

Messungen im Bereich eines Windparks mit Fokus auf tief- und niederfrequente Schallemissionen und -immissionen

Esther Blumendeller¹, Laura Gaßner², Florian Müller³, Maayen Wigger⁴,
Philipp Berlinger¹, Po Wen Cheng¹

¹Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie an der Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Deutschland

Email: blumendeller@ifb.uni-stuttgart.de

²Karlsruher Institut für Technologie, ³Medical School Hamburg, ⁴Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

Einleitung

Die Nutzung von Windenergie wird einen entscheidenden Anteil am erneuerbaren Energiemix der Zukunft haben. Während der Stromgewinnung geben Windenergieanlagen (WEA) Schall und Erschütterungen (seismische Wellen) in die Umgebung ab, vor allem im tieffrequenten Bereich. Im Zuge des interdisziplinären Verbundprojektes Inter-Wind werden akustische Messungen zur Unterstützung psychologischer Fragebögen, kombiniert mit seismischen und meteorologischen Messungen an Windparks auf der Schwäbischen Alb durchgeführt. Ziel des Projektes ist es, die Gründe für Belästigung der Anwohner in Zusammenhang mit den Immissionen der WEA zu verstehen. Hierbei liegt der Fokus auf dem tieffrequenten (20-200 Hz) und niederfrequenten (1-20 Hz) Bereich. Akustische und seismische Messungen wurden an einem Windpark auf der Schwäbischen Alb, mit drei WEA des Typs GE 2.75-120 durchgeführt. Parallel dazu konnten Anwohner Belästigungszeiträume über eine Geräuschmelde-App dokumentieren. In diesem Beitrag wird die Umsetzung einer interdisziplinären Messkampagne im Bereich des Tegelberg Windparks und eines Wohngebäudes in Tallage in ca. 1 km Entfernung zum Windpark beschrieben. Schließlich werden erste Ergebnisse der akustischen Messungen und interdisziplinären Untersuchung vorgestellt und diskutiert.

Anwohnerbefragungen

Um die Lärmbelastigung von Anwohnern durch WEA zu bewerten, wurden zunächst Anwohnerbefragungen durch die Medical School Hamburg (MSH) durchgeführt. Ziel war es, zu verstehen, wie die Anwohner die WEA und die WEA-Immissionen wahrnehmen. Die Umfrage bildete die Grundlage für die Messungen, die anschließend stattfinden sollten. Teilnehmer wurden über Pressemitteilungen und Bekanntmachungen der örtlichen Behörden von dem Projekt informiert. Schließlich wurden Anwohner von Juli bis September 2020 per Brief und ein paar Tage später per Telefonanruf kontaktiert und anhand eines standardisierten Fragebogens befragt. Im Rahmen der Umfragen konnten stark belästigte Anwohner identifiziert werden, die ihre Einwilligung für Schall- und Bodenbewegungsmessungen im Wohngebäude gaben. Zusätzlich zur Umfrage wurde eine App entwickelt, mit der die Nutzer melden konnten, wann sie sich durch WEA-Lärm belästigt fühlten. Die App war für die Bewohner, die an der Umfrage teilnahmen, ständig verfügbar, so dass sie jederzeit und sofort Lärmereignisse melden konnten. Die Nutzung

der App wurde gleichzeitig mit akustischen, seismischen und meteorologischen Messungen ermöglicht, so dass eine Analyse zu den Zeitpunkten möglich war, zu denen die Anwohner Belästigungen dokumentierten. Eine detaillierte Beschreibung des Studiendesigns ist [1] zu entnehmen.

Messkampagne

Die Messungen wurden in der Nähe eines Windparks auf der schwäbischen Alb in Süddeutschland durchgeführt. Im Rahmen dieser interdisziplinären Messkampagne wurden die akustischen (Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) der Universität Stuttgart), seismischen (Geophysikalisches Institut (GPI) am Karlsruher Institut für Technologie) und meteorologischen (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)) Messdaten erfasst. Der Windpark Tegelberg ist mit drei WEA des Typs GE 2,7 MW (Nabenhöhe 139 m, Rotordurchmesser 120 m, 2,78 MW Nennleistung) ausgestattet und befindet sich in der Nähe eines Steilhangs in 1 km Entfernung zur Gemeinde Kuchen. Grafik 1 zeigt eine Karte des Windparks mit den drei WEA und den Standorten aller Messgeräte.

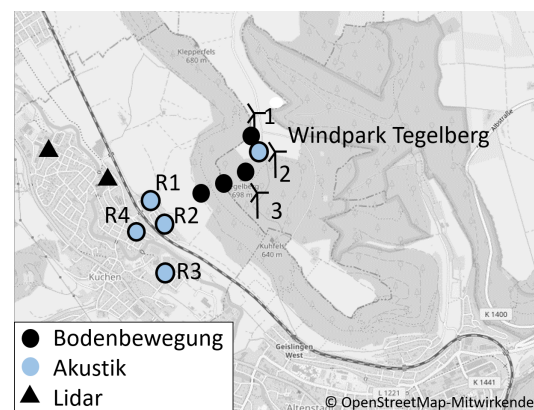


Abbildung 1: Karte [2] der Gemeinde Kuchen und ihrer Umgebung mit den Standorten der WEA des Windparks Tegelberg, Lidar-, Akustik- und Bodenbewegungsmessgeräten.

Die meteorologischen Parameter wurden sowohl mit zwei Lidaren, platziert in Kuchen, als auch mit den Sensoren an einem meteorologischen Messmast auf dem Forschungstestfeld WINSSENT in 2,4 km nordöstlich zum Windpark vom ZSW erfasst. Zusätzlich wurde vom SWE ein Messmast in Nähe des Mikrofons am Windpark plat-

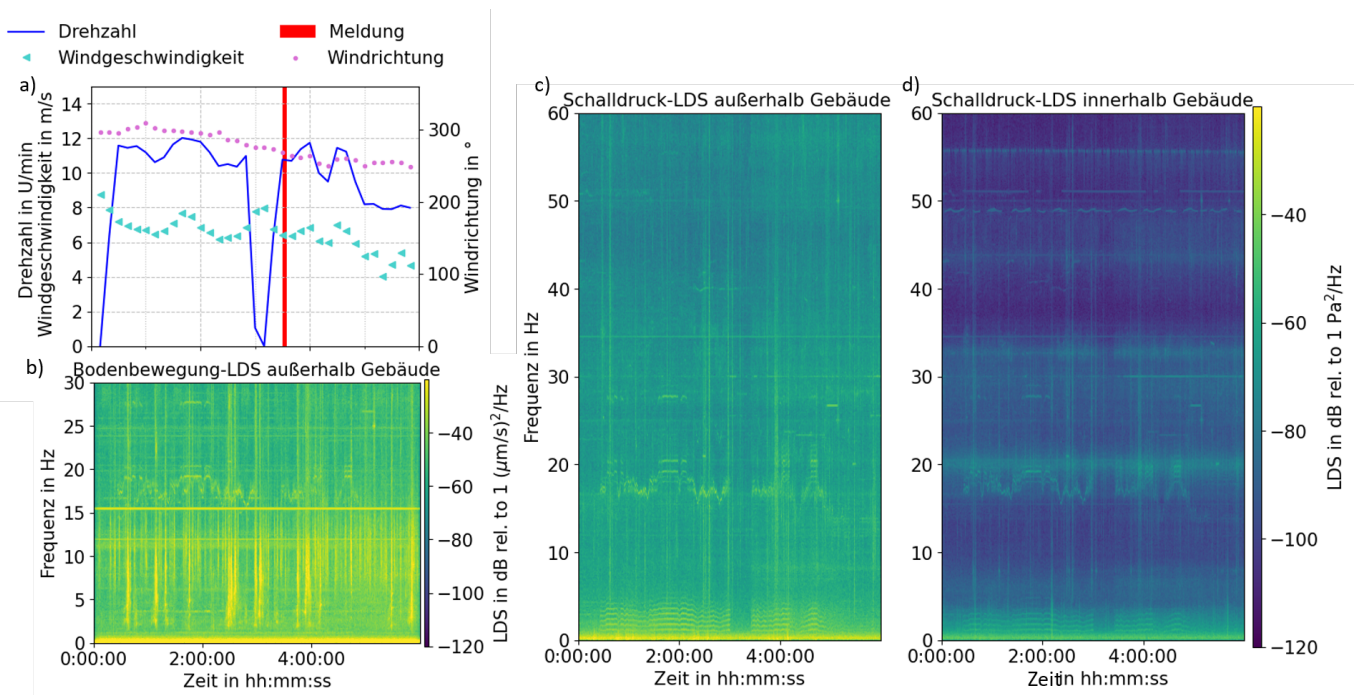


Abbildung 2: Messdatenbeispiel für den 05.12.2020 mit über die App registrierter Belästigungsmeldung, a) Betriebsdaten von WEA 3, b) Bodenbewegungs- und c)-d) Schalldruckmessdaten bei Anwohner 3.

ziert, um meteorologische Parameter in 10 m Höhe zu messen. Für die Messungen am Windpark wurde WEA 1 gewählt. Das Mikrofon wurde circa 140 m südlich der Anlage platziert. Die Bodenbewegungen wurden im Turm der WEA, neben dem Mikrofon und in einer Linie aus drei weiteren Messgeräten bis in das Tal gemessen. Parallel dazu wurden während des Messzeitraumes vom 22.10.2020 bis 16.12.2020 bei insgesamt vier Anwohnern die Schalldrücke und Bodenbewegungen gemessen, wobei die Messgeräte alle zwei Wochen umgesetzt wurden. Die akustischen Signale wurden außerhalb des Gebäudes und in einem dem Windpark zugewandten Innenraum gemessen. Die zwei Infraschall-Mikrofone im Freien (Windpark und außerhalb des Gebäudes) des Typs G.R.A.S.47AC wurden auf einer schallharten Platte mit zwei Windschirmen platziert. Für die Messungen in den Innenräumen wurde der Schalldruck mit einem Brüel&Kjaer 4964 Infraschallmikrofon und 26C1 G.R.A.S. Vorverstärker auf einem Stativ gemessen. Alle aufgezeichneten Daten wurden mit einem GPS-Zeitsignal synchronisiert. Genaue Informationen zur Messkampagne und dem Messaufbau kann [1, 3] entnommen werden. Zur Erfassung der Hintergrundgeräusche und um akustische und Bodenbewegungssignale dem Betrieb der WEA zuordnen zu können, wurden alle drei WEA während der Messkampagne regelmäßig im Nachtzeitraum abgeschaltet. Des Weiteren wurden die Anlagendaten aller drei WEA vom Betreiber zur Verfügung gestellt.

Zusammenführung der Messdaten

Um die gemessenen Daten zusammen zu bringen, wurde ein sechsstunden Zeitraum am 05.12.2020 gewählt. An diesem Vormittag gab es eine Beschwerdemeldung von einem Anwohner in Kuchen. Für einen Vergleich

der beim Anwohner erhobenen Messdaten, wurden für die Schall- und Bodenbewegungsdaten Leistungsdichtespektren (LDS) berechnet. Grafik 2 zeigt das LDS der Bodenbewegung gemessen vor dem Gebäude, sowie der Schalldrücke gemessen vor und im Wohngebäude. Dazu sind Drehzahl, Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und Windrichtung (Nabenausrichtung) von WEA 3 dargestellt. Während des betrachteten Zeitraums befanden sich die WEA 1, 2 und 3 im Teil- und Volllastbereich mit Drehzahlen zwischen 8 U/min und 12 U/min. Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe variierte zwischen 5 m/s und 8 m/s, wobei der Wind aus südöstlicher Richtung kam (siehe Abbildung 2a)). Zusätzlich ist der Zeitpunkt markiert, in dem eine Belästigung durch die WEA dokumentiert wurde. Die genaue Zeit der Belästigung und der App-Nutzung, die Geräuschbeschreibung, sowie das Ausmaß der Belästigung sind Tabelle 1 zu entnehmen.

In den betrachteten sechs Stunden werden in circa 2,4 km Entfernung mit Sensoren an den WINSSENT-Messmasten am Boden niedrigere Temperaturen gemessen als in 96 m Höhe, was auf eine Inversionswetterlage hinweisen könnte. Außerdem zeigt der Stabilitätsparameter $\zeta = z/L$ tagsüber fast durchgehend positive Werte, was auf eine stabile Schichtung hinweist. In [4, 5] wurden bereits Zusammenhänge der atmosphärischen Stabilität zur Schallausbreitung und Wahrnehmung gefunden. Genauere Informationen zu den meteorologischen Messungen können [1] entnommen werden.

In Abbildung 2c) und d) sind die LDS-Diagramme für die akustischen Messdaten (0-60 Hz) von außerhalb und innerhalb des Wohngebäudes von Anwohner 3 (siehe Abbildung 1) abgebildet. Das seismische Messgerät war im Garten in Nähe des Mikrofons platziert. In Abbildung 2b)

Tabelle 1: Überblick über die Lärmmeldungen des Anwohners am 05.12.2020, 00:00 - 06:00 UTC. Der Grad der Belästigung wird auf einer Skala von 0 "überhaupt nicht belästigt" bis 4 "sehr belästigt" gemessen.

Zeit der Beschwerde in UTC	Zeit der App-Nutzung in UTC	Geräuschbeschreibung	Ausmaß der Belästigung
03:35	21:47	Rotorenlärm im Schlafzimmer	4

sind die gemessenen Bodenbewegungen für einen Frequenzbereich von 0-30 Hz dargestellt. Alle drei Anlagen waren in den Zeiträumen von 00:00-00:20 und 03:00-03:20 UTC abgeschaltet. Diese Abschaltzeiten können auch in den Messdaten identifiziert werden. Während die Abschaltung der WEA in den akustischen Daten gut durch eine reduzierte Leistungsdichte im betrachteten Frequenzbereich sichtbar ist, ist sie in den Bodenbewegungsdaten nur schwer erkennbar. Signalanteile, die nur während des WEA-Betriebs vorhanden sind, können dem Anlagenbetrieb zugeordnet werden. In den akustischen Daten (Abbildung 2c) und d)) sind an beiden Messpunkten Vielfache der Blattdurchgangsfrequenz (BDF) unter 10 Hz sichtbar, allerdings nicht in den Bodenbewegungsmessdaten. Das könnte darauf hinweisen, dass die niederfrequenten Emissionen der WEA eher über die Luft übertragen werden, oder von Bodenbewegungen anderer Emissionsquellen in der Umgebung überlagert werden, wie zum Beispiel durch Zugdurchfahrten in 130 m Entfernung.

In allen Datensätzen ist ein über der Zeit fluktuierender Ton zwischen 15 Hz und 20 Hz erkennbar, der eindeutig dem Anlagenbetrieb zugeordnet werden kann. Dieser ist proportional zur Drehzahl, die Frequenz steigt und sinkt mit steigender/sinkender Drehzahl der WEA.

Andere Signalkomponenten in den akustischen und Bodenbewegungsmessdaten können dem Messort zugeordnet und durch andere Schallquellen, die Gebäudestruktur oder elektrisches Rauschen bei 50 Hz verursacht werden. Die Ursache der vertikalen Linien, sowohl im Freien als auch im Innenraum, sind kurzzeitige Schallquellen. Durch einen Abgleich mit einem Zugfahrplan können vorbeifahrenden Züge in 130 m Entfernung als Quellen identifiziert werden. Die durchgehende Linie bei 20 Hz innerhalb des Gebäudes (Abbildung 2d)) ist einer strukturellen Resonanz zuzuordnen [6].

Ergebnisse der akustischen Messungen

In Abbildung 3 ist der unbewertete Schalldruckpegel $L_{p,eq,1min}$ gemittelt über 1 Minute für den gleichen Frequenzbereich von 1-60 Hz und Zeitraum wie in Abbildung 2 dargestellt. In den Zeitreihen der akustischen Daten, die am Windpark und an beiden Messpositionen bei Anwohner 3 gemessen wurden, sind die Abschaltzeiten der WEA um 00:00 und um 03:00 UTC zu erkennen. Der Pegelunterschied vom Emissions- zum Immissionsort beträgt circa 4-10 dB, während einer Abschaltung

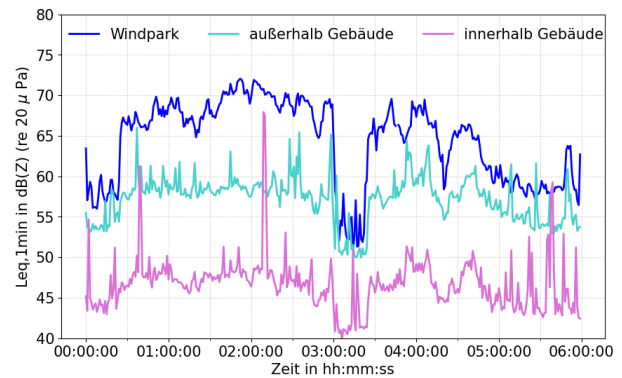


Abbildung 3: $L_{eq,1min}$ in dB(Z) (re $20 \mu Pa$) für den Frequenzbereich 1-60 Hz am 05.12.2020 zwischen 0:00 und 6:00 UTC.

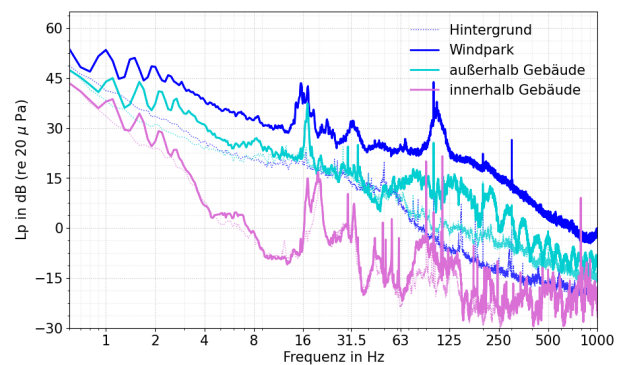


Abbildung 4: Schmalbandspektrum für die Mikrofonpositionen am Windpark und am Wohngebäude am 05.12.2020 um 03:30 UTC.

nur wenige dB. Von Außen in den Innenraum werden Pegelunterschiede von circa 10 dB gemessen, wobei ab 05:00 UTC eine Zunahme und stärkere Schwankungen des Schalldruckpegels zu sehen sind. Hier kann allerdings ausgeschlossen werden, dass der Windpark die Ursache ist, da die Schalldruckpegel bei den anderen Messpositionen nicht im selben Maße ansteigen.

Abbildung 4 zeigt die über 10 Minuten gemittelten Schmalbandspektren für die drei Mikrofonpositionen. Hierbei handelt es sich um den Zeitraum der gemeldeten Belästigung um 03:30 UTC, in dem WEA 1 und 3 mit circa 11 U/min drehen (Stillstand von WEA 2) und der Wind mit 6 m/s aus Süden kommt. Für das Hintergrundgeräusch wurde der Zeitraum um 03:10 UTC mit stillstehenden WEA, aber ansonsten ähnlichen Bedingungen gewählt. Deutlich sind in allen drei Spektren die höher Harmonischen der BDF (0,5 Hz) bis circa 3,0 Hz zu erkennen. Außerdem Töne bei 17,0 Hz und 32,4 Hz. Am Windpark sind noch Töne bei 22,4 Hz und 104,6 Hz der WEA zuzuordnen.

Der Vergleich der Schalldruckpegel mit der menschlichen Hörschwelle nach [7, 8] erfordert die Berechnung eines Terzspektrums. Um maximale Schalldruckpegel zu erhalten, wurden die Daten unter Verwendung von 10 Minuten Mittelwerten der WEA-Betriebsdaten und Windgeschwindigkeitsdaten in 10 m Höhe nach den folgenden

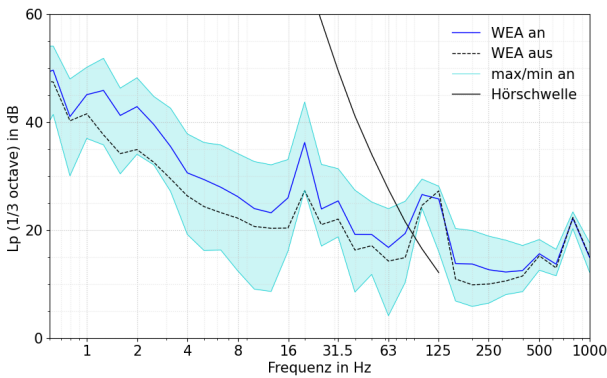


Abbildung 5: Terzspektrum für die Mikrofonposition am Wohngebäude 3. Nur Daten im Nachtzeitraum von 00:00-05:00 UTC für die Abschaltung (0-1 U/min) und den Nennbetrieb (11-12,5 U/min) von Windenergieanlage 3 wurden berücksichtigt.

Kriterien ausgewählt: Die Drehzahl aller WEA wurde mit 11-12,5 U/min für den Nennbetrieb und die Windrichtung in Nabenhöhe auf Süden und Westen (180-315°) begrenzt, da für diesen Bereich die meisten Daten im Messzeitraum vorliegen. Zur Ermittlung des Hintergrundgeräusches wurden die Daten der Zeitabschnitte mit einer maximalen Drehzahl von 1 U/min aller WEA ausgewählt. Es wurden nur Daten vom Nachtzeitraum von 00:00 bis 05:00 UTC berücksichtigt, um den Kontrast zwischen Umgebungsgeräuschen und WEA-Schalldaten zu erhöhen. Beispielfhaft wird in Abbildung 5 das gemittelte Terzspektrum für die genannten Kriterien während des zweiwöchigen Messzeitraums von Anwohner 3 dargestellt. Wie erwartet, liegen die Schalldrücke im niederfrequenten Bereich unterhalb der Hörschwelle, diese wird durch Maximalwerte bei 70 Hz überschritten. Eine eindeutige Zuordnung der Beschwerde zu Besonderheiten in den Messdaten kann hier nicht erfolgen, wobei die Ursache der Beschwerde um 03:30 UTC der Kontrast zwischen Stillstand und rotierender WEA sein könnte. Die Änderung im Betrieb könnte zu einer Erregung der Aufmerksamkeit führen. Die gezeigten Ergebnisse können darauf hinweisen, dass die Geräuschbelastung nicht unbedingt mit der Höhe der Schalldruckpegels zusammenhängt. Ursache können andere Umgebungsfaktoren und die Qualität des Geräusches sein[9].

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Umsetzung einer interdisziplinären Messkampagne zur Untersuchung der Belästigung von Anwohnern durch WEA-Geräusche beschrieben. Über einen Zeitraum von zwei Monaten im Winter 2020 wurden Belästigungsmeldungen von Anwohnern über eine App registriert. Parallel dazu erfolgte die Erfassung von akustischen, seismischen und meteorologischen Daten in der Nähe eines Windparks. Die Zusammenführung der Daten konnte über synchronisierte GPS-Zeitstempel erfolgen.

Durch die Zusammenführung von Anlagendaten mit Schall- und Bodenbewegungsdaten können Anlagengeräusche in 1 km Entfernung außerhalb und innerhalb eines Wohngebäudes identifiziert werden. Dies betrifft insbe-

sondere einen fluktuierenden Ton zwischen 15 Hz und 20 Hz. Störgeräusche, wie beispielsweise vorbeifahrende Züge in 130 m Entfernung vom Wohngebäude, beeinflussen insbesondere die Bodenbewegungsdaten. Die Harmonischen der Blattdurchgangsfrequenz sind in dem gezeigten Beispieldatensatz ausschließlich in den akustischen Messdaten zu erkennen. Außerdem kann gezeigt werden, dass die niederfrequenten Schalldruckpegel im Gebäude weit unterhalb der menschlichen Hörschwelle liegen. Eine eindeutige Identifizierung der Ursache einer Belästigung ist auf dieser Grundlage noch nicht möglich und ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Danksagung

Die Forschungsaktivitäten des Stuttgarter Lehrstuhls für Windenergie im Rahmen des Forschungsprojekts Inter-Wind wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert (03EE2023B). Daher bedanken sich die Autoren beim Zuwendungsgeber, sowie den Windenergieanlagen-Betreibern und den Anwohnern.

Literatur

- [1] Gaßner, L., Blumendeller, E., Müller, F. J. Y., Wigger, M., Rettenmeier, A., Cheng, P.W., Hübner, G., Ritter, J. und Pohl, J.: Joint analysis of resident complaints, meteorological, acoustic, and ground motion data to establish a robust annoyance evaluation of wind turbine emissions. *Renewable Energy*, 188, 1072–1093, 2022.
- [2] OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>, 2022-04-07.
- [3] Blumendeller, E., Kimmig, I., Huber, G., Rettler, P. und Cheng, P.W.: Investigations on Low Frequency Noises of On-Shore Wind Turbines. *Acoustics*, 343–365, 2020.
- [4] Van Den Berg, G.P.: The beat is getting stronger: The effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 24(1), 1–24, 2005.
- [5] Zajamsek, B., Hansen, K.L., Doolan, C.J., und Hansen, C.H.: Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, 370, 176–190, 2016.
- [6] Hansen, K., Zajamšek, B., und Hansen, C.: Comparison of the noise levels measured in the vicinity of a wind farm for shutdown and operational conditions. *INTERNOISE 2014*, 2014.
- [7] DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft, 1997.
- [8] Møller, H. und Pedersen, C.S.: Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and Health*, 6(23), 37–57, 2004.
- [9] Doolan, C.: A review of wind turbine noise perception, annoyance and low frequency emission. *Wind Engineering*, 37(1), 97–104, 2013.