# Entfernungsabhängige Refraktionseffekte in der Schallausbreitung von Windenergieanlagen

Susanne Martens, Tobias Bohne, Raimund Rolfes

Leibniz Universität Hannover, Institut für Statik und Dynamik, ForWind, 30167 Hannover, Deutschland, Email: s.martens@isd.uni-hannover.de

## Einleitung

Im Projekt WEA-Akzeptanz werden umfangreiche Messungen im Umkreis von Windenergieanlagen (WEA) durchgeführt. Auf Basis der meteorologischen und akustischen Messdaten sowie der Anlagenparameter wird der Einfluss atmosphärischer Bedingungen auf die Ausbreitung von WEA-Schall untersucht.

Bereits veröffentlichte Ergebnisse aus einer Messkampagne im Jahr 2018 zeigen, dass die Stärke der Refraktion insbesondere von dem vorherrschenden Schallgeschwindigkeitsgradienten und der Entfernung zur Anlage bestimmt wird. Mit zunehmender Entfernung und stärkeren Schallgeschwindigkeitsgradienten nimmt der Einfluss der Refraktionseffekte auf die WEA-Schallausbreitung zu. Bei Entfernungen von 154 und 249 m zur Anlage ist die Richtwirkung der Anlage dominant. Bei einer Entfernung von 470 m sind die Refraktionseffekte hingegen klar sichtbar. Im Vergleich zu stark positiven Schallgeschwindigkeitsgradienten ist der Schalldruckpegel bei stark negativen Gradienten um 6dB geringer [2].

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden neue Messdaten, welche in einer Messkampagne im Jahr 2019 aufgenommen wurden, hinsichtlich der entfernungsabhängigen Refraktionseffekte in der WEA-Schallausbreitung ausgewertet und beurteilt. In diesem Beitrag wird zunächst die Theorie übermittelt sowie die Messkampagne und die Auswertungsmethode vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen präsentiert und mit bisherigen Erkenntnissen verglichen. In einem Ausblick werden zukünftige Arbeiten dargestellt.

### Theorie der Schallausbreitung

Die Schallausbreitung in der Atmosphäre wird durch Luftabsorption, atmosphärischer Refraktion und Turbulenzen beeinflusst. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf den Refraktionseffekten, welche auf die vertikalen Gradienten der Schallgeschwindigkeit zurückzuführen sind. Die Schallwellen werden in Richtung der niedrigen Geschwindigkeiten gebrochen. Wenn die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt und/oder ein positiver Temperaturgradient vorhanden ist, werden die Schallwellen nach unten gebrochen. Dies führt zu höheren Schalldruckpegeln am Immissionspunkt. Wenn die Windgeschwindigkeit mit der Höhe abnimmt und/oder ein negativer Temperaturgradient vorhanden ist, werden die Schallwellen nach oben gebrochen. Als Folge können Schattenzonen, in denen niedrigere Pegel vorhanden sind, entstehen. Der Effekt der Refraktion ist in Abbildung 1 gezeigt.



**Abbildung 1:** Atmosphärische Refraktion auf Grund von vertikalen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit  $c_{eff}$ 

Wie in Abbildung 1 dargestellt, stehen die beschriebenen Refraktionseffekte im direkten Zusammenhang mit der effektiven Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{eff}}$ . In Schallausbreitungsrichtung wird diese in Abhängigkeit der Temperatur T [°C] und der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_{comp}$  [m/s] in der Höhe z [m] mit

$$c(z) = c_0 \sqrt{\frac{T(z)}{T_0}} + u_{comp}(z)$$
 [m/s] (1)

berechnet. Die horizontale Windgeschwindigkeit ist mit

$$u_{comp} = -|U| \cdot \cos(wd - dir) \qquad [m/s] \qquad (2)$$

gegeben. Hierbei werden die Richtungen des Windes wd [°] und der Schallausbreitung dir [°] sowie der Absolutwert der Windgeschwindigkeit |U| [m/s] verwendet. Die vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit  $u_{comp}(z)$  und der Temperatur T(z) werden mit Hilfe der Monin-Obukov Ähnlichkeitstheorie berechnet. Infolgedessen werden Turbulenzen auf Grund mechanischer Reibung und thermischer Reibung berücksichtigt. Bei den Berechnungen werden turbulente Strömungsgrößen, wie die Monin-Obukov Länge, mit Hilfe der Eddy Korrelationsmethode ermittelt. Informationen zur Bestimmung der Strömungsgrößen und zu den verwendeten Methoden sind in der Arbeit von Maas [1] zu finden. Bezüglich der Berechnung von Schallgeschwindigkeitsprofilen für akustische Auswertungen ist auf Martens et al. [2] zu verweisen.

Wie in vorherigen Arbeiten wird als Maß für die Refraktion der Gradient der Schallgeschwindigkeit

$$\Delta c_{\text{eff}} = \frac{c(z_2) - c(z_1)}{z_2 - z_1}$$
 [1/s] (3)

verwendet. Hierbei werden Schallgeschwindigkeiten auf den Höhen z1=1 m und z2=120 m berücksichtigt.

# Messumgebung und Messaufbau

Zur Untersuchung der beschriebenen Refraktionseffekte werden Messdaten aus einer Messkampagne im Frühjahr 2019 herangezogen. Die Messkampagne wurde in einem Bürgerwindpark in Schleswig-Holstein durchgeführt. Die Landschaft wird als flach und homogen eingestuft und ist überwiegend mit Gras bedeckt. Über einen Zeitraum von zwölf Wochen wurden akustische und meteorologische Daten sowie Anlagenparameter des Windparks synchron erfasst. Im Fokus der Untersuchungen steht eine Windenergieanlage der 3 MW-Klasse.

Die Messumgebung sowie die Position der Messinstrumente sind in Abbildung 2 dargestellt. Drei akustische Messstationen wurden in Entfernungen von 270, 498 und 1091 m zur Anlage positioniert, um Schalldruckpegel, Terzbänder und Audio in einer Abtastrate von 51 kHz aufzunehmen. Wie in Abbildung 3 (links) gezeigt, betrug die Messhöhe der akustischen Daten 1,70 m. Zudem wurden zwei Windschirme verwendet, um die windinduzierten Geräusche am Mikrofon effektiv zu reduzieren. Während des Messzeitraums wurden die Systeme über Solarpaneels mit Strom versorgt.

Synchron zu den akustischen Aufzeichnungen wurden umfangreiche meteorologische Messungen zur Beschreibung der atmosphärischen Bedingungen durchgeführt. Zur Erfassung von Windvektoren, Temperatur und Feuchtigkeit wurden Messgeräte in 2 und 10 m Höhe auf einem meteorologischen Mast installiert (siehe Abbildung 3, rechts). Mittels Ultrasonics wurden 3D-Windvektoren und virtuelle Temperaturen hochauflösend aufgenommen. Darauf aufbauend wurden relevante Turbulenzparameter zur Bestimmung der Windund Temperaturprofile bestimmt (siehe Maas [1]). Der meteorologische Mast befand sich in 300 m Entfernung zur Windenergieanlage. Zudem wurden die Betriebsdaten der Windenergieanlage, wie elektrische Leistung und Rotordrehzahl, detektiert.



Abbildung 2: Messumgebung inklusive der Messpositionen und der Höhenverteilung

Kartendaten©2020 Google, GeoBasis-DE/BKG

Bilder©2020 Aerodata International Surveys, GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Maxar Technologies



**Abbildung 3:** Akustische Messstation (links) und meteorologischer Mast inklusive Messinstrumente (rechts)

### Auswertungsmethode

Bei der Auswertung der akustischen Langzeitmessungen ist es wichtig, Datensätze mit dominanten WEA-Geräuschen auszuwählen. Zusätzlich ist eine Klassifizierung der Datensätze notwendig, da die Schallemission von Windenergieanlagen stark von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen abhängig ist. Auf Grund eines geringen Signal-zu-Rausch Abstandes, ist eine detaillierte Bearbeitung und Auswertung der Daten am dritten Messpunkt (1091 m) erforderlich. In diesem Beitrag wird daher nur auf die ersten beiden Messpunkte in 270 und 498 m zur Anlage eingegangen.

#### Datenselektion

Die akustischen Messungen wurden zumeist von natürlichen Quellen, wie windbedingte Vegetationsgeräusche oder Geräusche von Tieren, gestört. Zur Auswahl von Datensätzen mit dominanten WEA-Geräuschen werden aus der Literatur bekannte Kriterien angewandt:

(1) 
$$L_5 - L_{95} \le 4 \, \mathrm{dB}(\mathrm{A})$$

- (2)  $L_1 L_{95} \le 15 \, \mathrm{dB}(\mathrm{A})$
- (3)  $L_{eq} L_{1/3>3150\text{Hz}} \le 1.5 \text{ dB}(\text{A})$

In den Kriterien (1) und (2) werden statistische Abewertete Perzentil-Schallpegel ( $L_n$  mit n=1,5,95) verwendet. Sie basieren auf den Erkenntnissen, dass störende Schallereignisse den gemessenen Schallpegel während einer kurzen Zeitspanne stark beeinflussen. Folglich streuen die Schallpegel bei Hintergrundgeräuschen stark, während sie bei dominanten WEA-Geräuschen konstanter sind. Mit dem Kriterium (3) wird sichergestellt, dass hochfrequente Geräusche, wie Vogelgezwitscher, die Messdaten nicht beeinflussen. Die hochfrequenten Anteile des WEA-Schalls werden über die Entfernung stark absorbiert. Folglich haben Umgebungsgeräusche mehr hochfrequente Schallenergie als das WEA-Geräusch.

Neben diesen drei Kriterien werden nur Daten in Zeiten ohne Regen ausgewählt. Regen stört die akustischen Messungen und verändert das akustische Verhalten (Einfügedämpfung) der Windschirme. Außerdem ist ein ausreichender Signal-zu-Rausch Abstand erforderlich, um die WEA-Geräusche zu analysieren. Wie in der Norm IEC 61400-11 [3] gefordert, wurde das Hintergrundgeräusch bei ähnlichen Windbedingungen gemessen und mit einer linearen Regression angenähert. Es ist erforderlich, dass das gemessene WEA-Geräusch höher als die Regressionskurve des gemessenen Hintergrundgeräuschs ist.

### Klassifikation

Der gemessene Schalldruckpegel bzw. die WEA-Schallemission hängt von vielen Faktoren ab. Um ähnliche Situationen zu vergleichen, wird der gesamte Datensatz einschließlich akustischer, meteorologischer und betrieblicher Daten klassifiziert.

Auf Grund der Regelungen zum Einspeisemanagement von Windenergie gibt es eine Vielzahl an Betriebssituationen im Windpark, die einen Einfluss auf die akustischen Aufnahmen haben können. Zusätzlich können Anlagen eines benachbarten Windparks die Aufnahmen stören. Es wurden Untersuchungen bezüglich des Einflusses benachbarter Windenergieanlagen auf die gemessenen Daten durchgeführt sowie die Daten in Abhängigkeit der Betriebssituationen klassifiziert. In diesem Beitrag werden lediglich Daten verwendet, in dem die akustischen Aufnahmen nicht von anderen Anlagen beeinflusst werden.

Die Schallemission hängt zudem stark von den Betriebsbedingungen der Windenergieanlage ab. Wie aus Studien bekannt ist, ist die Rotordrehzahl ein guter Klassifikator, da diese den abgestrahlten Schallpegel stark bestimmt. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden Datensätze bei der Nenndrehzahl betrachtet.

Zusätzlich hat die Stabilität der Atmosphäre einen Einfluss auf die Schallemission und die Schallausbreitung. Je nach atmosphärischer Stabilität bilden sich unterschiedliche vertikale Profile der Temperatur und der Windgeschwindigkeit aus. Dementsprechend hat die Stabilität auch einen direkten Einfluss auf die Schallgeschwindigkeitsprofile. Die Stabilität der Atmosphäre wird standardmäßig in neutral, instabil und stabil klassifiziert. In dieser Arbeit werden Datensätze unter stabilen atmosphärischen Bedingungen herangezogen.

Schlussfolgernd können die Umgebungsbedingungen in einem Windpark einen signifikanten Einfluss auf den gemessenen Schalldruckpegel haben. Die Datensätze, die für die weitere Analyse verwendet werden, sind folgend zusammenzufassen:

- WEA-Geräusch ist dominant,
- Kein Regen,
- Gemessener Schalldruckpegel ist höher als die Regressionskurve des Hintergrundgeräuschs,
- Akustische Aufnahmen werden nicht von anderen Anlagen beeinflusst,
- Windenergieanlage wird bei Nenndrehzahl des Rotors betrieben,
- Stabile Atmosphäre.

# Ergebnisse

Die WEA-Schallausbreitung wird in Abhängigkeit von unterschiedlichen Gradienten der Schallgeschwindigkeit  $(\Delta c_{\text{eff}})$  untersucht und anschließend anhand ausgewählter Schallgeschwindigkeitsprofile betrachtet. Hierbei werden die Daten dieser Messkampagne mit Ergebnissen aus Martens et al. [2] verglichen. Da es sich im Vergleich um unterschiedliche Messstandorte handelt, werden die Daten mit der Differenz der Schallemissionswerte aus vorliegenden Berichten korrigiert. Zudem wird der diagonale Abstand von der Gondel zum Messpunkt gewählt. Hierbei handelt es sich um den ersten Versuch eines Vergleichs. Weitere Methoden zum Vergleich von Messdaten, die an unterschiedlichen Standorten aufgenommen wurden, sind in Zukunft zu betrachten.

### Schalldruckpegel in Abhängigkeit von $\Delta c_{\text{eff}}$

Für die Untersuchungen wird der Gradient  $\Delta c_{\rm eff}$  zwischen 120 und 1 m berechnet und in 0,01  $\Delta c_{\rm eff}$ -Bins eingeteilt. In Abbildung 4 sind die korrigierten und gemittelten Pegel über die berechneten Gradienten aufgetragen. Zusätzlich ist der diagonale Abstand zwischen der Messposition und der Windenergieanlage angegeben. Die Ergebnisse aus Martens et al. [2] sind in grau gekennzeichnet. Im Allgemeinen wird in Mitwindrichtung ein stark positiver und in Gegenwindrichtung ein stark negativer Gradient berechnet. Gradienten nahe  $\Delta c_{\rm eff} \approx 0$  weisen auf Situationen mit Querwind hin.

An Mikrofonpositionen unter einem Abstand von 500 m zur Anlage sind bei  $\Delta c_{\text{eff}} \approx 0$  niedrigere Pegel als bei hohen absoluten Gradienten zu verzeichnen. Dies ist nicht auf Refraktionseffekte zurückzuführen, sondern gibt die Richtwirkung einer Windenergieanlage wieder. Aufgrund der Dipolcharakteristik der aerodynamischen Quellen wird in Querwindrichtung weniger Schall abgestrahlt als bei Mit- und Gegenwind.

An Messpositionen in einem diagonalen Abstand von ca. 500 m zur Anlage werden mit stark positiven Gradienten böhere Pegel als mit negativen Gradienten gemessen. Die Differenz zwischen  $\Delta c_{\rm eff} = 0,06$  und  $\Delta c_{\rm eff} \approx 0$  ist etwa 5 dB. Diese Eigenschaft ist nicht nur auf die Richtwirkung der Windturbine zurückzuführen, sondern auch auf eine Abwärtsbrechung der Schallwellen. Es gibt keine Unterschiede zwischen den Pegeln bei  $\Delta c_{\rm eff} \approx 0$  und  $\Delta c_{\rm eff} \approx 0$ . Im Vergleich zu den Daten bei  $\Delta c_{\rm eff} \approx 0$  haben sich dementsprechend die Pegel bei  $\Delta c_{\rm eff} < 0$  verringert. Dies deutet auf eine Aufwärtsbrechung der Schallwellen hin.

### Schalldämpfung bei ausgewählten $c_{\text{eff}}$ -Profilen

Der Einfluss von Schallgeschwindigkeitsprofilen auf die Schallausbreitung wird anhand vier Beispielen diskutiert. Als Beispiele werden die Daten bei  $\Delta c_{\rm eff} =$ -0,045;-0,005;0,015 und 0,060/0,065 ausgewählt. In Abbildung 5 sind die angenäherten Schallgeschwindigkeitsprofile der ausgewählten  $\Delta c_{\rm eff}$  dargestellt (rechts) und die jeweiligen Ausbreitungsverluste über die Distanz der Messposition zur Gondel aufgetragen (links). Als Referenz für die Berechnung der Ausbreitungsverluste wird das erste Mikrofon bzw. der Wert aus einem vorliegenden Emissionsbericht verwendet. Zur Annäherung der Daten wird zudem eine quadratische Regression angewandt.

Die Messergebnisse stimmen mit der vorgestellten Theorie überein und bestätigen den in Abbildung 4 dargestell-



Effektiver Gradient der Schallgeschwindigkeit in 1/s

Abbildung 4: Relative Schalldruckpegel in Abhängigkeit effektiver Schallgeschwindigkeitsgradienten

ten Trend. Mit zunehmenden Schallgeschwindigkeitsgradienten und entsprechend wachsendem positiven Schallgeschwindigkeitsprofil wird über die Entfernung weniger Schall gedämpft. Je negativer der Schallgeschwindigkeitsgradient, desto höher der Ausbreitungsverlust über die Entfernung. In Abbildung 5 ist diese Tendenz besonders bei einer Entfernung von ca. 500 m zu erkennen. Bei stark negativen Gradienten ist der Ausbreitungsverlust um 6 dB höher als bei stark positiven Gradienten.

Die Tendenz ist bei den Ausbreitungsverlusten der Gradienten nahe Null weniger ausgeprägt. Hier ist die Steigung der Schallgeschwindigkeitsprofile kleiner, so dass die Schallwellen weniger nach oben/unten gebrochen werden. Infolgedessen weichen die Ausbreitungsverluste weniger voneinander ab.

### Schlussfolgerung und Ausblick

Die Entfernungsabhängigkeit von Refraktionseffekten ist in Datensätzen, die in zwei unterschiedlichen Messkampagne aufgenommen wurden, deutlich erkennbar. Die Ergebnisse aus Martens et al.[2] können anhand neuer Daten vorläufig bestätigt werden. Bei einem diagonalen Abstand unter 300 m zur Windenergieanlage dominiert die Richtwirkung der Anlage. Bei einer Entfernung von ca. 500 m sind Effekte der Refraktion zu verzeichnen. Die Effekte sind bei starken Gradienten der Schallgeschwindigkeit besonders ausgeprägt und steigen mit zunehmender Entfernung.

Im Rahmen der vorgestellten Messkampagne wurden akustische Daten in 1095 m Entfernung zur Anlage aufgenommen. In Zukunft werden diese Daten aufgearbeitet und hinsichtlich der Refraktionseffekte untersucht. Ein besondere Fokus liegt in Zukunft auf der Datenqualität. Durch geeignete Methoden der Signalverarbeitung soll die Datenqualität aller Messungen erhöht werden. Mit einer hohen Quantität und Qualität an Messdaten soll langfristig ein messdatenbasiertes Modell zur WEA-Schallausbreitung entwickelt werden.



Abbildung 5: Ausbreitungsverluste bei vier ausgewählten effektiven Schallgeschwindigkeitsprofilen

## Danksagung

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Projektes "WEA-Akzeptanz" entstanden, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und vom Projektträger Jülich (PTJ) finanziert wird. Darüber hinaus ist das Institut für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover Teil des Zentrums für Windenergie ForWind. Die Autoren möchten sich für die Unterstützung beim Zuwendungsgeber und für die Bereitstellung der meteorologischen Daten beim Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover bedanken. Ein besonderer Dank gilt dem Betreiber des Windparks, BÜRGERWINDPARK JANNE- $BY \ eG$ , und den Bürgern vor Ort. Ohne die große Unterstützung und Hilfe wären keine Messungen möglich gewesen. Weitere Informationen über das Projekt "WEA-Akzeptanz" finden Sie auf der Projekthomepage unter www.wea-akzeptanz.uni-hannover.de.



### Literatur

- Maas, O.: Detaillierte Vermessung der atmosphärischen Grenzschicht im Einflussbereich von Windenergieanlagen, Hannover, Deutschland, 2019
- [2] Martens, S., Bohne, T. und Rolfes, R.: Measuring and analysing the sound propagation of wind turbines. Proceedings of the 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lisbon, Portugal, 2019
- [3] IEC 61400-11:2012/AMD1:2018 International Electrotechnical Commission: Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques.