

Version 1, 12.04.2021

Version 2, 27.04.2021: Aktualisierung zum Stand Korrigendum bei JSV und bei Abbildungen 2, 3

Version 3, 03.09.2021: Aktualisierung zum Stand Korrigendum bei JSV und zur Messkampagne sowie Beschreibung zur Mittelwertbildung

Version 4, 14.12.2021: Aktualisierung zum veröffentlichten Korrigendum bei JSV

## „Infraschall und Windenergie“

BGR, Hannover, 14.12.2021

**Ausgangslage:** Moderne Windenergieanlagen (WEA) mit Leistungen von einigen Megawatt (MW) generieren aufgrund ihrer Größe und der geringen Rotationsgeschwindigkeit der Rotorblätter einen Großteil ihrer akustischen Emissionen im Infraschall-Bereich unterhalb von 20 Hz. In diesem nicht vom menschlichen Ohr wahrnehmbaren Frequenzbereich pflanzt sich der Schall deutlich weiter fort als im hörbaren Bereich und kann in mehreren Kilometern Entfernung noch von empfindlichen Messgeräten wie etwa den Mikrobarometern der Infraschall-Stationen der BGR registriert werden.

Dabei beeinträchtigen regelmäßige akustische Signale nahegelegener WEA die direkten Stationsaufzeichnungen von Luftdruckvariationen im Infraschall-Bereich und damit auch die Leistungsfähigkeit betreffender Stationen zur Detektion von Infraschall-Ereignissen. Dies betrifft auch die Signaturen von Explosionen im Rahmen der Überwachung des Kernwaffenteststopps (CTBT). Mit der Ratifizierung des CTBT im Jahr 1998 hat sich die Bundesrepublik Deutschland völkerrechtlich verpflichtet, die Qualitätsanforderungen für die Messungen von Infraschall zu erfüllen. Für die BGR als Betreiber der deutschen CTBT-Infraschall-Stationen ist eine genaue Kenntnis und Quantifizierung der Einflüsse von WEA auf Infraschall-Messungen von großer Bedeutung. Daher befasst sich die BGR seit 2004 mit dem Thema. Ziel war es auf der Grundlage von Messungen Empfehlungen für einen Mindestabstand zwischen Infraschall-Stationen und WEA zu entwickeln, die einen ungestörten Betrieb dieser CTBT-Stationen gewährleisten können. Auf dieser Grundlage konnte die BGR Mindestabstände zwischen ihren Infraschall-Stationen und WEA festlegen, die sowohl Größe als auch Leistungsfähigkeit der WEA betrachten. Behördliche Berücksichtigung finden diese Ergebnisse beispielsweise im Bayerischen Windatlas ([Energie-Atlas Bayern - Wind](#)), der für den Bau von WEA einen Mindestabstand von 15 km zu der Messanlage I26DE vorsieht.

Die BGR hat in der Vergangenheit ihre Arbeiten zum Einfluss von WEA auf Infraschall-Messanlagen auf nationalen und internationalen Fachtagungen präsentiert und als Bericht auf den eigenen Webseiten veröffentlicht. Im Jahr 2017 folgte eine Publikation, die nach einem Peer Review (Begutachtung durch Fachkolleginnen und –kollegen) in einem international anerkannten Fachjournal veröffentlicht wurde (Pilger & Ceranna 2017; <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.10.027>). Auch die Methode zur Analyse der Signalenergie als Funktion der Frequenz wurde unter Beteiligung der BGR im Peer-Review-Verfahren in einer anerkannten Fachzeitschrift veröffentlicht (Brown et al. 2012; <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0573-6>). Darauf beruhen die von der BGR angewendeten Modellierungen zur Abschätzung der Störsignale einer WEA. Diese Signale entstehen beim Passieren des Flügels am Turm. Die Abschätzungen dieser mittleren Störampplituden sind die Grundlage für die

Empfehlungen der Mindestabstände zu den CTBT-Infraschall-Stationen. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind damit sowohl die Messmethode als auch die Ergebnisse zur Empfehlung von Störampplituden und Mindestabständen zu den CTBT-Infraschall-Stationen international wissenschaftlich geprüft und anerkannt.

### **Auswertung der Infraschall-Aufzeichnungen und Bestimmung der Schalldruckpegel:**

Neuere wissenschaftliche Untersuchungen von Baumgart et al. (2021; <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116310>) sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB, März-2021; [Stellungnahme PTB - Pilger et al 2017.pdf](#)) haben darauf hingewiesen, dass die von der BGR abgeleiteten Schalldruckpegel zu hoch und damit fehlerhaft seien. Fachlich-wissenschaftliche Diskurse sind ein zentraler Baustein im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess. Entsprechend den Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis, so wie sie die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) vorgibt, umfasst ein wissenschaftlicher Diskurs neben der Forschung die Verarbeitung der Forschungsergebnisse, deren Neuinterpretation und Anwendung sowie das Verfassen von kritischen Gegenentwürfen und Gesamtdarstellungen in Form einer Synthese. Dem sieht sich die BGR als Ressortforschungseinrichtung verpflichtet. Entsprechend wurden die in der Vergangenheit bestimmten Ergebnisse und Empfehlungen von der BGR überprüft. Die Prüfungen kommen zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Die Registrierung von Infraschall-Signalen von WEA an hochempfindlichen Mikrobarometern ist noch in mehreren 10'ern Kilometern Entfernung wissenschaftlich belegt. Daher wären solche Störsignale auch im Abstand von mehreren Kilometern an den deutschen CTBT-Infraschall-Stationen registrierbar und würden die Empfindlichkeit der Messsysteme beeinträchtigen.
2. Die BGR hat 2017 eine redigierte Publikation ihrer Messungen im *Journal of Sound and Vibration* (JSV) veröffentlicht, in der auch für unbeeinträchtigte Messungen erforderliche Mindestabstände quantifiziert werden. Als Maß für die Stärke des Infraschalls einer WEA wurden in der Veröffentlichung Schalldruckpegel gezeigt. Diese enthielten jedoch einen systematischen Fehler und waren 36 dB zu hoch. Die BGR hat die Editoren von JSV kontaktiert, ein Korrigendum zu ihrer Publikation Pilger & Ceranna (2017) zu veröffentlichen, um auf diese Weise den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess zu unterstützen. Dieses liegt inzwischen als Online Veröffentlichung mit Peer Review vor (Pilger & Ceranna 2021; <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116636>). Der Diskussionsbeitrag von Baumgart et al. (2021) und die Replik von Pilger & Ceranna (2021) werden vom JSV in einer der kommenden Ausgaben parallel veröffentlicht – voraussichtlich in der Dezemberausgabe 2021.
3. Da die den vorherigen BGR-Studien zugrundeliegenden Leistungsdichtespektren unbestritten und im Rahmen des Peer Review anerkannt sind, werden in diesen Überarbeitungen sowie zukünftigen Ausführungen ausschließlich diese spektralen Darstellungen herangezogen.
4. Die Schätzung der Störampplituden erfolgte mithilfe eines von Viterna in den späten 70'ern und frühen 80'ern Jahren bei der NASA entwickelten Modells (siehe Pilger & Ceranna 2017), die mit Daten aus den Messungen in 2004 validiert wurden. Den Berechnungen des Viterna-Modells für unterschiedliche WEA-Typen und Entfernungen zur Folge wird ein Mindestabstand von 15 km von

WEA zur deutschen Infraschall-Station I26DE empfohlen. Die Kernaussage der BGR-Studien zwischen Mindestabstand von WEA und Infraschall-Station behält somit ihre Gültigkeit.

5. Im Zeitraum von Mai bis August 2021 wurden in Zusammenarbeit mit der PTB an zwei Windparks, bestehend aus modernen WEA mit elektrischen Leistungen im MW-Bereich, Messungen durchgeführt, um unter anderem auch die Nutzung des Viterna-Modells eingehender zu validieren. Mithilfe der Infraschall-Messdaten soll dabei ferner der spezifische Charakter der Störsignale von WEA und die Auswirkung auf Detektionen von CTBT-relevanten Ereignissen weiter untersucht werden.
6. Die in den BGR-Studien untersuchte WEA (Typ Vestas V47) hat eine nominelle Maximalleistung von 660 kW. Die mittlere Leistung im untersuchten Zeitraum 2004 lag bei rund 200 kW, die Energieausbeutung, die sich aus den gemessenen Windgeschwindigkeiten und der Kennlinie des Herstellers ergibt, stimmt mit den Betreiberinformationen überein.
7. Die Messungen und Analysen der BGR von Infraschall-Signalen einer WEA dienen ausschließlich dazu, ihr Störpotenzial für hochempfindliche Mikrobarometer abzuschätzen. Die verwendeten Darstellungen der Leistungsdichtespektren lassen keine Rückschlüsse auf die Einwirkung von WEA-Infraschall auf Menschen zu.
8. Die Darstellungsweisen von Leistungsdichtespektren als (a) in der Frequenz sehr fein, (b) gleitende Mittelwerte oder (c) als bandweise Mittelwerte sind äquivalent und richten sich nach der zugrundeliegenden Fragestellung. Für die Beurteilung der Einwirkung des Infraschalls von WEA auf den Menschen sind hingegen Terzbänder geeignet und nicht Leistungsdichtespektren mit sehr feiner Auflösung im Frequenzbereich, wie sie für die Messaufgaben der BGR erforderlich sind. Es geht hierbei nicht um die Reproduktion der Auswertung Dritter und insbesondere auch nicht um eine gesonderte Art der Darstellung von Schalldruckpegeln, sondern um die Tatsache, dass es mehrere äquivalente Darstellungen des Leistungsgehalts von Infraschall einer WEA gibt.

### Im Einzelnen:

**Zu (1):** Mikrobarometer sind hochempfindliche Messinstrumente, die kleinste Druckschwankungen im Frequenzbereich des Infraschalls registrieren können. So auch Infraschall-Signale von WEA in Entfernungen einiger 10'er Kilometer, wie Keith (2018; <https://doi.org/10.1121/1.5051331>) und Marcillo et al. (2015; <https://doi.org/10.1002/2014JD022821>) gezeigt haben. In diesem Kontext steht auch die BGR-Studie von Pilger und Ceranna (2017), die Infraschall-Signaturen von WEA im Rahmen einer Feldmessung 2004 bis in 2 km Abstand bzw. während des permanenten Betriebs der fest installierten Infraschall-Station IGADe nördlich von Bremen in mindestens 4 km Abstand zeigt. Bei diesen Signaturen handelt es sich um spektrale Spitzen bei einzelnen Frequenzen, den sogenannten Flügelharmonischen (*blade passing harmonics*), die ganzzahlige Vielfache der Häufigkeit sind, mit der ein Flügel den Turm passiert. Als Druckschwankungen im Zeitbereich können die Störsignale einer WEA in den Infraschall-Aufzeichnungen in der Regel nicht in derart großen Entfernungen nachgewiesen werden.

**Zu (2) und (3):** Basierend auf den Infraschall-Messungen der BGR an einer einzelnen WEA nördlich von Hannover im Jahr 2004 (siehe [BGR - Projekte - Der Infraschall von Windenergieanlagen \(bund.de\)](http://www.bund.de/BGR-Projekte-Der-Infraschall-von-Windenergieanlagen)) wurden von Baumgart et al. (2021) und der PTB (März-2021) unabhängige Bestimmungen der Leistungsdichtespektren (PSD - Power Spectral Density) vorgenommen. Dabei wurde in beiden Studien auf einen Fehler in den BGR-Kurven für den Schalldruckpegel (SPL - Sound Pressure Level) hingewiesen. Dies ist richtig. Bei der Umrechnung der PSD-Werte in SPL-Kurven wurde von der BGR eine fehlerhafte Skalierung gewählt. Insgesamt sind die SPL-Kurven der BGR, wie sie in Pilger & Ceranna (2017) veröffentlicht sind, um 36 dB zu hoch, entsprechend einem Faktor von 64 im quadratischen Mittel (RMS – *Root Mean Square*) der Schallamplitude.

Die PSD-Kurven, die ein zentrales – jedoch in Pilger & Ceranna (2017) nicht dargestelltes – Zwischenergebnis der BGR bei der Berechnung der spektralen Signatur einer Infraschall-Aufzeichnung sind (siehe auch Brown et al. 2012), werden korrekt berechnet und stimmen mit denen in den Studien von Baumgart et al. (2021) und PTB (März-2021) überein.

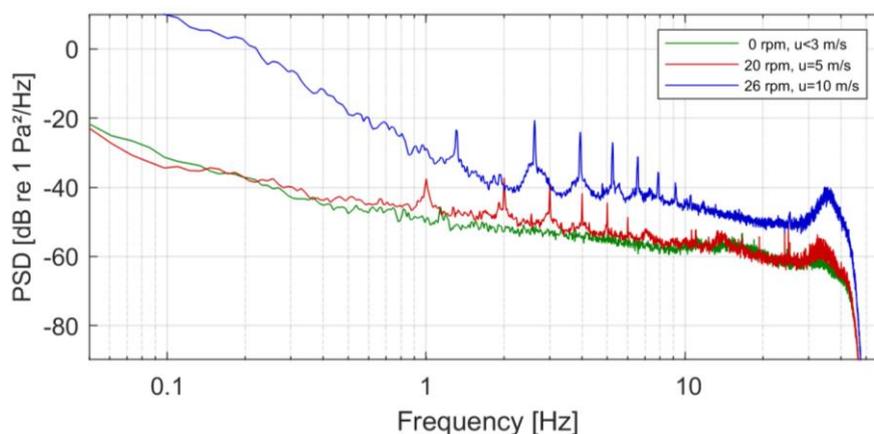


Abbildung 1: Darstellung der Leistungsdichtespektren (Power Spectral Density, PSD) in Analogie zu Abbildung 4 in Pilger & Ceranna (2017) anstelle der fehlerbehafteten Schalldruckpegel; diese korrekt bestimmten Spektren bildeten die Grundlage für die Bestimmung der SPL-Kurven.

**Zu (4):** Bei der SPL-Bestimmung aus den PSD-Kurven handelt es sich um einen systematischen Fehler, der auch bei den Bestimmungen der Modellkurven anhand des NASA-Modells (siehe Pilger & Ceranna 2017) auftrat. Dies zeigt ein neuerlicher Vergleich der Messdaten aus 2004 mit den Modellkurven (Abbildung 2) inklusive einer Unsicherheitsbetrachtung. Damit ist die Kernaussage der BGR zum Infraschall von WEA und deren Einfluss auf hochempfindliche Messsysteme weiterhin gültig, die für den Bau von WEA bzw. Windparks einen Mindestabstand von 15 km zur Infraschall-Station I26DE im Bayerischen Wald empfiehlt (Abbildung 3).

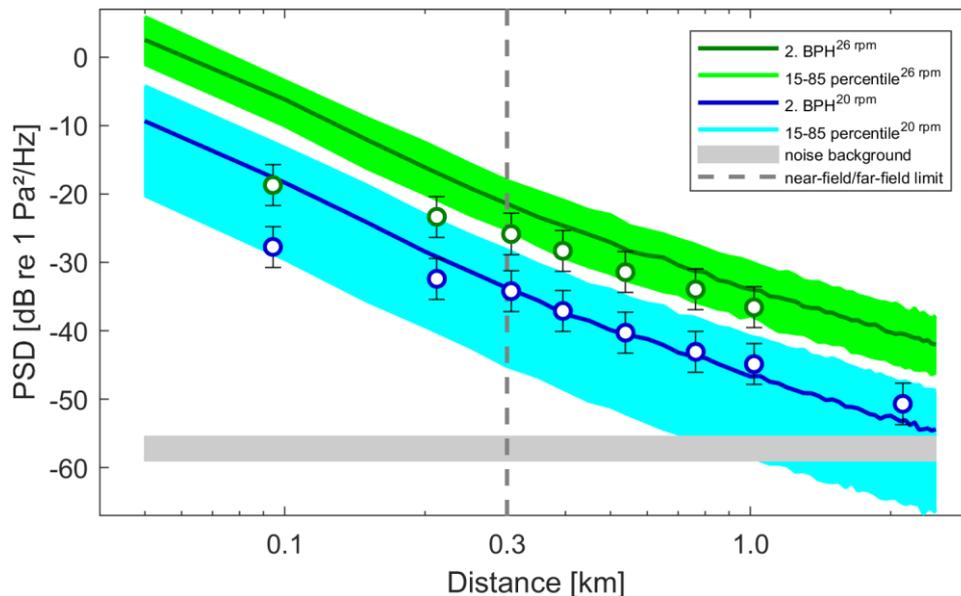


Abbildung 2: Vergleich der berechneten und gemessenen Werte der Leistungsdichtespektren (PSD) für die 2. Flügelharmonische (BPH - blade passing harmonic). Darstellung analog zu Abbildung 6 in Pilger & Ceranna (2017); hier mit Berücksichtigung der Unsicherheiten in Windgeschwindigkeit und Leistung für die Modellkurven sowie Umgebungseinflüssen bei Messwerten (Kreise) und Hintergrundrauschen zwischen 1 und 5 Hz am Messstandort unter ruhigen Bedingungen (grauer Balken). Die Anpassung für die niedrigere Umdrehungszahl (blau) ist hierbei besser als für die höhere Umdrehungszahl (grün). Die Messwerte in geringen Entfernungen von weniger als 300 m (gestrichelte Linie) zur WEA sind geringer als das Modell vorhersagt, da das NASA-Modell eine Fernfeldnäherung darstellt und somit erst ab einigen Wellenlängen zutreffend ist. Insgesamt zeigt sich eine gute Anpassung und damit Validierung des Modells.

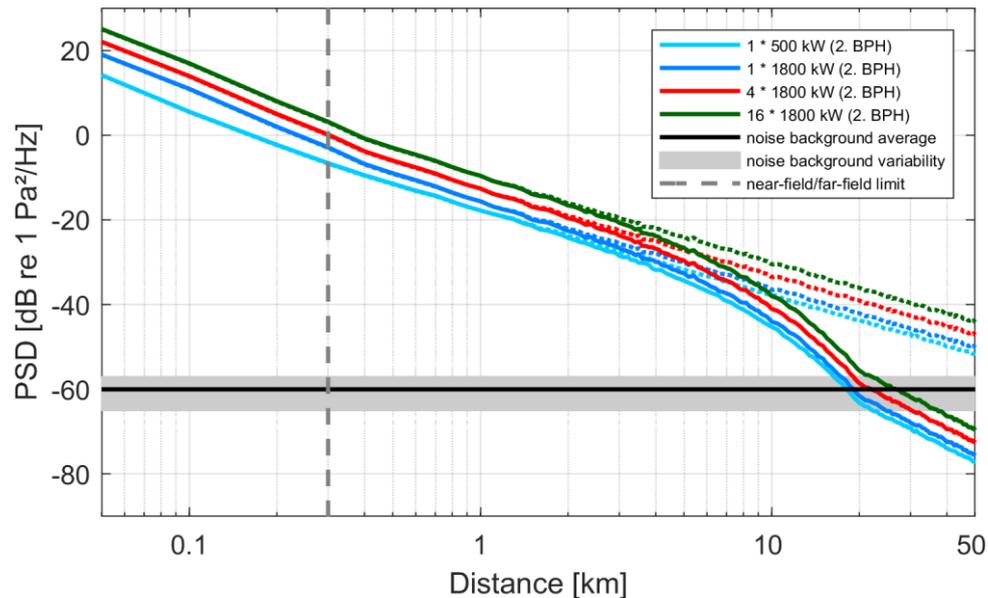


Abbildung 3: Darstellung der geschätzten maximalen Spitzen der Leistungsdichtespektren verschiedener WEA bzw. Windparks bei der Frequenz der 2. Flügelharmonischen (BPH) in Abhängigkeit zur Entfernung in Analogie zu Abbildung 8 in Pilger & Ceranna (2017). Die Referenz für das Hintergrundrauschen (schwarze Linie, grauer Balken) basiert auf Messungen an I26DE im Frequenzbereich zwischen 1 und 5 Hz. Durchgezogene farbige Linien stellen die Modellierung bei vorrangig auftretenden atmosphärischen Bedingungen dar. Da es sich bei Infraschall-Stationen um Arrays handelt, die aus mindestens vier Einzelsensoren bestehen und wie eine Antenne fungieren, ist die Betrachtung der spektralen Spitzen bei der 2. Flügelharmonischen ein angemessener Schätzer für die Beeinträchtigung des Detektionspotenzials einer solchen Station. So werden kohärente Signale anhand ihrer Energie im Frequenz-Wellenzahl-Bereich detektiert und durch Störsignale einer WEA beeinträchtigt.

**Zu (5):** Da sich die WEA-Technik seit den Messungen der BGR in 2004 erheblich weiterentwickelt hat, bearbeitet die BGR das Thema weiter. Neue Infraschall-Messkampagnen an zwei Standorten mit Windparks bestehend aus modernen WEA wurden zwischen dem 20. Mai und dem 23. August 2021 entlang von Profilen mit einer Länge von bis zu 3,5 km durchgeführt. Dafür wurden zwei Windparks mit insgesamt 25 WEA untersucht, davon neun WEA mit einer nominellen elektrischen Leistung von jeweils 0,9 MW und 16 WEA à 3,0 MW. Die Messkampagne wurde in Teilen von der PTB begleitet, die mit ihren eigenen Geräten (Mikrofone und Schalldruckpegelmessler) parallel zu den Mikrobarometern den Infraschall aufgezeichnet hat. Nach Abschluss der Arbeiten wurden alle Messdaten aufbereitet in einem *open access repository* der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, nachdem die BGR die ersten Auswertungen am 20.09.2021 auf einer Fachtagung vorgestellt hat – der GeoKarlsruhe 2021. Darüber hinaus wird die BGR ihre Auswertungen und Interpretationen in einer Peer-Review-Publikation mit *open access* veröffentlichen.

Auch sollen diese Messungen weitere Erkenntnisse über die spektralen Infraschall-Signaturen von WEA liefern. Grundsätzlich weisen diese bei einzelnen Frequenzen – den Flügelharmonischen – gegenüber dem Hintergrundrauschen deutlich erhöhte Energiewerte auf. Das zugehörige Drucksignal bzw. (Infra-)Schallsignal wird gemeinhin als Überlagerung einzelner Sinusschwingungen bei den Frequenzen der Flügelharmonischen verstanden. Als angemessenere Beschreibung erscheint jedoch

ein kurzzeitiger N-förmiger Impuls, der die Abfolge von Kompression und Dekompression der Luft zwischen Turm und passierendem Flügel nachempfendet.

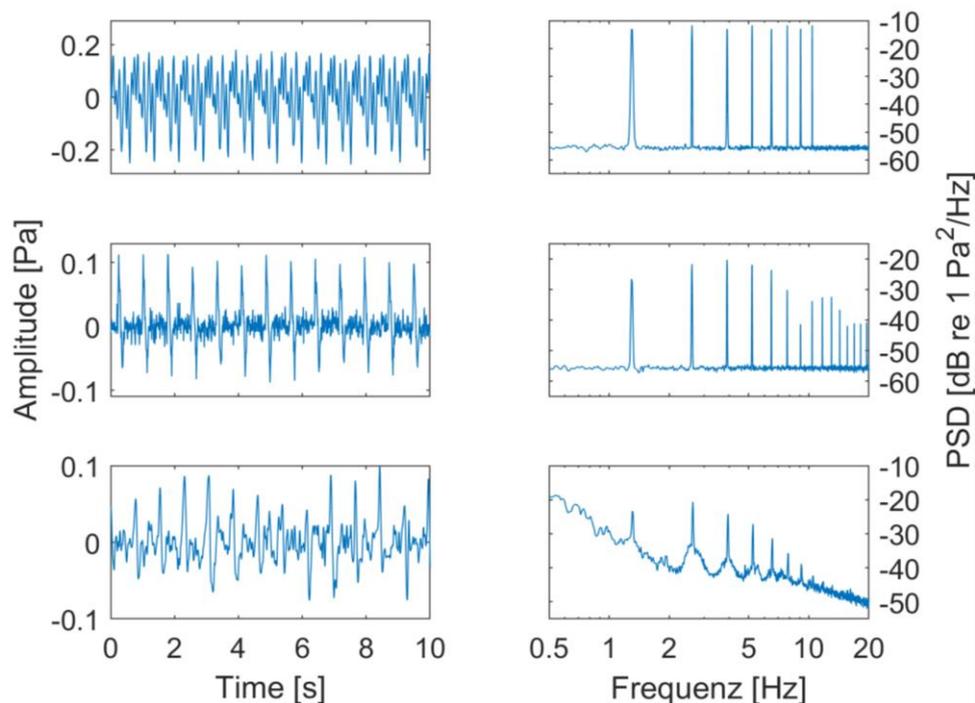


Abbildung 4: Links: Ausschnitte aus synthetischen Zeitreihen (oben und Mitte) und der Messung an einer einzelnen WEA aus 2004 (dritter Zeitraum aus Abbildung 4 in Pilger & Ceranna 2017) sowie rechts die zugehörigen gemittelten Leistungsdichtespektren (PSD, mit Hanning-Fenster und 8192 Datenpunkten). Die obere Zeitreihe ist eine Überlagerung von reinen Sinusschwingungen gleicher Amplitude mit jeweils 50 mPa bei 1.3, 2.6, 3.9, 5.2, 6.5, 7.8, 9.1 und 10.4 Hz und die mittlere Zeitreihe basiert auf der Betrachtung von N-förmigen Druckimpulsen mit einer Dauer von 0,15 s und einer Amplitude von 100 mPa; beide synthetische Zeitreihen haben ein weißes Hintergrundrauschen mit 3 mPa RMS-Amplitude. Die untere Zeitreihe zeigt exemplarisch Signale, wie sie der spektralen Betrachtung in Abbildung 1 (blaue Kurve) zugrunde liegen. Alle Zeitreihen sind 1800 s lang und mit 100 Hz abgetastet. Einzelne Sinusschwingungen allein scheinen das Infraschall-Signal einer WEA nicht passend zu beschreiben, hingegen N-förmige Impulse. Dabei ist die spektrale Signatur der N-förmigen Impulse ausschließlich auf ihre stetige Wiederholung in einem konstanten zeitlichen Abstand zurückzuführen; ihr Signalspektrum selber ist breitbandig und hat eine Zentralfrequenz bestimmt durch den Kehrwert der Signaldauer.

**Zu (6):** Die in 2004 (siehe Pilger & Ceranna 2017) untersuchte WEA vom Typ Vestas V47 liefert ihrem Datenblatt entsprechend eine maximale nominelle elektrische Leistung von 660 kW. Die vom Betreiber während des Messzeitraums übermittelten Leistungsdaten stehen grundsätzlich im Einklang mit der Leistungskennkurve der Anlage gemäß Datenblatt. Leistungswerte von mehr als 80% der nominellen Maximalleistung wurden jedoch nicht erreicht. Es ergibt sich eine mittlere elektrische Leistung von 206 kW bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 8.15 m/s während des Betriebs mit maximaler Umdrehungszahl von 26 rpm (*revolutions per minute*).

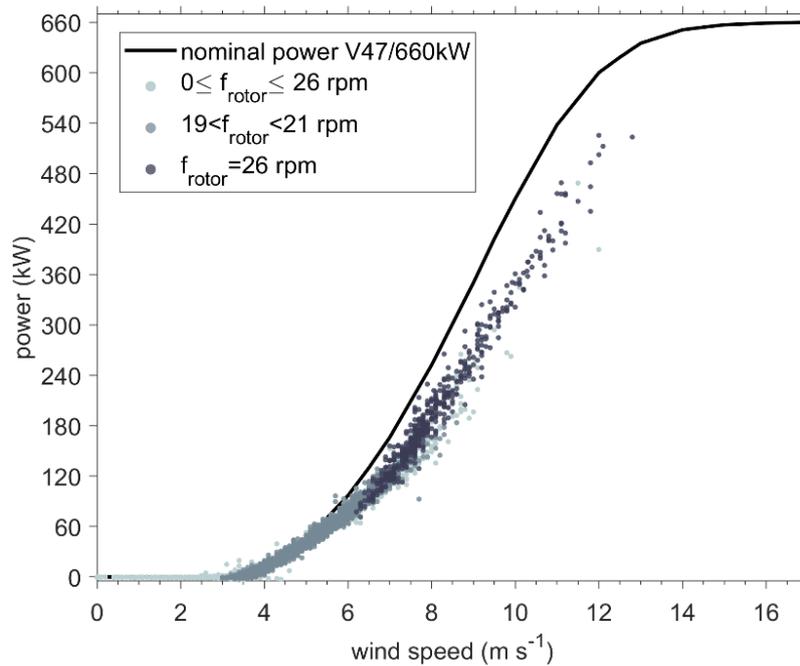


Abbildung 5: Darstellung der nominellen Leistung einer Vestas V47/660 als Funktion der Windgeschwindigkeit sowie die Werte der in 2004 untersuchten Anlage (Windgeschwindigkeit und elektrische Leistung) während der Zeit der Infraschall-Messungen (vgl. Pilger & Ceranna 2017).

**Zu (8):** Bei der Analyse von (Infra-)Schall-Daten kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung, um den spektralen Gehalt der Messdaten zu bewerten. Einen Überblick hierzu vermittelt unter anderem die Arbeit von Baumgart et al. (2021; <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116310>). In Abbildung 6 (links) sind beispielsweise drei Darstellungsformen von Leistungsdichtespektren als (a) in der Frequenz sehr fein aufgelöst, (b) gleitende Mittelwerte und (c) als bandweise Mittelwerte gezeigt. Diese drei Formen sind äquivalent, obwohl die jeweiligen Kurvenverläufe unterschiedlich sind und die spektralen Spitzen sich in Breite und Höhe unterscheiden. Bei einer Datenanalyse orientiert sich die Wahl der Darstellung an der zugrundeliegenden Fragestellung. Für die Untersuchungen der BGR zu Infraschall-Signalen von WEA haben sich in Bezug auf die Messaufgabe der BGR Leistungsdichtespektren mit einer möglichst feinen Auflösung im Frequenzbereich als zielführend erwiesen, da so präzise der akustische Fingerabdruck einer WEA mit seinen Flügelharmonischen nachgewiesen werden kann.

Um eine standardisierte Bewertung der Schalleistung oder -pegel vornehmen zu können, wurde in der Akustik die Betrachtung von Terz- und/oder Oktavbändern eingeführt, die nationalen und internationalen Normen (DIN-EN-ISO 266; vgl. [Normfrequenz – Wikipedia](#)) folgt. So fallen die Spektren in Terzbändern für die drei in Abbildung 6 gezeigten Leistungsdichtespektren annähernd zusammen (Abb. 6, rechts). Daher sind solche Darstellungen in Terz- oder Oktavbändern alleinig geeignet, um den Einfluss von Infraschall auf den Menschen zu bewerten. Für die von der BGR verwendete Darstellungsform der Leistungsdichtespektren mit einer feinen Auflösung im Frequenzbereich und hohen Amplitudenwerten in den Spitzen ist das nicht der Fall. Eine Verwendung für die Beurteilung des Einflusses von Infraschall auf den Menschen wäre irreführend, da diese Darstellungsform dafür ungeeignet ist.

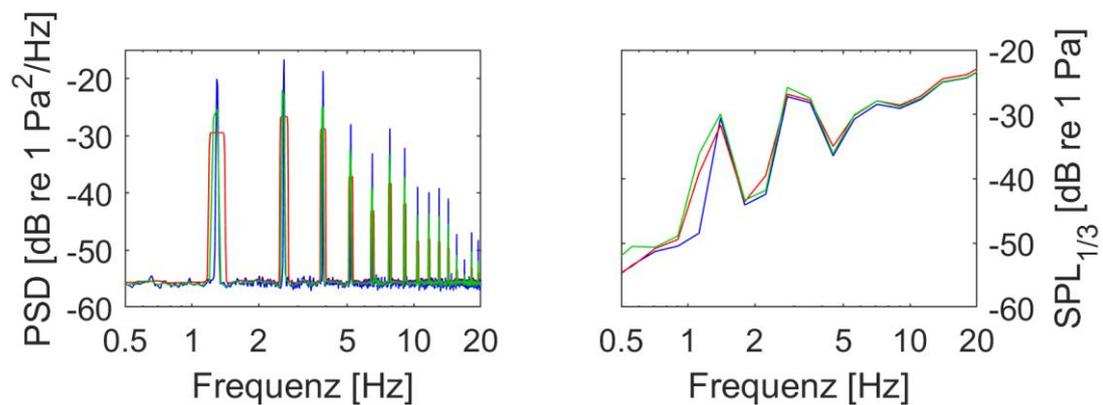


Abbildung 6: Verschiedene Darstellungen der Leistungsdichtespektren (PSD) und der zugehörigen Schalldruckpegel in Terzbändern ( $SPL_{1/3}$ ) für eine synthetische Zeitreihe mit 300 s Länge, wie in Abbildung 4 (Mitte links) gezeigt. Links: Leistungsdichtespektren für eine Fensterlänge mit 8192 Datenpunkten (blau) sowie die zugehörigen Spektren mit gleitender Mittelwertbildung über eine Fensterbreite von 0,2 Hz (rot) und eine Mittelwertbildung über Frequenzbänder mit einer Breite von 0,05 Hz (grün). Rechts: Bestimmung der Schalldruckpegel in Terzbändern (DIN-EN-ISO 266) für das originäre Leistungsdichtespektrum (blau) bzw. gemittelten Leistungsdichtespektren (rot und grün), die in ihren Verläufen gleich sind, unabhängig von den ursprünglichen Leistungsdichtekurven.