

Version 1, 12.04.2021

Version 2, 27.04.2021: Aktualisierungen zum Stand des Korrigendums beim JSV sowie bei den Abbildungen 2 und 3

„Infraschall und Windenergie“

BGR, Hannover, 27.04.2021

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 einen Mindestabstand von 15 km zu der Messanlage I26DE für den Bau von WEA 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 2016 folgte eine Publikation, die nach einem Peer Review in einem international anerkannten Fachjournal veröffentlicht wurde (Pilger & Ceranna; <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 unserem Verständnis sind damit sowohl

Messmethode als auch Ergebnisse zur Empfehlung von Störamplituden 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; [Infrasound of a Wind Turbine Reanalyzed \(arxiv.org\)](#)) sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB, März-2021;

[https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.6_schall/1.63/Stellungnahme_PTB - Pilger et all 2017.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.6_schall/1.63/Stellungnahme_PTB_-_Pilger_et_all_2017.pdf)) haben darauf hingewiesen, dass die Bestimmung der Schalldruckpegel der BGR zu hoch und damit fehlerhaft sei. Fachlich-wissenschaftliche Diskurse sind ein zentraler Baustein im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess. Entsprechend den Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis, 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 synthetischer Gesamtdarstellungen. Dem sieht sich die BGR als Ressortforschungseinrichtung verpflichtet. Entsprechend wurden aktuell die in der Vergangenheit bestimmten Ergebnisse und Empfehlungen von der BGR geprüft. Unsere Prüfungen kommen zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Die Registrierung von Infraschall-Signalen von WEA an hochempfindlichen Mikrobarometern ist noch in mehreren 10'er 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 2016 eine redigierte Publikation ihrer Messungen im Journal of Sound and Vibration (JSV) veröffentlicht, in der auch geeignete Mindestabstände für unbeeinträchtigte Messungen quantifiziert werden. Als Maß für die Stärke des Infraschalls einer WEA wurden in der Veröffentlichung Schalldruckpegel gezeigt. Diese enthalten jedoch einen systematischen Fehler und sind 36 dB zu hoch. Die BGR hat die Editoren von JSV kontaktiert, ein Korrigendum zu ihrer Publikation Pilger & Ceranna (2016) zu veröffentlichen, um auf diese Weise den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess zu unterstützen. Inzwischen liegt eine Reaktion hierzu sowie zum Diskussionsbeitrag von Baumgart et al. (2021) vor. Der Diskussionsbeitrag und die Replik von Pilger & Ceranna werden vom JSV in einer der kommenden Ausgaben parallel veröffentlicht. Die Überarbeitung des zugehörigen Berichts aus 2005 („Der unhörbare Lärm von Windkraftanlagen“) wird im Anschluss veröffentlicht werden.
3. Da die den BGR-Studien zugrundeliegenden Leistungsdichtespektren unbestritten und anerkannt sind, werden in diesen Überarbeitungen sowie zukünftigen Ausführungen ausschließlich diese spektrale Darstellungen herangezogen.
4. Die Schätzung der Störamplituden erfolgte mithilfe eines bei der NASA entwickelten Modells (siehe Pilger & Ceranna 2016), die mit Daten aus den Messungen in 2004 validiert wurden. Den Berechnungen des NASA-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 zweiten Quartal 2021 sind in Zusammenarbeit mit der PTB Messungen an modernen WEA mit elektrischen Leistungen im MW-Bereich angelaufen, um unter anderem auch das NASA-Modell weiter zu validieren. Dabei soll ferner der besondere Charakter der Störsignale von WEA weiter untersucht werden.
6. Die in den BGR-Studien untersuchte Windenergieanlage (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 Methoden lassen keine Rückschlüsse auf die Einwirkung von WEA-Infraschall auf Menschen zu.

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 (2016), 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 in der Regel die Störsignale einer WEA in den Infraschall-Aufzeichnungen nicht in solch 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) angestellt. 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 falsche Skalierung gewählt. Insgesamt sind die SPL-Kurven der BGR, wie sie in Pilger & Ceranna (2016) 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 (2016) 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.

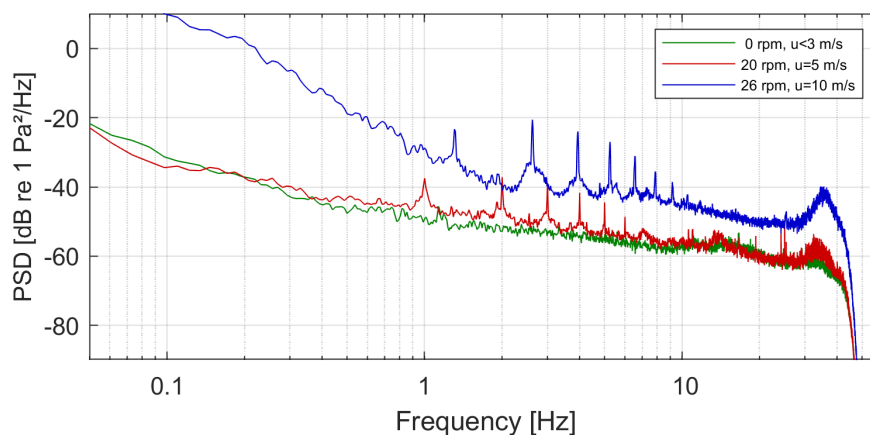


Abbildung 1: Darstellung der Leistungsdichtespektren (Power Spectral Density, PSD) in Analogie zu Abbildung 4 in Pilger & Ceranna (2016) anstelle der fehlerbehafteten Schalldruckpegel; diese korrekt bestimmten Spektren bildeten die Grundlage für die Bestimmung der SPL-Kurven.

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 2016) 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).

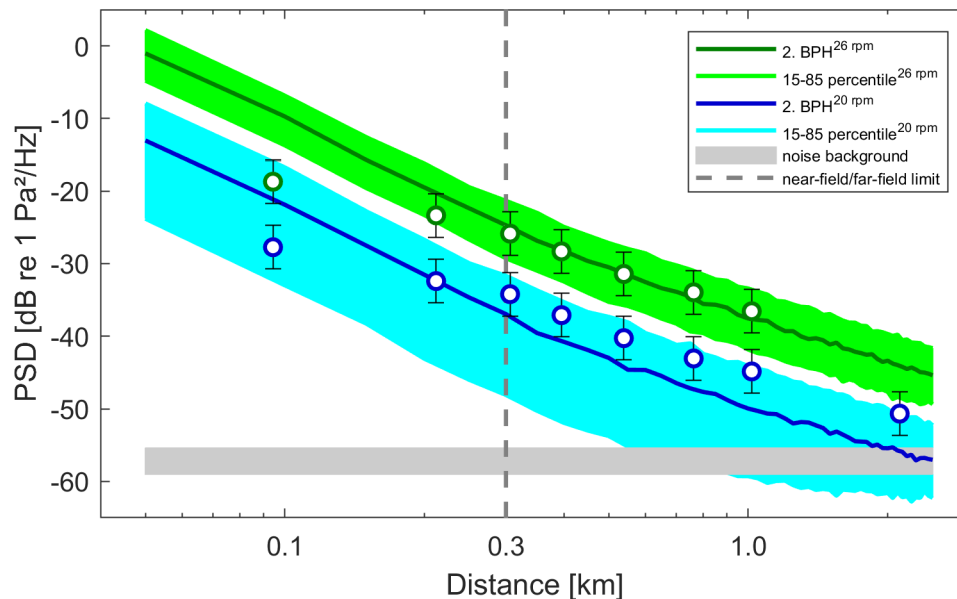


Abbildung 2: Vergleich der berechneten und gemessenen Werte der Leistungsdichtespektren (PSD) für die 2. Flügelharmonische (BPH - blade passing harmonic). Darstellung analog zu Abbildung 6 in Pilger & Ceranna (2016); hier mit Berücksichtigung der Unsicherheiten in Windgeschwindigkeit und Leistung für 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 hohe Umdrehungszahl (grün) ist aufgrund der stärkeren Störampplituden und der geringeren Variabilität besser als für die geringere Umdrehungszahl (blau). 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.

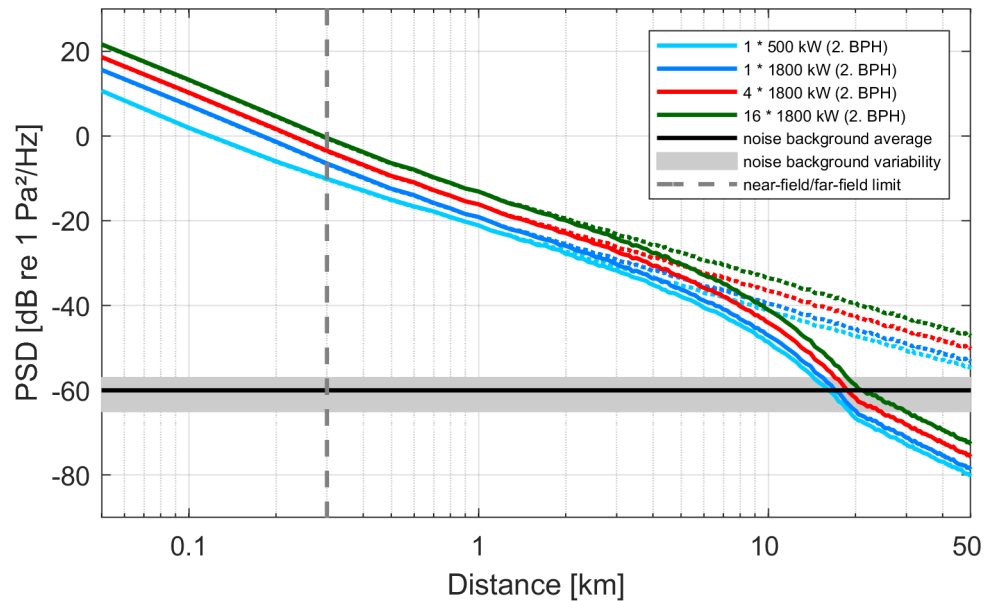


Abbildung 3: Darstellung der geschätzten maximalen Spitzen der Leistungsdichtespektren verschiedener WEA bzw. Windparks bei der Frequenz der 2. Flügelharmonischen (BPH) in Abhängigkeit zur Entfernung in Analogie zu Abbildung 8 in Pilger & Ceranna (2016). Die Referenz für das Hintergrundrauschen (schwarze 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, wird die BGR das Thema weiterbearbeiten. Die Planung und Durchführung neuer Messkampagnen an mehreren Standorten mit Windparks bestehend aus modernen WEA entlang von Profilen mit einer Länge von bis zu 4 km sind im 2. Quartal 2021 angelaufen. Dafür sind zwei Windparks mit insgesamt 25 WEA vorgesehen, davon neun WEA mit einer nominellen elektrischen Leistung von jeweils 0,9 MW und 16 WEA à 3,0 MW. Die Messkampagne wird dabei in Teilen von der PTB begleitet, die mit ihren eigenen Geräten (Mikrophone und Schalldruckpegelmesser) parallel zu den Mikrobarometern den Infraschall aufzeichnet. Nach Abschluss der Arbeiten werden alle Messdaten in einem *open access repository* der Öffentlichkeit zugänglich gemacht und zu einem späteren Zeitpunkt gemeinsam von BGR und PTB die Auswertungen auf Fachtagungen vorgestellt. 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.

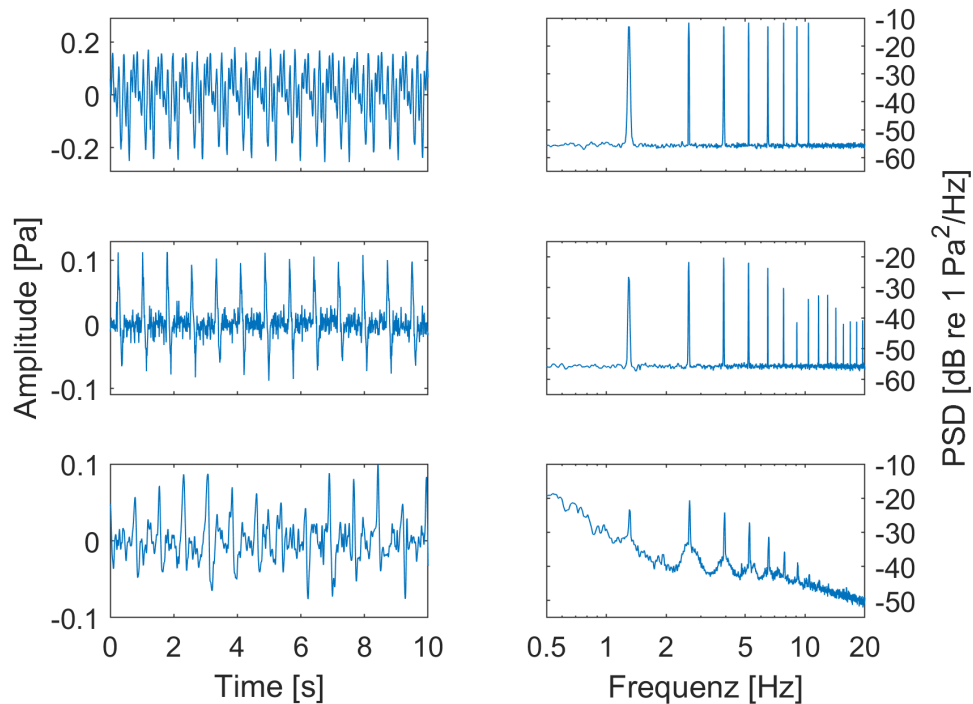


Abbildung 4: Links: Ausschnitte aus synthetischen Zeitreihen (oben und Mitte) und der Messung an einer einzelnen WEA aus 2004 (dritter Zeitraum aus Abbildung 4 in Pilger & Ceranna 2016) sowie rechts die zugehörigen gemittelten Leistungsdichtespektren (PSD, mit Hanning-Fenster und 8192 Datenpunkten). 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 2016) 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*).

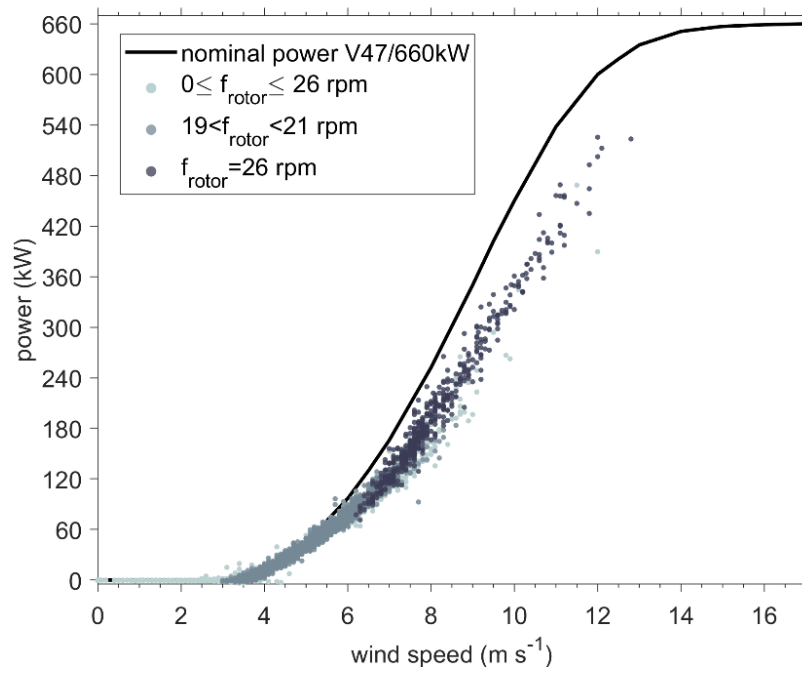


Abbildung 5: Darstellung der nominellen Leistung einer Vestas V47/660 als Funktion der Windgeschwindigkeit sowie die Werte der in 2004 untersuchten Anlage (Windgeschwindigkeit und elektrische Leistung) während der Zeit der Infrachall-Messungen (vgl. Pilger & Ceranna 2016).