

# Zur Detektierbarkeit der Geräusche einer Windenergieanlage unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen

Arthur Schady, Katharina Elsen

DLR, Institut für Physik der Atmosphäre, 82234 Wessling, E-Mail: arthur.schady@dlr.de

## Einleitung

Langzeitmessungen zur Überwachung der Lärmimmission von Windenergieanlagen (WEA) sind schwierig, da der lokale Geräuschpegel von einer Vielzahl von Einflüssen bestimmt wird [1]. Zum einen ist das der sehr variable Emissionspegel, abhängig von den Anströmbedingungen und von der Drehzahl der Anlage. Zum anderen ist eine konkrete Zuordnung der Geräusche zu der Quelle nicht immer eindeutig, weil der Immissionspegel, oft auf dem Niveau der Fremdgeräusche ist. Zur Verbesserung des Verständnisses der Schallübertragung unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen ist eine solche Zuordnung der Quellgeräusche jedoch essentiell. Ziel dieses Beitrages ist es darzustellen, mit welchen Mitteln genügend hoch aufgelöste (zeitlich und spektral) Langzeitmessdaten ausgewertet werden können, um Informationen zu Schallemission, Drehzahl, Hintergrundgeräuschen, Amplitudenmodulation und der lokalen Lärmbelastung durch eine WEA zu erlangen. Durch die Langzeitmessungen werden verschiedene meteorologische Bedingungen gegenübergestellt und die Einflüsse des Wetters auf die Detektierbarkeit der WEA-Geräusche dargestellt. Diese Untersuchungen ermöglichen Aussagen über die nötigen Analysezeiträume, zur Berücksichtigung meteorologischer Informationen und zu neuen Metriken in der Lärmüberwachung.

## Erhebung der Messdaten

Im Zeichen des immer stärker werdenden Interesses der Bevölkerung und der Regulierungsbehörden an einer umweltverträglichen Nutzung der Windenergie kommt auch der Schallausbreitung und somit den systematischen Schallimmissionsmessungen rund um die WEA große Bedeutung zu. Zur Erforschung der Strömungsregime und der Windverhältnisse in der atmosphärischen Grenzschicht über komplexem Gelände wurde in Perdigão (Portugal) im Rahmen des europäischen New European Wind Atlas (NEWA) Projekts 2017 eine große Messkampagne mit europäischer und US-amerikanischer Beteiligung durchgeführt (Fernando et.al 2018). Das Gelände bei Perdigão ist durch zwei parallele, 4500 m lange, etwa gleich hohe und 1400 m auseinander liegende Bergkämme gekennzeichnet. Die Bergkämme werden typischerweise senkrecht von Südwesten oder Nordosten angeströmt. Auf dem südwestlichen Bergkamm steht eine WEA, deren Schallimmission an mehreren Orten aufgezeichnet wurde. Durch das Gelände beeinflusst treten diverse interessante Strömungsphänomene auf, die möglicherweise entscheidenden Einfluss auf die Schallübertragung haben.

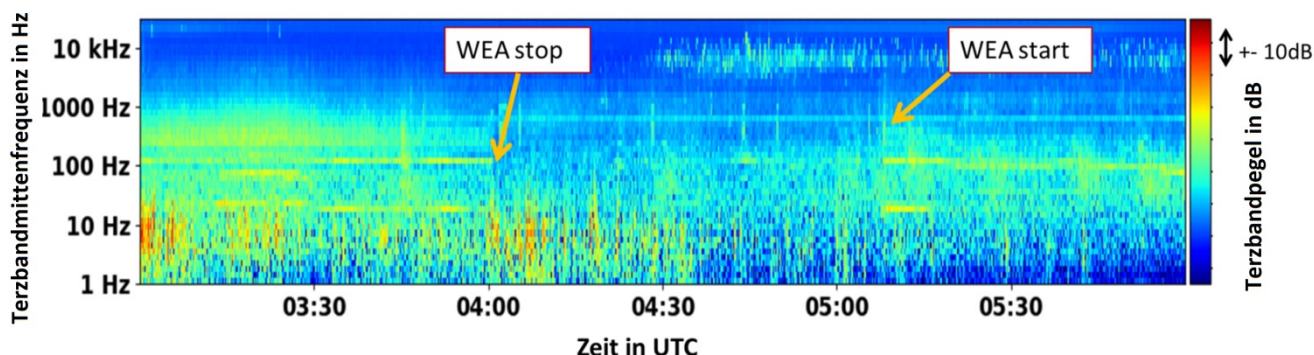
Mit den in Perdigão durchgeführten akustischen Messungen soll den Fragen nachgegangen werden, ob die Geräusche der WEA in der Umgebung messtechnisch nachweisbar sind und wie stark sie von der atmosphärischen Schichtung und den Windverhältnissen abhängen.

Die Grundlage für die Analyse der hier präsentierten Ergebnisse sind Daten von drei Schall Monitoring Stationen (vom Typ SV979), die in unterschiedlichem Abstand von der WEA in komplexem Gelände aufgestellt waren. Die Daten wurden jeweils in Stunden-Blöcken mit einer sampling rate von 10 Hz über einen Zeitraum von 40 Tagen gespeichert. In den ca. 3000 Datensätzen sind hoch aufgelöste Zeitreihen von 44 Terzbändern von 0.8 bis 16 kHz enthalten. Analysiert wurden davon 12 Terzbänder mit einer Mittenfrequenz von 40 bis 500 Hz. Damit wurden insgesamt ca. 34.000 Zeitreihen analysiert.

## Methodik

Die große Menge an Daten kann systematisch nur mit geeigneten Prozeduren analysiert werden. Die einfachste Methode ist die zeitliche Mittelung in geeigneten Abschnitten, wobei dann jeder Mittelungszeitraum verschiedene Situationen von der Schallentstehung bis zur Immission enthalten kann. Dadurch werden wichtige Informationen wie Fremdgeräusche oder spezielle Bedingungen für die Schallentstehung und die Ausbreitung verwischt. Dasselbe geschieht bei einer Breitbandmittelung mit gewichteten oder ungewichteten Schalldruckpegeln wie z.B.: LAeq oder LZeq oder über Perzentilbildung, die in Zeitabschnitten oder Frequenzbereichen durchgeführt werden kann.

Die von uns angewandte Methode bestimmt das Spektrum des Signals aus einzelnen Zeitreihen der Terzbänder mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT). Dabei werden nur kurzen Zeitfenster aus 2048 Datenpunkten analysiert, die ca. 3.4 Minuten entsprechen. Diese Zeitfenster wandern gleitend in 1-Minuten Abständen über den Datensatz einer Stunde und liefern somit 58 Spektren. Im besten Fall ergibt sich ein scharfer Peak an der Frequenz, der der dreifachen Umdrehungsfrequenz der WEA entspricht. Das würde dann daraufhin deuten, dass das aufgezeichnete Signal der WEA zugeordnet werden kann. Die Größe der Zeitfenster muss groß genug gewählt werden, um eine ausreichend hohe spektrale Auflösung der FFT zu erhalten, Andererseits muss das Zeitfenster klein bleiben, damit das Ergebnis repräsentativ für einen Zeitbereich bleibt und weil die Analyseverfahren sehr sensitiv auf Störungen in der Zeitreihe reagiert. Zu lange Zeitreihen mit Störungen und variabler Rotationsgeschwindigkeit der WEA würden kein klares Spektrum mehr ergeben und somit keine Zuordnung zu der Schallemission der WEA erlauben.



**Abbildung 1:** Darstellung des Spektrogramms der Station SV-174 vom 22.05.2017 im Zeitraum zwischen 3:00-6:00 UTC. Die Farbskala zeigt den Schalldruckpegel der einzelnen Terzbänder.

Durch diese automatische Analyse aller Datensätze, kann also teilweise auf die Umdrehungszahl der WEA geschlossen werden. Jedoch müssen schließlich auch hier die Ergebnisse wieder zusammengefasst werden.

Aus den erhaltenen 58 Spektren pro Stunde wurden die Frequenzen der Peaks ausgelesen und der Frequenz-Mittelwert für diese Stunde berechnet. Wenn sich dabei eine Umdrehungsfrequenz ergibt, die zwischen 10 und 18 U/min liegt, wird diese Analyse als plausibel gewertet. Die automatische Peak-detektion des resultierenden FFT-Spektrums der Terzbandzeitreihe kann hierbei besonders schwierig und fehleranfällig sein. Ein Abgleich mit bekannten Drehzahlen der WEA ist dabei sehr hilfreich.

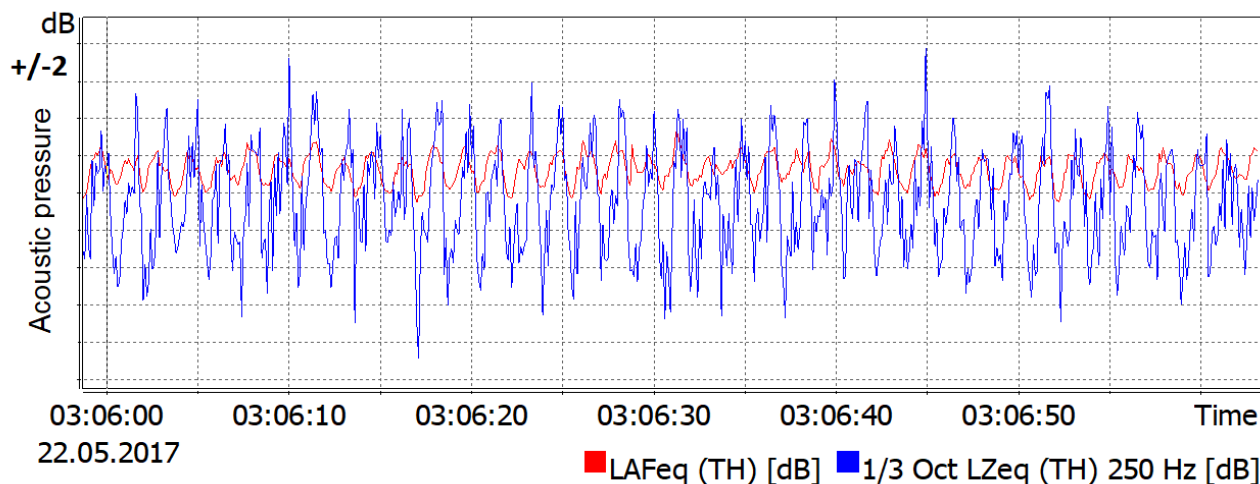
### Das Spektrogramm der Messung

Eine einfache Möglichkeit einen visuellen Eindruck von der Messung zu bekommen, ist die Darstellung in Form eines Spektrogramms. Darin sind alle aufgezeichneten Terzbänder und ihre Intensität dargestellt (siehe Abb. 1). Somit erkennt man auf einen Blick zu welcher Zeit bestimmte Frequenzen in einem Tonspektrum vorhanden sind und wann nicht.

Das in Abbildung 1 dargestellte Spektrogramm über einen Zeitraum von 3 Stunden enthält eine Stunde (von 4:00-5:00

UTC) in der die WEA ausgeschaltet wurde. Die Unterbrechung der Signale ist in einigen Terzbändern ( $> 40$  Hz und  $< 1000$  Hz) deutlich zu erkennen. Es gibt allerdings auch Terzbänder, die bei abgeschalteter WEA bestehen bleiben. Im tieffrequenten Bereich lassen sich hier keine Aussagen treffen. In dem hochfrequenten Bereich  $> 5000$  Hz ist ab 4:30 UTC das Einsetzen von Vogelgezwitscher sichtbar.

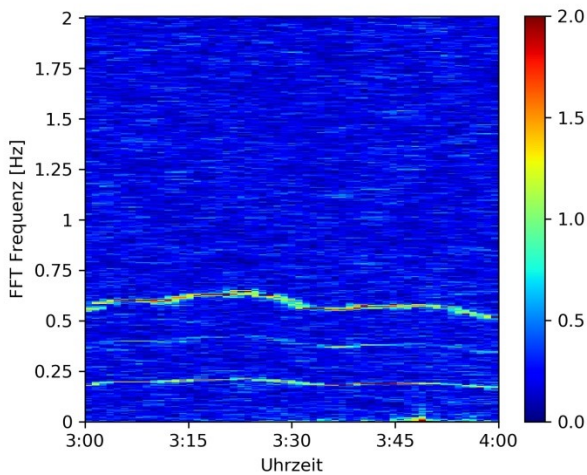
Diese Darstellungsform zeigt die spektralen Anteile der Geräusche und ist daher geeignet um einen Eindruck über eine Plausibilität der Aufzeichnung zu erhalten. Die zeitliche Auflösung um einzelne Geräuschsituationen zu erkennen, reicht hier jedoch nicht. Dazu müssten einzelne Terzbänder hochaufgelöst dargestellt werden (Abbildung 2). Darin erkennt man dann die periodische Variation, die sehr wahrscheinlich das gesuchte Signal der WEA ohne Störgeräusche darstellt. Eine solche Darstellung der gesamten Messung ist nicht praktikabel. Um dieses periodischen Signale in Zeitreihen aufzuspüren kann eine Fourier Transformation von sinnvoll kleinen Zeitfenstern gemacht werden.



**Abbildung 2:** Schalldruckpegelverlauf des 250 Hz Terzbandes (schwarz) und des LAeq (rot) am 22.05.2017 um 03:06 UTC für die Dauer einer Minute mit 36 periodischen Signalen, was einer Frequenz von 0.6 Hz, und einer Umdrehungszahl von 12 U/min entspricht.

## Fourier Transformation

Mithilfe einer FFT von kleinen Zeitfenstern innerhalb von einzelnen Terzbändern kann man die gesamte Messung auf Signale hin abtasten, die wahrscheinlich von der WEA kommen. Die zeitlich sehr hoch aufgelösten akustischen Spektren zeigen dann teilweise ein periodisches Signal von 0.4 – 0.9 Hz innerhalb der Terzbänder zwischen 40 Hz und 315 Hz. Dies ist das Phänomen der Amplitudenmodulation, wobei der hochfrequente abgetastete Ton die Trägerwelle darstellt und die in der FFT gefundene niederfrequente Pegelschwankung das Signal der WEA ist. In Abbildung 3 ist das Ergebnis einer FFT des 125 Hz Terzbandes der Station SV-174 dargestellt. Darin werden der Verlauf des detektierten Signals innerhalb einer Stunde am 22.05.2017 von 3:00 bis 4:00 Uhr UTC sowie zwei Untertöne sichtbar, die bei ganzzahligen Brüchen des Grundtons erkennbar sind.

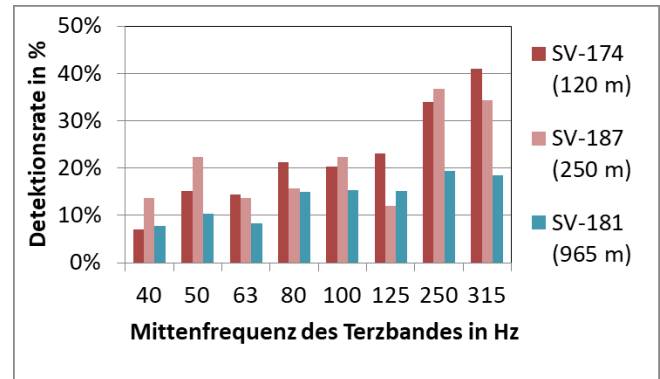


**Abbildung 3:** Ergebnis der FFT des 125 Hz Terzbandes der Station SV-174 am 22.05.2017 3:00-4:00 UTC. Das Umdrehungssignal der WEA bei ca. 0.60 Hz (entspricht 12 U/min)) mit einer zeitlicher Variation und zwei Untertöne sind zu erkennen.

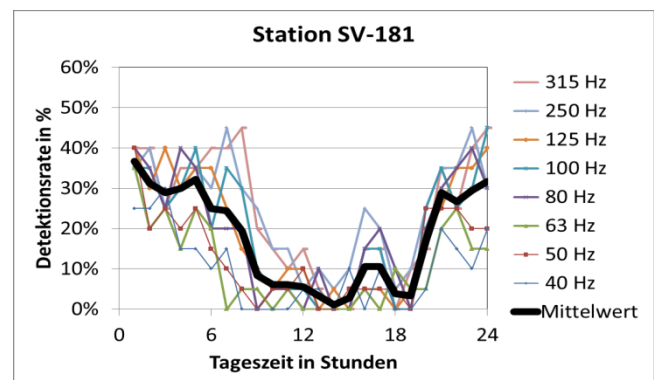
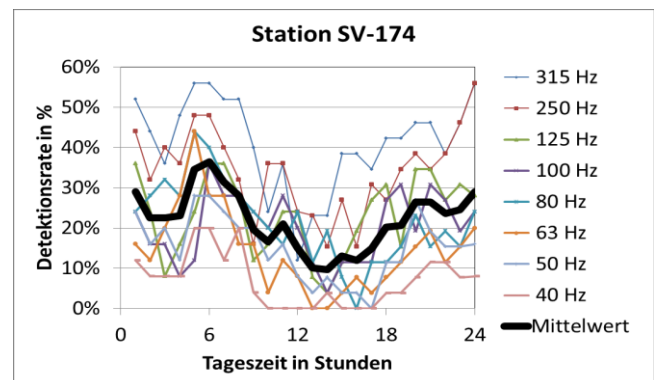
## Ergebnisse

Aus etwa 10000 Datensätzen je Mikrofon lassen sich verschiedene Statistiken berechnen. Abbildung 4 zeigt die Zusammenfassung der vorher beschriebenen Analysen und deren Signale der WEA für die drei Mikrofone. Man erkennt, dass die Mikrofone mit geringerem Abstand zur WEA eine höhere Detektionsrate für diese periodischen Signale haben, als das Mikrofon (SV-181), das in 965m Entfernung positioniert ist. Ferner ist mit steigender Frequenz der Terzbänder die Detektionsrate besser. Die Abhängigkeit der Detektionsrate von Störgeräuschen aber auch von den Ausbreitungsbedingungen, also der Meteorologie zeigt dann eine Zusammenfassung aller FFT Ergebnisse gemittelt über einen Tagesgang in Abbildung 5. Hier gehen wir davon aus, dass innerhalb eines Tages die meteorologischen Bedingungen hinreichend stark variieren, im Mittel jedoch vergleichbar sind und sich im Tagesgang entsprechend wiederholen. Die Detektionsrate variiert im Tagesverlauf deutlich über alle Terzbänder hinweg. In der Summe ergibt sich ein Tagesgang, der ein Minimum um die Mittagszeit besitzt. In dieser Zeit sind die Schallausbreitungsbedingungen aus meteorologischer Sicht

erschwert (labile Schichtung, turbulente Strömung und höhere bodennahe Windgeschwindigkeit). Hinzu kommen vermehrte Störgeräusche durch tierische und menschliche Aktivitäten.



**Abbildung 4:** Häufigkeit der Detektierbarkeit innerhalb von einzelnen Terzbändern an unterschiedlichen Mikrofonen



**Abbildung 5:** Häufigkeit der Detektierbarkeit im mittleren Tagesgang über alle Terzbänder zwischen 40 und 315 Hz an der Station 174 in 120m Abstand von der WEA (oben) und der Station 181 in 965 m Abstand (unten).

## Zusammenfassung

Akustische Langzeitmessungen im Umfeld einer WEA zeigen den typischen Tagesgang des hörbaren Schalls auch in entfernteren Positionen zur WEA. Dieser ist geprägt von Umgebungsgeräuschen wie Vogelgezwitscher, Hundegebell und Blätterrauschen und dem in Bodennähe aufkommenden Wind. Das Schallsignal der WEA ist im Ein-Minuten-Ausschnitt innerhalb von einigen Terzbändern erkennbar. Dort sind periodische Signale sichtbar, woraus sich das

Signal des 3-Blatt-Rotors mit seiner Umdrehungsfrequenz mittels einer FFT bestimmen lässt. Die Abhängigkeit vom Wetter, wie atmosphärischer Schichtung, und Windgeschwindigkeit wird durch eine Zusammenfassung der FFT-Ergebnisse in Tagesgänge gezeigt. Die Detektionsrate, welche je nach Mikrofon bis zu 55% reichen kann, wurde sehr konservativ bestimmt, denn Stillstandzeiten der WEA oder Zeiten mit niedrigerer Umdrehungszahl als 10 U/min wurden in der Auswertung als nicht detektierbar gewertet. In diesen Fällen kann das FFT Ergebnis natürlich auch keine eindeutigen Signale im Spektrum aufzeigen.

Ebenso darf nicht vergessen werden, dass die Messung auch von der meteorologischen Besonderheit des Standorts beeinflusst ist. Innerhalb der 40 Messtage kam es unerwartet häufig zu NO Windrichtungen. In der Nachtzeit lag die Messstation 181 im Tal oft im Vorlauf der WEA, wohingegen sie sich tagsüber im Nachlauf der WEA befand.

Eine spezielle Filterung der Daten könnte die Auswertung dieser Ergebnisse noch deutlich verbessern. Die große Menge an Datensätzen muss dabei so reduziert werden, dass nur relevante Fälle für eine Fragestellung in der Analyse oder in die Auswertung mit aufgenommen werden.

## Danksagung

Die Auswertungen für dieses Projekt werden unterstützt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Projektes Schall\_KoGe mit dem Förderkennzeichen: 0324337B. Ferner danken wir den Projektpartnern von der WRD GmbH für Informationen zum Betrieb der WEA.

## Literatur

- [1] Ljunggren, Sten (1999). A new IEA document for the measurement of noise immission from wind turbines at receptor locations (STEM-VIND--99-1). Thor, S.E. (Ed.). Sweden
- [2] Fernando H.F. et al. (2018): "The Perdigão: Peering into Microscale Details of Mountain Winds" submitted to Bulletin of the American Meteorological Society