

Schallimmissionsmessungen an Windenergieanlagen mit einer akustischen Kamera zum Aufbau einer Geräuschdatenbank

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 Forschungsprojektes X-Energy wird an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) in Hamburg eine Open-Source-Datenbank mit Geräuschen aus dem Umfeld von Windenergieanlagen (WEA) aufgebaut. Diese Datenbank bildet neben einem kostengünstigen und wetterfesten Mikrofon-Array [1] die Grundlage für das Teilprojekt X-Eptance Impulse, bei dem mehrere Werkzeuge zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Akzeptanz von Windparks entwickelt werden.

Das Teilprojekt hat sich bei der Generierung der Geräusche bewusst gegen die Simulation und für die Aufnahme von realen Geräuschen entschieden, um auf diese Weise eine höhere Akzeptanz in der Bevölkerung für die weiteren Arbeitsergebnisse zu erzielen. Außerdem stehen dadurch der Wissenschaft und allen Interessierten in Zukunft echte Geräuschdaten von WEAs zur Verfügung.

Bei der Generierung der Geräuschdaten steht die Problematik der Trennung von Umgebungs- und Primärgeräusch im Mittelpunkt. Dieses Problem soll durch den Einsatz einer akustischen Kamera [2] gelöst werden. Durch die Lokalisierung der Schallquellen mit einer akustischen Kamera soll es ermöglicht werden die gewünschten Geräusche in den Messdaten zu separieren. Um diesen Schritt später automatisch durchführen zu können, wird in den Messdaten zunächst manuell nach Geräuschmustern gesucht, die sich eindeutig den WEAs zu ordnen lassen.

Messkampagne 2018

Für die Erstellung eines ersten Datensatzes wurden über das Jahr 2018 verteilt Messungen in den Hamburger Windparks Curslack und Ochsenwerder durchgeführt. Dabei wurde der Großteil der Messungen im hochschuleigenen Windpark Curslack (s. Abbildung 1) durchgeführt.



Abbildung 1: Lageplan des Windparks Curslack
Quelle: *openstreetmap-contributors*

Neben den Geräuschdaten wurden auch Umgebungsbedingungen wie Windgeschwindigkeit und -richtung dokumentiert, um auch die Abhängigkeit der Geräusche davon berücksichtigen zu können. Die Messungen beschränkten sich auf einen WEA-Typus, der in beiden Windparks überwiegend anzutreffen ist, die Nordex N117 mit einer Nennleistung von 2.400 kW bzw. 3.000 kW und einem Rotordurchmesser von 117 m. Die WEAs sind auf einer Höhe von 120 m (WP Curslack) bzw. 91 m (WP Ochsenwerder) montiert.

Die Messungen wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN 61400-11 [3] durchgeführt. Dadurch ergaben sich Messabstände von ca. 180 m bzw. ca. 150 m. Abhängig von der Windrichtung und den Möglichkeiten vor Ort wurden die Messungen hauptsächlich in Windrichtung vor oder hinter der WEA ausgeführt (s. Abbildung 2). In der Norm entspricht dies der Referenzposition bzw. der Messposition 3. Teilweise wurden auch Messungen in geringeren Abständen durchgeführt. Diese dienen der Lokalisierung von Geräuschen, die bei vorherigen Messungen nicht eindeutig zugeordnet werden konnten.

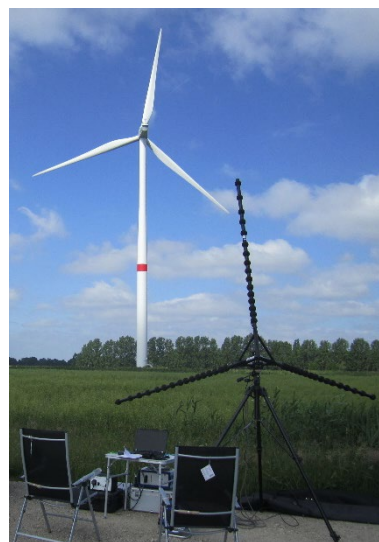


Abbildung 2: Messaufbau mit der akustischen Kamera im Windpark. Messposition: in Windrichtung hinter der WEA

Die für die Messungen eingesetzte akustische Kamera besteht aus einer herkömmlichen Videokamera und einem Mikrofon-Array der Firma gfai tech, das in diesem Fall aus 48 Sennheiser-Mikrofonkapseln besteht. Die Mikrofone sind auf drei Armen, die in 120°-Winkel zueinander angeordnet sind, mit unterschiedlichen Abständen verteilt (s. Abbildung 2). Diese Anordnung der Mikrofone ermöglicht es auch über größere Distanzen (bis zu 500 m) Messungen im Frequenzbereich von 100 Hz bis 13 kHz durchzuführen. In

den Windparks wurden von einer Messposition immer mehrere Messungen von jeweils 174 s aufgezeichnet. Es wurden bei dieser ersten Messkampagne insgesamt 83 Einzelmessungen durchgeführt und ausgewertet.

Auswertung

Die manuelle Auswertung der Messungen erfolgte mit der Software NoiseImage der Firma gfai tech. Dabei wurde für jede Messung zunächst ein Spektrogramm (s. Abbildung 3) über den kompletten Messzeitraum erzeugt und auf wiederkehrende Muster untersucht. Neben unterschiedlichen Einzelereignissen konnten vor allem drei für die WEA typische Muster in den Spektrogrammen identifiziert werden.

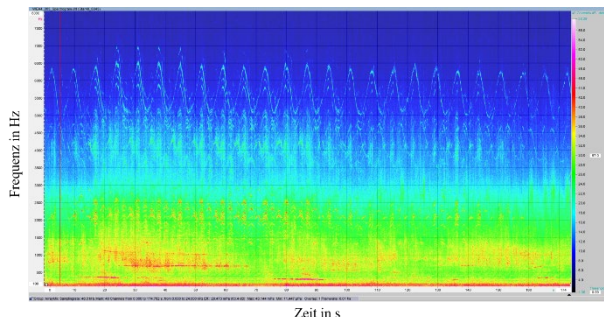


Abbildung 3: Spektrogramm einer Messung im Windpark Curslack. Dargestellter Frequenzbereich: 100 Hz – 8 kHz, Zeitbereich: 0 – 174 s, farbcodierte Intensität: 0 – 56 dB.

Im abgebildeten Spektrogramm ist mehr oder wenig deutlich ein wellenförmiger Verlauf im Bereich von 5 – 7 kHz zu erkennen. Dieses Muster lässt sich in vielen Messungen in unterschiedlichen Frequenzbereichen wiederfinden und resultiert aus dem Blattspitzengeräusch der Rotorblätter. Im Windpark und in den Messungen ist dieser Verlauf als Pfeifen wahrnehmbar. In Abbildung 4 ist in der linken Darstellung die Lokalisierung des Maximums dieser Wellenbewegung dargestellt.

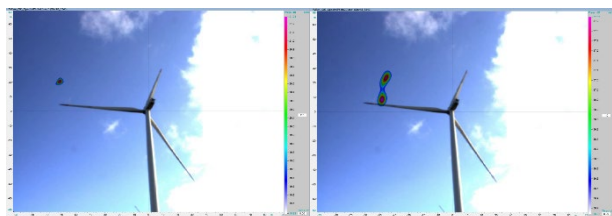


Abbildung 4: Lokalisierung unterschiedlicher Geräusche am Rotorblatt einer WEA. Links: Blattspitzengeräusch, max. Intensität: 21 dB, Bildausschnitt: X = 186 m, Y = 138 m. Rechts: Geräusch das sich aus mehreren Frequenzen im Bereich von 1,5 – 5 kHz zusammensetzt. Maximale Intensität: 37 dB, Bildausschnitt: X = 186 m, Y = 138 m. Abstand zur WEA: 172 m

Bei der grafischen Darstellung der Lokalisierung auf dem Kamerabild ergeben sich zwei Schwierigkeiten, die zu Verschiebungen in der Darstellung führen können. Dies ist zum einen der Unterschied zwischen Schall- und Lichtgeschwindigkeit, der einen Zeitversatz zwischen Audio- und Videosignal verursacht. Zum anderen entsteht durch die Messposition (unterhalb und nicht immer direkt vor oder hinter der WEA) eine Verdrehung der Bildebene auf welcher

die Position der Schallquelle berechnet wird. Dadurch wird die Schallquelle nicht an die korrekte Position auf dem Kamerabild projiziert. Die Auswertesoftware bietet zumindest für das erste Problem eine integrierte Lösung. Die Verschiebung durch die Position der akustischen Kamera kann jedoch nicht korrigiert werden.

Betrachtet man das Spektrogramm im Bereich von 1,5 – 7 kHz etwas näher (s. Abbildung 5) fällt auf, dass sich das wellenförmige Muster auch in niedrigeren Frequenzbereichen und mit unterschiedlicher Auslenkung wiederfinden lässt. Insgesamt tritt das Muster in drei Formen auf, wobei jede Form für das Pfeifgeräusch eines Rotorblatts steht und die komplette Kreisbewegung dieses Rotorblatts darstellt.

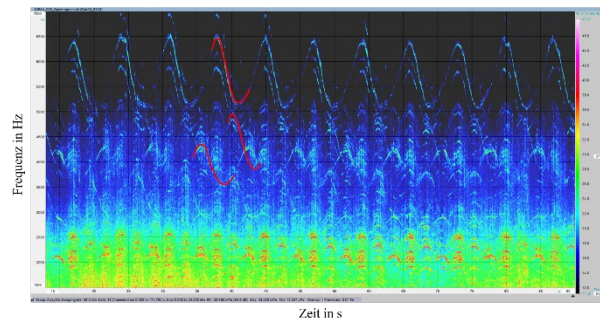


Abbildung 5: Ausschnitte aus dem Spektrogramm zur Verdeutlichung des Blattspitzengeräuschs. Frequenzbereich: 1,5 – 7 kHz, betrachteter Zeitraum: 13 bis 90 s

Neben dem an- und abschwelldenden Pfeifen der Blattspitzen entwickeln sich über das Rotorblatt verteilte weitere Geräusche. Diese sind jedoch nur in der Abwärtsbewegung des Rotorblatts wahrnehmbar und verstärken das Pfeifgeräusch von der Blattspitze. In Abbildung 5 sind diese Geräusche im Bereich von 1,5 – 5,2 kHz als übereinander angeordnete Bögen zu erkennen. Besonders im Bereich von 1,5 – 2,2 kHz stechen einzelne Frequenzen mit einer Intensität von ca. 30 dB (roter Bereich der Farbskala) aus dem Hintergrundgeräusch (> 20 dB, grüner und blauer Bereich der Farbskala) hervor und bilden dabei drei unterschiedliche, sich wiederholende Frequenzmuster (s. Abbildung 6). Die Lokalisierung eines solchen Musters ist in Abbildung 4 auf der rechten Seite zu sehen.

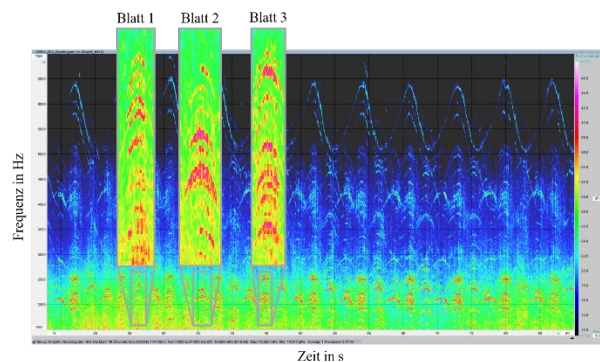


Abbildung 6: Ausschnitte aus dem Spektrogramm der rotorblatteigenen Frequenzmuster. Spektrogramm mit Frequenzbereich: 1,5 – 7 kHz, betrachteter Zeitraum: 13 bis 90 s. Ausschnitte im Frequenzbereich von 1,8 – 2,2 kHz, betrachteter Zeitraum: je ca. 2,3 s

Diese Muster lassen sich den wellenförmigen Verläufen der Blattspitzengeräusche zuordnen. Wie in Abbildung 7 veranschaulicht, tritt jedes Maximum einer Welle zeitgleich mit einem der Frequenzmuster auf. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Mustern liegt bei ca. 2,3 s und entspricht einer Drittel Umdrehung des Rotors. Mit dieser Information lässt sich die Umdrehungszahl der WEA aus jeder Messung abschätzen.

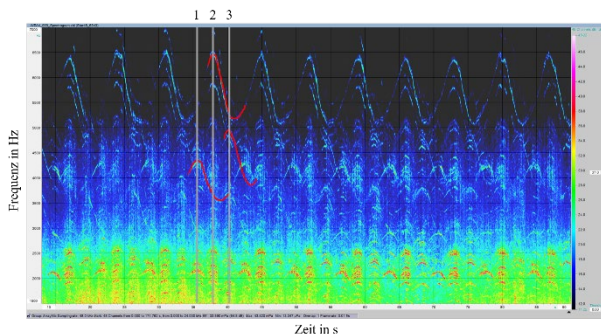


Abbildung 7: Veranschaulichung der Zuordnung der Blattspitzengeräusche zu den Geräuschemustern der einzelnen Rotorblätter. Frequenzbereich: 1,5 – 7 kHz, betrachteter Zeitraum: 13 bis 90 s.

Bei den Messungen im Windpark Ochsenwerder wurden auch einige Messungen mit einem deutlich geringeren Abstand zur WEA ausgeführt. Die Auswertung dieser Messungen liefert ein Spektrogramm, in welchem sich deutlich breitbandige Geräusche abzeichnen. Diese entstehen, wenn ein Rotorblatt den Turm der WEA passiert und Teile der vom Blatt emittierten Geräusche daran reflektiert werden. In Abbildung 8 sind diese sehr breitbandigen Geräusche als wiederkehrende Säulen im Spektrogramm zu erkennen.

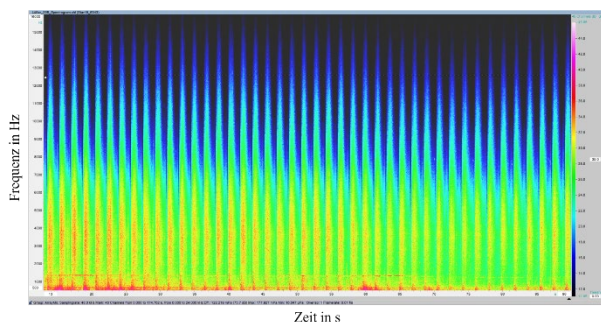


Abbildung 8: Spektrogramm einer Messung im Windpark Ochsenwerder mit einem geringeren Abstand zur WEA. Dargestellter Frequenzbereich: 500 Hz – 16 kHz, Zeitbereich: 13 – 90 s, farbcodierte Intensität: 0 – 56 dB.

Auch hier lässt sich aus dem zeitlichen Abstand zwischen den einzelnen Turmdurchläufen die Drehzahl der WEA abschätzen. In Abbildung 9 ist die Lokalisierung eines Turmdurchlaufs dargestellt. Es wird deutlich, dass die Quelle des Geräusches am Rotorblatt, welches gerade den Stahlurm passiert, liegt.

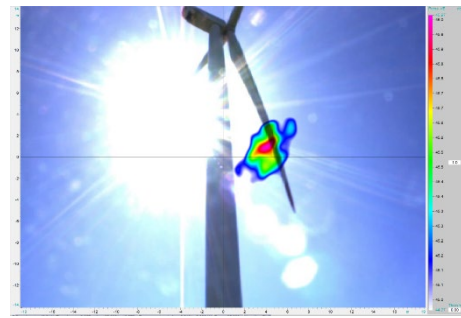


Abbildung 9: Lokalisierung des Turmdurchgangsgeräusches. Maximale Intensität: 46 dB, Bildausschnitt: X = 38 m, Y = 28 m, Abstand zur WEA: 35 m

Zusätzlich zu diesen Geräuschen, die bei WEAs inzwischen die auffälligsten Geräusche darstellen, können auch einzelne, konstante Frequenzen in den Messungen gefunden werden (s. Abbildung 10). Die genauen Quellen dieser Töne lassen sich mittels der durchgeführten Messungen nicht lokalisieren. Es ist jedoch fast immer möglich die Gondel der WEA als Quelle zu lokalisieren. Damit kommen als Quellen für diese Töne die Komponenten aus dem Triebstrang oder Generator der WEA in Frage.

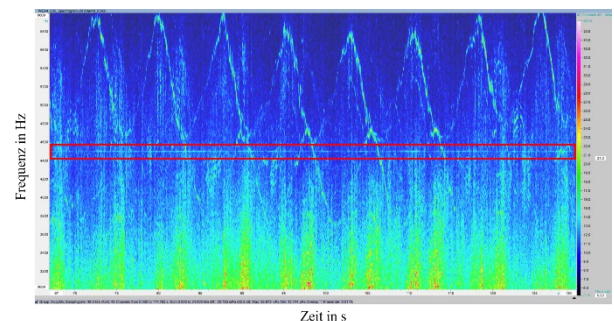


Abbildung 10: Ausschnitt eines Spektrogramms mit Markierung einer konstanten Frequenz bei 4,5 kHz (Intensität von ca. 14 dB). Frequenzbereich: 1,5 – 7 kHz, betrachteter Zeitraum: 13 bis 90 s.

In Abbildung 10 ist ein Beispiel für einen konstanten 4,5-kHz-Ton dargestellt. Dieser Ton konnte bisher in den meisten Messungen an einer N117 gefunden und der Gondel der WEA zugeordnet werden (s. Abbildung 11).



Abbildung 11: Lokalisierung der konstanten Frequenz (4,5 kHz) auf der Gondel. Maximale Intensität: 10 dB, Bildausschnitt: X = 186 m, Y = 138 m, Abstand zur WEA: 172 m

Neben dieser Frequenz lassen sich noch weitere Töne in den Messungen finden. Diese sind in der folgenden Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht der konstanten Frequenzen in den ausgewerteten Messungen mit der Angabe der Häufigkeit des Auftretens

Frequenz in Hz	Häufigkeit in den Messungen in %
Windpark Curslack	
240	50,00
305	50,0
2.320	56,3
4.500	84,4
9.150	84,4
Windpark Ochsenwerder	
240	79,0
340	68,4
465	68,4

Zusammenfassung

Für den WEA-Typus Nordex N117 konnten aus den Messungen drei eindeutige Merkmale ermittelt werden. Diese können zusammengefasst als Indikator für diesen WEA-Typus betrachtet werden. Die Messungen haben aber auch gezeigt, dass nicht alle Merkmale auf größere Entfernungen und aus unterschiedlichen Positionen erfasst werden können. Um einen möglichst vollständigen Indikator zu erhalten sind folglich Messungen in unterschiedlichen Abständen und möglicherweise auch aus unterschiedlichen Richtungen notwendig. Diese Problematik muss in weiteren Messungen noch genauer untersucht werden.

Des Weiteren wurden die Umgebungsbedingungen bei der Auswertung noch nicht mitberücksichtigt. Zwar kann subjektiv ein Zusammenhang zwischen der Änderung des Frequenzbereichs, der für das Blattgeräusch relevant ist, und der Windgeschwindigkeit hergestellt werden. Dies wurde jedoch noch nicht mit Daten aus den Messungen der Umgebungsbedingungen belegt.

Neben diesen zusätzlichen Fragestellungen stehen die Optimierung des Indikators und die Generierung der Soundfiles im Mittelpunkt. In einem nächsten Schritt soll der ermittelte Indikator nach einem geeigneten Verfahren, z.B. nach Vorbild der AudioID des Fraunhofer Instituts [4] oder nach anderen Methoden zur Generierung von akustischen Fingerabdrücken [5], weiterentwickelt werden. Außerdem sollen die Anteile der identifizierten Muster aus den Messungen separiert und zum Gesamtgeräusch einer WEA zusammengefügt werden.

Abschließend ist zu klären, ob die ermittelten Merkmale für WEA allgemeingültig sind oder wie sich andere WEA-Typen von den ermittelten Ergebnissen unterscheiden.

Literatur

- [1] Wenzel, T., Rokita, D. Ueberle, F., Rettig, R.: Acoustic internet-of-things: Low cost, distributed, synchronous measurement systems for automated sound source localization in wind turbines. ICSV 24 (2017)
- [2] acoustic camera, URL: <https://www.acoustic-camera.com> [Abrufdatum: 28.03.2019]
- [3] DIN EN 61400-11:1998, Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmeßverfahren
- [4] Allamanche, E., Herre, J., et al.: Audioid: Towards content-based identification of audio material. 110th AES Convention (2001)
- [5] Edwina Alisa, T., Naveen, N., Mathew, D.: A novel acoustic fingerprint method for audio signal pattern detection