

Untersuchung zur Abstrahlcharakteristik von Windenergieanlagen mit einer akustischen Kamera

Sebastian Mellert¹, Dagmar Rokita², Friedrich Ueberle³

¹ HAW Hamburg, 21033 Hamburg, E-Mail: sebastian.mellert@haw-hamburg.de

² HAW Hamburg, 21033 Hamburg, E-Mail: dagmar.rokita@haw-hamburg.de

³ HAW Hamburg, 21033 Hamburg, E-Mail: friedrich.ueberle@haw-hamburg.de

Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts X-Energie werden unterschiedliche Fragestellungen im Bereich der Erneuerbaren Energien untersucht. Ein Teilfrage befasst sich dabei mit der Steigerung der Akzeptanz und Nachhaltigkeit von Windenergieanlagen (WEA) und Windparks.

In diesem Zusammenhang werden im Teilprojekt X-Eptance Impulse unterschiedliche Werkzeuge entwickelt. Im Bereich der Nachhaltigkeit wird an einer bedarfsgerechten Anlagenteuerung gearbeitet, die einen Windpark in Abhängigkeit der Gesamtlautstärke regulieren soll. Für die Steigerung der Akzeptanz ist eine virtuelle Umgebung geplant, die durch Auralisation und Virtual Reality ein möglichst realitätsnahes Erleben von Windparks ermöglichen soll.

Für beide Entwicklungen sind die akustischen Gegebenheiten und Effekte im Windpark von Bedeutung und werden deshalb durch Messungen ermittelt. Dabei spielt unter anderem die Richtcharakteristik der WEA eine wichtige Rolle. Diese wurde in der Vergangenheit bereits für unterschiedliche Windparks und Anlagentypen durch mehrere Arbeitsgruppen untersucht [1, 2, 3, 4]. Unter der Annahme, dass man die WEA als Punktquelle betrachtet, wurde jeweils eine bidirektionale Ausbreitung des Schalls in Windrichtung festgestellt.

Beobachtungen im Windpark Curslack in Hamburg-Bergedorf legen jedoch die Vermutung nahe, dass die Richtcharakteristik zumindest im näheren Umfeld der Anlagen (< 300 m) komplexer ausgeprägt ist. Um diese Beobachtungen genauer zu untersuchen wurde im Jahr 2019 eine Messkampagne im Windpark Curslack durchgeführt.

Messungen

Die Messungen für diese Untersuchung wurden im Windpark Curslack in Hamburg-Bergedorf mit einer akustischen Kamera des Unternehmens gfai tech durchgeführt. Der Windpark Curslack besteht aus fünf WEA, die wie im Lage-



Abbildung 1: links: Lageplan des Windparks Curslack; rechts: die fünf WEA des Windparks Curslack mit der untersuchten Anlage WEA1 vorne links

plan in Abb. 1 angeordnet sind. Alle Anlagen sind vom Hersteller Nordex und sind mit einer Nabenhöhe von 120 m errichtet. Die Anlagen WEA2–WEA4 sind vom Typ N117/2400 Gamma mit einem Rotordurchmesser von 116,8 m und einer Nennleistung von 2,4 MW. Die untersuchte Anlage WEA1 ist vom Typ N117/3000 Delta und besitzt bei einer Nennleistung von 3,0 MW ebenfalls einen Rotor mit 116,8 m Durchmesser.

Die für die Messungen verwendete akustische Kamera (s. Abb. 2) besteht aus einem Stern-Array mit 48 Senheiser-Mikrofonkapseln und einer Baumer TXG06c Videokamera, die in der Mitte des Arrays platziert ist. Des Weiteren werden ein Datenrekorder, ein Laptop und eine mobile Stromversorgung mit zwei 18V Li-Ion Akkus für die Durchführung der Messungen verwendet.



Abbildung 2: links: Akustische Kamera mit 48 Mikrofon-Stern-Array und Videokamera in der Mitte; rechts: Messaufbau während einer Messung an WEA1

Die Messung wurde an drei Messtagen mit ähnlichen Wind- und Wetterbedingungen zwischen April und September 2019 durchgeführt. Dabei wurde an jedem Messtag in einem horizontalen Abstand von ca. 134 m im Halbkreis um die WEA herum gemessen (s. Abb. 3). Die Schrittweite des Winkels zwischen zwei Messpunkten betrug jeweils 20° und die Dauer pro Messung 64 s.

Neben den Messungen des Schalldruckpegels mit der akustischen Kamera, wurden weitere wichtige Umgebungsbedingungen gemessen und dokumentiert. Dazu gehören die GPS-Koordinaten der Messpunkte, die Temperatur während den Messungen sowie die Anlagen- und Wetterdaten. Diese wurden über die WEA selbst gemessen und in 10-min-Mittelwerten zur Verfügung gestellt. Als Wetterdaten wurden Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 120 m Höhe aufgenommen. Von der Anlage wurden die

Ausrichtung der Gondel (Azimut) und die Rotordrehzahl dokumentiert.

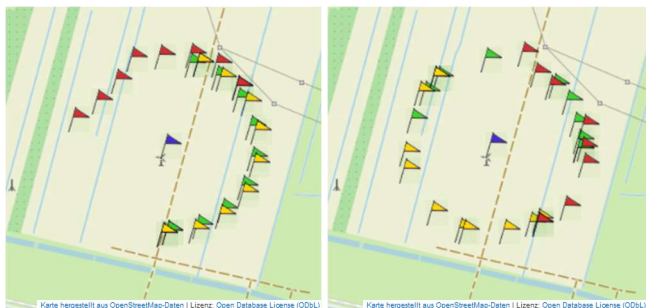


Abbildung 3: links: Standorte der Messungen an den 3 Messtagen (grün: erster Messtag, gelb: zweiter Messtag, rot: dritter Messtag); rechts: Standorte nach der Normierung der Windrichtung auf Nord (0°)

Die einzelnen Messpunkte der Halbkreise wurden so gewählt, dass diese sich mit Rücksicht der aktuellen Windverhältnisse jeweils zur Hälfte überlappen. Für die Auswertung wurden alle Messung auf eine einheitliche Windrichtung bezogen. In Abb. 3 im rechten Bild sind alle Messpunkte für die einheitliche Windrichtung Nord (0°) dargestellt. Es ergibt sich ein fast geschlossener Kreis um die untersuchte WEA.

Auf Grund von stetigen Änderungen der Windrichtung während der Messungen und dem daraus resultierenden Nachführen der WEA konnte die Schrittweite von 20° nicht eingehalten werden. Die teils größeren Lücken im Kreis sind auf diesen Effekt zurückzuführen. Ein vierter Messtag, der diese Lücke zum Teil geschlossen hätte, konnte auf Grund von unterschiedlichen äußeren Einflussfaktoren nicht mehr umgesetzt werden.



Abbildung 4: Anordnung der für die Auswertung berücksichtigten Messpunkte

Bei der Auswertung der Messungen hat sich gezeigt, dass insgesamt vier Messungen aus verschiedenen Gründen nicht für die weitere Verarbeitung nutzbar oder sinnvoll sind. Abb. 4 zeigt alle für die Auswertung aufbereitend und im weiteren Verlauf berücksichtigten Messpunkte.

Auswertung

Die Auswertung der Messungen wurde mit der Software NoiseImage 4.12.0 des Unternehmens gfai tech durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die anlagenspezifischen Schalldruckpegel in 1-s-Werten ermittelt. Wie in Abb. 5 beispielhaft gezeigt, wird zur Ermittlung des Schalldruckpegels in einem Spektrogramm ein Bereich von 1 s und 13,5 kHz (Frequenzbereich: 1,5 – 15 kHz) ausgewählt und

die Schallquellen für den ausgewählten Bereich ermittelt. Der jeweilige Wert des Schalldruckpegels setzt sich somit nur aus den Schallquellen, die eindeutig der WEA zuzuordnen sind zusammen. Auf diese Weise ergeben sich für jede Messung 64 Einzelwerte, die zusammen den Verlauf des Schalldruckpegels der untersuchten WEA am jeweiligen Messpunkt bilden.

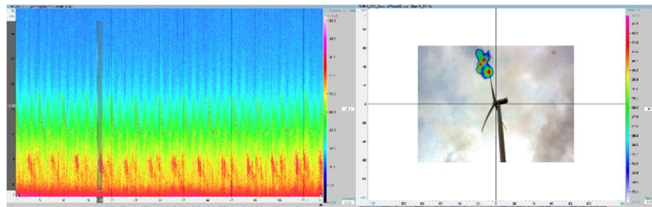


Abbildung 5: Beispiel für die Ermittlung der 1-s-Schallpegel aus den Messungen mit der akustischen Kamera. Links: Spektrogramm der Messung mit markiertem Zeitbereich; rechts: Lokalisierung der Schallquellen am Rotorblatt

Im nächsten Schritt wird für jeden Messpunkt ein unbewerteter, äquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq,i,64s}$ aus den Verläufen bestimmt und nach DIN EN 61400-11 [5] in Schalleistungspegel $L_{W,i}$ umgerechnet. Weiter wurde die mittlere Windgeschwindigkeit aus den Anlagendaten ebenfalls nach DIN 61400-11 auf eine standardisierte Windgeschwindigkeit in 10 m über dem Boden \bar{v}_W umgewandelt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind zusammen mit der Ausrichtung der Messpunkt zur Windrichtung Nord (0°) φ und der Rotordrehzahl \bar{v}_R in Tabelle 1 für jeden Messpunkt aufgeführt. Die Nummerierung bezieht sich dabei auf die Reihenfolge in der die Messungen entstanden sind. Die grau hinterlegten Messungen 1, 11, 21 und 23 werden in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Der Grund hierfür sind fehlende Informationen (Messung 21) oder doppeltes Auftreten bei der Ausrichtung φ .

Tabelle 1: Ausrichtung der Messposition, normierte Windgeschwindigkeit, mittlere Rotordrehzahl und Schalleistungspegel für alle Messpunkte

Nr.	φ in °	\bar{v}_W in m/s	\bar{v}_R in rpm	L_W in dB	Nr.	φ in °	\bar{v}_W in m/s	\bar{v}_R in rpm	L_W in dB
01	93	3,1	8,6	97,0	16	222	1,7	7,9	106,2
02	93	3,1	8,6	98,2	17	201	1,7	7,9	101,8
03	87	2,7	6,2	96,0	18	199	2,3	3,4	104,1
04	76	3,2	8,6	97,4	19	172	2,5	8,3	99,5
05	60	2,7	8,4	94,9	20	154	2,8	8,4	98,6
06	47	1,5	5,5	98,3	21	-	3,7	8,8	-
07	356	3,4	6,5	97,5	22	150	1,9	0,4	98,1
08	321	3,3	8,7	97,1	23	150	1,9	0,4	97,7
09	307	4,0	9,1	97,7	24	130	2,4	2,2	99,0
10	287	4,0	9,1	97,1	25	102	2,5	8,3	98,2
11	320	4,2	9,4	101,4	26	92	2,0	8,2	98,7
12	320	4,2	9,4	99,8	27	78	2,3	8,2	97,5
13	306	4,3	9,5	98,5	28	45	2,7	8,4	98,3
14	264	3,1	8,5	101,2	29	32	3,0	8,5	96,7
15	254	2,7	8,4	103,3	30	19	2,9	8,4	96,3

Unter der Annahme, dass sich die lautesten Messpunkte direkt vor (0°) bzw. hinter (180°) der WEA befinden, kann die

Messung Nr. 7 als Referenzpunkt angesehen werden. Ausgehend von diesem Referenzpunkt wurde die in Tabelle 2 dargestellten Differenz der Schallleistungspegel $\Delta L_{W,i}$ berechnet. Die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten wurden bei dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt. Dadurch ergibt sich aus Tabelle 2 ein verzerrtes Bild, über das keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann. Es ist jedoch eine Tendenz zu erkennen, dass es bei einem Abstand von ca. 180 m zur Nabe der WEA im Bereich von 172° bis 264° zu einem Anstieg des Schallpegels kommt. Dieser Sektor entspricht bei nördlicher Windrichtung dem Bereich hinter der Rotorebene auf Seite des herabkommenden Rotorblattes.

Tabelle 2: Differenz der Schallleistungspegel zwischen dem Referenzpunkt (356°) und der jeweiligen Messposition, sortiert nach aufsteigender Ausrichtung

φ in $^\circ$	19	32	45	47	60	76	78	87	92
ΔL_W in dB	-1,2	-0,8	0,9	0,8	-2,6	-0,1	0,1	-1,5	1,3
φ in $^\circ$	93	102	130	150	154	172	199	201	222
ΔL_W in dB	0,7	0,7	1,5	0,6	1,1	2,0	6,7	4,4	8,7
φ in $^\circ$	254	264	287	306	307	320	321	356	
ΔL_W in dB	5,8	3,7	-0,4	1,0	0,2	2,3	-0,4	0,0	

Auch bei einer Betrachtung der Pegelverläufe kann auf Grund der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten bzw. Rotordrehzahlen der einzelnen Messungen keine klare Aussage über die Richtcharakteristik der untersuchten WEA gemacht werden. In Abb. 6 sind die Pegelverläufe aller Messungen, in der Reihenfolge wie sie aufgenommen wurden, dargestellt. Die rot hinterlegten Messungen wurden bei der Auswertung, wie oben erwähnt nicht berücksichtigt. Neben den Pegelverläufen der einzelnen Messungen (grün) sind in der Grafik auch die mittlere Windgeschwindigkeit (blau) und die mittlere Rotordrehzahl (orange) jeder Messung dargestellt.

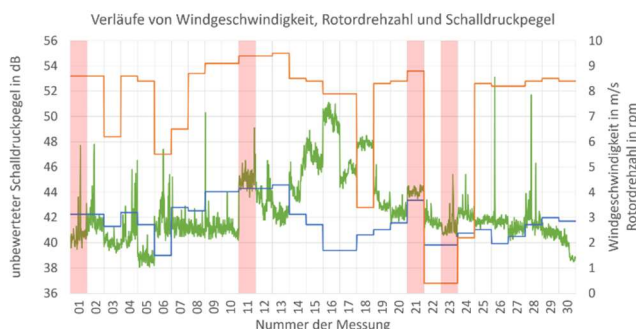


Abbildung 6: Darstellung der Verläufe von normierter Windgeschwindigkeit (blau), mittlerer Rotordrehzahl (orange) und unbewerteten Schallleistungspegel (grün) über den einzelnen Messungen (mit einer Aufnahmedauer von 64 s)

Da diese zusätzlichen Informationen nur als Mittelwerte über einen längeren Zeitraum (10 min) vorliegen, ist eine direkte Zuordnung von Schwankungen in den Pegelverläufen zu Änderungen in Drehzahl oder Windgeschwindigkeit nicht möglich. Als weiterer Effekt der Mittelung treten bei der Rotordrehzahl verfälschte Werte auf. Da die WEA in machen Mittelungsperioden über mehr oder weniger lange Zeiträume ins Trudeln kam, entspricht der Mittelwert nicht der

tatsächlichen Drehzahl während der Messung. Beispiele für diesen Effekt sind Messung 18, 22 und 23. In Messung 30 tritt das Mittelungsproblem umgekehrt auf. Aus dem Druckverlauf ist erkennbar, dass die WEA nach der halben Messdauer zum Stillstand kommt. Da dies aber nur in einen kurzen Zeitbereich der Mittelung fällt, bleibt die mittlere Drehzahl für die Messung unbeeinflusst. Um diesen Effekt berücksichtigen zu können, sind zeitlich höher aufgelöste Wetter- und Anlagendaten notwendig.

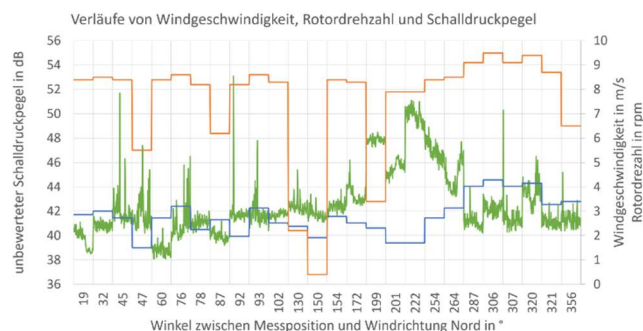


Abbildung 7: Darstellung der Verläufe von normierter Windgeschwindigkeit (blau), mittlerer Rotordrehzahl (orange) und unbewerteten Schallleistungspegel (grün) über den auf die nördliche Windrichtung (0°) bezogenen Winkel der Messpositionen

Für die Untersuchung der Richtcharakteristik mittels der Pegelverläufe werden die Verläufe nach ihrer Ausrichtung zur Windrichtung Nord angeordnet (s. Abb. 7). Auch hier lässt sich mit zwei Annahmen ein Bereich herausarbeiten, in dem eine Zunahme des Schallpegels gegenüber den anderen Messpositionen erkennbar ist.

Zunächst wird der Fehler bei der Rotordrehzahl mit der Annahme korrigiert, dass die durch die Mittelung abweichenden Drehzahlen (Messungen 3, 6, 7, 18, 22, 23 und 24) denen aus der vorangegangenen oder nachfolgenden Messung entsprechen. Des Weiteren wird angenommen, dass mit zunehmender Drehzahl auch der Schallpegel steigen wird und umgekehrt. Passt man den Verlauf der Rotordrehzahl entsprechend an, erhält man einen annähernd konstanten Verlauf der Rotordrehzahl und damit eine besser interpretierbare Darstellung (s. Abb. 8).

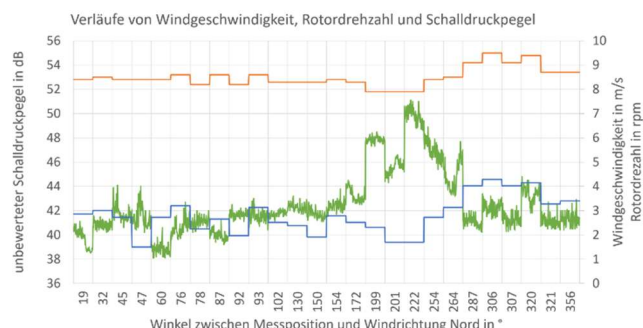


Abbildung 8: Darstellung der Verläufe von normierter Windgeschwindigkeit (blau), angepassten mittlerer Rotordrehzahl (orange) und unbewerteten Schallleistungspegel (grün) über den auf die nördliche Windrichtung (0°) bezogenen Winkel der Messpositionen

Aus dieser Darstellung werden zwei Effekte deutlich. Zum einen sticht zwischen 199° und 264° ein Bereich hervor, in

dem der Schalldruckpegel um bis zu 8 dB gegenüber dem Verlauf bei 356° ansteigt. Dieser Bereich liegt hinter der Rotorebene auf der Seite des herabkommenden Blatts und bestätigt die Tendenz, die sich bei den Schalleistungspegeln angedeutet haben.

Zum ändern wird ersichtlich, dass es Schwankungen im Schalldruckpegel gibt, die mit den vorliegenden, gemittelten Messdaten nicht erklärt werden können. Dies ist besonders auffällig bei den Ausrichtungen 19°, 254° und 264°. Hier ergeben sich teilweise Schwankungen von bis zu 4 dB. Diese sind wahrscheinlich an Veränderungen im Betriebszustand oder der Windbedingungen zurückzuführen. Um dies zu belegen fehlen jedoch ausreichend genaue Messdaten.

Zusammenfassung

Bei der Auswertung der Messdaten wurden einige Vereinfachungen und Annahmen getroffen, die die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich schmälern. Trotzdem kann, wie bereits erwähnt, aus den Ergebnissen eine Tendenz abgeleitet werden. Für die untersuchte Anlage scheint es in geringeren Abständen (180 m zur Nabe) auf der Seite des herabkommenden Rotorblattes im Abwindbereich zu einer erkennbaren Zunahme des Schalldruckpegels zu kommen. Dieses Verhalten stimmt nicht mit den in der Literatur [1, 2, 3, 4] enthaltenen Modellen einer bidirektionalen Punktquelle für eine Windkraftanlage überein.

Es muss aber berücksichtigt werden, dass diese Aussage nur für geringe Abstände gilt. Das Verhalten in größeren Abständen, die vor allem bei einer Bewertung hinsichtlich der Störung von Anwohnern von Bedeutung sind, kann in dieser Arbeit nicht abgeschätzt werden. Auch ist die Datengrundlage für eine allgemeine Aussage nicht ausreichend. Es hat sich gezeigt, dass der Umfang und die Art der Erhebung von Wetter- und Anlagendaten nicht ausreichend sind. Auch ist die Methode zur Bestimmung der Schalldruckpegel aus den Messungen mit der akustischen Kamera noch nicht ausgereift und benötigt weitere Verfeinerung. Hier ist vor allem kritisch, dass aus Kapazitäts- und Zeitgründen nicht ein größerer Frequenzbereich, vor allem Frequenzen unterhalb von 1,5 kHz, betrachtet wurden.

Um den in dieser Arbeit ermittelten Effekt am herabkommenden Rotorblatt weiter zu untersuchen, sind Messungen mit kleinerer Schrittweite zwischen den einzelnen Messpunkten geplant. Dabei soll auch der horizontale Abstand zur WEA variiert werden, um in Zukunft auch Aussagen für größere Entfernungen machen zu können. Die Problematik der unzureichend aufgelösten Wetterdaten, wird in Zukunft durch die Einbeziehung von Daten eines im Windpark installierten Wettermasts behoben.

Literatur

- [1] Y. Okada, K. Yoshihisa, K. Higashi und N. Nishimura, „Radiation characteristics of noise generated from a wind turbine,“ *Acoustical Science and Technology*, Bd. 36, Nr. 5, pp. 419 - 427, 2015.
- [2] D. Kühner, „Schallausbreitung von Windenergieanlagen,“ *Akustik Journal*, Nr. 01, pp. 16-35, Februar 2019.
- [3] S. Martens, T. Bohne und R. Rolfes, „Analyzing the Sound Propagation of Wind Turbines Based on Measured Acoustical and Meteorological Parameters,“ Berlin, 2019.
- [4] T. Evans und J. Cooper, „Influence of wind direction on noise emission and propagation from wind turbines,“ *Proceedings of Acoustics*, 2012.
- [5] *DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren (ICE 61400-11:2012)*, Berlin: Beuth-Verlag, 2013.