

Müller-BBM Industry Solutions GmbH  
Niederlassung Hamburg  
Bramfelder Str. 110b  
22305 Hamburg

Telefon +49(40)692145 0  
Telefax +49(40)692145 11

[www.mbbm-ind.com](http://www.mbbm-ind.com)

Dipl.-Ing. Thierry Maquil  
Telefon +49(40)692145 168  
Thierry.Maquil@mbbm-ind.com

11. April 2024  
M177781/02 Version 1 MAQ/APK

## **Vorhaben Offshore-Windpark Gennaker**

### **Prognose der zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Betriebsphase**

**Bericht Nr. M177781/02**

Auftraggeber:	OWP Gennaker GmbH Stephanitorsbollwerk 3 (Haus LUV) 28217 Bremen
Bearbeitet von:	Dipl.-Ing. Thierry Maquil Dr. Andreas Müller Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wildemann
Berichtsumfang:	Insgesamt 25 Seiten, davon 23 Seiten Textteil, 2 Seiten Anhang.

Müller-BBM Industry Solutions GmbH  
Niederlassung Hamburg  
HRB München 86143  
USt-IdNr. DE812167190

Geschäftsführer:  
Joachim Bittner, Walter Grotz,  
Dr. Carl-Christian Hantschk,  
Dr. Alexander Ropertz

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Situation und Aufgabe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Berücksichtigte Unterlagen</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Kurzbeschreibung des geplanten Offshore-Windparks</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Akustische Metrik, Immissionsrichtwerte und Immissionsorte</b>	<b>8</b>
4.1	Einleitung	8
4.2	Akustische Metriken	8
4.3	Immissionsrichtwerte und Immissionsorte	9
<b>5</b>	<b>Berechnungsschritte zu Schallemission und Schallimmission</b>	<b>10</b>
5.1	Generelle Vorgehensweise	10
5.2	Berechnung des Schalldruckpegels in 100 m Entfernung	10
5.3	Definition eines anlagentypisches Frequenzspektrums	11
5.4	Kumulative Ausbreitungsdämpfung aller Windenergieanlagen des OWP	12
<b>6</b>	<b>Schallemission und Schallimmission</b>	<b>16</b>
6.1	Schallemission	16
6.2	Immissionsprognose	17
6.3	Gegenüberstellung des Betriebsschalls zum Hintergrundschall	18
6.4	Bewertung des Betriebsschalls für die Leistungsbereiche „mittel“ und „niedrig“	20
6.5	Prognosegenauigkeit	22
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>23</b>

**Anhang:** Schallausbreitungskarten – Betriebsschallimmissionen

## 1 Situation und Aufgabe

Die OWP Gennaker GmbH plant, die Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) zur Errichtung und zum Betrieb eines Energieparks *Offshore-Windpark Gennaker* im Wind-Vorrang-Gebiet „Darß“ zu beantragen. Geplant ist die Errichtung von 63 Windenergieanlagen (WEA) auf Monopiles auf einer Projektfläche von 44,2 km<sup>2</sup>.

Ein bereits genehmigtes Konzept des Vorhabens basiert auf der zum Planungszeitpunkt größtmöglichen Turbine der Fa. Siemens Wind Power SWT-8.0-154 mit einer Leistung von max. 8,4 MW inkl. Power Boost.

Aufgrund des rasanten technischen Fortschritts und sich kontinuierlich verändernder Marktbedingungen ist für die wirtschaftliche Projektumsetzung die Umplanung auf größere Turbinen der 15-Megawatt-Klasse unumgänglich.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nach BImSchG ist die schalltechnische Verträglichkeit des Vorhabens nachzuweisen. Entsprechend sollen in diesem Zusammenhang sowohl die während der Bauphase als auch die beim Betrieb des Offshore-Windparks *Gennaker* zu erwartenden Schallimmissionen gutachterlich prognostiziert werden.

Die Gutachten teilen sich in unterschiedliche Fachgebiete (Luftschall- und Wasserschallimmissionen) auf. In diesem Bericht werden die Unterwasserschallimmissionen während des Betriebes des Offshore-Windparks untersucht. In einem ersten Schritt werden typischen Betriebsschallimmissionen in Abhängigkeit von unter anderem der Leistung der Turbinen und verschiedenen Leistungsbereichen (Windklassen) prognostiziert. In einem zweiten Schritt werden die Schallimmissionen im Vergleich zum Umgebungslärm (Hintergrundpegel) beurteilt.

## 2 Berücksichtigte Unterlagen

- [1] OWP Gennaker GmbH (2023): Offshore-Windpark Gennaker, Projektbeschreibung OWP Gennaker 15 MW Layout.  
Dokument: GEN-PMT-FIL-Projektbeschreibung\_15MW\_R00.pdf.
- [2] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2013): Offshore-Windparks – Prognose für Unterwasserschall, Mindestmaß an Dokumentation, Bericht Nr. 100004/29, verfasst von Müller-BBM.  
<https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Suchausschluss/Offshore/Anlagen-DE/Ergaenzung-Offshore-Windparks.pdf?blob=publicationFile&v=5>
- [3] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2011), Offshore-Windparks: Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen, aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen, Anwendungshinweise, verfasst von Müller-BBM.  
[https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Suchausschluss/Offshore/Anlagen-DE/Messvorschrift\\_Unterwasserschallmessungen.pdf?blob=publicationFile&v=1](https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Suchausschluss/Offshore/Anlagen-DE/Messvorschrift_Unterwasserschallmessungen.pdf?blob=publicationFile&v=1)
- [4] ISO 1996: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedure.
- [5] ISO 1996: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels.
- [6] VDI 3723, Blatt 1 (1993) Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschmissionen.
- [7] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2013), Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4), Stand: Oktober 2013.  
<https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Offshore/Standards/Standard-Auswirkungen-Offshore-Windenergieanlagen-Meeresumwelt.html>
- [8] Thiele und Schellstede (1980): Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik.
- [9] Bellmann M.A., Brinkmann J., May A., Wendt T., Gerlach S. & Remmers P. (2020), Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Rammschall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), FKZ UM16 881500. Beauftragt und geleitet durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Auftrags-Nr. 10036866. Editiert durch die itap GmbH.  
<https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Projekte/Erfahrungsbericht-Rammschall.html>
- [10] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound. Los Altos: McGraw-Hill Ryerson, Limited, ISBN 9780070660878, 1983.

- [11] H. G. Urban, Handbuch der Wasserschalltechnik. Bremen: STN ATLAS Elektronik, ISBN 3936799024, 2002.
- [12] Fricke, M., Neddermann, B., Lübber, A. und Gabriel, J. (2014): Realistische Hydroschallszenarien auf der Basis von Prognosemodellen und Monitoring für den Bau von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (HyproWind).  
<https://www.fino1.de/de/forschung/archiv-ergebnisse/schalldruckpegel.html?file=files/forschung/schalldruckpegel/FKZ0325212-HyproWind.pdf>
- [13] OWP Gennaker GmbH (2023) Offshore Windpark Gennaker, Geotechnical log combined with laboratory.  
Dokument: *OWF Gennaker-Final-Field-Data-Report-Appendix A-Geotech Logs.pdf*.
- [14] OWP Gennaker GmbH (2022) Offshore Windpark Gennaker, Bathymetrie.  
Datei: GEN\_GEO\_BAT\_2022\_25cm\_DHHN\_25833.tif
- [15] The European Marine Observation and Data Network (EMODnet): EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2022), Mean Depth, Stand 17.01.24.  
<https://www.emodnet-bathymetry.eu/data-products>
- [16] Bellmann, M.A., Müller, T., Scheiblich, K. und Betke, K. (2023) Erfahrungsbericht Betriebsschall – Projektübergreifende Auswertung und Bewertung von Unterwasserschallmessungen aus der Betriebsphase von Offshore-Windparks, itap Bericht Nr. 3926, gefördert durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Fördernummer 10054419.  
[https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Umweltpruefung/Unterwasserschall/MarinEARS/Anlagen/Downloads/Betriebsschall\\_Erfahrungsbericht.html](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Umweltpruefung/Unterwasserschall/MarinEARS/Anlagen/Downloads/Betriebsschall_Erfahrungsbericht.html)
- [17] Tougaard, J., Hermannsen, L., Madsen P.T. (2020) How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *J. Acoust. Soc. Am.* 148 (5): 2885–2893.  
<https://doi.org/10.1121/10.0002453>
- [18] Müller, G. and Möser, M. (2013) Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Berlin, Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-18893-0>
- [19] Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1936–1956.
- [20] Basan, F., Fischer, J.-G. and Kühnel, D. (2021) Soundscapes in the German Baltic Sea Before and During the Covid-19 Pandemic. *Frontiers in Marine Science*, Vol.8 - 2021,  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.689860>.
- [21] Mustonen, M., Klausen, A., Andersson, M., Clorennec, D., Folegot, T., Koza, R. Pajala, J., Persson, L., Tegowski, J. Tougaard, J., Wahlberg, M. and Sigray, P. (2019) Spatial and Temporal Variability of Ambient Underwater Sound in the Baltic Sea. *Scientific Reports* 9, 13237.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48891-x>

- [22] Johansson, T. and Andersson, M.H. (2012) FOI Ambient Underwater Noise Levels at Norra Midsjöbanken during Construction of the Nord Stream Pipeline. FOI report: FOI-R—3469-SE.  
<https://www.foi.se/rapportsammanfattning?reportNo=FOI-R--3469--SE>

### 3 Kurzbeschreibung des geplanten Offshore-Windparks

Der geplante OWP *Gennaker* befindet sich im Wind-Vorrang-Gebiet „Darß“. Die Vorhabenfläche ist 44,2 km<sup>2</sup> groß. Die Wassertiefen variieren in diesem Gebiet zwischen 12,5 m und 20,0 m. In der Vorhabenfläche sollen 63 WEAs mit je 15 MW Leistung installiert werden. Abbildung 1 zeigt die geplanten WEA-Positionen im OWP *Gennaker* und gibt einen Überblick über die Lage des Windparks in der Ostsee.

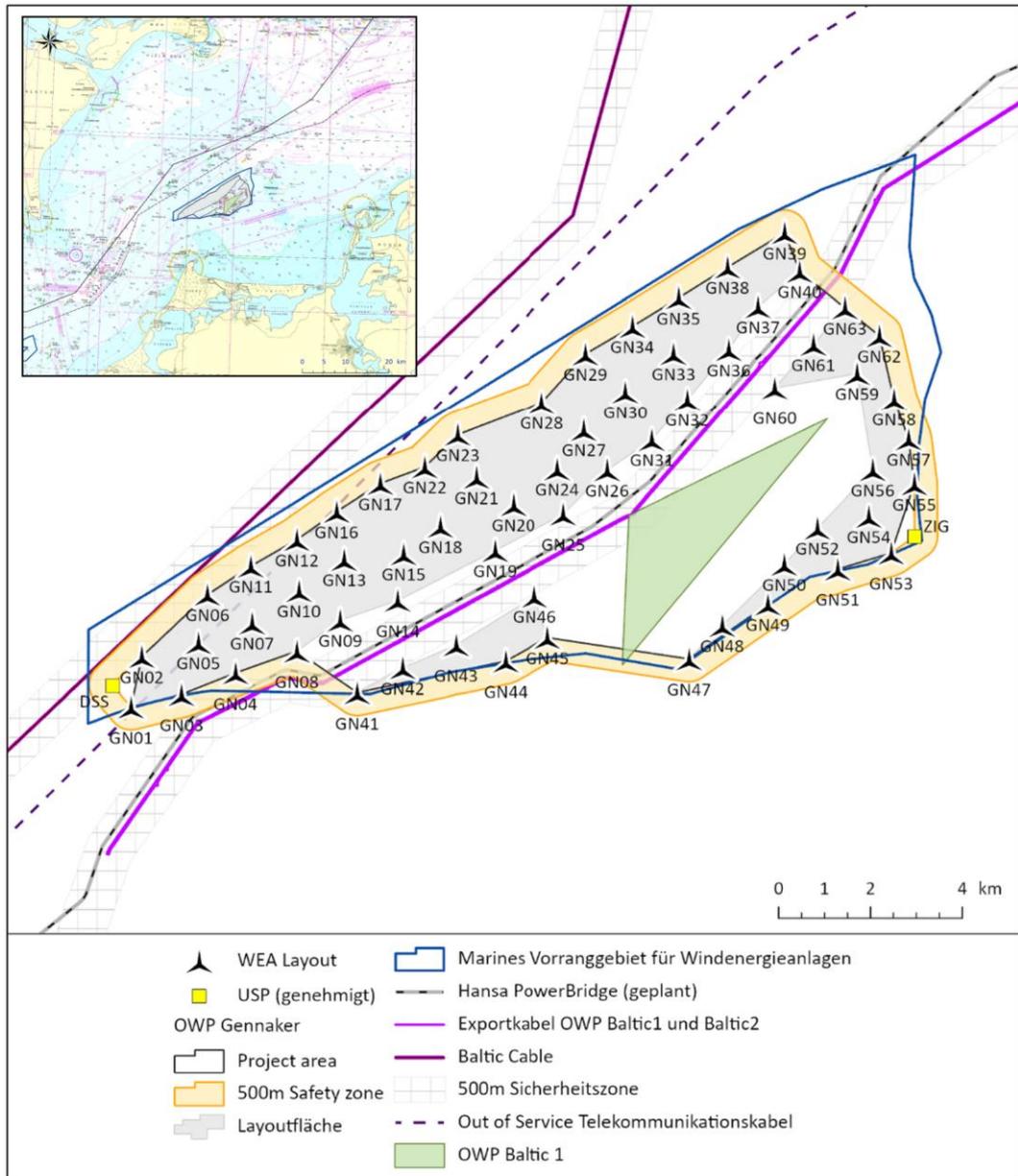


Abbildung 1: WEA-Positionen im geplanten OWP *Gennaker* mit Lage in der Ostsee [1].

\\S-HAM-FS01\ALLEFIRMEN\PROJ\17781\M177781\_02\_BER\_1D.DOCX:27.03.2024

## 4 Akustische Metrik, Immissionsrichtwerte und Immissionsorte

### 4.1 Einleitung

Für die ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) fordert die deutsche Zulassungsbehörde BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) für Offshore-Windenergieanlagen seit 2013 nach der Richtlinie [2], den durch den Betrieb eines Offshore-Windparks eingetragenen Unterwasserschall durch Prognoseberechnungen zu ermitteln.

Es sind für das Vorhaben OWP *Gennaker* ebenfalls die Richtlinien des BSH [2] anzuwenden, obwohl dieses in der 12-sm-Zone gelegen ist.

In Abschnitt 4.2 sind die notwendigen akustischen Metriken zusammengefasst, im Abschnitt 4.3 die Immissionsrichtwerte und Immissionsorte.

### 4.2 Akustische Metriken

Für die Betrachtung des Betriebslärms, siehe [2] und [3], gelten die nachstehend definierten Pegelgrößen:

- äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{eq}$  für kontinuierliche Schallsignale.

Die verwendeten Pegelgrößen lehnen sich an die Definitionen der ISO 1996-1 und ISO 1996-2 ([4] und [5]) an, sind aber nicht identisch mit diesen. So wird die Definition des  $L_{eq}$  ohne Frequenzbewertung vorgenommen.

#### Äquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq}$ (oder Schalldruckpegel)

ist definiert durch:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

wobei  $p(t)$  den Schalldruck,  $p_0$  den Bezugsschalldruck 1  $\mu\text{Pa}$  und  $T$  die Mittelungszeit darstellt<sup>1</sup>.

#### Mittelungspegel $L_{eq,5s}$ und akustische Überschreitungspegel (Perzentilpegel)

Zur Auswertung von Betriebsschallmessungen (nach [4]) werden die Mittelungspegel  $L_{eq,5s}$  mit einer Mittelungszeit von 5 s frequenz aufgelöst in 1/3-Oktavbändern (im deutschsprachigen Raum auch als *Terzbänder* bezeichnet) gebildet. Für jede Windklasse werden folgenden Perzentilpegel bestimmt:

- $L_{90}$ : Perzentilpegel, der bei 90 % der Messungen über die gesamte Messdauer überschritten wird.

<sup>1</sup> Laut ISO 1996-1 wird der äquivalente Dauerschallpegel auch mit dem Index  $T$  gekennzeichnet  $L_{eqT}$ .

- $L_{50}$ : Perzentilpegel, der bei 50 % der Messungen über die gesamte Messdauer überschritten wird.
- $L_{05}$ : Perzentilpegel, der bei 5 % der Messungen über die gesamte Messdauer überschritten wird.

#### Anmerkung: Terzsummenschallpegel (Breitbandpegel)

Der Gesamtpegel (z. B.  $L_{eq}$ ) kann aus der Summation der einzelnen Terzpegel eines Terzspektrums (1/3 Oktavspektrum) gemäß folgender Formel durch energetische Addition ermittelt werden:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10} \left( \sum 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

mit

$$L_i = \text{Terzpegel.} \quad (3)$$

### 4.3 Immissionsrichtwerte und Immissionsorte

Für die Betrachtung des Betriebslärms, siehe [2], werden folgende Immissionsorte verwendet:

- im Abstand von 100 m zur Schallquelle,
- in einer Entfernung von 1 km und 5 km außerhalb des Windparks.

Es wird der Schalldruckpegel für drei Leistungsbereiche prognostiziert:

- „niedrig“,
- „mittel“ und
- „hoch“ (Nennleistung).

Bei der Beurteilung des Unterwasserschalls während des Betriebes werden alle Anlagen kumulativ betrachtet.

Konkrete Lärmschutzwerte in Bezug auf Betriebsschallimmissionen sind nicht vorgegeben. Es soll ein Vergleich des Hintergrundschalls der Basisaufnahme mit dem Betriebsschall durchgeführt werden.

Messtechnisch kann dieser Vergleich durch Hintergrundschallmessungen vor Baubeginn mit anschließenden Betriebsschallmessungen nach Inbetriebnahme des OWP ermittelt werden, siehe [7].

## 5 Berechnungsschritte zu Schallemission und Schallimmission

### 5.1 Generelle Vorgehensweise

In der folgenden Prognose wird von Windenergieanlagen auf Monopiles mit einer Turbine ohne Getriebe mit einer Nennleistung von 15 MW ausgegangen.

Die Prognose bezieht sich auf die Schalleinträge der Windenergieanlagen des Offshore-Windparks *Gennaker* während des Betriebes. Schiffslärm durch allgemeinen Schiffsverkehr in der Nähe des Offshore-Windparks (zum Beispiel Schifffahrtsrouten) sowie Schiffslärm durch betriebsbedingten Serviceverkehr im Offshore-Windpark werden nicht betrachtet.

Nachfolgend wird beschrieben, wie die Prognose durchgeführt worden ist:

- Berechnung des Schalldruckpegels für eine WEA in 100 m Entfernung,
- Definition eines Spektrums in Abhängigkeit des Anlagentyps,
- kumulative Ausbreitungsberechnung aller WEAs des Offshore-Windparks unter Berücksichtigung der Bathymetrie und Bodenbeschaffenheit und des Hintergrundschalls.

### 5.2 Berechnung des Schalldruckpegels in 100 m Entfernung

Die Berechnung des Schalldruckpegels in 100 m Entfernung erfolgt basierend auf Messdaten von bestehenden Offshore-Windparks.

Gemessene breitbandige Schalldruckpegel in 100 m Entfernung von Windenergieanlagen ohne Getriebe (siehe u. a. [16]) zeigen, dass mit zunehmender Leistung (Leistungsbereich „niedrig“, „mittel“ zu „hoch“) die Schalldruckpegel ansteigen. Die Prognose erfolgt für den Leistungsbereich „hoch“ („worst case“-Betrachtung).

In Abbildung 2 sind gemessene Schalldruckpegel in 100 m Entfernung von WEA auf Monopiles im Betrieb bei Nennleistung (Leistungsbereich „hoch“) zusammengefasst. Messdaten, welche explizit Windenergieanlagen ohne Getriebe zuzuordnen sind, sind gesondert gekennzeichnet. Es liegen Daten für Windenergieanlagen bis zu einer Nennleistung von 7 MW vor. Für Windenergieanlagen mit einer höheren Nennleistung ist eine Extrapolation notwendig. In dieser Prognose wird diese Extrapolation nach folgender Gleichung durchgeführt:

$$L_{\text{eq}} = L_{\text{eq,WEAref}} + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{Leistung}}{\text{Leistung}_{\text{WEAref}}} \right) \quad \text{dB re } 1\mu\text{Pa} \quad (4)$$

Dabei ist:

$L_{\text{eq,WEAref}}$  ein gemittelter Schalldruckpegel von möglichst identischen Windenergieanlagen (Referenzwindenergieanlagen),

$\text{Leistung}_{\text{WEAref}}$  die Leistung der Referenzwindenergieanlagen.

Hinweis: Eine Leistungsskalierung nach einem  $10 \cdot \log_{10}(\text{Leistung})$ -Gesetz ist ein Berechnungsansatz für Schalldruckpegel, siehe [18].

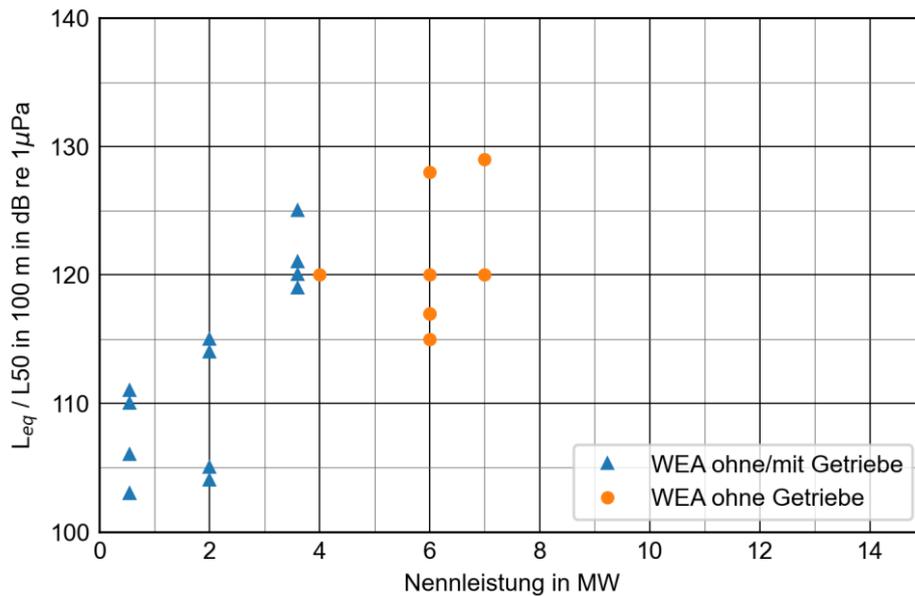


Abbildung 2: Zusammenfassung breitbandiger Schalldruckpegel von WEA auf Monopiles im Betrieb bei Nennleistung in einem Messabstand von 100 m, aus [16] und [17].

### 5.3 Definition eines anlagentypisches Frequenzspektrums

Im Betrieb von WEA verursachen der drehende Rotor und der Generator mechanische Schwingungen, welche über die Gründungsstruktur als Schall teilweise ins Wasser abgestrahlt werden. Durch die drehende (sinusförmige) Anregung ist der Schalleintrag ebenfalls periodisch und zeigt schmalbandige Pegelspitzen.

Abbildung 3 zeigt 1/3-Oktavspektren einer Windenergieanlage ohne Getriebe auf einem Monopile im Betrieb bei Nennleistung. Die schmalbandige, pegelbestimmende Komponente befindet sich für dieses Beispiel im 25 Hz-1/3-Oktavband und im 50 Hz-1/3-Oktavband (harmonische Schwingung). In Dokument [16] sind, neben Anlagen neueren Baujahres mit pegelbestimmender Komponente im 25 Hz-1/3-Oktavband, weitere Anlagen ohne Getriebe mit pegelbestimmender Komponente im 80 Hz-1/3-Oktavband genannt.

Gemessene Schalldruckpegel zeigen ab ca. dem 250 Hz-1/3-Oktavband keine breitbandigen Unterschiede zu den Hintergrundpegeln, siehe Dokument [16]. Daher wird in dieser Prognose ab dem 250 Hz-1/3-Oktavband das Frequenzspektrum an das Frequenzspektrum des Hintergrundpegels angenähert.

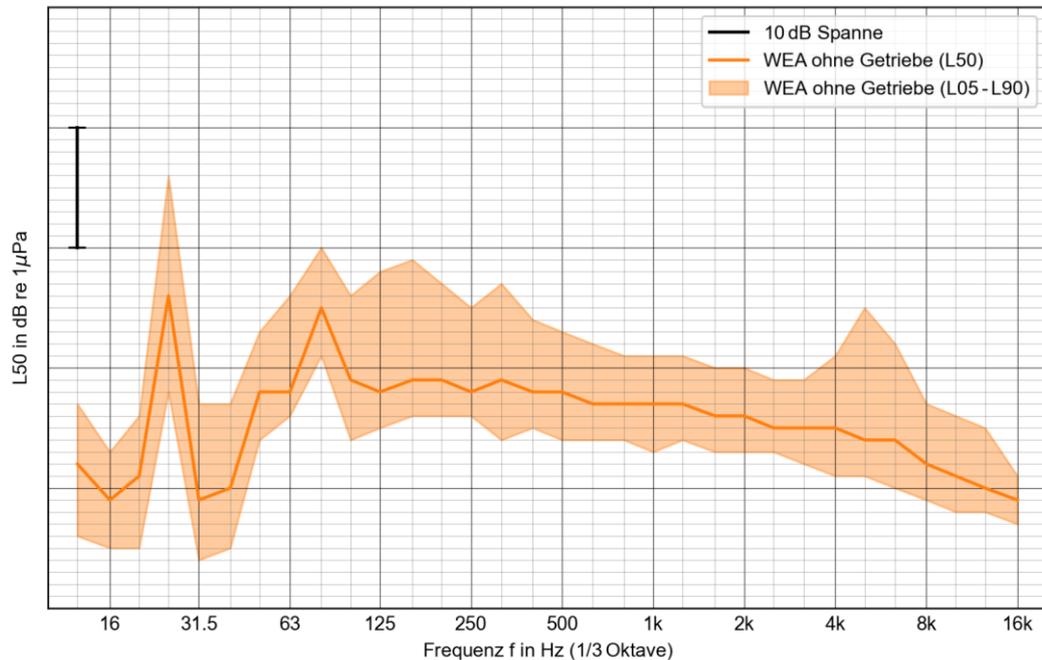


Abbildung 3: 1/3-Oktavspektrum einer WEA ohne Getriebe auf Monopile im Betrieb bei Nennleistung aus [16].

Das Frequenzspektrum, WEA ohne Getriebe ( $L_{50}$  in obiger Abbildung) mit Annäherung an die Hintergrundpegel bei hohen Frequenzen, wird mit dem berechneten Schalldruckpegel in 100 m so kombiniert, dass der Summenpegel des Frequenzspektrums dem des Schalldruckpegels in 100 m entspricht.

## 5.4 Kumulative Ausbreitungsdämpfung aller Windenergieanlagen des OWP

### 5.4.1 Vorgehensweise

Für die im Abschnitt 6.2 dargestellte Schallausbreitungskarte wird die Ausbreitungsdämpfung nach Formel (5) aus Abschnitt 5.4.2, unter Beachtung der in Abschnitt 5.4.3 dargestellten Bathymetrie und Bodenbeschaffenheit, mittels der dargestellten Grenzfrequenz der Schallausbreitung berechnet.

Alle Windenergieanlagen des Offshore-Windparks werden mit dem gleichem Quellspektrum im Betrieb bei Nennleistung simultan betrachtet. Diese Betrachtung ist in Dokument [2] vorgegeben und wird als "worst-case" Szenario angesehen.

In den Schallausbreitungskarten wird der Summenpegel des Terzspektrums an jedem Ort dargestellt. Die einzelnen Terzpegel an jedem Ort berechnen sich aus den Terzpegeln der Quellspektren abzüglich der jeweiligen Ausbreitungsdämpfung in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Quelle und dem Ort sowie in Abhängigkeit von der Bathymetrie und Bodenbeschaffenheit an jedem Ort.

### 5.4.2 Schallausbreitung

Für die Schallausbreitung im Wasser sind insbesondere zwei Faktoren von Bedeutung: 1) Die Wassertiefe auf dem Ausbreitungsweg zwischen Schallquelle und Immissionsort bestimmt die Stärke der lokalen Ausbreitungsdämpfung. 2) Die Entfernung zwischen Schallquelle und Immissionsort bestimmt die Länge des Ausbreitungsweges und damit die resultierenden Schallpegel.

Zur Beschreibung der ausbreitungsabhängigen Abnahme der Schallintensität oder des Schalldrucks wird die Ausbreitungsdämpfung (oder der Ausbreitungsverlust) verwendet. In der Unterwasserakustik ist dies die Abnahme der Schallintensität oder des Schalldrucks zwischen zwei Messpunkten, angegeben in Dezibel. Im vorliegenden Fall ist das die Schalldruck-Pegeldifferenz zwischen zwei Messpunkten im Schallfeld.

In [8] sind Näherungsformeln zur Berechnung der Schallausbreitung für verschiedene Gebiete der Nordsee für „glatte“ und für „raue“ See publiziert. Bei Offshore-Arbeiten wird von günstigen Wetterbedingungen ausgegangen. Daher wird hier die Ausbreitungsdämpfung für „glatte“ See (llg) verwendet:

$$TL = (16,07 + 0,185 \cdot F) \cdot (\log_{10}(R) + 3) + (0,174 + 0,046 \cdot F + 0,005 \cdot F^2) \cdot R \quad (5)$$

Dabei sind:

$TL$	Ausbreitungsdämpfung (engl. Transmission Loss) in dB,
$F$	$F = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{f}{1\text{kHz}}\right)$ ,
$R$	Entfernung zur Schallquelle in km,
$f$	Frequenz in Hz.

Anmerkung:

Strenggenommen gilt diese Gleichung nur für winterliche Bedingungen mit guter Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil in der Nordsee. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Formel (5) im Vergleich mit Messdaten eine gute Näherung ist, siehe [9].

Die Berechnung der Ausbreitungsdämpfung (Schalldruckpegel in den Schallkarten) wurde in dieser Prognose nach Formel (5) durchgeführt unter Berücksichtigung der Ausbreitungseigenschaften aufgrund Bathymetrie und Boden, siehe folgenden Abschnitt 5.4.3.

### 5.4.3 Bathymetrie und Bodenbeschaffenheit

Die Wassertiefe hat einen Einfluss auf die Ausbreitung des Wasserschalls. Abhängig von der Wassertiefe ist unterhalb einer Grenzfrequenz („Cut-off-Frequenz“) keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich. Je flacher das Gewässer, desto höher ist die Grenzfrequenz. Weiterhin spielt die Bodenbeschaffenheit eine wichtige Rolle und kann über folgende Gleichung (6) aus [10] abgeschätzt werden.

$$f_0 = \frac{c_{\text{Wasser}}}{4h} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - (c_{\text{Wasser}}/c_{\text{Boden}})^2}} \quad \text{Hz} \quad (6)$$

Dabei sind:

$f_0$	die Grenzfrequenz in Hz,
$h$	die Wassertiefe in m,
$c_{\text{Wasser}}$	die Schallgeschwindigkeit von Wasser: 1500 m/s,
$c_{\text{Boden}}$	die Schallgeschwindigkeit vom Boden in m/s.

Typische Kenndaten für sandige Böden sind in [11] gegeben. Die gesamte Metrik ist in [12] zusammengefasst. Der Verlauf der Grenzfrequenzen für verschiedene Sandarten ist in Abbildung 4 dargestellt. Weiter ist in Abbildung 4 die Abhängigkeit für einen schallharten Boden dargestellt.

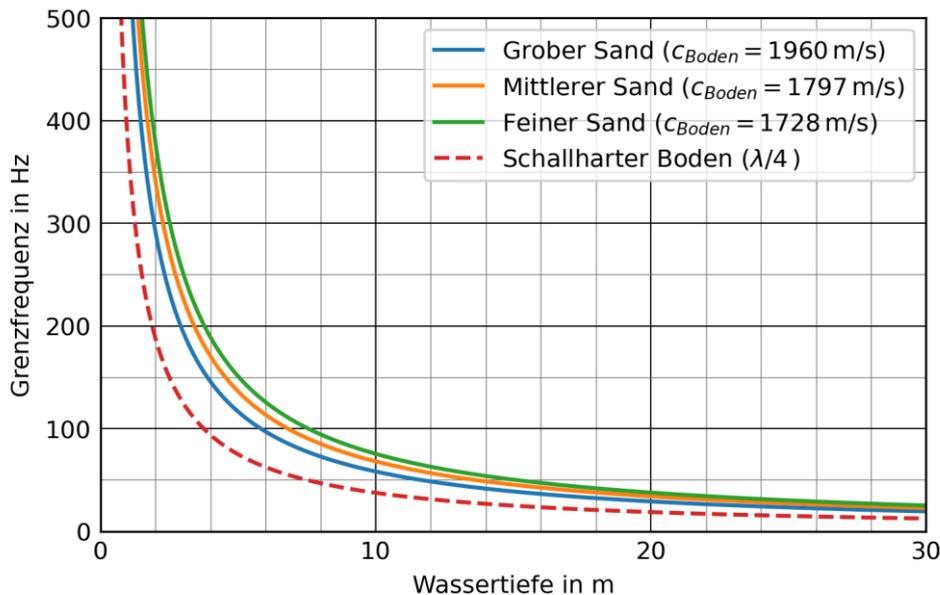


Abbildung 4: Grenzfrequenz für Sandböden in Abhängigkeit der Wassertiefe.

Die Grenzfrequenz ist eine Funktion der Wassertiefe und der Bodeneigenschaften: Im Wasser über schallharten Böden sind die Schallwellen nicht ausbreitungsfähig, wenn ein Viertel der Wellenlänge größer als die Wassertiefe ist. Die vorliegenden Bodenanalysen des geplanten Offshore-Windparks [13] zeigen als erste Bodenschicht über eine Tiefe von im Mittel 20 – 30 m einen Sandboden mit unterschiedlichen Körnungen auf. Im Rahmen dieser Prognose wurde ein Boden bestehend aus mittlerem Sand gemäß Abbildung 4 berücksichtigt.

Im Prognosegebiet liegen unterschiedliche Wassertiefen vor und folglich auch unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf die Ausbreitung des Wasserschalls. Zur Erstellung der Schallausbreitungskarten werden projektspezifische Bathymetrie-Daten [14] und öffentlich zugängliche Bathymetrie-Daten von EMODnet [15] verwendet, siehe Abbildung 5.

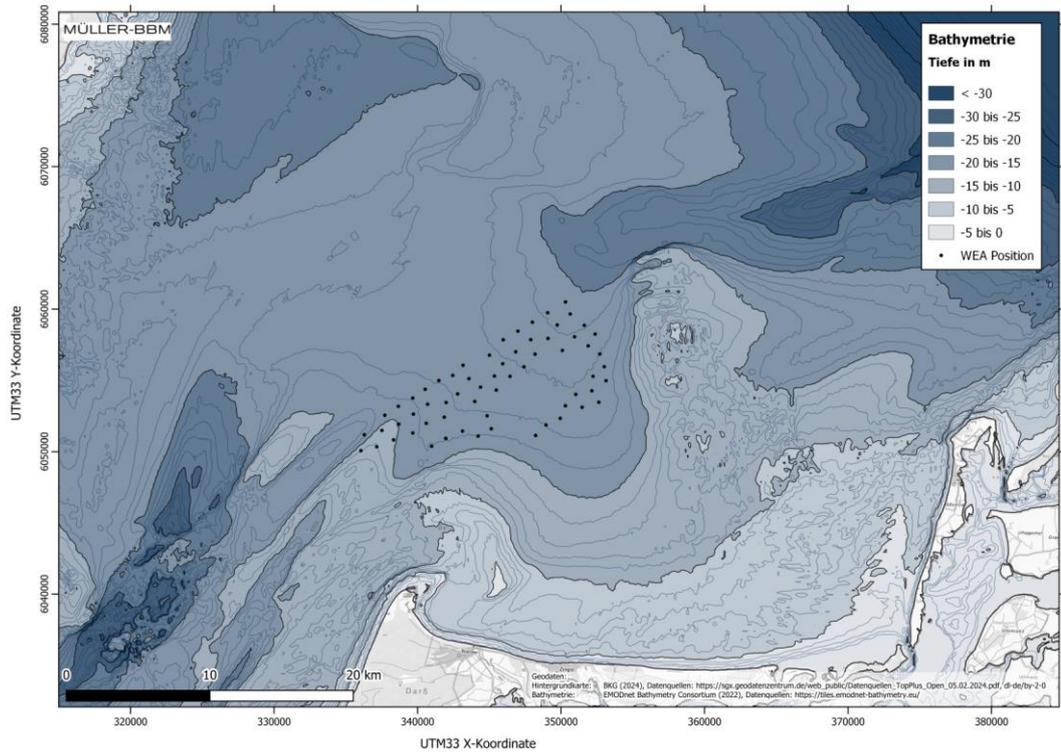


Abbildung 5: Bathymetrie im Berechnungsgebiet der Schallausbreitung [15].

\\S-HAM-FS01\ALLEFIRMEN\PROJ177\M177781\02\_BER\_1D.DOCX:27.03.2024

## 6 Schallemission und Schallimmission

### 6.1 Schallemission

Die Prognose ergibt für eine Windenergieanlage mit einer Nennleistung von 15 MW im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ in 100 m Entfernung zur Schallquelle einen Schalldruckpegel von 128 dB re 1µPa. Abbildung 6 stellt die Bestimmung des Schalldruckpegels entsprechend dem Ansatz aus Abschnitt 5.2, nach Gleichung (4), schematisch dar.

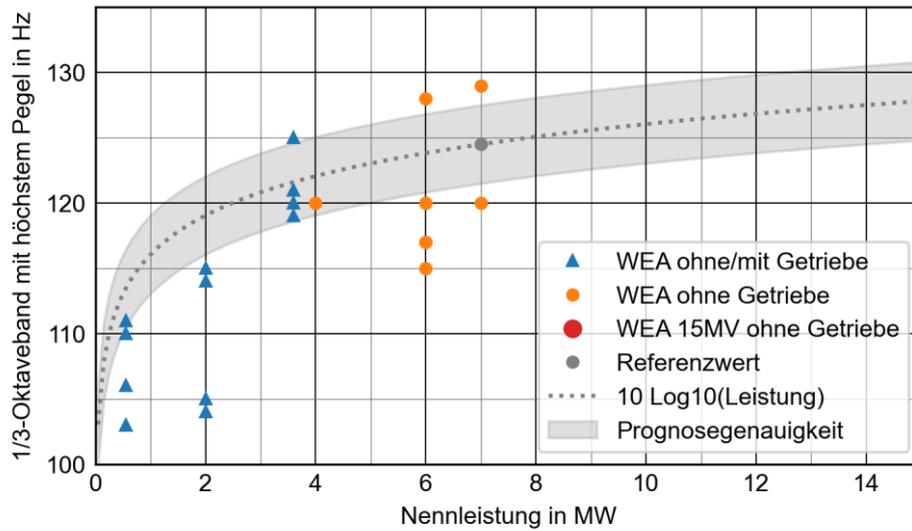


Abbildung 6: Darstellung des Ansatzes zur Bestimmung des Schalldruckpegels von einer WEA mit einer Nennleistung von 15 MW im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ in 100 m Entfernung zur Schallquelle.

Das berechnete Quellspektrum für eine einzelne Windenergieanlage mit 15 MW Nennleistung ist in Abbildung 7 dargestellt.

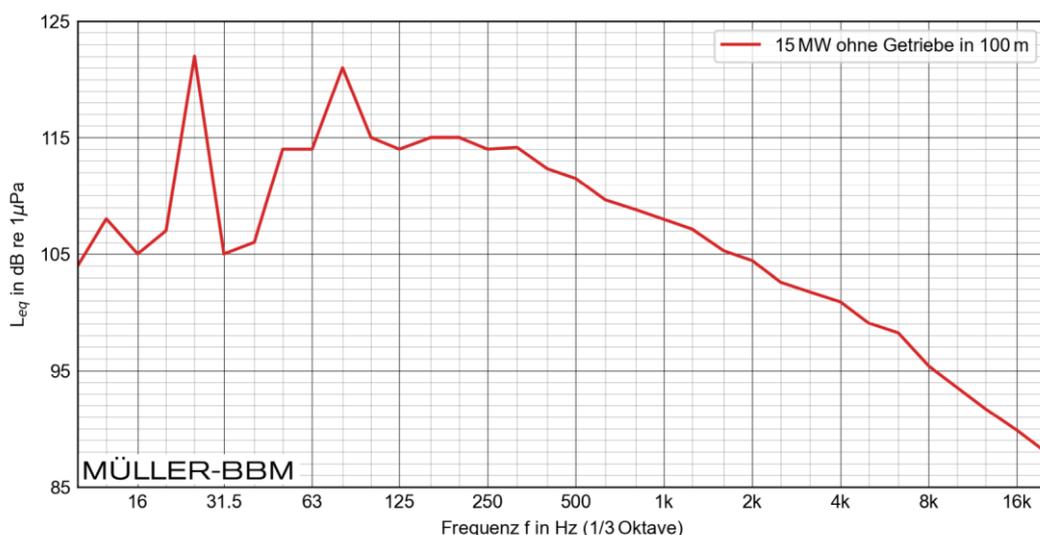


Abbildung 7: Prognostiziertes Quellspektrum für eine Windenergieanlage ohne Getriebe mit einer Nennleistung von 15 MW in 100 m Entfernung zur Schallquelle.

## 6.2 Immissionsprognose

Für die Immissionsprognose werden alle 63 Windenergieanlagen des Offshore-Windparks *Gennaker* mit dem gleichem Quellspektrum im Betrieb bei Nennleistung 15 MW (Abbildung 7) simultan betrachtet. Die Positionen der 63 Windenergieanlagen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 8 zeigt die Schallausbreitung der Betriebsschallprognose für den Offshore-Windpark *Gennaker*. Im Anhang ist die Schallausbreitung der Betriebsschallprognose als größere Abbildung dargestellt.

### Hinweis:

Die Schallausbreitung der Betriebsschallprognose stellt ausschließlich den Schallbeitrag des Offshore-Windparks *Gennaker* dar und beinhaltet keine weiteren Schallbeiträge wie den Hintergrundpegel des Meeres inklusive Schiffsverkehr und/oder den Betriebsschall des Windparks *Baltic 1*.

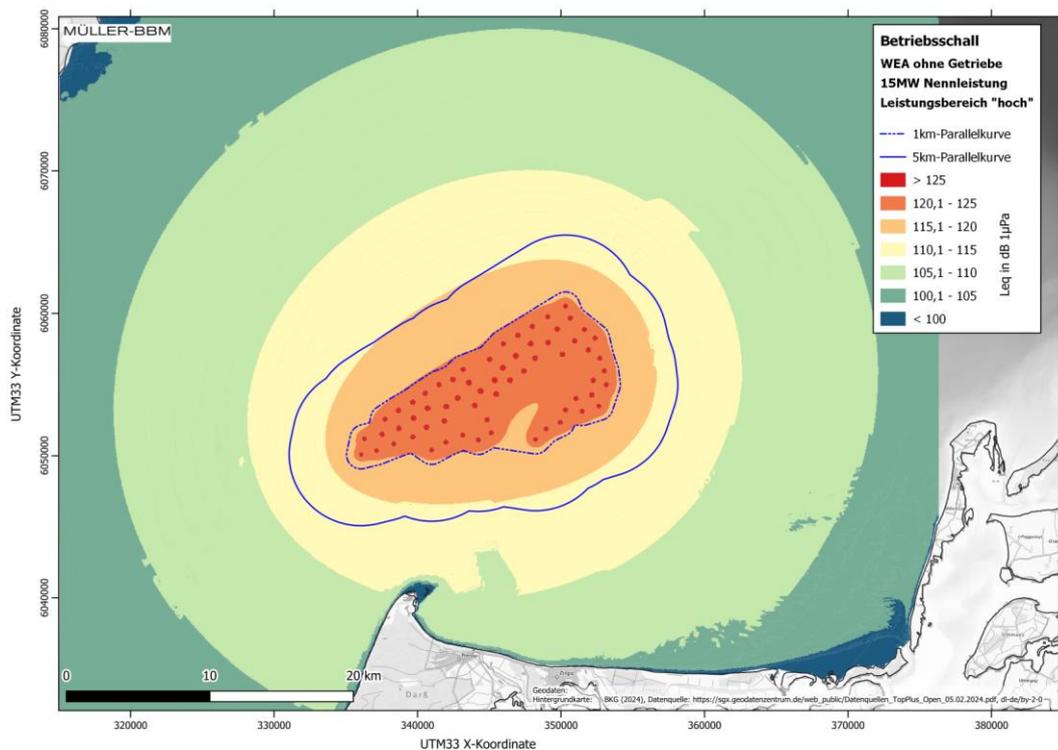


Abbildung 8: Schallausbreitung der Betriebsschallprognose für den OWP *Gennaker* mit 63 Windenergieanlagen im Betrieb bei Nennleistung 15 MW (ohne weitere Schallbeiträge).

In den folgenden Entfernungen zum Windpark *Gennaker* (Parallelkurven um den Windpark, siehe Abbildung 8) ergibt die Betriebsschallprognose

- Abstand 1 km: Schalldruckpegel von 117 dB bis 120 dB, Mittelwert 119 dB,
- Abstand 5 km: Schalldruckpegel von 111 dB bis 115 dB, Mittelwert 113 dB,

re 1 µPA. Die Streuungen der Schalldruckpegel je Abstand resultieren aus den Positionen der Windenergieanlagen und der Bathymetrie um den Windpark.

### 6.3 Gegenüberstellung des Betriebsschalls zum Hintergrundschall

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Prognose liegen für den Hintergrundpegel (Vorbelastung) keine Messdaten aus dem beplanten Meeresbereich vor. Zur Gegenüberstellung des Betriebsschalls des Windparks *Gennaker* zum Hintergrundschall werden im folgenden Abschnitt mögliche Hintergrundpegel dargelegt.

Es können Hintergrundpegel im Meer ohne anthropogene Einflüsse, bekannt als Wenz-Kurven [19], verwendet werden (konservative Betrachtung). Es liegen Kurven für verschiedene Seegänge bzw. Windgeschwindigkeiten vor. Für diese Prognose zum Leistungsbereich „hoch“ mit Windgeschwindigkeiten größer als 12 m/s (siehe Tabelle 1) können Hintergrundpegel entsprechend einem Seegang 4 und Seegang 5 (SS4 und SS5) gewählt werden.

Tabelle 1. Typische Windklassen für die 15 MW WEA.

Windklasse	Leistungsbereiche [% der Nennleistung]	Windgeschwindigkeits- bereiche [m/s]
Niedrig	< 5	< 5
Mittel	5 bis 95	5 – 12
Hoch	> 95	> 12

Gemessene Schalldruckpegel in der Ostsee sind unter anderem in den Dokumenten [20], [21] und [22] publiziert. Die Dokumente [20] und [21] stellen Messergebnisse von Messstationen in der AWZ an Schifffahrtsrouten – Fehmarn Belt (westlich der Vorhabenfläche) und Arkona-Becken (östlich der Vorhabenfläche) – dar. Dokument [22] zeigt Messdaten aus dem Seegebiet „Norra Midsjöbanken“ (außerhalb der AWZ, mittig in der Ostsee).

Die Medianpegel bzw. 50 %-Perzentilpegel beinhalten nicht nur den natürlichen Hintergrundschalldruckpegel, sondern auch Beiträge durch unter anderem Schiffsverkehr (Vorbelastungen). Je intensiver der Schiffsverkehr im Umfeld der Messposition, desto höher liegt der 50 %-Perzentilpegel des Hintergrundschalldruckpegels.

Die 90 %-Perzentilpegel beschreiben die 10 % leisesten gemessenen Schalldruckpegel und bilden den Hintergrundschalldruckpegel ohne nahen Schiffsverkehr an der jeweiligen Messstation ab.

Tabelle 2 fasst die Hintergrundschalldruckpegel in tabellarischer Form zusammen. Die Hintergrundschalldruckpegel ohne nahen Schiffsverkehr schwanken zwischen 102 dB und 112 dB re 1  $\mu$ Pa. Die Hintergrundschalldruckpegel bei direktem Einfluss von Schifffahrtsrouten liegen in diesen Beispielen zwischen 113 dB bis 127 dB re 1  $\mu$ Pa.

Ergänzend ist in Tabelle 2 die Vorbelastung durch den Offshore-Windpark *Baltic 1* dargestellt. Der Windpark *Baltic 1* liegt mittig in der Vorhabenfläche des Offshore-Windparks *Gennaker* und ist bereits seit 2011 in Betrieb. Er besteht aus 21 Windenergieanlagen auf Monopiles mit Turbinen des Anlagentyps Siemens SWT-2.3-93 (mit Getriebe). In Dokument [16] sind Betriebsschallmessdaten für diesen Anlagentyp im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ in 100 m Entfernung zur Schallquelle mit einem Schalldruckpegel von 123 dB re 1 µPa dokumentiert. Die höchsten Pegel befanden sich hierbei in dem 63 Hz-1/3-Oktavband.

Der gleichzeitige Betrieb beider Windparks bewirkt, dass sich an einzelnen Immissionsorten die prognostizierten Schalldruckpegel (Abbildung 8) um maximal 1 dB erhöhen. Deswegen wird die Vorbelastung durch den Windpark *Baltic 1* in dieser Prognose vernachlässigt.

Tabelle 2. Zusammenfassung von veröffentlichten Hintergrundschallpegeln in der Ostsee.

Name (Quelle)	Pegel in dB re 1 µPa
Hintergrundpegel im Meer ohne anthropogene Einflüsse (Wenz-Kurven, [19])	99 (Seegang SS4) 102 (Seegang SS5)
Fehmarn Belt: Messtation an Schifffahrtsroute, [20] und [21]	112* <sup>1</sup> (ohne nahen Schiffsverkehr) 127* <sup>2</sup> (mit Schiffsverkehr)
Arkona-Becken: Messtation an der Schifffahrtsroute zwischen Stettin und Ystad auf Höhe Arkona-Becken, [20] und [21]	102* <sup>1</sup> (ohne nahen Schiffsverkehr) 113* <sup>2</sup> (mit Schiffsverkehr)
Norra Midsjöbanken: Hintergrundmessungen während Bau der Nord Stream Pipeline, [22]	105* <sup>1</sup> (ohne nahen Schiffsverkehr) 117* <sup>2</sup> (mit Schiffs- und Baulärm)
WEA <i>Baltic 1</i> : Einzelne WEA des Anlagentyps Siemens SWT-2,3-93, [16]	123 (in 100 m Abstand)

\*<sup>1</sup> 90 %-Perzentilpegel; \*<sup>2</sup> 50 %-Perzentilpegel

In dieser Gegenüberstellung werden die prognostizierten Schalldruckpegel vom Windpark *Gennaker* im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ mit den Hintergrundschalldruckpegeln von der Messstation Arkona-Becken mit Schiffsverkehr verglichen, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3. Prognostizierte Schalldruckpegel vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ und Hintergrundschalldruckpegel gemessen an der Messstation Arkona-Becken mit Schiffsverkehr (50 %-Perzentilpegel).

Abstand	<i>Gennaker</i> („hoch“)	Arkona-Becken
1 km	119 dB re 1 µPa	113 dB re 1 µPa
5 km	113 dB re 1 µPa	

In größeren Abständen (> 5 km) werden die Schalleinträge vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb durch diese Hintergrundgeräusche maskiert.

\\S-HAM-FS01\ALLEFIRMEN\PROJ\177\MM177781\02\_BER\_1D.DOCX:27.03.2024

#### 6.4 Bewertung des Betriebsschalls für die Leistungsbereiche „mittel“ und „niedrig“

Die Prognose erfolgt für den Leistungsbereich „hoch“ („worst case“-Betrachtung). Im folgenden Abschnitt wird ergänzend der Betriebsschall durch den Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb für die Leistungsbereiche „mittel“ und „niedrig“ dargelegt.

Für Windenergieanlagen ohne Getriebe im Betrieb wird der Schalldruckpegel für weitere Leistungsbereiche mittels einer Korrektur der Werte für den Leistungsbereich „hoch“ (Nennleistung) berechnet. Die Korrektur erfolgt nach einem  $10 \cdot \log_{10}(\text{Leistung})$ -Gesetz, vergleiche Abschnitt 5.2, nach Gleichung (4).

Die Prognose ergibt für eine Windenergieanlage ohne Getriebe mit einer Nennleistung von 15 MW im Betrieb in 100 m Entfernung zur Schallquelle Schalldruckpegel von

- 125 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  im Leistungsbereich „mittel“ (50 %Nennleistung),
- 115 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  im Leistungsbereich „niedrig“ (5 %Nennleistung).

Die Betriebsschallprognose ergibt für den Leistungsbereich „mittel“ (50 % Nennleistung):

- Abstand 1 km: Schalldruckpegel von 114 dB bis 117 dB, Mittelwert 116 dB,
- Abstand 5 km: Schalldruckpegel von 108 dB bis 112 dB, Mittelwert 110 dB,

und für den Leistungsbereich „niedrig“ (<5 % Nennleistung):

- Abstand 1 km: Schalldruckpegel von 104 dB bis 107 dB, Mittelwert 106 dB,
- Abstand 5 km: Schalldruckpegel von 98 dB bis 102 dB, Mittelwert 100 dB,

re 1  $\mu\text{Pa}$ .

Die Leistungsbereiche von Windenergieanlagen entsprechen verschiedenen Windklassen (siehe Tabelle 1). Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Prognose liegen für den Hintergrundpegel keine Messdaten für verschiedene Windklassen aus dem beplanten Meeresbereich vor. Zur Bewertung des Betriebsschalls im Vergleich zum Hintergrundschall wird für die Leistungsbereiche „mittel“ und „niedrig“ folglich auch der Hintergrundschalldruckpegel von der Messstation Arkona-Becken mit Schiffsverkehr verwendet (siehe Abschnitt 6.3).

In dieser Gegenüberstellung werden die prognostizierten Schalldruckpegel vom Windpark *Gennaker* im Betrieb mit den Hintergrundschalldruckpegeln von der Messstation Arkona-Becken mit Schiffsverkehr verglichen, siehe Tabelle 4 und Tabelle 5.

Tabelle 4. Prognostizierte Schalldruckpegel vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb im Leistungsbereich „mittel“ und Hintergrundschalldruckpegel gemessen an der Messstation Arkona-Becken mit Schiffsverkehr (50 %-Perzentilpegel).

Abstand	<i>Gennaker</i> („mittel“)	Arkona-Becken
1 km	116 dB re 1 $\mu\text{Pa}$	113 dB re 1 $\mu\text{Pa}$
5 km	110 dB re 1 $\mu\text{Pa}$	

Tabelle 5. Prognostizierte Schalldruckpegel vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb im Leistungsbereich „niedrig“ und Hintergrundschalldruckpegel gemessen an der Messstation Arkona-Becken mit Schiffsverkehr (50 %-Perzentilpegel).

<b>Abstand</b>	<b><i>Gennaker</i> („niedrig“)</b>	<b>Arkona-Becken</b>
1 km	106 dB re 1 $\mu$ Pa	113 dB re 1 $\mu$ Pa
5 km	100 dB re 1 $\mu$ Pa	

In einer Entfernung zwischen 1 km und 5 km werden die Schalleinträge vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb im Leistungsbereich „mittel“ durch das angenommene Hintergrundgeräusch maskiert.

Bereits im Abstand von 1 km werden die Schalleinträge vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb im Leistungsbereich „niedrig“ durch das angenommene Hintergrundgeräusch maskiert.

## 6.5 Prognosegenauigkeit

Diese Prognose für den Betriebsschall-Emissionspegel basiert auf internen Erfahrungswerten sowie öffentlich zugänglichen Messdaten und Prognosemodellen. Es ist von einer Prognosegenauigkeit von  $\pm 3$  dB auszugehen, die sich u. a. anhand der zur Verfügung stehenden Datenlage (WEA-Typ und Nennleistung, Fundamentstruktur, Wassertiefe und Seegebiet) und Messungengenauigkeit bei den Betriebsschallmessungen, die zur Validierung herangezogen wurden, ergibt.

Bei der Ausbreitungsberechnung wird von einer geschätzten gesamten (Emissionspegel plus Ausbreitung) Genauigkeit von  $\pm 5$  dB bis zu einer Entfernung von 10 km zur Quelle ausgegangen, die u. a. von den Witterungsbedingungen, Änderungen der Eigenschaften des Bodens (Schichtungen), Wasserschichtungen und Strömungen abhängig ist.

## 7 Zusammenfassung

Im Offshore-Windpark *Gennaker* im Wind-Vorrang Gebiet „Darß“ sollen 63 getriebelose Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von jeweils 15 MW installiert werden.

Hiermit wird eine Prognose der zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen während des Betriebes vorgelegt.

Basierend auf Messdaten von Windenergieanlagen mit geringerer Nennleistung wurde ein Quellspektrum in 100 m Entfernung zu den Windenergieanlagen im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ berechnet. Die Prognose ergibt für eine einzelne Windenergieanlage mit einer Nennleistung von 15 MW im Betrieb im Leistungsbereich „hoch“ in 100 m Entfernung zur Schallquelle einen Schalldruckpegel von 128 dB re 1  $\mu$ Pa.

Für die Schallausbreitung der Betriebsschallprognose wurden alle 63 Windenergieanlagen des Offshore-Windparks *Gennaker* simultan im Betrieb bei Nennleistung betrachtet, was einer „worst-case“ Betrachtung entspricht. Im Abstand von 1 km bzw. 5 km vom Offshore-Windpark *Gennaker* (Parallelkurven um den Windpark) ergibt die Schallausbreitung der Betriebsschallprognose einen mittleren Schalldruckpegel von 119 dB bzw. von 113 dB re 1  $\mu$ Pa.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Betriebsschallprognose mit einem veröffentlichten Hintergrundschalldruckpegel von 113 dB re 1  $\mu$ Pa gemessen an der Messstation Arkona-Becken zeigt, dass ab 5 km Entfernung zum Windpark die Schalleinträge vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb (Leistungsbereich „hoch“) durch Hintergrundgeräusche (Breitbandpegel) maskiert werden.

Im Leistungsbereich „mittel“ (50 % Nennleistung) werden die Schalleinträge vom Offshore-Windpark *Gennaker* im Betrieb in einer Entfernung zwischen 1 km und 5 km durch die angenommenen Hintergrundgeräusche maskiert.

Für den Leistungsbereich „niedrig“ ergibt die Gegenüberstellung, dass keine relevanten Betriebsschallimmissionsbeiträge durch den Offshore-Windpark *Gennaker* in die Ostsee erwartet werden.



Dipl.-Ing. Thierry Maquil



Dr. Andreas Müller

## Anhang

### Schallausbreitungskarten – Betriebsschallimmissionen

Tabelle 6. Abbildungsverzeichnis des Anhangs.

Seite	Beschreibung
Anhang, Seite 2	Schallausbreitung der Betriebsschallprognose für den OWP <i>Gennaker</i> mit 63 Windenergieanlagen im Betrieb bei Nennleistung 15 MW (ohne weitere Schallbeiträge)

