] VBUS – Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Straßen, vom 22. Mai 2006; BAnz. Nr. 154a vom 17.08.2006, S. 30
- [16] FHWA Traffic Noise Model®, User's Guide, (Version 2.5 Addendum), U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration; Final Report April 2004
- [17] VDI 2720 Blatt 1:1997-03: Schallschutz durch Abschirmung im Freien
- [18] Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2269) geändert worden ist
- [19] Sportanlagenlärmschutzverordnung vom 18. Juli 1991 (BGBl. I S. 1588, 1790), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Juni 2017 (BGBl. I S. 1468) geändert worden ist
- [20] Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm – Erklärung der Kommission im Vermittlungsausschuss zur Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm; Amtsblatt Nr. L 189 vom 18/07/2002 S. 0012 – 0026
- [21] BUB – Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen, (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) vom 20. November 2018 (BAnz AT 28.12.2018 B7)
- [22] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV): RVS 04.02.11 Umweltschutz, Lärm und Luftschadstoffe, Lärmschutz vom 1. März 2006
- [23] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): SonRoad, Berechnungsmodell für Straßenlärm; Schriftenreihe Umwelt NR. 366
- [24] HMSO, 1988: Calculation of Road Traffic Noise, Department of Transport Welsh Office; ISBN 0-11-550847-3
- [25] SALOMONS, E.: Computational Atmospheric Acoustics, Springer Science & Business Media, 2012
- [26] DEFRANCE, J.; SALOMONS, E.; NOORDHOEK, I.; HEIMANN, D.; PLOVSING, B.; WATTS, G.; JONASSON, H.; ZHANG, X.; PREMAT, E.; SCHMICH, I. et al.: Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(2):213 – 227, 2007
- [27] DELANY, M. E.; BAZLEY, E. N.: Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied acoustics*, 3(2):105 – 116, 1970
- [28] SALOMONS, E.; BLUMRICH, R.; HEIMANN, D.: Eulerian timedomain model for sound propagation over a finite impedance ground surface comparison with frequency domain models. *Acta Acustica united with Acustica* 88, (2002) 483 – 492
- [29] HEIMANN, D. (2007): Three-Dimensional Linearised Euler Model Simulations of Sound Propagation in Idealised Urban Situations with Wind Effects. *Applied Acoustics*, 68, Seiten 217 – 237. DOI: 10.1016/j.apacoust.2005.10.002
- [30] UmweltAtlasBayern:Lärmbelastungskataster: http://www.umweltatlas.bayern.de/mapapps/resources/apps/lfu_laerm_ftz/index.html?lang=de, zuletzt abgerufen am 12.12.2018
- [31] DIN EN 1793-3:1997-11: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum
- [32] DWD-Daten des COSMO-DE Modells, https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/01_num_vorhersagemodelle/regionalmodell_cosmo_de.html, zuletzt abgerufen am 02.04.2020

- [33] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen: RLS-19, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Ausgabe 2019, Köln 2019
- [34] Nord2000 noise calculation method: <https://forcetechnology.com/en/innovation/completed-projects/nord2000-noise-calculation-method-auralisation>, zuletzt abgerufen am 29.10.2020

Bilder

- Bild 2-1: Cluster unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung meteorologischer Daten
- Bild 3-1: Lage der Zählstellen und der Wettermesstationen in Bayern
- Bild 3-2: Messgebiet bei Sulzemoos (Kartenquelle: OpenStreetMap, Lizenz: CC-BY-SA 2.0)
- Bild 3-3: Windrichtungsstatistik für Station Mammendorf
- Bild 4-1: TA1 – Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände
- Bild 4-2: TA 2 – Lange, gerade Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (Wall 6 m)
- Bild 4-3: TA 3 – Zwei kreuzende, lange gerade Straßen auf ebenem Gelände
- Bild 4-4: TA 4a – Modell „Sulzemoos eben“
- Bild 4-5: TA 4b – Darstellung des realistischen Modell „Sulzemoos“ mit Höhenlinien
- Bild 5-1: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand bei Mitwindsituation
- Bild 5-2: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Mitwindsituation und spektrale Betrachtung der DIN ISO 9613-2 und der VDI 2714
- Bild 5-3: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand bei Mitwindsituation
- Bild 5-4: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Mitwindsituation
- Bild 5-5: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Mitwindsituation
- Bild 5-6: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand bei Mitwindsituation
- Bild 5-7: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen
- Bild 5-8: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen
- Bild 5-9: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen
- Bild 5-10: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen
- Bild 5-11: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für schallausbreitungsgünstige und homogene Bedingungen
- Bild 5-12: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit
- Bild 5-13: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit
- Bild 5-14: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit
- Bild 5-15: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Ver-

- gleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit
- Bild 5-16: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Temperaturgradienten und Windrichtungen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit
- Bild 5-17: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten
- Bild 5-18: Testaufgabe 2 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten
- Bild 5-19: Testaufgabe 3 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten
- Bild 5-20: Testaufgabe 4a – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten
- Bild 5-21: Testaufgabe 4b – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für den Vergleich von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei gleichbleibendem Temperaturgradienten
- Bild 5-22: Testaufgabe 1 – Vergleich von Nord2000 und Harmonoise hinsichtlich Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für verschiedene Bedingungen
- Bild 5-23: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand mit Berücksichtigung unterschiedlicher Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Nord2000
- Bild 5-24: Testaufgabe 1 – Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand mit Berücksichtigung unterschiedlicher Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Harmonoise
- Bild 5-25: Schallausbreitung simuliert mit dem wellenbasierten Modell im Vertikalschnitt
- Bild 5-26: Pegeldifferenzen zum Referenzschallpegel für die Windgeschwindigkeitsklasse $W_{2,}$ jeweils bei Mit- und Gegenwind, ermittelt mit dem wellenbasierten Modell
- Bild 5-27: Vergleich zwischen den mit dem wellenbasierten Modell und Nord2000 durchgeführten Simulationen für die Testaufgabe TA1, Links oben für Mitwind und rechts oben für Gegenwind. Unten: Differenzen (wellenbasiertes Modell – Nord2000) zwischen den beiden Methoden für die jeweilige Situation
- Bild 6-1: Position der beiden Dauermessstationen DMS_1 und DMS_2 sowie die Positionen der einzelnen IMS Messstationen 1-8
- Bild 6-2: Niederschlagstage und Mengen in der Nähe von Sulzemoos an der Station Maisach-Galgen (www.wetteronline.de)
- Bild 6-3: Lage der Gitterzellen nahe Sulzemoos in dem COSMO-DE Gitter – horizontale Gitterzelle mit den Ortskoordinaten 418/229 schematisch dargestellt; links oben das COSMO-Gitter mit Topografie, rechts oben die Lage von Sulzemoos in Deutschland)
- Bild 6-4: Pegel (Oben), Spektrogramm (Mitte) und Wettersituation am Dienstag, 18. Sept. 2018 00:00-23:59 Uhr
- Bild 6-5: Vertikalprofile von Wind und Temperatur
- Bild 6-6: Hexbin-Plot (2-dimensionales Histogramm) der Pegelstärke in Abhängigkeit von der Windrichtung mit einer Auflösung von 4° und 2 dB
- Bild 6-7: Pegelzeitverlauf L_{Aeq} mit 10 min-Mittelwerten an der DMS_1-Schall (Tango_NMS) für den Zeitraum 17.09.2018 bis zum 18.11.2018

- Bild 6-8: Zeitverläufe der gemessenen Parameter
- Bild 6-9: Windrichtungsstatistik an der Messstation DMS_1 für den Zeitraum 29.09.2018 bis 18.11.2018
- Bild 7-1: Wochentagweise gemittelte Verkehrsemissionsberechnungen (Oben: Gesamtemission (Pkw und Lkw); Mitte: Geräuschemission durch Pkw; Unten: Geräuschemission durch Lkw)
- Bild 7-2: Verteilung der Korrelationskoeffizienten für Kombinationen aus tagesspezifischen Messwerten und verschiedenen Emissions-Berechnungsmethoden
- Bild 7-3: Theoretische abstandsbedingte Schallpegelabnahme für Linienschallquellen
- Bild 7-4: Vergleich der Dichtefunktionen der Differenzschallpegel zwischen Quelle und den verschiedenen Immissionspunkten
- Bild 7-5: Dichteverteilungen für sechs Kombinationen aus Windrichtung und Stabilitätsklasse, unabhängig von der Windgeschwindigkeit am Beispiel der Station DMS1
- Bild 7-6: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Testaufgabe 4b für Mitwind (schallausbreitungsgünstig), für Normen mit Berücksichtigung der Meteorologie und Vergleich zu Messwerten
- Bild 7-7: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Testaufgabe 4b für Querwind, für unterschiedliche Normen und Vergleich zu Messwerten
- Bild 7-8: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für Testaufgabe 4b für Gegenwind (schallausbreitungsungünstig) für unterschiedliche Normen und Vergleich zu Messwerten
- Bild 7-9: Abweichung von der mittleren gemessenen Pegeldifferenz in rund 250 m Entfernung von der Quelle bei schallausbreitungsneutraler Wettersituation. Mitwind ist hier bei 0°, entsprechend liegt Gegenwind bei 180°
- Bild 7-10: Mittelungspegel von 19 verschiedenen meteorologischen Situationen, gemessen im Messgebiet Sulzemoos (farbige Ringe) im Vergleich zur berechneten Schalldruckpegelabnahme nach RLS-90 (schwarz)
- Bild 7-11: Pegeldifferenzen zwischen den beiden Dauermessstationen. Mitwind ist hier bei 0°, entsprechend liegt Gegenwind bei 180°
- Bild 7-12: Differenzen zwischen auf 1 Minute und 10 Minuten gemittelten und 1-Sekunden-Daten. Mitwind ist hier bei 0°, entsprechend liegt Gegenwind bei 180°
- Bild 8-1: Vergleich zwischen verschiedenen Dämpfungstermen
- Bild 8-2: Vergleich zwischen RLS-90 und Nord2000 für Testaufgabe 1
- Bild 8-3: Vergleich zwischen RLS-90 und Nord2000 für Testaufgabe 4b
- Bild 8-4: Anwendung der vorgeschlagenen Dämpfungsklassen auf das Untersuchungsgebiet Sulzemoos

Tabellen

- Tab. 2-1: Klassifizierung der Windgeschwindigkeiten
- Tab. 2-2: Klassifizierung der Stabilitätsklassen
- Tab. 2-3: Übersicht über die verwendeten meteorologischen Parameter bei Regelwerken ohne explizite Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter
- Tab. 2-4: Übersicht über die Verwendung meteorologischen Parameter bei Regelwerken mit (eingeschränkter) Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter
- Tab. 3-1: Auswahlkriterien bei der Gebietsuche
- Tab. 5-1: Übersicht der betrachteten Klassen für die Kombinationen aus vertikalem Temperaturgradient (bzw. Stabilität) in K/100 m und Windgeschwindigkeit in m/s für die Nord2000
- Tab. 5-2: Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für die mit dem wellenbasierten Modell durchgeführten Simulationen

- Tab. 5-3: Pegeldifferenz am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt der Testaufgabe 4b für Mitwind
- Tab. 5-4: Pegeldifferenz am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt der Testaufgabe 4b für Querwind
- Tab. 5-5: Pegeldifferenz am Immissionsort DMS_1 zum Referenzpunkt der Testaufgabe 4b für Gegenwind
- Tab. 5-6: Gemessene Häufigkeitsverteilung der Klassen W und S in Sulzemoos in %
- Tab. 5-7: Gemessene Häufigkeitsverteilung der Windrichtungssektoren in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen in Sulzemoos in %
- Tab. 5-8: Übersicht der durchschnittlichen Rechenzeiten einer Rasterlärmkarte für Testaufgabe 4b und der zusätzlich erforderlichen Eingabeparameter für verschiedenen Rechenvorschriften
- Tab. 6-1: Die Positionen und Aufstellzeiten der Messstationen
- Tab. 6-2: Meteorologische Einordnung der Intensivmesstage zu einer festen Tageszeit
- Tab. 6-3: Spezifikation des Monitoringgeräts Tango NMS
- Tab. 6-4: Spezifikation der Wetterstation Davis Vantage Pro2
- Tab. 6-5: Beispieldatensatz der Rohdaten aus der Verkehrszählstation
- Tab. 7-1: Vergleich von zufälliger Verteilung (Korrelation der Emissionen aller Tage untereinander, aber nicht mit sich selbst) und der Verteilung der Korrelationskoeffizienten bei wochentags-spezifischer Korrelation von Emissions- und Immissionswerten
- Tab. 7-2: Vergleich der Verteilung der Korrelationskoeffizienten bei wochentags-spezifischer Korrelation von Emissions- und Immissionswerten mit der Verteilung die man bei einer tages-spezifischen Korrelation erhält
- Tab. 7-3: Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in Windgeschwindigkeitsklassen
- Tab. 7-4: Klassifizierung der Atmosphärischen Stabilität in Stabilitätsklassen
- Tab. 7-5: Beispielhafte Auswertung einer Intensivmessstation (hier IMS₅) entsprechend der Harmonoise-Klassifizierung
- Tab. 7-6: Übersicht über die Definitionen einer schallausbreitungsgünstigen meteorologischen Situation in den verschiedenen Normen
- Tab. 7-7: Kriterien für schallausbreitungsgünstige/-ungünstige Bedingungen
- Tab. 7-8: Häufigkeiten und mittlerer Differenzschallpegel zwischen Emission und Immission für verschiedene meteorologische Bedingungen am Beispiel der Station DMS1
- Tab. 7-9: Differenzschallpegel in dB für schallausbreitungsgünstige Bedingungen entsprechend der Kriterien AG₁, AG₂ und AG, berechnet für alle verfügbaren Messstationen
- Tab. 7-10: Differenzschallpegel L_{diff} in dB ($L_{diff} = Emission_{gerechnet} - Immission_{gemessen}$) für die Situation W₂/S₂ bei Mitwind, Querwind und Gegenwind für alle verfügbaren Messstationen. Abstand = Abstand zur Quelle in m
- Tab. 7-11: Kombinierte Häufigkeitsverteilung für die Klassen W und S in Prozent
- Tab. 7-12: Mittlere Schallpegelabnahmen gegenüber den berechneten Emissionswerten in 250 m Entfernung von der Autobahn, für die Windklasse W₀ und die Stabilitätsklassen S₁ bis S₅
- Tab. 7-13: Minimale und maximale Abweichungen vom mittleren Schallpegel [dB] unter schallausbreitungsneutralen Wetterbedingungen für die Windklassen W₀ bis W₂, jeweils für beide Dauermessstellen und alle Stabilitätsklassen
- Tab. 8-1: Parameter α , β und ξ für die Dämpfungsklassen sowie Zu- bzw. Abschläge in dB in 250 m Entfernung von der Quelle
- Tab. 8-2: Einteilung der meteorologischen Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen für Mitwind

Tab. 8-3: Einteilung der meteorologischen Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen für Querwind

Tab. 8-4: Einteilung der meteorologischen Klassen in die verschiedenen Dämpfungsklassen für Gegenwind

Tab. 8-5: Mittlere quadratische Abweichung (MSE) zwischen Messung und den beiden Normvarianten

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2018

- V 300: **Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoff-rückhalt und Standfestigkeit von Banketten**
Werkenthin, Kluge, Wessolek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 301: **Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung**
Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 302: **Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB**
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 303: **Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer**
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50
- V 304: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015**
Fitschen, Nordmann € 31,00
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00
- V 305: **Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen**
Hartmann, Londong € 16,00
- V 306: **Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest**
Lippold, Wittig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 307: **Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung**
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50
- V 308: **Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)**
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 309: **Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO₂-Pilotstudie Lärmschutzwand**
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50
- V 310: **Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie**
Wang, Oeser, Steinauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 311: **Feldversuch mit Lang-Lkw**
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 312: **Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen**

Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

2019

- V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50
- V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50
- V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**
Kappich, Westermann, Holst € 15,50
- V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt € 18,50
- V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00
- V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50
- V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**
Lippold, Vettters, Ressel, Alber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfselemente von Rad-schnellverbindungen**
Malik, Lange, Andriessse, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00
- V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**
Hausmann € 18,00
- V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**
Fitschen, Nordmann € 31,50
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00
- #### 2020
- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**
Diegmann, Wurstthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckkieß, Schimpf, Schmotz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**
Frenken, Mahmoudi € 16,50

V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**
Meisel, Balzer-Hebborn, Eilmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**
Baier, Leu, Rittershaus
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**
Lippold, Zösch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**
Hänisch, Heidebrunn € 17,00

V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00

V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00

V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50

V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

2021

V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**
Schneider, Turhan, Pelzer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**
Fitschen, Nordmann € 31,00

V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00

V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50

V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00

V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**

Liepert, Skowronek, Eberlei, Crijenkovic, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.