

Ist der Blattspitzenlärm von Windturbinen Infraschall?

Frank Kameier

Hochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Fachgebiet Strömungstechnik und Akustik, Münsterstr. 156, 40476 Düsseldorf, Deutschland, Email: frank.kameier@hs-duesseldorf.de

Einleitung

Geräusche von Windenergieanlagen stören Menschen. Aus der Literatur lässt sich zusammenfassen, was Betroffene hören. Vereinfacht lässt sich das störende Geräusch als Wusch-Wusch-Geräusch benennen [1]. Wann diese störenden Geräusche gesundheitsschädlich werden, ist eine Fragestellung für Mediziner und Psychologen. Hineinspielen hinsichtlich gesundheitlicher Beeinträchtigungen auch periodischer Schattenwurf und der Blick auf eine „verspagelte“ Landschaft. Diese Aspekte werden hier nicht weiter betrachtet. Es geht in der vorliegenden Darstellung nur um störende Hörbarkeit und die Möglichkeit, diese Hörbarkeit zu eliminieren.

In Punkto Geräuschqualität wird eine Simulation herangezogen, um deutlich zu machen, dass sich die Energie einer tieffrequenten Modulationsfrequenz über das komplette Frequenzspektrum verteilt und nicht nur als Grundfrequenz erkennbar ist, wie eigentlich erwartet und teilweise auch behauptet wird [2],[3]. Das hat zur Folge, dass eine Interpretation der Blattfolgefrequenz einzig als Infraschall unzulässig ist. Zusammen mit einem Rauschen – vermutlich resultierend von einer Strömungsablösung – treten tonale Frequenzkomponenten im gesamten Spektrum und somit auch im Hörbereich auf.

Simulationsergebnisse

Abb. 1 zeigt den Zeitverlauf gemäß einer Amplitudenmodulation. Multipliziert wurde ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 0,5 Hz als Blattfolgefrequenz (Drehzahl mal Rotorblattanzahl). Entscheidend ist hier der Höreindruck, der exakt einem Wusch-Wusch-Geräusch entspricht [1]. Die Simulation mit DasyLab ist so durchgeführt worden, dass Signalanalyse und wiedergegebenes Geräusch online erfolgen, um Variationen am Signal einfach vornehmen zu können.

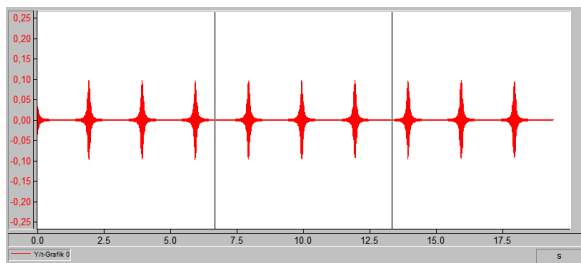


Abbildung 1: Simulierter Zeitverlauf des hörbaren Geräusches einer Windturbine als Produkt eines Rechtecksignals und weißem Rauschen – geglättet mit einem Cauchy-Fenster.

Die Abbildungen 2 bis 4 zeigen hochaufgelöste Frequenzspektren mit einem Δf von 0,13 Hz. In Abb. 1 werden ein unbewertetes und ein A-bewertetes Spektrum gezeigt, Skalierung in dB. Erst mit einem Zoom

erkennt man in den Abbildungen 3 und 4 das Vorhandensein der tonalen Blattfolgefrequenz von 0,5 Hz. Die Energie der Blattfolgefrequenz ist über den Frequenzverlauf verteilt, da eine Modulation mit einem Rauschen zu Summen- und Differenzfrequenzen im gesamten Frequenzbereich führt – beginnend bei der 0 Hz Frequenzlinie.

Verändert man nun den Zeitverlauf in seinem Gleichanteil, wird der tieffrequente Infraschall deutlicher bei den ersten Harmonischen der Blattfolgefrequenz, Abb.5. Es genügt eine sehr kleine Verschiebung der Amplituden des Rechtsignals von weniger als 1% der Amplitude positiv zu negativ.

Abb. 6 und 7 zeigen reale Messungen aus der Literatur. Vom Amplitudenverlauf sind sich Simulation und Messung sehr ähnlich. Abb. 6 zeigt auch eine Verrechnung zu Terzen (rot gestrichelt), die die Tonalitäten in einem Rauschen verschwinden lassen. Nach DIN 45680 soll derart in Terzen verrechnet werden, was ziemlich eindeutig keinen Sinn macht. Die Messdaten in Abb. 7 sind bei sehr kleiner Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s aufgezeichnet worden. Die Messdaten im Freien (grüne Kurve) sind mit den Simulationsdaten zu vergleichen. Ein Hörvergleich für die hohen, hörbaren Frequenzen liegt natürlich nicht vor – wäre aber für einen objektiven Vergleich hilfreich.

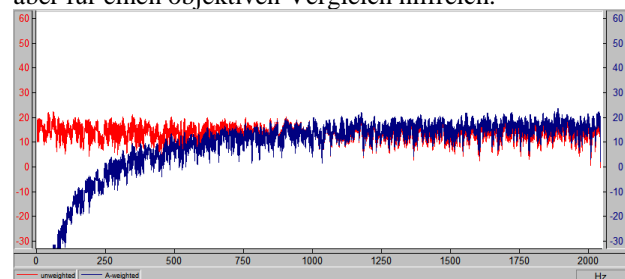


Abbildung 2: Frequenzspektrum zum Zeitverlauf in Abb. 1.

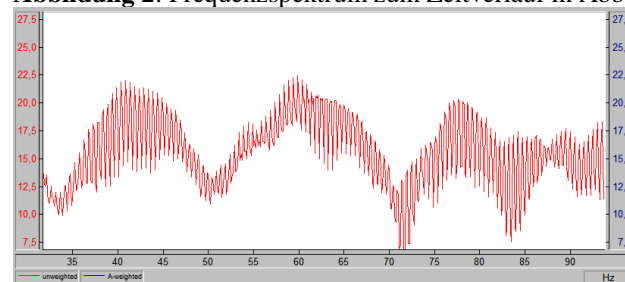


Abbildung 3: Zoom der Abb. 2, willkürlich 35-90 Hz.

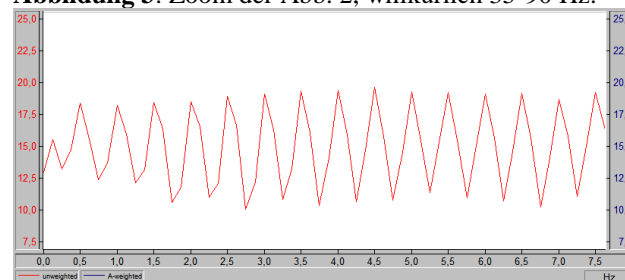


Abbildung 4: Zoom von 0 bis 7,5 Hz der Abb. 2.

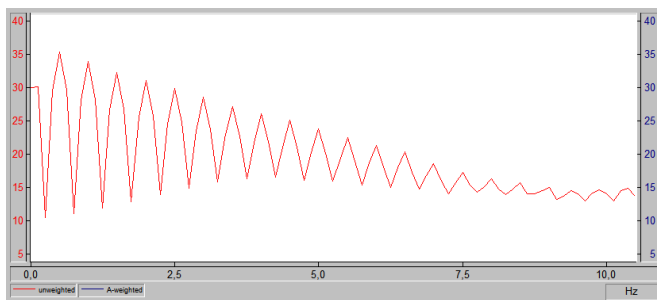


Abbildung 5: Frequenzverlauf mit unsymmetrischem Rechtecksignal, respektive mit einem Gleichanteil.

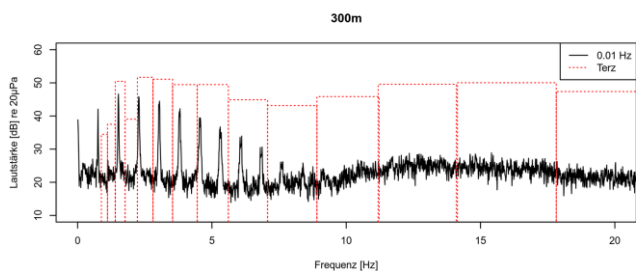


Abbildung 6: Messdaten am Harsdorfer Windrad vom 30.05.2020 00:30-00:40 Schalldruck über Frequenz und als Terzpegel (rot gestrichelt)/4/.

FIGURE 4

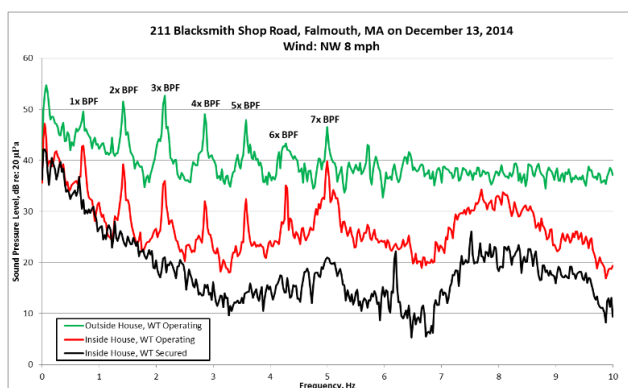


Abbildung 7: Infrasschallmessungen an den Falmouth Wind Turbines, Michael Bahtiarian, 2015 /5/

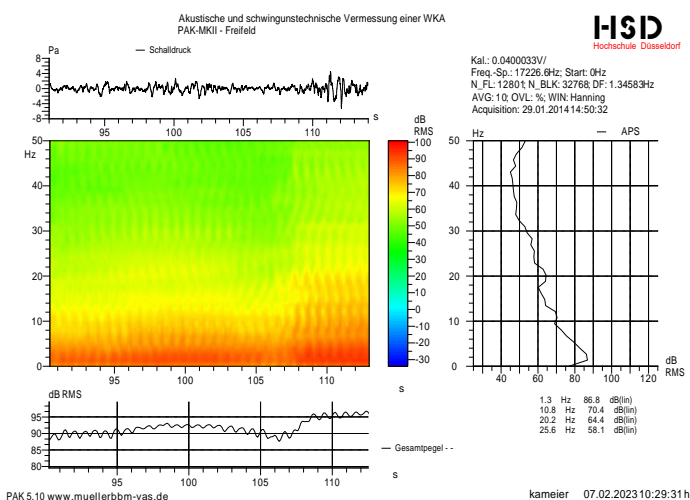


Abbildung 8: Eigene Messungen, Windturbine 2 MW in 100 Meter Entfernung (Wahl et al.(2014)/6/).

Abb. 8 zeigt eigene Messungen aus dem Jahr 2014. Gut zu erkennen ist eine gewisse Welligkeit in dem farbigen Spektrogramm und dem darunter gezeigten

Gesamtpegelverlauf des Schalldrucks. Diese Welligkeit ist typisch für eine Amplitudenmodulation, die man hinsichtlich der Zeit fein genug aufgelöst hat. Zu erkennen ist, dass sich die Welligkeit bis zur gezeigten maximalen Frequenz von 50 Hz hinzieht. Stellt man höhere Frequenzen zeitlich fein genug aufgelöst dar, zieht sich das deutlich über den gesamten Hörbereich hinweg.

Interpretationen

Vergleicht man Quellenlokalisierungen in der Literatur oder dem Internet, so werden Geräuschquellen an Windturbinen der Blattspitze mit den höchsten Geschwindigkeiten im Sinne einer aerodynamischen Betrachtung dargestellt, vgl. Abb. 9. Auch besteht die Hypothese, dass das Vorbestreichen des Schaufelblatts am Mast ein massiver Geräuschenstehungsmechanismus ist. Aerodynamische Geräuschenstehungsmechanismen am Schaufelblatt stehen wohl relativ sicher in Zusammenhang mit einer Strömungsablösung. Diese ist im Allgemeinen auch breitbandig und kann als weißes Rauschen – wie in der hier durchgeführten Simulation – verstanden werden. Eine weitere Überlegung führt zum Blattspitzenwirbel, der sich durch die Druckausgleichsströmung am Tragflügelprofil aufrollt. Allerdings kann man nicht davon ausgehen, dass dieser Mechanismus ein weißes Rauschen als Geräusch generiert. Dennoch ist für die Lehrveranstaltung Grundlagen der Strömungstechnik an der Hochschule Düsseldorf die Hypothese des Blattspitzenwirbels verfolgt worden, um die Visualisierung von Wirbeln und die Manipulation oder Verkleinerung von Wirbeln anzugehen und zu unterrichten. Hinsichtlich des Forschungsaspektes wäre es notwendig, die Strömungsablösung an realen Windturbinen zu untersuchen, was nur mit Unterstützung von Herstellern möglich erscheint. Hersteller wurden kontaktiert. Offensichtlich besteht hinsichtlich dieser Geräuschaspekte aber derzeit kein Handlungsbedarf.

Der Gedanke des Blattspitzenwirbels wurde inspiriert durch die Sichtbarmachung von Gleitschirmfliegern, die das Gefahrenpotential für ihresgleichen untersucht haben, vgl. Abb. 10 /7/.



Abbildung 9: Quellenlokalisierung mit einem Mikrofonarray (Akustische Kamera) – Quellen an der Blattspitze. <https://www.gfaitech.com/applications/wind-turbine>



FOTO: TOM MENZEL



Die Rauchkörper wurden mit einer 10 m langen Leine an einem Multicopter befestigt und im Lee der Windkraftanlage platziert.



Testpilot Simon Winkler im Lee der Anlage bei Böisingen

FOTO: BERTHA MENSING

Abbildung 10: Blattspitzenwirbel einer Windturbine // <https://www.dhv.de/medien/dhv-info/dhv-info-2016/dhv-info-199/>

Abb. 11 zeigt den Blattspitzenwirbel, der an einem nicht rotierenden Schaufelblatt numerisch berechnet wurde. Studierende hatten die Aufgabe, diesen Wirbel nun zu reduzieren, respektive zu verkleinern, was mit einem Winglet beeindruckend gut gelungen ist.

Zusammenfassung

Ansatzpunkt war die Untersuchung des hörbaren Geräuschs von Windturbinen, das auch als Wusch-Wusch-Geräusch bezeichnet wird. Simulationsergebnisse zeigen, dass das hörbare Geräusch aus über den gesamten Frequenzbereich verteilten Tonalitäten mit einer Frequenzdifferenz der Blattfolgefrequenz besteht. So gesehen werden von dem Wusch-Wusch-Geräusch auch nicht hörbare Infraschallkomponenten generiert. Es handelt sich um Töne, die einem

Rauschen überlagert sind. Mit der Blattfolgefrequenz werden durch die Rotation der Rotorschaukeln Druckschwankung als Doppler-Frequenzen generiert.

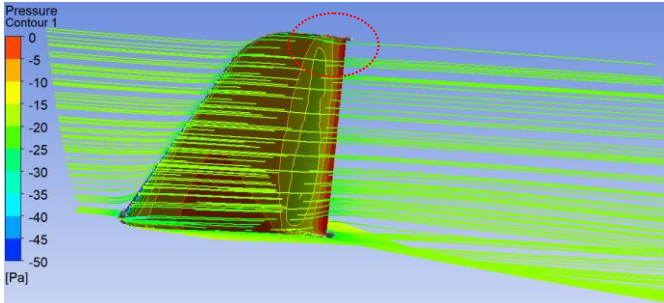
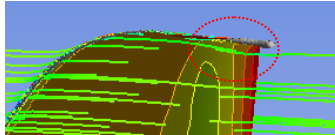
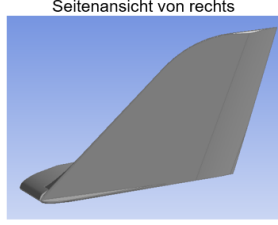
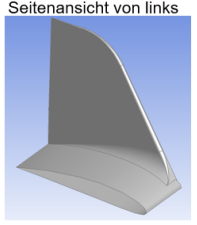
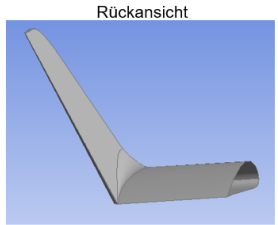
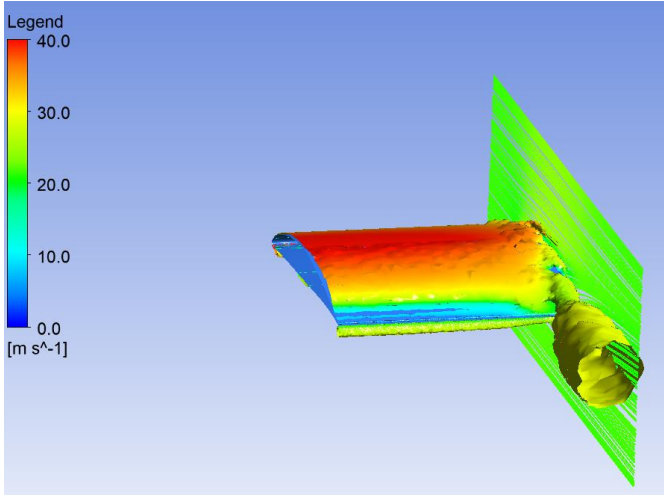


Abbildung 11: Numerische Simulation mit der ANSYS Studentenversion, CFX-Löser. Von oben nach unten: Blattspitzenwirbel dargestellt mittels Q-Kriterium, Design eines Winglets und Simulation mit reduzierter Größe des Blattspitzenwirbels, Niklas Uebbing, Student im 3. Semester.

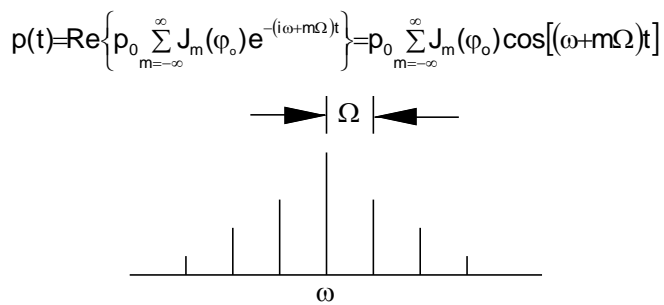


Abbildung 12: Räumliche Fourier-Zerlegung mit Besselkoeffizienten J_m für die Amplituden und dem zugehörigen Frequenzspektrum mit Summen- und Differenzfrequenzen im Abstand der Rotordrehzahl, vgl. /8/.

Diese Doppler-Frequenzen treten als Summen- und Differenzfrequenzen auf. Mit einer räumlichen Fourier-Zerlegung kann man das auch analytisch nachweisen, vgl. Abb.12.

Formal handelt es sich also um ein Modulationsphänomen. Bei einer Amplitudenmodulation tritt die Modulationsfrequenz genauso wie hier simuliert als Summen- und Differenzfrequenz zum Grundton auf. Der „Grundton“ im vorliegenden Fall ist weißes Rauschen – hier also breitbandig und nicht ein Ton. Die Summen- und Differenzfrequenzen starten bei 0 Hz. Ursächlich für das Rauschen sind aerodynamische Entstehungsmechanismen, wahrscheinlich eine breitbandige Strömungsablösung auf der Saugseite des Profils.

Die Hypothese, dass der Blattspitzenwirbel für das Geräusch verantwortlich ist, ist sehr unwahrscheinlich, da ein solcher Wirbel eher höherfrequente Zischlaute generiert. Sehr wahrscheinlich handelt es sich eher um eine Strömungsablösung an den Saugseiten der Rotorprofile. Fehlanströmung im Sinne einer Strömungsmaschinentheorie ist bei großen Windturbinen durch das natürlich vorhandene Windprofil nahezu unumgänglich. Die Rotorblätter müssten sich zur Minderung der Ablösung über eine Umdrehung geometrisch von ihrer Profilform verändern, um sich den ändernden Anströmbedingungen anzupassen. Eine Pitch-Verstellung um die Achse der Rotorblätter ist nur für die globale Leistungsregelung förderlich. Strömungsablösung wird bereits mit Turbulatoren oder Turbulenzerzeugern erfolgreich beeinflusst. Auch sogenannte Riblets, die Haifischhäuten nachempfunden sind, oder Vorderkantentuberkel, die Walflossen nachempfunden sind, wären denkbar. Jedoch spricht bei diesen Maßnahmen dagegen, dass sie starr über eine Umdrehung sind. Vermutlich muss die Strömungsablösung aber unterschiedlich für ein Rotorblatt in der Position „oben“ und „unten“ beeinflusst werden, sodass eine adaptive Geometrie notwendig wird – ähnlich den komplexen Klappensystemen bei Flugzeugtragflügeln, die sich stark geometrisch für die verschiedenen Flugphasen mit unterschiedlicher aerodynamischer Belastung verändern.

Die hörbaren Geräusche von Windturbinen stehen nicht mehr im Focus der Forschung oder der Hersteller, da gesetzliche Vorgaben durchweg eingehalten werden. Leise

Geräusche können durch Periodizität oder kontinuierliche Schwankung der Pegel stören und somit zu psychischen Belastungen führen. Terzspektren eignen sich für tiefe Frequenzen nicht, da Tonalitäten in einem Rauschen verdeckt werden.

Literatur

- /1/ Inge Rowehl, Belastendes Wusch-Wusch-Geräusch, Betrifft: Unser Artikel „Seit einem Jahr keine Ruhe mehr“ vom 26. Februar 2019 über den Windpark Kammersand.
https://www.nwzonline.de/ammerland/belastendes-wusch-wusch-geraesch_a_50.4827011748.html#
- /2/ Till Kühner, Amplitudenmodulierte Geräusche von Windenergieanlagen, DAGA 2018, München
https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2018/data/articles/000251.pdf
- /3/ Christoph Pörschmann, Stephan Großarth, Johannes M. Arend, Klaus Wunder, Amplitude modulations increase annoyance due to wind turbine noise immission, August 2021, Internoise 2021, Washington DC
https://www.researchgate.net/publication/353659000_Amplitude_modulations_increase_annoyance_due_to_wind_turbine_noise_immission
- /4/ Stefan Holzheu, Infraschall - Messung und Auswertung,
https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/inferschall/de/windenergi/gru/html.php?id_o_bj=157572
- /5/ Michael Bahtiaran, Infrasound Measurements of Falmouth Wind Turbines Wind, February 27, 2015
<https://www.edockets.state.mn.us/EFiling/edockets/searchDocuments.do?method=showPoup&documentId=%7B30F8E75E-0000-CD1E-88E8-0966487DEEBF%7D&documentTitle=201710-136092-01>
- /6/ Tim Wahl, Till Biedermann, Christian Epe, Robert Heinze, Frank Kameier: Ist Lärmschutz bei Windenergieanlagen notwendig? DAGA, Oldenburg, 2014.
- /7/ <https://www.dhv.de/medien/dhv-info/dhv-info-2016/dhv-info-199/>
- /8/ Frank Kameier, Experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Minderung des Blattspitzen-Wirbellärms axialer Strömungsmaschinen, Dissertation an der TU Berlin 1994. http://stroemungsakustik.de/old.mv.fh-duesseldorf.de/d_pers/Kameier_Frank/c_veroeffentlichungen/Dissertation_kameier220405d.pdf