Charakterisierung von gemessenen Geräuschen einer Windenergieanlage für die Auralisation in einem virtuellen Windpark

Sebastian Mellert[1], Iwer Petersen[2], Dagmar Rokita[1], Friedrich Ueberle[1], Birgit Wendholt[2]

[1] *HAW Hamburg Fakultät Life Sciences, 21033 Hamburg, E-Mail: sebastian.mellert@haw-hamburg.de*

[2] *HAW Hamburg Fakultät Technik & Informatik, 20099 Hamburg, E-Mail: iwer.petersen@haw-hamburg.de*

Einleitung

Obwohl die Windenergie als wichtiger Baustein für eine umweltfreundliche Energiegewinnung angesehen wird, bilden sich in der Bevölkerung oft Widerstände gegen geplante Windparks in direkter Umgebung. Unterschiedliche Studien [1, 2, 3] zeigen, dass sich durch den Einsatz von virtueller Realität die Erwartungshaltung von Anwohnern und die Kommunikation mit der Öffentlichkeit verbessern lässt.

In diesem Kontext bewegt sich auch das Forschungsprojekt „Open Citizen Soundwalks“ an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Ziel ist der Aufbau eines virtuellen Soundwalk in einem Hamburger Windpark der über unterschiedliche Plattformen der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden soll. Die virtuelle Umgebung wird dabei in der Unreal Engine mittels freizugänglicher Geoinformations-Daten erzeugt und mit den typischen Umgebungs- und Anlagengeräuschen aus dem Windpark auralisiert.

Die Auswahl und Charakterisierung dieser Geräusche erfolgt sowohl auf Basis von wissenschaftlichen Erkenntnissen über die Geräuschentstehung an Windenergieanlagen (WEA) als auch auf Messdaten aus dem abzubildenden Windpark. Diese Daten wurden in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl untersucht und die Ergebnisse werden in dieser Arbeit kurz vorgestellt.

Datenerhebung

Im Jahr 2019 wurden im Windpark Curslack mehrere Messreihen mit einer akustischen Kamera durchgeführt. Dabei entstanden 61 Einzelmessungen, die insgesamt 65 min akustische Daten enthalten. Neben diesen Daten stehen für diese Messungen Betriebs- und Wetterdaten aus unterschiedlichen Quellen aus dem Windpark zur Verfügung.

Abbildung 1: Windpark Curslack aus nord-östlicher Richtung betrachtet mit Markierung der untersuchen WEA (Quelle: eigene Aufnahme)

Der Windpark Curslack (s. Abbildung 1) setzt sich aus einer Nordex N117 Delta und 4 Nordex N117 Gamma zusammen. Alle WEA besitzen eine Nabenhöhe von 120 m und einen Rotordurchmesser von 117 m. Der Windpark befindet sich auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche und wird nach Norden und Westen durch eine Autobahn bzw. eine viel genutzte Landstraße begrenzt. Westlich des Windparks befindet sich ein Windmessmast, der insgesamt 120 m hoch und mit Sensoren für Windgeschwindigkeit, -richtung, Temperatur, Luftdruck und -feuchtigkeit ausgestattet ist.

Die akustischen Daten wurden mit einer akustischen Kamera von gfai tech GmbH erhoben und mit den Programmen NoiseImage Versionen 4.12.0 und Matlab R2018a ausgewertet. Die akustische Kamera besteht aus 48 Sennheiser Mikrofon-Kapseln und einer Videokamera. Die Mikrofon-Kapseln sind auf drei Armen in unregelmäßigen Abständen verteilt, während sich die Videokamera vor dem Schnittpunkt dieser Arme befindet (s. Abbildung 2).

Abbildung 2: links: Mikrofon-Array der akustischen Kamera auf einem Stativ im Windpark, rechts: akustische Kamera mit Stromversorgung und Datenrekorder bei einer Messung im Windpark (Quelle: eigene Aufnahmen)

Alle Messungen wurden an der Nordex N117 Delta durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Anzahl der Einzelmessungen, die vorherrschende Windrichtung und Windgeschwindigkeiten während der unterschiedlichen Messzeiträumen aufgeführt. Es wird deutlich, dass die akustischen Daten zu unterschiedlichen Jahreszeiten und Windbedingungen erhobenen wurden. Damit ist es wahrscheinlich, dass die vorhandenen Daten ein breites Spektrum der typischen Anlagen- und Umgebungsgeräusche des Windparks Curslack enthalten. Diese Geräusche wurden im nächsten Schritt ermittelt und analysiert. Der Schwerpunkt der Analyse lag dabei auf den Geräuschen der WEA.

Tabelle 1: Übersicht der erhobenen Messdaten unter den jeweiligen Windbedingungen

Datum	Anzahl Messungen	Windrichtung in °	Windgeschw. in m/s
04.2019	10	47 – 99	2,2 – 5,3
06.2019	11	212 – 236	2,1 – 5,5
09.2019	9	262 – 282	2,7 – 4,4
12.2019	31	225 – 299	4,3 – 8,6

Analyse der Daten

Aus der Literatur ist bekannt, dass an WEA zwei Arten von Geräuschen auftreten – mechanische und aerodynamische [4]. Bei modernen WEA dominieren inzwischen die aerodynamischen Geräusche das Klangbild [5]. Aus vorherigen Untersuchungen [6] ist bekannt, dass an der untersuchten WEA vor allem das Hinterkanten und das Blattspitzen-Geräusch im Windpark wahrnehmbar ist. Diese beiden Geräuscharten konnten in einer ersten Analyse in 80,3 % (Hinterkanten-Geräusch) bzw. 91,8 % (Blattspitzen-Geräusch) der Daten wiedergefunden werden. In sechs Datensätzen war weder das Hinterkanten- noch das Blattspitzen-Geräusch enthalten, so dass die Auswertung mit 55 Messungen fortgesetzt wurde.

Hierbei wurde für jede Messung das Spektrogramm auf die charakteristischen Signaturen der beiden Geräuscharten untersucht. Das Hinterkanten-Geräusch zeichnet sich dabei durch eine breitbandige Verteilung aus, das mit zunehmender Frequenz an Intensität verliert und zeitlich auf einen Bereich von 2 - 3 s beschränkt ist. Das frequenz- und amplituden-modulierte Blattspitzen-Geräusch ist hingegen als Sinus ähnlicher Verlauf im Spektrogramm zu finden. Dabei können je nach Hintergrundgeräusch entweder nur die höheren Ordnungen (s. Abbildung 3) oder auch der Grundton und höhere Ordnungen erkennbar sein.

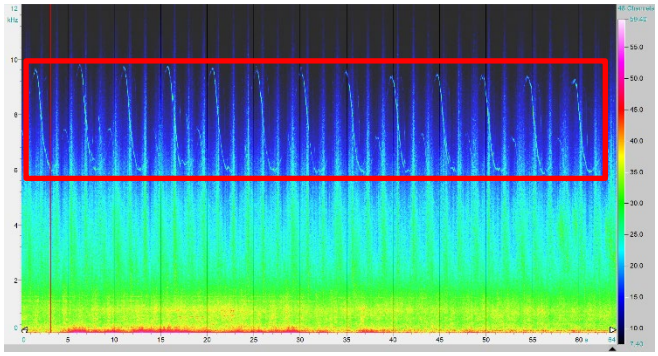

Abbildung 3: Spektrogramm einer Messung im Windpark Curslack; in rot ist die Frequenzmodulation des Blattspitzen-Geräuschs im Bereich von 5,8 - 9,8 kHz markiert; Frequenzbereich: 0,1 - 12 kHz; Zeitbereich: 0 - 64 s; farbskalierter Intensitätsbereich: 7,4 - 59,4 dB

Da das Blattspitzen-Geräusch von Rotorblatt zu Rotorblatt variiert, können in einer Messung neben den unterschiedlichen Ordnungen auch bis zu drei zeitlich versetzte Verläufe auftreten (s. Abbildung 4 links). Teilweise enthalten Messungen auch Geräusche von mehreren WEA, so dass eine direkte Zuordnung eines Verlaufs zu einer WEA bzw. einem Rotorblatt nicht direkt möglich ist.

Deshalb wurden zunächst für jede Messung die Wertepaare Frequenz und Zeit für jedes Maximum und Minimum eines erkennbaren Verlaufs manuell aus den Spektrogrammen ermittelt (s. Abbildung 4 rechts). Da die Auflösung der Spektrogramme mit 5 Hz für die Frequenz und 0,05 s für die Zeit teilweise zu grob und das Auslesen der Extrempunkte zum Teil eine Interpretation durch den Auswertenden erforderte, wurden die so ermittelten Werte mit einer Unsicherheit von 10 LSD ($\Delta f = 50$ Hz, $\Delta t = 0{,}5$ s) behaftet.

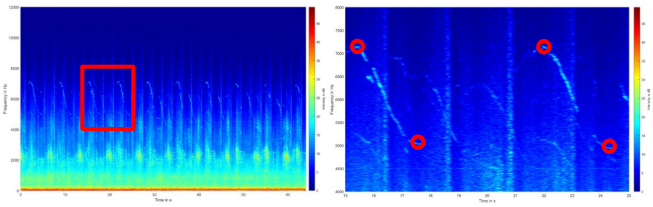

Abbildung 4: links: gesamtes Spektrogramm (0 - 12 kHz, 0 - 64 s) mit drei zeitlich versetzen Verläufen und Markierung eines Ausschnitts; rechts: Ausschnitt aus dem Spektrogramm (4 - 8 kHz, 15 - 25 s) mit Markierung der Extremwerte eines Verlaufs

Ermittlung Rotordrehzahl aus den Messungen

Aus den zeitlichen Abständen der einzelnen Extrempunkte wurde als nächstes die jeweilige Rotordrehzahl ermittelt. Dabei wurde immer der Abstand zwischen zwei benachbarten maximalen bzw. minimalen Frequenzen als eine oder mehrere volle Umdrehungen des Rotors betrachtet. Aus den einzelnen Rotordrehzahlen einer Messung wurde ein Mittelwert und die Standardabweichung für die maximalen und die minimalen Frequenzen dieser Messung berechnet. Die Standard-abweichung liegt dabei zwischen 0,4 - 12,6 % und kann in den meisten Fällen als allgemeiner Wert für die jeweilige Messung betrachtet werden. Mit Blick auf die oben erwähnte Ableseungenauigkeit ergibt sich für die relative Unsicherheit der Rotordrehzahl einen Bereich von 13,6 – 32 % und macht deutlich, dass die Rotordrehzahl innerhalb einer Messung zwar meist nur geringen Schwankungen unterliegt, durch die Ableseungenauigkeit aber insgesamt unpräzise ausfällt.

Bei einem Vergleich mit den 10-Minuten Mittelwerten, die aus den Betriebsdaten der WEA stammen, fällt auf, dass die berechneten Werte teilweise stark von den Betriebsdaten abweichen (s. Abbildung 5). Grund hierfür ist, dass in den Betriebsdaten auch Phasen der Abschaltung oder Wechsel der Umgebungsbedingungen enthalten sind. Diese sind in der hier berechneten Rotordrehzahl nur bedingt enthalten, da die WEA immer nur im Betrieb vermessen wurde. Für die weitere Auswertung wird mit der berechneten Rotordrehzahl gearbeitet.

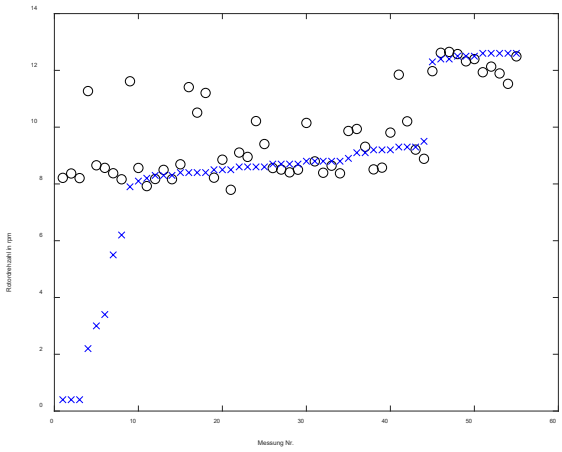

Abbildung 5: Vergleich der Rotordrehzahl; blaue Kreuze: 10-Minuten Mittelwerte aus den Betriebsdaten der WEA; schwarze Kreis: berechnete Mittelwert aus der Messung

Zuordnung zwischen Frequenzen und Rotorblättern

In Abbildung 6 sind die ermittelten Maxima (blaue Kreise) und Minima (rote Kreuze) der Frequenz über der ermittelten Rotordrehzahl dargestellt. Eine genaue Zuordnung der Frequenzen zu einem bestimmten Rotorblatt oder eine Aufteilung in Grund- und Obertöne ist aus dieser Darstellung jedoch nicht möglich. Es ist aber ein möglicher linearer Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Rotordrehzahl erkennbar. Dieser wird im nächsten Schritt genauer untersucht.

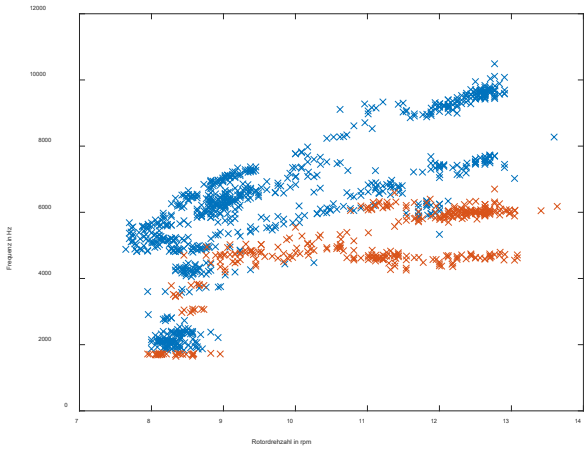

Abbildung 6: Verteilung der maximalen (blau) und minimalen (orange) Frequenzen des Blattspitzen-Geräusch aller Rotorblätter und Ordnungen über der Drehzahl

Dazu wurde für beide Datensätze ein Wertebereich für die Steigung und den Schnittpunkt mit der y-Achse definiert. Da die Steigung positiv erwartet wird, liegen die Werte hier in einem Bereich von 10 bis 400. Für den Schnittpunkt mit der y-Achse wurde ein Bereich von -500 bis +500 gewählt.

Der nächste Teil der Auswertung unterteilt sich in drei Arbeitsschritte. Zunächst wird für jede Rotordrehzahl des Datensatzes aus den sich ergebenden Geraden der Wertebereiche eine Frequenz ermittelt. Durch die Subtraktion der zur Rotordrehzahl zugehörige gemessene Frequenz und der aus der Geraden ermittelten Frequenz und deren beiden höheren Ordnungen, kann eine Zuordnung eines Datenpaares zu einem Wertepaar erfolgen. Liegt die Differenz unter der Ableseungenauigkeit ($\Delta f = \pm 50$ Hz) wird der Datenpunkt dem entsprechenden Wertepaar zugeordnet. Abschließend erfolgt die Ermittlung der prozentualen Zuordnung aller Datenpaare zu den definierten Wertepaaren. Der größte prozentuale Werte weist dabei das Wertepaar für die beste Näherungsgerade aus. Dieses Wertepaar wird dem ersten Rotorblatt zugeordnet.

Bevor dieser Arbeitsschritt für die anderen Rotorblätter wiederholt werden kann, müssen die zugeordneten Datenpaare der Näherungsgerade des ersten Rotorblattes aus dem Datensatz entfernt werden. Anschließend wird dieses Vorgehen mit dem reduzierten Datensatz wiederholt, bis für alle Rotorblätter eine geeignete Näherungsgerade vorliegt. Dieser Prozess wird sowohl für den Datensatz der maximalen als auch der minimalen Frequenzen durchlaufen. Die Ergebnisse dieser Zuordnung sind in Abbildung 7 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass für jedes Rotorblatt eine dominante Ordnung (Grundton oder Oberton) in den Messdaten zu finden ist. Weiterhin liegen für die maximalen Frequenzen mehr Datenpaare vor als für die minimalen Frequenzen. Daraus ergibt sich auch die geringe Datenlage für das dritte Rotorblatt bei den minimalen Frequenzen. Dies hat zur Folge, dass für die ersten beiden Ordnungen keine Daten vorliegen und sich die gefundene Näherungsgerade in diesen Bereichen nicht überprüfen lässt. Die gefundene Näherungsgerade für das dritte Rotorblatt scheint außerdem das tatsächliche Verhalten der minimalen Frequenz nicht so gut wiederzugeben.

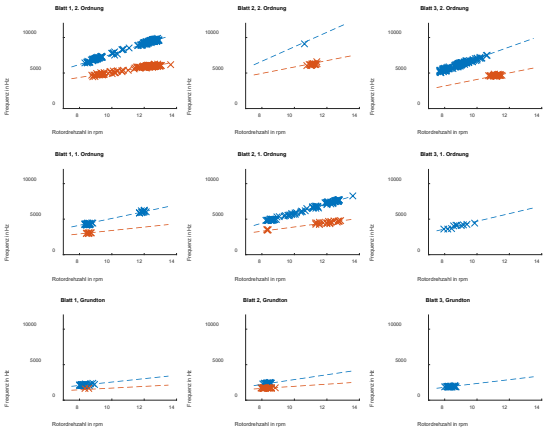

Abbildung 7: Aufteilung der maximalen (blau) und minimalen (orange) Frequenzen nach Rotorblatt und Ordnung mit der jeweiligen Näherungsgeraden (gestrichelt)

Diese wird auch im unterschiedlichen Verhalten der Näherungsgeraden zwischen den ersten beiden Rotorblättern und dem dritten Rotorblatt deutlich. Während bei den ersten beiden Rotorblättern die maximale Frequenz schneller zunimmt als die minimale Frequenz, verlaufen die Näherungsgeraden beim dritten Rotorblatt annähernd parallel. Diese spricht ebenfalls dafür, dass die für das dritte Rotorblatt gefundenen Näherungsgerade nicht das tatsächliche Verhalten wiedergibt.

Zusammenfassung

Mit diesen Ergebnissen lassen sich die Blattspitzen-Geräusche der untersuchten WEA zum Großteil sehr gut durch die maximale und minimale Frequenz der periodischen Frequenzänderung in Abhängigkeit der Rotordrehzahl beschreiben. Lediglich die geringe Datenlage für das dritte Rotorblatt erlaubt dort keine zuverlässige Aussage über das Verhalten der minimalen Frequenz. Dieses Problem kann wahrscheinlich durch eine Erweiterung der Eingangsdaten gelöst werden. Außerdem sind die Schrittweiten bei der Ermittlung der Geradenparameter in der aktuellen Auswertung noch sehr grob gehalten. Eine Verfeinerung der Berechnungen in diesem Bereich könnte das Ergebnis, auch in Hinblick auf die beiden anderen Rotorblätter, noch verbessern.

Neben diesem Aspekt sollte außerdem noch ein genauerer Blick auf die relevanten Parameter, welche die Modulation

der Frequenz beeinflussen, geworfen werden. Für die aktuelle Auswertung wurde lediglich die Rotordrehzahl berücksichtigt. Erste Überlegungen zum Doppler-Effekt auf einer Kreisbahn zeigen jedoch, dass neben der Rotordrehzahl noch weitere Parameter wie die horizontale Entfernung zur WEA, die Orientierung zur WEA und in kleinerem Ausmaß auch die Lufttemperatur einen Einfluss auf die Modulation der Frequenz des Blattspitzen-Geräuschs haben.

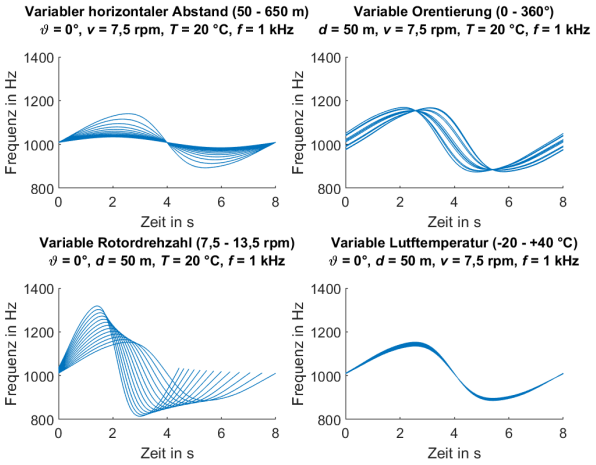

Abbildung 8: Einfluss der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auf die Frequenzmodulation des Blattspitzen-Geräuschs durch den Doppler-Effekt

In Abbildung 8 sind die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf das Verhalten der Frequenzmodulation während einer Umdrehung dargestellt. In jedem Graphen wurde jeweils ein Umgebungsparameter variiert während die anderen Parameter konstant gehalten wurden. Aus der Variation des horizontalen Abstands geht hervor, dass die Frequenzmodulation mit zunehmendem Abstand immer kleiner wird, so dass dieser Effekt auf große Distanzen verschwindet. Die Variation der Position um die WEA führt nur zu kleinen Änderungen der Schwankungsbreite der Frequenz. Hier ergibt sich viel mehr eine zeitliche Verschiebung der Extrempunkte. Der Effekt der Temperaturänderung in verwertbaren mitteleuropäischen Temperaturbereichen fällt sehr gering aus. Dagegen ist der Effekt durch die Rotordrehzahl erkennbar größer. Hier wird der Verlauf mit zunehmender Rotordrehzahl gestaucht, was zur Zunahme der Schwankungsbreite der Frequenz und zur Stauchung im Zeitbereich führt. Damit scheint die Rotordrehzahl der dominante Einfluss bei der Frequenzmodulation des Blattspitzen-Geräuschs zu sein. Nichtsdestotrotz sind vor allem die Einflüsse des horizontalen Abstands und der Position zur WEA nicht zu vernachlässigen.

Ausblick

In dieser Arbeit konnte eine Näherungslösung für die Charakterisierung des Blattspitzen-Geräuschs durch die minimale und maximale Frequenz dieses Geräuschs in Abhängigkeit der Rotordrehzahl ermittelt werden. In wie weit diese Ergebnisse auf das Hinterkanten-Geräusch übertragbar sind und ob die gefundene Lösung für die Überführung in die virtuelle Welt geeignet ist, muss noch untersucht werden. Des Weiteren muss der Einfluss der weiteren Umgebungsparameter auf die Frequenzmodulation des Blattspitzen-Geräuschs noch genauer analysiert und in ein geeignetes Modell übertragen werden.

Literatur

[1] A. Crammer, J. D. Ericson, A. Ebers Broughel, B. Bernard, E. Robicheaux und M. Podolski, „Worth a thousand words: Presenting wind turbine in virtual reality reveals new opportunities for socual acceptance and visualization research," *Ênergy Research & Scocial Science,* Bd. 67, 2020.

[2] F. Butera, K. Burgemeister, K. Fisher und D. Mounter, „Using Wind Fram Noise Auralisations for Effective Community Consultation," in *inter.noise*, Melbourne, 2014.

[3] C. Wang, D. Miller, I. Brown und Y. Jiang, „Public Participation to Support Wind Energy Development: The Role of 3D GIS and Virtual Reality," in *24th Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, 2016.

[4] S. Wagner, R. Bareiß und G. Guidati, Wind turbine noise, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

[5] S. Deshmukh, S. Bhattacharya, A. Jain und A. R. Paul, „Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review," in *2nd International Conference on Energy and Power*, Sydney, 2018.

[6] S. Mellert, D. Rokita und F. Ueberle, „Schallimmissionsmessungen an Windenergieanlagen mit einer akustischen Kamera zum Aufbau einer Geräuschdatenbank," in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2019*, Berlin, 2019.