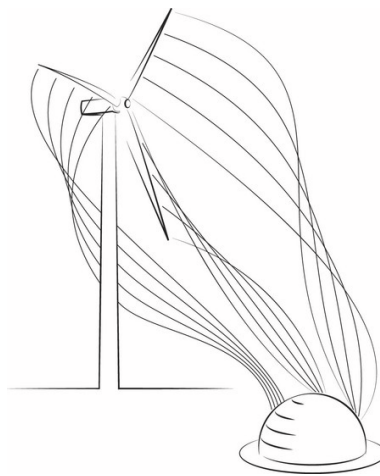


Wölfel Engineering GmbH + Co. KG

Noisy.Blade

Nutzung akustischer Signaturen der Rotorblätter von
Windenergieanlagen zwecks Zustands- und Lärmüberwachung



Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 37760/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Andreas Nuber

Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	2
2	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	3
3	Zusammenfassung	4
4	Einleitung.....	5
5	Hauptteil.....	7
5.1	Entwicklung und Aufbau des Messsystems	7
5.2	Datenanalyse und Entwicklung Statusindikator für Rotorblattschäden.....	9
5.3	Schallemissionsmessung.....	15
6	Fazit	16
7	Literaturverzeichnis.....	17

1 Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: Darstellung einer Auswahl potenziell akustisch wirksamer Schäden an Rotorblättern von Windenergieanlagen.....	6
Abbildung 2: Installation des Noisy.Blade-Systems an einer WEA. Das Mikrophon mit Windschutz (links) wurde am Vordach des Lüftungsauges außen am Turm festgeklemmt. Die Messtechnik (schwarzer Kasten rechts) ist im Turm in der Nähe des Lüftungsauges auf einem Schaltschrank platziert.....	7
Abbildung 3: Die im Projekt genutzte Messtechnik besteht aus einem Smartphone mit Datenerfassungssoftware, welches mit dem außen am Turm befestigten Mikrophon verbunden ist. Zum Schutz gegen Umwelteinflüsse ist das Smartphone in einem Schutzkoffer untergebracht.	8
Abbildung 4: Installationsort des Mikrofons bzw. der Noisy.Blade Messtechnik in Relation zur Gesamtanlage.....	8
Abbildung 5: Spektrogramm einer Messung mit Noisy.Blade an einer WEA. Die spektrale Intensität in dB ist farbcodiert als Funktion der Zeit dargestellt.	10
Abbildung 6: Identifikation der Blattdurchgänge mittels Peak-Finding. Die weiße Linie zeigt den Summenpegel im Bereich 2 kHz – 8 kHz. Die weißen Punkte markieren die durch den Peak-Finding-Algorithmus detektierten Zeitpunkte der Blattdurchgänge.....	10
Abbildung 7: Extraktion der Events als Basis für die Bildung des Indikators. Die grünen Rechtecke markieren die Zeitbereiche drei aufeinander folgender Blattdurchgänge.	11
Abbildung 8: Bildliche Darstellung des Vergleichs der akustischen Spektren von drei aufeinander folgenden Blattdurchgängen.....	11
Abbildung 9: Indikatorverteilung über die Zeit. Oben: Eine Normalverteilung des Indikators zeigt keinen Schaden. Unten: Eine Aufspreizung des Indikators deutet auf einen Schaden hin.	12
Abbildung 10: Mit Noisy.Blade detektierter Schaden an einem Rotorblatt (Folienablösung).....	13
Abbildung 11: Ergebnisse der Messreihen auf Türhöhe am Turm einer WEA während der Entstehung eines Schadens.	14
Abbildung 12: Akustische Rotorblattüberwachung einer Windenergieanlage.....	14
Abbildung 13: Vergleich des Summenpegels dB(A) im Frequenzbereich 2 kHz – 8 kHz zwischen IEC-Messung und Noisy.Blade Aufnahme.	15

2 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

WEA	Windenergieanlage
MicW i436	Mini Mess-Mikrofon für Smartphones der Klasse 2 nach IEC 61672
Noisy.Blade	Dieses Forschungsprojekt
.wav	Containerformat zur digitalen Speicherung von Audiodateien
Power Station NPS400	Autarke Stromversorgungseinheit der Firma Nitecore
FFT	Fast Fourier Transformation
dB	Decibel: Einheit zur Messung von Schallintensität und anderen physikalischen Größen
dB(A)	Bewerteter Schalldruckpegel als Größe, die der auditiven Wahrnehmung des Menschen angenähert ist.
V	Volt, SI-Einheit der elektrisch Spannung
Hz	Hertz, SI-Einheit der Frequenz, Schwingungen pro Sekunde
kHz	1000 Hz

3 Zusammenfassung

Windenergie hat unter den erneuerbaren Energiequellen in Deutschland den größten Anteil an der Stromproduktion. Dabei sind Windenergieanlagen (WEA) enormen mechanischen Kräften und meteorologischen Einflüssen ausgesetzt, die sich fortlaufend in Abnutzungserscheinungen bemerkbar machen. Aufgrund der zu erwartenden Degradationen und Schäden unterliegen die Anlagen einer regelmäßigen wiederkehrenden Prüfung. Diese beinhaltet unter anderem Rotorblattinspektion, Blitzschutzprüfung, Schallemissionsmessung und Blattwinkelprüfung. Die Prüfung bedingt stets Kosten – in Form von Personalkosten – sowie dem Energieausfall, der sich durch das außer Betrieb setzen für die Prüfung ergibt. Weitere zu überwachende Größen im Betrieb sind Eisansatz zur Vermeidung von Eisabwurf an den Rotorblättern sowie die akustische Auswirkung auf die Umgebung um Schallemissionsgrenzwerte einzuhalten und die Akzeptanz bei der Bevölkerung sicherzustellen.

Das Projekt Noisy.Blade adressiert die genannten Problemstellungen mit dem Ansatz einer kostengünstigen akustischen Überwachung des Anlagengeräuschs. Damit können gleichzeitig die akustischen Auswirkungen auf die Umgebung überwacht sowie Schäden am Rotorblatt durch eine Detektion von Änderungen des Strömungsgeräuschs erkannt werden.

Für die Umsetzung wurden im ersten Schritt Monitoring-Einheiten mit Mikrofon, Komponenten zur Datenerfassung- und Speicherung sowie Schutzgehäuse konstruiert und gebaut. Diese wurden anschließend zur Langzeit-Datenerfassung an produzierenden WEA der assoziierten Partner installiert. Zusätzlich zu den Dauermessungen wurden Richtlinien-konforme und erweiterte Emissions- und Immissionsmessungen durchgeführt, um als Benchmark für die Messungen mit dem im Projekt entwickelten Noisy.Blade-System zu dienen. Die gespeicherten akustischen Daten wurden zusammen mit weiteren Daten wie Betriebsparameter der Anlage und Umweltparameter für die weitere Analyse aufbereitet und annotiert. Zur Erkennung der Geräuschänderung und deren Klassifikation bezüglich Schäden oder allgemein Änderungen an der Blatthülle wurden auf die vorverarbeiteten Daten verschiedene Methoden der Signalanalyse getestet und darauf basierend ein Statusindikator entwickelt. Im Projektzeitraum trat an einer WEA tatsächlich ein Blattschaden auf, welcher mit dem entwickelten Statusindikator erkannt wurde. Neben der Schadenserkenung wurde mit dem Noisy.Blade-System auch getestet, ob die gesamte Geräuschemission der Anlage qualitativ und quantitativ erfasst werden kann. Mit unabhängigen standardisierten Messungen wurden die Ergebnisse schließlich validiert und bewertet.

Basierend auf diesem erfolgreichen Proof-of-Concept der Methode sind nun weitere Messkampagnen an unterschiedlichen Anlagen mit unterschiedlichen Fehlern und akustischen Charakteristiken notwendig um den Statusindikator für möglichst viele Fehler- und Anlagentypen zu optimieren.

Das Projekt wurde von Wölfel Engineering GmbH + Co. KG bearbeitet mit freundlicher Unterstützung der assoziierten Partner Bürger-Energie Altertheim eG, Energiedienstleistungen Bals GmbH und MVV Windenergie GmbH. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt förderte diesen Vorhaben unter dem Aktenzeichen Az 37760/01.

4 Einleitung

Während die Windenergie in den Ausbauplänen in Deutschland weiterhin eine wichtige Rolle spielt, wird es immer schwieriger neue Flächen für die Windenergienutzung zu erschließen. Die Optimierung bestehender WEA ist daher eine gute Möglichkeit, den Beitrag der Windenergie zum Gesamtenergiebedarf zu steigern. Mit dem Ausbau der Windenergie an Land in einem dicht besiedelten Land wie Deutschland gehen darüber hinaus gesellschaftliche Akzeptanzschwierigkeiten einher. Speziell die von den WEA ausgehende Schallemission ist eine verbreitete Sorge von Bürgerinitiativen gegen Windparks. An diesen kritischen Punkten – Effizienz- und Ertragssteigerung sowie Akzeptanzproblematik – setzt dieses Projekt an.

Der konkrete Beitrag zur Umweltentlastung durch das Projekt ist damit mehrschichtig.

Ein wichtiger Aspekt unterstützt bzw. stärkt die Leistungsausbeute erneuerbarer Energien in Form von Windenergie durch:

1. Reduktion der Ausfallzeiten von WEA und hierdurch Effizienzsteigerung
2. Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und Kostensenkung durch frühe Schadenserkenkung in Verbindung mit zustandsorientierter Instandhaltung
3. Frühes Erkennen von Blattwinkelfehlstellungen und hierdurch zeitnahes Gegensteuern (Ertragssteigerung).

Ein weiterer Aspekt betrifft die Schallabstrahlung von WEA.

Dauerhaftes Schall-Monitoring könnte langfristig eine Abkehr der Worst-Case-Annahmen im Schallimmissionsschutz ermöglichen, was wiederum einen deutlich effektiveren Betrieb der Anlagen ermöglichen würde und bisher ungenutzte Flächen für WEAs rentabel machen könnte. Zusätzlich erhöhen leisere Anlagen die Akzeptanz von Onshore WEAs in der Bevölkerung, insbesondere bei zunehmender Annäherung an Orts- bzw. Stadtgrenzen.

Durch die Entwicklung und den Einsatz von Noisy.Blade wird nicht nur durch die Effizienzsteigerung und Ertragsoptimierung der Windenergieanlagen der Beitrag jeder einzelnen Anlage zum Klimaschutz erhöht, sondern auch die Belastung der Anwohner durch geringere Schallemissionen verringert. Dies fördert die Akzeptanz der Windenergie und dient damit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien generell.

WEA wandeln die im Wind gespeicherte kinetische Energie über die Rotorblätter in ein mechanisches Drehmoment um, welches dann mit einem Generator in elektrische Energie gewandelt wird. Die über die aerodynamische Hülle der Rotorblätter streichende Luft erzeugt dabei ein charakteristisches Geräusch, welches von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft sowie der Blattoberfläche und deren Form und Beschaffenheit abhängt. Wird nun die Anströmung z. B. durch ein Verdrehen des Blattes (Pitch-Stellung) oder dessen Oberfläche z. B. durch einen Schaden, Erosion oder Eisansatz verändert, hat dies eine charakteristische Änderung des Strömungsgeräusches zur Folge (siehe Abbildung 1). Folglich kann das Strömungsgeräusch der Rotorblätter als Informationsquelle über deren aktuellen Zustand sowie deren Ausrichtung bzw. Pitchwinkelstellung dienen.

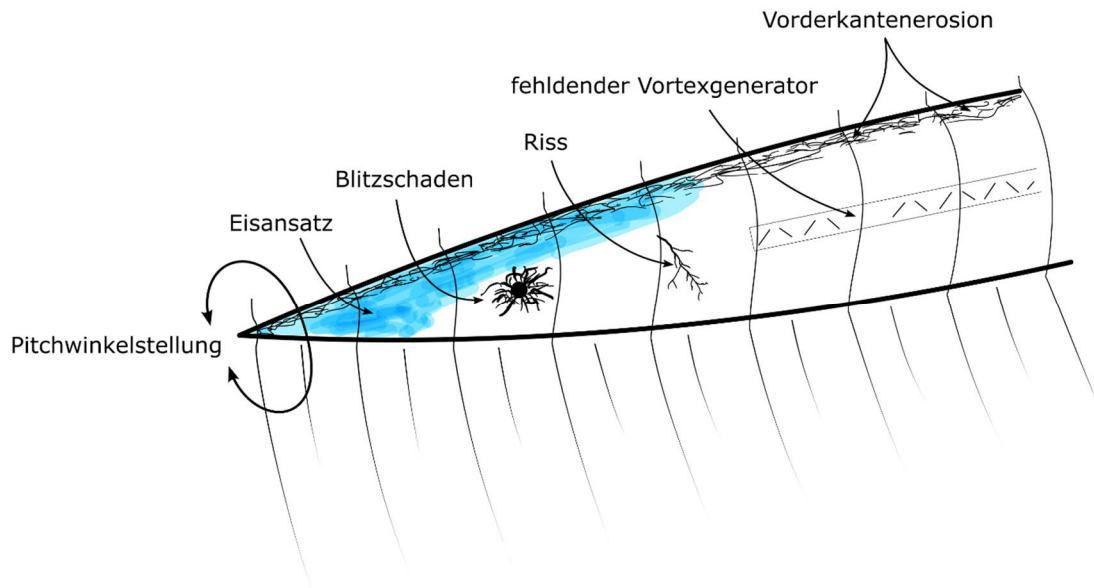


Abbildung 1: Darstellung einer Auswahl potenziell akustisch wirksamer Schäden an Rotorblättern von Windenergieanlagen.

Das Strömungsgeräusch bildet zusammen mit dem Maschinengeräusch (Getriebe und Generator) das Anlagengeräusch, welches Anwohner oft als störend empfinden und festgelegte Grenzwerte nicht überschreiten darf.

Im Rahmen des Projektes sollte erforscht werden, inwieweit akustische Signaturen der Strömungsgeräusche am Rotorblatt Aufschluss über kritische Zustandsänderungen der WEA geben können. Hierfür wurden akustische Daten gemessen, aufbereitet und mit Methoden der Signalanalyse ausgewertet. Darüber hinaus sollte mit der gleichen Sensorik die Schallemission der WEA erfasst und geprüft werden, ob darauf basierend ein ertragsoptimierter Betrieb bei gleichzeitiger Minimierung der Lärmemission möglich ist. Um eine ausreichend große Datenbasis aufzubauen, wurden umfangreiche akustische Langzeitmessungen an WEAs durchgeführt. Der Zugang zu den dafür benötigten WEAs wurde von den assoziierten Partnern bereitgestellt. Die Wahl des Messpunktes sollte hierbei leicht zu erreichen und für Dauermessungen geeignet sein. Im Rahmen der Evaluation wurden Anlagenparameter erfasst, um diese als zusätzliche Parameter in die Auswertung aufzunehmen. Hinsichtlich der zu detektierenden Zustandsänderungen sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Kann eine qualitative und quantitative Veränderung der Schallabstrahlung mit Hinblick auf den Schallimmissionsschutz erkannt werden?
- Lassen sich Blitzschäden mit Hinblick auf ein Einzelereignis (Blitzeinschlag) oder das durch den Schaden veränderte Abstrahlverhalten erkennen?
- Können Blattwinkelfehlstellungen (welche zu Ertragseinbußen und zu aerodynamischer Unwucht führen) sensitiv erkannt werden?
- Lassen sich aufkommende und plötzlich eintretende Blattschäden (Regenerosion, Risse, Delamination, ...) in Art, Umfang und Lokalisierung detektieren?
- Lässt sich ein Eisansatz auf den Rotorblättern nur anhand akustischer Signaturen zeitnah erkennen?

5 Hauptteil

5.1 Entwicklung und Aufbau des Messsystems

Im Rahmen des Projektes sollte erforscht werden, inwieweit akustische Signaturen der Strömungsgeräusche am Rotorblatt Aufschluss über kritische Zustandsänderungen der WEA geben können. Grundvoraussetzung hierfür ist die Schaffung einer Datenbasis durch akustische Messungen an Windenergieanlagen. Zu Beginn des Projekts wurde das Messkonzept entwickelt, welches zeitnah zum Projektstart erste Daten liefern kann sowie robust und flexibel ist, um an unterschiedlichen Anlagen genutzt werden zu können. Als Kernkomponente des Noisy.Blade Systems werden Smartphones genutzt. Diese haben eine mehr als ausreichende Rechenleistung für die Datenaufzeichnung und Vorverarbeitung, integrierte Speicher für die aufgezeichneten Daten und sind dabei preiswert und als Massenprodukt qualitätsgesichert. Die Energieversorgung kann kurzfristig über den integrierten Akku sowie für Langzeitmessungen über die Ladeschnittstelle erfolgen. Um qualitativ hochwertige Schallmessungen durchführen zu können, sowie eine räumliche Trennung von Smartphone und Messpunkt zu ermöglichen, wurden externe Mikrofone verwendet. Das im Projekt genutzte MicW i436 ist ein Mini Mess-Mikrofon für Smartphones der Klasse 2 nach IEC 61672. Abbildung 2 zeigt die Installation des Noisy.Blade-Systems an einer WEA. Das Mikrofon mit Windschutz (links) wurde am Vordach des Lüftungsauges außen am Turm festgeklemmt. Die Messtechnik bestehend aus einem Smartphone, Kabel und Schutzkoffer (schwarzer Kasten rechts) ist im Turm in der Nähe des Lüftungsauges auf einem Schaltschrank platziert. Abbildung 3 zeigt den Inhalt des Schutzkoffers.



Abbildung 2: Installation des Noisy.Blade-Systems an einer WEA. Das Mikrofon mit Windschutz (links) wurde am Vordach des Lüftungsauges außen am Turm festgeklemmt. Die Messtechnik (schwarzer Kasten rechts) ist im Turm in der Nähe des Lüftungsauges auf einem Schaltschrank platziert.

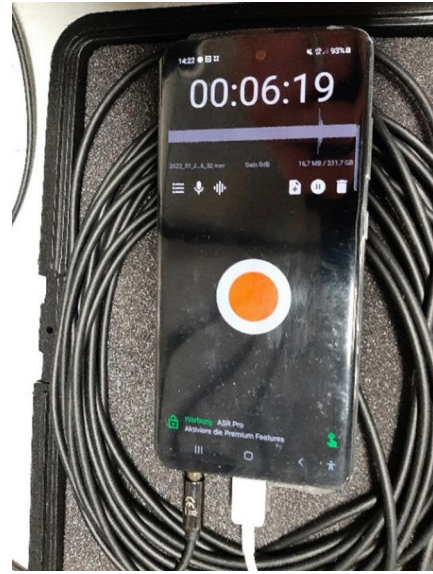


Abbildung 3: Die im Projekt genutzte Messtechnik besteht aus einem Smartphone mit Datenerfassungssoftware, welches mit dem außen am Turm befestigten Mikrofon verbunden ist. Zum Schutz gegen Umwelteinflüsse ist das Smartphone in einem Schutzkoffer untergebracht.

Bei der Positionierung der Sensorik müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. So sollte eine räumliche Nähe zu den relevanten Schallquellen (Rotorblattspitze) gegeben sein, insbesondere vor dem Hintergrund unterschiedlicher Windrichtungen und dem hierdurch veränderten Ausbreitungsweg zwischen Schallquelle und Sensorik. Dabei sollte auch eine repräsentative Erfassung der Gesamtschallemission möglich sein, um die Lärmauswirkungen auf die Umgebung bestimmen zu können. Eine einfache Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten oder zur schnellen Fehlerbehebung ist ebenfalls wichtig. Eine Position die alle der genannten Bedingungen erfüllt, ist der Turmfuß. Abbildung 4 zeigt die Positionierung des Messsystems in Relation zur Gesamtanlage.



Abbildung 4: Installationsort des Mikrofons bzw. der Noisy.Blade Messtechnik in Relation zur Gesamtanlage.

Um die WEA nicht durch Bohrungen oder Verklebungen zu beschädigen, sollten bestehende Öffnungen im Turm für die Kabelführung genutzt sowie die Befestigung des Mikrofons mit Magneten realisiert werden. Eine Möglichkeit sind hierfür Lüftungsöffnungen über der Tür oder sogenannte Lüftungsaugen seitlich davon. Da die Vordächer der Lüftungsaugen nicht magnetisch waren, konnte die angedachte magnetische Lösung zur Anbringung des Mikrofons nicht angewandt werden. Deswegen musste auf eine Klemmlösung zurückgegriffen werden.

Während der initialen Messkampagne und der Hardwareinstallation vor Ort an den WEA konnte an einigen Stellen ein Verbesserungspotential festgestellt werden.

- 1) Platzierung der Mikrofone
Falls möglich sollten die Mikrofone nicht direkt an Lüftungsgittern bzw. Durchgangsöffnungen in der Turmwand platziert werden. Hier dringt der Innenschallpegel der im Turmfuß installierten Technik deutlich nach außen und überschattet das Audiosignal signifikant.
- 2) Verwendung Mikrofone
Die genutzten MicW i436 Mikrofone eignen sich nur bedingt für den Außeneinsatz (v.a. im Winter). Hier sind 3 von 5 Mikrofonen, vermutlich auf Grund von Staunässe und Auffrieren, nach kurzer Zeit ausgefallen. Für Langzeitmessungen sollten entsprechend wetterfeste Mikrofone verwendet werden.
- 3) Stromversorgung
Ein direkter Anschluss der Smartphones an den 230 V WEA-internen Stromkreis führt zu einem permanenten Grundrauschen bei ca. 50/60 Hz, wodurch die aufgezeichneten .wav-Files unbrauchbar werden. Um dies zu vermeiden, ist ein Einsatz von autarker Stromversorgung oder separater Filtertechnik notwendig. Als Lösung hierfür wurden Power Stations NPS400 der Firma Nitecore angeschafft, um eine autarke und direkte Versorgung der Smartphones mit Gleichstrom zu gewährleisten. Hierdurch konnte das Störsignals vermieden werden.

Im Projekt wurden an fünf WEA der assoziierten Partner Messkampagnen mit dem Noisy.Blade System durchgeführt.

5.2 Datenanalyse und Entwicklung Statusindikator für Rotorblattschäden

Die Grundidee für die Schadensdetektion an Rotorblättern von WEA mit Noisy.Blade besteht darin das Strömungsgeräusch, der sich durch die Luft bewegenden Rotorblätter, zu analysieren. Sollte an einem der Rotorblätter ein akustisch wirksamer Schaden entstehen, so ändert sich das charakteristische Geräusch dieses Blattes. Zur Analyse eines Geräuschs kann dessen Frequenzspektrum betrachtet werden, welches die Zusammensetzung des Geräuschs aus Schwingungen verschiedener Frequenzen darstellt. Aus der mit dem Mikrophon gemessenen Schallintensität als Funktion der Zeit (Zeitsignal) kann das zugehörige Spektrum mittels einer schnellen Fouriertransformation (FFT) berechnet werden. Wird nun der zeitliche Verlauf der spektralen Zusammensetzung einer Messung bildlich dargestellt erhält man ein Spektrogramm. Abbildung 5 zeigt beispielhaft das Spektrogramm einer akustischen Messung an einer WEA. Horizontale Linien stellen gleichbleibende tonale Anteile des Anlagengeräuschs dar, vertikale Linien in gleichbleibenden Abständen können wiederkehrenden periodischen Ereignissen wie z. B. dem Vorbeistreichen der Rotorblätter zugeordnet werden.

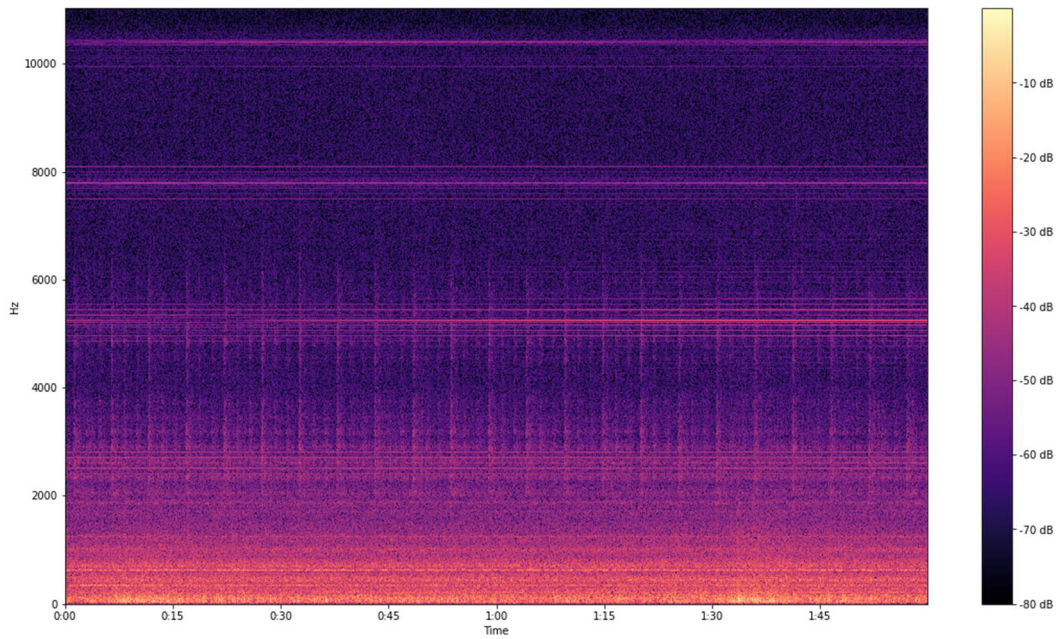


Abbildung 5: Spektrogramm einer Messung mit Noisy.Blade an einer WEA. Die spektrale Intensität in dB ist farbcodiert als Funktion der Zeit dargestellt.

Um die Rotorblätter akustisch zu überwachen, müssen nun die gemessenen Schallereignisse den drei Rotorblättern zugeordnet werden. Hierfür wird die gemessene Schallintensität über ein Frequenzintervall integriert, um den Summenpegel zu bestimmen. Die Peaks im Zeitverlauf des Summenpegels stellen die Rotorblattdurchgänge dar. Die Zeitpunkte der rotorblattspezifischen Schallereignisse können nun über einen Peak-Finding-Algorithmus bestimmt werden. In Abbildung 6 ist dieses Vorgehen entsprechend dargestellt. Die weiße Linie in der Mitte des Spektrogramms zeigt den Summenpegel im Bereich 2 kHz – 8 kHz. Die weißen Punkte markieren die durch den Peak-Finding-Algorithmus detektierten Zeitpunkte der Blattdurchgänge.

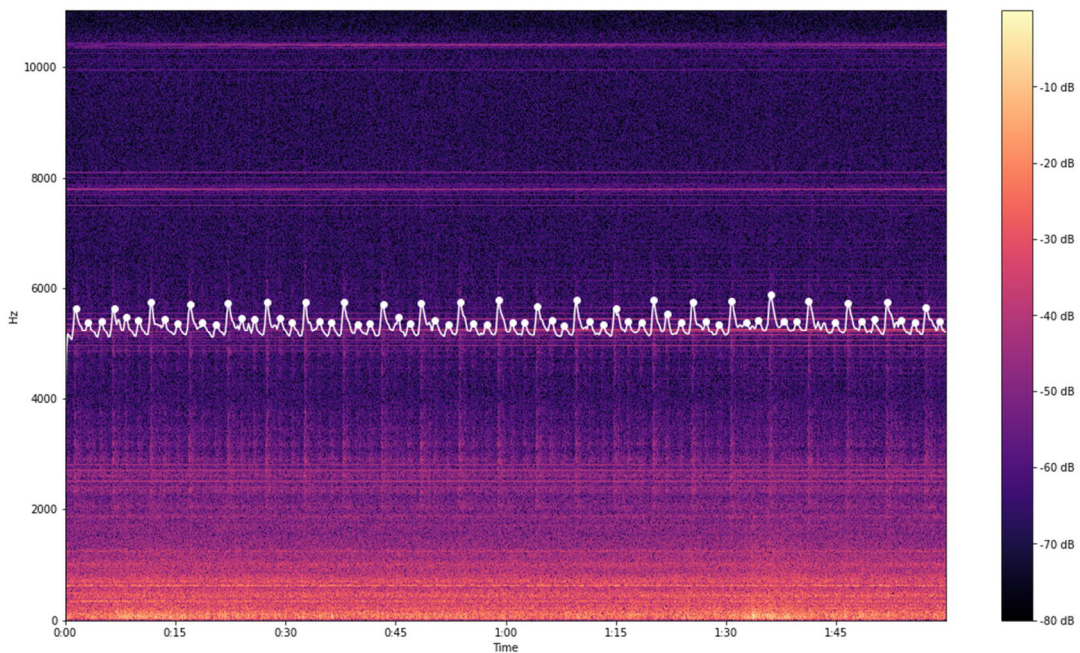


Abbildung 6: Identifikation der Blattdurchgänge mittels Peak-Finding. Die weiße Linie zeigt den Summenpegel im Bereich 2 kHz – 8 kHz. Die weißen Punkte markieren die durch den Peak-Finding-Algorithmus detektierten Zeitpunkte der Blattdurchgänge.

Die aerodynamischen Geräusche der drei baugleichen Rotorblätter sollten im Normalfall identisch oder zumindest sehr ähnlich sein. Weichen das Geräusch bzw. das akustische Spektrum eines Blattes signifikant von dem der anderen beiden Blätter ab, kann dies auf eine Änderung bzw. einen aeroakustisch wirksamen Schaden hindeuten. Sind die blattspezifischen Schallereignisse (Events) im Spektrogramm identifiziert (grüne Rechtecke in Abbildung 7), werden diese als Grundlage für die Bildung eines Schadensindikators extrahiert.

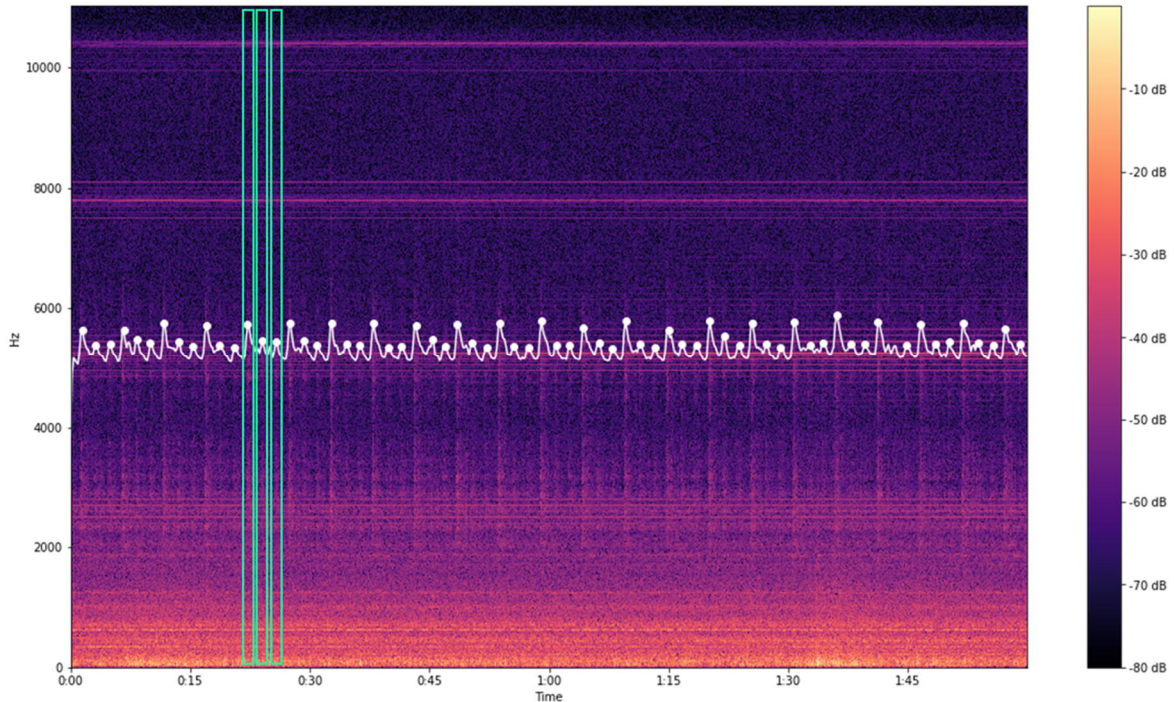


Abbildung 7: Extraktion der Events als Basis für die Bildung des Indikators. Die grünen Rechtecke markieren die Zeitbereiche drei aufeinander folgender Blattdurchgänge.

Der im Projekt entwickelte Schadensindikator nutzt das Prinzip des Vergleichs der akustischen Spektren von drei aufeinander folgenden Blattdurchgängen, bildlich dargestellt in Abbildung 8. Hierbei stellt $B_{1,2}$ die spektrale Abweichung von Rotorblatt 1 und Rotorblatt 2 dar. $B_{2,3}$ entsprechend die Abweichung zwischen Rotorblatt 2 und Rotorblatt 3 sowie $B_{1,3}$ die Abweichung zwischen Rotorblatt 3 und Rotorblatt 1.

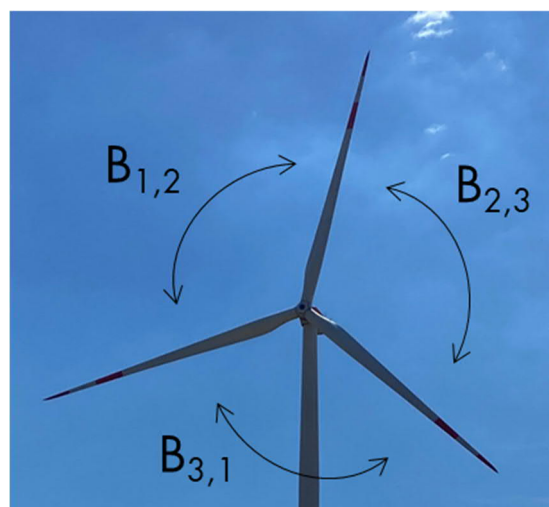


Abbildung 8: Bildliche Darstellung des Vergleichs der akustischen Spektren von drei aufeinander folgenden Blattdurchgängen.

Sind die aerodynamischen Geräusche der drei Rotorblätter gleich (kein Schaden bzw. Abweichung), sind die in einer Messreihe gebildeten Indikatorwerte normalverteilt. Weicht das Geräusch eines Blattes ab, spreizt sich die Verteilung des Indikators auf, was folglich auf einen Schaden hindeutet. Abbildung 9 zeigt den Indikatorverlauf in einem schadensfreien Zustand (oben) sowie bei einem aeroakustisch wirksamen Schaden an einem der Rotorblätter (unten).

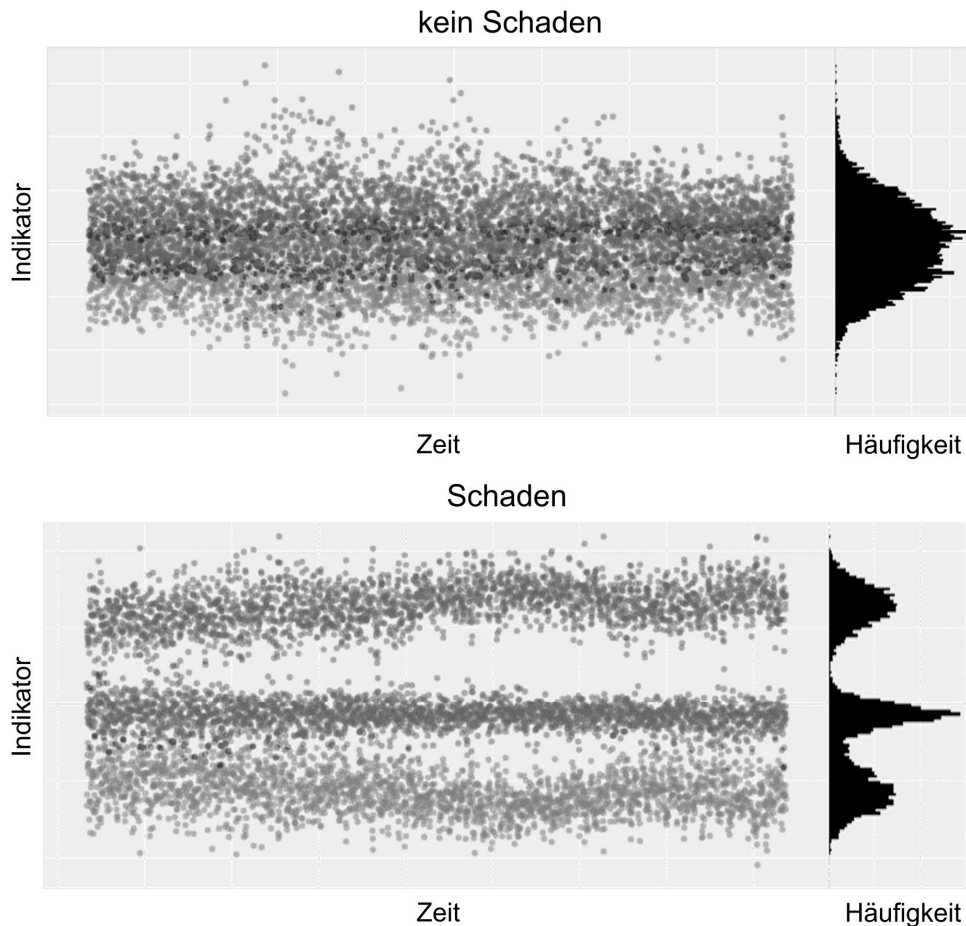


Abbildung 9: Indikatorverteilung über die Zeit. Oben: Eine Normalverteilung des Indikators zeigt keinen Schaden. Unten: Eine Aufspreizung des Indikators deutet auf einen Schaden hin.

An einem Rotorblatt einer im Projekt mit Noisy.Blade überwachten WEA ist während der Projektlaufzeit ein akustisch wirksamer Schaden entstanden. Es handelt sich dabei um eine Ablösung der Erosionsschutzfolie im Spitzenbereich des Blatts. Der beschädigte Bereich hat eine Ausdehnung von ca. 20 cm (siehe Abbildung 10). Für das Projekt war dies ein Glücksfall, da es nicht zu erwarten gewesen war während der Projektlaufzeit tatsächlich einen realen Schaden messen zu können. Durch diesen Umstand war es nicht mehr nötig, wie ursprünglich geplant, künstliche Schadensattrappen an einem Rotorblatt anzubringen, um die Funktionsfähigkeit des entwickelten Schadensindikators zu testen. Über die Langzeitmessung konnte darüber hinaus die Entstehung des Schadens und dessen Weiterentwicklung messtechnisch verfolgt werden. In Abbildung 11 ist der zeitliche Indikatorverlauf während der Entstehungsphase des Schadens dargestellt. Oben links ist der Indikator im Zeitraum 17. - 20. Februar 2022 normalverteilt, was den ursprünglichen schadensfreien Zustand markiert. Ab 21. Februar 2022 beginnt eine Aufspreizung des Indikators. Diese kommt von einer sich einstellenden akustischen Abweichung eines der Rotorblätter, welche als Beginn der Schadensentstehung interpretiert werden kann. Mit fortschreitender Zeit vergrößert sich die Aufspreizung mit der ab dem 24. Februar 2022 vollständigen Ausprägung des Schadens.



Abbildung 10: Mit Noisy.Blade detektierter Schaden an einem Rotorblatt (Folienablösung).

Der Indikatorverlauf zeigt zwischendurch immer wieder Bereiche, in denen die Aufspreizung des Indikators kleiner wird bzw. wie am 26. Februar 2022 komplett zu verschwinden scheint. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sich der Schaden wieder zurückbildet. Vielmehr ändert sich in diesen Bereichen der Betriebszustand der Anlage, wodurch das Blattgeräusch abnimmt bzw. ganz verschwindet, wenn z. B. die Anlage stillsteht. Geht die WEA wieder in ihren normalen Betrieb über, wird die Aufspreizung des Indikators und damit der detektierte Schaden wieder deutlich. Der akustische Schadensindikator sollte deshalb stets in Bezug zum aktuellen Betriebszustand der Anlage betrachtet werden.

Werden ein Schaden bzw. eine akustische Abweichung detektiert, müssen diese durch eine visuelle Inspektion bestätigt bzw. deren Art und Ausmaß bestimmt werden. Das Konzept der akustischen Schadensüberwachung von Rotorblätter ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Anlage wird grundsätzlich kontinuierlich akustisch überwacht. Durch Merkmalsextraktion wird aus den gemessenen Daten ein Schadensindikatorverlauf gebildet. Zeigt dieser einen Schaden an, folgt eine visuelle Inspektion und Reparatur des Schadens, worauf die Überwachung fortgesetzt wird.

Prinzipiell ist der entwickelte Indikator dazu geeignet jede akustische Abweichung der Rotorblätter relativ zueinander anzuzeigen. Damit können neben Schäden grundsätzlich auch Pitchwinkel-feststellungen detektiert werden. Abweichungen, die alle Blätter gleichermaßen betreffen, wie z. B. eine gleichmäßige Erosion oder Eisbildung sowie ein falscher Offset der Pitchwinkelsteuerung, sind mit diesem Verfahren nicht detektierbar. Findet die Erosion oder Eisbildung jedoch an einem oder zwei Blättern vermehrt statt, könnte dies wiederum erkennbar sein.

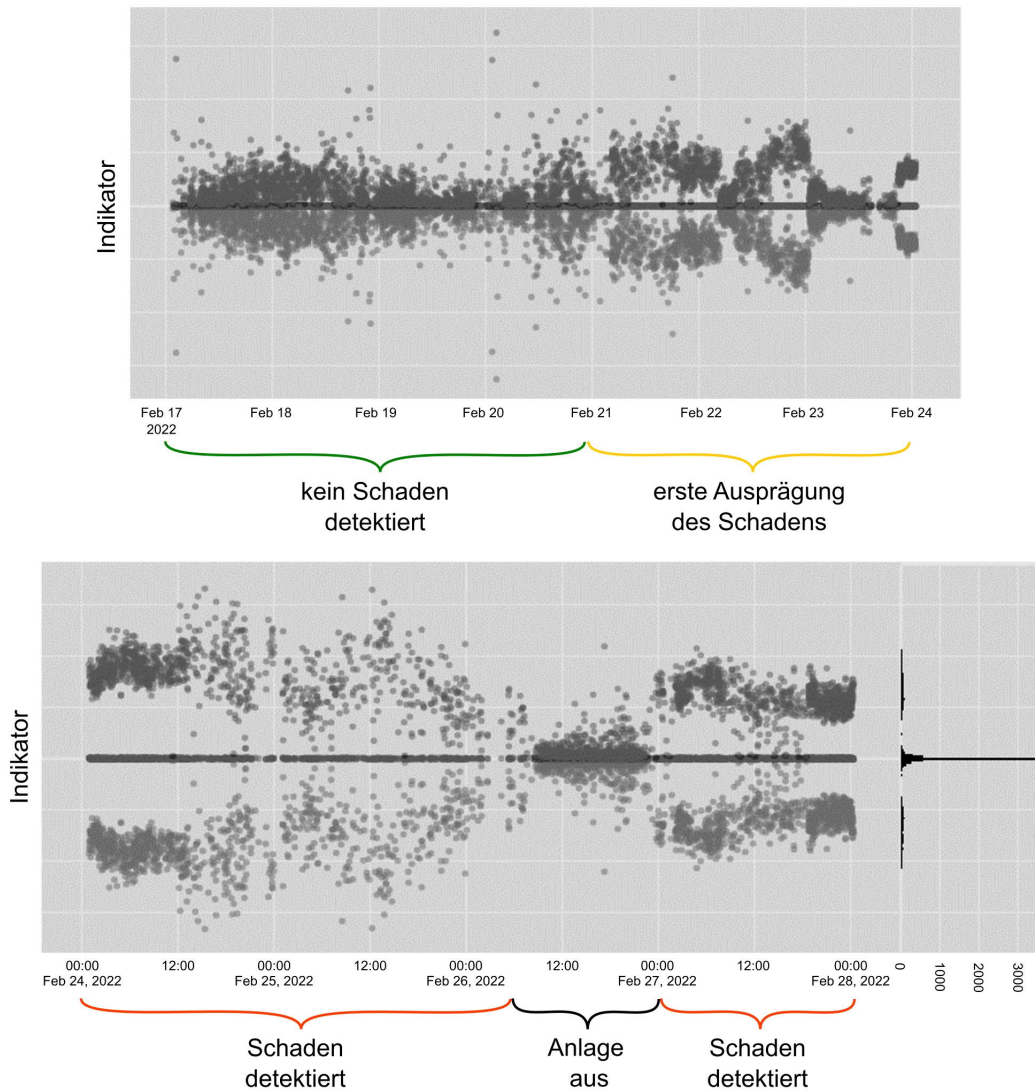


Abbildung 11: Ergebnisse der Messreihen auf Türhöhe am Turm einer WEA während der Entstehung eines Schadens.

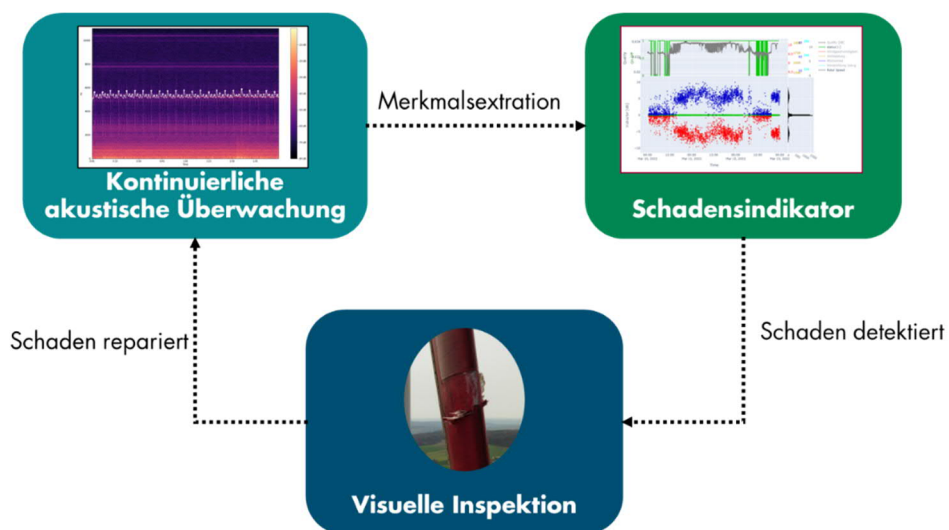


Abbildung 12: Akustische Rotorblattüberwachung einer Windenergieanlage.

5.3 Schallemissionsmessung

Neben der Rotorblattüberwachung sollte die akustische Messtechnik von Noisy.Blade auch dazu genutzt werden, um parallel die Gesamtlärmemission der Anlage zu bestimmen bzw. einen Anhaltspunkt zur Lärmbelastung der Umwelt durch die Anlage zu geben. Hierzu wurden die mit Noisy.Blade aufgenommenen Daten mit zeitgleich durchgeführten Schallemissionsmessungen nach IEC 61400-11 [1] verglichen. Abbildung 13 zeigt einen qualitativen Vergleich des Summenpegels dB(A) im Frequenzbereich 2 kHz – 8 kHz zwischen IEC-Messung und Noisy.Blade Aufnahme. Verschiedene Betriebszustände der Anlage sind farblich gekennzeichnet (blau, rot, grün), die Messung mit Noisy.Blade ist als schwarze Linie dargestellt.

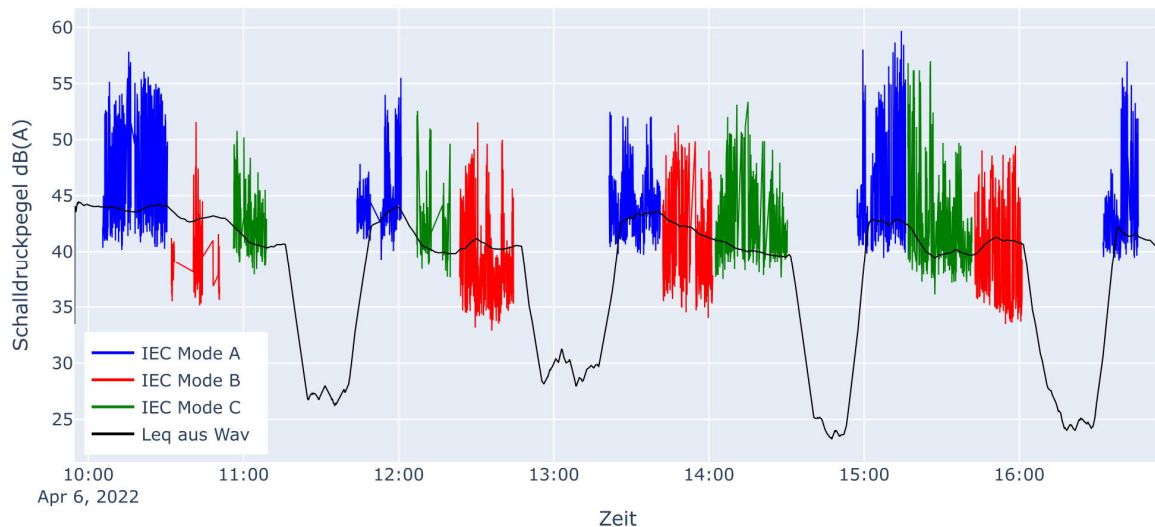


Abbildung 13: Vergleich des Summenpegels dB(A) im Frequenzbereich 2 kHz – 8 kHz zwischen IEC-Messung und Noisy.Blade Aufnahme.

Die Herausforderung bei der Bewertung der Lärmbelastung der Umgebung durch den WEA-Betrieb mit dem Noisy.Blade System besteht primär in der, für eine entsprechende Schallemissionsmessung, schlecht geeigneten Messposition. Diese wurde für Noisy.Blade, für die akustische Rotorblattüberwachung bei gleichzeitig einfacher Zugänglichkeit, am Turmfuß gewählt. Die nach IEC 61400-11 vorgeschriebene Messposition für eine Schallemissionsmessung bei Windenergieanlagen liegt in Windrichtung bei einem Abstand, der der Nabenhöhe plus dem halben Rotordurchmesser der Anlage entspricht. Im hier untersuchten Fall wären dies ca. 200 m. Grund hierfür ist, dass bei Emissionsmessungen das Anlagengeräusch in seiner Gesamtheit bewertet werden soll, ohne dass einzelne Geräuschanteile, durch stark unterschiedliche Abstände der Teilschallquellen zum Mikrofon, dominant sind. Bei der Messposition von Noisy.Blade im Projekt sind jedoch Geräusche im Bereich des Turmfußes bzw. der im Turmfuß verbauten Technik überrepräsentiert, Geräusche aus dem Maschinenaus auf dem Turmkopf dagegen unterrepräsentiert. Trotz dieses systematischen Messfehlers zeigt der mit Noisy.Blade gemessene Summenpegelverlauf im Frequenzbereich 2 kHz – 8 kHz eine qualitativ gute Übereinstimmung mit dem Verlauf des Summenpegels aus der IEC-Messung. Hierbei ist zu beachten, dass das Noisy.Blade-Mikrofon im Gegensatz zum Messaufbau der IEC-Messung nicht kalibriert war, weshalb der absolute Pegel nicht verglichen werden kann. In Abbildung 13 liegen die Absolutwerte der Pegel lediglich zufällig sehr nahe beieinander. Physikalisch wäre es zu erwarten, dass der Summenpegel in 200 m Entfernung niedriger ist, als direkt am Turmfuß. Für den qualitativen Vergleich ist diese Darstellung jedoch vorteilhaft. Eine quantitative Bewertung der Schallemission erscheint durch den qualitativ ähnlichen Verlauf nach einer Kalibrierung mit Referenzmessungen machbar.

6 Fazit

Im Projekt Noisy.Blade wurde ein Indikator entwickelt und in Feldmessungen validiert, welcher akustische Abweichungen zwischen Rotorblättern an Windenergieanlagen anzeigt. Im Projektverlauf konnte damit ein tatsächlich aufgetretener Schaden an einem Rotorblatt detektiert werden. Darüber hinaus wurde eine Bewertung der Schallemission der gesamten Anlage mittels Noisy.Blade geprüft, indem die Messungen mit einer zeitgleich durchgeführten IEC-konformen Schallemissionsmessung verglichen wurde.

Hinsichtlich der zu detektierenden Zustandsänderungen sollten im Projekt folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Kann eine qualitative und quantitative Veränderung der Schallabstrahlung mit Hinblick auf den Schallimmissionsschutz erkannt werden?

Im Projekt konnte eine gute Korrelation des Pegelverlaufs bei unterschiedlichen Betriebsmodi der Anlage mit dem einer IEC-konformen Schallemissionsmessung gezeigt werden. Damit wurde die Möglichkeit der Erkennung einer qualitativen Veränderung der Schallabstrahlung nachgewiesen. Eine quantitative Aussage sollte nach einer Kalibrierung ebenfalls möglich sein.

- Lassen sich Blitzschäden mit Hinblick auf ein Einzelereignis (Blitzeinschlag) oder das durch den Schaden veränderte Abstrahlverhalten erkennen?

Im Projektzeitraum kam es zu keinem Blitzeinschlag an den überwachten Anlagen. Da mit dem im Projekt entwickelten Indikator jedoch die Entwicklung eines echten Schadens (Ablösung der Erosionsschutzfolie auf einer Fläche mit ca. 20 cm Ausdehnung) detektiert werden konnte, kann diese Frage positiv beantwortet werden.

- Können Blattwinkelfehlstellungen (welche zu Ertragseinbußen und zu aerodynamischer Unwucht führen) sensitiv erkannt werden?

Im Projekt wurden keine Pitchwinkelfehlstellungen aktiv herbeigeführt. Da der Indikator jedoch empfindlich auf einen Unterschied der aerodynamischen Geräusche der Rotorblätter reagiert, sollte die Fehlstellung eines Blatts im Vergleich zu den anderen Blättern angezeigt werden. Eine Validierung dieser Vermutung ist in weiteren Messungen noch zu erbringen.

- Lassen sich aufkommende und plötzlich eintretende Blattschäden (Regenerosion, Risse, Delamination, ...) in Art, Umfang und Lokalisierung detektieren?

Da mit dem im Projekt entwickelten Indikator die langsame Entwicklung eines echten Schadens (Ablösung der Erosionsschutzfolie auf einer Fläche mit ca. 20 cm Ausdehnung) detektiert und mitverfolgt werden konnte, kann diese Frage grundsätzlich bejaht werden. Eine Unterscheidung der Schadensart und Lokalisierung konnten im Projekt nicht untersucht werden. Dies ist eine spannende Fragestellung für Folgeprojekte.

- Lässt sich ein Eisansatz auf den Rotorblättern nur anhand akustischer Signaturen zeitnah erkennen?

Da im Messzeitraum keine Vereisung der Rotorblätter stattfand, kann diese Frage nicht beantwortet werden. Hierfür sind weitere Messungen im Winter notwendig.

Zusammenfassend kann durch die Entwicklung und den Einsatz von Noisy.Blade nicht nur durch die potenzielle Effizienzsteigerung und Ertragsoptimierung der Windenergieanlagen der Beitrag jeder einzelnen Anlage zum Klimaschutz erhöht, sondern auch die Belastung der Anwohner durch geringere Schallemissionen verringert werden. Dies fördert die Akzeptanz der Windenergie und dient damit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien generell.

7 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 61400-11. 2019-05. Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2012 + A1:2018)