

Studienarbeit

**Berechnung und Bewertung
der Schallausbreitung von Windenergieanlagen
mit Hilfe von Messdaten**

Lorenz Karl Häfele

Betreuer: Prof. Dr. P.W. Cheng
M.Sc. E. Blumendeller

Universität Stuttgart
Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE)
am Institut für Flugzeugbau
Prof. Dr. P.W. Cheng

April 2023

Abstract

Within the emerging field of wind energy usage on land, the prediction of noise became a crucial factor for the successful execution of wind energy development projects as well as for the acceptance within the society.

This study deals with the calculation and assessment of the noise propagation of wind turbines with the noise prediction model described in the ISO 9613-2 [1]. Moreover the VDI 4101-2 is taken into account, because this guideline extends the scope of application to sources with higher heights like wind turbines. A short introduction into the basic aspects of sound propagation and its different modelling approaches, is followed by a detailed description of the noise propagation model ISO 9613-2. Within this thesis, the model ISO 9613-2 was implemented into software according to the recommendations of the ISO 17534-1 [2] and the quality was validated by calculating test cases also provided by the mentioned norm. The quality investigation of the sound pressure levels calculated by the ISO 9613-2 is then based on values from measurement campaigns within the project Inter-Wind. The measurements were made at a windfarm Tegelberg near the city of Kuchen. Two of the measurement series were further investigated in this study. The first campaign measured the sound pressure levels within the windfarm and the second one provided sound pressure levels approximately 1500 m south-west of the windfarm at the public pool of Kuchen. The measured sound pressure levels are then compared to the predicted ones calculated with the noise prediction model of the ISO 9613-2 as well as with the adaptations made by the VDI 4101-2. The comparison of the measured and predicted sound pressure levels shows small deviations for the measurements nearby the windfarm. The deviation between the predicted sound pressure levels by the VDI 4101-2 and the median were in the range of $0,8\text{ dB}$ to $4,37\text{ dB}$. The predicted sound pressure levels calculated by the ISO 9613-2 as well as the VDI 4101-2 get more accurate with an increase in wind velocity. In contrast to the small deviations for the near field, the predicted sound pressure levels for the longer distance were very high. Deviations of 10 dB to over 30 dB were observed. Therefore two different approaches to vary the geometrical divergence are proposed in this study to improve the quality of the forecasted sound pressure level. The first one assumes a transition of the spherical to a cylindrical propagation of sound after a critical distance. The second approach, which offers more acceptable results, varies the geometrical divergence for different octavebandfrequencies. In the investigated case, the deviation of the total sound pressure level could be reduced from 10 dB to approx. $2,5\text{ dB}$.

In conclusion, the noise prediction model was able to forecast sound pressure levels with small deviations in the near-field but was not applicable to the circumstances of the measurements in a longer distance. However, it must be mentioned that the measurements of the sound pressure levels can always be influenced by other sources of noise besides to the investigated wind turbines.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Einführung | 1 |
| 1.2. Ziel der Arbeit | 2 |
| 1.3. Aufbau | 3 |
| 2. Prognose der Schallausbreitung | 5 |
| 2.1. Einführung in die Schallausbreitung | 5 |
| 2.1.1. Grundlagen der Akustik | 5 |
| 2.1.2. Ausbreitung des Schalls durch die Atmosphäre | 7 |
| 2.2. Schallausbreitungsprognose | 10 |
| 2.2.1. Grundtypen der Geräuschprognoseverfahren | 10 |
| 2.2.2. Modellierung der Quelle | 11 |
| 2.2.3. Schallausbreitungsprognosemodelle | 13 |
| 3. Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Die ISO 9613-2 | 15 |
| 3.1. Das Schallausbreitungsprognosemodell nach ISO 9613-2 | 15 |
| 3.1.1. Grundlegende Gleichungen | 16 |
| 3.1.2. Dämpfungsterme | 17 |
| 3.1.3. Meteorologische Korrektur | 20 |
| 3.1.4. Bewuchs | 20 |
| 3.1.5. Genauigkeit und Geltungsbereich | 21 |
| 3.2. Anpassungen des Schallausbreitungsprognosemodells der ISO 9613-2 | 21 |
| 3.2.1. Geometrische Ausbreitung | 21 |
| 3.2.2. Interimsverfahren nach VDI 4101-2 | 22 |
| 3.2.3. Empfohlene Anpassungen | 23 |
| 3.3. Validierung der Umsetzung anhand ISO 17534-3 und der VDI 4101-2 | 23 |
| 4. Schalldruckpegel im Projekt Inter-Wind | 27 |
| 4.1. Das Projekt Inter-Wind | 27 |
| 4.1.1. Der Windpark Tegelberg | 27 |
| 4.1.2. Meteorologische Messungen | 28 |
| 4.1.3. Akustische Messungen | 31 |
| 4.2. Berechnung von Eingangsparametern und Messwerten | 32 |
| 4.2.1. Schallleistungspegel der WEA GE 2.7 MW | 32 |
| 4.2.2. Gemessene Schalldruckpegel | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.3. Filterung der Daten | 33 |
| 4.3. Berechnung nach ISO 9613-2 | 35 |
| 4.3.1. Berechnung der Dämpfungsterme | 35 |
| 4.3.2. Berechnete Schalldruckpegel nach ISO 9613-2 | 38 |
| 4.4. Berechnung nach Interimsverfahren VDI 4101-2 | 41 |
| 5. Vergleich und Bewertung der Schallausbreitungsprognose | 43 |
| 5.1. Schallausbreitungsprognose nach ISO 9613-2 | 43 |
| 5.1.1. Vergleich der berechneten und gemessenen Gesamtschall- druckpegel | 43 |
| 5.1.2. Analyse der Schalldruckpegel in Oktavbandmittenfrequenzen | 46 |
| 5.2. Schallausbreitungsprognose nach VDI 4101-2 | 48 |
| 5.3. Anpassung der geometrischen Ausbreitung | 50 |
| 5.3.1. Bestimmung der kritischen Distanz | 51 |
| 5.3.2. Frequenzabhängige Dämpfung durch geometrische Ausbrei- tung | 53 |
| 5.4. Analyse der ausbreitungsgünstigen Bedingungen | 54 |
| 6. Fazit und Ausblick | 57 |
| 6.1. Fazit | 57 |
| 6.2. Ausblick | 58 |
| A. Eingangsparameter | 61 |
| A.0.1. Schalleistungspegel der WEA GE 2.7 | 61 |
| B. Weitere Abbildungen | 63 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 2.1. Temperatur- und Windgeschwindigkeitsprofi über der Höhe am WINSENT Forschungstestfeld | 9 |
| 3.1. Dämpfung durch geometrische Ausbreitung bei kugelförmiger (Punktquelle) und zylindrischer (Linienquelle) Schallausbreitung . | 22 |
| 4.1. Karte des Windparks Tegelberg mit den Standorten der WEA, des Messmastes und der Mikrofone | 28 |
| 4.2. Topographie zwischen WEA 2 und Freibad Kuchen | 29 |
| 4.3. Windrose Tegelberg WEA 1 in Nabenhöhe vom 24.10.2020 bis 12.12.2020 | 30 |
| 4.4. Windrose Tegelberg WEA 2 in Nabenhöhe vom 24.03.2022 bis 10.05.2022 | 31 |
| 4.5. Messkampagne I: Äquivalenter A-bewerteter Dauerschalldruckpegel nach ISO 9613-2 für unterschiedliche Parameterkombinationen . . | 39 |
| 4.6. Messkampagne II: Äquivalenter A-bewerteter Dauerschalldruckpegel nach ISO 9613-2 für unterschiedliche Parameterkombinationen | 41 |
| 4.7. Äquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel nach VDI 4101-2 beider Messkampagnen | 42 |
| 5.1. Messkampagne I: Abweichung der Dauerschalldruckpegel bei Mitwind | 44 |
| 5.2. Messkampagne II: Abweichung der Dauerschalldruckpegel bei Bodeninversion | 45 |
| 5.3. Messkampagne I: Gemessene und nach ISO 9613-2 berchnete Oktavbandpegel bei Mitwind und Bodeninversion | 47 |
| 5.4. Messkampagne II: Gemessene und nach ISO 9613-2 berchnete Oktavbandpegel bei Mitwind und Bodeninversion | 47 |
| 5.5. Vergleich der gemessenen mit den nach VDI 4101-2 berechneten Schalldruckpegeln für beide Messkampagnen bei Bodeninversion und Mitwind | 49 |
| 5.6. Nachts gemessener Schalldruckpegel über der Rotordrehzahl der WEA 2 bei Bodeninversion und Mitwind | 51 |
| 5.7. Schalldruckpegel über der Rotordehzahl für unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen | 55 |
| B.1. Windrose Tegelberg gemessen am Messmast vom 24.10.2020 bis 12.12.2020 | 63 |

| | |
|---|----|
| B.2. Messkampagne I: Abweichung der Dauerschalldruckpegel bei Bodeninversion | 64 |
| B.3. Darstellung der Oktavbandpegel für Messkampagne II | 64 |
| B.4. Messkampagne I: Vergleich der gemessenen mit den nach VDI 4101-2 berechneten äquivalenten, A-bewerteten Schalldruckpegeln | 65 |
| B.5. Messkampagne II: Vergleich der gemessenen mit den nach VDI 4101-2 berechneten äquivalenten, A-bewerteten Schalldruckpegeln | 66 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| 2.1. Oktavbandmittenfrequenzen und Grenzfrequenzen | 7 |
| 3.1. Bodenfaktor G für verschiedene Bodenbeschaffenheiten | 18 |
| 3.2. Geschätzte Genauigkeiten für die Berechnung nach ISO 9613-2 in Abhängigkeit von Höhe und Distanz | 21 |
| 4.1. Statistik für Temperatur und Luftfeuchtigkeit der beiden Messkam- pagnen | 29 |
| 4.2. Statistik der gemessenen Schalldruckpegel beider Messkampagnen in dB(A) | 32 |
| 4.3. Filterung nach Betrieb der Anlage | 34 |
| 4.4. Anzahl von 10-Minuten Messswerten bei einer Filterung nach Mit- windrichtung | 34 |
| 4.5. Anzahl von 10-Minuten Messswerten bei einer Filterung nach Bo- deninversion | 35 |
| 4.6. Dämpfung durch geometrische Ausbreitung | 36 |
| 4.7. Dämpfung durch atmosphärische Dämpfung bei $T = 10^{\circ}C, F = 70\%$ | 36 |
| 4.8. Dämpfung durch Bodeneffekt nach spektralem Berechnungsverfahren | 37 |
| 4.9. Dämpfung durch Bodeneffekt nach nicht-spektralem Berechnungs- verfahren | 38 |
| 5.1. Bestimmung der kritischen Distanz je Windgeschwindigkeit für Messkampagne II | 52 |
| 5.2. Prognosequalität der VDI 4101-2 in Oktavbandauflösung für Mes- skampagne II | 53 |
| 5.3. Resultierende Oktavpegel in dB(A) durch frequenzabhängige Va- riation der geometrischen Ausbreitung | 54 |
| A.1. Unbewertete Schallleistungspegel der WEA GE2.7 | 61 |

Abkürzungsverzeichnis

dB Dezibel

EU Europäische Union

ISO Internationale Organisation für Normung

TA Technische Anleitung

VDI Verein Deutscher Ingenieure

WEA Windenergieanlage

Kapitel 1.

Einleitung

Das erste Kapitel beschreibt die Problemstellung, die der Arbeit zugrunde liegt. Darüber hinaus werden die Ziele beschrieben, die im Rahmen der Arbeit erreicht werden sollen, und der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.1. Einführung

Der Ausbau Erneuerbarer Energien bildet das Fundament für den Klimaschutz und ist eine wichtige Maßnahme zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Denn dieser Ausbau hat nicht nur Auswirkungen auf den Energiesektor selbst, sondern stellt ebenso für andere Sektoren die dringend benötigte Ressource Energie bereit. Laut statistischem Bundesamt [3] hatte die Windenergie im Jahre 2022 einen Anteil von 24,1 % an der deutschen Stromerzeugung und ist damit die zweitgrößte Energiequelle hinter der Kohle, welche für ein Drittel der Stromerzeugung sorgte. Diese Zahlen zeigen, dass die Windenergie bereits heute ein wichtiger Bestandteil des deutschen Strommixes ist. Allerdings wird in naher Zukunft ein enormer Ausbau von Nöten sein, um die Energieversorgung vollumfänglich erneuerbar zu gestalten. Doch dieser Ausbau bringt viele Herausforderungen mit sich. Es müssen nicht nur Standorte ausfindig gemacht werden, die für eine wirtschaftliche Nutzung von Windenergie geeignet sind, sondern ebenso die Auswirkungen dieser Nutzung berücksichtigt werden.

Windenergieanlage (WEA) verursachen Geräusche im Wesentlichen durch die aerodynamische Umströmung der Rotoren und durch das Getriebe. Daher müssen Projektentwickler diese Geräuschentwicklung berücksichtigen: Laut [4] ist neben der Leistungskennlinie, welche die abgegebene Leistung der WEA ins Verhältnis zur Windgeschwindigkeit setzt, der Schalleistungspegel der zweitwichtigste technische Parameter einer WEA. Für die Genehmigung von einzelnen WEA oder Windparks werden verschiedene Gutachten benötigt. So müssen im Planungsprozess neben Gutachten für Schattenwurf und Netzanschluss auch schalltechnische Gutachten und Prognose durchgeführt werden. Werden WEA geplant, müssen mögliche Geräuschpegel in einem sogenannten Schallimmissionsgutachten berechnet werden. Die erfolgreiche Genehmigung dieses Gutachtens erfolgt dann, wenn die von der Technische Anleitung (TA) Lärm vorgeschriebenen Maximalwerte

nicht überschritten werden. Diese Maximalwerte variieren je nach Art der Nutzung des betroffenen Gebietes wie beispielsweise einem Wohn- oder Industriegebiet.

Um eine Vorhersage des Geräuschpegels am Immissionsort zu treffen, werden Schallausbreitungsprognosemodelle eingesetzt. Deren Genauigkeit hat großen Einfluss auf den erfolgreichen Ausbau der Windenergie. Denn wird beispielsweise ein zu hoher Pegel prognostiziert, kommt das Projekt unter Umständen nicht zu Stande und die vorhandenen Windressourcen können nicht ausgenutzt werden. Wird aber andererseits ein zu geringer Pegel prognostiziert, kann dies schließlich dazu führen, dass bereits genehmigte Anlagen in ihrem Betrieb eingeschränkt werden, um dadurch die Grenzwerte nicht zu überschreiten.

Die TA Lärm [5] schreibt vor, dass die Berechnung der Schallimmissionspegel anhand des von der Internationale Organisation für Normung (ISO) in der ISO 9613-2 beschriebenen Schallausbreitungsprognosemodelle erfolgen muss. Im Jahr 2015 wurde außerdem ein Interimsverfahren [6] veröffentlicht, welches festlegt, dass die vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) veröffentlichten Richtlinie VDI 4101 Blatt 2 [7] ein Verfahren für die Prognose der Geräuschimmission von WEA bereitstellen wird. Auf diese beiden Richtlinien wird in der Arbeit im Detail eingegangen.

Diese Schallausbreitungsprognosemodelle stellen ein standardisiertes Verfahren bereit, welche allerdings in verschiedenen Studien sowohl genaue [8], [9] als auch stark vom gemessenen Wert abweichende Immissionspegel [10] prognostiziert.

Im Rahmen des Projekts Inter-Wind am SWE wurden Schallmessungen im Bereich eines Windparks und in 1,5 km Entfernung durchgeführt. Diese Messungen sollen nun mit anhand von Schallausbreitungsprognosemodellen berechneten Schalldruckpegeln verglichen werden. Dazu wurden Messungen aus verschiedenen Messkampagnen am Windpark Tegelberg nahe der Gemeinde Kuchen herangezogen. Der Windpark zeichnet sich durch eine komplexe Topographie aus, welche sich auf die Schallausbreitung der drei vorhandenen Anlagen auswirkt. Aufgrund der Komplexität soll die Prognosequalität der Modelle an diesem Windpark untersucht werden.

1.2. Ziel der Arbeit

Die vorliegende Studienarbeit verfolgt das Ziel das Schallausbreitungsprognosemodell nach ISO 9613-2 auf die am Windpark Tegelberg vorliegenden Bedingungen anzuwenden und dessen Prognosequalität anhand zweier Messkampagnen zu überprüfen. Als Grundlage der Bewertung dient zunächst das Standardverfahren der ISO 9613-2. Darüber hinaus untersucht die Arbeit Anpassungen des Verfahrens sowie das aktuell eingesetzte Interimsverfahren der VDI 4101-2 auf die Verbesserung der Berechnungsqualität im Vergleich zum Standardverfahren. Daher werden zwei verschiedene Ansätze genutzt, um die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung anzupassen. Dadurch soll die Prognosequalität im Fernbereich verbessert werden.

1.3. Aufbau

Kapitel 2 befasst sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen der Akustik, dem Einfluss der Atmosphäre auf die Ausbreitung von Schallwellen sowie der Schallausbreitungsprognose anhand von Modellen.

In Kapitel 3 wird das Schallausbreitungsprognosemodell der ISO 9613-2, welches im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, im Detail vorgestellt. Es wird auf die enthaltenen Dämpfungsterme, den Geltungsbereich sowie Anpassungen des Modells wie beispielsweise durch die VDI 4101-2 eingegangen.

Kapitel 4 geht anschließend näher auf das Projekt Inter-Wind ein, beschreibt die Standortbedingungen, die Aufbereitung der Messdaten sowie die Berechnung der Schalldruckpegel anhand der vorgestellten Berechnungsverfahren. Kapitel 5 vergleicht schließlich die berechneten mit den gemessenen Schalldruckpegeln und bewertet die Qualität der Schallausbreitungsprognose. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Arbeit und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungen im Forschungsbereich der Schallimmission von WEA.

Kapitel 2.

Prognose der Schallausbreitung

Das folgende Kapitel umfasst eine kurze Einführung in die Grundlagen der Akustik und in die damit verbundenen Begrifflichkeiten. Anschließend wird der Einfluss der atmosphärischen Stabilität sowie der Windrichtung auf die Schallausbreitung erläutert, da diese Faktoren die Grundlage für das Berechnungsverfahren der ISO 9613-2 bilden. Danach folgt eine kurze Beschreibung der Modellierung der WEA als Schallquelle. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung der meistgenutzten Schallausbreitungsprognosemodellen.

2.1. Einführung in die Schallausbreitung

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Begriffe im Bereich der Akustik und der menschlichen Wahrnehmung sowie der Quantifizierung von Schall erläutert. Dazu werden Informationen aus [11] verwendet.

2.1.1. Grundlagen der Akustik

Schall ist aus physikalischer Sicht eine Druckschwankung, die sich von einer Schallquelle durch den Raum hin zu einem Empfänger ausbreitet. Als Empfänger dient dem Menschen das Ohr. Die sich ausbreitende Druckschwankung wird auch als Schalldruck bezeichnet und ist dem atmosphärischen Druck überlagert. Schalldruck wird durch zwei Eigenschaften charakterisiert: Zum einen durch die Amplitude der Druckschwankung, die ebenfalls als Schalldruck bezeichnet wird, und zum anderen durch die Frequenz mit der die Druckschwankung pro Sekunde schwingt. Wie in [11] ausführlich beschrieben, verhält sich die Wahrnehmung des Schalldruckes durch das Ohr, auch als Hörempfinden bezeichnet, nicht linear. Daher wird zur Bemessung des Schalldruckes nicht auf den physikalischen Druck zurückgegriffen. Stattdessen wird ein logarithmischer Zusammenhang auf Basis eines Referenzdruckes verwendet. Dieses logarithmische Maß wird als Schalldruckpegel bezeichnet und besitzt die Einheit Dezibel (dB). Der Referenzdruck von $2 \cdot 10^{-5} Pa$ dient dabei als Bezugsgröße und stellt die Hörschwelle des menschlichen Ohres dar. Diese wird als 0 dB festgelegt.

Das menschliche Ohr weist nicht nur bei der ersten Eigenschaft des Schalldruckes, der Amplitude, ein nicht-lineares Verhalten auf. Auch bei der Wahrnehmung des gleichen Schalldruckes unterschiedlicher Frequenz ist die Empfindlichkeit variabel. In [11] wird dies anschaulich beschrieben: Ein Ton mit einer Frequenz von 100 Hz und einem Schalldruckpegel von 70 dB wird als gleich laut empfunden wie ein zweiter Ton mit einer Frequenz von 1000 Hz und einem Schalldruckpegel von 60 dB. Um diesem Zusammenhang Rechnung zu tragen, wird die A-Bewertung verwendet. Die A-Bewertung verstärkt oder schwächt den Schalldruckpegel je nach Frequenz ab. Für die Berechnungen in den nachfolgenden Kapiteln wird die A-Bewertung nach DIN 61672-1 [12] verwendet.

Schallquellen wie WEA werden allerdings nicht über den Schalldruck charakterisiert sondern durch die von ihnen abgegebene Energie. Möser beschreibt in [13] den Energietransport durch „elastische Verdichtungen und [...] Bewegungen der Gasmassen“ [13, S. 9]. Dieser Energietransport pro Zeitintervall, über ein Medium und durch eine die Schallquelle umspannende Hüllfläche wird als Schallleistung bezeichnet. Ebenso wie der Schalldruck wird die Schallleistung in den logarithmischen Schallleistungspegel mit der Einheit dB überführt.

Der Energie-äquivalente Dauerschallpegel dient dazu Geräusche in unterschiedlichen Situationen miteinander vergleichen zu können. Zur Messung sich veränderlicher Pegel müsste ein kontinuierliches Signal aufgenommen werden. Die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Geräuschen über einen Zeitverlauf ist allerdings nur bedingt möglich. Ein vorbeifahrender Zug verursacht beispielsweise kurzzeitig einen hohen Schalldruckpegel wobei kontinuierlich vorbeifahrender Straßenverkehr einen gleichmäßigeren, niedrigeren Schalldruckpegel verursacht. Um diese unterschiedlichen Situationen vergleichen zu können, wird der Energie-äquivalente Dauerschallpegel eingesetzt. Dieser gibt für einen gewissen Zeitraum eine „mittlere Signalenergie an“ [11, S. 13]. Er wandelt den schwankenden Schalldruckpegel dabei in einen über den Zeitraum konstanten Pegel um. Dieser dient zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten. Allerdings gehen durch die Mittelung wichtige Informationen verloren, welche trotzdem bewertungsrelevant sein könnten. Ein relativ konstanter Verkehrslärm wird womöglich als weniger störend empfunden als ein lauter, einmalig vorbeifahrender Zug, da hierbei kurzzeitig ein deutlich höherer Maximalpegel auftritt. Diese Information geht durch die Mittelung verloren. Die beschriebene Mittelung von Schallpegeln wird in der gleichnamigen DIN-Norm DIN 45641 [14] beschrieben und fließt in die spätere Auswertung der Messergebnisse mit ein.

Die zuvor erwähnte A-Bewertung und andere frequenzabhängige Berechnungen, die im weiteren Verlauf der Arbeit folgen, werden nicht für einen kontinuierlichen Frequenzverlauf vorgenommen, sondern für diskrete Frequenzbänder. Diese fassen Bereiche von Frequenzen zusammen. Die so entstehenden Bänder werden mit zunehmender Frequenz größer und sind in Terz- oder Oktavbänder gegliedert, wobei immer drei angrenzende Terzbänder ein Oktavband ergeben. Eine Diskreti-

sierung durch Oktaven bedeutet jeweils die Verdoppelung von einer Frequenz zur nächsten. Ein Frequenzband wird durch seine Bandmittenfrequenz f_m charakterisiert und durch die daraus berechneten oberen und unteren Grenzfrequenzen begrenzt. Für die in den nachfolgenden Kapiteln berechneten Ergebnisse werden die Oktavbänder aus der DIN EN61260-1 [15] angewandt. Hierbei ist es wichtig zwischen den Nennwerten bzw. Normfrequenzen und dem exakten Rechenwert zu unterscheiden. Fließen die Bandmittenfrequenzen oder die Grenzfrequenzen in die Berechnung ein oder werden als Filter eingesetzt, müssen die exakten Rechenwerte verwendet werden, um frequenzabhängige Dämpfungseinflüsse des Schallausbreitungsprognosemodells korrekt zu berechnen. Folgende Tabelle fasst die Normfrequenzen, exakte Rechenwerte und die mit [15] berechneten unteren und oberen Grenzfrequenzen für die acht relevanten Oktavbandmittenfrequenzen zusammen.

Tabelle 2.1.: Oktavbandmittenfrequenzen und Grenzfrequenzen

| Nennfrequenz von f_m | Exakter Rechenwert f_m | Untere Grenzfrequenz f_u | Obere Grenzfrequenz f_o |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 63 | 63,096 | 44.62 | 89.23 |
| 125 | 125,89 | 89.02 | 178.04 |
| 250 | 251,19 | 177.62 | 355.24 |
| 500 | 501,19 | 354.39 | 708.79 |
| 1000 | 1000 | 707.11 | 1414.21 |
| 2000 | 1995,26 | 1410.89 | 2821.78 |
| 4000 | 3981,07 | 2815.06 | 5630.13 |
| 8000 | 7943,28 | 5616.76 | 11233.52 |

2.1.2. Ausbreitung des Schalls durch die Atmosphäre

Das folgende Unterkapitel zeigt den Zusammenhang zwischen den vorliegenden atmosphärischen Bedingungen und der Ausbreitung des Schalls auf.

Viele der im nachfolgenden Kapitel vorgestellten Schallausbreitungsprognosemodelle, sowie das Berechnungsverfahren der ISO 9613-2, gehen von ausbreitungsgünstigen Bedingungen aus. Damit sind Bedingungen gemeint, bei welchen eine Schallausbreitung begünstigt und die Dämpfung gering ist. So ist unter anderem die ISO 9613-2 nur für Berechnungen unter diesen Bedingungen ausgelegt und gültig. Grundsätzlich werden zwei Bedingungen als ausbreitungsgünstig angesehen: Mitwindrichtung und Bodeninversion. Beiden Bedingungen

liegt dabei dasselbe Prinzip zugrunde, welches zu höheren Schalldruckpegeln am Immissionsort führt.

Hörmeier geht in [16] auf das physikalische Prinzip der Beugung und den Zusammenhang mit meteorologischen Parametern ein. Die Beugung der von einer Quelle ausgehenden Schallwelle wird maßgeblich durch die vorhandene Temperaturschichtung und Windgeschwindigkeitsgradienten verursacht [16].

In welche Richtung diese Beugung erfolgt hängt nun einerseits vom Temperaturgradienten über der Höhe und andererseits von der effektiven Schallgeschwindigkeit ab. Bei steigender Temperatur nimmt ebenso die Schallgeschwindigkeit zu. Liegen über der Höhe verschiedene Temperaturen vor, hat die Differenz der Schallgeschwindigkeit eine Beugung der Schallwellen zur Folge. Der zweite Effekt, welcher zur Beugung führt, ist die Änderung der effektiven Windgeschwindigkeit über der Höhe bei Mitwind. Diese effektive Windgeschwindigkeit wird definiert als die Geschwindigkeit mit der sich die Schallwellen effektiv ausbreiten und ergibt sich als Summe aus Schallgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit.

Die Beugung erfolgt in die Richtung mit geringerer Temperatur bzw. geringerer effektiver Schallgeschwindigkeit. In folgender Abbildung 2.1 sind verschiedene atmosphärische Temperaturschichtungen sowie das jeweils vorliegende Windgeschwindigkeitsprofil gegeben. Außerdem ist in der Legende der Abbildung die Uhrzeit ersichtlich, zu der das jeweilige Temperatur- bzw. Windgeschwindigkeitsprofil vorlag. Die Messwerte stammen aus dem Projekt Inter-Wind und wurden am Forschungstestfeld WINSENT aufgezeichnet.

Bei neutraler und instabiler Temperaturschichtung in der Atmosphäre ist die Temperatur in der Höhe niedriger als am Boden. Dadurch werden die Schallwellen nach oben gebeugt. Es entsteht eine Schattenzone in einiger Entfernung zur Schallquelle, in die nur wenige Schallwellen eintreten. Dort sind die Schalldruckpegel sehr gering. Wenn allerdings eine stabile Temperaturschichtung auftritt, wie sie in Abbildung 2.1 als rote Linie dargestellt ist, werden die Schallwellen nach unten gebeugt.

Diese Temperaturschichtung wird als Bodeninversion bezeichnet und bildet sich meist in klaren Nächten aus, wenn der Boden und damit die Luft in Bodennähe durch Wärmestrahlung stärker abkühlt als die Luft in der Höhe. Darüber hinaus zeigt Abbildung 2.1 auf der rechten Seite das Windgeschwindigkeitsprofil über der Höhe. Es ist gut zu erkennen, dass bei einer stabilen Temperaturschichtung die Windgeschwindigkeitsdifferenz größer ist als bei neutraler oder instabiler Temperaturschichtung. Diese Windscherung über der Höhe verstärkt den Effekt und die Beugung der Schallwellen nach unten. Allerdings führt eine vorliegende Bodeninversion bereits zu einer Beugung der Schallwellen nach unten.

Die Windscherung über der Höhe ist zwar bei einer stabilen Temperaturschichtung stark ausgeprägt, tritt allerdings aufgrund der Bodenrauigkeit auch bei neutraler oder instabiler Temperaturschichtung auf. Dies führt zur zweiten ausbreitungsgünstigen Bedingung: der Mitwindrichtung.

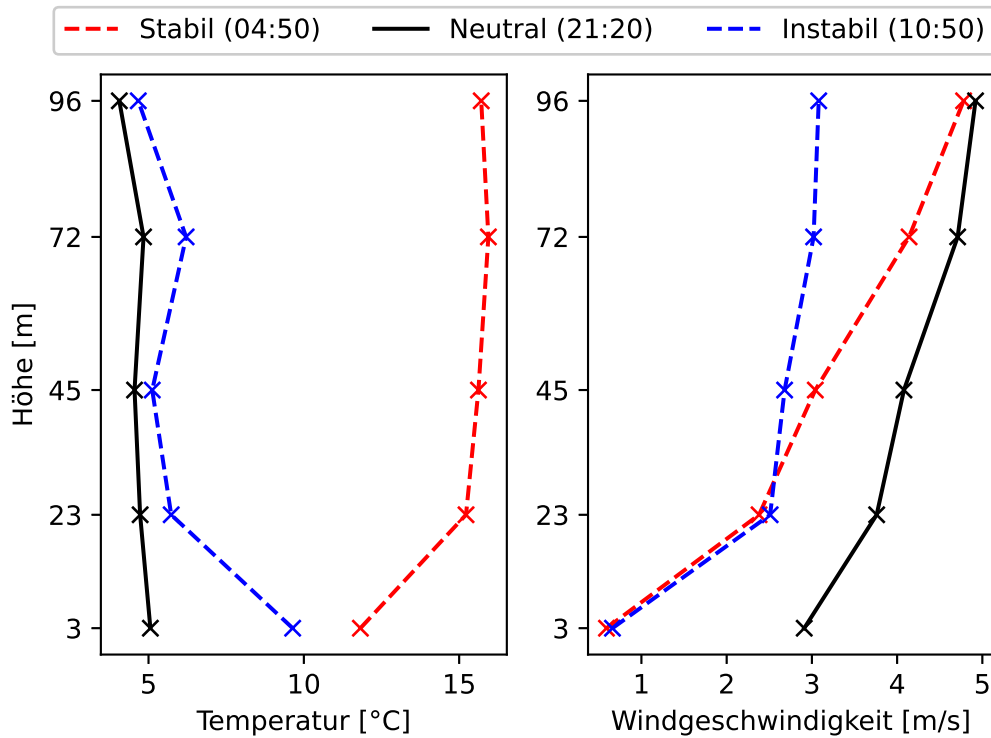


Abbildung 2.1.: Temperatur- und Windgeschwindigkeitsprofil über der Höhe am WINSENT Forschungstestfeld

[16] und [17] beschreiben den Einfluss der effektiven Schallgeschwindigkeit, die sich als Summe aus Schallgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit in Richtung der Quelle ergibt. Bei einer ausgeprägten Windscherung, wie sie in Abbildung 2.1 auf der rechten Seite in allen drei Szenarien zu sehen ist, treten über der Höhe unterschiedliche effektive Windgeschwindigkeiten auf. Während die Windgeschwindigkeit in Richtung der Quelle bei Mitwindbedingungen positiv ist, ist sie bei Gegenwindrichtung negativ. Daher wird bei Gegenwind die effektive Schallgeschwindigkeit um die Windgeschwindigkeit verringert. Dadurch resultiert aus der Windscherung eine über der Höhe abnehmende effektive Schallgeschwindigkeit. Dadurch werden die Schallwellen, wie bereits zuvor beschrieben, in Richtung der geringeren effektiven Schallgeschwindigkeit gebeugt: nach oben. In Mitwindrichtung bewirkt die Windscherung andererseits eine über der Höhe zunehmende effektive Schallgeschwindigkeit wodurch die Schallwellen wiederum nach unten gebeugt werden.

Die Beugung der Schallwellen nach unten hat zur Folge, dass am Boden zunächst höhere Schalldruckpegel auftreten. Zudem werden Schallwellen am Boden reflektiert und erneut in der Atmosphäre gebeugt wodurch auch in größerer Entfernung

von der Schallquelle eine Verstärkung der Schalldruckpegel auftreten kann. Abschließend kann festgehalten werden, dass bei einer vorliegenden Bodeninversion oder bei Mitwindrichtung ausbreitungsgünstige Bedingungen vorliegen. Treten beide Bedingungen gleichzeitig auf, wird die Beugung verstärkt was zu stärkeren Schalldruckpegeln führen kann.

2.2. Schallausbreitungsprognose

Auf eine kurze Einführung über die Grundtypen der Geräuschprognoseverfahren folgt ein Abschnitt, der die Modellierung der Quelle behandelt. Daran schließt sich ein Überblick über verschiedene Schallausbreitungsprognosemodelle an, die für die Berechnung der Geräuschimmission von WEA an einem spezifischen Ort verwendet werden. Grundsätzlich versuchen Schallausbreitungsprognosemodelle dieselben Einflüsse zu berechnen. Diese beinhalten die Richtcharakteristik und -wirkung der Quelle, den Abstand zwischen Quelle und Immissionsort, Dämpfung durch Luftabsorption, Einflüsse der Bodenbeschaffenheit und der Atmosphäre sowie Abschirmungen, Beugungen und Reflexionen an Barrieren.

2.2.1. Grundtypen der Geräuschprognoseverfahren

Die VDI 4101-1 [18] definiert Schallausbreitungsprognosemodelle als

Verfahren, die die Berechnung [...] des Schalldruckpegels sowie gegebenenfalls weiterer akustischer Parameter an einem oder an mehreren Orten unter Vorgabe der Lage und der akustischen Eigenschaften [...] der Schallquelle und unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeometrie [...] und der akustischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums [...] ermöglichen. [18, S. 17f]

Zunächst teilt [18] Geräuschprognoseverfahren in 5 Grundtypen ein. Diese sind praxisnahe Verfahren, strahlenbasierte Modelle, Schallausbreitungsmodelle mit Lösung des akustischen Gleichungssystems im Frequenz- oder Zeitbereich sowie hybride Verfahren. Je Verfahrenstyp werden im Folgenden die grundlegenden Eigenschaften erläutert.

Praxisnahe Verfahren, zu denen auch die ISO 9613-2 gehört, berechnen den gesuchten Schalldruckpegel am Immissionsort durch mehrere Korrekturpegelwerte. Diese sind größtenteils empirischer Natur und durch Normen standardisiert. Diese Verfahren haben den Vorteil, dass sie einfach anwendbar sind und eine großflächige Lärmkartierung durch geringen Rechenaufwand möglich ist. Allerdings können in Einzelfällen durchaus große Fehler auftreten, sollte der vorliegende Anwendungsfall außergewöhnliche topografische oder meteorologische

Eigenheiten aufweisen.

Strahlenbasierte Modelle bedienen sich der geometrischen Akustik und verbinden die Quelle mit dem Empfänger über Strahlen, welche die Schallwellen modellieren [18]. Die eingesetzten Strahlen unterliegen dem Beugungsgesetz von Snell und sind je nach Zustand der Atmosphäre geradlinig oder gekrümmt. Diese Art von Modell ist hauptsächlich für die Berechnung von Bodeneinflüssen und für dreidimensionale Berechnungen geeignet, da Reflexionsphänomene anhand dem Strahlenverlauf gut modelliert werden können. Andererseits werden meteorologische Effekte wie die Luftabsorption nur bedingt berücksichtigt.

Schallausbreitungsmodelle mit Lösung des akustischen Gleichungssystems im Frequenz- oder Zeitbereich sind zwei weitere Grundtypen von Geräuschprognoseverfahren [18]. Beide werden weiter in verschiedene Verfahren unterteilt, wobei eine detaillierte Beschreibung aller den Rahmen der Studienarbeit überschreiten würde. Allgemein kann über diese Verfahren mit numerischem Lösungsansatz festgehalten werden, dass spezifische Phänomene wie der Einfluss von Turbulenz sehr genau modelliert werden können. Dem gegenüber steht, dass solche Modelle hohen Rechenaufwand und eine Vielzahl an Eingangsdaten erfordern.

Zuletzt werden in hybriden Verfahren die Vorteile der jeweiligen Modellansätze kombiniert [18]. Hybride Verfahren sind beispielsweise Strahlen-/PE-Modelle, welche strahlenbasierte Modelle mit dem Parabolic Equation Model, einem Lösungsansatz im Frequenzbereich, kombinieren. Die jeweiligen Grundverfahren werden je nach Anwendungsfall so kombiniert, dass sich vorteilhafte Eigenschaften ergänzen und falls notwendig der Rechenaufwand reduziert werden kann.

2.2.2. Modellierung der Quelle

Das Maschinengeräusch des Getriebes und die aerodynamischen Geräusche der Rotorblätter sind jene Elemente einer WEA, die hauptsächlich für Schallemissionen verantwortlich sind [19]. In Schallausbreitungsprognosemodellen wird die Geräuschquelle einer WEA meist als Punktquelle angenommen [1]. Nach [20] könnten WEA darüber hinaus auch als Linien- oder Flächenquellen modelliert werden. Je nach Art der Quelle würde dadurch der Schall bei der Ausbreitung in den freien Raum unterschiedlich ausgestrahlt und damit unterschiedlich stark gedämpft werden. Diese Dämpfung hängt direkt mit der Distanz zwischen Quelle und Empfänger zusammen. In der Literatur wird neben Punkt- und Linienquellen häufig auch von einer kugelförmigen oder zylindrischen Ausbreitung gesprochen. Oerlemans [21] zeigt in einer empirischen Untersuchung, dass neben einer geringen Geräuschemission an der Nabe der überwiegende Teil der Geräuschemission von den Rotorblattspitzen ausgeht. Somit wäre die Distanz zwischen Quelle und Empfänger davon abhängig wie die WEA zum Empfänger ausgerichtet ist. Steht der Empfänger in der Rotorblattebene, variiert der Abstand zwischen

Rotorblattspitze bzw. der Geräuschquelle und dem Empfänger periodisch. Makarewicz hat sich in [19] damit beschäftigt, ob trotz des zuvor beschriebenen Sachverhalts die Geräuschemission einer WEA als Punktquelle im Rotormittelpunkt bzw. auf Nabenhöhe modelliert werden kann. Anhand einer rein mathematischen Betrachtungsweise kann gezeigt werden, dass unter nachfolgender Bedingung die Modellierung einer WEA als Punktquelle mit einem Fehler von $< 1\text{dB}$ erfolgen kann. Dabei ist d die horizontale, projizierte Distanz zwischen WEA und dem Empfänger, h die Nabenhöhe und l die Länge des Rotorblattes.

$$\sqrt{d^2 + h^2} > \sqrt{5} \cdot l \quad (2.2.1)$$

Hier muss jedoch festgehalten werden, dass diese Art der Modellierung nur für einzelne WEA gilt. Betrachtet man mehrere WEA in einem Windpark, müssen andere Verfahren verwendet werden. Beispielsweise beschreibt [20] die Zusammenhänge für die geometrische Ausbreitung von Schallemissionen eines Windparks mit 37 WEA, die in einer Linie stehen. Dabei nimmt die Dämpfung, die je Verdoppelung der Distanz angegeben wird, mit zunehmendem Abstand vom Windpark zu. Diese beträgt zwischen 1 km und 2 km Entfernung 3,4 dB je Verdoppelung und liegt damit im Bereich der zylindrischen Ausbreitung, die sich zu 3 dB beläuft. Währenddessen beläuft sich diese Dämpfung in einer Entfernung zwischen 10 km und 20 km zu 5,6 dB je Verdoppelung und nähert sich den 6 dB Dämpfung an, die bei einer angenommenen Punktquelle auftreten würde. Dieser Zusammenhang gilt nur für große Windparks mit einer Vielzahl von Turbinen. Eine gegenläufige Entwicklung der Dämpfung kann bei einzelnen oder wenigen Anlagen durch ein auftretendes Windphänomen hervorgerufen werden.

In [22] diskutiert Makarewicz den Einfluss dieses Windphänomens dem sogenannten Low Level Jet, im Deutschen auch als Grenzschichtstrahlstrom bezeichnet. Dieser charakterisiert sich durch Windgeschwindigkeiten von mindestens 10-20 m/s in einer Höhe von mehreren Hundert Metern. Die hohen Windgeschwindigkeiten in mehreren Hundert Metern Höhe führen dazu, dass die von einer Quelle in 100 m Höhe ausgehenden Schallwellen gebeugt und nach unten gekrümmt werden. In [22] wird eine Höhe von 100 m angenommen, allerdings gilt das Phänomen ebenso für andere Nabenhöhen in diesem Bereich. Durch die Krümmung kommt es zur Superposition der abwärts gekrümmten mit der am Boden reflektierten Schallwelle. Anhand des in [22] vorgestellten Strahlenmodells, kann mithilfe einiger Parameter die Entfernung dieser auftretenden Superposition von der Quelle berechnet werden. Diese Parameter sind die Windgeschwindigkeit in Quellenhöhe und in der Höhe des Low Level Jets sowie einem Jet Parameter. Für die Berechnung des Jet Parameters sei auf [22] verwiesen. Der Ort der Superposition wird nun als kritische Distanz R bezeichnet und markiert den Beginn der Übergangszone, in der die Ausbreitung von einer kugelförmigen in eine zylindrische übergeht. Innerhalb dieser kritischen Distanz beträgt die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung 6 dB und geht anschließend in eine Dämpfung von 3 dB je Verdoppelung des Abstandes über.

In einer Beispielrechnung wird deutlich wie sich das Windgeschwindigkeitsprofil auf die kritische Länge R auswirkt. Bei einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s auf 300 m und 9 m/s auf 100 m, ergibt sich eine kritische Distanz von 2570 m. Wohingegen sich bei einer Windgeschwindigkeit von 28 m/s auf 300 m und 4 m/s auf 100 m eine kritische Distanz von 1340 m einstellt. Somit bewirkt ein größerer Windgeschwindigkeitsgradient oberhalb der Nabenhöhe eine stärkere Krümmung und eine geringere kritische Distanz.

2.2.3. Schallausbreitungsprognosemodelle

CONCAWE

Das erste Schallausbreitungsprognosemodelle CONCAWE stammt aus dem Jahr 1981 und wurde ursprünglich für die Berechnung von Geräuschemissionen von petrochemischen Industrieanlagen entwickelt [23]. Das Modell ist auch heute noch im Einsatz und wird von unterschiedlichen Richtlinien als zu verwendende Methode empfohlen, um Geräusche von WEA zu berechnen [24]. Das Modell ist gültig für Distanzen zwischen Quelle und Empfänger von 100 m bis 2000 m und für Windgeschwindigkeiten unter 7 m/s. Es beruht auf empirisch bestimmten Bodeneinflüssen, welche für davon abweichende Bodenbeschaffenheiten nicht als valide angesehen werden können [20]. Evans analysiert in [25] das CONCAWE Modell und vergleicht es mit den Modellen ISO 9613-2, Nord2000 und NZS 6808. Außerdem werden die berechneten Schalldruckpegel mit realen Messwerten sechs verschiedener Windparks verglichen. Dabei wird im Speziellen auf die umliegende Topographie eingegangen. Die Differenz zwischen vorhergesagtem und berechnetem Wert ist beim CONCAWE Modell vergleichsweise stark von der Topographie abhängig und liefert vor allem bei konkavem Gelände gute Ergebnisse. Allerdings weist das CONCAWE Modell für flache und stetige Topographien die größten Abweichungen im Vergleich zu den anderen Modellen auf. Ein Grund dafür ist laut [25], dass das CONCAWE Modell wie das Modell ISO 9613-2, für bodennahe Quellen entwickelt und validiert wurde.

NMPB2008

Ein weiteres Modell ist das NMPB2008, welches von der Europäische Union (EU) als Methodik für das CNOSSOS Programm ausgewählt wurde. Im Rahmen dieses Programms wird die Richtlinie zur Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm umgesetzt. Dabei sollen EU Staaten die Lärmverschmutzung kartieren [26], um die Geräuschemissionen von Schallquellen zu erfassen. Diese sind: Straßen- und Bahnverkehr, Luftfahrt sowie Industrie. Wie die ISO 9613-2 verwendet das Modell NMPB2008 die Oktavbandmittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz zur Berechnung frequenzabhängiger Dämpfungseinflüsse. Das Modell wurde ursprünglich für die Prognose von Straßenlärm entwickelt und basiert somit auf einem

halb-empirischen Modellansatz.

HARMONOISE

Das Harmonoise Modell aus dem Jahr 2002 ist im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Modellen ein komplexeres Modell.

Der Schalldruckpegel am Immissionsort wird in Terzbändern zwischen 25 Hz und 10 kHz berechnet und ist somit detaillierter aufgelöst als in den anderen Schallausbreitungsprognosemodellen. Die Modellierung der Topographie erfolgt durch mehrere gerade Linien und bildet deshalb laut Hansen [20] das Gelände gegenüber den Modellen CONCAWE und ISO 9613-2 genauer ab. Während andere Modelle nur für gewisse Bereiche von Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und atmosphärische Bedingungen gültig sind, kann das Harmonoise Modell eine Schallausbreitungsprognosemodelle für spezifische Werte der genannten Parameter berechnen [27]. Valide Ergebnisse liefert Harmonoise für bodennahe Quellen bei einer Distanz von bis zu 1000 m. Werden WEA betrachtet, so liefert das Modell laut [20] valide Ergebnisse für Abstände von mehreren Kilometern.

ISO 9613-2

Das Berechnungsverfahren der ISO 9613-2 wird laut Kaliski [28] weltweit zur Berechnung von Geräuschimmissionen von WEA eingesetzt. Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt somit auf diesem Verfahren, das im nächsten Kapitel im Detail erläutert wird.

Kapitel 3.

Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Die ISO 9613-2

Das folgende Kapitel fokussiert sich auf die ISO 9613-2. Zu Beginn wird das Berechnungsverfahren im Detail beschrieben und neben den grundlegenden Gleichungen alle Dämpfungsterme vorgestellt. Da das Schallausbreitungsprognosemodell der ISO 9613-2 ursprünglich für bodennahe Quellen entwickelt wurde, werden des Weiteren Anpassungen des Modells an eine höherliegende Quelle in Form einer WEA aufgeführt. Die VDI 4101-2, welche zuvor bereits erwähnt wurde, enthält unter anderem Eingangparameter für die ISO 9613-2 um diese auf die Anwendung von WEA anzupassen. Das Kapitel schließt mit der Validierung der softwaretechnischen Umsetzung der ISO 9613-2 sowie der VDI 4101-2 anhand den qualitätssichernden Maßnahmen der ISO/TR 17534-3.

3.1. Das Schallausbreitungsprognosemodell nach ISO 9613-2

Im folgenden Unterkapitel wird die ISO 9613-2 [1] ausführlich vorgestellt. Die ISO 9613-2 ist ein Berechnungsverfahren der Genauigkeitsklasse 2 und hat zum Ziel den äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegel am Immissionsort zu bestimmen. Das Verfahren gilt für Mitwindausbreitung oder „für Schallausbreitung bei gut entwickelter, leichter Bodeninversion“ [1, S. 2], die meist nachts auftritt. Die Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien ausgehend von einer bekannten Geräuschemission einer oder mehrerer punktförmiger Quellen wird mithilfe von Algorithmen berechnet. Diese Algorithmen berechnen die Dämpfungsterme für Oktavbänder mit Mittenbandfrequenzen zwischen 63 Hz und 8 kHz. Die Dämpfungsterme der ISO 9613-2 berücksichtigen die folgenden physikalischen Effekte:

- Geometrische Ausbreitung

- Luftabsorption
- Bodeneffekt
- Reflexion an Flächen
- Abschirmung durch Hindernisse

Darüber hinaus enthält die ISO [1] weitere Angaben zur Dämpfung des Schalls durch Bebauung, Bewuchs und Industriegelände gegeben.

3.1.1. Grundlegende Gleichungen

Der äquivalente Oktavband-Dauerschalldruckpegel am Immissionsort wird für jede Oktavbandmittenfrequenz separat berechnet. Dazu wird vom bekannten Schalleistungspegel der Punktquelle die Summe der Dämpfungsterme subtrahiert. Außerdem wird eine Richtwirkungskorrektur addiert, die „beschreibt, um wieviel der von der Punktquelle erzeugte äquivalente Dauerschalldruckpegel in einer festgelegten Richtung von dem Pegel einer ungerichteten Punktschallquelle mit einem Schalleistungspegel L_W abweicht“ [1, S. 4].

$$L_{fT}(DW) = L_W + D_C - A \quad (3.1.1)$$

mit $L_{fT}(DW)$ dem äquivalenten Oktavband-Dauerschalldruckpegel an einem Aufpunkt bei Mitwind in dB, L_W dem Oktavband-Schalleistungspegel der Punktschallquelle in dB bezogen auf eine Bezugsschalleistung von einem Picowatt, D_C der Richtwirkungskorrektur in dB und A der Oktavbanddämpfung zwischen Quelle und Aufpunkt in dB.

Die Dämpfungsterme, deren Erläuterungen sich im nachfolgenden Kapitel 3.1.2 finden, werden wie bereits erwähnt addiert.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (3.1.2)$$

mit A_{div} der Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung in dB, A_{atm} der Dämpfung aufgrund von Luftabsorption in dB, A_{gr} der Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts in dB, A_{bar} der Dämpfung aufgrund von Abschirmung in dB und A_{misc} der Dämpfung aufgrund verschiedener anderer Effekte in dB.

Gleichung 3.1.3 beschreibt nun die Berechnung des äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegels. Die erste Summe über n addiert die zum Gesamtpegel beitragenden Quellen, wobei n die Anzahl dieser Quellen angibt. Außerdem werden Spiegelquellen durch auftretende Reflexionen in n berücksichtigt. Deren spezifischer Ausbreitungsweg und die damit verbundenen Dämpfungsterme werden dann je Quelle bzw. Spiegelquelle berechnet.

Die zweite Summe über m berücksichtigt nun die Schalldruckpegel je Oktavbandmittenfrequenz, welche zuvor mit Gleichung 3.1.1 berechnet wurden. Dabei

entspricht m der Anzahl der Oktavbandmittenfrequenzen zwischen 63 Hz und 8 kHz, womit $m = 8$ resultiert. Im Exponent der Gleichung 3.1.3 ist zu sehen, dass zunächst die frequenzabhängigen Dauerschalldruckpegel mit der A-Bewertung versehen werden. Damit wird dem menschlichen Hörempfinden, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, Rechnung getragen.

$$L_{AT}(DW) = 10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m 10^{0,1[L_{fT}(ij)+A_f(j)]} \right\} \right\} \text{ dB} \quad (3.1.3)$$

mit $L_{AT}(DW)$ dem äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegel bei Mitwind in dB(A), L_{fT} dem äquivalenten Oktavband-Dauerschalldruckpegel an einem Aufpunkt in dB und A_f der A-Bewertung in dB.

3.1.2. Dämpfungsterme

Geometrische Ausbreitung

Die Dämpfung des Schalls durch die geometrische Ausbreitung im freien Raum ist eine Funktion der Entfernung von der Quelle und resultiert aus der räumlichen Ausbreitung der Strahlen in ein größer werdendes Volumen [20]. Wie in Gleichung 3.1.4 zu sehen ist, hängt die Dämpfung durch die geometrische Ausbreitung lediglich vom Abstand d zwischen Quelle und Empfänger ab. Sie ist frequenzunabhängig und gilt deshalb für alle Bandmittenfrequenzen. Die Schallquelle wird hierbei als Punktquelle angenommen. Dies führt zu einer Abnahme von 6 dB je Verdopplung der Distanz zwischen Quelle und Empfänger.

$$A_{div} = [20 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11] \text{ dB} \quad (3.1.4)$$

mit A_{div} der Dämpfung durch geometrische Ausbreitung in dB, d dem Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger in m und d_0 dem Bezugsabstand (1 m) in m.

Luftabsorption

Der Dämpfungsterm A_{atm} berechnet die Dämpfung des Schalls durch Luftabsorption. Der Term hängt wie zuvor die geometrische Ausbreitung von der Entfernung d zwischen Quelle und Empfänger ab. Darüber hinaus beschreibt der Absorptionskoeffizient α die Dämpfung der Luft in Dezibel je Kilometer. Der Absorptionskoeffizient α wird mithilfe der ISO 9613-1 [29] bestimmt. α ist dabei abhängig von der Frequenz, der Temperatur sowie der Luftfeuchtigkeit. Für die Berechnung des Absorptionskoeffizienten wird auf das Kapitel 6.2 der ISO-Norm verwiesen [29].

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (3.1.5)$$

mit A_{atm} der Dämpfung aufgrund von Luftabsorption in dB, α dem Absorptionskoeffizient der Luft, in Dezibel je Kilometer und d dem Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger in m.

Bodeneffekt

Die Bodendämpfung A_{gr} beschreibt den Einfluss der Bodenbeschaffenheit zwischen Quelle und Empfänger auf die Ausbreitung des Schalls. Diese Methode zur Bestimmung der Bodendämpfung verwendet unterschiedliche Terme für die verschiedenen Oktavbandmittenfrequenzen und wird daher auch als spektrale Methode bezeichnet. Bei Mitwindbedingungen oder einer vorliegenden Bodeninversion ist der Ausbreitungsweg des Schalls abwärts gekrümmt. In [1] folgt daraus, dass die Dämpfung hauptsächlich von der Bodenbeschaffenheit in der Nähe der Quelle und des Empfängers abhängt. Die Dämpfung des Schalls entsteht durch „die Überlagerung von Schall, der an der Bodenoberfläche reflektiert wurde, mit dem Schall, der sich direkt zwischen Quelle und Empfänger ausbreitet“ [1, S. 5]. Die ISO 9613-2 unterteilt aufgrund des zuvor beschriebenen Zusammenhangs den Bereich zwischen Quelle und Empfänger in Quellbereich, Mittelbereich und Empfängerbereich.

Zur Beschreibung der Bodenbeschaffenheit nutzt [1] einen Bodenfaktor G . Tabelle 3.1 führt die unterschiedlichen Bodenfaktoren auf und gibt Beispiele für mögliche Arten von Böden.

Tabelle 3.1.: Bodenfaktor G für verschiedene Bodenbeschaffenheiten

| Bodenfaktor | Kategorie | Bodenart |
|-------------|---------------|---------------------------------------|
| $G = 0$ | Harter Boden | Straßenpflaster, Eis, Beton |
| $G = 1$ | Poröser Boden | Gras, Bäume, Ackerland |
| $0 < G < 1$ | Mischboden | Anteile harter und poröser Bodenarten |

In einem ersten Schritt werden die Bodendämpfungsbeiträge für die drei zuvor genannten Bereiche gemäß ISO 9613-2 [1] berechnet. Die Bodendämpfung wird berechnet mit

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad (3.1.6)$$

mit A_{gr} der Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts in dB, A_s der Dämpfung im quellennahen Bereich aufgrund des Bodeneffekts in dB, A_r der Dämpfung im empfängernahen Bereich aufgrund des Bodeneffekts in dB und A_m der Dämpfung im Mittelbereich aufgrund des Bodeneffekts in dB.

Diese Berechnung der Bodendämpfung gilt allerdings nur für „annähernd flachen Boden“ [1, S. 5], was sowohl ebenes Gelände als auch Gelände mit konstantem Gefälle einschließt. Ist dies nicht der Fall, so kann ein alternatives Verfahren

eingesetzt werden. Dabei wird die Bodendämpfung nicht mehr spektral für die einzelnen Frequenzbänder bestimmt, sondern frequenzunabhängig.

Alternatives Verfahren zur Berechnung des A-bewerteten Schalldruckpegels

Das alternative, nicht-spektrale Verfahren kann wiederum auch nur unter bestimmten Bedingungen eingesetzt werden. Es darf nur der A-bewertete Schalldruckpegel am Immissionsort bestimmt werden und die Bodenbeschaffenheit muss überwiegend porös oder leicht gemischt sein. In diesem Fall wird zur Berechnung der Bodendämpfung keine Einteilung in Bereiche vorgenommen. Stattdessen muss aus dem Geländeprofil zwischen Quelle und Empfänger die mittlere Höhe h_m des Ausbreitungsweges bestimmt werden. Die mittlere Höhe berechnet sich folgendermaßen:

Zunächst wird die Fläche berechnet, welche von der Luftlinie zwischen Quelle und Empfänger und dem Bodenprofil zwischen den zwei Punkten aufgespannt wird. Die resultierende Fläche wird mit F bezeichnet. Anschließend wird diese durch die Distanz d der Luftlinie zwischen Quelle und Empfänger dividiert und man erhält die mittlere Höhe h_m . Mit der so berechneten mittleren Höhe wird die Bodendämpfung berechnet mit

$$A_{gr} = 4,8 - 2 \cdot \frac{h_m}{d} \left[17 + \frac{300}{d} \right] \geq 0 \text{ dB.} \quad (3.1.7)$$

mit A_{gr} der Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts in dB, h_m der mittleren Höhe des Schallausbreitungsweges über dem Boden in m und d dem Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger in m.

Zusätzlich zur berechneten Bodendämpfung A_{gr} muss in diesem alternativen Verfahren ein Raumwinkelmaß D_Ω berücksichtigt werden. Kommt es in der Nähe der Quelle zu Bodenreflexionen, führt dies zu einem „scheinbaren Anstieg des Schalleistungspegels der Schallquelle“ [1, S. 7]. Das Raumwinkelmaß D_Ω bezieht die Effekte dieses Phänomens in die Berechnung mit ein. Dazu wird es in Gleichung 3.1.1 eingesetzt. D_Ω ist abhängig vom auf den Boden projizierten Abstand zwischen Quelle und Empfänger sowie den Höhen von Quelle und Empfänger über dem Boden. Für die Berechnung sei auf [1] verwiesen.

Abschirmung

Der Dämpfungsterm A_{bar} bezieht abschirmende Hindernisse zwischen Quelle und Empfänger in die Schallausbreitungsberechnung ein. Ein Objekt gilt als abschirmendes Hindernis, wenn es drei Anforderungen erfüllt. Erstens muss die flächenbezogene Masse des Objekts mindestens 10 kg/m^2 betragen. Weiter gilt ein Hindernis nur als abschirmend, wenn es eine geschlossene Oberfläche besitzt

und darüber hinaus die „Horizontalabmessung des Objektes senkrecht zur Verbindungslinie Quelle-Empfänger [...] größer [ist] als die akustische Wellenlänge λ bei der [entsprechenden] Bandmittenfrequenz“ [1, S. 7].

Reflexionen

Werden die von der Schallquelle abgestrahlten Schallwellen „an mehr oder weniger senkrechten Oberflächen“ [1, S. 10] reflektiert, führt dies zu einem höheren Schalldruckpegel am Immissionsort. Reflexionen am Boden werden hier nicht berücksichtigt, da diese bereits in den Bodeneffekt miteinbezogen werden. Ist eine solche senkrechte Oberfläche vorhanden, wird die reflektierte Schallwelle als eine Spiegelquelle bezeichnet und betrachtet. Als zusätzliche Schallquelle müssen alle zuvor beschriebenen Schritte ebenfalls durchlaufen und alle Dämpfungsterme speziell für diese Schallquelle berechnet werden. Von einer detaillierteren Beschreibung der Behandlung von Reflexionen wird hier abgesehen und auf die ISO verwiesen, da sie im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt werden.

3.1.3. Meteorologische Korrektur

Die meteorologische Korrektur kommt zum Einsatz, wenn ein A-bewerteter Langzeitmittelungspegel berechnet werden soll, der über mehrere Monate oder ein Jahr [1, S. 11] hinweg benötigt wird. Dies kann beispielsweise für Immissionsgrenzwerte der Fall sein, welche vom Langzeitpegel eingehalten werden müssen. Wenn solch lange Zeiträume in die Betrachtung einfließen, treten verschiedenste Witterungsbedingungen auf. Der Faktor C_{met} der die meteorologische Korrektur quantifiziert, ist von der Höhe der Quelle und des Empfängers, dem projizierten Abstand sowie von einem Faktor C_0 abhängig. Der Faktor C_0 hängt nach ISO 9613-2 von „örtlichen Wetterstatistiken für Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Temperaturgradienten“ [1, S. 11] ab und wird anhand derer abgeschätzt. Nach Berechnung der meteorologischen Korrektur C_{met} ergibt sich der A-bewerteter Langzeitmittelungspegel aus der Differenz des äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegels und der meteorologischen Korrektur. Der Langzeitmittelungspegel ist geringer als der berechnete äquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel, da über einen langen Zeitraum auch ungünstige Ausbreitungsbedingungen vorliegen, die zu einem geringeren Schalldruckpegel am Immissionsort führen. Hierbei sei allerdings erwähnt, dass eine Berechnung des Langzeitmittelungspegel über mehrere Monate für WEA keinen Mehrwert liefert. Dabei ist lediglich der Zeitraum von Interesse bei dem die Anlage in Betrieb ist.

3.1.4. Bewuchs

Der erste Teildämpfungsterm des Dämpfungsterms A_{misc} berücksichtigt den Bewuchs zwischen Quelle und Empfänger. Allerdings spezifiziert die ISO 9613-2, dass

Bewuchs nur einen Beitrag leistet, „wenn er so dicht ist, daß die Sicht entlang des Ausbreitungsweges vollständig blockiert ist“ [1, S. 13]. Der relevante Parameter ist daher die Weglänge durch den Bewuchs, welcher mit d_f bezeichnet wird.

3.1.5. Genauigkeit und Geltungsbereich

Im folgenden Abschnitt wird die Thematik der Genauigkeit und Anwendungseinschränkungen des Berechnungsverfahrens diskutiert.

Tabelle 3.2 zeigt die geschätzten Genauigkeiten für berechnete Pegel gemäß ISO 9613-2. Allgemein ist die ISO für Quelle-Empfänger Distanzen zwischen 0 m und 1000 m sowie für eine mittlere Höhe von Quelle und Empfänger von bis zu 30 m validiert.

Tabelle 3.2.: Geschätzte Genauigkeiten für die Berechnung nach ISO 9613-2 in Abhängigkeit von Höhe und Distanz

| Höhe h | Abstand d | |
|--------------|---------------|--------------------|
| | 0 < d < 100 m | 100 m < d < 1000 m |
| 0 < h < 5m | ± 3 dB | ± 3 dB |
| 5m < h < 30m | ± 1 dB | ± 3 dB |

Die ISO 9613-2 soll Schallimmissionen bei ausbreitungsgünstigen Bedingungen berechnen. Für eine ausführliche Beschreibung der ausbreitungsgünstigen Bedingungen sei auf Kapitel 2.1.2 verwiesen.

3.2. Anpassungen des Schallausbreitungsprognosemodells der ISO 9613-2

3.2.1. Geometrische Ausbreitung

Das Berechnungsverfahren der ISO 9613-2 nimmt eine Punktquelle an. Echeverri-Londoño [10] und Makarewicz [22] zeigen jedoch, dass für WEA die Annahme einer Linienquelle zu genaueren prognostizierten Schalldruckpegeln führt. [10] zeigt durch den Vergleich von theoretischen mit experimentellen Daten geringere Abweichungen bei der Annahme einer Linienquelle.

Die Annahme einer Linienquelle führt dazu, dass die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung von 6 dB auf 3 dB je Verdopplung des Abstandes sinkt. Folgende Abbildung 3.1 zeigt die Dämpfung über der Distanz zwischen Quelle und Empfänger. Außerdem sind die Distanzen in den zwei Messkampagnen je Art

der Dämpfung eingezeichnet. Dabei wird zwischen Punkt- und Linienquelle differenziert. Die unterschiedlichen Ausbreitungsarten werden auch als kugelförmige bzw. zylindrische Ausbreitung bezeichnet.

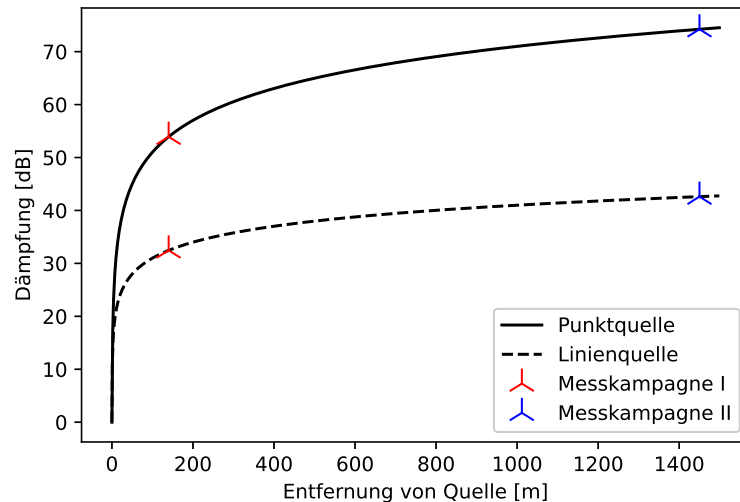


Abbildung 3.1.: Dämpfung durch geometrische Ausbreitung bei kugelförmiger (Punktquelle) und zylindrischer (Linienquelle) Schallausbreitung

In der vorliegenden Arbeit soll unter anderem untersucht werden, ob die berechneten Pegel mit Annahme einer Punkt- oder Linienquelle näher an den in der Messkampagne gemessenen Pegeln liegen. Des Weiteren soll der Frage nachgegangen werden, inwiefern die Art der Quelle mit der Oktavbandmittenfrequenz zusammenhängt. Dazu wird die Qualität der berechneten Pegel mit den gemessenen Pegeln verglichen und die Art der Quelle für die Oktavbandmittenfrequenzen variiert. Für niedrige Frequenzen wird eine Punktquelle und für höhere Frequenzen eine Linienquelle angenommen.

3.2.2. Interimsverfahren nach VDI 4101-2

Im Jahr 2015 wurde vom Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik ein Interimsverfahren veröffentlicht [6]. Dieses Verfahren geht vor allem darauf ein, dass WEA hoch liegende Quellen sind. Eine hoch liegende Quelle wird dabei definiert als „eine Quelle, deren Ersatzquelle außerhalb der zulässigen Quellhöhe im Anwendungsbereich“ [6, S. 5] der ISO 91613-2 liegt. Die zulässige Quellhöhe beträgt maximal 30 m. Laut [6] soll eine Norm, die VDI 4101 Blatt 2, ein „Verfahren zur Schallausbreitung zur Verfügung stellen, welches den Anwendungsbereich [...] auf Windkraftanlagen als hochliegende Quellen erweitert.“ [6, S. 4]

Die VDI 4101 Blatt 2 wurde im Jahr 2020 veröffentlicht [7] und macht folgende Angaben zum angepassten Verfahren für WEA als hoch liegende Quelle. Die Dämpfung durch Luftabsorption A_{atm} soll bei einer Temperatur von $T = 10^\circ C$ und einer Luftfeuchtigkeit von $F = 70\%$ berechnet werden. Dies entspricht denselben Bedingungen wie sie in [30] im Abschnitt zuvor empfohlen werden. Die meteorologische Korrektur C_{met} , welche für die Einbeziehung unterschiedlicher Witterungsbedingungen im Langzeitmittlungspegel eingesetzt wird, wird gleich Null gesetzt. Zuletzt wird der Bodenfaktor A_{gr} für alle Oktavbandmittenfrequenzen zu $A_{gr} = -3 dB$ festgelegt. Neben den beschriebenen Anpassungen der Parameter beinhaltet die VDI 4101-2 zwei Testaufgaben, welche der Qualitätssicherung der Umsetzung dienen. Auf diese wird in 3.3 näher eingegangen.

3.2.3. Empfohlene Anpassungen

Eine Arbeitsgruppe des Institutes of Acoustics mit Sitz in Hertfordshire, Großbritannien veröffentlichte im Jahr 2013 einen Leitfaden für bewährte Praktiken für die Anwendung der ETSU-R-97 Methode [30], welche wiederum die Beurteilung und Bewertung der Geräuschmission von WEA beschreibt. Dieser Leitfaden gibt neben vielen anderen Empfehlungen im Umfeld der Schallausbreitung von WEA auch Empfehlungen für die Anwendung der ISO 9613-2 ab. Auch Hansen verweist in [20] auf ebendiese Anpassungen, welche die unterschiedlichen Dämpfungsterme sowie Eingabeparameter für das Berechnungsverfahren betreffen.

- Ein Bodenfaktor von $G = 1$ soll nicht angewandt werden.
- Es soll ein Bodenfaktor von $G = 0,5$ verwendet werden - außer der Schall breitet sich über große Wasserflächen oder in städtischem Gebiet aus.
- Für die Empfängerhöhe soll $h_r = 4,0$ m angenommen werden.
- Bei der Ausbreitung des Schalls über ein konkaves Geländeprofil oder wenn das Gelände zwischen Quelle und Empfänger stark abfällt, soll eine zusätzliche Korrektur von $+3$ dB bei einem Bodenfaktor von $G = 0,5$ bzw. $+1,5$ dB mit $G = 0$ vorgenommen werden.
- Die atmosphärische Dämpfung A_{atm} soll mit einer Temperatur von $T = 10^\circ C$ und einer Luftfeuchtigkeit von $F = 70\%$ berechnet werden.

3.3. Validierung der Umsetzung anhand ISO 17534-3 und der VDI 4101-2

Jede Umsetzung einer Methode oder eines Berechnungsverfahrens benötigt Möglichkeiten zur Validierung. Die ISO 9613-2 ist bereits in vielen kommerziellen

Softwarelösungen zur Berechnung von Schallausbreitung im Einsatz. Dort dient sie häufig als Grundlage für Schallgutachten und wird in der TA Lärm als anzuwendende Methodik vorgeschrieben [5]. Die ISO 17534-3 [2] dient dazu die Qualität der Umsetzung zu gewährleisten und die Ergebnisse von Berechnungen zu validieren. Dazu gibt die Norm 19 Testfälle vor. Anhand dieser Testfälle muss die Qualität der Implementierung der verschiedenen Aspekte der Ausbreitung überprüft werden. Je Testfall wird beschrieben wie die Eingangsparameter zu konfigurieren sind. Außerdem werden die Ergebnisse je Oktavbandmittenfrequenz und je Dämpfungsterm detailliert aufgeführt, sodass auch Zwischenergebnisse auf ihre Richtigkeit überprüft werden können. Die Norm spezifiziert, dass die resultierenden Werte je Oktavbandmittenfrequenz und der Gesamtpegel eine Toleranz von $\pm 0,05 \text{ dB}$ nicht überschreiten dürfen.

Für die Berechnungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Dämpfungsterme A_{bar} sowie A_{misc} , welcher unter anderem die Dämpfung durch Bewuchs berücksichtigt, nicht angewandt. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich zwischen Quelle und Empfänger in den betrachteten Anwendungsfällen weder eine beugungsinduzierende Abschirmung bzw. Barriere noch Bewuchs befindet. Die Dämpfungsterme dafür wurden softwaretechnisch umgesetzt aber nicht anhand der ISO/TR 17534-3 validiert.

Zur Validierung der implementierten ISO 9613-2 sind die Testfälle T01 bis T07 berechnet worden. In diesen Testfällen wird schrittweise die Komplexität des Testfalls erhöht. Testfall T01 beschreibt eine ebene Fläche mit gleichbleibendem Bodenfaktor G zwischen Quelle und Empfänger wohingegen Testfall T07 einige Parametervariationen umfasst. Da Testfall T07 und der spätere Anwendungsfall die größten Ähnlichkeiten aufweisen, soll dieser und dessen Berechnung im Folgenden kurz beschrieben werden.

Testfall T07 beinhaltet eine Quelle, die über alle Oktavbandmittenfrequenzen denselben Schallleistungspegel von $L_W = 93 \text{ dB}$ emittiert. Der Luftdämpfungskoeffizient α wird bei einer Temperatur von $T = 20^\circ \text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $F = 70\%$ für den Dämpfungsterm A_{atm} berechnet. Während in Testfall T06 die Bodendämpfung mithilfe der spektralen Methode und mit unterschiedlichen Bodenfaktoren über den Ausbreitungsweg hinweg bestimmt werden muss, soll in T07 das nicht-spektrale, alternative Verfahren angewandt werden. Das Bodenprofil, welches für dieses Verfahren notwendig ist, muss ebenfalls softwaretechnisch umgesetzt werden.

Die Berechnung der Testfälle T01 bis T07 hat gezeigt, dass die Terme in korrekter Weise implementiert wurden. Damit ist die Validierung nach ISO/TR 17534-3 erfolgreich. Die weiteren Testfälle, welche die ISO/TR 17534-3 außerdem enthält, überprüfen die valide Umsetzung des Dämpfungsterms für Abschirmung an Barrieren sowie Reflexionen und Beugungen an Objekten im Ausbreitungsweg zwischen Quelle und Empfänger. Da diese Phänomene für die Berechnung der Immissionspegel am Windpark Tegelberg allerdings nicht auftreten, wurde im Zuge der Arbeit auf die Validierung verzichtet.

3.3. Validierung der Umsetzung anhand ISO 17534-3 und der VDI 4101-2

Neben der Validierung der ISO 9613-2 durch die Testfälle der ISO/TR 17534-3, wurde außerdem die Validierung des angepassten Berechnungsverfahrens nach dem Interimsverfahren [6], welches in der VDI 4101-2 [7] beschrieben wird, durchgeführt. Dazu wurde die Testaufgabe TA01 der VDI 4101-2 berechnet. Die zu berechnende Aufgabe beschreibt eine 60 m hohe WEA sowie einen Empfänger, der sich in ca. 2370 m Entfernung befindet. Die Ergebnisse entsprechen exakt den geforderten spektralen Ergebnissen der Norm. Somit wurde die ISO 913-2 richtig implementiert.

Kapitel 4.

Schalldruckpegel im Projekt Inter-Wind

Im folgenden Kapitel werden die Standortbedingungen, meteorologischen Messungen und Schallmessungen aus dem Projekt Inter-Wind vorgestellt und die Aufbereitung der Messdaten beschrieben. Außerdem werden die Ergebnisse der Berechnung nach ISO 9613-2 sowie nach VDI 4101-2 auf Basis der im Projekt vorliegenden Bedingungen aufgezeigt.

4.1. Das Projekt Inter-Wind

Die vorliegenden Messkampagnen wurden im Rahmen des Verbundprojektes Inter-Wind durchgeführt. Im Projekt Inter-Wind werden akustische, seismische und meteorologische Messungen durchgeführt und psychologische Fragebögen ausgewertet [31]. Ziel des Projektes ist es, die Auslöser für Belästigungen der Anwohner durch WEA zu identifizieren und diese wiederum zu quantifizieren. In einer ersten Messkampagne im Zeitraum vom 22.10.2020 bis zum 16.12.2020 wurden Messungen am Windpark in 140 m Entfernung von einer WEA durchgeführt. In einer zweiten Messkampagne wurden vom 23.03.2022 bis zum 12.05.2022 weitere Messungen, u.a. im Freibad Kuchen in 1,5 km Entfernung vom Windpark durchgeführt. Zunächst folgt eine Vorstellung des Windparks Tegelberg sowie dessen vorliegende Topographie. Daran schließt sich eine Beschreibung der verschiedenen Messungen und Messwerte an.

4.1.1. Der Windpark Tegelberg

Die zu untersuchenden WEA befinden sich im Windpark Tegelberg nahe der Gemeinde Kuchen auf der Schwäbischen Alb. Der Windpark besteht aus drei WEA des Typs GE 2,7 MW mit einer Nabenhöhe von 139 m und einem Rotordurchmesser von 120 m. Die Anlagen stehen in ca. 1 km Entfernung von der ersten Bebauung der Gemeinde Kuchen. Die Karte [32] in Abbildung 4.1 zeigt den Windpark Tegelberg mit den drei WEA sowie die Standorte aller Messgeräte, die zur Aufzeichnung

der Daten verwendet wurden. Auf die Messungen wird im nächsten Kapitel eingegangen.

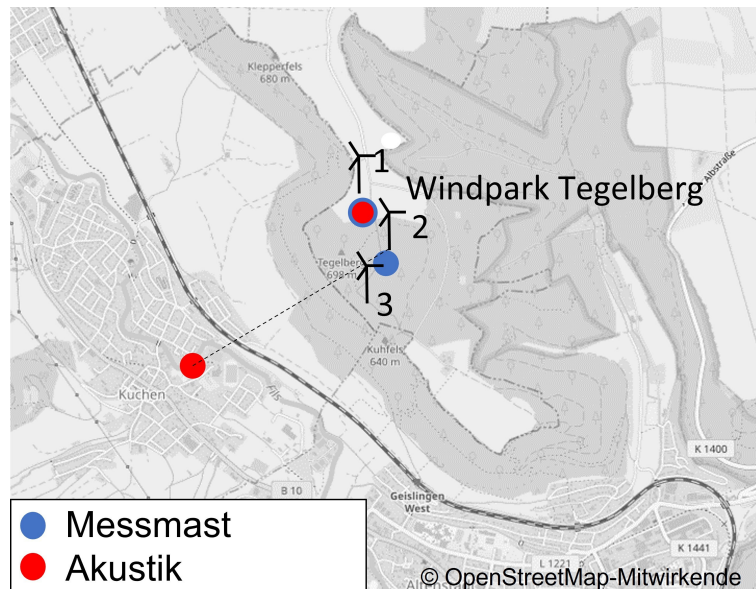


Abbildung 4.1.: Karte des Windparks Tegelberg mit den Standorten der WEA, des Messmastes und der Mikrofone

Die Topographie spielt für die Schallausbreitung eine wichtige Rolle und wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Diese zeigt das Höhenprofil des Geländes zwischen WEA 2 und dem am Freibad Kuchen positionierten Mikrofon. Das Profil wurde mithilfe von Daten aus Google Earth Pro [33] mit einer Auflösung von 50 m generiert. Anlage 2 steht auf einer Höhe von ca. 700 m über Meeresspiegel. In 400 m Entfernung vom Fuß der Anlage fällt das Gelände stark ab und flacht erst im Bereich der ersten Bebauungen der Gemeinde Kuchen wieder ab. Die auf den Boden in 400 m Höhe projizierte Distanz beträgt 1450 m .

4.1.2. Meteorologische Messungen

Für die meteorologischen Messungen wurden mehrere Messeinrichtungen verwendet. Zunächst wurden Daten an einem Messmast in $2,4\text{ km}$ nordöstlich des Windparks in mehreren Höhen erfasst. Außerdem wurden meteorologische Daten am Windpark Tegelberg an einem 10 m hohen Messmasten nahe des Mikrofons am Windpark gemessen. Im Zuge der ersten Messkampagne wurde der Messmast nahe WEA 1 platziert. In Messkampagne 2 wurde dieser Messmast, der zuvor im freien Feld südlich der WEA 1 stand, unterhalb der WEA 2 im Wald aufgestellt. Dies hat zur Folge, dass in der zweiten Messkampagne keine Werte für Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf 10 m Höhe ermittelt werden konnte. Auf die Messungen wird in [31] näher eingegangen.

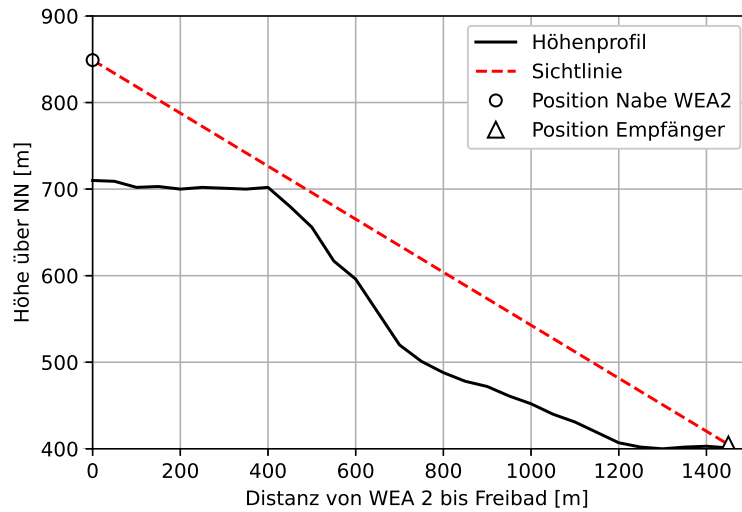


Abbildung 4.2.: Topographie zwischen WEA 2 und Freibad Kuchen

Für die spätere Berechnung von Dämpfungseinflüssen sind Temperatur und Luftfeuchtigkeit wichtige Eingangsparameter. Diese Werte des Messmastes am Windpark Tegelberg werden für beide Messkampagnen verwendet. Diese liegen als 10-Minuten Mittelwerte vor. Nachfolgende Tabelle 4.1 zeigt daher das arithmetische Mittel sowie die Bereiche in denen sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit in beiden Messkampagnen bewegen.

Tabelle 4.1.: Statistik für Temperatur und Luftfeuchtigkeit der beiden Messkampagnen

| Messkampagne | | Mittelwert | Minimum | Maximum |
|--------------|----------------------------|------------|---------|---------|
| I | Temperatur [$^{\circ}C$] | 4,01 | -5,66 | 18,15 |
| | Luftfeuchtigkeit [%] | 88,68 | 28,06 | 100 |
| II | Temperatur [$^{\circ}C$] | 8,08 | -6,21 | 25,09 |
| | Luftfeuchtigkeit [%] | 71,34 | 23,93 | 100 |

Im Folgenden wird nun auf die gemessenen Daten der Windgeschwindigkeit und Windrichtung eingegangen, um die Komplexität des Standortes darzulegen. Zunächst findet sich in Abbildung 4.3 die Windrose der ersten Messkampagne am Tegelberg. Die der Windrose zugrundeliegenden Daten sind die Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung in Nabenhöhe der WEA 1. Die Hauptwindrichtung ist West-Nord-West allerdings ist das Windrichtungsprofil gleichmäßig von Nord-West über Süd-West bis hin zu Süd-Ost verteilt. Die Windgeschwindigkeiten bewegen sich hauptsächlich im Bereich von 5 m/s bis 10 m/s.

Betrachtet man nun die Windrose der Messungen am Messmast in 10 m Höhe,

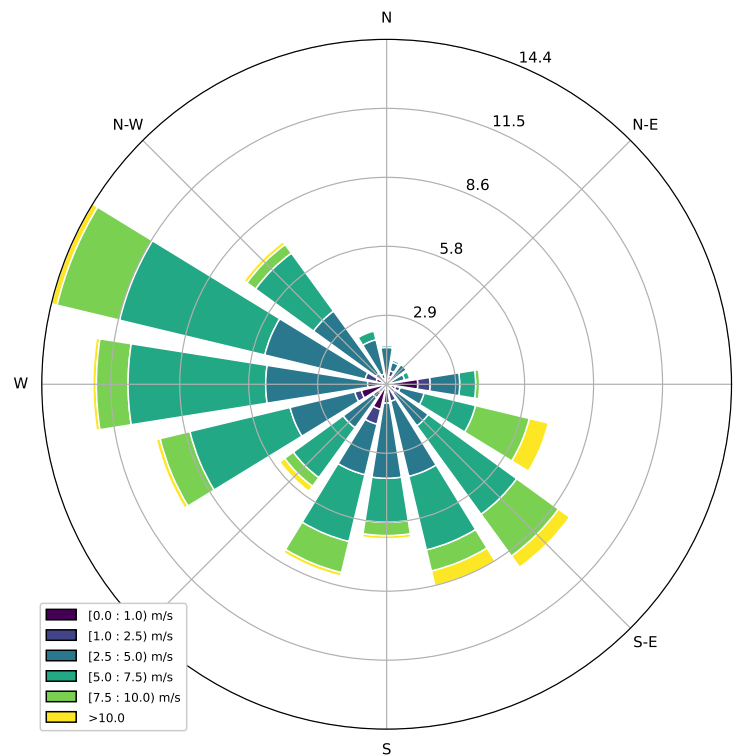


Abbildung 4.3.: Windrose Tegelberg WEA 1 in Nabenhöhe vom 24.10.2020 bis 12.12.2020

wie in Abbildung B.1 im Anhang B dargestellt, zeichnet sich ein konträres Bild ab. Dass die Windgeschwindigkeiten deutlich geringer sind als in Nabenhöhe, ist zu erwarten. Hingegen weicht die Verteilung der Windrichtung sehr stark ab. Die Hauptwindrichtung ist auf Höhe des Messmastes Osten mit einem Anteil von fast 30 %. Diese großen Abweichungen werden vermutlich durch die Topographie rund um den Windpark Tegelberg verursacht. Von Norden und Osten ausgehend, ist das Gelände relativ flach weist aber im Süden und Westen des Windparks das zuvor abgebildete stark abfallende Gelände auf. Somit könnte die Kante des Berges verursachen, dass am Messmast in 10 m Höhe andere Winde auftreten als in 139 m Höhe der WEA. Diese sind so hoch, dass sie weniger stark vom Einfluss der Topographie betroffen sind.

In der zweiten Messkampagne in 2022 tritt wiederum eine andere Verteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf. Dies ist in Abbildung 4.4 ebenfalls als Windrose dargestellt. Die Hauptwindrichtung ist Ost-Süd-Ost gefolgt von der Nord-West Richtung. Es kann hierbei kein dominierender Geschwindigkeitsbereich identifiziert werden.

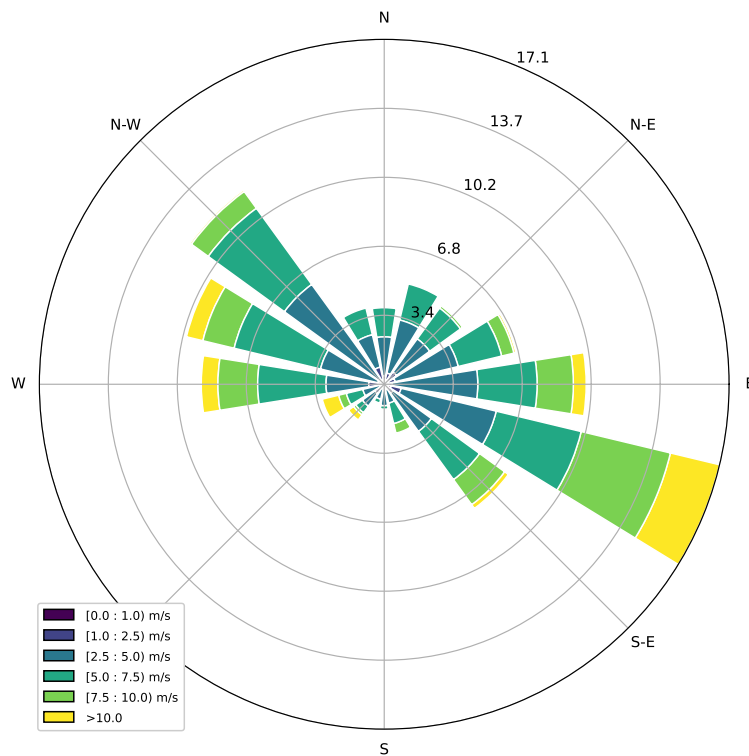


Abbildung 4.4.: Windrose Tegelberg WEA 2 in Nabenhöhe vom 24.03.2022 bis 10.05.2022

4.1.3. Akustische Messungen

In der ersten Messkampagne wurde das Mikrofon zur Aufzeichnung der akustischen Daten ca. 140 m südlich der WEA 1 platziert. Somit sind die gemessenen Schalldruckpegel sehr nahe der WEA aufgezeichnet und unterliegen kaum störenden Einflüssen, da keine Straßen oder vergleichbare Lärmquellen in der näheren Umgebung zu finden sind. Bei der zweiten Messkampagne wurden u.a. Schalldruckpegel am Freibad in Kuchen in 1,5 km Entfernung vom Windpark gemessen. Dazu wurde jeweils ein Mikrofon innerhalb und außerhalb eines Gebäudes aufgestellt. Das Freibad Kuchen liegt in bebautem Gebiet und nur ca. 200 m von der nächsten Hauptstraße entfernt. Deshalb muss im weiteren Verlauf der Auswertung darauf geachtet werden, die gemessenen Pegel zu filtern, damit unbekannte zusätzliche Lärmquellen wie der Straßenverkehr die Messwerte nicht beeinflussen.

Die gemessenen Schalldruckpegel sind in Tabelle 4.2 gelistet. Der Mittelungspegel wird nach [14] berechnet. Die hier gelisteten Pegel sind die bereits A-bewerteten Schalldruckpegel, welche aus den gemessenen Schalldrücken aufbereitet wurden. Wie die akustischen Messwerte aufbereitet werden und weitere Eingangsparameter in die spätere Berechnung mit einfließen, wird im nächsten Kapitel beschrieben. In der vorliegenden Arbeit sollen nun die Messungen aus der ersten Messkampagne

Tabelle 4.2.: Statistik der gemessenen Schalldruckpegel beider Messkampagnen in dB(A)

| Messkampagne | | Mittelungspegel | Minimum | Maximum |
|--------------|-------|-----------------|---------|---------|
| I | dB(A) | 64,93 | 28,91 | 66,53 |
| II | dB(A) | 66,55 | 29,72 | 97,27 |

herangezogen werden, um die Prognosequalität im Nahbereich zu untersuchen. Die Messungen aus der zweiten Messkampagne werden zur Untersuchung der Qualität im Fernbereich eingesetzt.

4.2. Berechnung von Eingangsparametern und Messwerten

4.2.1. Schalleistungspegel der WEA GE 2.7 MW

Der für die Berechnung zu verwendende Schalleistungspegel der WEA des Typs GE 2,7 MW mit 139 m Nabenhöhe kann dem Datenblatt der Anlage nicht direkt entnommen werden [34]. Die Schalleistungspegel sind für Oktavbandmittenfrequenzen von 32 Hz bis 16000 Hz angegeben, wobei nur die Werte von 63 Hz bis 8000 Hz in die weitere Berechnung mit einfließen. Diese Oktavbandmittenfrequenzen werden von der ISO 9613-2 [1] vorgeschrieben. Außerdem sind die Pegel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit gegeben. Die Daten liegen sowohl für Windgeschwindigkeiten auf 139 m Nabenhöhe als auch für eine standardisierte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe vor. Die Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe ist im Datenblatt der Anlage unter Annahme eines logarithmischen Windprofils und einer Oberflächenrauigkeit von 0,05 m gegeben [34]. Da die Oberflächenrauigkeit am Windpark Tegelberg unter Umständen von der im Datenblatt verwendeten abweicht, werden die angegebenen Schalldruckpegel auf Nabenhöhe angewandt. Deshalb wird im weiteren Verlauf der Arbeit ebenfalls die gemessene Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe verwendet und nicht jene, die in 10 m Höhe gemessen wurde.

Die Pegel sind als A-bewertete Schalleistungspegel gegeben und müssen laut VDI 4101-2 [7] zur Verwendung in der ISO 9613-2 in unbewertete Pegel umgerechnet werden. Die so berechneten, unbewerteten Schalleistungspegel der Anlage sind dem Anhang A zu entnehmen. Bei näherer Betrachtung der Schalleistungspegel kann festgestellt werden, dass die Pegel nicht linear mit der Windgeschwindigkeit ansteigen. Die Gesamtschalleistungspegel bei 9 m/s und 15 m/s unterscheiden sich nur um 0,2 dB. Areodynamische Geräusche gelten als Hauptgeräuschquelle von WEA [4]. Diese Geräusche hängen direkt mit der Blattspitzengeschwindigkeit

zusammen. Weil die Blattspitzengeschwindigkeit ab einer gewissen Windgeschwindigkeit nicht mehr weiter zunimmt, bleibt der Gesamtschallleistungspegel trotz zunehmender Windgeschwindigkeit konstant.

4.2.2. Gemessene Schalldruckpegel

Im Folgenden wird erläutert wie die Daten der Messkampagnen für die vorliegende Arbeit berechnet werden. Dies ist notwendig, um die gemessenen Schalldruckpegel in die Berechnungen einfließen zu lassen und auf diese Weise die Vergleichbarkeit mit den Berechnungsergebnissen im weiteren Verlauf herzustellen.

Aus den gemessenen Schalldrücken werden A-bewertete sowie Z-bewertete Schalldruckpegel für die 8 benötigten Oktavbandmittenfrequenzen berechnet. Die Mittenfrequenzen der gemessenen Schalldrücke in Terzbandspektren reichen von $0,1Hz$ bis $10.000Hz$. Für den späteren Vergleich mit den berechneten Schalldruckpegeln, welche in den Oktavbandmittenfrequenzen von $63Hz$ bis $8.000Hz$ berechnet werden, sind die gemessenen Schalldrücke aus dem Terzbandspektrum in Schalldruckpegel in diesem Oktavbandspektrum umzurechnen.

Für die Schalldruckpegel in den Oktavbandmittenfrequenzen werden jeweils drei benachbarte Schalldrücke aus der Terzbandauflösung zu einem Schalldruckpegel zusammengefasst. Dies erfolgt anhand folgender Formel.

$$L = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{p_0^2} \right) \quad (4.2.1)$$

mit L dem Schalldruckpegel in dB, p_i dem Schalldruck in Terzbandauflösung in Pa und p_0 dem Referenzdruck von $2 \cdot 10^{-5} Pa$.

4.2.3. Filterung der Daten

Nachstehend werden alle vorgenommenen Filterungen der Messwerte erläutert. Zunächst wird für die erste Messkampagne der Zeitraum vom 24.10.2020 um 00:00 bis zum 12.12.2020 um 23:50 und für die zweite Messkampagne vom 24.03.2022 um 00:00 bis zum 10.05.2020 um 23:50 festgelegt. Diese Auswahl wurde vor dem Hintergrund getroffen, dass zu Beginn der Messkampagnen Geräusche beim Aufbau der Messeinrichtungen aufgenommen wurden. Zudem kam es gegen Ende beider Messkampagnen bei mehreren 10-Minuten Werten zu Fehlerwerten, weshalb diese Tage ebenfalls nicht in die weitere Auswertung einbezogen werden.

Das erste wichtige Filterkriterium ist die Drehzahl der jeweiligen Anlage. Anhand derer wird überprüft, ob die Anlage in Betrieb ist. Wäre die Anlage nicht in

Betrieb, würde von ihr keine Geräuschemission ausgehen. Als Schwelle für den Betrieb der Anlage wird daher eine Drehzahl von $2 \frac{U}{min}$ festgelegt.

Außerdem werden die Werte für die zweite Messkampagne zusätzlich nach der Tageszeit gefiltert. So werden Störgeräusche von tagsüber auftretendem Lärm durch Straßenverkehr und weiteren Quellen gefiltert. Die Nacht wird im Folgenden definiert als die Zeitspanne von 20:00 Uhr am Abend bis 6:00 Uhr am Morgen.

Tabelle 4.3.: Filterung nach Betrieb der Anlage

| Messkampagne | Gesamt | In Betrieb (davon nachts) | Außer Betrieb |
|--------------|--------|---------------------------|---------------|
| I | 7200 | 5017 | 2183 |
| II | 6912 | 5240 (1865) | 1672 |

In Kapitel 3.1.5 wurde der Anwendungsbereich der Schallausbreitungsprognose auf ausbreitungsgünstige Bedingungen eingeschränkt.

Die erste Bedingung - die Schallausbreitung in Mitwindrichtung - kann einfach anhand der Anlagendaten überprüft und danach gefiltert werden. Dazu wird die gemessene Windrichtung in Nabenhöhe verwendet. In der ersten Messkampagne wurde das Mikrofon südlich der WEA 1 positioniert, dies entspricht einer Richtung von 180° . In der zweiten Messkampagne ist die Ausrichtung des Mikrofons 2 am Freibad Kuchen bezüglich WEA 2 entscheidend. Das Freibad liegt in süd-westlicher Richtung und geht mit 235° in die Filterung ein.

Für den späteren Vergleich mit den nach ISO 9613-2 berechneten Werten sind nur die 10-Minuten Werte relevant, in denen die Anlage auch in Betrieb ist. Daher wird das Filterkriterium der Mitwindrichtung auf die bereits nach Betrieb gefilterten Werte angewendet.

Dadurch ergeben sich die in folgender Tabelle 4.4 gegebenen Mitwindrichtungsbe-
reiche, die nach [1] mit $\pm 45^\circ$ definiert sind. Zusätzlich ist in der Tabelle die Anzahl der 10-Minuten Mittelwerte gegeben, die in diesen Bereich fallen und durch dieses Kriterium gefiltert werden.

Tabelle 4.4.: Anzahl von 10-Minuten Messswerten bei einer Filterung nach Mitwindrichtung

| Messkampagne | Windrichtungsbereich | Gesamt | Mitwind | Nicht-Mitwind |
|--------------|-------------------------|--------|---------|---------------|
| I | $135^\circ - 225^\circ$ | 5017 | 1560 | 3457 |
| II | $190^\circ - 280^\circ$ | 1865 | 330 | 1535 |

Das zweite Filterkriterium, unter welchem ausbreitungsgünstige Bedingungen vorliegen, ist die Bodeninversion. Wie in 2.1.2 bereits erläutert, tritt bei einer Bodeninversion am Boden eine geringere Temperatur auf als in der Höhe. Mithilfe

der Temperaturmessungen am WINSENT Testfeld, die auf unterschiedlichen Höhen durchgeführt wurden, kann dieses Kriterium nachgeprüft werden. Es wird eine Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur auf 96 m (Messkampagne I) bzw. 97 m (Messkampagne II) Höhe und auf 3 m Höhe von $\Delta T > 0$ K als Filterkriterium verwendet. Dadurch ergibt sich die in folgender Tabelle 4.5 gegebene Anzahl an Werten, die dieses Kriterium ebenso erfüllen.

Tabelle 4.5.: Anzahl von 10-Minuten Messswerten bei einer Filterung nach Bodeninversion

| Messkampagne | Gesamt | Bodeninversion | Keine Bodeninversion |
|--------------|--------|----------------|----------------------|
| I | 5017 | 1643 | 3374 |
| II | 1865 | 1094 | 771 |

4.3. Berechnung nach ISO 9613-2

Im folgenden Abschnitt wird die Berechnung der Schalldruckpegel am Immissionsort nach ISO 9613-2 dargelegt. Dazu werden zunächst die einzelnen Dämpfungsterme berechnet und anschließend die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens vorgestellt. Dabei werden die Berechnungen für die zwei unterschiedlichen Immissionsorte, am Windpark und am Freibad Kuchen, parallel aufgezeigt.

4.3.1. Berechnung der Dämpfungsterme

Geometrische Ausbreitung

Die geometrische Ausbreitung stellt den größten Anteil der Dämpfung dar und hängt von der Art der Quelle und von ihrer Distanz zum Empfänger ab.

Zunächst soll für die Messung am Windpark in 140 m Entfernung von WEA 1 das Kriterium zur Verwendung einer Punktquelle überprüft werden. Gemäß Formel 2.2.1 gilt:

$$\sqrt{(140 \text{ m})^2 + (139 \text{ m})^2} > \sqrt{5} \cdot 60 \text{ m}$$

$$197,28 > 134,16$$

Damit kann WEA 1 als Punktquelle angenommen werden. Aufgrund der deutlich größeren Distanz zwischen WEA 2 und dem Immissionsort am Freibad, ist die Bedingung für die zweite Messreihe ebenfalls erfüllt. Folgende Tabelle 4.6 listet die Ergebnisse der Dämpfung durch geometrische Ausbreitung auf.

Tabelle 4.6.: Dämpfung durch geometrische Ausbreitung

| Ort der Messung | Proj. Distanz d_p [m] | Distanz d [m] | Dämpfung A_{div} [dB] |
|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| Windpark | 140 | 194,49 | 56,78 |
| Freibad | 1450 | 1561,32 | 74,87 |

Atmosphärische Dämpfung

Tabelle 4.7 zeigt sowohl den Dämpfungskoeffizienten α sowie die daraus resultierende atmosphärische Dämpfung A_{atm} für eine Temperatur von $T = 10^\circ C$ und eine Luftfeuchtigkeit von $F = 70\%$. Hier werden nur die Ergebnisse für die eben beschriebene Kombination an Werten aufgeführt, da sie ebenfalls für das nachfolgende Interimsverfahren nach VDI 4101-2 verwendet werden. Die Ergebnisse für die erste Messkampagne (WEA1 - Windpark) sind mit I und für die zweite Messkampagne (WEA2 - Freibad) mit II gekennzeichnet.

Tabelle 4.7.: Dämpfung durch atmosphärische Dämpfung bei $T = 10^\circ C$, $F = 70\%$

| Frequenz [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|
| $\alpha_{atm}[db/km]$ | 0.122 | 0.411 | 1.043 | 1.928 | 3.658 | 9.664 | 32.770 | 116.882 |
| $A_{atm,I}[dB]$ | 0.024 | 0.078 | 0.203 | 0.375 | 0.711 | 1.880 | 6.373 | 22.732 |
| $A_{atm,II}[dB]$ | 0.190 | 0.642 | 1.629 | 3.010 | 5.711 | 15.089 | 51.165 | 182.491 |

Bodeneffekt

Für einen anschaulichen Vergleich der beiden Berechnungsverfahren, wird der Dämpfungsterm mit den genannten zwei Verfahren für beide Messkampagnen berechnet.

In die spektrale Berechnung des Dämpfungsterms fließt der Bodenfaktor ein. Laut [30] soll, wie bereits in Kapitel 3.2.3 beschrieben, ein Bodenfaktor von $G = 1$ nicht für eine Berechnung herangezogen werden. Um aufzuzeigen wie sich die Wahl des Bodenfaktors auf die Dämpfung A_{gr} auswirkt, wird die Berechnung für drei verschiedene Bodenfaktoren bzw. Bodenarten angestellt. Diese sind harter Boden ($G = 0$), poröser Boden ($G = 1$) sowie Mischboden, der sich zu gleichen Teilen aus hartem und porösem Boden ($G = 0,5$) zusammensetzt.

Die Bodendämpfung je Oktavbandmittenfrequenz und je Bodenfaktor ist in Tabelle 4.8 aufgeführt. Als Parameter fließen hierbei die Quellen- und Empfängerhöhe sowie die Distanz zwischen diesen Punkten in den zu untersuchenden Fällen in die Berechnung ein. Wie in Gleichung 3.1.6 wird der Dämpfungsterm für drei Bereiche

ermittelt. Auf die Auflistung die Dämpfungsterme je Bereich wird allerdings verzichtet, da sie in der weitere Auswertung nicht weiter betrachtet wird, und lediglich die Summe dargestellt.

Tabelle 4.8.: Dämpfung durch Bodeneffekt nach spektralem Berechnungsverfahren

| Frequenz [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Windpark | | | | | | | | |
| G = 0 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 |
| G = 0,5 | -3.00 | -0.21 | -0.54 | -1.50 | -1.50 | -1.50 | -1.50 | -1.50 |
| G = 1 | -3.00 | 2.57 | 1.91 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Freibad | | | | | | | | |
| G = 0 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 | -3.00 |
| G = 0,5 | -3.00 | 0.50 | -0.48 | -1.50 | -1.50 | -1.50 | -1.50 | -1.50 |
| G = 1 | -3.00 | 4.01 | 2.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Anhand der in Tabelle 4.8 aufgelisteten Dämpfungswerte ist der Einfluss des Bodenfaktors G gut zu sehen. Ein Bodenfaktor von $G = 0$, der einem harten Boden entspricht, führt zu Reflexionen am Boden über alle Frequenzbänder hinweg. Dadurch wird der Schalldruckpegel verstärkt, was wiederum am negativen Vorzeichen abgelesen werden kann. Dahingegen führt ein Bodenfaktor von $G = 1$ und damit einem sehr porösen Boden zu verhältnismäßig starker Dämpfung bei niedrigen Frequenzen. Eine Ausnahme stellt dabei allerdings das Frequenzband mit 63 Hz dar, wobei dieser Dämpfungsterm unabhängig vom Bodenfaktor G berechnet wird. Werden Frequenzen größer als 500 Hz erreicht die Dämpfung durch den Bodeneffekt mit $G = 1$ keinen Einfluss mehr auf die Schallausbreitung. Bei der nicht-spektralen Berechnung der Bodendämpfung wird A_{gr} für alle Frequenzbänder verwendet. Das nicht-spektrale Verfahren wird angewendet, wenn kein flacher Boden vorliegt und somit das spektrale Verfahren nicht mehr gültig ist. Der nicht-spektrale Dämpfungsterm der Bodendämpfung fällt deutlich kleiner aus und ist mit -5 dB als große Verstärkung anzusehen. Wie in 3.1 beschrieben, muss bei Verwendung des nicht-spektralen Verfahrens zusätzlich das Richtwirkungsmaß D_{Ω} berücksichtigt werden. Dieses ergibt sich wie in Tabelle 4.9 aufgeführt, bei beiden Fällen zu ca. 3 dB. Das Richtwirkungsmaß wird dem Schalleistungspegel, der von der Quelle ausgeht, addiert während die Bodendämpfung subtrahiert wird. Bei der negativen Bodendämpfung am Windpark ergibt sich bei diesem Verfahren eine Verstärkung von ca. 8 dB durch den Bodeneffekt. Andererseits heben sich die beiden Terme für die Berechnung des Empfängers am Freibad auf, sodass der Bodeneffekt die Schallausbreitung weder begünstigt noch hemmt.

Tabelle 4.9.: Dämpfung durch Bodeneffekt nach nicht-spektralem Berechnungsverfahren

| | Windpark | Freibad |
|------------------------------|----------|---------|
| Mittlere Höhe h_m [m] | 51.47 | 71.27 |
| $A_{gr,nicht-spektral}$ [dB] | -5.01 | 3.23 |
| D_Ω [dB] | 2.88 | 3.01 |

4.3.2. Berechnete Schalldruckpegel nach ISO 9613-2

Nachdem nun alle relevanten Dämpfungsterme berechnet und deren Ergebnisse aufgezeigt wurden, folgt nun die eigentliche Berechnung der Schalldruckpegel nach ISO 9613-2. Je Messkampagne werden die verwendeten Verfahren und Eingangsparameter wie bspw. der verwendete Bodenfaktor beschrieben. Daran schließt sich jeweils die Präsentation der Schalldruckpegel an.

Messkampagne I

Für die Berechnung der Schalldruckpegel für die Bedingungen gemäß Messkampagne I, welche die Schallausbreitung von WEA 1 zum Mikrofon in 140 m Entfernung am Windpark betrifft, werden folgende Parameter verwendet. Es wird eine Empfängerhöhe von $h_r = 4\text{ m}$ angenommen, wie nach [30] empfohlen und in Kapitel 3.2.3 aufgeführt. Die Quellhöhe fließt mit $h_s = 139\text{ m}$ in die Berechnung ein.

Die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung erfolgt durch Annahme einer Punktquelle wodurch sich die in Tabelle 4.6 gegebene Dämpfung von $A_{div} = 56,78\text{ dB}$ ergibt. Gemäß Empfehlungen aus Kapitel 3.2.3 wird die atmosphärische Dämpfung mit einer Temperatur von $T = 10^\circ\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $F = 70\%$ vorgeben. Allerdings werden hier die Werte des Messmastes aus der Messkampagne eingesetzt. Dadurch sollen die unterschiedlichen Einflüsse miteinbezogen werden. Die Berechnung erfolgt nun für Temperaturen von -6°C bis 26°C in Intervallen von 4°C . Diese werden jeweils mit Luftfechtigkeiten zwischen 10% und 90% mit 20% Intervallschritten kombiniert. Die Intervalle wurden so gewählt, um in der späteren Auswertung die Messwerte in Bereiche einzuteilen. Die hier gegebenen Werte stellen jeweils den mittleren Wert des Bereichs dar. So fallen alle Messwerte zwischen -8°C und -4°C in den Bereich mit -6°C . Für diesen mittleren Wert wird der Schalldruckpegel im Weiteren berechnet. Die Berechnung der atmosphärischen Dämpfung wird hier nicht nach Empfehlung durchgeführt, da im Weiteren die Schalldruckpegel ebenfalls nach VDI 4101-2 berechnet werden und dort ohnehin diese Empfehlung angewendet wird. Somit kann hier der Einfluss einer variablen atmosphärischen Dämpfung untersucht werden, ohne die Empfehlungen gänzlich zu vernachlässigen. Der Bodeneffekt, wird mithilfe des spektralen Verfahrens berechnet, da das Gelände zwischen WEA 1 und Empfänger

flach ist. Somit ist die Anwendungsbedingung erfüllt. Die Berechnung wurde für die Bodenfaktoren $G = 0,5$, welcher empfohlen wird, und $G = 0$ durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass ein Bodenfaktor von $G = 0$ eine geringere Abweichung von den gemessenen Schalldruckpegeln bewirkt. Dazu sei auf das folgende Kapitel 5 verwiesen. Aufgrund dessen werden die Berechnungsergebnisse mit einem Bodenfaktor von $G = 0$ aufgezeigt.

Abbildung 4.5 zeigt die Berechnungsergebnisse nach dem Schallausbreitungsprognosemodell der ISO 9613-2 unter der zuvor beschriebenen Konfiguration. Es werden die äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegel in Abhängigkeit der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit dargestellt.

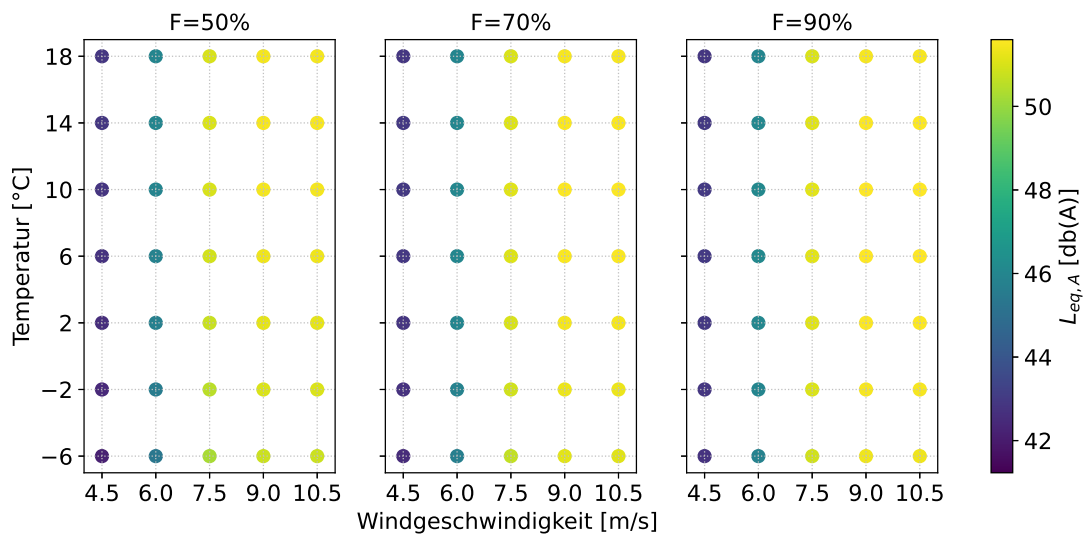


Abbildung 4.5.: Messkampagne I: Äquivalenter A-bewerteter Dauerschalldruckpegel nach ISO 9613-2 für unterschiedliche Parameterkombinationen

Auf der x-Achse werden jeweils die Windgeschwindigkeiten und auf der y-Achse jeweils die Temperaturen aufgetragen. In den drei verschiedenen Bereichen werden die zuvor genannten Parameter mit unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten kombiniert. Diese sind $F = 50\%$, $F = 70\%$ und $F = 90\%$. Auf die Darstellung der anderen Luftfeuchtigkeitsbereiche wird verzichtet, da in diesen nur sehr wenige Messwerte auftreten. Außerdem wurde der dargestellte Temperatur- und Windgeschwindigkeitsbereich eingegrenzt, da die meisten Messwerte in die dargestellten Bereiche fallen. Um eine gewisse Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird nur ein Teil der beschriebenen Bereiche abgebildet.

Der geringste berechnete und abgebildete Pegel tritt bei $T = -6^\circ\text{C}$, $F = 50\%$ und einer Windgeschwindigkeit von $v_W = 4,5\text{ m/s}$ auf und beträgt $L_{eq,A} = 42,18\text{ dB}$. Dagegen beträgt der höchste berechnete und abgebildete Pegel bei derselben Windgeschwindigkeit $42,89\text{ dB}$ und resultiert aus warmen und feuchten

meteorologischen Bedingungen ($T = 18^\circ\text{C}$, $F = 90\%$). Damit ist die Abweichung bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten gering im Vergleich zum Einfluss der Windgeschwindigkeit. Die allgemein höchsten Pegel werden bei Windgeschwindigkeiten von 9 m/s und mehr berechnet. Hier unterscheiden sich die Schalleistungspegel nur noch an der ersten Dezimalstelle und weisen daher kaum Abweichungen voneinander auf. Der höchste Schalldruckpegel am Immissionsort, der in der Abbildung 4.5 dargestellt ist, beträgt $51,47\text{ dB}$ und tritt ebenfalls bei warmen und feuchten Bedingungen sowie der höchsten Windgeschwindigkeit auf.

Messkampagne II

Nun folgen die berechneten Schalldruckpegel für die Bedingungen der Messkampagne II und damit die Schallausbreitung zwischen WEA 2 und dem am Freibad in $1,5\text{ km}$ Entfernung platzierten Mikrofon.

Für die Berechnung der Schalldruckpegel gelten dieselben Annahmen wie bei Messkampagne I mit der Ausnahme, dass das alternative, nicht-spektrale Verfahren zur Bestimmung der Bodendämpfung eingesetzt wird. Dieses kommt hier zum Einsatz, da das Gelände zwischen Quelle und Empfänger weder flach ist noch ein konstantes Gefälle aufweist. Dies ist in Abbildung 4.2 zu erkennen. Die Dämpfung, die auf jede Frequenz gleichermaßen angewandt wird, ist Tabelle 4.9 zu entnehmen. Neben dem Dämpfungsterm A_{gr} muss beim nicht-spektralen das Richtwirkungsmaß D_Ω berücksichtigt werden. Dieses ist ebenfalls in Tabelle 4.9 aufgeführt.

Die Dämpfung durch die geometrische Ausbreitung unter Annahme einer Punktquelle kann ebenfalls Tabelle 4.6 entnommen werden und beträgt $A_{div} = 74,87\text{ dB}$. Die atmosphärische Dämpfung wird wie bei Messkampagne I für die dort beschriebenen Bereiche vorgenommen.

Die berechneten äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegel am Immissionsort Freibad sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Diese folgt denselben Grundsätzen wie bereits Abbildung 4.5. Wie zuvor bei Messkampagne I, geht nun aus Abbildung 4.6 deutlich hervor, dass Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsunterschiede nur marginale Unterschiede aufweisen. Der niedrigste Pegel liegt bei $17,21\text{ dB}$ und tritt wie zuvor bei kalten, trockenen Bedingungen auf ($T = -6^\circ\text{C}$, $F = 50\%$, $v_W = 4,5\text{ m/s}$). Im Gegensatz dazu wird wieder bei warmen und feuchten Bedingungen ($T = 18^\circ\text{C}$, $F = 90\%$, $v_W = 10,5\text{ m/s}$) der höchste A-bewertete Schalldruckpegel berechnet. Dieser beträgt $26,59\text{ dB}$.

Damit ist die Berechnung der Schalldruckpegel nach ISO 9613-2 für beide Messkampagnen abgeschlossen.

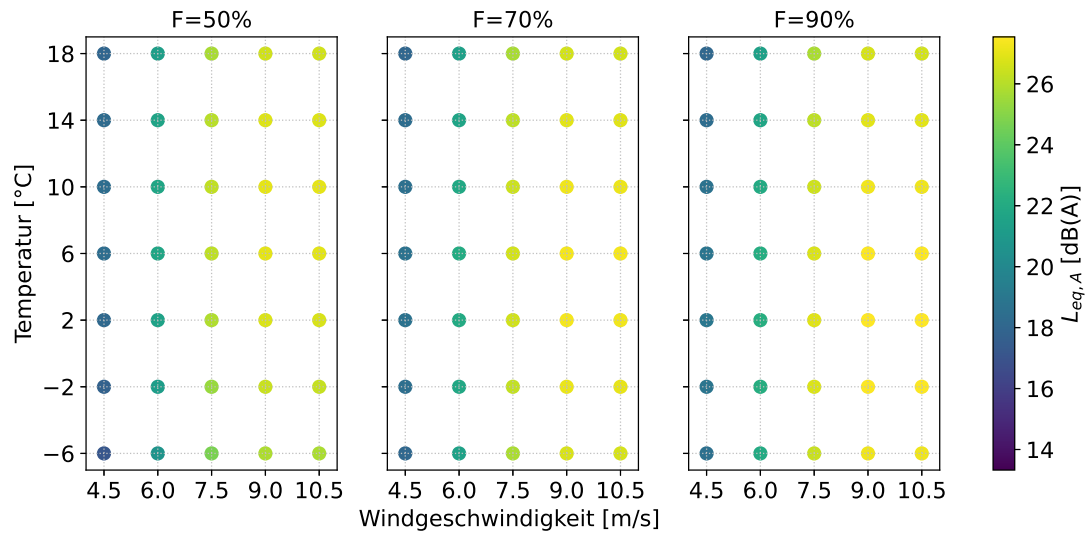


Abbildung 4.6.: Messkampagne II: Äquivalenter A-bewerteter Dauerschalldruckpegel nach ISO 9613-2 für unterschiedliche Parameterkombinationen

4.4. Berechnung nach Interimsverfahren VDI 4101-2

Im Folgenden werden die äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegel nach Interimsverfahren bzw. nach VDI 4101-2 vorgestellt. Das Berechnungsverfahren nach VDI 4101-2 nimmt keine Unterscheidung der vorliegenden Temperaturen und Luftfechtigkeiten vor. Es wird wie nach [30] empfohlen, eine Temperatur von $T = 10^\circ\text{C}$ und eine Luftfeuchtigkeit von $F = 70\%$ angenommen. Die daraus resultierende atmosphärische Dämpfung ist bereits in Tabelle 4.7 aufgeführt. Außerdem werden keine topographiespezifische Bedingungen berücksichtigt, da der Bodenfaktor mit $A_{gr} = -3\text{ dB}$ als konstant angenommen wird. Somit ist die einzige Variable der von der WEA abgegebene Schalleistungspegel. Dieser ist im Datenblatt in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe gegeben. Daher wird der A-bewertete Dauerschalldruckpegel am Immissionsort anhand der VDI 4101-2 nur für die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten berechnet, welche neben den unbewerteten Schalleistungspegeln je Oktavbandmittenfrequenz im Anhang A.0.1 dieser Arbeit gegeben sind. Die berechneten äquivalenten, A-bewerteten Dauerschalldruckpegel nach VDI 4101-2 sind in folgender Abbildung 4.7 für beide Messkampagnen über der Windgeschwindigkeit dargestellt. Auf der x-Achse sind die zuvor erwähnten Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe und auf der y-Achse die A-bewerteten Schalldruckpegel aufgetragen. Die berechneten Pegel für Messkampagne I liegen zwischen 45 dB und 55 dB , wohingegen die Pegel für Messkampagne II deutlich geringer ausfallen. Diese liegen in einem Bereich von

ca. 25 dB bis 33 dB.

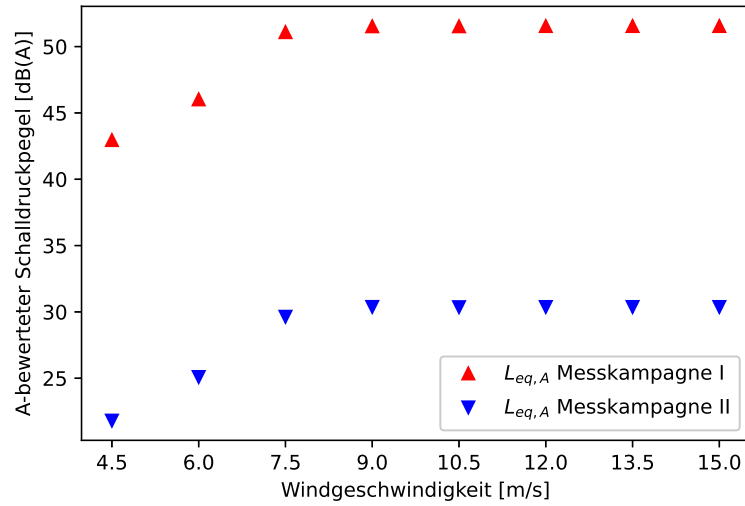


Abbildung 4.7.: Äquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel nach VDI 4101-2 beider Messkampagnen

Nachdem nun die Berechnung der Schalldruckpegel anhand der vorgestellten Schallausbreitungsprognosemodelle abgeschlossen ist, folgt im nächsten Kapitel 5 der Vergleich mit den Schalldruckpegeln aus dem Projekt Inter-Wind.

Kapitel 5.

Vergleich und Bewertung der Schallausbreitungsprognose

Das folgende Kapitel befasst sich mit dem Vergleich der berechneten mit den gemessenen Schalldruckpegeln am Windpark Tegelberg. Zunächst werden die nach ISO 9613-2 berechneten Gesamtpegel mit den Messwerten verglichen. Hierbei spielen die Filter eine wichtige Rolle, welche in Kapitel 4.2.3 beschrieben werden. Diese legen durch die ausbreitungsgünstigen Bedingungen fest, welche Messwerte zum Vergleich herangezogen werden. Darauf folgt eine Analyse der Schalldruckpegel aufgelöst in Oktavbandmittenfrequenzen für eine spezifische Parameterkombination, um die Prognose der unterschiedlichen Frequenzen zu analysieren. Dem schließt sich eine Anpassung der Dämpfung durch geometrische Ausbreitung an. Diese erfolgt für Messkampagne II, da dort große Abweichungen zwischen Rechen- und Messwert auftreten. Danach folgt eine Analyse der ausbreitungsgünstigen Bedingungen auf denen das Schallausbreitungsprognosemodell der ISO 9613-2 und damit auch der VDI 4101-2 beruht. Dabei wird der Fokus darauf gelegt, ob bei diesen Bedingungen die höheren Schalldruckpegel aufgetreten sind.

5.1. Schallausbreitungsprognose nach ISO 9613-2

In diesem Kapitel werden die berechneten Gesamtschalldruckpegel sowie Schalldruckpegel in den unterschiedlichen Oktavbandmittenfrequenzen mit den gemessenen Werten verglichen.

5.1.1. Vergleich der berechneten und gemessenen Gesamtschalldruckpegel

Messkampagne I

Zunächst werden die berechneten äquivalenten, A-bewerteten Dauerschalldruckpegel mit den gemessenen, A-bewerteten Schalldruckpegeln verglichen. Die gemessenen Pegel werden jeweils in Sektoren verschiedener Parameterkombinationen

eingeteilt und innerhalb dieser Sektoren gemittelt. Diese Sektoren wurden bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Die Mittelung der Pegel erfolgt innerhalb der einzelnen Sektoren nach DIN 45641 [14].

Für den Vergleich wird die Abweichung ΔL bestimmt. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen Mittelungspegel und berechnetem Pegel. Ein positives ΔL signalisiert, dass der Mittelungspegel größer ist als der berechnete Pegel und die ISO 9613-2 die Schalldruckpegel am Immissionsort unterschätzt. Andererseits würde ein negatives ΔL einen höheren berechneten als gemessenen Pegel bedeuten und die ISO den Pegel überschätzen.

Die untenstehende Abbildung 5.1 zeigt Abweichungen für die verschiedenen Parameterkombinationen aus Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Hierbei werden nur Schalldruckpegel aus 10-min Bins verwendet, in denen die ausbreitungsgünstige Bedingung Mitwind erfüllt ist. Die Windgeschwindigkeit ist auf der x-Achse und die Temperatur auf der y-Achse aufgetragen. In den drei Bereichen innerhalb der Abbildung wird nach den unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten differenziert. Die Farbskala gibt die Abweichung ΔL an, die in der jeweiligen Parameterkombination auftritt. Die letzte Information, welche aus der Abbildung entnommen werden kann, wird durch den Durchmesser des jeweiligen Kreises angegeben. Dieser spiegelt die Anzahl der Schalldruckpegel, die in der jeweiligen Parameterkombination gemessen wurden, wider.

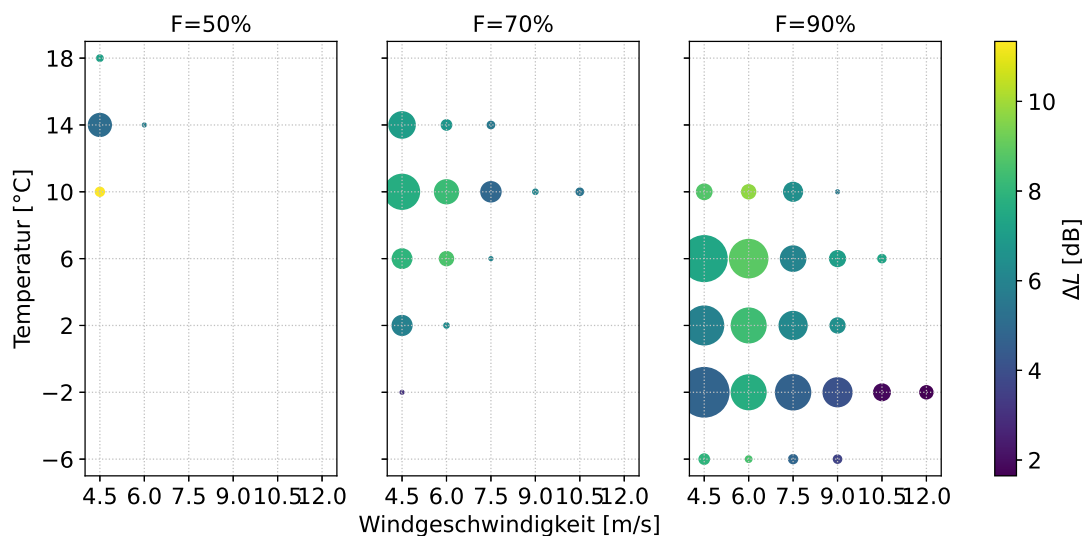


Abbildung 5.1.: Messkampagne I: Abweichung der Dauerschalldruckpegel bei Mitwind

Über diese Anzahl gemessener Pegel wurde außerdem der Mittelungspegel gebildet, der mit dem berechneten Pegel verglichen wird. Je größer die Anzahl der Pegel über die gemittelt wird, desto geringer fallen die Auswirkungen möglicher

Störgeräusche aus. So würde ein Mittelungspegel über eine große Anzahl von Messungen die jeweilige Parameterkombination besser charakterisieren. Auf dieser Prämisse wurde angenommen, dass dadurch geringere Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Schalldruckpegel auftreten könnten, wenn eine breitere Datenbasis vorliegt. Dies ist allerdings nicht zutreffend. Es kann kein Zusammenhang zwischen der Abweichung und der Anzahl der gemessenen Pegel identifiziert werden. In Abbildung 5.1 ist zu erkennen, dass die größte und kleinste Abweichung bei Parameterkombinationen vorliegen, welche jeweils einen kleinen Durchmesser aufweisen. Die größte Abweichung tritt bei geringer Windgeschwindigkeit von $4,5\text{ m/s}$, einer Temperatur von 10°C und einer Luftfeuchtigkeit von 50% auf und beträgt $11,34\text{ dB}$. Die geringste Abweichung beträgt $1,65\text{ dB}$ und wird bei $v_W = 12\text{ m/s}$, $T = -2^\circ\text{C}$ und $F = 90\%$ erreicht. Außerdem zeigt die Abbildung größere Abweichungen bei geringen und deutlich bessere Ergebnisse bei hohen Windgeschwindigkeiten. Ein möglicher Grund dafür ist die Dominanz der WEA gegenüber andere windinduzierten Geräuschquellen. Allerdings sind die Abweichungen für die meisten Parameterkombinationen größer als 3 dB . Damit wird die in Kapitel 3.1.5 beschriebene Genauigkeit von $\pm 3\text{ dB}$ nicht durchgehend eingehalten.

Messkampagne II

Analog zu Abbildung 5.1 für Messkampagne I, wird für Messkampagne II die Abweichung ΔL berechnet und in folgender Abbildung 5.2 dargestellt.

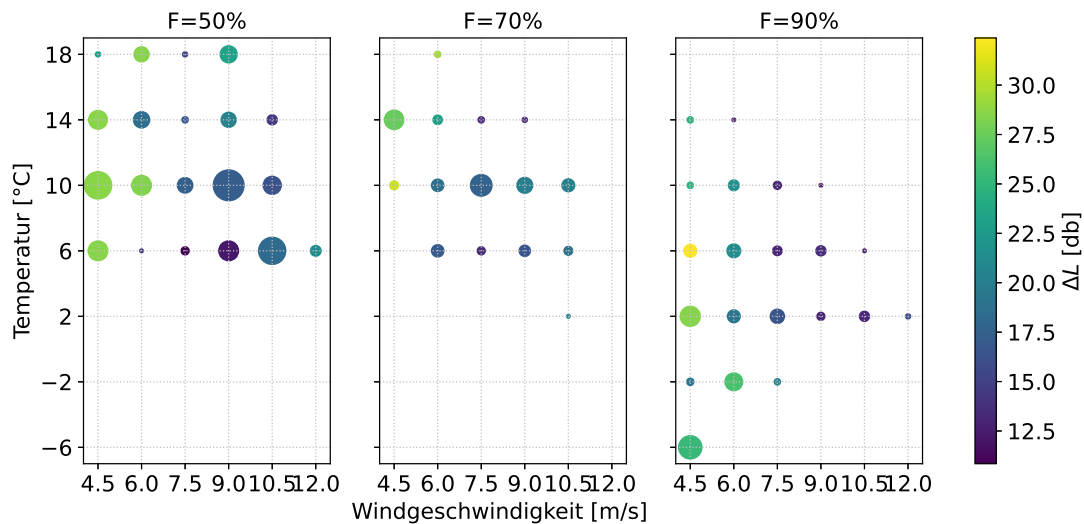


Abbildung 5.2.: Messkampagne II: Abweichung der Dauerschalldruckpegel bei Bodeninversion

Die abgebildeten Werte sind nun für Messkampagne II nach einer vorliegenden Bodeninversion gefiltert, die in Kapitel 4.2.3 beschrieben wurde. Im Gegensatz

zur Filterung nach Mitwind, liegen bei der Bodeninversion deutlich mehr Werte vor. Die Abweichungen sind im Vergleich zu Messkampagne I deutlich größer. ΔL liegt in einem Bereich von 10,84 dB(A) bis 32,39 dB(A). Es ist zu erkennen, dass die Abweichung mit zunehmender Windgeschwindigkeit wie bereits bei Messkampagne I geringer wird. Abgesehen von dieser Erkenntnis, liefert der Vergleich der Mittelungspegel und der nach ISO 9613-2 berechneten Pegel nur eine weitere Aussage: Die Abweichungen sind deutlich zu groß und liegen weit über der Genauigkeit von ± 3 dB aus Kapitel 3.1.5. Allerdings sind diese Genauigkeiten nur für Distanzen bis 1000 m und einer Quellenhöhe bis 30 m nach [1] validiert.

5.1.2. Analyse der Schalldruckpegel in Oktavbandmittenfrequenzen

Nachdem die resultierenden, A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel behandelt wurden, soll nun eine Betrachtung der Pegel innerhalb der Oktavbänder folgen. Dies dient im späteren Verlauf dazu, die Prognosequalität der ISO 9613-2 in den einzelnen Frequenzbereichen bewerten zu können. Dazu werden Messungen für sehr ausbreitungsgünstige Bedingungen bei Mitwind und Bodeninversion herangezogen. Außerdem wird die Kombination von meteorologischen Parametern gewählt zu der die meisten 10-min Mittelwerte vorliegen. Dadurch wird über einen größeren Zeitraum gemittelt und Störgeräusche haben geringeren Einfluss auf das Ergebnis. Zusätzlich kann eine Streuung der Messwerte um die Mittelwerte bzw. die berechneten Werte analysiert werden. Zunächst wird Messkampagne I betrachtet. Der Bereich in dem die meisten 10-min Mittelwerte für die genannten ausbreitungsgünstigen Bedingungen auftreten ist: $T = 4 - 8^\circ\text{C}$, $F = 80 - 100\%$ und $v_W = 5, 25 - 6, 75\text{ m/s}$. In diesen Bereich fallen 75 10-min Mittelwerte. Der A-bewertete Gesamtschalldruckpegel nach ISO 9613-2 für diesen Bereich beträgt 46,07 dB(A) und weicht um 8,04 dB vom gemittelten Gesamtschalldruckpegel des betrachteten Bereichs ab, welcher sich zu 54,11 dB(A) ergibt. Keiner der 75 gemessenen Schalldruckpegel liegt unterhalb des berechneten Wertes. Die geringste Abweichung beträgt 2,2 dB und die größte 13,2 dB. In Abbildung 5.3 sind nun die Pegel der acht Oktavbandmittenfrequenzen aufgetragen.

Zum einen ist der gemittelte Pegel für jede Oktave und zum anderen der jeweils berechnete Oktavpegel nach ISO eingezeichnet. Außerdem ist für jeden gemessenen Oktavbandpegel jeweils das 5%-Perzentil sowie das 95%-Perzentil aufgetragen, um den Schwankungsbereich der Messwerte darzustellen. Der Oktavpegel der geringsten Frequenz mit 63 Hz liegt nur um 1,4 dB unterhalb des gemittelten Oktavbandpegels. Die Abweichung zwischen gemitteltem und berechnetem Oktavpegel bleibt bis zur Frequenz 2000 Hz relativ konstant zwischen 9,0 dB und 12,6 dB. Anschließend steigt die Abweichung stark an und erreicht bei 8000 Hz eine Abweichung von 35,74 dB.

In folgender Abbildung 5.4 werden für Messkampagne II, wie zuvor für Messkam-

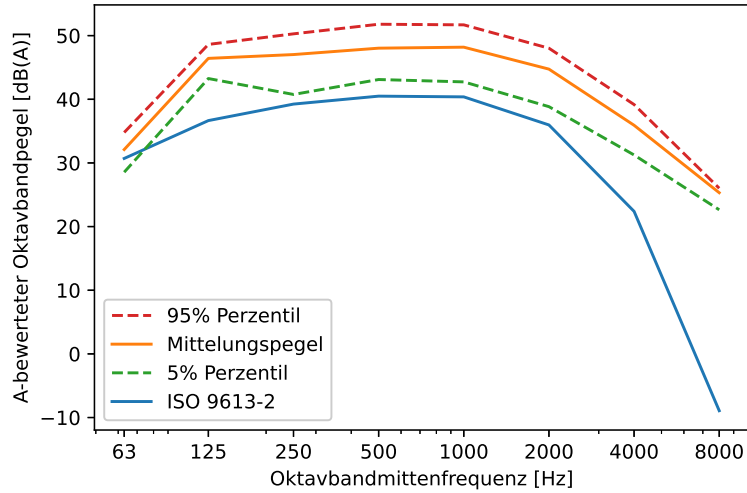


Abbildung 5.3.: Messkampagne I: Gemessene und nach ISO 9613-2 berechnete Oktavbandpegel bei Mitwind und Bodeninversion

pagne I, die berechneten Oktavbandpegel mit den gemessenen und gemittelten Oktavbandpegeln verglichen. Es werden ebenfalls nur diejenigen 10-min Mittelwerte verwendet, welche bei Bodeninversion und Mitwind auftreten. 43 10-min Mittelwerte erfüllen beide ausbreitungsgünstigen Bedingungen.

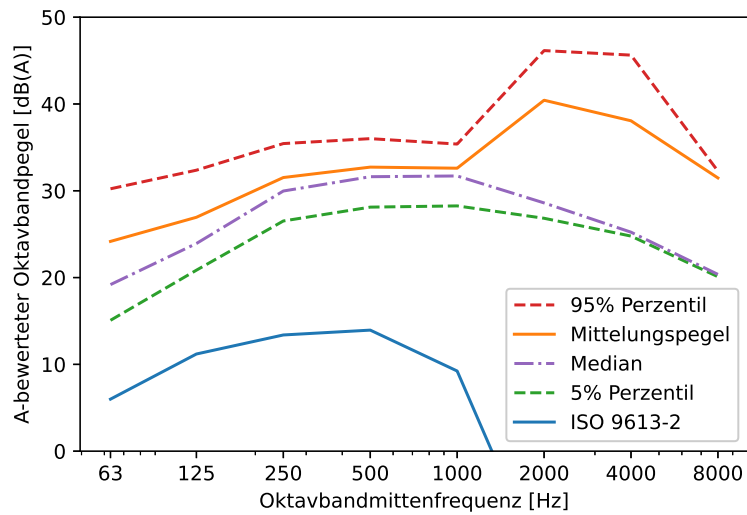


Abbildung 5.4.: Messkampagne II: Gemessene und nach ISO 9613-2 berechnete Oktavbandpegel bei Mitwind und Bodeninversion

Die meteorologischen Bedingungen sind folgende: $T = -8 - -4^{\circ}\text{C}$, $F = 80 - 100\%$ und $v_W = 0 - 5,25\text{ m/s}$. Der nach ISO 9613-2 berechnete Schalldruckpegel beträgt $25,30\text{ dB(A)}$ und weicht um $18,58\text{ dB}$ vom Mittelungspegel ab. Dieser beträgt

43,89 dB(A). Dagegen beträgt der Median nur 37,44 dB(A). Die Abweichung zwischen Median und berechnetem Pegel beträgt allerdings immer noch 12,14 dB. Aufgrund dieser großen Differenz von Mittelungspegel und Median, wird der Median für Messkampagne II zusätzlich als violette Linie in Abbildung 5.4 eingezeichnet. Anhand des geringeren Medians wird sichtbar, dass es vor allem in den höheren Oktavbandmittenfrequenzen zu starken Abweichungen und Ausreißern kommt, die mit großer Wahrscheinlichkeit von fremden Lärmquellen verursacht werden. Dadurch fällt der Mittelungspegel im Vergleich zum Median größer aus. Der nach ISO 9613-2 berechnete Oktavbandpegel liegt deutlich unterhalb des 5%-Perzentils und sinkt ab 1000 Hz sehr stark ab. In Anhang B wird das Diagramm in Abbildung B.3 so dargestellt, dass die berechneten Pegel vollständig abgebildet sind. Hauptursache für die sehr niedrigen Oktavpegel und den damit einhergehenden großen Abweichungen ist der Dämpfungsterm durch atmosphärische Dämpfung A_{atm} . Dieser folgt einem linearen Zusammenhang zwischen Dämpfungskoeffizient α und der Distanz. Durch die große Distanz in Messkampagne II wird der Dämpfungsterm sehr groß und die resultierende Dämpfung führt zu verschwindend geringen Oktavpegeln.

5.2. Schallausbreitungsprognose nach VDI 4101-2

In diesem Kapitel werden die nach VDI 4101-2 berechneten mit den gemessenen Schalldruckpegeln verglichen.

Abbildung 5.5 zeigt die A-bewerteten Schalldruckpegel jeweils aufgetragen über der Windgeschwindigkeit für beide Messkampagnen. Dabei sind die gemessenen Pegel bei Bodeninversion und Mitwind dargestellt. Im Anhang B sind für beide Messkampagnen außerdem dieselben Diagramme für die einzelne Filterung nach Mitwind und nach Bodeninversion zu finden.

In den Boxplots sind alle 10-min Mittelwerte der gemessenen, A-bewerteten Schalldruckpegel abgebildet. Darüber hinaus ist der je Windgeschwindigkeit berechnete Schalldruckpegel nach VDI 4101-2 eingezeichnet. Das rote Dreieck zeigt die berechneten Werte für Messkampagne I, während das blaue Dreieck die berechneten Werte für Messkampagne II repräsentiert.

In Messkampagne I ist zu sehen, dass der nach VDI 4101-2 berechnete Schalldruckpegel mindestens innerhalb des unteren Whiskers des boxplots liegt und sich somit innerhalb des Bereiches befindet in dem die 10-min Mittelwerte des Schalldruckpegels gemessen wurden. Dies gilt ebenfalls, wenn spezifisch nur nach Bodeninversion oder Mitwind gefiltert wird. Außerdem ist gut zu erkennen, dass der berechnete Pegel bei höheren Windgeschwindigkeiten näher am Median liegt, welcher in orange eingezeichnet ist. So wird für den Geschwindigkeitsbereich um 9 m/s, welcher sich von 8,25 m/s bis 9,75 m/s erstreckt, ein Schalldruckpegel von

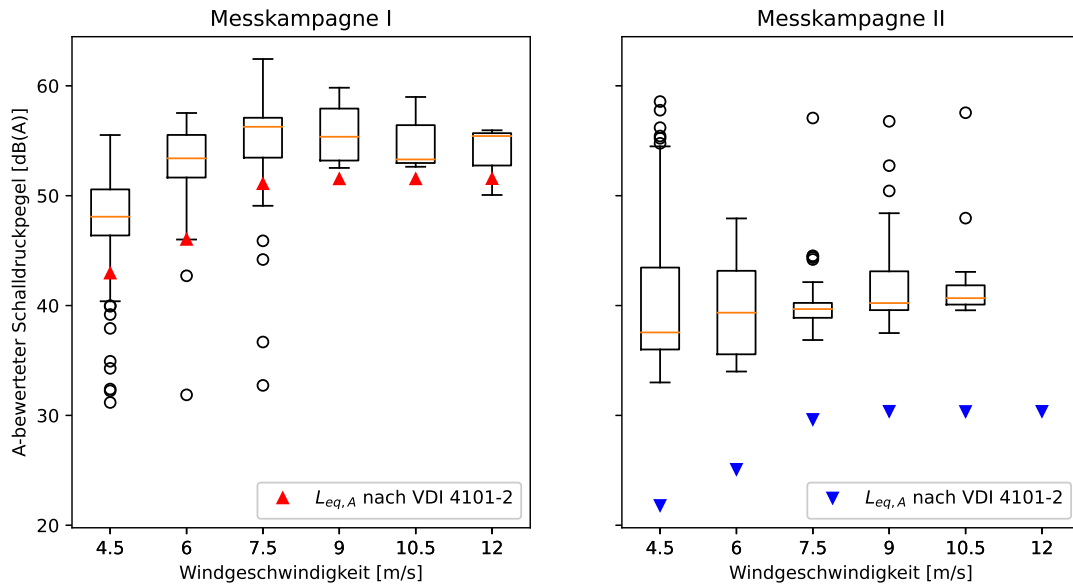


Abbildung 5.5.: Vergleich der gemessenen mit den nach VDI 4101-2 berechneten Schalldruckpegeln für beide Messkampagnen bei Bodeninversion und Mitwind

54, 55 $dB(A)$ berechnet. Der Median innerhalb dieses Geschwindigkeitsbereiches liegt nur 0, 81 dB höher bei 55, 36 $dB(A)$. Der über alle in diesem Bereich gemessenen Pegel berechnete Mittelungspegel ergibt sich zu 56, 08 $dB(A)$ und liegt nur etwas höher als der Median. Damit ist die Abweichung zwischen berechnetem Pegel und Mittelungspegel ebenfalls gering. Die größte Abweichung vom Median tritt im Geschwindigkeitsbereich um 6 m/s auf. Hier beträgt der Median 53, 40 $dB(A)$ und der berechnete Pegel 49, 03 $dB(A)$. Die Abweichung beläuft sich auf 4, 37 dB . Der Mittelungspegel in diesem Bereich beträgt 53, 97 $dB(A)$.

In der Abbildung ist außerdem zu sehen, dass die Streuung der Messwerte mit zunehmender Windgeschwindigkeit geringer wird. Grund für diese geringe Streuung ist vermutlich die Dominanz der WEA als Schallquelle im abgelegenen Windpark. Dadurch ist die WEA die einzige Schallquelle und alleinig verantwortlich für den höheren Schalldruckpegel.

Dagegen ist zu sehen, dass für Messkampagne II die Streuung unabhängig von der zunehmenden Windgeschwindigkeit stark variiert. Im Windgeschwindigkeitsbereich um 9 m/s wie zuvor in Messkampagne I betrachtet, treten nun größere Schwankungen und mehrere Ausreißer auf. Obwohl bei Messkampagne II von Beginn an nur Messungen in der Nacht betrachtet wurden, sind die große Streuung sowie die vielen Ausreißer auf andere Schallquellen zurückzuführen. Dadurch wird der Mittelungspegel beeinflusst und kann nicht mehr als valider Wert zum Vergleich verwendet werden. Hingegen ist der Median unabhängig von größeren Schwankungen und wird zum Vergleich verwendet. Die größte Abweichung

zwischen Median und berechnetem Schalldruckpegel tritt im niedrigsten Windgeschwindigkeitsbereich zwischen 0 m/s und $5,25\text{ m/s}$ auf. Der Median beläuft sich auf $37,55\text{ dB(A)}$ wobei die VDI 4101-2 einen um $15,75\text{ dB}$ geringeren Schalldruckpegel von $21,81\text{ dB(A)}$ berechnet. Die geringste Abweichung beträgt $9,85\text{ dB}$ und wird bei 9 m/s erreicht. Der Median beläuft sich auf $40,22\text{ dB(A)}$ und der berechnete Pegel auf $30,38\text{ dB(A)}$. Unter der Annahme, dass der nach VDI 4101-2 berechnete Schalldruckpegel der am Immissionsort von der WEA 2 verursacht wird in der Realität so auftritt, hätte die WEA 2 nur marginalen Einfluss auf den Schalldruckpegel am Immissionsort. Dies gilt bereits für ausbreitungsgünstige Bedingungen, wodurch der Einfluss unter anderen Bedingungen noch geringer ausfallen würde.

In Abbildung 5.5 sind die Werte für Mitwind und Bodeninversion aufgeführt. Analog dazu sind im Anhang B dieselben Abbildungen für eine alleinige Filterung nach Mitwind sowie nach einer Bodeninversion aufgeführt. In Abbildung B.4 werden die Schalldruckpegel für Messkampagne I dargestellt. Werden die zwei Filter unabhängig voneinander betrachtet, kommt es zu deutlich mehr Ausreißern. Diese Ausreißer sind vor allem geringere Pegel, die ebenfalls unter dem berechneten Pegel liegen. Außer einen etwas größeren Streuung der Messwerte, sind keine Abweichungen von den zuvor getätigten Aussagen zu finden. Die entsprechende Abbildung B.5 für Messkampagne II ist ebenfalls im Anhang zu finden. Dort ist wiederum zu beobachten, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten sich die berechneten Pegel den gemessenen annähern. Allerdings liegt bei keiner der drei Filterungen der berechnete Pegel innerhalb des unteren Whiskers des Boxplots und somit unterhalb aller gemessenen Pegel, da auch keine Ausreißer nach unten vorhanden sind. Auch Messkampagne II weist Ausreißer auf, allerdings sind dies Ausreißer nach oben mit deutlich höheren Schalldruckpegeln. Diese sind auf Fremdgeräusche zurückzuführen und werden nicht von der WEA 2 verursacht.

5.3. Anpassung der geometrischen Ausbreitung

Während die Abweichungen für Messkampagne I gering ausfallen, sind die berechneten Abweichungen für Messkampagne II sehr groß. Wenn die berechneten Schalldruckpegel als richtig angenommen werden würden, hätte die betrachtete WEA 2 keinerlei Einfluss auf den am Freibad gemessenen Schalldruckpegel. Allerdings ist in Abbildung 5.5 zu sehen, dass mit einer zunehmenden Windgeschwindigkeit ebenfalls eine Zunahme der gemessenen Schalldruckpegel einhergeht. Dies könnten allerdings auch Windgeräusche fremder Lärmquellen sein, welche durch höhere Windgeschwindigkeiten auch verstärkt werden. Folgende Abbildung zeigt daher den Zusammenhang zwischen gemessenem Schalldruckpegel und der Drehzahl der WEA 2 bei besonders ausbreitungsgünstigen Bedingungen, womit Bodeninversion und Mitwind gemeint sind.

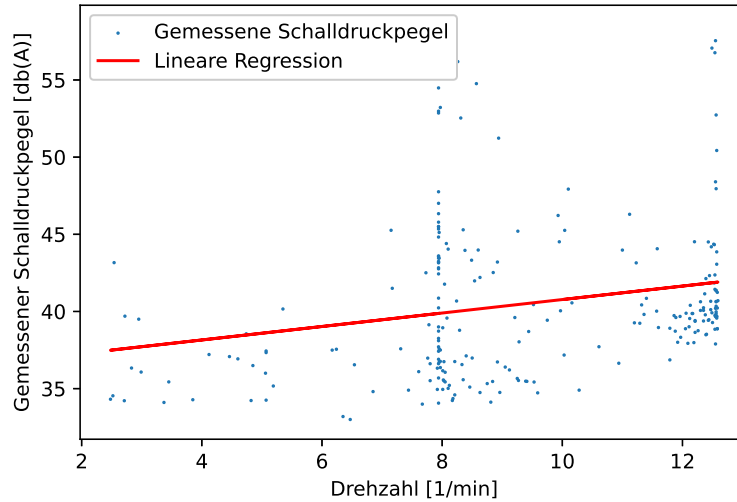


Abbildung 5.6.: Nachts gemessener Schalldruckpegel über der Rotordrehzahl der WEA 2 bei Bodeninversion und Mitwind

Die Abbildung stellt einen Zusammenhang zwischen Rotordrehzahl und Schalldruckpegel her. Da die Abweichungen so groß sind, dass nur die Anpassung der Dämpfung durch geometrische Ausbreitung einen positiven Effekt erzielen kann, soll die Anpassung dieser Dämpfung untersucht werden.

Mit zwei unterschiedlichen Ansätzen wird im Folgenden der berechnete Schalldruckpegel angepasst, um die Abweichung zum gemessenen Schalldruckpegel zu verringern. Der erste Ansatz beruht auf der Theorie nach Makarewicz und dem Übergang von einer punktförmigen zu einer zylinderförmigen Ausbreitung in einer kritischen Distanz R von der Quelle. Es werden die berechneten Schalldruckpegel nach VDI 4101-2 als Grundlage verwendet. Diese weisen eine geringere Komplexität auf, weil mit einer konstanten Temperatur und Luftfeuchtigkeit gerechnet wird. Außerdem ist das Verfahren der VDI 4101-2 speziell für WEA ausgelegt. Der zweite Ansatz basiert dahingegen auf den Erkenntnissen aus der zuvor durchgeführten Analyse der Schalldruckpegel in den einzelnen Oktavbandmittenfrequenzen. Auch hierbei wird aus besagten Gründen die VDI 4101-2 verwendet.

5.3.1. Bestimmung der kritischen Distanz

Zur Bestimmung einer kritischen Distanz, wird zunächst ein Zielwert festgelegt, welcher erreicht werden soll. Anhand dessen kann dann die geometrische Ausbreitung derart gestaltet werden, sodass das Schallausbreitungsprognosemodell genauere Schalldruckpegel prognostiziert.

Dieser Ansatz beruht auf Makarewicz [22]. Darin wird die These aufgestellt, dass beim Auftreten eines Low Level Jets die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung geringer wird. Nach einer kritischen Distanz R beträgt die Dämpfung nur

noch 3 dB je Verdopplung der Distanz anstatt 6 dB, die bei Annahme einer Punktquelle auftreten. Zur Überprüfung des Low Level Jets und die durch diesen hervorgerufene geringere Dämpfung, werden wie in [22] Windgeschwindigkeitsmessungen in großen Höhen benötigt. In [22] wird die Windgeschwindigkeit in 300 m Höhe verwendet. Da diese Windgeschwindigkeiten nicht gemessen wurden, kann eine Bestimmung mithilfe der in [22] gezeigten Berechnung nicht stattfinden. Stattdessen wird lediglich eine kritische Distanz berechnet, bei der der berechnete Schalldruckpegel dem gemessenen Schalldruckpegel entspricht. Dazu wird der Median je Windgeschwindigkeitsbereich verwendet, der in Abbildung 5.5 als orange Linie eingezeichnet ist. Da die Abweichung je Windgeschwindigkeitsbereich variiert, wird die kritische Distanz für alle Windgeschwindigkeitsbereiche bestimmt. Die kritische Distanz ergibt sich als Lösung der Gleichung:

$$A_{div} + \Delta L = R \cdot 6 \text{ dB} + (d - R) \cdot 3 \text{ dB} \quad (5.3.1)$$

Tabelle 5.1 führt die so berechneten kritischen Distanzen auf. Je größer die Abweichung ΔL , desto geringer wird die kritische Distanz.

Tabelle 5.1.: Bestimmung der kritischen Distanz je Windgeschwindigkeit für Messkampagne II

| v_W [m/s] | Median [dB(A)] | VDI [dB(A)] | ΔL [dB] | Kritische Distanz R [m] |
|-------------|----------------|-------------|-----------------|-------------------------|
| 4.5 | 37.55 | 21.81 | 15.75 | 41.54 |
| 6 | 39.35 | 25.09 | 14.25 | 58.68 |
| 7.5 | 39.68 | 29.64 | 10.04 | 154.70 |
| 9 | 40.22 | 30.38 | 9.85 | 161.62 |
| 10.5 | 40.67 | 30.36 | 10.31 | 145.38 |

Die so berechneten kritischen Distanzen sind sehr gering. In [22] beträgt die kritische Distanz für einen starken Low Level Jet 1340 m und ist damit deutlich größer als die berechneten kritischen Distanzen. Wenn dieselbe kritische Distanz auf die Schallausbreitung in Messkampagne II angewendet würde, hätte dies eine um 0,66 dB geringere Dämpfung zur Folge und somit einen zu vernachlässigenden Effekt auf die Verbesserung der Prognosequalität. Daher sind die berechneten kritischen Distanzen als unrealistisch zu bewerten. In dieser Form und als alleinige Anpassung des Schallausbreitungsprognosemodells ist dieser Ansatz als nicht zielführend zu bewerten.

5.3.2. Frequenzabhängige Dämpfung durch geometrische Ausbreitung

Beim zweiten Ansatz wird dieselbe Dämpfung durch geometrische Ausbreitung für die gesamte Distanz zwischen Quelle und Empfänger verwendet. Allerdings wird die Art der Dämpfung für die Oktavbandmittenfrequenzen variiert und die daraus resultierende Abweichung analysiert. Aus Abbildung 5.4 geht hervor, dass die Abweichung für die Oktavbandpegel nach ISO 9613-2 bei hohen Frequenzen groß ist. Dies gilt ebenso für die Berechnung nach VDI 4101-2.

Für die folgende Betrachtung der frequenzabhängigen Dämpfung, wird der Median des jeweiligen Oktavbandes im Windgeschwindigkeitsbereich von $6,75\text{ m/s}$ bis $8,25\text{ m/s}$ verwendet. Wie in Abbildung 5.5 für Messkampagne II zu sehen, ist in diesem Bereich die Abweichung vergleichsweise geringer. Darüber hinaus sind die gemessenen Schalldruckpegel mit geringer Streuung um den Median verteilt, was zu einer Datengrundlage führt, welche weniger Störgeräuschen unterliegt als andere Windgeschwindigkeitsbereiche. In Kapitel 5.1.2 wurde bereits begründet weshalb der Median gegenüber dem Mittelungspegel eine bessere Wahl zum Vergleich mit dem berechneten Pegel darstellt. Daher dient dieser nun ebenfalls in Oktavbandauflösung als Vergleichsinstrument.

Der Median des Gesamtschalldruckpegels im zuvor erwähnten Bereich und bei Mitwind und Bodeninversion beträgt $39,68\text{ dB(A)}$. Dieser weicht allerdings vom Gesamtschalldruckpegel ab, welcher sich jeweils aus dem Median der Oktavbandpegel ergibt. Dieser berechnet sich zu $39,62\text{ dB(A)}$. Aufgrund der erwähnten, geringen Streuung in diesem Bereich ist ebenso diese Differenz sehr gering. Der nach VDI 4101-2 berechnete Schalldruckpegel beträgt $29,64\text{ dB(A)}$, was einer Abweichung von ca. 10 dB entspricht.

Die Mediane der Oktavbandpegel sind in Tabelle 5.2 neben den Oktavbandpegeln nach VDI 4101-2 und der Abweichung ΔL je Oktavband gegeben. Hier ist wiederum die bereits erwähnte große Abweichung bei hohen Frequenzen zu sehen.

Tabelle 5.2.: Prognosequalität der VDI 4101-2 in Oktavbandauflösung für Messkampagne II

| Frequenz [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
| Median [dB(A)] | 19.93 | 27.67 | 33.22 | 33.96 | 32.76 | 30.98 | 27.84 | 21.41 |
| VDI [dB(A)] | 9.24 | 14.29 | 16.00 | 16.62 | 14.62 | 2.14 | -43.53 | -190.66 |
| ΔL [dB] | 10.69 | 13.38 | 17.22 | 17.34 | 18.14 | 28.84 | 71.38 | 212.07 |

Mit einer Variation der geometrischen Ausbreitung in den hohen Oktavbandmittenfrequenzen wird nun versucht die Abweichung zwischen dem Median des gemessenen und dem nach VDI 4101-2 berechneten Schalldruckpegels zu reduzieren. Die Ergebnisse der Variation sind in folgender Tabelle 5.3 aufgeführt. In

der zweiten Zeile sind die Oktavbandpegel zu sehen, wenn für die Frequenzen 4 kHz und 8 kHz eine Linienquelle angenommen wird. Dadurch resultiert eine Dämpfung von nur 3 dB je Verdoppelung der Distanz und es ergibt sich eine Dämpfung von $42,39\text{ dB}$ statt $74,87\text{ dB}$. Dies entspricht einer um $32,48\text{ dB}$ reduzierten Dämpfung. Allerdings hat diese große Reduktion keinen Einfluss wenn nur die zwei höchsten Frequenzen betrachtet werden. Die Oktavpegel werden so niedrig berechnet, dass selbst eine theoretische Verstärkung in dieser Größenordnung keinerlei Einfluss auf den Gesamtschalldruckpegel L_{Total} hat. Wenn nun allerdings zusätzlich der Oktavpegel bei 2 kHz unter Annahme einer Linienquelle berechnet wird, ergibt sich ein Gesamtschalldruckpegel von $42,18\text{ dB(A)}$, der um $2,56\text{ dB}$ größer ausfällt als der Gesamtschalldruckpegel, welcher sich aus den in der Tabelle 5.2 aufgeführten Oktavpegeln ergibt. Damit kann zwar die Abweichung des Gesamtschalldruckpegels deutlich reduziert werden, allerdings überschreitet der berechnete Oktavbandpegel bei 2 kHz nun den Median um $11,20\text{ dB}$.

Diese Analyse hat gezeigt, dass eine Variation der Dämpfung durch geometrische Ausbreitung die Prognosequalität unter den hier untersuchten Bedingungen verbessern kann. Jedoch führt dies zu stärkeren Abweichungen in Oktavbandaufösung. Das zuvor relativ gleichmäßig zu niedrige Pegelprofil zwischen 63 Hz und 2 kHz weicht wie zuvor beschrieben nun bei 2 kHz ab. Allerdings ist die Abweichung des Oktavpegels geringer als zuvor. Mit Annahme einer Punktquelle lag dieser Oktavpegel um $28,84\text{ dB}$ unterhalb des Medians und mit Annahme einer Linienquelle nun um nur noch $11,20\text{ dB}$ über dem Median.

Tabelle 5.3.: Resultierende Oktavpegel in dB(A) durch frequenzabhängige Variation der geometrischen Ausbreitung

| Frequenz [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | L_{Total} |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------------|
| 4 kHz | 13.44 | 19.89 | 23.70 | 25.32 | 23.32 | 10.24 | -4.00 | -152.53 | 29.64 |
| 2 kHz | 13.44 | 19.89 | 23.70 | 25.32 | 23.32 | 42.18 | -4.00 | -152.53 | 42.41 |

5.4. Analyse der ausbreitungsgünstigen Bedingungen

Das Berechnungsverfahren der ISO 9613-2 und damit auch das der VDI 4101-2 beruhen auf den ausbreitungsgünstigen Bedingungen. Da bei Mitwind und einer vorliegenden Bodeninversion am Immissionsort größere Schalldruckpegel auftreten. Dies wird im Folgenden anhand der Messwerte aus Messkampagne I untersucht. Die gemessenen Schalldruckpegel in Messkampagne II sind mehr Störgeräuschen ausgesetzt, weshalb sie in dieser Analyse nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 5.7 zeigt jeweils den gemessenen, A-bewerteten Schalldruckpegel über der Rotordrehzahl der WEA 1. Die orangenen Punkte repräsentieren je Diagramm Messwerte unter ausbreitungsgünstigen Bedingungen und die blauen Punkte jeweils alle Messwerte, welche diese Bedingungen nicht erfüllen. Neben der Punktwolke sind außerdem für jedes Diagramm zwei Trendlinien eingezeichnet. Dabei stellt die grüne Trendlinie jeweils eine einfache lineare Regression der Werte bei ausbreitungsgünstigen Bedingungen dar. Die rote Trendlinie steht analog dazu für die Nichterfüllung der jeweiligen Bedingungen.

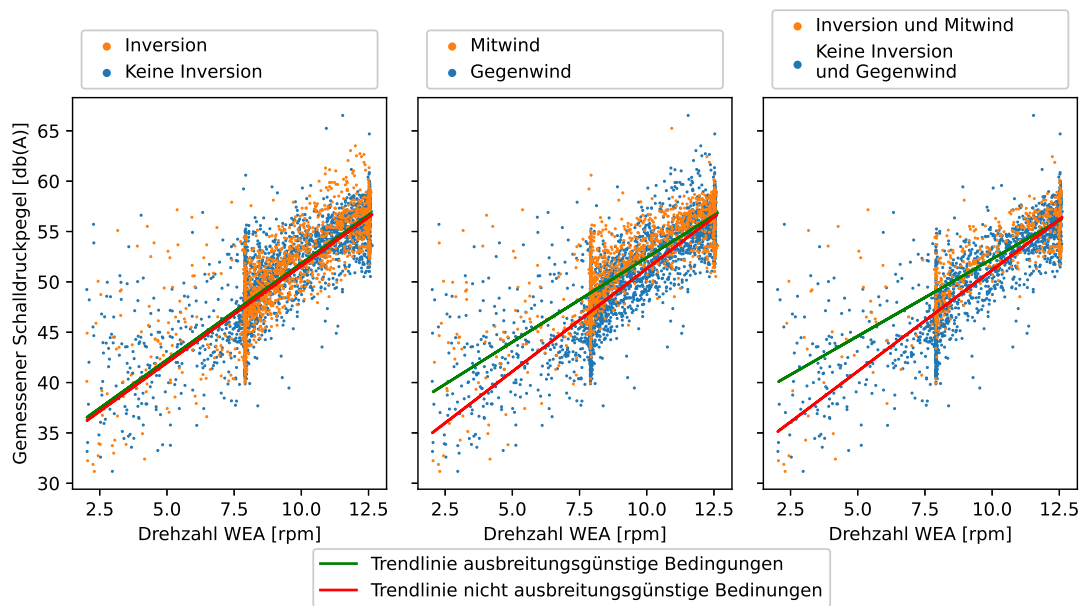


Abbildung 5.7.: Schalldruckpegel über der Rotordrehzahl für unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen

In den drei Diagrammen werden nun jeweils unterschiedliche Filterungen vorgenommen. Im linken Diagramm wird zunächst danach unterschieden ob eine Bodeninversion vorliegt oder nicht. Die eingezeichneten Trendlinien zeigen über alle Rotordrehzahlen hinweg keinerlei Unterschiede auf. Somit können die Auswirkungen von ausbreitungsgünstigen Bedingungen für eine Bodeninversion in den Messwerten nicht erkannt werden. Im Gegensatz dazu weist das mittlere Diagramm gewisse Unterschiede zwischen den Bedingungen auf. Hierbei dient die Windrichtung als Filterkriterium. Mit der Mitwindrichtung wird eine günstige Ausbreitung der Schallwellen assoziiert. Dies kann ebenfalls für die Messwerte aus Messkampagne I gezeigt werden. So liegt die Trendlinie bei Mitwind vor allem niedrigen Drehzahlbereich deutlich über der bei Gegenwind. Mit Gegenwind werden hierbei alle Windrichtungen bezeichnet, welche nicht in den in Kapitel 4.2.3 definierten Sektor fallen. Nochmals bessere Bedingungen für eine günstige Schallausbreitung können im rechten Diagramm abgelesen werden. Durch die kom-

binierte Filterung nach Bodeninversion und Mitwind steigt die grüne Trendlinie weiter an und bei niedrigen Drehzahlen werden höhere Schalldruckpegel gemessen als bei den zwei Filterungen zuvor. Bei hohen Drehzahlen ist die Abweichung der Trendlinien für alle drei Diagramme sehr gering und läuft jeweils in einen Punkt zusammen. Somit zeigt die Analyse der ausbreitungsgünstigen Bedingungen, dass die Filterung nach Mitwind höhere Schalldruckpegel aufweist als wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist. Währenddessen die Bodeninversion allein keine höheren Schalldruckpegel verzeichnet, kann jedoch die Kombination beider Filterungen durchaus als ausbreitungsgünstig charakterisiert werden.

Kapitel 6.

Fazit und Ausblick

Das folgende Kapitel gibt letztlich ein zusammenfassendes Fazit der vorliegenden Studienarbeit und geht dabei vor allem auf die Bewertung der Prognosequalität ein, welche aus dem Vergleich der berechneten mit den gemessenen Schalldruckpegeln hervorgegangen ist. Zuletzt wird ein Ausblick auf weitere Forschungsfelder im Bereich der Schallausbreitungsprognosemodelle von WEA gegeben.

6.1. Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war das Schallausbreitungsprognosemodell der ISO 9613-2 auf den Windpark Tegelberg anzuwenden. Es sollten Anpassungen des Berechnungsverfahrens an die Prognose der Schallimmission von WEA angewandt werden. Darüber hinaus stellte die VDI 4101-2 Eingangsparemeter für das Schallausbreitungsprognosemodell bereit, um ebenfalls eine Anpassung des Verfahrens auf die Anwendung bei WEA zu bewirken. Das Schallausbreitungsprognosemodell wurde implementiert und anhand mehrerer Testfälle eine Qualitätssicherung durchgeführt. Anhand der Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Testfälle, kann die Implementierung des Modells als valide bezeichnet werden.

Im Rahmen des Projekts Inter-Wind wurden im Windpark Tegelberg zwei Messkampagnen durchgeführt, welche die Grundlage für die Bewertung des Schallausbreitungsprognosemodells in der vorliegenden Arbeit bildeten. Die erste Messkampagne untersuchte die Schallimmission in 140 m Entfernung einer WEA, während in Messkampagne II Schalldruckpegel in 1,5 km Entfernung gemessen wurden.

Für die Bewertung wurden für verschiedene Kombinationen der Parameter Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit aus den gemessenen Schalldruckpegeln Mittelungspegel gebildet. Anhand des Schallausbreitungsprognosemodells ISO 9613-2 und verschiedenen Anpassungen der Eingangsparemeter die Schalldruckpegel für die unterschiedlichen Parameterkombinationen berechnet. Dabei stellte sich heraus, dass die Prognosegenauigkeit bei höheren Windgeschwindigkeiten größer ist und es dort zu geringeren Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Pegel kommt. Für Messkampagne I konnten für wenige Parameterkombinationen Pegel innerhalb der in der ISO 9613-2 beschriebenen Genauigkeitsbereich von $\pm 3 \text{ dB}$. Allerdings lag die Abweichung für den Vergleich

mit Messkampagne II in einem Bereich von 10 *dB* bis über 30 *dB*. Eine Analyse der Schalldruckpegel in den einzelnen Oktavbandmittenfrequenzen hat gezeigt in welchen Frequenzbändern diese großen Abweichungen auftreten. So konnte die atmosphärische Dämpfung als Hauptursache für starke Dämpfungen in hohen Frequenzen ausgemacht werden. Der Untersuchung der ISO 9613-2 folgte eine Analyse der Immissionsprognose nach VDI 4101-2. Die VDI 4101-2 berechnet die Schalldruckpegel mit fest vorgegebenen Werten der Temperatur und Luftfeuchtigkeit, was die Komplexität der Berechnungsergebnisse gegenüber dem Verfahren der ISO 9613-2 deutlich reduziert. Außerdem nimmt die VDI 4101-2 einen fixen Wert für die Bodendämpfung an. Dieser entspricht der Bodendämpfung der ISO 9613-2 bei hartem Boden. Daher werden für Messkampagne I dieselben Schalldruckpegel berechnet. Für höhere Windgeschwindigkeiten über einschließlich 7,5 *m/s* werden Schalldruckpegel prognostiziert, welche vom Median der Messungen nur um wenige *dB* abweichen und innerhalb des Genauigkeitsbereichs von ± 3 *dB* liegen. So kann für den Bereich, der mit 140 m im Nahbereich des Windparks liegt und in Messkampagne I untersucht wurde, eine gute Prognosequalität festgestellt werden. Dahingegen weisen sowohl die ISO 9613-2 als auch die VDI 4101-2 bei Messkampagne II große Abweichungen auf. Deshalb wurde anhand zwei verschiedener Ansätze versucht die Prognosequalität zu verbessern. Der erste Ansatz basiert auf einer Änderung der Art der geometrischen Ausbreitung nach einer kritischen Distanz. Allerdings führte dieser Ansatz zu einer zu geringen kritischen Distanz als in jener Studie, auf welcher der Ansatz basiert. Daher wird der erste Ansatz als nicht valide angesehen. Der zweite Ansatz variiert die Art der geometrischen Ausbreitung für hohe Oktavbandmittenfrequenzen, da laut vorheriger Analyse dort die größten Abweichungen auftreten. Unter der Annahme, dass die Schallausbreitung in den Frequenzen 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz zylinderförmig auftritt, kann die Abweichung des Gesamtschalldruckpegels vom Median von 10 *dB* auf 2,56 *dB* reduziert werden. Diese Verbesserung der Prognosequalität geht allerdings mit großen Schwankungen in Oktavbandauflösung einher. Der zweite Ansatz liefert bessere Ergebnisse als der erste, jedoch wurde diese Anpassung sehr spezifisch für die vorliegenden Messwerte durchgeführt. Daher kann der frequenzabhängige Ansatz nicht ohne Weiteres auf andere Anwendungsfälle übertragen werden.

6.2. Ausblick

Im Jahre 2015 wurde im Rahmen eines Interimsverfahren festgelegt, dass eine zu veröffentlichende Richtlinie die ISO 9613-2 auf hochliegende Quellen bzw. WEA erweitert. Diese Richtlinie wurde 5 Jahre später mit der VDI 4101-2 veröffentlicht. Dies zeigt den langsamen Prozess der Erstellung und Validierung solcher Richtlinien. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren noch für einen gewissen Zeitraum zur Anwendung kommen wird bis numerische Modelle die halb-empirischen Prognosemodelle ablösen werden.

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Prognosequalität des Schallausbreitungsprognosemodells ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten, welche in der gesamten Kette auftreten können. Dies ist ein weiteres, großes Forschungsfeld, da vom Schallleistungspegel der WEA bis hin zur Messung der Schalldruckpegel alle Variablen mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Außerdem haben die Messungen gezeigt, dass die atmosphärische Dämpfung im betrachteten Modell für hohe Frequenzen sowohl im Nah- als auch im Fernbereich deutlich zu groß ist. Dies könnte ebenfalls von Bedeutung sein, um die Schallausbreitungsprognose zu verbessern. Darüber hinaus ist die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung, wie sie in dieser Arbeit mit zwei verschiedenen Ansätzen bereits variiert wurde, ebenfalls ein kritischer Faktor für die Verbesserung der Prognosequalität. Dieser Term hat den mit Abstand größten Einfluss auf die Geräuschemission und könnte deshalb zuerst weiter untersucht werden.

Schallausbreitungsprognosemodelle und die Verbesserung deren Qualität sind kritische Faktoren für den Ausbau der Windenergie an Land. Die damit durchgeführten Schallimmissionsgutachten sind nicht nur für die erfolgreiche Durchführung von Projekten sondern ebenso für die Akzeptanz von Anwohnern und deren Geräuschbeeinträchtigung von enormer Wichtigkeit.

Anhang A.

Eingangsparameter

A.0.1. Schallleistungspegel der WEA GE 2.7

Tabelle A.1.: Unbewertete Schallleistungspegel der WEA GE2.7

| Standardisierte Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe [m/s] | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Windgeschwindigkeit auf 139 m Nabenhöhe [m/s] | | 4.5 | 6 | 7.5 | 9 | 10.5 | 12 | 13.5 | 15 |
| Frequenz [Hz] | 63 | 107.5 | 110.7 | 111.7 | 114.7 | 114.6 | 114.5 | 114.5 | 114.5 |
| | 125 | 102.9 | 106.6 | 108.5 | 110.9 | 110.8 | 110.7 | 110.7 | 110.7 |
| | 250 | 98.1 | 101.8 | 105.8 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 |
| | 500 | 94.7 | 97.8 | 103.4 | 103.6 | 103.6 | 103.7 | 103.7 | 103.7 |
| | 1000 | 92.2 | 94.8 | 100.9 | 100.6 | 100.6 | 100.6 | 100.6 | 100.6 |
| | 2000 | 87.9 | 90.3 | 96 | 96.3 | 96.4 | 96.4 | 96.4 | 96.4 |
| | 4000 | 78.5 | 81.2 | 86.1 | 88.1 | 88.1 | 88.1 | 88.1 | 88.1 |
| | 8000 | 64.8 | 67.5 | 71 | 73.1 | 73.1 | 73.2 | 73.2 | 73.2 |
| Gesamtschallleistungspegel | | 109.4 | 112.8 | 114.7 | 117.1 | 117.0 | 116.9 | 116.9 | 116.9 |

Anhang B.

Weitere Abbildungen

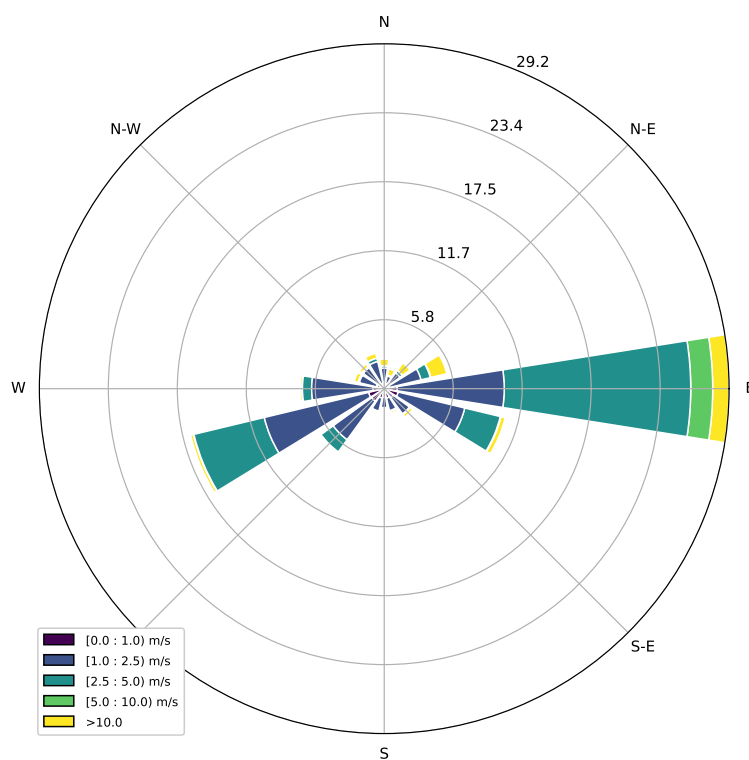


Abbildung B.1.: Windrose Tegelberg gemessen am Messmast vom 24.10.2020 bis 12.12.2020

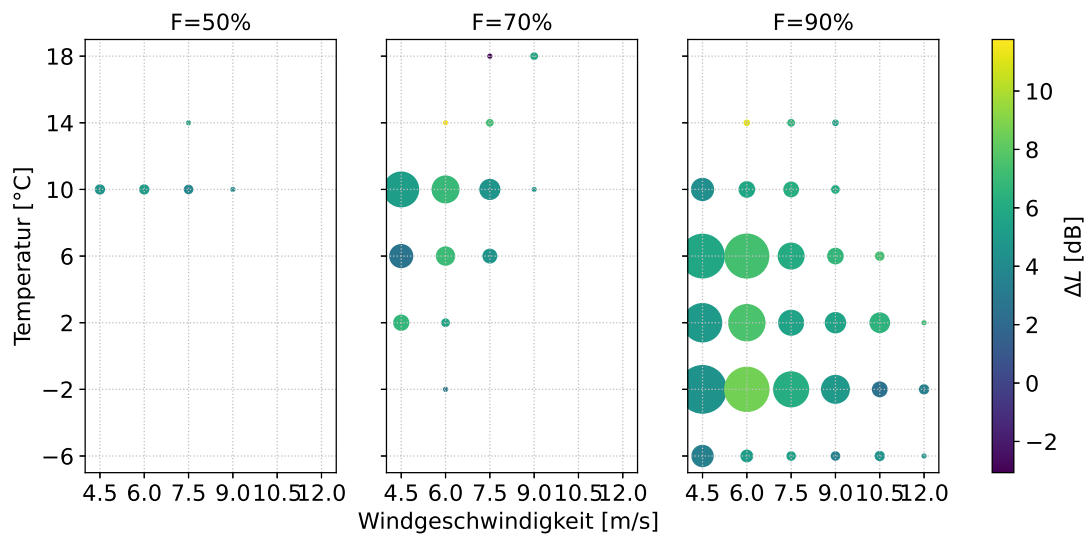


Abbildung B.2.: Messkampagne I: Abweichung der Dauerschalldruckpegel bei Bodeninversion

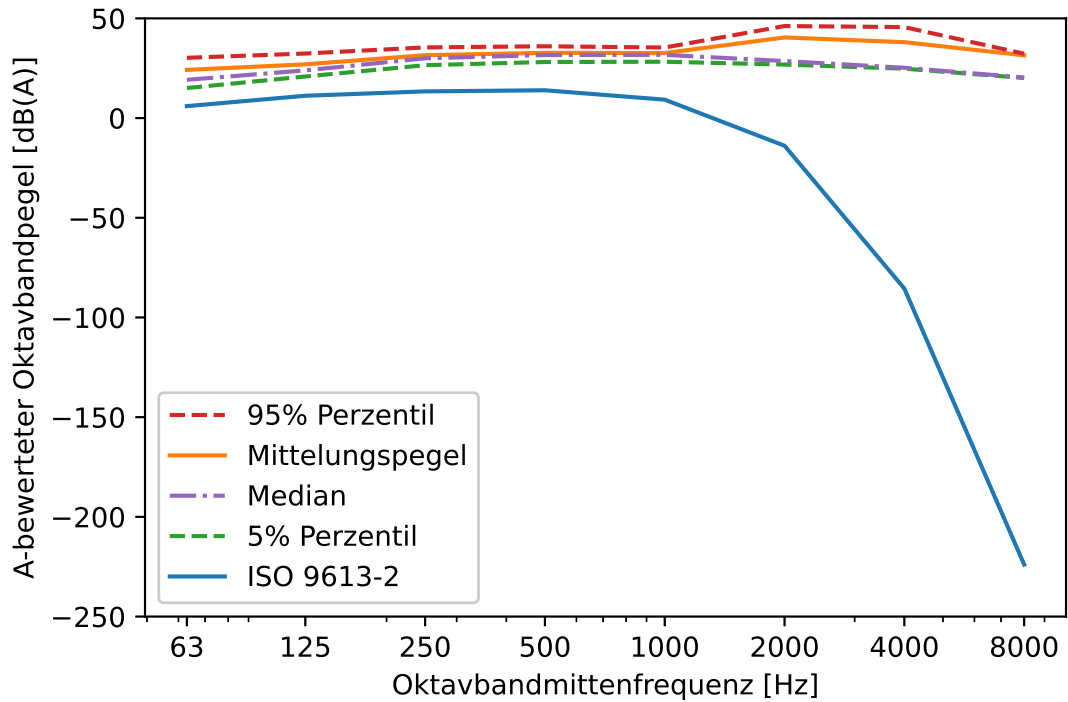


Abbildung B.3.: Darstellung der Oktavbandpegel für Messkampagne II

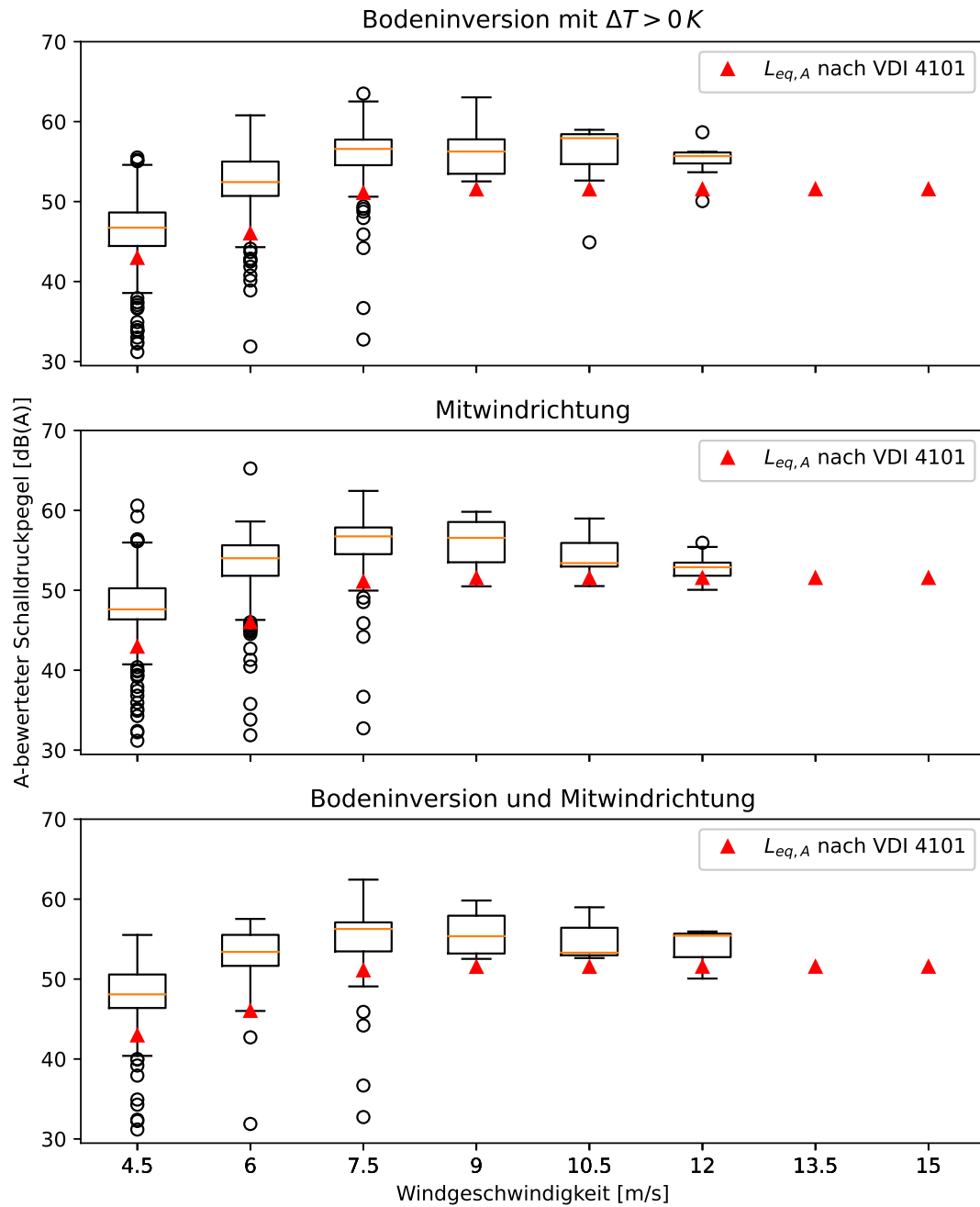


Abbildung B.4.: Messkampagne I: Vergleich der gemessenen mit den nach VDI 4101-2 berechneten äquivalenten, A-bewerteten Schalldruckpegeln

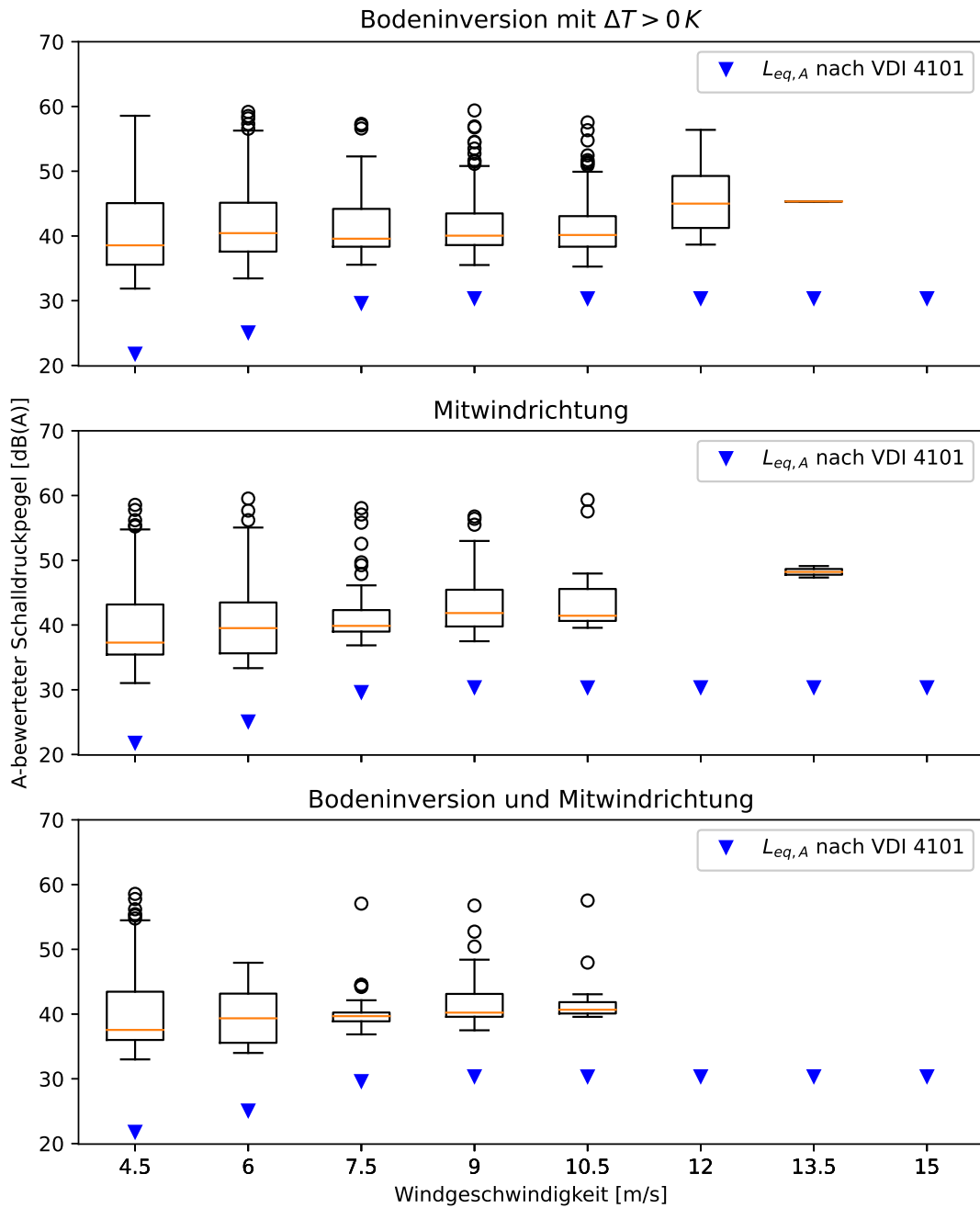


Abbildung B.5.: Messkampagne II: Vergleich der gemessenen mit den nach VDI 4101-2 berechneten äquivalenten, A-bewerteten Schalldruckpegeln

Literaturverzeichnis

- [1] Norm DIN ISO 9613-2:1999-10, *Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien: Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren*, 1999-10.
- [2] Norm ISO 17534-3:2015-01, *Recommendations for quality assured implementation of ISO 9613-2 in software according to ISO 17534-1*, 2015.
- [3] Statistisches Bundesamt, “Stromerzeugung 2022: Ein Drittel aus Kohle, ein Viertel aus Windkraft,” 25.03.2023. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html
- [4] E. Hau, *Windkraftanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [5] TA Lärm, *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm)*, 1998.
- [6] Unterausschuss NA 001-02-03-19 UA, *Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen*, fassung 2015-05.1 ed., 2015-05.
- [7] Richtlinie VDI 4101-2:2020-04, *Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen: Windkraftanlagen*, 2020-04.
- [8] J. Cooper and T. Evans, “Accuracy of noise predictions for wind farms,” in *5th International Conference on Wind Turbine Noise Denver*, 28-30 August 2013.
- [9] K. Kaliski and E. Duncan, “Propagation Modeling Parameters for Wind Power Projects,” *Sound & Vibration*, vol. 12, 2008.
- [10] C. A. Echeverri-Londoño and A. E. González Fernández, “Prediction of noise from wind turbines: theoretical and experimental study,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 90, pp. 28–33, 2019.
- [11] M. Möser, *Technische Akustik*, 10th ed., ser. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [12] Norm DIN EN 61672-1:2014-07, *Elektroakustik - Schallpegelmesser: Teil 1: Anforderungen*, 2014-07.

- [13] M. Möser and G. Müller, “Grundlagen der Technischen Akustik,” in *Taschenbuch der Technischen Akustik*, ser. Springer Reference Technik, G. Müller and M. Möser, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, pp. 1–29.
- [14] Norm DIN 45641:1990-06, *Mittelung von Schallpegeln*, 1990-06.
- [15] Norm DIN EN 61260-1:2014-10, *Elektroakustik - Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven: Teil 1: Anforderungen*, 2014-10.
- [16] J. Hörmeyer, T. Bohne, and R. Rolfes, “Ein numerisches Modell zur Vorhersage der Schallausbreitung von Windenergieanlage unter berücksichtigung atmosphärischer Einflüsse,” in *DAGA 2018 München*, 19.-22.03.2018.
- [17] D. K. Wilson, “Sound Propagation in the Atmospheric Boundary Layer,” *Acoustics Today*, vol. 11, no. 2, pp. 44–53, 2015.
- [18] Richtlinie VDI 4101-1:2020-04, *Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen: Phänomene und Verfahren*, 2020-04.
- [19] R. Makarewicz, “Is a wind turbine a point source?” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, no. 2, pp. 579–581, 2011.
- [20] C. H. Hansen, C. J. Doolan, and K. L. Hansen, *Wind farm noise: Measurement, assessment and control*, ser. Wiley series in acoustics, noise and vibration. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2017.
- [21] S. Oerlemans, P. Sijtsma, and B. Méndez López, “Location and quantification of noise sources on a wind turbine,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 299, no. 4-5, pp. 869–883, 2007.
- [22] R. Makarewicz, “Cylindrical spreading of noise from a wind turbine,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no. 148, pp. 1–5, 2016.
- [23] C. J. Manning, *The propagation of noise from petroleum and petrochemical complexes to neighbouring communities*, Den Haag, 1981.
- [24] J. Song and I. Yorke, *Wind farms environmental noise guidelines*, 2009.
- [25] T. Evans and J. Cooper, “Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms,” *Acoustics Australia*, vol. 40, no. 1, 2012.
- [26] S. Kephalopoulos, M. Paviotti, F. Anfosso-Lédée, D. van Maercke, S. Shilton, and N. Jones, “Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental

- noise mapping,” *The Science of the total environment*, vol. 482-483, pp. 400–410, 2014.
- [27] RSG et al., *Massachusetts Study on Wind Turbine Acoustics*, 2016.
- [28] K. Kaliski and D. K. Wilson, “Improving predictions of wind turbine noise using PE modeling,” in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2011.
- [29] Norm ISO 9613-1:1993, *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors: Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere: ISO 9613-1*, 1993-06.
- [30] R. Perkins, *A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise*, 2013.
- [31] E. Blumendeller, L. Gaßner, F. J. Müller, M. Wigger, P. Berlinger, and P. W. Cheng, “Messungen im Bereich eines Windparks mit Fokus auf tief- und niederfrequente Schallemissionen und - immissionen,” in *DAGA 2022 Stuttgart*, 2022.
- [32] OpenStreetMap, 2023-04-15. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org>
- [33] Google Earth Pro, 2022-12-29. [Online]. Available: <https://www.google.com/earth/versions/>
- [34] General Electric Company, *Technische Dokumentation Windenergieanlagen 2.75-120 - 50 Hz: Schallleistung: Normbetrieb gemäß FGW*, 2014.