

Offshore-Windpark „ARCADIS Ost 1“

Prognose des Unterwasserschalls im Betrieb

Literaturstudie

Erstellt für Parkwind Ost GmbH
Vertreten durch Herrn Andreas Bürger



Projektmanager	Uwe Stöber
Projektnummer	14805051
Erstellt	Uwe Stöber
Genehmigt	Martina aus der Beek
Einstufung	Offen

Prognose des Unterwasserschalls im Betrieb für den Offshore-Windpark „ARCADIS Ost 1“

1 Aufgabenstellung

Die Firma Parkwind Ost hat im April 2018 den Zuschlag für den Bau des Offshore-Windparks ARCADIS Ost 1 in der Ostsee erhalten und erstellt derzeit die Umplanung des Windparks an die geänderten Randbedingungen. Im Wesentlichen wurden die Größe der Turbine, die Fundamente und das Layout des Windparks verändert. Die aktualisierten Rahmendaten des Windparks sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Der Windpark besitzt eine BImSchG Genehmigung von 2014. Bestandteil der vorhandenen Genehmigung ist unter anderem eine schalltechnische Untersuchung, in der die Themen Luft- und Unterwasserschall für die Bau- und Betriebsphase bewertet wurden.

Der Antrag zur Genehmigungsänderung muss bei der Genehmigungsbehörde in Stralsund (StALU) eingereicht werden. Für die Genehmigungsänderung benötigt die Firma Parkwind Ost eine neue schalltechnische Untersuchung einschließlich der hierzu erforderlichen Anlagen.

Parkwind Ost hat daher bei DHI eine Prognose des Unterwasserschalls im Betrieb angefragt.

Tabelle 1: Rahmendaten des Offshore-Windparks ARCADIS Ost 1 in der Ostsee

Eigenschaft des Windparks	Wert / Daten
Anzahl der Strukturen	28 Windenergieanlagen, 1 Konverterstation
Turbinenhersteller	MHI Vestas Offshore Wind (MVOW)
Leistung	9,5 MW
Rotordurchmesser	174 m
Nabenhöhe	107,0 m MSL
Anzahl der Turbinen	28
Fundamente der Windenergieanlagen	Monopiles, Durchmesser: 9–10 m, Einbindetiefe: 35–61 m
Wassertiefe	42 – 45 m

2 Definitionen der Schalldruckpegel

Es gibt verschiedene Definitionen für Schallpegel. Dabei werden Quellpegel in einer Entfernung von 1 m von der Quelle angegeben (re 1 m). Im vorliegenden Fall gilt die Entfernung vom Zentrum des Monopiles. Da ferner angenommen wird, dass die Übertragung der Geräusche durch Körperschall über den gesamten Monopile erfolgt, sind alle folgenden Entfernungsangaben horizontal vom Zentrum des Monopiles. Bei

Messungen, die einer bestimmten Quelle zugeordnet werden, wird üblicherweise die Entfernung zur angenommenen Quelle genannt.

Im Zusammenhang mit den Betriebsgeräuschen von Offshore-Bauwerken sind vor allem folgende Pegelgrößen von Bedeutung:

2.1 Äquivalenter Dauerschallpegel

Da der Schalldruckpegel zeitlich stark schwanken kann, wird häufig ein Mittelungspegel, der äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} , angegeben. Dieser ist wie folgt definiert:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) = 20 \log \left(\frac{\sqrt{\overline{p(t)^2}}}{p_0} \right)$$

Dabei ist $p(t)$ der zeitliche Verlauf des Schalldruckpegels, p_0 ist der Bezugsschalldruck von 1 μPa und T ist die Mittelungsdauer. Der äquivalente Dauerschallpegel wird auch als Root-mean-square-Schalldruckpegel (rms SPL, root-mean-square sound pressure level) bezeichnet.

2.2 Spitzenpegel

Der Spitzenpegel stellt ein logarithmisches Maß für die maximal gemessenen Druckschwankungsspitzen dar:

$$L_{peak} = 20 \log \left(\frac{p_{peak}}{p_0} \right)$$

Dabei ist p_{peak} der maximal festgestellte positive (p_{max}) oder negative (p_{min}) Schalldruck. In diesem Fall wird der Spitzenpegel auch als Zero-to-Peak Pegel (L_{0-pk}) bezeichnet. Manche Autoren präferieren die Angabe eines Peak-to-Peak Pegels (L_{pk-pk}). Dieser umfasst dann die Amplitude zwischen dem maximal gemessenen negativen und dem maximal gemessenen positiven Schalldruckereignis.

3 Ergebnisse der schalltechnischen Untersuchung im Jahr 2012

In der ursprünglichen schalltechnischen Untersuchung aus dem Jahr 2012 /1/ basierte die Prognose des Unterwasserschalls im Betrieb der Offshore Windenergieanlagen (OWEA) auf einem einzelnen Bericht über Schallmessungen für OWEA der Leistungsklasse 2 MW (vgl. /2/). Die Hauptfrequenzen lagen zwischen 100 und 315 Hz und die berechneten Schalleistungspegel erreichten Werte zwischen 141 und 151 dB re 1 μPa bei einem Mittelwert von 147 dB re 1 μPa in 25 m Entfernung von der OWEA.

Gemäß Bericht aus dem Jahr 2012 /1/ muss während des Betriebes der OWEA bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s die Hörschwelle der Meeressäuger bereits in einer Entfernung von 25 m zum Mittelpunkt des Windenergieanlagenfundamentes unterschritten werden /2/.

Die Berechnungen ergaben, dass der Wert von 150 dB re 1 μPa (z.B. /3/) bereits in einer Entfernung von 25 m um 3 dB unterschritten wird. In den maßgebenden Terzspektren liegen die Schalldruckpegel bis zu einer Entfernung von 500 m über dem Hintergrundgeräusch.

4 Stand der Forschung

Zu den umfangreichsten Studien gehört eine Untersuchung im Rahmen des RAVE (Research at Alpha VEntus) Programms, bei der der Betriebsschall des Windparks alpha ventus in der Nordsee (45 km vor Borkum, 30 m Wassertiefe) über eine Dauer von 165 Tagen in den Jahren 2010 und 2011 vermessen wurde /4/. Die Messungen erfolgten in unterschiedlichen Distanzen von 92 bis 446 m von der nächsten OWEA.

Die Analyse konzentrierte sich auf den Betriebsschall von zwei Anlagen unterschiedlicher Hersteller mit jeweils 5 MW Nennleistung. Einem Anlagentyp konnte ein sehr markantes tonales Geräusch mit 90 Hz zugeordnet werden, das insbesondere bei Volllast den Schall im Windpark dominierte. Quellstärke des Anlagentyps wurde mit dem tonalen Geräusch als äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq} im Abstand von 1 m bestimmt zu 147 dB re 1 μ Pa re 1 m. Der Einfluss der anderen Anlage war nicht nachweisbar, da die Umweltbedingungen im Vergleich zu laut waren und die Geräusche der Anlage überlagerten.

Es wurde vermutet /4/, dass eine Periode im Triebstrang, eine Überrollfrequenz im Lager oder eine Zahneingriffsfrequenz die Wassersäule im Zentralkörper der Gründungsstruktur anregt. Im Teillastbereich veränderte sich die Frequenz und eine strenge Koppelung an die Vibrationen der Gründungsstruktur konnte nachgewiesen werden.

Grundsätzlich ist eine Abhängigkeit von Last, Konstruktion von Turm, Fundament sowie Verbindung von Turm zu Fundament (Transition-Piece) zu erwarten, die die unterschiedliche Ausbildung von Schwingungsmoden zulassen. Außerdem ist aufgrund der akustischen Impedanz eine Abhängigkeit der Abstrahlung von der Form und Art der Oberflächen des Fundamentes zu erwarten. Van Radecke und Benesch /4/ schlussfolgern daher, dass nur schwer aus konstruktiven Elementen abzuleiten ist, wie sich das Spektrum der Unterwasserabstrahlung ausbildet.

Entgegen den Erwartungen erbrachte die Studie über den Windpark alpha ventus den Nachweis, dass es mit zunehmender Leistung und mit steigender Wellenhöhe im Windpark insgesamt leiser wurde, weil Hintergrundgeräusche (z.B. von Schiffen auf 4 km entfernten Schiffsrouten) dieselbe Größenordnung wie Anlagengeräusche haben und mit zunehmendem Wind abnehmen. Diese Abnahme überkompensiert die Zunahme der Anlagengeräusche.

Auch die MarVEN (Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy) Studie /5/, die hauptsächlich den aktuellen Forschungsbedarf identifizieren sollte, führte zu dem Ergebnis, dass Schallpegel im Betrieb deutlich geringer sind als in der Bauphase und zu deutlich weniger Bedenken hinsichtlich des Wohlergehens der Meeresfauna führt. Schallemissionen im Betrieb sind zwar nur wenig erforscht, aber es ist anzunehmen, dass sie mit Emissionen von mittelgroßen Schiffen vergleichbar sind, die vergleichsweise geringe Risiken hinsichtlich der Schallauswirkungen beinhalten.

Modellstudien unter sehr konservativen Annahmen zeigen, dass Betriebsschall von OWEA von Meeressäugern in mehreren km Entfernung wahrgenommen werden könnten /5/. Bisher habe jedoch keine Studie einen Einfluss des Schalls in der Betriebsphase auf das Verhalten der Meeressäuger nachgewiesen, wobei einschränkend erwähnt werden muss, dass Betriebsschall aufgrund der geringeren Emissionen im Vergleich zum Rammschall mit deutlich geringerer Priorität erforscht wird. Tatsächlich zeigte eine Untersuchung der Bewegungsmuster von Seehunden um Großbritannien, dass diese Windparks nur in der Bauphase meiden, jedoch nicht, wenn der Windpark in Betrieb ist /6/. In einem Windpark wurde sogar ein nahezu signifikanter Anstieg von Aktivität im Windpark im Vergleich zum Zeitraum vor der Entwicklung des Windparks festgestellt /6/.

Im Rahmen von MarVEN wurde somit auch lediglich die Untersuchung von Infraschall mit Frequenzen von weniger als 5 Hz und die möglichen Auswirkungen auf Fische als Priorität für die zukünftige Forschung angeregt

Messungen aus dem Jahr 2014 in belgischen Windparks mit 3 MW OWEA auf Monopiles ergaben in 40 m Entfernung von der Quelle Zero-to-Peak Schallpegel von $L_{0-pk} = 150$ dB re 1 μ Pa und ein (Root-mean-square) Schalldruckpegel von $SPL = 135$ dB re 1 μ Pa. In 150 m Entfernung von der Quelle wurden $L_{0-pk} = 147$ dB re 1 μ Pa und $SPL = 133$ dB re 1 μ Pa gemessen /7/. Die Werte bei 40 m sind mit Messungen an 5 und 6 15 MW OWEA auf Jacket-Grundungen innerhalb der gleichen Studie vergleichbar, bei 150 m Entfernung jedoch deutlich höher (10 dB für L_{0-pk} und 5 dB für SPL). Das Terzspektrum enthielt Spitzen bei 50 und 140 Hz.

Eine weitere Auswertung der Langzeitmessung an FINO 1 Plattform kommt ebenfalls zu der Schlussfolgerung, dass der Betriebsschall der OWEA im Windpark alpha ventus zwar anhand bestimmter Frequenzen identifiziert werden kann, aber nur kaum den Hintergrund übersteigt, zumal das Umgebungsgeräusch von starkem Schiffsverkehr geprägt ist /8/. Die Analyse einzelner Frequenzen ergab Korrelationen zwischen Schallpegeln und dem Status der OWEA sowie der Windstärke, der Gesamtwirkung des Betriebsschalls sei aber wahrscheinlich vernachlässigbar

Vergleichsmessungen innerhalb und außerhalb von vier verschiedenen Windparks in britischen Gewässern zeigten, dass der Betriebsschall nur sehr geringe Pegel aufweist und nur in unmittelbarer Nähe zum OWEA über den Hintergrund hinausgeht /9/. Nach Gewichtung der Immissionsspektren für verschiedene Spezies lag die Erhöhung durch Betriebsschall über den Hintergrund innerhalb der natürlichen Variation, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass der Betrieb von Offshore Windparks keine Änderungen im Verhalten von Meeressäugern und Fischen hervorruft

Die Messungen /9/ fanden in den Windparks North Hoyle (2 MW Nennleistung), Scroby Sands (2 MW Nennleistung), Barrow (3 MW Nennleistung) und Kentish Flats (3 MW Nennleistung) statt und dauerten jeweils zwischen 4 und 13 h. Die Wassertiefe betrug 4 – 12 m, alle OWEA standen auf Monopiles. Die gemessenen Schallpegel betragen im Windpark 114 – 130 dB re 1 μ Pa und unterschieden sich in drei Fällen nur unwesentlich von den gemessenen Schallpegeln außerhalb der Windparks (-2 bis 2 dB Unterschied). Lediglich im Windpark North Hoyle waren die Messwerte mit 128 dB re 1 μ Pa deutlich höher als außerhalb mit 120 dB re 1 μ Pa. Da keine Entfernungsangaben zu den Schallquellen angegeben wurden, kann aus diesen Messergebnissen kein Quellpegel ermittelt werden

Messungen in 110 m Entfernung von einer OWEA in Utgrunden (Schweden) mit 1,5 MW Nennleistung ergaben bei starkem Wind von 12 m/s ein Terzspektrum mit äquivalenten Dauerschallpegeln zwischen 90 und 142 dB re 1 μ Pa @ 1m, wobei die meiste Energie in den Terzen mit den Mittelfrequenzen 50, 160 und 200 Hz enthalten war /10/. Der lauteste Terzschallpegel mit 142 dB re 1 μ Pa @ 1m wurde bei einer Mittenfrequenz von 160 Hz gemessen. Ausgehend von einem Hintergrundschallpegel von 90 dB re 1 μ Pa bei 160 Hz, der bereits über der Hörschwelle von Seehunden liegt, übersteigt der Pegel des Betriebsschalls den Hintergrund bis in eine Entfernung von 3,3 km

Schallemissionen von kleineren OWEA mit Nennleistungen von 0,45 bis 2 MW wurden in drei Windparks in Dänemark und Schweden (Middelgrunden, Vindeby, and Bockstigen-Valar) vermessen /11/. Die Schalldruckpegel wurden in Entfernungen von 14 bis 20 m vom Fundament gemessen und lagen im Bereich 109–127 dB re 1 μ Pa rms. Maximale Terzpegel erreichten 106 bis 126 dB re 1 μ Pa rms. Die Entfernung, in der Seehunde die Geräusche hören können, wurde auf 2,5 bis 10 km geschätzt, für Schweinswale ergeben sich 8–63 m

Schallemissionen einer 6 MW Anlage wurden zudem in einer Modellstudie untersucht, die auf den angeregten Vibrationen der Anlage auf verschiedenen Fundamenten beruhte /12/. Die Modellierung umfasste ein Frequenzband von 10 Hz bis 2 kHz. Für Monopiles wurde der höchste L_{eq} unter den Gründungen für Frequenzen unter 200 Hz gefunden. Der höchste Pegel mit 149 dB re 1 μ Pa in 5 m Entfernung lag jedoch bei 560 Hz. Jacket-Gründungen führten zu den höchsten Pegeln oberhalb von 500 Hz mit 177 dB re 1 μ Pa bei 700 Hz und 191 dB re 1 μ Pa bei 925 Hz, jeweils in 5 m Entfernung von der Jacket-Struktur. Die hohen Schalldruckpegel bei den hohen Frequenzen wurden strukturellen Resonanzen zugeordnet, für die der hohe Pegel stark auf die Umgebung der Struktur begrenzt ist und mit der Entfernung zur Struktur sehr schnell abfällt.

Die Literaturwerte wurden auf 25 m Abstand normiert (siehe Kapitel 5) und in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Literaturwerte normiert auf 25m Abstand. Wassertiefen beziehen sich auf die vermessenen Windturbinen, den gesamten Windpark oder die Messstelle und dienen lediglich als Anhaltspunkt. Terzmittenfrequenzen gehören jeweils zum maximalen Terzschalldruckpegel. Als Messentfernungen wurden die jeweiligen Entfernungen des zitierten Schalldruckpegels aus der Publikation übernommen. Wurde bereits ein Quellpegel angegeben (z.B. für alpha ventus), so wurde dieser übernommen. Für die Windparks North Hoyle, Scroby Sands, Kentish Flats und Barrow erfolgte lediglich eine Unterscheidung in Schalldruckpegel innerhalb des Windparks (innen) und außerhalb (außen).

Windpark / Datenherkunft	Nennleistung (MW)	Wassertiefe (m)	Max. Breitbandschalldruckpegel bei 25m (dB re 1 μ Pa)	Max. Terzschalldruckpegel bei 25m (dB re 1 μ Pa)	Terzmittenfrequenz (Hz)	Messentfernung (m)	Quelle
Vindeby	0,45	4	120	120	125	14	/11/
Bockstigen-Valar	0,5	10	109	106	160	20	/11/
Utgrunden	1,5			118	160	1	/10/
Mittelgrunden	2	5	105	102	25	20	/11/
TÜV Nord Prognose	2		127			1	/1/
TÜV Nord Prognose	2		117			1	/1/
North Hoyle	2	12	125			innen	/9/
North Hoyle	2	12	117			außen	/9/
Scroby Sands	2	5	127			innen	/9/
Scroby Sands	2	5	129			außen	/9/
Northwind	3	20	135			40	/7/
Northwind	3	20	142			150	/7/
Kentish Flats	3	5	111			innen	/9/
Kentish Flats	3	5	110			außen	/9/

Windpark / Datenherkunft	Nennleistung (MW)	Wassertiefe (m)	Max. Breitbandschalldruckpegel bei 25m (dB re 1 µPa)	Max. Terzschalldruckpegel bei 25m (dB re 1 µPa)	Terzmittelfrequenz (Hz)	Messentfernung (m)	Quelle
Barrow	3		121			innen	/9/
Barrow	3		119			außen	/9/
alpha ventus	5	30		123	90	1	/4/
C-Power	5	25	137			40	/7/
C-Power	5	25	131			60	/7/
C-Power	5	25	131			150	/7/
Modellstudie	6	30		136	560	5	/12/
Modellstudie	6	50		164	700	5	/12/
Modellstudie	6	50		178	925	5	/12/

5 Berechnung der Schallausbreitung

Wie im vorherigen schalltechnischen Gutachten /1/ beschrieben, kann die Abnahme des Schalldruckpegels ΔL ohne Berücksichtigung der Absorptionsdämpfung im Wasserkörper nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\Delta L = k \log(r/r_0)$$

mit

- r, r_0 Entfernungen von der Schallquelle
- r_0 Bezugsentfernung 1 m
- k Faktor zur Berücksichtigung der Wellenfront
 - $k = 20$ Kugeloberfläche 6 dB-Abnahme bei Abstandsverdopplung
 - $k = 10$ Zylinderoberfläche 3 dB-Abnahme bei Abstandsverdopplung
 - $k = 15$ Mittelwert für die Nordsee /13/
 - $k = 17$ Mittelwert für die Ostsee /13/

Für die Berechnung des Quellpegels in 1 m Entfernung wurde $k = 15$ benutzt, da sich die meisten Windparks in der Nordsee befinden. Die Immissionspegel in 25 m Entfernung wurden unter Verwendung von $k = 17$ berechnet, da sich der Windpark ARCADIS Ost 1, für den die Prognose erstellt wird, in der Ostsee befindet. Die so ermittelten Schalldruckpegel sind in Tabelle 2 und Abbildung 1 dargestellt.

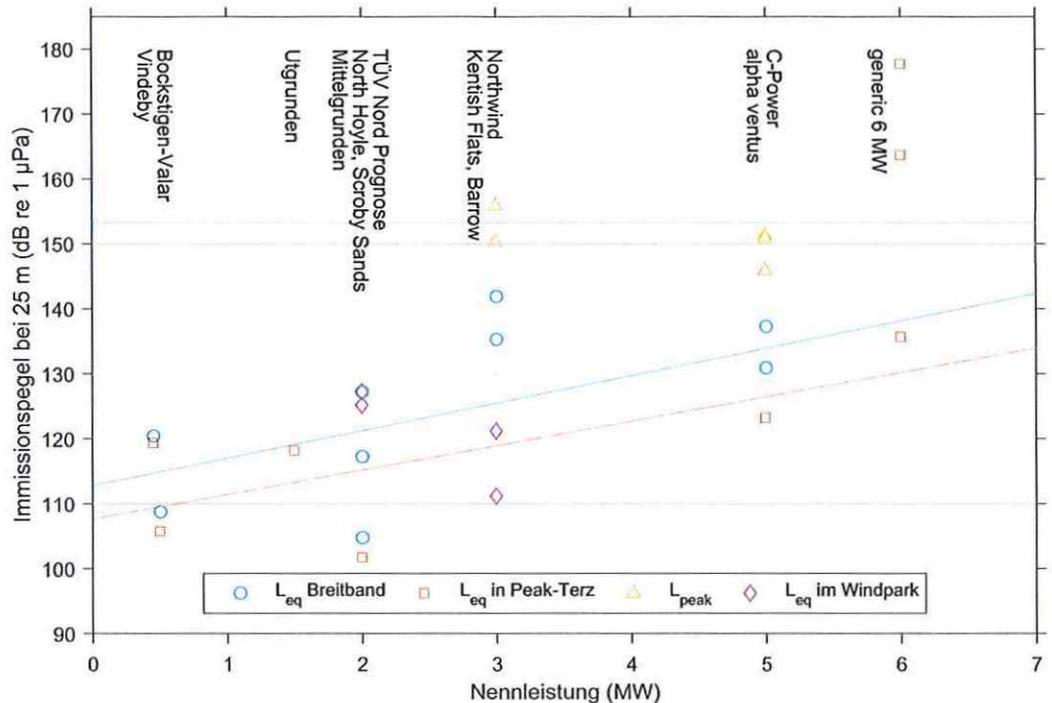


Abbildung 1: Immissionspegel bei 25 m in Abhängigkeit der Nennleistung. Grafische Darstellung der Daten in Tabelle 2. Die Namen der Windparks bzw. der Datenherkunft sind oberhalb der Daten aufgeführt. Horizontale graue Linien bei 110, 150 und 153.2 dB re 1 μ Pa markieren den Hintergrundpegel, den Grenzwert in 25 m Entfernung von der OWEA und den Pegel eines Versorgungsschiffes in 25 m Entfernung. Regressionslinien für Breitbandpegel (blau) und Peak-Terzpegel (rot) sind ebenfalls eingezeichnet.

6 Prognose

Für die Prognose wurden die auf 25 m Abstand normierten Schalldruckpegel gegenüber der Nennleistung dargestellt, einerseits weil die Nennleistung für alle Messungen verfügbar ist und andererseits, weil sie nicht nur die Turbinengröße beschreibt, sondern auch ein Indikator für die Gesamtgröße der OWEA und das Fundament ist. Diese Vereinfachung führte jedoch auch zu einer starken Streuung, insbesondere für eine Nennleistung von 3 MW. So wurden für 3 MW die höchsten Breitband L_{eq} gemessen, so dass eine Erhöhung durch Umgebungs- und Hintergrundgeräusche nicht unwahrscheinlich ist. Insgesamt zeigen die gemessenen Breitbandpegel eine steigende Tendenz mit steigender Nennleistung.

Die maximalen L_{eq} in Terzspektren wurden als grundsätzlich belastbarer angesehen, da der Peak im Terzspektrum üblicherweise den OWEA besser zugeordnet werden konnte (vergl. /4/) und eine Überlagerung durch Umgebungs- und Hintergrundgeräusche deutlich unwahrscheinlicher war. Einzige Ausnahme hier bildeten die hochfrequenten Modellergebnisse der generischen 6 MW Anlage bei 700 und 925 Hz /12/. Aufgrund der hohen Frequenzen war ihre Reichweite jedoch begrenzt (vergl. /12/). Da sie außerdem nur bei Jacket-Gründungen auftraten und hier ein Monopile zu prognostizieren war, wurden diese Schallpegel nicht berücksichtigt.

Die Peak-Schalldruckpegel waren nur für zwei Nennleistungen verfügbar und zeigten mit zunehmender Nennleistung eine abnehmende Tendenz. Bei Peak-Pegeln war außerdem die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass es sich um Umgebungsgeräusche oder

Umgebungs­lärm handelte. Die Peak-Schall­druck­pegel wurden nicht für die Prognose verwendet.

Ein Regressionsgerade durch die Breitbandpegel (Abbildung 1, blaue gepunktete Linie) ergab für 9,5 MW Nennleistung eine Breitbandpegel 153 dB re 1 µPa @ 25 m über dem Grenzwert von 150 dB re 1 µPa @ 25 m /1/. Bei diesem Wert wurden jedoch auch Umgebungs- und Hintergrundgeräusche mit extrapoliert. Der vorhergesagte Breitbandpegel liegt allerdings knapp unterhalb des Pegels eines Versorgungsschiffes in 25 m Entfernung von 153,2 dB re 1 µPa @ 25 m.

Die Regression der Peak-Terzpegel (Abbildung 1, rote gepunktete Linie) ergab für 9,5 MW Nennleistung einen Pegel von

143 dB re 1 µPa @ 25 m

deutlich unter dem Grenzwert von 150 dB re 1 µPa @ 25 m /1/. Aufgrund der besseren Zuordnung der spektralen Peaks zu den OWEA war nur von einer geringen Beeinträchtigung der Prognose durch Umgebungs- und Hintergrundgeräusche auszugehen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurden Literaturwerte für Betriebsschall zusammengetragen und auf Immissionspegel in 25 m Entfernung normiert um einen Vergleich zum Grenzwert von 150 dB re 1 µPa in 25 m Entfernung /1/ von der OWEA zu erhalten. Bei den Literaturwerten handelt es sich überwiegend um Messwerte von Anlagen unterschiedlicher Größe und unter unterschiedlichen Umweltbedingungen. Die normierten Werte wurden gegen die Nennleistung aufgetragen, da diese für alle Anlagen verfügbar war und eine generelle Größeneinschätzung der Anlagen ermöglichte.

Eine Regression der Breitbandpegel ergab für die zu untersuchende Anlage mit einer Nennleistung von 9,5 MW einen Pegel über dem des Grenzwertes. Da bei den Breitbandpegeln jedoch auch Umgebungs- und Hintergrundgeräusche mit extrapoliert werden, ist von einer Überschätzung auszugehen.

Regression von Peak-Terzpegeln, die den OWEA üblicherweise genau zugeordnet werden können, ergab für die zu untersuchende Anlage mit einer Nennleistung von 9,5 MW einen Pegel von 143 dB re 1 µPa @ 25 m deutlich unterhalb des Grenzwertes.

Die Literaturstudie ergab außerdem, dass der Betriebsschall zwar über den Hintergrunds­schall hinaus geht, z.T. auch über größere Entfernungen und somit für Seehunde durchaus wahrnehmbar ist, aber keine Verhaltensänderungen nachweisbar waren.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ TÜV NORD: Schalltechnische Untersuchung für den Offshore-Windpark „ARCADIS Ost 1“. TNU-UBS-HRO / Sbg. Rostock, 12.12.2012.
- /2/ biola: Hydroschallemissionen und -immissionen von Offshore-Windenergieanlagen - Prognose des Schalleintrags, der Reichweite und der potenziellen Auswirkungen auf Meeressäuger und Fische. Hamburg, Juli 2008.

- /13/ BioConsult SH: Auswirkungen des Baus des Umspannwerks am Offshore-Testfeld „alpha ventus“ auf Schweinswale, Untersuchungen zu Schweinswalen mit T-PODs. Husum, Februar 2009.
- /14/ Van Radecke, H., Benesch, M. 2012. Messung der Betriebsgeräusche von Offshore-WEA zur Bestimmung des Schalleintrags durch die Schallübertragungsfunktion zwischen Turm und Wasser an Anlagen im Testfeld Offshore. Schlussbericht, Förderkennzeichen 0327687.
- /15/ Thomsen, F., Gill, A., Kosecka, M., Andersson, M., Andre, M., Degraer, S., Folegot, T., Gabriel, J., Judd, A., Neumann, T., Norro, A., Risch, D., Sigray, P., Wood, D., Wilson, B. 2015. MaRVEN – Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy. Final study report, RTD-KI-NA-27-738-EN-N, doi:10.2777/272281.
- /16/ Russell, D.J.F., Hastie, G.D., Thompson, D., Janik, V.M., Hammond, P.S., Scott-Hayward, L.A.S., Matthiopoulos, J., Jones, E.L., McConnell, B.J. 2016. Avoidance of wind farms by harbour seals is limited to pile driving activities. *Journal of Applied Ecology*, 53, 1642–1652, doi: 10.1111/1365-2664.12678.
- /17/ Norro, A, Sigray, P. 2015. Marven WP5, Underwater noise measurements at Belgium offshore wind farm. Appendix to Thomsen at al. 2015.
- /18/ Lübben, A., Wilts, F. 2015. Measurements of Sound during Offshore Wind Farm Construction and Operation in the Southern North Sea. Appendix to Thomsen at al. 2015.
- /19/ Nedwell, J.R., Parvin, S.J., Edwards, B., Workman, R., Brooker, A.G., Kynoch, J.E. 2007. Measurement and interpretation of underwater noise during construction and operation of offshore windfarms in UK waters. Subacoustech Report No. 544R0738 to COWRIE Ltd. ISBN: 978-0-9554279-5-4.
- /110/ Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, R., Piper, W. 2006. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd. Newbury, UK.
- /111/ Tougaard, J., Henriksen, O.D., Miller, L.A. 2009. Underwater noise from three types of offshore wind turbines: estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *J. Acoust. Soc. Am.* 125(6):3766–3773
- /112/ Marmo, B., Roberts, I., Buckingham, M.P., King, S., Booth, C. 2013. Modelling of Noise Effects of Operational Offshore Wind Turbines including noise transmission through various foundation types. Edinburgh: Scottish Government.
- /113/ Gerasch, W.-J., Grießmann, T., Rustemeier, J.: Hydroschall beim Bau und Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen.- Oktober 2008

X

Dr. Uwe Stöber
Senior Expert Marine