



Abschlussbericht

**Erfahrungsbericht Betriebsschall:
Projektübergreifende Auswertung und Bewertung der
Unterwasserschallmessungen aus der Betriebsphase
von Offshore-Windparks**

Akronym: OWF NOISE

Autoren: Dr. Michael A. Bellmann, Tobias Müller, Kristina Scheiblich & Dr. Klaus Betke

Oldenburg, den 14. Juli 2023

Berichtsumfang: 96 Seiten Bericht; 7 Seiten Anhang

Itap GmbH
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg
Deutschland

Zitierhinweis: Bellmann MA, Müller T, Scheiblich K & 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.

Gefördert durch:



**BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln aus dem Forschungstitel des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) unter der Auftragsnummer 10054419 gefördert.

Disclaimer: Die Informationen im Kapitel 4.1 schildern die Vorgehensweise der Zulassungsbehörde für Offshore-Vorhaben in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee und wurden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zusammengefasst.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	6
2.	Einleitung und Notwendigkeit dieser Studie	13
3.	Schalltechnische Grundlagen	18
3.1	Schalldruck und Schalldruckpegel	18
3.2	Typische Schallquellen im Meer	22
3.3	Anthropogener Schalleintrag ins Wasser durch Offshore-Windparks	23
3.3.1	Schalleinträge durch Offshore-Windenergieanlagen	23
3.3.2	Schalleinträge durch Schiffsverkehr	25
3.4	Hörvermögen von Schweinswalen	25
4.	Anforderungen an die Messungen und Umsetzung	28
4.1	Gängige Vollzugspraxis bei der Durchführung von Betriebsschallmessungen in Offshore-Windparks	28
4.2	Zu erfassende (Schallmess-) Daten gemäß BSH-Messvorschrift	31
4.3	Betriebsdaten der Offshore-Windenergieanlagen	33
4.4	Messgeräte und Verankerung	36
4.5	Schalltechnische Auswertung	39
4.6	Durchführung der Messungen	40
5.	Untersuchte Offshore-Windparks	41
6.	Messergebnisse	45
6.1	Messungen in ca. 100 m Entfernung zu Windenergieanlagen	45
6.1.1	Frequenzunabhängige Merkmale	46
6.1.2	Spektrale Merkmale	49
6.1.3	Mögliche, projektspezifische Einflussparameter	53
6.1.4	Standortspezifische Einflussparameter	58
6.2	Messungen in und um Offshore Windparks	59
6.3	Vergleich Hintergrund- und Betriebsschall	63
6.4	Schiffsgeräusche im Zusammenhang mit in Betrieb befindlichen Windparks	65
6.4.1	Serviceverkehr in und um einen Windpark	65
6.4.2	Serviceverkehr außerhalb der Windparks	71
7.	Diskussion	74
7.1	Mögliche Einflussfaktoren auf den Betriebsschall	74
7.1.1	Fundamenttyp und Nennleistung	75
7.1.2	Betriebsschall außerhalb des Windparks	79
7.1.3	Betriebsbedingter Serviceverkehr	80
7.2	Hintergrundschall	82
7.3	Biologische Effekte von Betriebsschall	84
7.4	Kumulative Effekte bei Betriebsschall	87
8.	Literaturverzeichnis	91
9.	Anhang: Pegel an den 100 m Positionen aller OWEAs	98

9.1	Schalldruckpegel L_{05}	98
9.2	Schalldruckpegel L_{50}	99
9.3	Schalldruckpegel L_{90}	100
10.	Abbildungsverzeichnis	101
11.	Tabellenverzeichnis	103

Abkürzungsverzeichnis

AIS	<u>A</u> utomatisches <u>I</u> dentifikationssystem (engl. Automatic Identification System)
AWZ	<u>A</u> usschließliche <u>W</u> irtschaftszone (engl. Exclusive Economic Zone - EEZ)
BfN	<u>B</u> undesamt für <u>N</u> aturschutz (engl. Federal Agency for Nature Conservation)
BMU	<u>B</u> undes <u>m</u> inisterium für <u>U</u> mwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (engl. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)
BNatSchG	<u>B</u> undes- <u>N</u> aturschutzgesetz (engl. Federal Nature Conservation Act)
BSH	<u>B</u> undesamt für <u>S</u> eeschifffahrt und <u>H</u> ydrographie (engl. Federal Maritime and Hydrographic Agency)
c	Schallgeschwindigkeit
CTV	Crew Transfer Vessels
dB	<u>D</u> ezi <u>b</u> el
DP	<u>D</u> ynamic <u>P</u> ositioning (dt. Dynamische Positionierung)
et al.	(lat.) und andere (u. a.)
F&E	<u>F</u> orschung & <u>E</u> ntwicklung (engl. Research & Development)
FEP	<u>F</u> lächen <u>e</u> ntwicklungsplan
FKZ	<u>F</u> örderung <u>k</u> ennzeichen (engl. support code)
HELCOM	Baltic Marine Environment Protection Commission – <u>H</u> elsinki <u>C</u> ommission
Hz	<u>H</u> ertz
ISO	<u>I</u> nternational <u>O</u> rganization for <u>S</u> tandardisation (dt. Internationale Organisation für Normung)
itap (GmbH)	<u>I</u> nstitut für <u>t</u> echnische und <u>a</u> ngewandte <u>P</u> hysik GmbH
kHz	<u>K</u> ilo- <u>H</u> ertz
kn	<u>K</u> noten (engl. knots)
L_E / SEL	Einzelereignispegel (engl. <u>S</u> ound <u>E</u> xposure <u>L</u> evel)
LNG	engl. <u>L</u> iquid <u>N</u> atural <u>G</u> as
LOBE	engl. <u>L</u> evel of <u>O</u> nset of <u>B</u> iological <u>a</u> dverse <u>E</u> ffects
$L_{p,pk}$	Spitzen Schalldruckpegel (zero-to-peak Sound Pressure Level)
p	Schalldruck
PTS	<u>P</u> ermanent <u>T</u> hreshold <u>S</u> hift (dt. Permanente Hörschwellenverschiebung)
MarinEARS	<u>M</u> arine <u>E</u> xplorer and <u>R</u> egistry of <u>S</u> ound (dt. Meeresforschung und nationales Schall-Register für die Meldung impulshafter Schallereignisse in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee an die EU nach Maßgabe der MSRL).
MSRL	<u>M</u> eer <u>e</u> sstrategie <u>R</u> ahmenricht <u>l</u> inie (engl. Marine Strategy Framework Directive)
OSPAR	<u>O</u> slo <u>P</u> aris Convention (dt. OSPAR-Abkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordatlantiks)
OWEA	<u>O</u> ffshore <u>W</u> indenergieanlage (engl. Offshore Wind Turbine Generator)
OWP	<u>O</u> ffshore <u>W</u> indpark (engl. Offshore Windfarm – OWF)
ρ	Dichte eines Mediums
SL	<u>S</u> ensation <u>L</u> evel (dt. Hörpegel bzw. Hörschall)
SPL	<u>S</u> ound <u>P</u> ressure <u>L</u> evel (dt. Schalldruckpegel)
SNR	<u>S</u> ignal-to- <u>N</u> oise <u>R</u> atio (dt. Signal-Rauschabstand)
TL	<u>T</u> ransmission <u>L</u> oss (dt. Ausbreitungsdämpfung)
TTS	<u>T</u> emporal <u>T</u> hreshold <u>S</u> hift (dt. temporäre Hörschwellenverschiebung)
v	Schallschnelle
VTG	<u>V</u> erkehr <u>t</u> rennungsgebiet
Z	(Schall-) Kennimpedanz

1. Zusammenfassung

Die industrielle Nutzung der Meere hat in der letzten Dekade, insbesondere durch die Nutzung regenerativer Energiequellen auf See in Form von Offshore-Windparks (OWP), rasant zugenommen. Dieser Trend wird sich auch über die nächsten Jahre bzw. Jahrzehnte fortsetzen. Durch den Betrieb von OWPs werden nicht nur Schalleinträge durch die in Betrieb befindlichen Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) ins Wasser eingebracht, sondern auch betriebsbedingter Schiffsverkehr für Wartungs- und Reparaturzwecke (Serviceverkehr) stellt eine weitere, zusätzliche Lärmquelle dar. Die Laufzeit von Windparks beträgt ca. 25 Jahre, so dass nicht von der Hand zu weisen ist, dass dadurch kontinuierlich Schall (Dauerschall) über Jahrzehnte ins Wasser eingetragen wird, von dem potenziell Meide- und Störwirkungen für die Meeresfauna ausgehen könnte. Für die langfristig naturverträgliche Nutzung der regenerativen Energiequellen auf See ist daher auch dieser Schalleintrag ins Wasser messtechnisch zu erfassen, auszuwerten und hinsichtlich seiner ökologischen Auswirkung zu evaluieren.

Auf europäischer Ebene wurde durch die EU-Arbeitsgruppe *TG-NOISE* das Grundkonzept für Schwellenwerte¹ im Hinblick auf den impulshaltigen und kontinuierlichen Unterwasserschall (Impuls- und Dauerschall; Kriterium D11C1/2) definiert; die Entwicklung und Abstimmung der Schwellenwerte auf nationaler und regionaler Ebene ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Damit existieren derzeit keine verbindlichen Richt- oder Grenzwerte für die ökologische Beurteilung von Betriebsschall.

Im Zeitraum von 2011 bis 2022 wurden in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nord- und Ostsee 22 und in der 12-Seemeilen-Zone drei Offshore-Windparks errichtet und in Betrieb genommen. Somit befinden sich im Jahr 2023 mehr als 1.500 Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) mit einer Gesamtleistung von über 8 GW in Betrieb. Über die nächsten Jahre wird sich diese Anzahl jedoch deutlich aufgrund der Ausbauziele für regenerative Energiequellen erhöhen (Ausbauziel für 2030 sind 30 GW). Dem Vorsorgeprinzip folgend und basierend auf den ersten Messerfahrten aus in Betrieb befindlichen Windparks (z. B. Betke, 2003; 2004) wurden seitens der Zulassungs- und Genehmigungsbehörde Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) umfangreiche Unterwasserschallmessungen zur Evaluation der dadurch ins Wasser eingetragenen Schalleinträge angeordnet. Dabei wurden sowohl

¹ Der Schwellenwert bezieht sich auf einen LOBE (Level of Onset of Biologically adverse Effects), also den Beginn einer schädlichen, biologischen Wirkung auf eine entsprechende Indikatorspezies. Weitere Informationen: https://environment.ec.europa.eu/news/zero-pollution-and-biodiversity-first-ever-eu-wide-limits-underwater-noise-2022-11-29_en.

vor dem Bau (Hintergrundschall), als auch im Betrieb (Betriebsschall) der Windparks Unterwasserschallmessungen in standardisierter Form gemäß der Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011) durchgeführt, ausgewertet und in das nationale Schallregister MarinEARS² inkl. umfangreicher Begleitinformationen aus den Windparks, wie Anlagentyp, Leistungs- und Wetterdaten, etc. eingebunden.

Im Rahmen des F&E-Vorhabens OWF Noise wurden erstmalig sämtliche verfügbaren Betriebs- und Hintergrundschallmessdaten aller deutschen Offshore-Windparks aus dem MarinEARS in einer projektübergreifenden Studie zusammengefasst. Die Studie dient einer ersten vorhabenübergreifenden Beschreibung und Bewertung der wesentlichen Schallquellen während des Betriebs von Offshore Windparks in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee. Die Ergebnisse bilden zugleich die Basis für die Beurteilung von möglichen biologischen Auswirkungen durch betriebsassoziierten Schalleinträge.

Mit der Durchführung von insgesamt 27 Betriebs- und 12 Hintergrundschallmessungen in 24 Windparks mit 16 verschiedenen OWEA-Typen von sieben verschiedenen Herstellern und Nennleistungen zwischen 2,3 und 8,0 MW, gegründet auf fünf unterschiedlichen Fundamentstrukturen, drei Messpositionen pro Windpark und in drei definierten Betriebszuständen der Anlagen stellt die Messdatenbasis aus dem MarinEARS derzeit die weltweit größte Datenbasis dar.

Basierend auf der projektübergreifenden Auswertung der Hintergrund- und Betriebsschallmessungen ergaben sich nachfolgende Ergebnisse:

Allgemein

- Auf der standardisierten Erfassung, Auswertung und Dokumentation im MarinEARS konnte ein direkter, systematischer Vergleich zwischen unterschiedlichen Windparks durchgeführt werden, um mögliche projekt- und standortspezifischen Einflussparameter des Betriebsschalls zu identifizieren und zu quantifizieren. Auch ein Vergleich der Schallbedingungen vor dem Bau von Windparks mit der Betriebsphase sind aufgrund des standardisierten Mess-, Auswertungs- und Dokumentationskonzepts möglich.

² MarinEARS – Marine Explorer and Registry of Sound; Fachinformationssystem für Unterwasserschall und nationales Schallregister für Schallereignisse (Dauer- und Impulsschall) in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee an die EU nach Maßgabe der MSRL (<https://marinears.bsh.de>).

- Die Evaluation der Schallbedingungen während der Betriebsschallphase von Off-shore-Windparks innerhalb und außerhalb dieser industriell genutzten Flächen stellen sich als äußerst komplex dar, da sich der betriebsbedingte Schalleintrag durch in Betrieb befindliche Anlagen und durch den betriebsbedingten Serviceverkehr weder zeitlich noch räumlich erheblich vom bereits umgebenden Hintergrundschall abheben. Eine kumulative Betrachtung sämtlicher Dauerschalleinträge ist somit erforderlich.
- Mit dieser projektübergreifenden Studie konnte der derzeitige Wissensstand hinsichtlich Betriebs- und Hintergrundschall zusammengefasst werden und bestehende Wissenslücken für eine kumulative Evaluation der ökologischen Auswirkungen von Betriebsschall identifiziert werden.

Projekt- und standortspezifische Einflussparameter auf Betriebsschall

- Der Schalleintrag von in Betrieb befindlichen Offshore-Windenergieanlagen ist grundsätzlich tieffrequenter Natur. Zumeist werden tonale Komponenten, die sich aus den charakteristischen Übersetzungen von Getriebe, Generator und Umdrehungszahl der Rotoren (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz) ergeben, im Frequenzbereich zwischen 25 und 160 Hz ins Wasser eingetragen. Teilweise sind auch wenige Harmonische, d. h. natürliche Vielfache der Eigenfrequenz, im Spektrum bis zu wenigen hundert Hertz messbar.
- Diese tieffrequenten Schalleinträge ins Wasser sind lediglich in unmittelbarer Umgebung der Anlagen (~ 100 m) und bei Betrieb der Anlagen nahe der Nennleistung pegelbestimmend. Der mittlere (breitbandige) Gesamtschalldruckpegel (L_{50}) bei Nennleistung der Anlagen variiert zwischen 112 und 131 dB (Median und Mittelwert 120 dB). Der mittlere Schalldruckpegel (L_{50}) aus dem 1/3-Oktavband mit der dominierenden Komponente der Eigenfrequenz der Anlage variiert zwischen 102 und 126 dB (Median und Mittelwert 114 dB).
- Für eine Beurteilung der Schalleinträge durch die in Betrieb befindlichen Anlage mit Nennleistung in der Windklasse „hoch“ sind Pegelstatistiken ($L_{90, 50,05}$) zwingend erforderlich, da sich durch die vorherrschenden Wetterbedingungen auch der umgebende Hintergrundschall, verursacht durch Schiffsgeräusche und wetterbedingte Schalleinträge, verändert und es teilweise zu einer Vermischung dieser Schalleinträge kommt.

- Die Eigenfrequenzen der Anlagen sind bei Direktgetriebe bzw. getriebelosen Anlagen tendenziell tieffrequenter (≤ 80 Hz) und ebenfalls „leiser“ als Anlagen mit Getriebe, obwohl die getriebelosen Anlagen im Mittel um 1,4 MW größere Nennleistungen aufwiesen (Median 2,3 dB bzw. Mittelwert 1,5 dB).
- Ein beurteilungsrelevanter Zusammenhang zwischen den Schalleinträgen ins Wasser durch die Anlagen und deren Fundamentstruktur (Monopfahl, Tripod, Tripile, Jacket mit unterschiedlichen Pfahldurchmessern bis 8,1 m) konnte nicht festgestellt werden. Tendenziell scheinen große Monopfähle etwas „leiser“ als die anderen Fundamentstrukturen, wie Jackets, mit mehreren Gründungspfählen mit geringeren Pfahldurchmessern zu sein (im Mittel 2,0 dB). Eine weitergehende detaillierte Auswertung nach den unterschiedlichen Nicht-Monopfahl-Fundamentstrukturen ist aufgrund der geringen Stichproben nicht sinnvoll.
- Ein starker Zusammenhang zwischen den Schalleinträgen und der Nennleistung der Anlagen (zwischen 2,3 und 8,0 MW) konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Tendenziell sind Anlagen mit großer Nennleistung geringfügig „leiser“ als Anlagen mit geringen Nennleistungen (im Mittel ≤ 5 MW 122,8 dB, > 5 MW 120,0 dB). Dies kann jedoch auch durch den zumeist stattgefundenen Wechsel von Getriebe auf Direktantrieb begründet sein. Zudem scheinen Anlagen neuester Generation tendenziell ebenfalls etwas „leiser“ zu sein als Anlagen älteren Baujahrs.
- Es konnten auch keine beurteilungsrelevanten Unterschiede des Betriebsschalls basierend auf unterschiedlichen Wassertiefen (20 bis 40 m) oder Nord- bzw. Ostsee identifiziert werden.
- Die breitbandige Differenz im mittleren Schalldruckpegel (L_{50}) zwischen Anlagen im Betrieb mit Nennleistung (Windklasse „hoch“) und im Stillstand (Windklasse „niedrig“) variiert zwischen 0 dB und 13 dB (Mittelwert 3,3 dB, Median 3 dB). In vier Fällen ist der breitbandige Schalldruckpegel für die Windklasse „niedrig“ (Anlagen im Stillstand) um bis zu 7 dB lauter als in der Windklasse „hoch“ (Anlagen mit Nennleistung). Diese vier Fälle sind Windparks mit kleineren und älteren Windenergieanlagen. Der Grund könnte ggfs. durch einen höheren Schiffsverkehr innerhalb und außerhalb der Windparks verursacht worden sein. Messdaten unter denselben Wetterbedingungen (Windklasse „hoch“) zwischen den Betriebszuständen „Anlage im Betrieb mit Nennleistung“ und „Anlage im Stillstand“ liegen nicht vor.

- Die tonalen, tieffrequenten Komponenten der in Betrieb befindlichen Anlagen sind außerhalb der Windparks zumeist noch bis in Entfernungen von wenigen Kilometern messtechnisch erfassbar, vermischen sich jedoch mit zunehmendem Abstand mit dem allgemeinen Hintergrundschaallpegel, so dass der abgestrahlte Schall nicht mehr pegelbestimmend ist (Signal-Rausch-Verhältnis < 6 dB). Der Hintergrundschaallpegel außerhalb von OWPs wird zumeist von dem nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr außerhalb der Windparks dominiert und variiert stark in unterschiedlichen Richtungen zu einem Windpark bzw. zwischen unterschiedlichen Seegebieten.
- Der permanente Schallpegel (L_{50}) im Windpark bei Anlagen im Stillstand (Windklasse „niedrig“) variiert zwischen 107 und 132 dB (Median und Mittelwert 117 dB). Derartige Pegelunterschiede bei gutem Wetter mit wenig Wind werden höchstwahrscheinlich primär durch Schiffslärm verursacht.
- Es zeigt sich, dass es eine hohe Korrelation zwischen der Schiffsdichte inkl. Abstand zur Messposition und des permanent vorhandenen Schallpegels gibt: je mehr Schiffe, je größer und schneller die Schiffe und je dichter sie an den Messpositionen vorbeifahren, desto lauter ist der Hintergrundschaallpegel. Dieser grundlegende Zusammenhang zwischen Schiffsdichte und Dauerschall wurde auch eindeutig durch Modellierungen und Messungen in der Nord- und Ostsee durch die Forschungsvorhaben BIAS und JOMOPANS nachgewiesen.

Betriebsbedingter Schiffsverkehr (Serviceverkehr)

- Der betriebsbedingte Schiffsverkehr innerhalb der abgesperrten Windparks ist im Vergleich zu dem permanenten, nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr außerhalb der Windparks und dem abgestrahlten Betriebsschall der in Betrieb befindlichen Anlagen zunächst energetisch vernachlässigbar. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass sich zumeist nur ein Serviceschiff zzgl. ggfs. gelegentlichen kleinen Crew-Transfer-Vessels und anderen Serviceschiffen im Tagzeitraum im und um den Windpark bewegen. In den Windparks selbst fahren Serviceschiffe größtenteils nur mit gedrosselter Geschwindigkeit (< 8 kn). Die überwiegende Zeit befinden sich die Serviceschiffe in oder um den Windpark auf Reede. Im Nachtzeitraum erfolgt meistens keine Schiffsbewegung. Dabei zeigt sich, dass die Serviceschiffe für küstennahe Windparks abends in den Hafen

einfahren und für entfernte Windparks Schlafmöglichkeiten offshore geschaffen wurden. Dies deckt sich mit dem Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan (FEP) (BSH, 2023).

- Der Schalleintrag des Serviceverkehrs außerhalb der Windparks beschränkt sich nur auf wenige An- und Abfahrten pro Tag bei küstennahen Windparks bzw. pro Woche bei entfernteren Windparks. Für eine Evaluation dieser Schalleinträge ins Wasser ist dieser in Relation mit dem zusätzlichen Schiffsverkehr zu setzen. Zudem erfolgt eine vollständige Vermischung des OWP-relevanten und des nicht OWP-relevanten Schiffsverkehrs auf den fest vorgegebenen Routen. Basierend auf dem Umweltbericht zum FEP 2023 (BSH,2023) macht der nicht OWP-relevante Schiffsverkehr 70% im Sommer und 80% im Winter aus, so dass der Anteil des OWP-relevanten Serviceverkehrs auf den Gesamtschalldruckpegel außerhalb von Windparks als gering bis vernachlässigbar einzustufen ist.

Mögliche ökologische Auswirkungen von Betriebsschall

- Der breitbandige Gesamtschallpegel übersteigt zu keinem Zeitpunkt in keinem der 27 betrachteten Windparks durch die in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen inkl. aller Hintergrundgeräusche, verursacht durch Wind und Wellen sowie Schiffslärm, einen Schalldruckpegel von 130 dB.
- Eine physische Schädigung in Form einer temporären oder permanenten Hörschwellenverschiebung ist basierend auf vorliegenden Audiogrammstudien für marine Säugetiere, insbesondere für die Leitart Schweinswal, auszuschließen (z. B. Kastelein et al., 2017). Aufgrund der tonalen und sehr tieffrequenten Schalleinträge durch die Anlagen (≤ 160 Hz) ist grundsätzlich davon auszugehen, dass diese Schallkomponenten selbst in Entfernungen von 100 m zur Anlage nicht von Schweinswalen wahrgenommen werden können. Andere Tierarten, wie z.B. Seehunde sind durchaus in der Lage diese tieffrequenten Schalleinträge wahrzunehmen.
- Zeitlich und räumlich begrenzte, erhöhte Schalleinträge durch Serviceschiffe sind innerhalb der Windparks nicht auszuschließen. Jedoch bewegt sich der betriebsbedingte Verkehr nur in einem Bruchteil der Zeit mit Fahrgeschwindigkeiten bis 8 kn.

- Bestehende Modellierungsansätze (z. B. Tougaard et al., 2020; Stöber & Thomsen, 2021) für Betriebsschall basieren zumeist auf nur wenigen und zum Teil kleineren Anlagentypen (oftmals mit Getriebe), so dass Vorhersagen der Schallbedingungen bestehender deutscher OWPs der neuesten Generation (z. B. Holme et al., 2023) zu erheblichen Überschätzungen des tatsächlich gemessenen Betriebsschalls von Anlagen von bis zu 8 dB führen. Auch die in Stöber & Thomsen (2021) berechneten Störradien für eine 10 MW Anlage von 6,3 km mit Getriebe und 1,4 km für getriebe lose Anlagen konnten mit dieser projektübergreifenden Studie nicht validiert werden. So konnten die tonalen Komponenten (Eigenfrequenzen) teilweise bis in Entfernungen von 5 km messtechnisch detektiert werden, aber nicht pegelbestimmend. Zudem sind die tief-frequenten Schalleinträge durch die Windenergieanlage bereits in Entfernungen von 100 m zur Anlage für einzelne marine Säugetiere, wie den Schweinswal, nicht mehr hörbar.
- Die ökologische Beurteilung von Betriebsschall muss immer im Kontext sämtlicher Dauerschallkomponenten, bestehend aus Schalleinträgen durch die Windenergieanlagen, dem OWP-relevanten und dem nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr, sowie den abiotischen Schalleinträgen durch z. B. Wind und Wellenschlag, kumulativ erfolgen. Nur durch eine Betrachtung des gesamten Dauerschalls in und um die Windparks lässt sich eine räumlich und zeitlich kumulative Evaluation der möglichen ökologischen Auswirkungen von in Betrieb befindlichen Windparks wissenschaftlich fundiert durchführen. Es empfiehlt sich aus sinnesphysiologischer Sicht für eine weitergehende Auswertung von Betriebsschall bzw. Dauerschall eine artenspezifische und hörgerechte Verarbeitung der Schalleinträge.

2. Einleitung und Notwendigkeit dieser Studie

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf See wächst schnell in Europa, auch in Deutschland, forciert durch den erneuerbaren Energieprozess nach 2011 (Fukushima). Die Nachfrage nach erneuerbaren Energien muss jedoch mit dem Bewusstsein für Nachhaltigkeitsaspekte einhergehen, insbesondere für den Schutz der Natur und der marinen Öko-systeme. Der Bau und der anschließende Betrieb von Offshore-Windparks führt zu sehr unterschiedlichen Einträgen von Schallenergie ins Meer. Die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL, 2008) unterscheidet Schalleinträge ins Wasser grundsätzlich in zwei Deskriptoren: 11.1 impulshaltiger Schall, wie Impulsrammungen oder Sprengschall und 11.2 Dauerschall, wie z. B. Schiffslärm oder Betriebsschall von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA).

Im Rahmen der Schwellenwertentwicklung für Impuls- und Dauerschall für alle europäischen Gewässer durch die EU-Arbeitsgruppe *TG-NOISE* wurde das Grundkonzept für die Schwellenwerte im Hinblick auf den kontinuierlichen Unterwasserschall (Dauerschall; Kriterium D11C2) wie folgt definiert: „In keinem Monat des Beurteilungsjahres dürfen mehr als 20% ($\leq 20\%$) des Habitats der ausgewählten Arten Unterwasserschalleinträge aufweisen, die über dem Schwellenwert liegen“. Die Entwicklung und die Abstimmung dieser Schwellenwerte sind wichtige, bestimmende Prozesse und werden sowohl national als auch regional erfolgen, um diese zielführend nutzen zu können. Dies bedeutet jedoch, dass derzeit weder national noch international verbindliche Richt- oder Grenzwerte für eine ökologische Beurteilung von Betriebsschall (Dauerschall) existieren.

Der Schweinswal ist die einzige, heimische Walart in deutschen Gewässern der Nord- und Ostsee. Zur Orientierung unter Wasser, zur Nahrungssuche und zur Kommunikation verwendet der Schweinswal ein Echo-Ortungssystem und reagiert daher sensibel auf eine Verlärmung der Meere. Aus diesen Gründen gilt diese Art in der deutschen Nord- und Ostsee als Schlüsselart im Rahmen der Bewertung von anthropogenen Schalleinträgen ins Wasser.

In den ersten Jahren dieser Betrachtungen lag das Hauptaugenmerk vermehrt auf dem Bau-schall, da in den meisten Fällen die Gründungsarbeiten der Fundamentstrukturen mittels Impulsrammverfahren erfolgten. Diese bewährte Installationsmethode verursacht besonders lauten, impulshaltigen Unterwasserschall, der bei Schweinswalen physische Schäden des auditorischen Systems in Form von temporären oder permanenten Hörschwellenverschiebungen verursachen kann (z. B. Lucke et al., 2009; Kastelein et al., 2015; Southall et al., 2019). Zudem wurde eine Meide- oder Störwirkung bei dieser Installationsmethode zeitlich und räumlich über mehrere Kilometer festgestellt (Brandt et al., 2016; Rose et al., 2019). Durch die

intensiven Bemühungen der Industrie und durch öffentliche Förderungen konnte innerhalb von wenigen Jahren ein Standard-der-Technik für Schallminderungsmaßnahmen entwickelt werden, der zu einer erheblichen Reduzierung führte und damit zur Einhaltung der deutschen Lärmschutzwerte³ für impulshaltigen Schall-eintrag (Bellmann et al., 2020).

Im Gegensatz dazu sind die ökologischen Auswirkungen des Unterwasserschalleintrages durch den Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) bisher nur wenig systematisch untersucht worden. Mehrere Studien weisen darauf hin, dass die mechanischen Schwingungen von Komponenten, verursacht durch die Umsetzung der Rotation der Turbine über das Getriebe zum Generator, über die Gründungsstruktur (Turm inkl. Fundament) ins Wasser abstrahlt werden. Durch Messungen in ausländischen Offshore-Windparks war die ungefähre Art dieser Geräusche schon früh bekannt (z. B. Betke et al., 2003, 2004). Es ist davon auszugehen, dass dieser Schalleintrag den in der näheren Umgebung gemessenen Umgebungslärm bzw. permanent vorhandenen Hintergrundschall dominieren kann (z. B. Betke, et al., 2005; Madsen et al., 2006; Norro & Degraer, 2016; Yang, et al., 2018). Laut dem Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan 2023 (BSH, 2023) ist jedoch nicht von einer Tötung oder Verletzung von marinen Säugetieren (Leitart in Deutschland ist der Schweinswal) im Sinne des BNatSchG durch Betriebsschall auszugehen.

Im ersten deutschen Offshore-Windpark *alpha ventus* wurden 2011 ähnliche Schalleinträge ins Wasser gemessen (Betke, 2014). Allerdings war zu diesem Zeitpunkt der Betriebsschall damit nur oberflächlich untersucht. So war nicht bekannt, ob und in welchem Ausmaß der Betriebschall von der Größe oder der Nennleistung einer Windenergieanlage sowie ihrer Bauart (Direktgetriebe oder Getriebe) abhängt. Ein weiterer Einflussparameter auf die Schallabstrahlung könnte die Art des Fundaments sein; so ist ein Unterschied zwischen Monopile- und Jacket-Gründungen denkbar. Auch standortspezifische Einflussparameter, wie z. B. Bathymetrie oder Windgeschwindigkeit, sind nicht auszuschließen.

Angetrieben durch die Nachfrage nach erneuerbarer Energie und den vorliegenden Erfahrungen wurden die Turbinengröße und damit auch deren (Nenn-) Leistung im letzten Jahrzehnt erheblich größer. Derzeit werden OWEA der 8 bis 9 MW-Klasse errichtet; anstehende Offshore-Projekte werden Nennleistungen von deutlich über 10 MW haben. Ein erster Prototyp einer

³ Deutsches, duales Lärmschutzwertkriterium zur Vermeidung von temporären Hörschwellenverschiebungen bei Schweinswalen durch impulshaften Schalleintrag ins Wasser: 5% Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}) ≤ 160 dB und zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ≤ 190 dB, einzuhalten in 750 m Abstand zur Quelle.

15 MW OWEA ist bereits onshore in den Testbetrieb gegangen (erneuerbare Energien, 2023⁴); 18 MW OWEAs sind ebenfalls in Planung. Außerdem geht der Trend zunehmend zu getriebelosen Turbinen (Direktantrieb).

Im Gegensatz zu der Effizienzkontrolle bei den Fundamentgründungen (Bauphase) mittels Impulsrammverfahren konnten bisher die projekt- und standortspezifischen Einflussparameter von in Betrieb befindlichen OWEAs weder in Deutschland noch international systematisch anhand einer großen, empirischen Datenlage untersucht werden. Hintergrund könnte der Mangel an bestehenden und frei zugänglichen Betriebsschallmessdaten sein. Zudem wurden in den meisten Fällen keine standardisierten Mess- und Auswertungskonzepte bei Betriebsschallmessungen angewendet, so dass sich ein Vergleich der bestehenden Messdaten verschiedener, internationaler Windparks als schwierig bzw. nur bedingt möglich herausstellte. Einige Studien haben die frei verfügbaren, empirischen Datensätze von Betriebsschallmessungen zusammengefasst und darauf basierend Modelle für die Schallabstrahlung und -ausbreitung von in Betrieb befindlichen Anlagen generiert (z. B. Tougaard et al., 2020; Stöber & Thompson, 2021). Jedoch ist keine Studie bekannt, die die kumulativen Effekte sämtlicher Dauerschalleinträge im Wasser berücksichtigt hat, da in und um Windparks Schalleinträge durch die Anlagen selber, den OWP-relevanten Serviceverkehr, den nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr und abiotische Effekte wie Wind und Wellenschlag vorhanden sind.

Ziel des F&E-Vorhabens OWF Noise ist es zum einen, die wesentlichen Einflussparameter von in Betrieb befindlichen Anlagen auf den Schalleintrag ins Wasser zu identifizieren und zu quantifizieren. Zum anderen soll der kumulative Effekt vom Betriebsschall der Anlagen, der betriebsbedingte Schiffsverkehr und der permanente Hintergrundschall in und um die Windparks systematisch untersucht werden. Hierzu wurden erstmalig die Betriebsschallmessungen an 27 Windenergieanlagen aus 24 Windparks verwendet. Diese Betriebsschallmessungen wurden pro OWEA an mindestens drei Messpositionen in Abständen zwischen 100 m von einer ausgewählten Anlage, in der Windparkmitte bis hin zu 5 km außerhalb des Windparks in drei definierten Betriebszuständen der Anlagen (Stillstand der Anlagen, Anlagen laufen mit Nennleistung und Anlagen befinden sich zwischen den zuvor genannten Betriebszuständen) parallel über mehrere Wochen ausgeführt. Zudem wurden für die Beurteilung des Betriebsschalls

⁴ <https://www.erneuerbareenergien.de/technologie/offshore-wind/offshore-windturbinen-v236-co-vestas-nimmt-rekord-windenergieanlage-betrieb>

ebenfalls 12 Hintergrundschallmessungen in und um ausgewählte Windparks zumeist an denselben Messpositionen wie die Betriebsschallmessungen vor dem Bau der Windparks durchgeführt.

Sämtliche Datensätze für Betriebs- und Hintergrundschallmessungen sind Bestandteil des nationalen Schallregisters MarinEARS für Dauerschall und beinhalten Windparks aus der AWZ der Nord- und der Ostsee. Vergleichbar zum Schallregister Impulsschall im MarinEARS wurden sämtliche besagten Dauerschallmessungen in standardisierter Form erfasst und ausgewertet sowie zentral dokumentiert. Damit enthält die Datenbank für Dauerschall nicht nur die Rohdaten und prozessierte Messdatensätze, sondern auch wesentliche Begleitinformationen für Betriebs- und Hintergrundschall, wie z. B. Windverhältnisse, OWEA-Typ inkl. Leistungsdaten, Messberichte, etc. Hintergrund dieser größten Datenbasis für Betriebs- und Hintergrundschall weltweit ist dem Vorsorgeprinzip in Deutschland geschuldet. So wurden seit 2011 nicht nur umfangreiche Messungen während der Bauphase, sondern auch Unterwasserschallmessungen vor dem Baustart im Genehmigungs- und Vollzugsverfahren in Deutschland angeordnet. Vom BSH wurde dazu unter Mitarbeit von Akustikern von der *Müller-BBM GmbH* und der *itap GmbH* die „Messvorschrift für Unterwasserschall-messungen“ (BSH, 2011) erarbeitet, welche Vorgaben für diese Art der Dauerschallmessung sowie deren anschließende Auswertung nach dem damaligen Wissensstand enthält. Der wesentliche Fokus der Messvorschrift lag und liegt auf der Erfassung des Schalleintrages von OWEAs im Betrieb und nicht auf der Erfassung des betriebsbedingten Serviceverkehrs.

Durch die standardisierten Datensätze im MarinEARS für Hintergrund- und Betriebsschall werden die Messdaten und deren Begleitdokumente für eine projektübergreifende Analyse handhabbar. Basierend auf dieser Datenbank ist es das Ziel dieses F&E-Vorhabens, eine projektübergreifende Analyse durchzuführen, um die standort- und betriebsbedingten Einflussparameter des Schalleintrages ins Wasser durch in Betrieb befindlicher Windenergieanlagen zu identifizieren; siehe Kapitel 6.1 und 6.2.

Schiffsgeräusche, die dem Betrieb des Windparks zuzuordnen sind (Serviceverkehr) und damit eigentlich Bestandteil der Betriebsgeräusche eines Windparks sind, wurden bislang kaum national, wie international untersucht. Erst in den Jahren ab 2019 wurden vereinzelt Messungen des betriebsbedingten Schiffsverkehrs in und um die Windparks in Deutschland durchgeführt. Eine weitergehende Fragestellung dieses Forschungsvorhabens ist, ob und welcher Einfluss

durch den zusätzlichen Serviceverkehr von Windparks ausgeht. Mit den vorliegenden, empirischen Messdaten und Analysen bereits abgeschlossener Betriebsschallmessungen wird eine erste Abschätzung des betriebsbedingten Schiffslärms dargestellt; Kapitel 6.4.

Die Erfassung des Hintergrundschalls vor dem Bau des Windparks ist ebenfalls zwingend erforderlich, da Betriebsschall im Kontext zu dem permanenten Hintergrundschall zu sehen ist, um die kumulativen Effekte sämtlicher Dauerschalleinträge ins Wasser analysieren und evaluieren zu können; siehe Kapitel 6.3 und Kapitel 7.2. In den beiden geförderten Forschungsvorhaben BIAS⁵ für die Ostsee und JOMOPANS⁶ für die Nordsee wurden großangelegte Unterwasserschallmessungen des permanent vorhandenen Hintergrundschalls ab den Jahren 2014 erfasst. Es stellte sich grundsätzlich heraus, dass der permanente Hintergrundschall maßgeblich von der Art und Anzahl von Schiffen und Schiffsgeschwindigkeit abhängig ist; je größere, schnellere und je mehr Schiffe (Schiffsdichte) im Einsatz sind, desto größer ist der Schalleintrag ins Wasser. Aber auch abiotische Schalleinträge, wie Wind und Wellen, können den Hintergrundschall zumindest in bestimmten Frequenzbereichen nachhaltig beeinflussen. Schallkarten aus den beiden Forschungsvorhaben zeigen eine hohe Korrelation zwischen dem gemessenen Unterwasserschall und den vorhandenen Schiffsrouten (Verkehrstrennungsgebieten - VTG) in der Nord- und Ostsee.

Der gemessene Schall von Offshore-Windenergieanlagen wird in diesem Bericht außerdem mit dem Hörvermögen von Schweinswalen verglichen, die in Deutschland als Leitart für die ökologische Bewertung von Schalleinträgen ins Wasser gelten. Damit soll ein weiterer Beitrag zur weitergehenden, ökologischen Bewertung der möglichen Stör- und Meidewirkung des Betriebsschalls geliefert werden; Kapitel 7.3. In Kapitel 7.4 werden abschließend die möglichen, kumulativen Effekte von Betriebsschall diskutiert.

⁵ Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscapes – BIAS: EU life plus project. <https://biasproject.wordpress.com/>

⁶ Joint Monitoring Program for Ambient Noise North Sea – JOMOPANS: EU interreg project. <https://northsearegion.eu/jomopans/>

3. Schalltechnische Grundlagen

Grundsätzlich können Schalleinträge ins Wasser abiotische Quellen, wie Wind und Wellen, und biotische Quellen, wie Tierlaute zur Echolotortung oder Kommunikation untereinander, sein. Neben diesen natürlichen Geräuschen gibt es anthropogene Schallquellen, wie Schiffsverkehr, oder Baumaßnahmen, wie z. B. Rammarbeiten. Die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (2008) unterteilt dabei alle Schalleinträge (Deskriptor 11: Energieeintrag ins Wasser / Unterwasserschall) in impulshaften Schalleintrag und Dauerschall. Betriebsschall von Windenergieanlagen sowie Hintergrundschall sind als Dauerschall einzustufen. Im Folgenden werden die wesentlichen, akustischen Kenngrößen für Dauerschall kurz dargestellt. Die in diesem Bericht verwendete Terminologie für Unterwasserschall basiert auf der ISO 18405 (2017) sowie der Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011).

3.1 Schalldruck und Schalldruckpegel

Schall im Allgemeinen besteht aus Druckschwankungen in einem Medium, wie Wasser oder Luft. Typischerweise wird Schall durch zwei physikalische Größen beschrieben, dem *Schalldruck* p (in Pascal Pa), der die Druckschwankung, und der *Schallschnelle* v (in mm/s), die die Geschwindigkeit bei der Auslenkung des Mediums charakterisiert. Die Schallschnelle ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser} , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von $c_{Wasser} = 1.480$ m/s liegt. Die Schallschnelle v ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit c .

Schalldruck p und Schallschnelle v stehen mit der akustischen Kennimpedanz Z (in Ns/m^3 bzw. kg/m^2s ; veraltet: Rayl), die den Wellenwiderstand des Mediums charakterisiert, im folgenden Zusammenhang:

$$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c \quad \text{Gleichung 1}$$

mit

ρ – Dichte des Mediums (in kg/m^3),

c – Schallgeschwindigkeit (in m/s).

Schall lässt sich grundsätzlich als schnelle Schwankung des Umgebungsdrucks oder des statischen Drucks verstehen; Abbildung 1. Die physikalische Größe *Schalldruck* addiert sich also zum konstanten Umgebungsdruck.

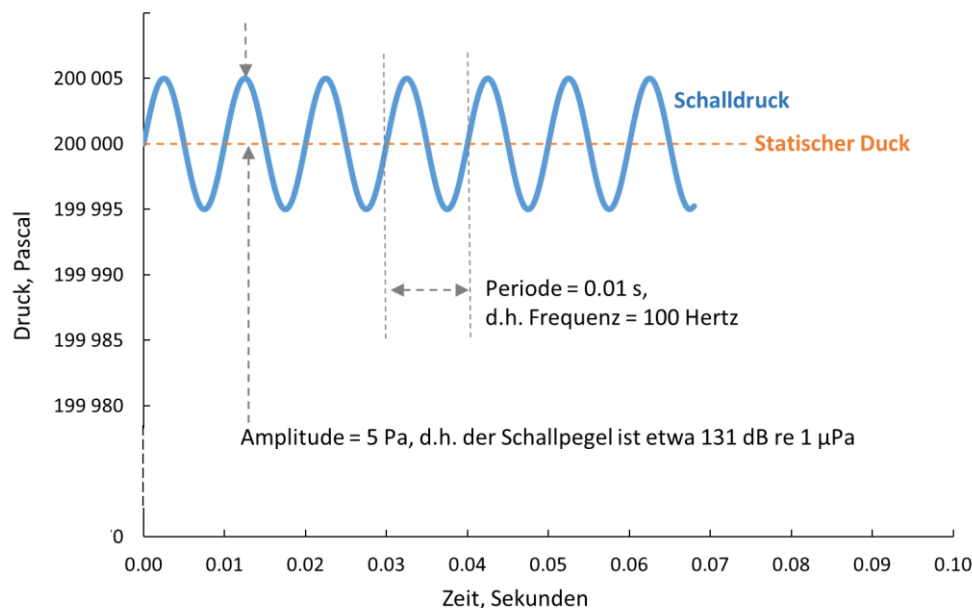


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Schalldruck und statischem Wasserdruck am Beispiel eines einzelnen Tons mit einer Frequenz von 100 Hz. Der statische Druck von 200 kPa in diesem Beispiel entspricht einer Wassertiefe von etwa 10 m.

Allgemeines zu Schalldruckpegeln

Wie in anderen Bereichen der Nachrichtentechnik, wenn die darzustellenden Werte einen großen Wertebereich überspannen, wird Schall nicht durch den physikalisch messbaren Schalldruck, sondern durch den Schallpegel oder genauer Schalldruckpegel charakterisiert. Messgeräte bzw. Sensoren für Unterwasserschall (Hydrophone) liefern zunächst lineare Werte des Schalldrucks, jedoch keinen logarithmischen Pegel (in dB). Dieser muss somit in die gewünschte Pegelgröße umgerechnet werden. Allgemein erfolgt das mit

$$L = 10 \log_{10}(\langle p^2 \rangle / p_0^2) \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit

$\langle p^2 \rangle$ - quadrierte und zeitlich gemittelte Schalldruck p (in Pa),

p_0 - international genormte Bezugsschalldruck 1 µPa (ISO 18405, 2017).

Die Mittelungszeit, die in der Gleichung 2 nicht explizit auftritt, ist der Aufgabenstellung entsprechend frei wählbar. In dieser Untersuchung beträgt sie 5 s, dies entspricht der BSH-

Messvorschrift (BSH, 2011), Abschnitt 6. Der Pegel L in der Gleichung 1 kann auch als „energie-äquivalenter Dauerschallpegel“ L_{eq} wie folgt geschrieben werden:

$$L_{eq} = 20 * \log_{10} \frac{1/T \int_0^T p(t)^2 dt}{p_0} \quad (\text{Gleichung 3})$$

mit

$p(t)$ – zeitlich schwankender Druck (in Pa),

T – Mittelungszeit (in s); in dieser Studie 5 s.

Das Ergebnis p ist der Schalldruck in Pa (meistens der mittlere Schalldruck, da der Pegel L praktisch immer ein mittlerer Pegel ist).

Überschreitungspegel

Auf der Basis der über Zeitabschnitte von 5 Sekunden gemittelten Schalldruckpegels lassen sich statistische Darstellungen bilden. Diese werden gelegentlich auch fälschlicherweise als „Perzentilpegel“ (z. B. in DIN 1320, 2009) bezeichnet. Bei der Analyse des Betriebsschalls werden vorzugsweise der L_{05} , L_{50} und L_{90} als aussagekräftige Größen herangezogen.

Der L_{90} wird beispielsweise in 90% der Messzeit und demnach von 90% der Messwerte überschritten und fungiert als Maß für leise Zeitabschnitte bzw. charakterisiert zumeist den permanenten Hintergrundschallpegel. Der L_{90} wird zumeist durch Geräusche entfernter Schiffe und Wind- und Wellengeräusche beeinflusst, aber inkludiert auch die OWEA-Betriebsgeräusche benachbarter Windparks, sofern vorhanden.

Der L_{05} wird von 5% aller Messwerte der Analysedauer überschritten und dient als Maß für die „lautesten“ Pegel der Mittelungszeiträume. Er ist statistisch robuster als der absolute Maximalwert, der u. U. schon durch eine(n) einzelne(n), laute(n) Störung oder Schalleintrag einen sehr hohen Wert annehmen kann. Allerdings kann bei starkem Wind auch der L_{05} durch Nebengeräusche, z. B. einzelner Wellenschlag oder Kettenklirren der Messgeräteverankerung, störend beeinflusst werden.

Der auch Median genannte L_{50} ist ein gegenüber Ausreißern in beide Richtungen robuster Mittelwert und bietet sich als Datenbasis für qualitative Aussagen in Vergleichen an.

Für die Beurteilung der stationären Anlagengeräusche ist daher eine genaue Betrachtung von L_5 , L_{50} und L_{90} erforderlich, statt des über die gesamte Messzeit gemittelten L_{eq} . Im Nachfolgenden wird der L_{50} auch für die Identifikation möglicher Einflussparameter auf Betriebsschall verwendet.

Die Berechnung der statistischen Pegelgrößen L_{05} , L_{50} und L_{90} basiert auf $L_{eq,5s}$ (Gleichung 3), also dem in 5-Sekunden-Schritten ermittelten, äquivalenten Dauerschallpegel.

Beispiel: Angenommen, innerhalb einer Windklasse wurden insgesamt 3.000 auswertbare 5-Sekunden-Intervalle aufgezeichnet, also etwa 4,2 Stunden. Diese 3.000 diskreten Werte des $L_{eq,5s}$ werden der Größe nach aufsteigend sortiert. Der L_{50} ist nun der Pegelwert Nr. 1.500, der L_{05} der Pegel Nr. 2.850 und der L_{90} der Pegel Nr. 300.

Frequenzspektren

Pegel können sowohl breitbandig angegeben werden, d. h. in Form einer einzigen Zahl für den gesamten, betrachteten Frequenzbereich von z. B. 10 Hz bis 20.000 Hz, als auch für einzelne Frequenzbänder; siehe Abbildung 2. Beim genormten 1/3-Oktavspektrum (auch Terzbandspektrum genannt) beträgt die Frequenzauflösung stets drei Werte per Frequenzverdopplung bzw. Oktave; Abbildung 2 (links). Beim Schmalbandspektrum (Abbildung 2, rechts) können die Frequenzauflösung und andere Parameter, wie Fensterungen und zeitliche Mittelungen, entsprechend der Analyse frei gewählt werden.

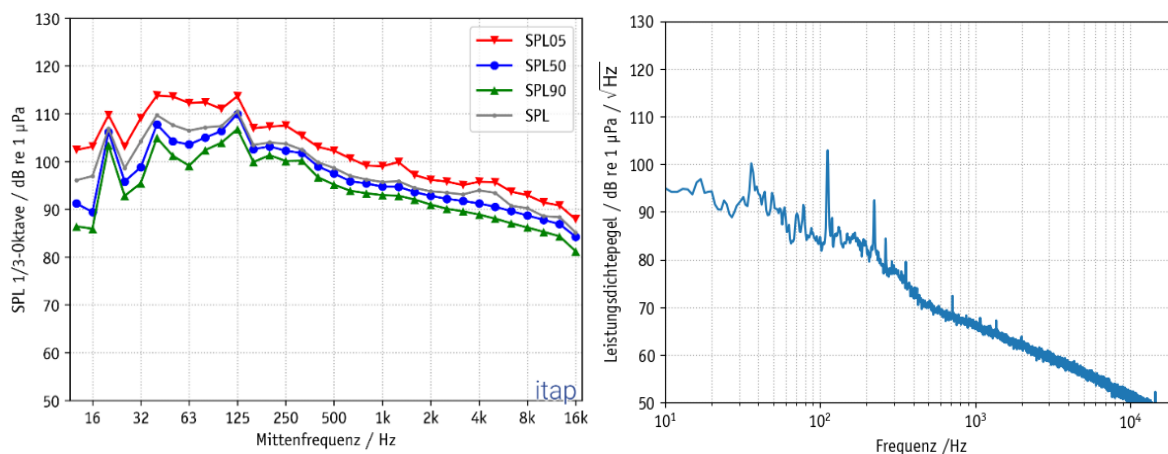


Abbildung 2: Links: gemitteltetes 1/3-Oktavspektrum einer Betriebsschallmessung in ca. 100 m Entfernung zu einer Anlage sowie die dazugehörigen 5, 50 und 90% Überschreitungspegel, rechts: Schmalbandspektrum mit 1 Hz Auflösung. Der breitbandige L_{50} (Gesamtpegel der blauen Kurve im linken Bild) beträgt etwa 118 dB re 1 μ Pa.

3.2 Typische Schallquellen im Meer

Generell werden Schallquellen im Meer, die das akustische Unterwasserumfeld beeinflussen, in zwei Größen unterschieden: natürliche (biotisch oder abiotische) und anthropogene (menschengemachte) Schallquellen.

Als natürliche Schallquellen im Meer gelten vor allem wetterbedingte Einflüsse. Diese können im Allgemeinen durch Wind, Wellen, Niederschlag und Unwetter hervorgerufen werden. Je nach Stärke und Art des Wettereinflusses variiert der charakteristische Frequenzbereich. Zusätzlich gelten als natürliche Schallquellen auch Geräusche von maritimen Lebewesen, sowie seismisch evozierte Geräusche. Im Nachfolgenden sind einige bekannte Schallquellen zusammengefasst:

Wind und Wellen: Windinduzierte Unterwassergeräusche haben im Spektrum ein sehr flaches Maximum bei 500 Hz und sind bis über 10 kHz nachweisbar. Der Schallpegel steigt bei jeder Verdopplung der Windgeschwindigkeit im Bereich 1,5 m/s bis 20 m/s um rund 5 dB an (Carey & Evans, 2011).

Niederschlag: Regen, Hagel und auch Schnee verursachen Geräusche im Bereich von einigen kHz bis zu mehreren 10 kHz. Kleine Regentropfen um 1 mm erzeugen ein ausgeprägtes Maximum bei 13 bis 16 kHz (Bjørnø, 1994).

Sonstige abiotische Schallquellen: Weitere abiotische Geräusche sind Gewitter, Eisbewegungen und seismische Geräusche. Massiver Niederschlag, wie Hagel oder Starkregen, produziert i. d. R. relativ hochfrequenten Schalleintrag ins Wasser und ist je nach Wassertiefe pegelbestimmend.

Biotische Geräusche: Auch Tiere können Schall für die Echoortung, zum Jagen oder für die Kommunikation ins Wasser eintragen; unter anderem die Klicklaute der Leitart Schweinswale in der Nord- und Ostsee. Diese liegen im Frequenzbereich um 130 kHz; bei solch hohen Frequenzen ist die Absorption des Wassers recht stark, weshalb die Klicks nur eine Reichweite von bis zu einem Kilometer haben (Clausen *et al.*, 2010).

Technischer Hinweis: Grundsätzlich hat sich bei den Betriebsschallmessungen im Zeitraum März bis Oktober gezeigt, dass weder Starkregen, Hagel oder natürliche Geräusche von Schweinswalen pegelbestimmend bei den Betriebsschallmessungen im und um Windparks waren.

3.3 Anthropogener Schalleintrag ins Wasser durch Offshore-Windparks

Grundsätzlich können Schalleinträge, die durch den Betrieb eines Windparks entstehen, in betriebsbedingten Schiffslärm (Serviceverkehr) und Schalleinträge von im Betrieb befindlichen Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) klassifiziert werden. Beide Schalleinträge werden im Nachfolgenden kurz beschrieben.

3.3.1 Schalleinträge durch Offshore-Windenergieanlagen

Schalleinträge ins Wasser, die beim Betrieb einer Offshore-Windenergieanlage zu beobachten sind, gehen größtenteils von rotierenden Maschinenteilen, wie Rotorblatt, Getriebe und Generator, aus. Diese verursachen Strukturschwingungen der Gondel und des Turms und breiten sich bis unter die Wasserlinie aus, wo sie als Unterwasserschall abgestrahlt werden (Abbildung 3).

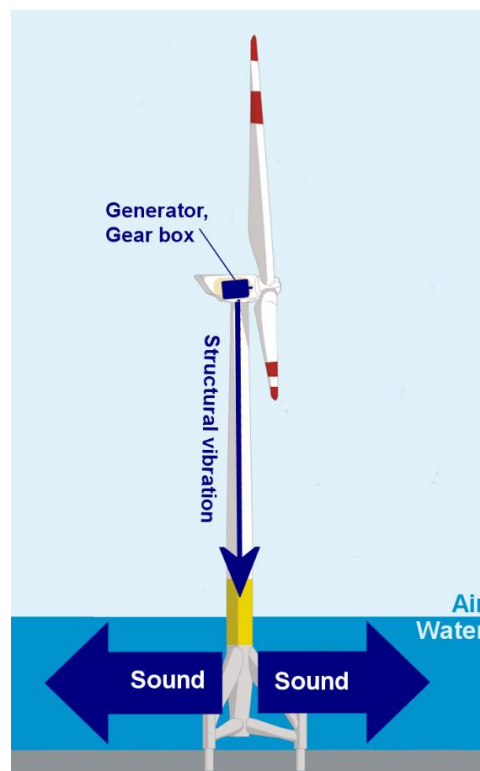


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Eintrags von Maschinengeräuschen ins Wasser.

Wenn z. B. in einer Getriebestufe 100 Zähne je Sekunde in mechanischen Kontakt kommen, ist mit einem Ton mit einer Grundfrequenz von 100 Hz zu rechnen, eventuell auch mit Overtönen vom ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz, auch Harmonische genannt. Die Frequenzen dieser von der Anlage produzierten, schmalbandigen Geräusche (Rotor-

Antriebssystem-Eigenfrequenz) liegen überwiegend deutlich unter 1.000 Hz (z. B. Betke und Matuschek 2012, Betke 2014). Im Frequenzspektrum treten diese Geräusche als schmalbandige Pegelspitzen hervor. In Abbildung 4 sind exemplarisch die Schalleinträge von in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen mit Nennleistungen zwischen 1,5 und 5 MW als Schmalbandspektren aus veröffentlichten Messungen zusammengefasst (Betke und Matuschek, 2012). Derartige, typische Schmalbandspektren sind auch in anderen Veröffentlichungen neueren Datums zu finden (z. B. Tougaard et al., 2020; Stöber und Thompson, 2021).

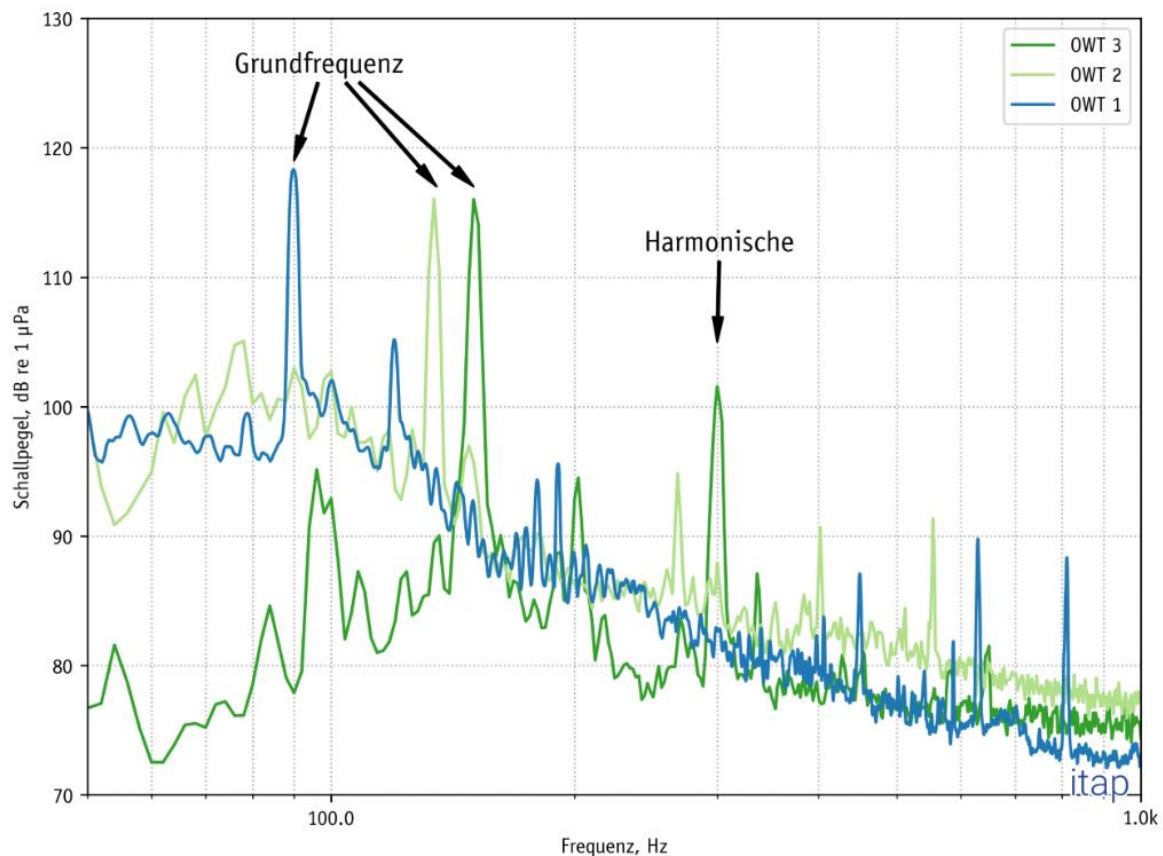


Abbildung 4: Unterwassergeräusche von drei verschiedenen OWEA, jeweils in ca. 100 m Entfernung. OWT1: 5 MW-Anlage installiert auf einem Tripod-Fundament, OWT2 und OWT3 jeweils 2 MW-Anlage installiert auf Monopfählen mit unterschiedlichen Durchmessers (Betke und Matuschek, 2012).

Für getriebelose Anlagen, bei denen der Rotor direkt den Generator antreibt (englisch „direct drive“), trifft der im vorigen Abschnitt beschriebene Mechanismus der Schallentstehung nicht zu. Die Erregung des Generators erfolgt dort i. d. R. durch Permanentmagnete. Die Anzahl der Nuten des Generators in Abhängigkeit zur Rotordrehzahl bestimmt dessen Grundfrequenz. Oftmals wird von einer Grundfrequenz von 20 bis 50 Hz je nach Direkt-getriebetyp bzw. Anzahl der Permanentmagneten ausgegangen. Somit wurden auch bei solchen Windenergieanlagen zum Teil auffällige, tonale Geräuschkomponenten festgestellt.

Aerodynamische Geräusche von den Rotorblättern, die den Luftschall von Windenergieanlagen in der unmittelbaren Umgebung dominieren, spielen beim Unterwasserschall keine Rolle, da der Luftschall aufgrund der deutlich unterschiedlichen Schallimpedanzen von Luft und Wasser praktisch nicht ins Wasser eindringt. Zudem übertragen sich i. d. R. Vibrationen von den Rotorblättern nicht über die Generatoren, so dass auch diese Art der Schalleinträge ins Wasser nicht von Bedeutung sind.

3.3.2 Schalleinträge durch Schiffsverkehr

Die Schalleinträge von Schiffen sind abhängig von der Größe bzw. Länge der Schiffe, der Fahrgeschwindigkeit und des Antriebsmoduls. In der MSRL und in den Empfehlungen der HELCOM und OSPAR sind die 1/3-Oktavbänder um 63 und 125 Hz Indikatoren für herkömmliche Schiffsgeräusche größerer Schiffseinheiten. Dies konnte auch zum Teil durch Messungen innerhalb der Projekte BIAS (BIAS, 2016) sowie JOMOPANS und durch mehrere andere Langzeitmessungen (NRC, 2003) eindeutig nachgewiesen werden.

Bei den üblicherweise kleinen Schiffen bzw. Booten, die oftmals für Freizeitaktivitäten verwendet werden, ist das Spektrum der Schallabstrahlung zumeist deutlich hochfrequenter und hat ein Maximum im Bereich 1 bis 10 kHz (Kipple & Gabriele, 2003). Bei anderen Antriebsarten, wie z. B. der elektrische Antrieb bei einem Teil der Fähren der Fehmarnbeltquerung, ergeben sich teils Maxima im Spektrum zwischen 400 und 500 Hz (*itap GmbH* eigene Messungen).

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass auch im Schiffsbau eine naturverträgliche Umrüstung sukzessive Einzug hält. Diese sogenannte Blue Technologie setzt derzeit vermehrt auf Flüssiggasantriebe (engl. Liquid Natural Gas – LNG). Welchen Einfluss diese neuartigen, teils durch Turbinen gestützten, Antriebe auf die spektrale Verteilung und Pegel der Schalleinträge ins Wasser hat, ist derzeit noch nicht abschätzbar.

3.4 Hörvermögen von Schweinswalen

Für die Beurteilung des Hörvermögens von Tieren ist die (Ruhe-) Hörschwelle die wichtigste, audiologische Kenngröße. Sie gibt an, welchen Schallpegel ein Ton einer bestimmten Frequenz (Einzelton bzw. sinusförmiges Signal; teilweise wird auch ein Sinussweep verwendet) haben

muss, damit er vom Tier gerade eben wahrgenommen wird (Abbildung 5). Wie beim Menschen ist die Hörschwelle stark frequenzabhängig, z. B. Zwicker und Fastl (1999). Zudem zeigen sich interindividuelle Unterschiede. Bei etwa der Hälfte der Individuen liegt die Hörschwelle dabei innerhalb eines Bereiches von ± 5 dB um den Medianwert. An den Rändern des Hörbereiches, also bei besonders tiefen und hohen Frequenzen, ist die Streuung erwartungsgemäß größer (z. B. Betke, 1991). Auch bei Landsäugetieren und Vögeln konnten diese Frequenzabhängigkeiten und interindividuellen Unterschiede festgestellt werden (Hefner & Hefner, 1992; Beason, 2004).

Die von den OWEA verursachten, schmalen Maxima (tonale Komponenten der Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz) im Unterwasserschallspektrum in Abbildung 4 können zumindest qualitativ mit gemessenen Hörschwellen verglichen werden; die Vergleichbarkeit wird dadurch begünstigt, dass die kritische Bandbreite, die im Gehör für die Lautstärkewahrnehmung wichtig ist, bei vielen Walarten, wie dem Schweinswal, grob angenähert die gleiche Breite wie die messtechnischen 1/3-Oktavbänder hat (Au und Hastings, 2008).

Für den hier interessierenden Frequenzbereich unter 500 Hz gibt es allerdings nur wenige, belastbare Hörschwellendaten von unterschiedlichen Schweinswalindividuen. Dadurch ist auch wenig über die interindividuelle Streubreite bekannt, d. h. die Unterschiede in der Hörwahrnehmung von unterschiedlichen Tieren derselben Art. Wie bei anderen Tieren (und beim Menschen) ist eine weitere Schwierigkeit bei der Beurteilung, dass die bloße Hörbarkeit eines Geräusches (= Pegel liegt über der Hörschwelle) noch keine Stör- oder Meidewirkung bedeuten muss (z. B. Zwicker und Fastl, 1999).

Generell erstreckt sich der Hörbereich bei Schweinswalen von ca. 125 Hz bis 140 kHz (Kastlein et al., 2015). Der Bereich „guten“ Hörens lag in dieser Studie zwischen 13 und 140 kHz und ist definiert mit einem Pegelanstieg von bis zu 10 dB über der niedrigsten Hörschwelle bei 125 kHz. Klicklaute, die von Schweinswalen zur Echolokation ausgesendet werden und zur Orientierung bzw. zur Jagd dienen, liegen im Bereich 100 bis 140 kHz.

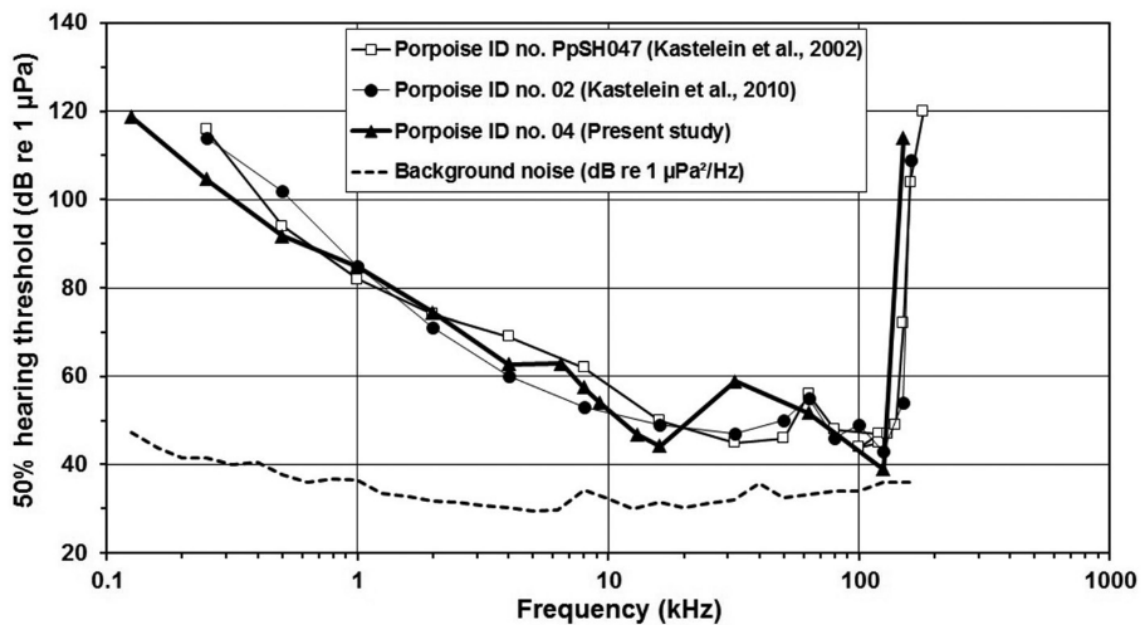
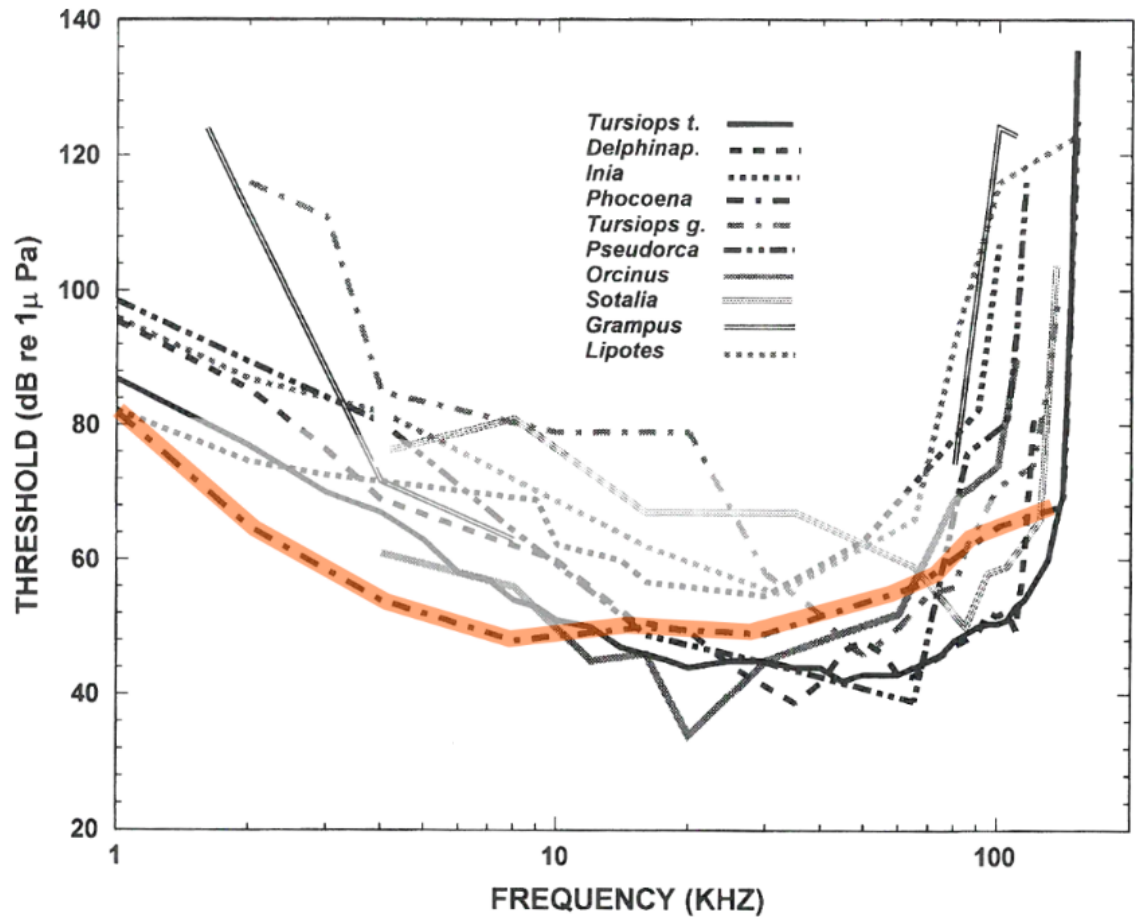


Abbildung 5: Oben: Hörschwellen verschiedener Zahnwale; farblich hervorgehoben ist die Hörschwelle eines Schweinswals (Au und Hastings, 2008). Unten: Ruhehörschwellen verschiedener Schweinswalindividuen (Kastelein et al., 2015).

4. Anforderungen an die Messungen und Umsetzung

Die Anforderungen an die Messsysteme und an den Ablauf der Messung sind vom BSH im „Standard: Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)“ (BSH, 2013) und der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen (BSH, 2011) zusammengefasst und werden seit 2011 in deutschen Windparks im Regel- und Vollzugsprozess angeordnet.

4.1 Gängige Vollzugspraxis bei der Durchführung von Betriebsschallmessungen in Offshore-Windparks

Im Rahmen der Überwachung der Betriebsphase muss der Unterwasserschall standardisiert in und um Offshore-Windparks in Anlehnung an die Messvorschrift (BSH, 2011) untersucht werden.

Ziel der Untersuchung des Unterwasserschalls in der Betriebsphase der Offshore Windparks ist die Einschätzung der möglichen Auswirkung auf die Meeresumwelt, insbesondere auf die Schlüsselart Schweinswal. Die Einschätzung soll dabei für einzelne Offshore Windparks erfolgen und zugleich die Grundlage schaffen, um kumulative Effekte durch Unterwasserschall in der Betriebsphase vorhabenübergreifend zu bewerten. Ein Vergleich mit der generellen Schallsituation (Hintergrundschall) in der Umgebung des Windparks möglichst kurz vor Beginn der Installationsarbeiten ist dabei anzustreben, um den jeweils aktuellen Stand des Schiffsverkehrs in der Analyse berücksichtigen zu können.

Basierend auf dem fortlaufenden Erfahrungsgewinn haben sich zusätzliche Anforderungen an die Betriebsschallmessungen ergeben, die in der Vollzugspraxis in Form von Vorgaben Anwendung finden: Im Folgenden werden diese zusammengefasst:

Bei Offshore Windparks, die in unmittelbarer Nähe zueinander liegen, werden die Untersuchungen des Betriebsschalls vorzugsweise in einem einheitlichen, zeitlichen und räumlichen Design durchgeführt und sind mit dem BSH rechtzeitig abzustimmen.

Räumlich werden die Messungen des Unterwasserschalls, soweit wie möglich, mit der akustischen Erfassung des Schweinswals kombiniert. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Habitatnutzung des Gebiets durch Schweinswale wird der Zeitraum der sechswöchigen

Untersuchungen ausgewählt, um in Verbindung mit den biologischen Untersuchungen mögliche Auswirkungen einschätzen zu können. In der unmittelbaren Umgebung von Naturschutzgebieten sind mit einem geeigneten Untersuchungskonzept ebenfalls die Auswirkungen von Unterwasserschall auf dieses sensible Gebiet zu gewährleisten.

Neben der in Kapitel 4.2 genannten Anforderungen aus der Messvorschrift des BSH (2011) wird zunehmend darauf geachtet, dass neben dem Schalleintrag durch die Anlagen auch der Schalleintrag durch OWP-relevanten Serviceverkehr durch ein geeignetes Untersuchungskonzept erfasst wird.

Untersuchungskonzept

Ein mit den Behörden abgestimmtes Mess- und Auswertungskonzept ist seitens der Off-shore-Windparkbetreiber und des ausführenden Messinstituts vor Durchführung der Messungen in schriftlicher Form einzureichen. Folgende Aspekte sind dabei zu beachten:

- Darstellung der Anzahl, Kennzeichnung und Lage der Messpositionen in und um das Untersuchungsgebiet.
- Die Dauer der Messungen soll möglichst sechs Wochen nicht überschreiten, um verschiedene Windklassen und Betriebszustände der Anlagen zu erfassen. Es muss gewährleistet sein, dass für die drei erforderlichen Windklassen (niedrig, mittel, hoch) mindestens 3 Stunden Datenmaterial für eine Auswertung zur Verfügung stehen (BSH, 2011).
- Die Messungen sind vorzugsweise in den Monaten mit dem höchsten Schweinswalaufkommen im Bereich des Untersuchungsgebiets durchzuführen.
- Die Datenaufnahme ist verbindlich verlustfrei in WAV-Format vorzunehmen.
- Die Messgeräte sind vorab zu kalibrieren und entsprechende Nachweise sind dem BSH einzureichen.
- Für die Ausbringung und Bergung der Geräte ist qualifiziertes Personal einzusetzen.
- Die Offshore-Windenergieanlagen müssen während der Betriebsschallmessungen im Normalbetrieb laufen; es werden keine lärmintensiven Wartungs- oder Reparaturarbeiten im Windpark durchgeführt.

- Für einen Vergleich der Schallsituation vor und während des Betriebes eines Off-shore-Windparks sind ebenfalls Hintergrundschallmessungen an vergleichbaren Messpositionen kurz vor Baustart der Fundamentinstallationen durchzuführen.
- Die Durchführung von ortsfesten (Dauer-) Messungen des Unterwasserschalls ist genehmigungspflichtig. Zuständig für die Genehmigung von Messstellen in der deutschen AWZ ist das BSH. Anträge sind mindestens acht bis zwölf Wochen vor Beginn der geplanten Messungen dem BSH einzureichen.

Auswertung und Berichterstattung

- Die Daten sind für den gesamten Messzeitraum auszuwerten. Folgende Aspekte sind in der Auswertung zwingend zu berücksichtigen:
- Informationen über alle OWP-relevanten Schiffsbewegungen mittels AIS-Datenaufzeichnung in und um die Windparks,
- Wetterdaten (Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe) aus der Überwachung der nächstgelegenen Windenergieanlagen,
- elektrische Leistung der nächstgelegenen Anlagen für den gesamten Messzeitraum; die zeitliche Auflösung darf nicht geringer als 10 Min. sein,
- im Bericht sind charakteristische (Betriebs-) Zustände zu definieren und darzustellen (Windklassen, Leistung der Anlagen, Entfernung der Messstation),
- es sollte möglichst ein Vergleich der Schallsituation anhand der Betriebsschallmessungen und sonstigen Daten aus der Umgebung des Windparks durchgeführt werden,
- sechs Monate nach Beendigung der Messungen ist der Abschlussbericht bei der zuständigen Behörde einzureichen.

Datenübermittlung

- Die Rohdaten aus allen Messstationen für den gesamten Messzeitraum sind der Zulassungs- und Überwachungsbehörde BSH spätestens sechs Monate nach Beendigung der Messungen zu übermitteln.

- Die prozessierten Daten ($L_{eq,5s}$, Statistik, Frequenzanalyse) für alle Messstationen und für den gesamten Zeitraum sind ebenfalls spätestens sechs Monate nach Beendigung der Messungen im nationalen Schallregister MarinEARS hochzuladen.

Sperrung der Rohdaten aus Unterwasserschallmessungen

Sämtliche Unterwasserschallmessdaten in Deutschland sind grundsätzlich genehmigungspflichtig und als sensible, schützenswerte Informationen einzustufen, die nicht für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Die Weitergabe der Rohdaten an Dritte ist strikt untersagt.

Außerdem gelten folgende Vorkehrungen:

- Während militärischer Übungs- und Manövertätigkeiten ist auf die Durchführung von Unterwasserschallmessungen außerhalb der Sicherheitszone zu verzichten.
- Die Rohdaten sind nach der Auswertung unverzüglich dem BSH zur Archivierung zu übergeben.
- Der Betreiber des Offshore Windparks und die beauftragte, messende Einrichtung speichern zu eigenen Zwecken ausschließlich aufbereitete, reduzierte Daten (prozessierte Datensätze). Die Aufbereitung der Daten ist mit dem BSH abzustimmen und soll sicherstellen, dass Schiffssignaturen nicht mehr identifizierbar sind.
- Auf Online-Übertragung der Rohdaten und Datenübermittlung via Internet ist zu verzichten.
- Etwaige weitere Nutzung der Daten ist vorher mit dem BSH abzustimmen.

4.2 Zu erfassende (Schallmess-) Daten gemäß BSH-Messvorschrift

Die Messdaten der Schalleinträge ins Wasser sind stichprobenartig an einzelnen Windenergieanlagen im Bereich des Windparks zu erheben, wobei die Schallmessungen in einer Entfernung von ca. 100 m zur Anlage sowie in der Mitte des Windparks vorzunehmen sind. Dabei sollten Anlagen im Randbereich eines Windparks ausgewählt werden, die möglichst durch wenige andere, störende Schalleinträge, wie z. B. andere Anlagen oder hohe Schiffsverkehrsdichten, vorbelastet sind, um möglichst nur den von dieser Anlage abgestrahlten Schall ins Wasser messen zu können. Somit sollten sich diese ausgewählten Anlagen weder in der Nähe der

Umspannstation, einer Konverterplattform oder eines Verkehrstrennungsgebiets (VTG) befinden. Zudem muss seitens der Betreiber gewährleistet sein, dass sich diese Anlage und die unmittelbar benachbarten Anlagen während der Unterwasserschallmessungen im normalen Betrieb befinden, d. h. keine Wartungsarbeiten oder Reparaturen durchgeführt werden.

Zusätzlich sind Messungen in 1 km Entfernung zum Windpark und im nächstgelegenen FFH-Naturschutzgebiet durchzuführen, sofern dieses nicht weiter als 5 km vom Windpark entfernt ist (BSH, 2011). Sind keine Naturschutzgebiete in der Nähe, ist ersatzweise eine repräsentative Schallmessposition in einer Entfernung von ca. 5 km vom jeweiligen Windpark durchzuführen. Sämtliche Messpositionen sind mit dem BSH abzustimmen, um beispielsweise die Leichtigkeit der Schifffahrt nicht zu beeinträchtigen. Bei der Wahl der Messpositionen sind auch weitere, praktische Aspekte zu berücksichtigen; zu vermeiden sind etwa Messpositionen in unmittelbarer Nähe bzw. in der Sicherheitszone von Pipelines, Kabeln, Umspannstationen, nicht geräumten Munitionsgebieten, bekannten Wracks, etc. Das gilt auch für die Verkabelung innerhalb der Windparks.

Sämtliche Messungen sollen in einem verlustfreien Format (wave, 24-bit) mit einer Abtastrate von mindestens 44,1 kHz aufgezeichnet werden (BSH, 2011). Dies entspricht ebenfalls dem Standardformat der ISO 18406 (2017) für die Unterwasserschallmessungen von impulshaltigen Geräuschen, wie z. B. Rammschall. Ein verlustfreies Aufzeichnungsformat mit 16-bit hat sich auch bei Dauerschallmessungen in den Projekten JOMOPANS und BIAS bewährt. Eine Verwendung von komprimierten Datenformaten sollte möglichst ausgeschlossen werden, da damit zumeist Qualitätsverluste einhergehen.

Zunächst wird der $L_{eq,5s}$ bestimmt, d. h. der (energie-) äquivalente Dauerschallpegel mit einer Mittelungszeit von 5 Sekunden und frequenz aufgelöst in 1/3-Oktavbändern. Daraus werden pro gewählter Windklasse der $L_{05,50}$ oder $90,5s$ mit einer Mittelungszeit von 5 Sekunden (der in 5, 50 oder 90% der gesamten 5-Sekunden-Intervalle überschritten wird) berechnet. Zudem wird der energieäquivalente Dauerschallpegel über den gesamten Messzeitraum eines Betriebsmodus berechnet. Repräsentative, äquivalente Dauerschallpegel $L_{eq,5s}$ sind zudem frequenz aufgelöst in mindestens 1/3-Oktavbändern darzustellen.

Für bestimmte Zeitabschnitte können auch schmalbandige Spektren mit einer Auflösung von 1 bis 2 Hz erstellt werden. Es ist aber sicherzustellen, dass aus solchen hochauflösenden Darstellungen keine Schiffssignaturen erkennbar sind (insbesondere von militärischen Schiffen).

Zu beachten ist auch, dass die Höhe der Maxima in Schmalbandspektren von mehreren Parametern abhängt, wie z. B. der spektralen Auflösung, der Mittelungsdauer etc., so dass Pegelwerte aus diesen Spektren nur ungenau entnommen werden können.

Technischer Hinweis: Zeitintervalle, die offensichtlich von Störgeräuschen beeinflusst sind, wie durch Starkregen oder Schiffsvorbeifahrten an den jeweiligen Messpositionen in einem Abstand von ca. 1 km oder weniger, sollten möglichst von der o. g. Auswertung ausgeschlossen werden.

4.3 Betriebsdaten der Offshore-Windenergieanlagen

Die Erwartung ist, dass die Schallabstrahlung einer Windenergieanlage von deren Betriebszustand abhängt; dabei sollte der erzeugte Schalldruckpegel i. d. R. mit der Windgeschwindigkeit bzw. mit der abgegebenen Leistung erwartungsgemäß ansteigen. Die Winddaten von den Gondelanemometern und die Leistungsdaten der OWEA wurden für alle vorliegenden Betriebschallmessungen von den jeweiligen Windparkbetreibern in Form von 10- bis 15-Minuten-Mittelwerten zur Verfügung gestellt. Für jeden Windpark wurden zwei Datensätze von den Betreibern angefordert, einer für ausgewählte OWEA, in deren unmittelbaren Umgebung sich eine Messposition (100 m Abstand) befand, und der andere von der Messposition „zentral im Windpark“, also von einer der unmittelbar benachbarten OWEAs.

Zur Illustration der Windverhältnisse sind in Abbildung 6 Messwerte von zwei ausgewählten OWEAs in der Nordsee für einen Zeitraum von 6 Wochen exemplarisch dargestellt. Abbildung 7 zeigt beispielhaft typische Wind- und Leistungswerte von zwei verschiedenen OWEA-Typen als Funktion der gemessenen Windgeschwindigkeit. Die Anlagen laufen zumeist bei Windgeschwindigkeiten von 3 bis 4 m/s an und liefern normalerweise ab dieser Windgeschwindigkeit elektrische Energie. Die Nennleistung wird i. d. R. bei Windgeschwindigkeiten von 11 bis 12 m/s erreicht. Die Höhe der Anlage hat auf See nur einen geringen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit. Wegen des logarithmischen Windprofils (Gasch, 1993) nimmt der Wind bei einer Zunahme der Höhe von 80 auf 120 m um weniger als 0,5% zu. Die

Abbildung 6 und Abbildung 7 basieren auf 10-Minuten-Werten über einen Zeitraum von 6 Wochen (ca. 6.000 Werten pro OWEA).

Gemäß BSH-Messvorschrift sind drei Leistungsbereiche, Betriebsmodi bzw. Windklassen zu erfassen: „niedrig“, „mittel“ und „hoch“. Für jede der drei Windklassen soll die auswertbare

Messzeit mindestens drei Stunden betragen. Die Windklassen sind nicht spezifiziert, auch konnte bei der Entstehung der BSH-Messvorschrift noch nicht näher angegeben werden, in welcher Form die Winddaten erhoben werden sollen.

Bei den Betriebsschallmessungen der *itap GmbH* wurde daher folgendermaßen vorgegangen: Anhand von Darstellungen wie in Abbildung 7 wurden zunächst die Windklassen festgelegt. Dabei stellte sich bei allen bisher durchgeführten Betriebsschallmessungen heraus, dass die vermessenen OWEAs unterschiedlicher Nennleistung und unterschiedlicher Hersteller für unterschiedliche Anlagentypen sehr ähnliche Abstufungen für die erzielte Leistung ihrer Anlagen bzgl. der Windstärke verwenden; siehe Tabelle 1.

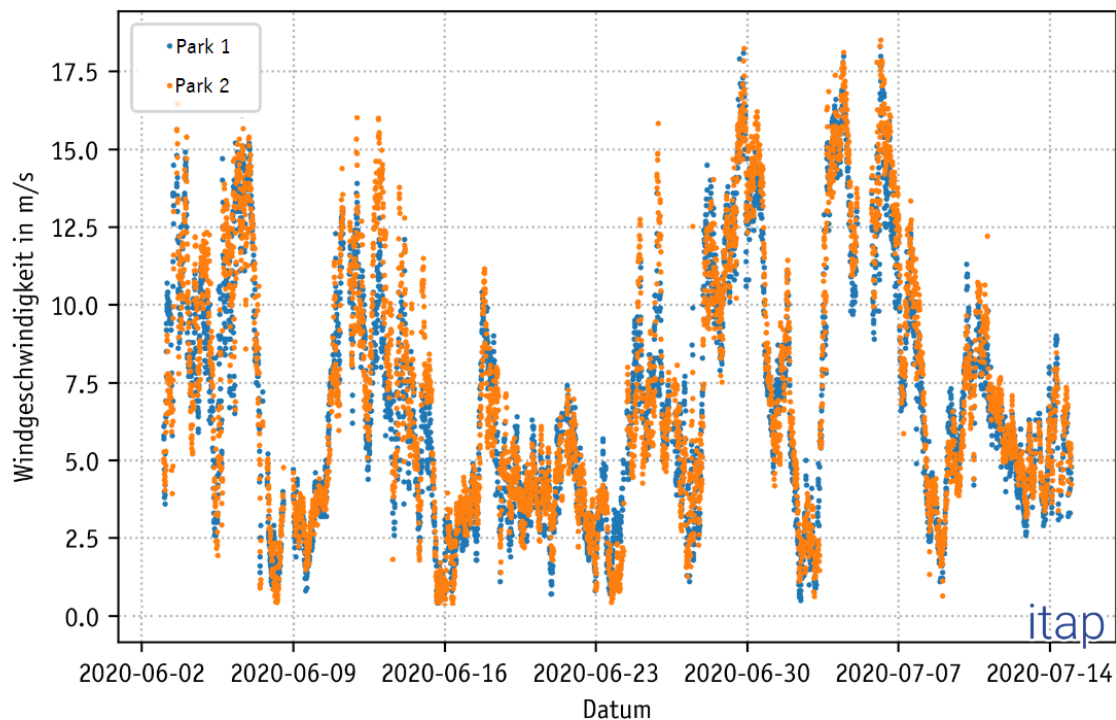


Abbildung 6: Gemessene Windgeschwindigkeiten in zwei Windparks in der nordwestlichen Zone 1 der Nordsee über einen Messzeitraum von ca. 6 Wochen während der Betriebsschallmessungen zwischen März und September.

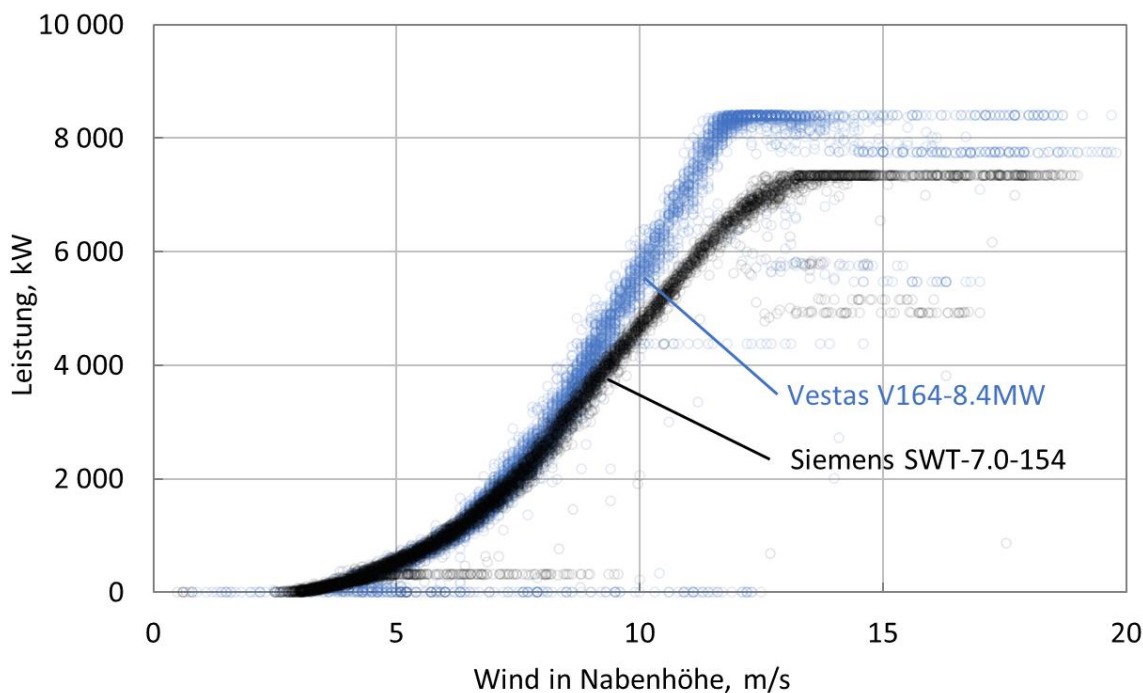


Abbildung 7: Elektrische Leistung als Funktion der Windgeschwindigkeit für zwei verschiedene OWEA verschiedener Hersteller mit 7 MW (schwarz, getriebelos) und 8,4 MW (blau, mit Getriebe) Nennleistung (Betke und Bellmann, 2022).

Windklasse	Wind in Nabenhöhe	Anlagenzustand, Leistung
niedrig	0 bis 3,5 m/s	Stillstand oder fast Stillstand
mittel	7 bis 10 m/s	30% bis 75% Nennleistung
hoch	ab 11 m/s	über 90% Nennleistung

Tabelle 1: Definition der itap GmbH der Windklassen für die nachfolgende Auswertung gemäß der Messvorschrift des BSH (2011).

Technischer Hinweis: Damit die Anforderung von mindestens 3 Stunden Messdaten pro Messposition und Windklasse erfüllt werden können, wurden zumeist Messdauern von 5 bis 6 Wochen ausgeführt. Aufgrund der Standortwahl der Offshore-Windparks ist die Erfassung der Windklasse „niedrig“, ergo OWEA stehen still, zumeist die kritischste Windklasse. Somit liegen i. d. R. pro Messposition pro Windpark mindestens 600.000 5-Sekunden-Intervalle für die Auswertung vor. Zudem stellte sich der Messzeitraum Oktober bis März mit den traditionellen Herbst- und Winterstürmen als nicht optimal für die Erfassung aller drei Windklassen heraus, so dass die

Betriebs- und Hintergrundschallmessungen vorwiegend im Frühling und Sommer durchgeführt worden sind.

4.4 Messgeräte und Verankerung

Die Anforderungen an die Unterwasserschall-Messsysteme sind in Kapitel 3 der Messvorschrift des BSH (BSH, 2011) spezifiziert und entsprechen im Allgemeinen der ISO 18406 (2017). Unter anderem müssen die Hydrophone mindestens alle 24 Monate kalibriert werden. Seit 2019 kalibriert die *itap GmbH* die verwendeten Hydrophone mittels eines normkonformen Kalibrierungsprozesses (ISO 17025) selbst; Abbildung 8. Eine normgerechte Kalibrierung über den Hersteller der Messgeräte oder des Hydrophons ist ebenfalls möglich. Diese Prüfung erfolgt bei einer Frequenz von 250 Hz und mit Luft als Prüfmedium. Referenzelement ist ein Kondensator-Messmikrofon GRAS 46AG, welches regelmäßig von einer DAkkS-akkreditierten DKD-Prüfstelle kalibriert wird (z. Zt. Norsonic-Tippkemper GmbH, 59302 Oelde-Stromberg).

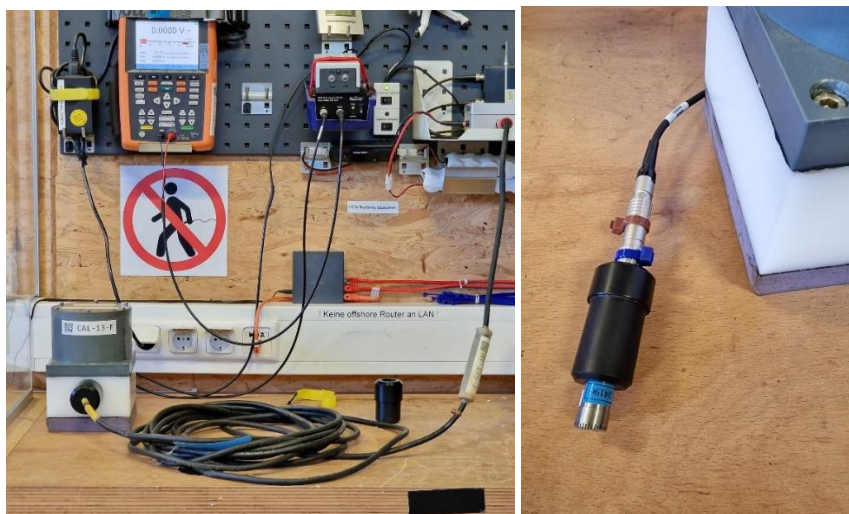


Abbildung 8: Kalibrierplatz für Hydrophone. Der weiße Quader unten links umschließt das Testvolumen, in dem mit einem Lautsprecher (im zylindrischen Aufsatz) unterschiedliche Testschalldrücke erzeugt werden können; bei Betriebsschallmessungen wird ein Wert um 150 dB re 1 μ Pa benutzt. Der tatsächliche Schalldruck im Testvolumen wird mit dem Referenzmikrofon (rechtes Bild) ermittelt. Zusammen mit der Ausgangsspannung des Hydrophons wird daraus dessen Kalibrierfaktor berechnet.

Die Verankerungen sollen keine störenden Eigengeräusche, wie z. B. Kettenklappern, erzeugen. Zudem dürfen die Verankerungen die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt im Sinne des Seeanlagengesetzes (SeeAnlV) nicht beeinträchtigen (BSH, 2017). Jede Verankerung muss

eine Oberflächenmarkierung aufweisen, deren Unversehrtheit mindestens alle 14 Tage mittels Sichtprüfung festzustellen ist.

In Abbildung 9 ist eine Skizze der standardmäßig verwendeten Messanordnung dargestellt mit zwei Oberflächenmarkierungen, einer Spierenboje mit Blinklicht (links im Bild) und etwa 50 m davon entfernt ein gelber Markierungsball. Die Markierung mit einer mindestens 6 m langen Spiere ist Teil der Anforderungen des BSH an Messstellen in der AWZ (BSH, 2017).

Abbildung 10 zeigt die Komponenten zur Schallaufzeichnung. Das Hydrophon vom z. B. Typ Brüel & Kjør 8106 wird mit einem Netzschwimmer in etwa 2 m Höhe über dem Meeresboden gehalten. Die auf dem Boden liegende Stahlröhre enthält die Aufnahmeelektronik, Trockenbatterien zur Stromversorgung sowie eine Zeitsteuerung. Diese ist so programmiert, dass alle 2 Stunden für die Dauer von 10 Minuten Schall aufgezeichnet wird. Dieses intermittierende Aufnahmeverfahren liefert bei einer Beobachtungsdauer von mehreren Wochen ausreichend Daten im Sinne der BSH-Messvorschrift (mindestens 3 Stunden je Windklasse).

Während der letzten Jahre wurde in Abstimmung mit dem BSH stattdessen oftmals auch eine kontinuierliche Datenaufzeichnung verwendet, da sich die Messtechnik inkl. Datenspeicherung in den letzten Jahren stetig verbessert hat.

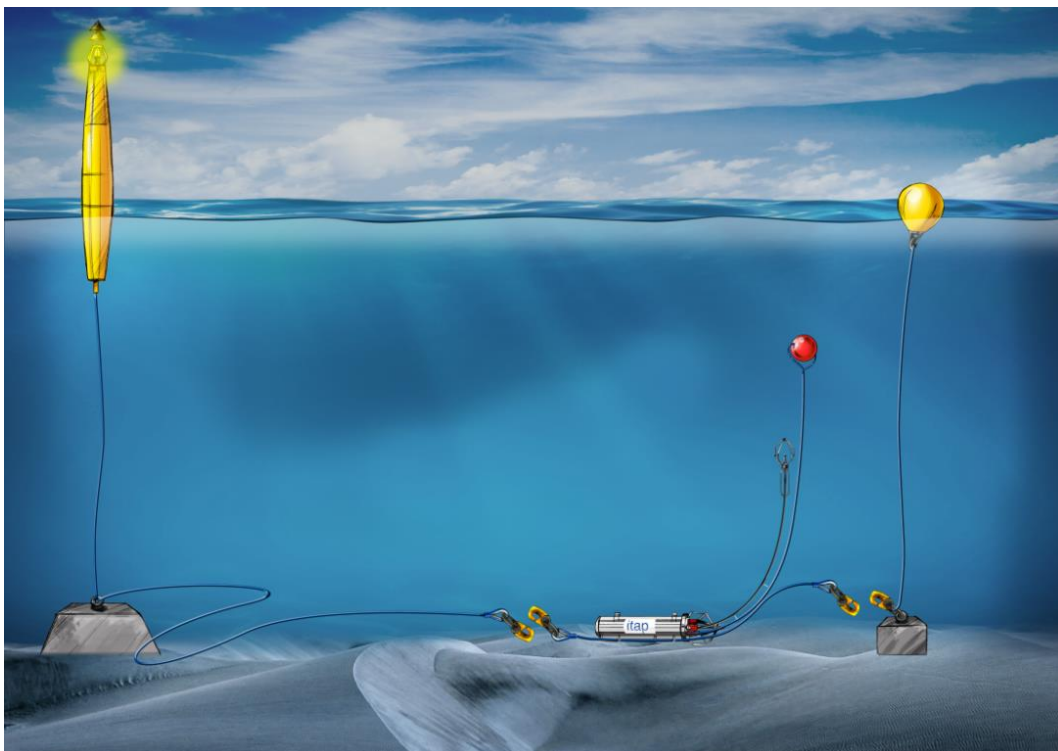


Abbildung 9: Skizze der standardmäßig benutzten Messanordnung.

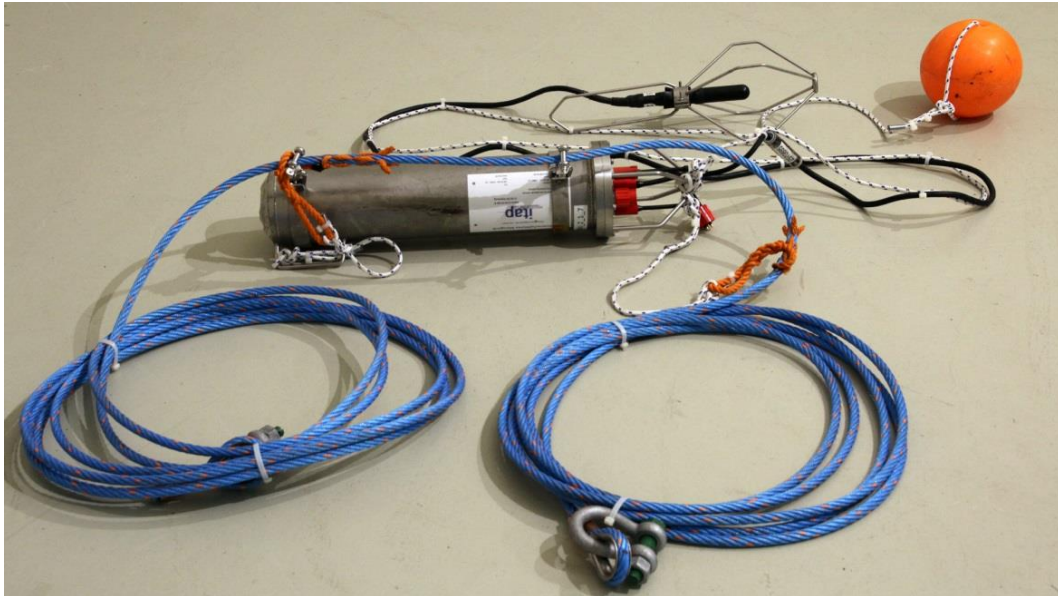


Abbildung 10: Unterwasserschallmessgerät der itap GmbH; ganz hinten das Hydrophon mit Auftriebskörper.

Seit 2022 (OWP *Deutsche Bucht*, *Albatros* und *EnBW Hohe See*) sind zudem Messgeräte des Typs SoundTrap 600 der Fa. *Oceans Instruments* versuchsweise zum Einsatz gekommen. Diese Messgeräte haben den Vorteil einer sehr langen Laufzeit mit mehreren Monaten im unkomprimierten Dateiformat mit 16-bit. Nachteil dieser Messgeräte sind der limitierende Dynamikbereich und die starre Verbindung zwischen Hydrophon und Messgerätgehäuse für die Energieversorgung und Datenaufzeichnung. Allerdings wurden diese Messsysteme ebenfalls für Dauerschallmessungen des Hintergrundschallpegels im Forschungsvorhaben JOMOPANS eingesetzt und bieten somit Vergleichsmöglichkeiten mit bestehenden Messdaten an.

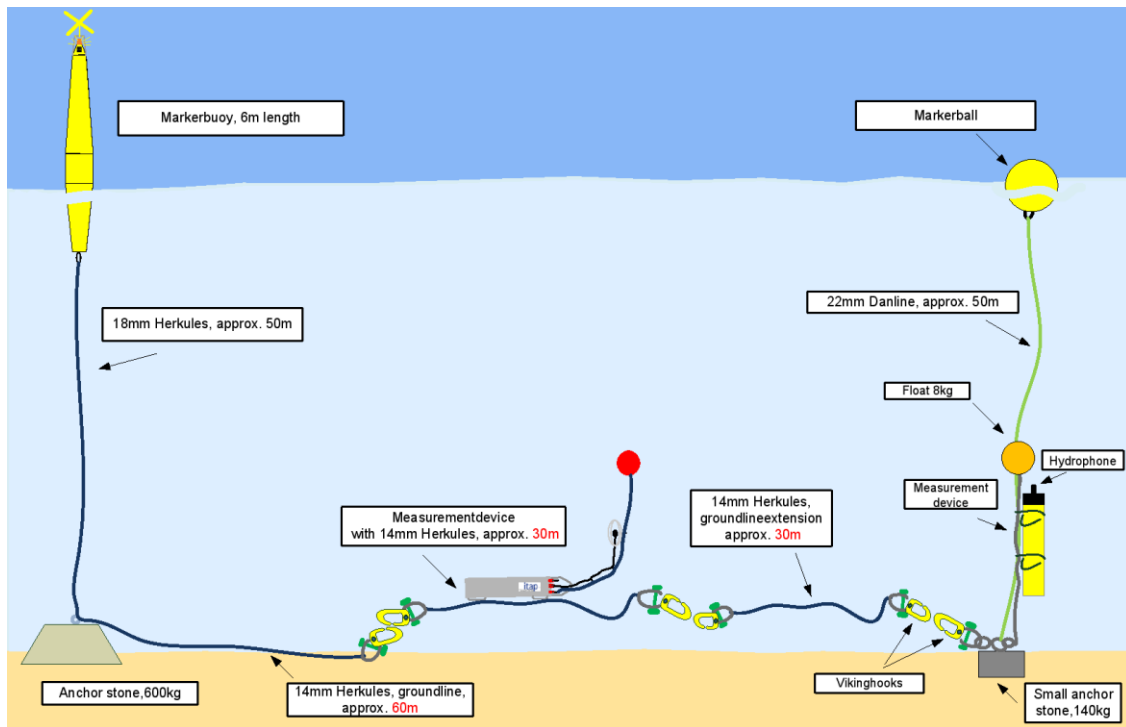


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Verankerungskonzepts mit zusätzlichem Messgerät (z. B. Wildlife Acoustics SM2M oder SoundTrap, gelbes Rohr ganz rechts).

Eine dritte, sehr ähnliche Konfiguration ergab sich dadurch, dass sich bei einigen Windparks und Messpositionen die Schallmessgeräte und die Schweinswal-Detektoren (Porpoise Detector; POD) der beteiligten, biologischen Gutachterbüros eine gemeinsame Verankerung teilten. Der POD war dabei am Ankerseil des Markierungsballs befestigt und störte die Schallmessung ebenfalls nicht.

Sämtliche eingesetzten Messgeräte und Verankerungen entsprechen den Anforderungen der Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011).

4.5 Schalltechnische Auswertung

Zur Auswertung der Aufnahmen nach den in Kapitel 4.2 genannten Kriterien wurde eine in der *itap GmbH* entwickelte Software verwendet (IONIS, Version 0.6.5), die in einer Variante auch zur Auswertung von impulshaltigen Schalleinträgen nach ISO 18406 (2017), wie z. B. Offshore-Bauschall, Impulsrammschall oder Sprengschall, eingesetzt wird. Bei den statistischen Größen wurde neben dem Pegelwert L_{05} nach Maßgabe der Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011) auch der L_{50} und der L_{90} berechnet, und zwar sowohl breitbandig als auch frequenz aufgelöst in 1/3-Oktavbändern.

Diese Auswertungssoftware wurde ebenfalls durch Vergleiche mit den Auswertungen der innerhalb des Forschungsvorhabens BIAS entwickelten Software für Dauerschallmessungen verglichen bzw. evaluiert.

4.6 Durchführung der Messungen

Bei geografisch benachbarten Windparks wurden die Betriebsschallmessungen zumeist für alle zwei oder drei Windparks des „Clusters“ gleichzeitig vorgenommen. Dieses Vorgehen verringert den organisatorischen Aufwand und senkt die Kosten für das Ausbringen und Einholen der Messgeräte. In Einzelfällen konnten dadurch auch ein bis zwei Messstationen eingespart werden, indem sich benachbarte Windparks die 1-km- oder 5-km-Messposition teilten.

Der wesentliche Vorteil ist aber, dass der Hintergrundschallpegel, der näherungsweise durch den Pegel in der Windklasse „niedrig“ gegeben ist (alle OWEA aus), für mehrere Windparks unmittelbar verglichen werden kann. Dadurch lässt sich beispielsweise eingrenzen, ob ein ungewöhnlich hoher Hintergrundpegel eine lokale Anomalie darstellt, verursacht durch z. B. Serviceschiffe im Windpark oder durch die ständig vorhandenen Geräusche von entferntem Schiffsverkehr bestimmt wird.

Ein weiterer Vorteil einer Cluster-Messung ist, dass die Betriebszustände von benachbarten Windparks ebenfalls dokumentiert sind, so dass z. B. ungewöhnliche, akustische Situationen im Windpark A, wie z. B. Reparaturen an bestehenden OWEAs, bei der Beurteilung des Betriebsschalls in Windpark B ausgeschlossen werden können.

5. Untersuchte Offshore-Windparks

In Tabelle 2 sind die Kombinationen aus installierten Windenergieanlagen und Fundamentstrukturen aus Offshore-Windparks in der deutschen AWZ aufgelistet, bei denen der Unterwasser-Betriebsschall gemäß den Vorgaben des BSH bisher gemessen wurde; Tabelle 3 fasst einige projekt- und standortspezifischen Parameter zusammen. Insgesamt umfasst der Datensatz für diese Studie

- 27 durchgeführte Betriebsschallmessungen in 24 Windparks,
- 16 verschiedene OWEA-Typen von sieben verschiedenen Herstellern,
- Nennleistungen zwischen 2,3 und 8,0 MW,
- gegründet auf fünf unterschiedlichen Fundamentstrukturen,
- Wassertiefen zwischen 15 und 40 m,
- an mindestens drei Messpositionen pro Windpark und
- in drei definierten Betriebszuständen der Anlagen.

Abbildung 13 zeigt Beispiele für die in Tabelle 2 genannten Fundamente oder Gründungsstrukturen. Das in zwei Windparks verwendete „Suction Bucket Jacket“ ist nicht abgebildet (OWP *Borkum Riffgrund 01* und *02*). Es handelt sich um eine 3-beinige Jacket-Konstruktion, die mit „Saugglocken“ statt mit Rammpfählen am Meeresboden fixiert wurde; eine schematische Darstellung eines Suction Buckets ist in der Literatur zu finden (Koschinski & Lüdemann, 2019). Der Unterschied ist oberhalb der Wasserlinie nicht ohne weiteres zu erkennen.

Nicht Gegenstand des Vorhabens OWF NOISE sind:

- Die neueren oder noch im Bau befindlichen Windparks mit Errichtungsdatum ab 2022.
- Es ist nur einer der beiden Windparks innerhalb der 12-Seemeilen-Zone der dt. Nordsee eingebunden worden, da in einem dieser Windparks Wassertiefen von deutlich kleiner 10 m auftreten.
- OWP *alpha ventus*: Am ersten deutschen Offshore-Windpark wurden im Rahmen des Forschungsverbunds RAVE (Research at Alpha Ventus) 2011 Betriebsschallmessungen vorgenommen (Betke und Matuschek, 2012). Erfahrungen aus dieser Untersuchung sind in die BSH-Messvorschrift (BSH, 2011) eingeflossen.

Im Flächenentwicklungsplan der Nordsee des BSH (2020) wurde die AWZ in 5 Zonen unterteilt, innerhalb deren Flächen für die potenzielle Nutzung von Offshore-Wind definiert wurden. Aufgrund der geringen Flächen für die Nutzung von Offshore-Wind in der deutschen AWZ der Ostsee wurden keine Zonen, sondern nur Flächen definiert. Dabei werden die Flächen mit einem N für die Nordsee und einem O für die Ostsee gekennzeichnet; zudem werden die Flächen durchnummeriert; Abbildung 12. In den nachfolgenden Auswertungen werden die jeweiligen Zonen, in denen bestimmte Messdaten für einen definierten Windpark erhoben wurden, benannt.

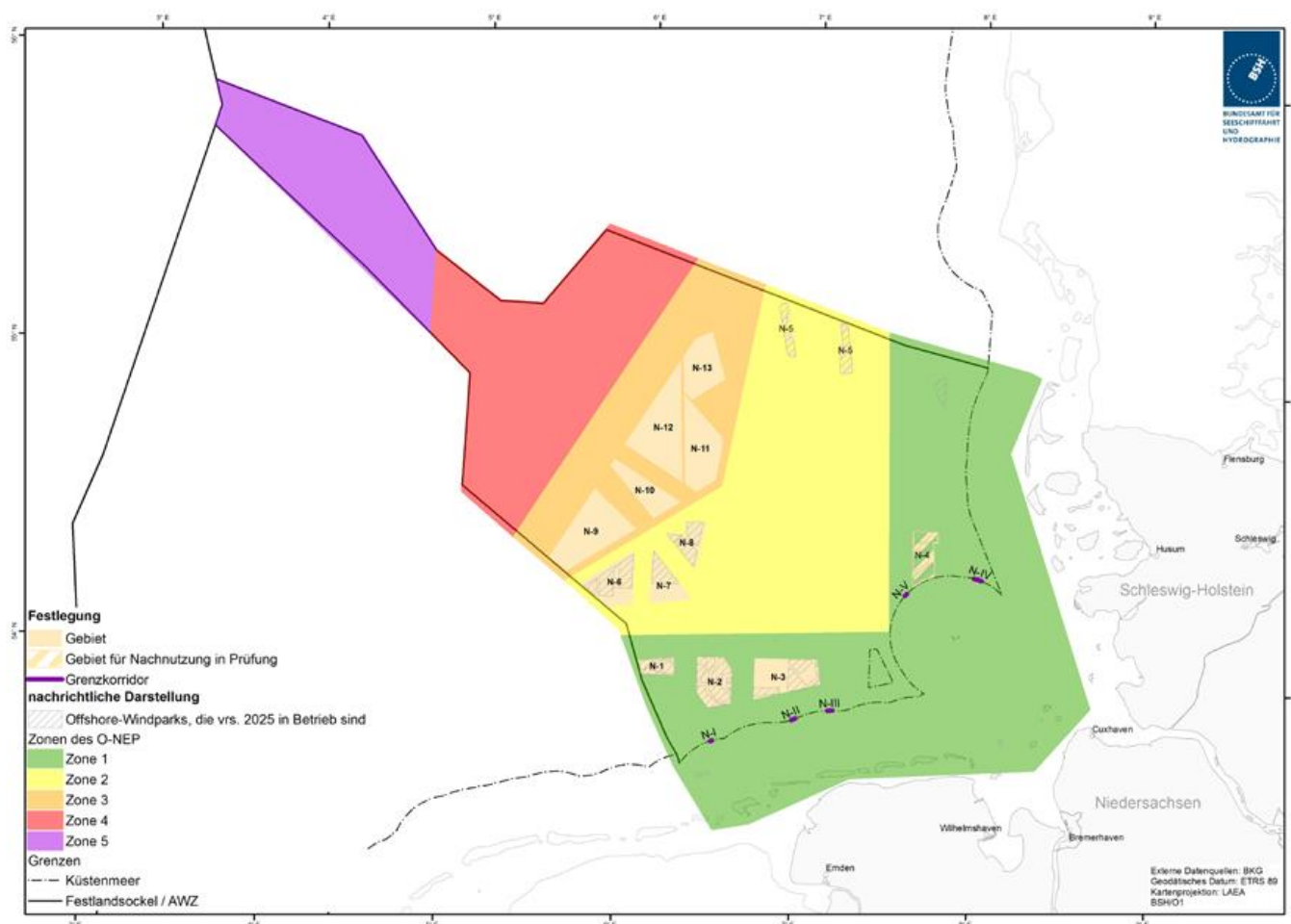


Abbildung 12: Festlegung von Zonen und Flächen zur Nutzung von Offshore-Wind der deutschen AWZ der Nordsee (Quelle: Flächenentwicklungsplan des BSH 2020).

Nr.	Fundament	Lage des OWPs	Anlagentyp	WT [m]	Nennleistung [MW]	Getriebe
1	Monopile	Nordsee Zone 1 O	Siemens SWT-3.6-120	21	3,6	ja
2	Monopile	Ostsee	Siemens SWT-6.0-154	27	6	nein
3	Tripile	Nordsee Zone 2 NW	Bard 5.0	39	5	ja
4	Monopile	Nordsee Zone 1 NW	Siemens SWT-4.0-120	25	4	ja
5	SB Jacket			25		
6	Monopile	Nordsee Zone 1 NW	Vestas V-164-8.0	28	8	ja
7	SB Jacket			28		
8	Monopile	Nordsee Zone 1 NO	Siemens SWT-3.6-120	18	3,6	ja
9	Monopile	Nordsee Zone 2 NO	Siemens SWT-3.6-120	30	3,6	ja
10	Monopile	Nordsee Zone 2 NW	MHI-Vestas V164-8.4	38	8,4	ja
11	Monopile	Ostsee	Siemens SWT-2.3-93	17	2,3	ja
12	Jacket	Ostsee	Siemens SWT-3.6-120	35	3,6	ja
13	Monopile	Nordsee Zone 2 NW	Siemens SWT 7.0-154	40	7	nein
14	Monopile	Nordsee Zone 2 NW	Siemens SWT 7.0-154	39	7	nein
15	Tripod	Nordsee Zone 2 NW	Areva Multibrid M5000	39	5	ja
16	Monopile	Nordsee Zone 1 NW	Siemens SWT-6.0-154	30	6	nein
17	Monopile	Nordsee Zone 1 NW	Siemens SWT-6.0-154	33	6	nein
18	Monopile	Nordsee Zone 1 O	Siemens SWT-3.6-120	25	3,6	ja
19	Monopile	Nordsee Zone 1 NW	GE Haliade 150-6	28	6	nein
20	Monopile	Nordsee Zone 1 NW	Senvion 6.2M126	28	6,2	ja
21	Jacket	Nordsee Zone 1 O	Senvion 6.2M126	24	6,2	ja
22	Monopile	Nordsee Zone 1 SW	Siemens SWT-3.6-120	20	3,6	ja
23	Monopile	Nordsee Zone 2 SO	Siemens SWT-4.0-130	27	4	nein
24	Tripod	Nordsee Zone 1 NW	Adwen AD 5-116	28	5	ja
25	Monopile		Senvion 6.3M126	28	6,3	ja
26	Monopile	Nordsee Zone 2 W	Siemens SWT-6.0-154	39	6	nein
27	Jacket	Ostsee	Adwen AD 5-135	37	5,1	ja

Tabelle 2: *Kombinationen aus Windenergieanlagen und Fundamentstrukturen aus OWPs in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee, an denen Betriebsschallmessungen durchgeführt wurden. Für die Nordsee sind ebenfalls die Zonen und die Lage der Windparks in den Zonen aus dem FEP 2020 dargestellt. Verwendete Abkürzungen: SB = Suction Bucket, WT = Wassertiefe, N – Nord, S – Süd, O – Ost, W – West.*

Parameter	Bereich oder Wert	Anzahl OWEA	Bemerkungen
Nennleistung	2,1 – 4 MW	10	
	4,1 – 6 MW	9	
	6,1 – 8 MW	8	
Fundament	Monopile	19	
	Jacket	5	Enthält auch 2 Suction Bucket Jackets
	Tripod	3	Sonderkonstruktion „Tripile“ von Bard ist hier mit aufgenommen
Getriebe	ja	20	
	nein	7	Davon sechs vom Hersteller Siemens und eine von GE-Wind; andere getriebelose OWEA sind in der dt. AWZ bisher nicht vertreten
Wassertiefe	> 15 bis 20 m	3	
	21 bis 30 m	15	
	31 bis 40 m	9	

Tabelle 3: Zusammenfassung einiger standort- und projektspezifischer Parameter der vermessenen Anlagen.



Abbildung 13: Fundamente von OWEA. Von links: Monopile, Jacket, 4-beiniger Tripod, Tripile (Foto ganz rechts: Martina Nolte, CC BY-SA 3.0 de, alle übrigen: itap GmbH).

6. Messergebnisse

In einem ersten Schritt werden die Messergebnisse der Messposition auf einer Distanz von ca. 100 m von der jeweiligen, ausgewählten Windenergieanlage vorgestellt; Kapitel 6.1. Dabei werden sowohl die breitbandigen (Kapitel 6.1.1), als auch die spektralen Merkmale (Kapitel 6.1.2) dargestellt. Eines der wesentlichen Ziele dieses Forschungsvorhabens war, festzustellen, ob die von den Windenergieanlagen unter Wasser erzeugten bzw. abgestrahlten Schallpegel mit bestimmten Merkmalen der Anlagen oder des Standorts korrelieren. Aus physikalischer Sicht sind hier vor allem die elektrische (Nenn-) Leistung sowie die Art des Antriebs (Getriebe oder Direktantrieb bzw. getriebelos) zu nennen. Außerdem untersucht wurden der Einfluss der Fundamentbauweise und der Wassertiefe; siehe Kapitel 6.1.3. Auch standortspezifische Einflussparameter sind untersucht worden; siehe Kapitel 6.1.4.

Die Auswertung der Messdaten an den anderen Messpositionen innerhalb und außerhalb der Windparks hat sich als hochgradig nicht trivial herausgestellt, da oft eine Vermischung mit dem permanent gegenwärtigen Hintergrundschallpegel vorhanden ist; Kapitel 6.2.

Ein Vergleich zwischen den durchgeführten Betriebs- und Hintergrundschallmessungen zur Evaluierung der Schallsituation vor dem Bau und während des Betriebes des Windparks ist Gegenstand des Kapitels 6.3. Dabei wird zunächst nur der Schalleintrag durch die in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen betrachtet.

Basierend auf den wenigen, spezifischen Messungen aus den vergangenen drei Jahren sind Schalleinträge des betriebsbedingten Schiffsverkehrs (Serviceverkehr) in Kapitel 6.4 untersucht worden.

6.1 Messungen in ca. 100 m Entfernung zu Windenergieanlagen

Die Auswertungen aller Betriebsschallmessungen haben gezeigt, dass die Identifikation möglicher Einflussparameter auf den abgestrahlten Schall von Anlagen durch den L_{50} -Wert möglich ist; dies zeigt sich vor allem an den 1/3-Oktavspektren. Die L_{05} -Wert zeigen gegenüber dem L_{50} -Wert breitbandige Pegelanstiege, die man kaum technisch plausibel einer Windenergieanlage zuordnen kann. Vermutlich sind diese durch nahe Schiffsvorbeifahrten oder einem Schalleintrag durch Wind und Wellenschlag verursacht worden. Die tonalen Komponenten, die eindeutig auf die Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz zurückzuführen sind, kommen bei der

Verwendung des L_{05} -Wert dabei zumeist nicht voll zur Geltung oder überlappen sich teilweise mit den tonalen Komponenten anderer Anlagen. Der L_{05} -Wert würde somit den Schalleintrag durch die Anlagen überschätzen. Der L_{90} repräsentiert eher den permanenten (Hintergrund-) Schall um die Anlage. Bei Verwendung dieser Pegelgröße ist von einer deutlichen Unterschätzung der möglichen, abgestrahlten Schalleinträge einer Anlage auszugehen.

Aus diesen Gründen basieren die nachfolgenden Auswertungen, wenn nicht anders beschrieben, auf dem L_{50} -Wert pro Windklasse, d. h. dem Median aller 5-s-Auswertungsintervalle dieser Messreihe über eine Messdauer von mindestens fünf Wochen.

6.1.1 Frequenzunabhängige Merkmale

Die wesentlichen Messergebnisse der Schalleinträge durch die im Nennleistungsbetrieb befindlichen Windenergieanlagen (d. h. bei Windklasse „hoch“) in einer Distanz von ca. 100 m sind in Tabelle 4 zusammengefasst, dargestellt als breitbandiger L_{50} und als 1/3-Oktavband mit dem höchsten Pegel (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz) sowie als L_{50} in diesem „dominanten“ 1/3-Oktavband.

Markiert sind die Fälle, in denen signifikant von der Entfernung $d = 100$ m gemäß Messvorgabe (BSH, 2011) abgewichen werden musste. Hintergrund waren sicherheitstechnische Bedenken bei der Auslegung und Bergung von Messgeräten im Sicherheitsbereich der Windenergieanlagen. Durch die bekannte, geometrische Ausbreitungsdämpfung $15 \cdot \log_{10}(d/100 \text{ m})$ dB ließen sich theoretisch mögliche Korrekturen für Abweichungen in der Entfernung vornehmen. Es zeigte sich allerdings, dass dieses aus dem Rammschallbereich bewährte, überschlägige Verfahren zur Pegelabstandskorrektur zwischen 750 m und 10 km (z. B. Bellmann et al., 2020) zu extrem hohen Schalldruckpegeln in 100 m Entfernung der Anlagen führte, die aus akustischer Sicht als z. T. unrealistisch einzustufen sind. Ein möglicher Grund könnte der sehr geringe Abstand zwischen Messposition und Quelle sein, so dass man sich im akustischen Nahbereich der abstrahlenden Quelle befindet und allein durch Schalldruckmessungen die akustische Energie bzw. Leistung nicht adäquat erfasst werden kann.

Dies würde bei Verwendung der Ausbreitungsdämpfung zu einer deutlichen Überschätzung bei einer Pegelabstandskorrektur führen. Daher wurde von Pegelkorrekturen im Nachfolgenden abgesehen; alle dargestellten Pegel sind somit die von den Hydrophonen gelieferten (Schalldruckpegel-) Werte an der jeweiligen Messposition.

Nr.	Fundament	Nennleistung, MW	Getriebe	L ₅₀ breitbandig, dB re 1 µPa	1/3-Oktavband mit höchstem Pegel, Hz	Höchster 1/3-Oktavpegel L ₅₀ , dB re 1 µPa	Abweichender Messabstand, m
1	Monopile	3,6	ja	124	160	123,7	
2	Monopile	6	nein	115	25	108	
3	Tripile	5	ja	121 (127)	160	121	250
4	Monopile	4	ja	128	160	117	
5	SB Jacket			131	160	121	
6	Monopile	8	ja	119	80	110	
7	SB Jacket			123	40	113	
8	Monopile	3,6	ja	115	50	102	
9	Monopile	3,6	ja	118	160	117	
10	Monopile	8,4	ja	120	125	113	
11	Monopile	2,3	ja	123	63	115	
12	Jacket	3,6	ja	122	160	120	
13	Monopile	7	nein	120	80	116	
14	Monopile	7	nein	122 (129)	80	120	300
15	Tripod	5	ja	127 (131)	80	127	180
16	Monopile	6	nein	117	25	110	
17	Monopile	6	nein	117	80	112	
18	Monopile	3,6	ja	122	160	121	
19	Monopile	6	nein	120	80	110	
20	Monopile	6,2	ja	118	125	109	
21	Jacket	6,2	ja	117	160	115	
22	Monopile	3,6	ja	124	160	124	
23	Monopile	4	nein	114 (120)	160	111	250
24	Tripod	5	ja	122	80	115	
25	Monopile	6,3	ja	121	80	110	
26	Monopile	6	nein	119 (128)	80	109	400
27	Jacket	5,1	ja	112	80	102	

Tabelle 4: *Wesentliche Messergebnisse für die Messposition „100 m entfernt von einer ausgewählten OWEA“ in der Windklasse „hoch“ inkl. des Fundamenttyps und der Nennleistung der OWEA. Bei einigen OWEA musste deutlich von den 100 Metern abgewichen werden, siehe Spalte ganz rechts. In Klammern sind die abstandskorrigierten Werte mittels Ausbreitungsdämpfung ($15 \cdot \log_{10}(\text{Abstand})$) dargestellt. Die Nummerierung entspricht der aus Tabelle 2.*

In Tabelle 5 ist die Pegelstatistik der in Tabelle 4 enthaltenen, breitbandigen Messdaten zusammengefasst.

	breitbandiger Schalldruckpegel L_{50} dB re 1 μ Pa	Höchster 1/3-Oktavpegel L_{50} dB re 1 μ Pa
Maximum	131	126
Mittelwert	120	114
Median	120	114
Minimum	112	102

Tabelle 5: Breitbandiger Schalldruckpegel ($L_{50, 5s}$) und Schalldruckpegel im höchsten 1/3-Oktavband (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz), gemessen in ca. 100 m Entfernung von allen gemessenen und in Betrieb befindlichen OWEA unter Nennleistung (Windklasse „hoch“) aus Tabelle 4.

Im Anhang in Kapitel 9.1 bis 9.3 sind sämtliche, breitbandigen Messdaten (Schalldruckpegel L_{50}) in ca. 100 m Entfernung unabhängig von allen weiteren projekt- und standortspezifischen Parametern für die Windklassen „niedrig“, „mittel“ und „hoch“, ergo Windenergieanlagen im Stillstand bis unter Nennleistung, für die Pegelgrößen L_5 , L_{50} und L_{90} gegenübergestellt.

In Abbildung 14 sind die gemessenen, breitbandigen $L_{50, 5s}$ -Werte aus Tabelle 4, zusammen mit den Namen der OWPs, graphisch und in den Betriebszuständen OWEA im Stillstand und unter Nennleistung dargestellt.

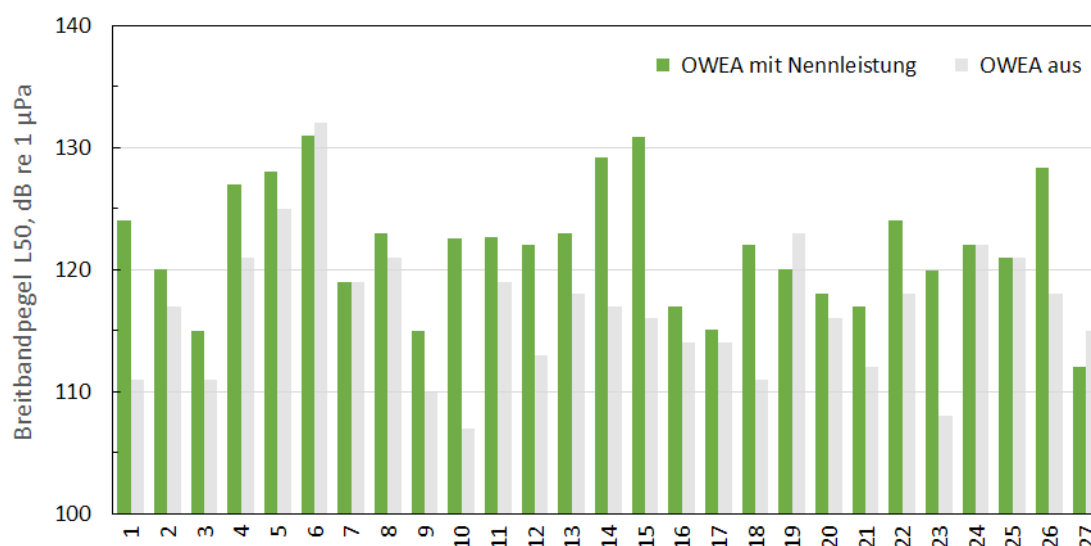


Abbildung 14: Breitbandige Schalldruckpegel L_{50} (Mittelungszeit 5 s) in 100 m Entfernung von ausgewählten, in Betrieb befindlichen OWEAs aus Tabelle 4. Mit „OWEA aus“ ist in diesem und in den folgenden Abbildungen die Messung bei Windklasse „niedrig“ gemeint. Die OWEAs laufen mit Nennleistung in der Windklasse „hoch“. Oben: mit Windparknamen; unten: ohne Windparknamen.

6.1.2 Spektrale Merkmale

In Abbildung 15 sind die aus Tabelle 4 zusammengefasste Anzahl und die Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz (1/3-Oktavband) der pegelbestimmenden, tonalen Komponenten der in Betrieb befindlichen Anlagen mit Nennleistung (Windklasse „hoch“) in einer Messentfernung von ca. 100 m zusammengefasst.

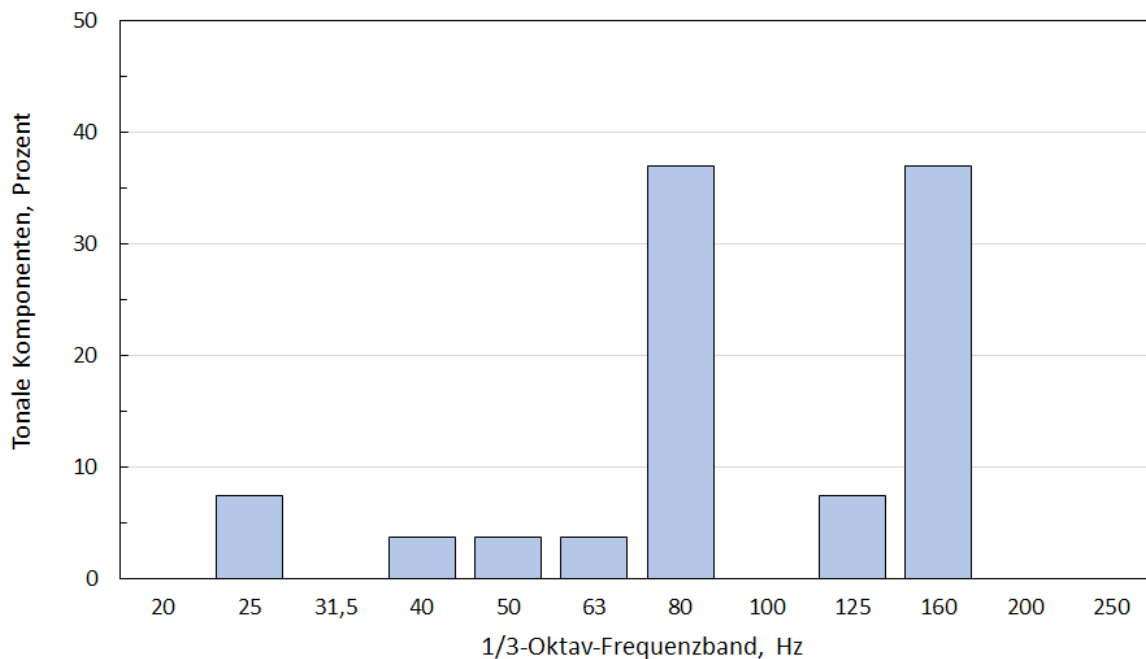


Abbildung 15: Verteilung der spektralen Maxima und prozentuale Anzahl der Windenergieanlagen, bei denen ein pegelbestimmendes 1/3-Oktavband festgestellt wurde (Tabelle 4).

Es zeigt sich, dass über 75% aller untersuchten Windenergieanlagen dieser Studie eine pegelbestimmende Komponente in den 1/3-Oktavbändern zwischen 80 und 160 Hz ins Wasser eintragen (Tabelle 4). In zwei Fällen ist eine tonale Komponente im 25 Hz 1/3-Oktavband zu finden. Bei diesen beiden Anlagen handelt es sich um getriebelose Anlagen neueren Baujahrs. Allerdings gab es auch fünf weitere, getriebelose Anlagen, die im 1/3-Oktavband um 80 Hz pegelbestimmende Schalleinträge ins Wasser emittierten. Bei drei Anlagen mit Getrieben traten Eigenfrequenzen zwischen 40 und 63 Hz auf. Interessanterweise wurden in zwei Windparks in der nordwestlichen Zone 1 der Nordsee jeweils Anlagen desselben Typs auf einen Monopile und ein Suction Bucket Jacket installiert. In einem Windpark traten bei den Anlagen desselben Typs dieselben Eigenfrequenzen auf, in dem anderen Windpark lag die Eigenfrequenz beim Mono-pfahl bei 80 Hz und beim Suction Bucket Jacket Fundament bei 40 Hz. Diese Unterschiede können durchaus durch unterschiedliche Winkeleinstellungen der Rotorblätter, der Umdrehungszahl der Rotorblätter und/oder den gemittelten Leistungsdaten über mehrere Minuten resultieren.

Abbildung 16 zeigt exemplarisch das 1/3-Oktavspektrum für jeweils eine ausgewählte Anlage mit und ohne Getriebe desselben Herstellers - Siemens SWT-3.6-120 mit Getriebe und Siemens SWT-6.0-154 getriebelos – in Betrieb mit Nennleistung in der Windklasse „hoch“ (Matuschek et al., 2018; Gerlach & Betke, 2021).

Es zeigen sich in den 1/3-Oktavspektren eine schmalbandige und pegelbestimmende Komponente im 1/3-Oktavband 160 Hz (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz und der 1. Harmonischen bei der Anlage mit Getriebe und 25 Hz bei der getriebelosen Anlage an der ca. 100 m entfernten Messposition, wenn die Windenergieanlage unter Nennleistung (Volllast) betrieben wird.

Zur Klärung der Frage, ob es sich bei den in den 1/3-Oktavspektren auftretenden, erhöhten Pegeln in einem 1/3-Oktavband um stochastische oder um tonale (sinusförmige) Geräusche handelt, erfolgte exemplarisch eine Schmalbandanalyse mittels FFT (Fast Fourier Transform) für die beiden OWPs; siehe Abbildung 16. Dabei wurden die Schmalbandspektren für die Windklasse „hoch“ (OWEA läuft unter Nennleistung) und für die Windklasse „niedrig“ (OWEA steht still oder nahezu still) gegenübergestellt.

Es handelt sich um sinusförmige Komponenten bei den in Betrieb befindlichen Anlagen unter Nennleistung. Sobald die Anlagen stillstehen bzw. fast stillstehen (Windklasse „niedrig“, Abbildung 17), sind diese tonalen Komponenten nicht mehr vorhanden. Somit ist diese tieffrequente, tonale Komponente eindeutig den in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen zuzuordnen. Durch Angaben der Rotordrehzahl und der Getriebeeinstellung bzw. -übersetzung und der Generatorkonfiguration lassen sich diese tonalen Komponenten auch berechnen (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz).

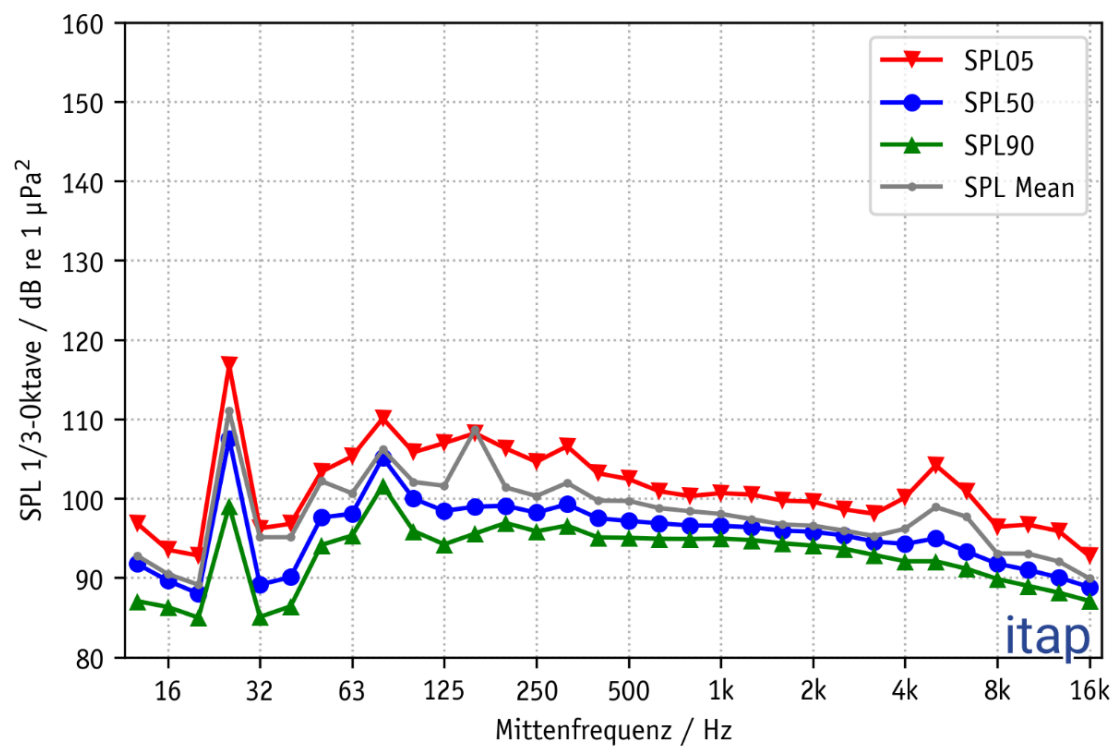
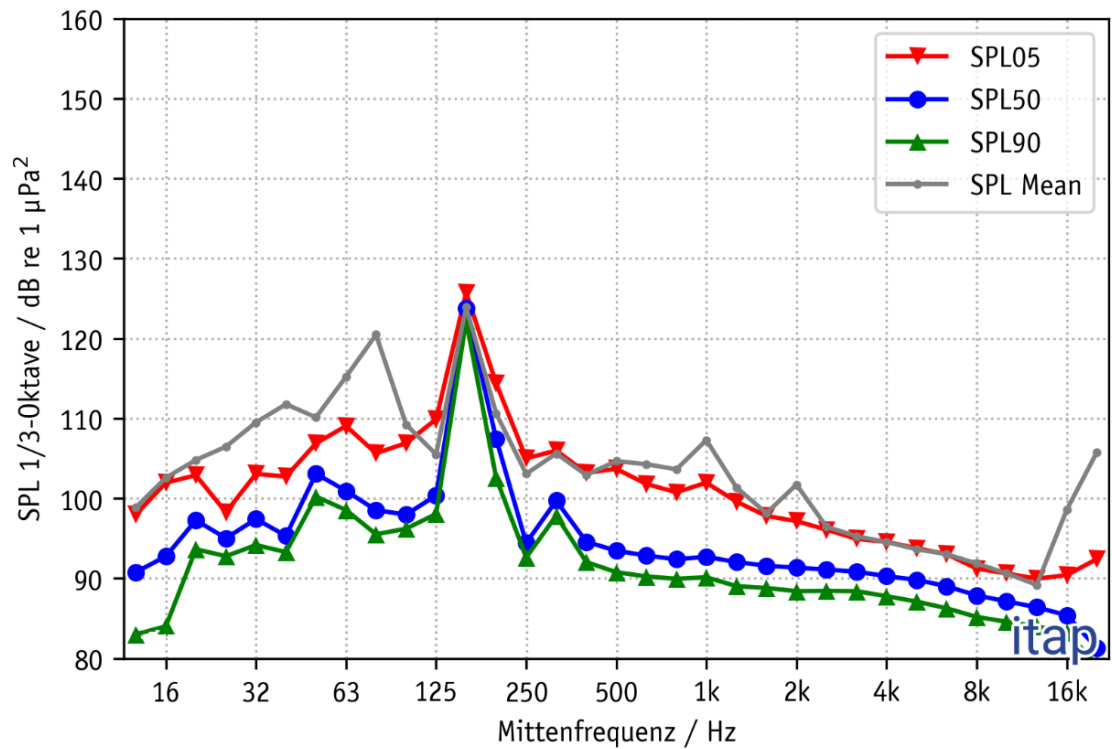


Abbildung 16: Beispielhafte 1/3-Oktavspektren für Anlagen desselben Herstellers mit Getriebe (oben; Siemens SWT-3.6-120) und ohne Getriebe (unten; OWEA Siemens SWT-6.0-154).

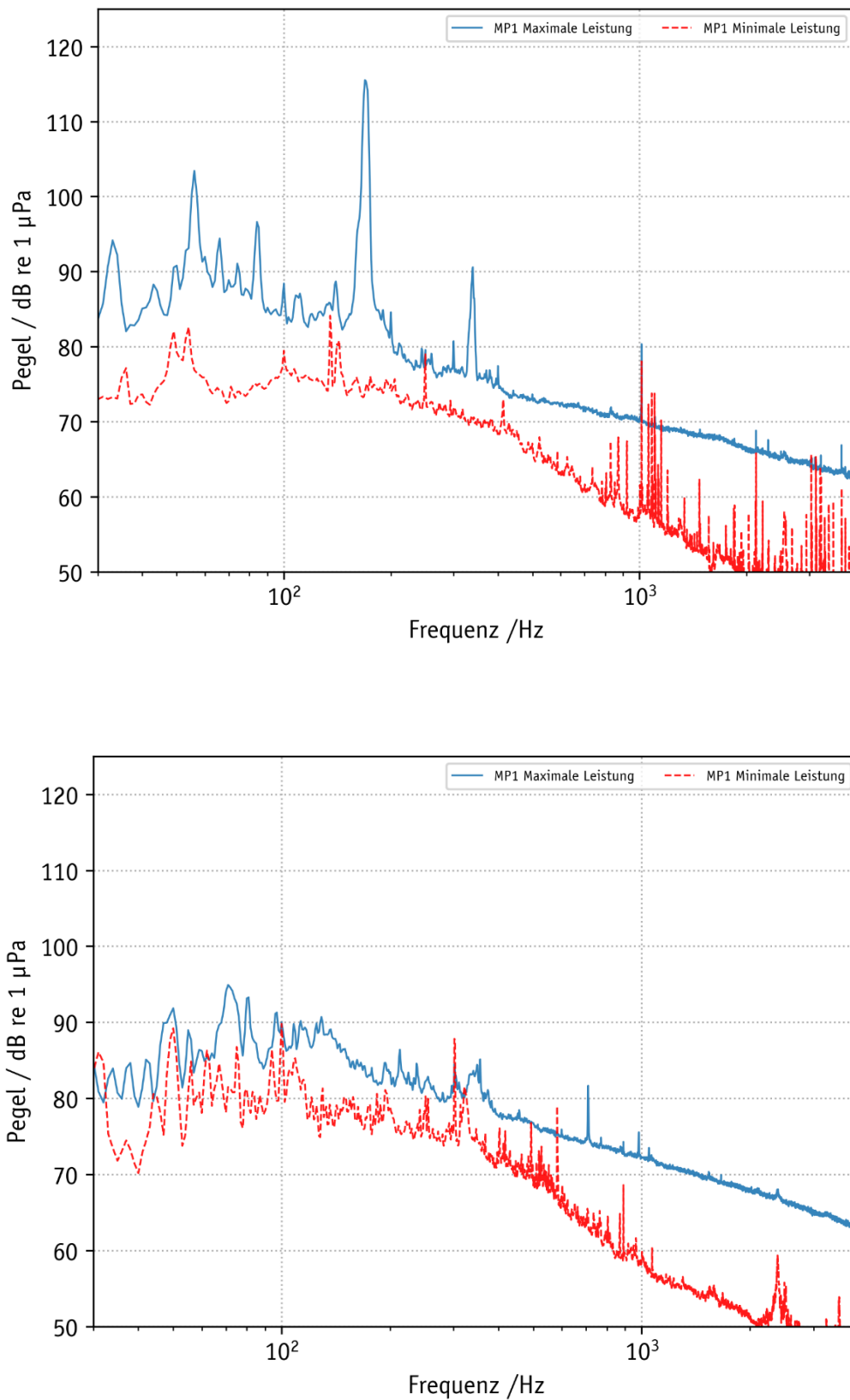


Abbildung 17: Beispielhafte Gegenüberstellung der Schmalband-FFT-Spektren für eine ausgewählte Windanlage mit und ohne Getriebe aus Abbildung 16 in den Windklassen „niedrig“ (Anlagen im Stillstand) und Windklasse „hoch“ (Anlagen unter Nennleistung).

6.1.3 Mögliche, projektspezifische Einflussparameter

In einer projektübergreifenden, multifaktoriellen Varianzanalyse wurde versucht, mögliche Einflussparameter auf die abgestrahlten, tonalen Komponenten der in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen zu identifizieren. Es zeigten sich nachfolgende Abhängigkeiten:

Fundamentstruktur: Abbildung 18 zeigt den L_{50} für die verschiedenen Fundamentstrukturen. Im Mittel liegen die Werte für Monopiles tendenziell 3,0 dB niedriger als die der anderen (strukture aufgelösten) Fundamenttypen, wie Jackets oder Tripods. Ob und inwiefern das Design der Fundamentstruktur, der Pfahldurchmesser, die Fundamentmasse oder andere Parameter einen Einfluss (Frequenz bzw. Amplitude) auf den ins Wasser abgestrahlten Schalleintrag durch in Betrieb befindliche Anlagen hat, ist dieser Analyse nicht zu entnehmen. Die Anzahl der Messungen, vor allem von Anlagen mit anderen Fundamenten als Monopiles, ist zu gering, um systematische und statistisch valide Pegelunterschiede nachweisen zu können.

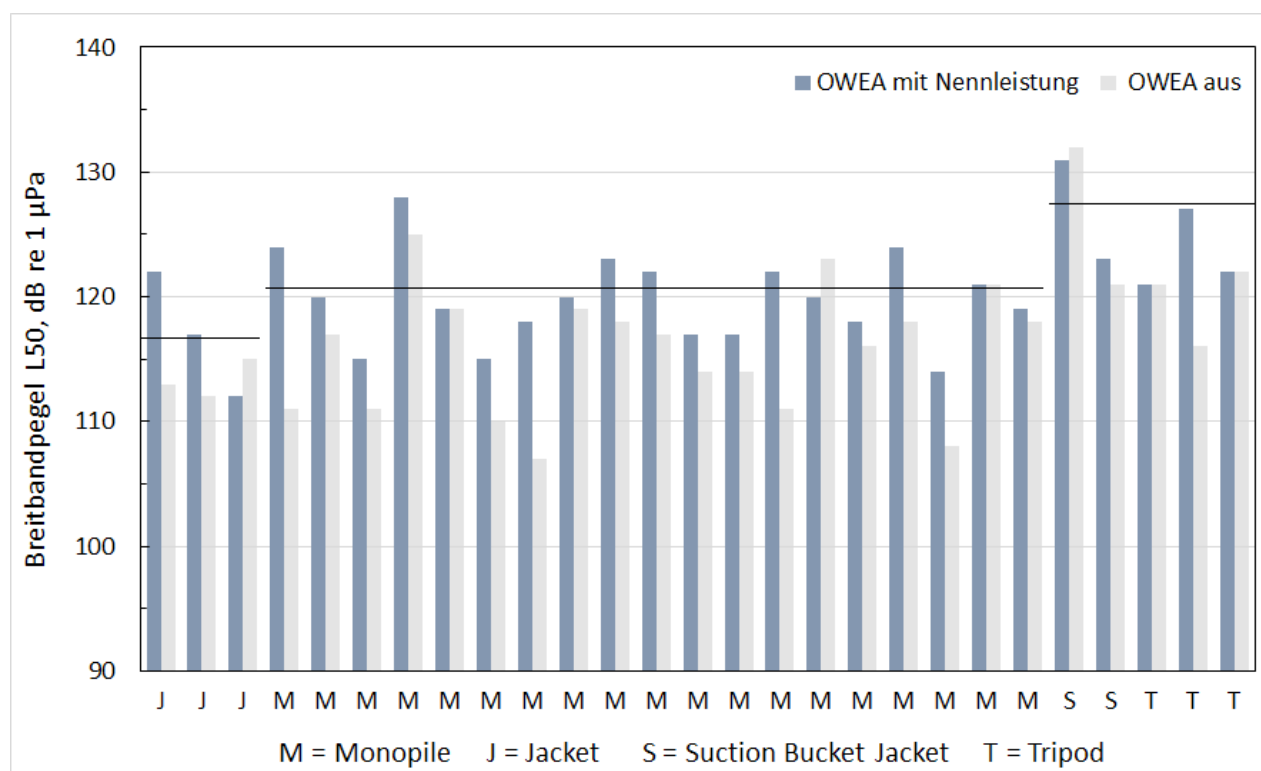


Abbildung 18: Breitbandige Schalldruckpegel L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA in Abhängigkeit der Fundamenttypen.

Getriebetyp: In Abbildung 19 sind die Pegel (L_{50}) nach Getriebe und Direktantrieb (getriebe los) geordnet. Hier zeigt sich ein schwacher Hinweis darauf, dass bei getriebe losen Anlagen der Pegel im Mittel (Median) um etwa 2,5 dB niedriger als bei Anlagen mit Getriebe ist.

In Tabelle 6 ist die Statistik über die beiden möglichen, projektspezifischen Einflussfaktoren Fundamentstruktur und Getriebeart zusammengestellt.

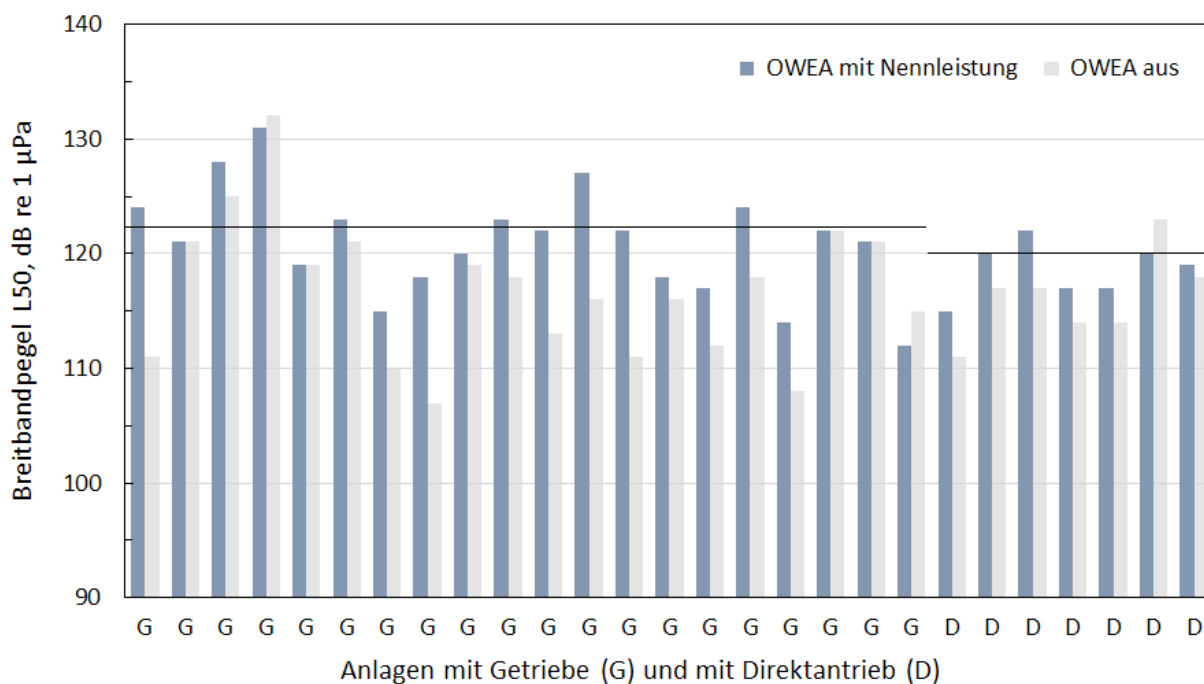


Abbildung 19: Breitbandige Schalldruckpegel L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA nach Antriebssystemen (G – Getriebe; D – Direktantrieb bzw. getriebelos) geordnet.

Parameter	Schalldruckpegel L_{50} dB re 1 μ Pa aus Abbildung 18 und Abbildung 19		
	Mittelwert	Standardabweichung	Median
Monopfahl	121,3	4,4	121,0
andere Fundamentstruktur	124,8	6,1	123,0
mit Getriebe	122,3	4,7	122,2
ohne Getriebe	120,7	5,5	120,0

Tabelle 6: Statistische Darstellung des Schalldruckpegels L_{50} , gemessen an in Betrieb befindlichen OWEAs unterschiedlichen Typs sowie Fundamentstrukturen in einer Messentfernung von ca. 100 m.

Nennleistung: In Abbildung 20 sind die gemessenen, breitbandigen Schalldruckpegel L_{50} und in Abbildung 21 der Pegel des dominanten 1/3-Oktavbandpegels L_{50} in Abhängigkeit der Nennleistung der Anlagen dargestellt.

Abbildung 20 deutet darauf hin, dass der gemessene, breitbandige Gesamtpegel in ca. 100 m Entfernung von Anlagen in Betrieb mit Nennleistung mit zunehmender Nennleistung abnimmt. Der breitbandige Gesamtpegel kann u. U. stark durch weitere Faktoren, wie z. B dem Hintergrundschallpegel, erheblich beeinflusst sein; siehe unten. Nimmt man nur das pegelbestimmende 1/3-Oktavband, ergibt sich jedoch ebenfalls eine Abnahme im Pegel mit zunehmender Nennleistung; siehe Abbildung 21.

Tendenziell ist somit bei moderneren OWEAs mit höherer Nennleistung von einem gleichbleibenden bis abnehmenden Schalldruckpegel auszugehen.

Bestehender Hintergrundschallpegel: In Abbildung 22 sind die gemessenen Differenzen zwischen dem breitbandigen Schalldruckpegel L_{50} mit Nennleistung (Windklasse „hoch“) und ausgeschalteten OWEA (Windklasse „niedrig“) dargestellt.

In Abbildung 22 zeigt sich, dass es eine große Varianz im breitbandigen Differenzpegel zwischen den Betriebszuständen „Anlagen laufen unter Nennleistung“ und „Anlagen sind ausgeschaltet“ gibt. So sind in den allermeisten Fällen die breitbandigen Schalldruckpegel L_{50} erwartungsgemäß bei in Betrieb befindlichen Anlagen größer als bei ausgeschalteten Anlagen. Tendenziell nimmt die Pegeldifferenz mit zunehmender Nennleistung bzw. neuerem Baujahr ab. In den meisten Fällen ist der Schalldruckpegel in der Windklasse „mittel“ zwischen den Pegeln der Windklassen „hoch“ und „niedrig“; nur in vereinzelt Fällen ist der Pegel in der Windklasse „mittel“ größer als in der Windklasse „hoch“.

Umgekehrt könnte ggfs. auch geschlussfolgert werden, je „neuer“ die Anlagen, desto weniger steigt der Schalldruckpegel L_{50} zwischen den Betriebszuständen „Anlagen in Betrieb mit Nennleistung“ und „Anlagen sind aus“ in einer Entfernung von bis zu 100 m von der Anlage an.

Es sind aber auch vier Fälle messtechnisch erfasst worden, in denen der breitbandige Schalldruckpegel in der Windklasse „hoch“ (Anlagen in Betrieb mit Nennleistungen) leiser sind als in der Windklasse „niedrig“ (Anlagen produzieren keine Leistung).

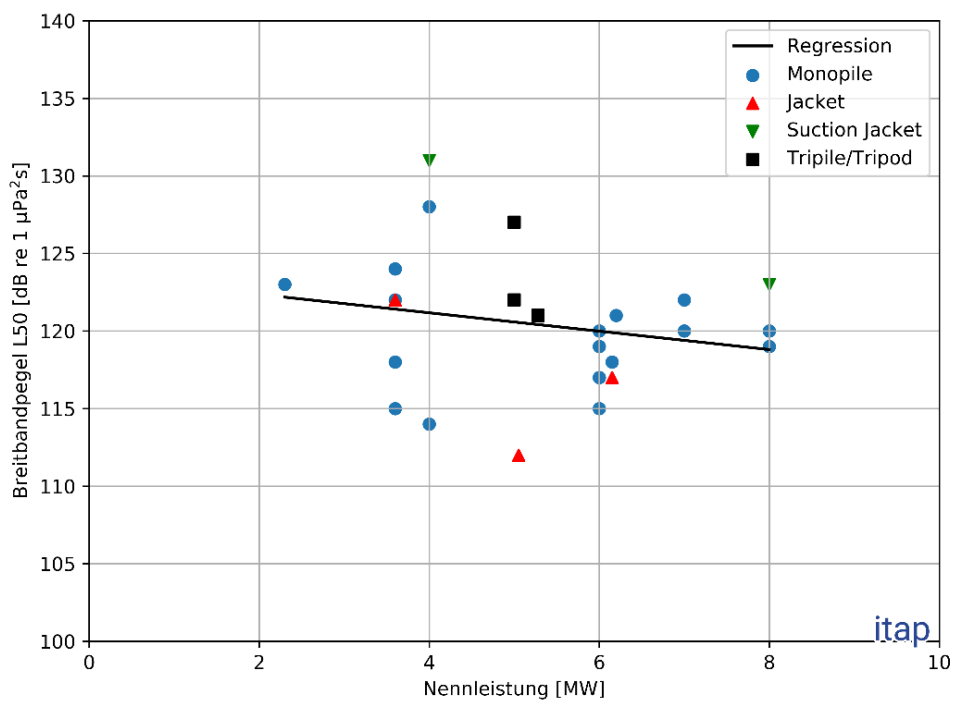
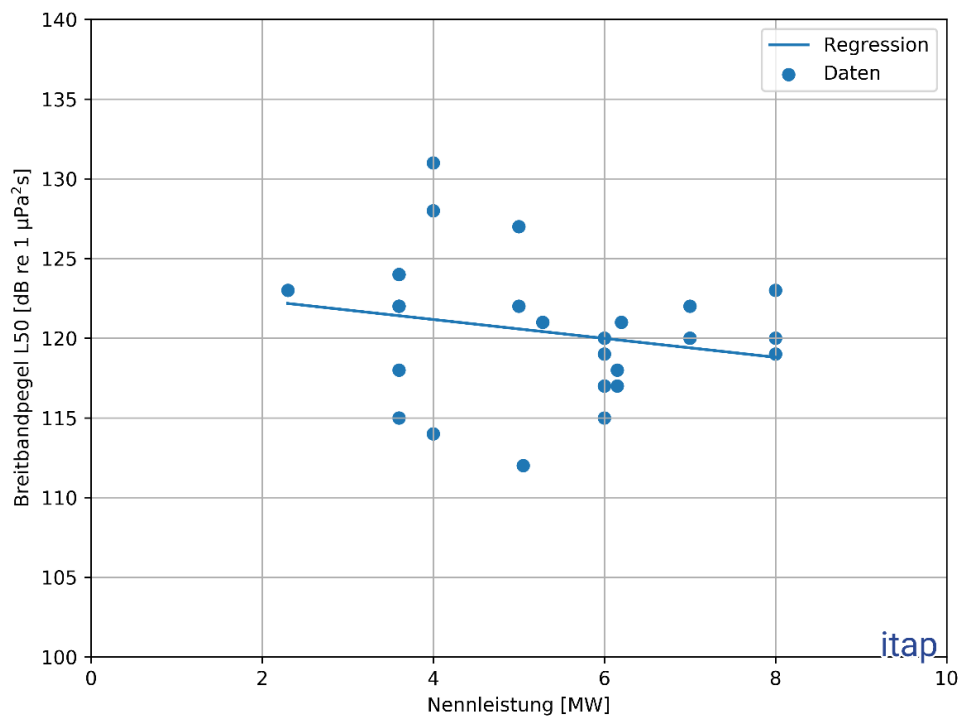


Abbildung 20: Breitbandige L50 in 100 m Entfernung von den OWEA als Funktion der Nennleistung. Oben: Unabhängig von der Fundamentstruktur; unten: nach Fundamenttyp aufgeschlüsselt.

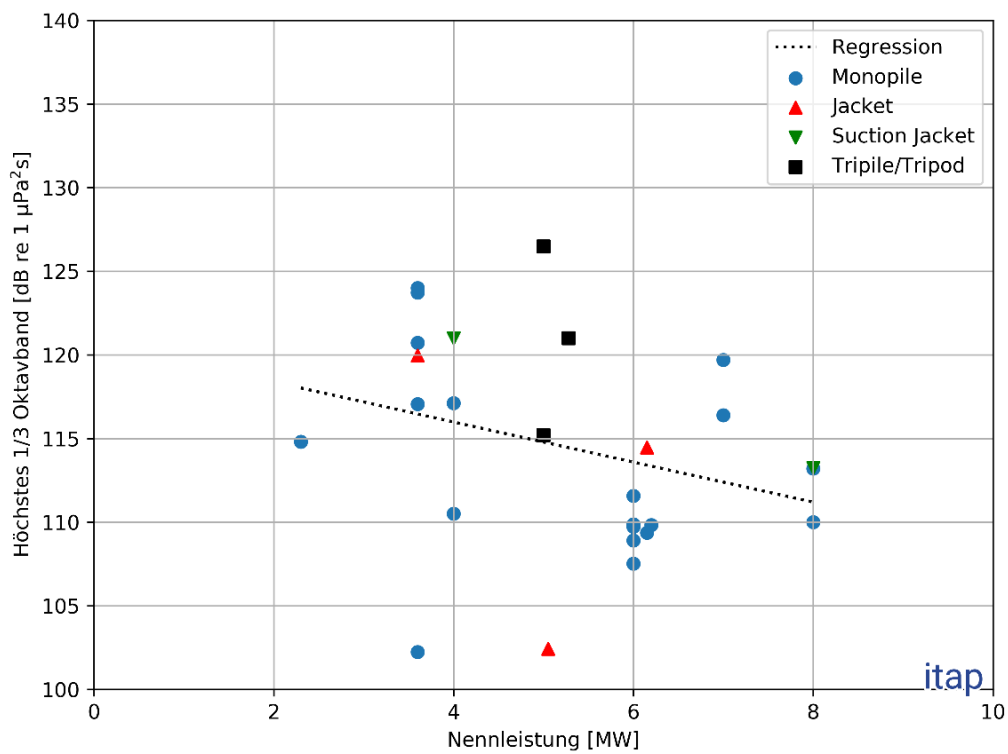
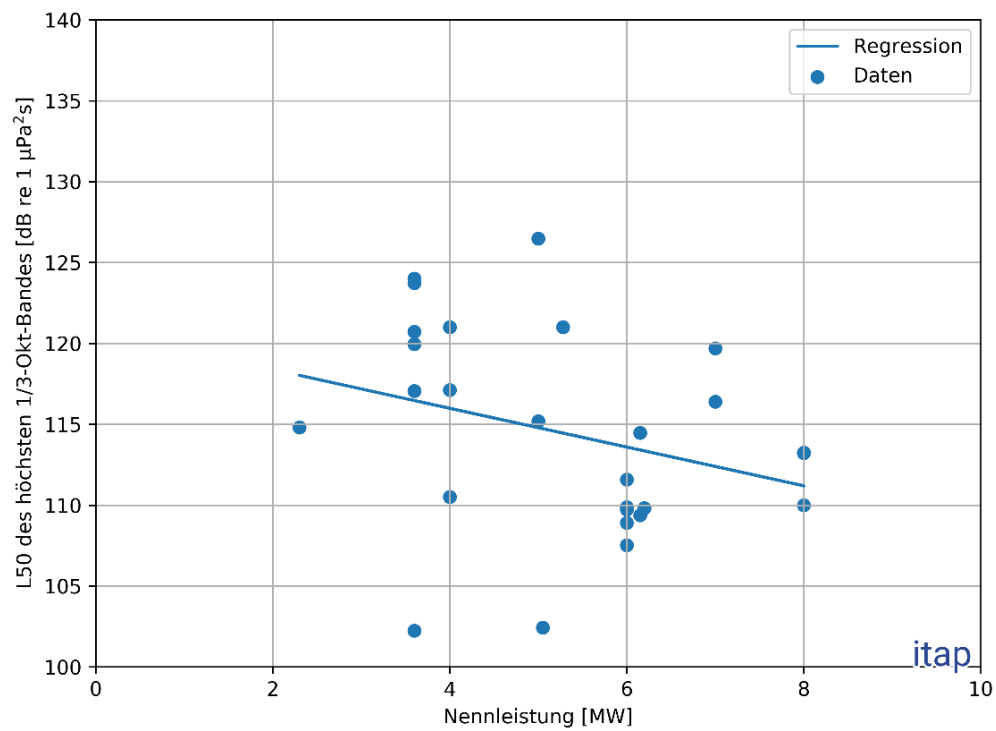


Abbildung 21: L_{50} des 1/3-Oktavbandes mit dem höchsten Pegel in 100 m Entfernung von den OWEA als Funktion von deren Nennleistung. Oben: Unabhängig von der Fundamentstruktur; unten: nach Fundamenttyp aufgeschlüsselt.

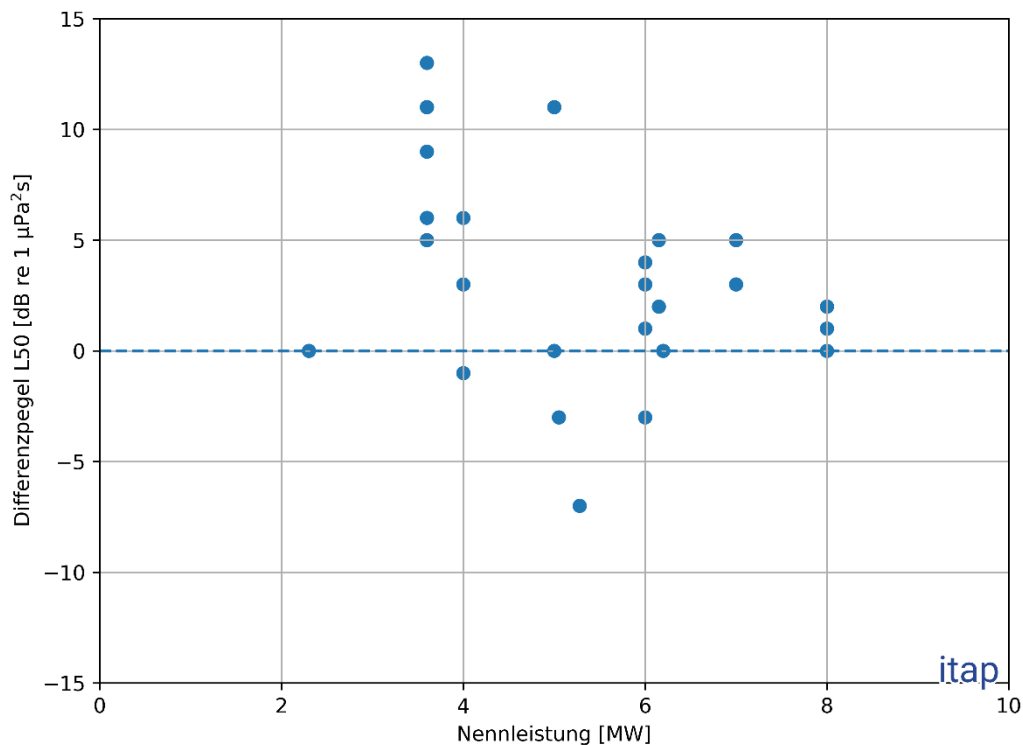


Abbildung 22: Differenzpegel zwischen dem breitbandigen Schalldruckpegel L_{50} mit in Betrieb befindlichen OWEAs mit Nennleistung (Windklasse „hoch“) und ausgeschalteten OWEAs (Windklasse „niedrig“) als Funktion der Turbinengröße.

6.1.4 Standortspezifische Einflussparameter

Wassertiefe: In Abbildung 23 sind die gemessenen Pegel als Funktion der Wassertiefe aufgetragen. Ein statistisch valider Zusammenhang besteht anscheinend nicht; tendenziell scheint der Pegel mit zunehmender Wassertiefe leicht abzunehmen.

Die Wassertiefe kann theoretisch keinen großen Einfluss bei den vorhandenen Datensätzen haben, da sie für alle gemessenen OWEA nur etwa einen Bereich von 1:2 überstreicht (rund 20 m bis 40 m).

Mit der Annahme, dass die Schallabstrahlung von der Wasseroberfläche bis zum Meeresboden gleich ist, würde dies bei ansonsten gleichen Bedingungen einen Unterschied von 3 dB bedeuten. Messungen an einem Monopile haben allerdings ergeben, dass die Schwingungsamplitude und damit die Schallabstrahlung zum Meeresboden hin abnimmt (Betke et al., 2003). Dies ist vermutlich mit der zunehmenden Biegesteifigkeit des „voreingespannten“ Pfahls im Meeresboden zurückzuführen. Hinzu kommt, wenn sowohl bei 20 m, als auch bei

40 m Wassertiefe die gleiche Schwingungsenergie von der Gondel in den Turm eingeleitet wird (also in beiden Fällen die gleiche Turbine verbaut ist), ist ebenfalls kein höherer Schallpegel zu erwarten oder allenfalls eine geringfügige Änderung aufgrund subtiler Änderungen der Schallabstrahlung.

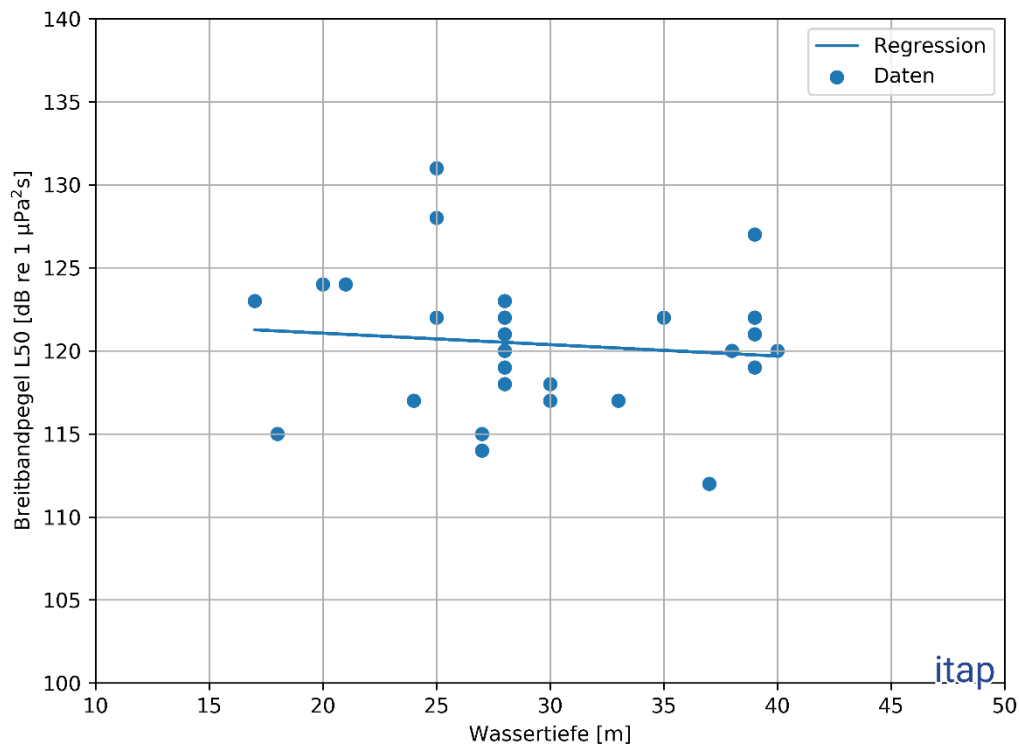


Abbildung 23: Breitbandige Pegel L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA in Betrieb (Nennleistung) als Funktion der Wassertiefe.

Weitere standortspezifische Parameter wurden aufgrund der geringen Varianz in den untersuchten Windparks nicht durchgeführt. So wurden die allermeisten Windparks in der dt. Nordsee in vorwiegend sandigen Böden installiert, während im Gegensatz dazu nur wenige Windparks in der Ostsee mit zum Teil sehr komplexen Bodenschichtungen installiert worden sind.

6.2 Messungen in und um Offshore Windparks

In der Abbildung 24 sind exemplarisch die Schmalband-FFT-Spektren, gemessen an einer ausgewählten Anlage in der östlichen Zone 1 der Nordsee (OWP *Meerwind Südost*; OWEA: Siemens

SWT-3.6-120 mit Getriebe) für die Messpositionen ca. 100 m von der OWEA, in ca. 1 km und ca. 5 km außerhalb des OWPs für die Windklassen „hoch“ (Nennleistung) und „niedrig“ gegenübergestellt.

Es zeigt sich, dass die Amplitude der charakteristischen Frequenz (hier 160 Hz) bei Nennleistung mit zunehmendem Abstand zur jeweiligen Anlage bzw. zum Windpark stetig abnimmt. Unabhängig davon zeigt sich bei allen Messpositionen außerhalb der Windparks, dass sich das Spektrum um die schmalbandige, tonale Komponente um 160 Hz etwas verbreitert. Es ist zu vermuten, dass diese spektrale Verbreiterung durch die Anwesenheit von zwei oder mehr Windenergieanlagen verursacht wird, die ggfs. leicht unterschiedliche Frequenzen aufgrund der Rotordrehzahl oder des Pitchwinkels aufweisen. Eine weitere Möglichkeit kann auch darin begründet sein, dass für sämtliche Auswertungen jeweils nur 10-Minuten-Mittelwerte der jeweiligen Windenergieanlage vorlagen und somit diese besagte Anlage Variationen der Rotordrehzahl o. ä. aufwies.

Bei einer Darstellung in der spektralen Breite von 1/3-Oktaven ist diese geringfügige, spektrale Verbreiterung jedoch nicht relevant. Ebenfalls zeigt sich, dass in ca. 100 m Entfernung noch harmonische Oberschwingungen von 160 Hz im Wasser messtechnisch nachweisbar sind, d. h. ganzzahlige Vielfache von 160 Hz; diese schmalbandigen Komponenten sind aber nicht mehr pegelbestimmend. Sie sind mit zunehmendem Abstand zum Windpark auch nicht mehr in den gemessenen Spektren vorhanden.

Zudem ist zu erkennen, dass sich zumeist der breitbandige Pegel deutlich zwischen der Windklasse „hoch“ zu „niedrig“ absenkt. Dies ist im tieffrequenten Bereich primär auf natürliche Schallquellen (Wind, Wellen, etc.) zurückzuführen. Erwähnenswert ist, dass z. T. bei beiden Windklassen Schiffsgeräusche aus weiterer Entfernung eines VTGs mess- und hörbar sind, welche ebenfalls zu einer breitbandigen Pegelanhebung beitragen. In vereinzelten Fällen kommt es zu höheren Pegeln bei der Windklasse „niedrig“, die i. d. R. auf die Schalleinträge von kleineren Schiffen zurückzuführen sind, die bei schlechtem Wetter (Windklasse „hoch“) nicht mehr im oder um den Windpark verkehren.

In Tabelle 7 sind exemplarisch alle breitbandigen Schalldruckpegel an allen Messpositionen aus Abbildung 24 innerhalb und außerhalb des OWPs exemplarisch zusammengefasst.

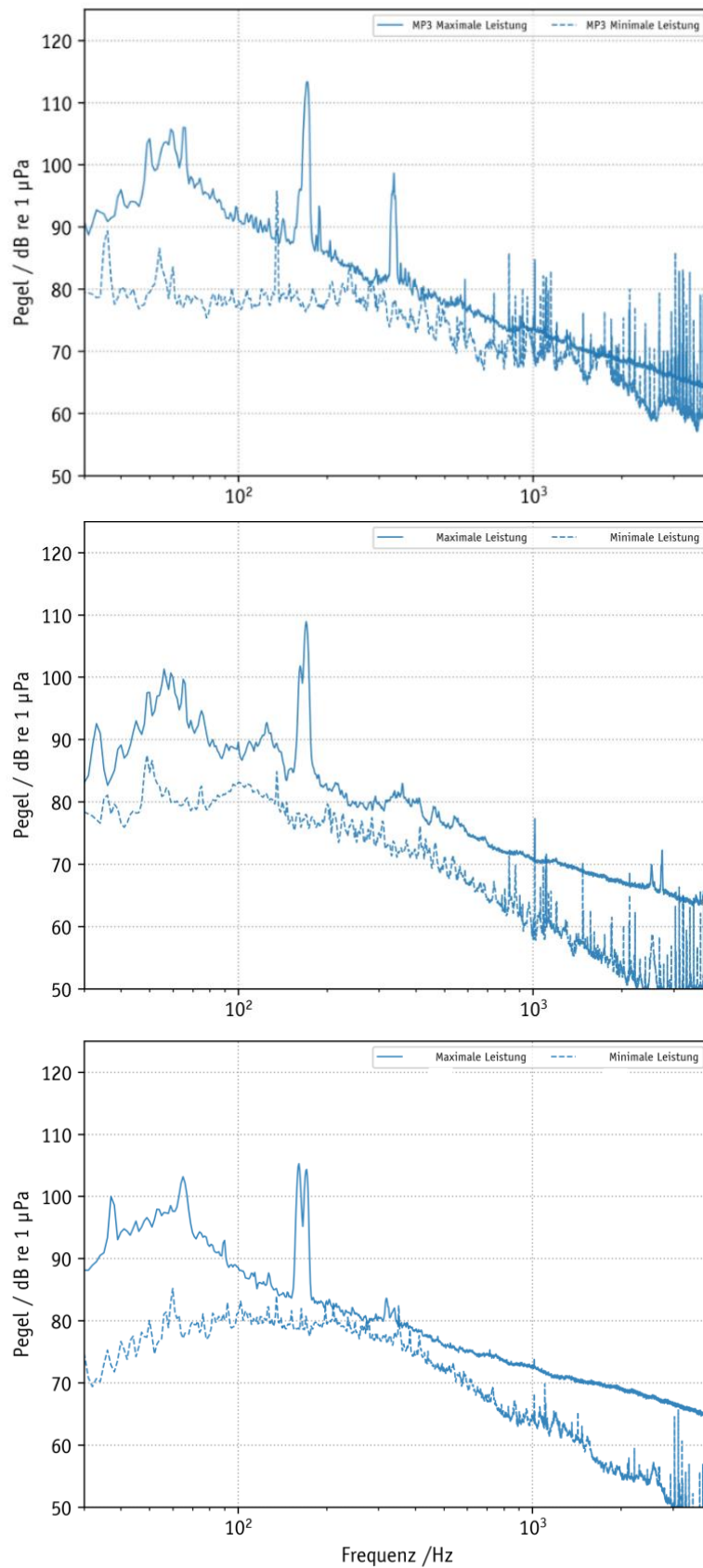


Abbildung 24: Typische Schmalbandspektren an einer ausgewählten Anlage in der östlichen Zone 1 der Nordsee (Siemens SWT-3.6-120 mit Getriebe) in 100 m (oben), 1 km (Mitte) und 5 km (unten) Abstand, jeweils bei Nennleistung (Windklasse „hoch“) und Stillstand (Windklasse „niedrig“).

Messposition	Windklasse	Schallpegel in dB re 1 μ Pa			
		L ₉₀	L ₅₀	L _{eq}	L ₅
100 m von OWEA	hoch	120	122	123	127
	mittel	117	123	125	130
	niedrig	106	111	117	124
Mitte OWP	hoch	110	115	116	121
	mittel	109	114	120	127
	niedrig	103	109	112	118
1 km von OWP	hoch	108	115	116	119
	mittel	107	114	116	121
	niedrig	101	108	116	122
5 km von OWP	hoch	114	116	118	122
	mittel	112	117	119	123
	niedrig	106	112	117	124

Tabelle 7: *Gemessene, breitbandige Schalldruckpegel nach Messpositionen und Windklasse geordnet für einen ausgewählten Windpark in der östlichen Zone 1 der Nordsee nördlich vor Helgoland.*

Es zeigt sich aus Tabelle 7, dass tendenziell der Schalldruckpegel innerhalb des Windparks mit der Windklasse bzw. dem zunehmenden Betrieb der Windenergieanlagen ansteigt. Außerhalb des Windparks sind aber zumeist keine oder keine signifikanten Pegelerhöhungen bzgl. des Dauerschallpegels L_{eq} und dem Perzentilpegel L₀₅ zu erkennen. Lediglich für die L₉₀- und L₅₀-Werte an den Messpositionen „Mitte OWP“ und „1 km von OWP“ steigt der Pegel mit zunehmender Windklasse an. Eine Besonderheit für diese relativ „alte“ und kleine Anlage (3,6 MW) ist, dass die Schalldruckpegel für die Windklasse „mittel“ zumindest innerhalb des Windparks höher sind als für die Windklasse „hoch“. Gründe dafür können vielfältiger Natur sein, wie z. B. Regelmechanismen der jeweiligen Anlage, und lassen sich auf der bestehenden Datengrundlage von gemittelten Leistungsdaten nicht weitergehend analysieren.

Auffällig ist zudem, dass die Pegelwerte in 5 km Entfernung zum Windpark höher sind als in einer Entfernung von 1 km. Dies deutet darauf hin, dass der Schalldruckpegel außerhalb des Windparks nicht durch den Betrieb der Anlagen bzw. des Windparks dominiert wird, sondern von dem umgebenden Hintergrundschallpegel.

6.3 Vergleich Hintergrund- und Betriebsschall

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens eines Windparks werden eine Hintergrundschallmessung vor dem Beginn des Baus eines Windparks und eine Betriebsschallmessung gemäß Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011) angeordnet. Aus dem Vergleich dieser beiden Messungen soll evaluiert werden, ob und wenn ja welche Auswirkungen der Betrieb dieses Windparks auf den Gesamtschall in und um diesen hat.

Insgesamt wurden 12 Hintergrundschallmessungen in den Zonen 1 und 2 der Nordsee ausgeführt.

Der direkte Vergleich der Hintergrund- und Betriebsschallmessungen gestaltete sich in den letzten Jahren als komplex. Die Aussagen aus dem Vergleich zeigen keine eindeutigen Ergebnisse; so könnte es zu einer Erhöhung und Absenkung des Hintergrundschalls durch den Bau einzelner Windparks bzw. Cluster von Windparks kommen. Aus diesem Grund werden hier einige Beispiele näher dargestellt.

Als Beispielmessung aus der westlichen Zone 2 der Nordsee in der Nähe zu den Niederlanden ist der ermittelte Hintergrund- und Betriebsschall in Tabelle 8 gegenübergestellt.

Windklasse	Hintergrundschall, 2018	Betriebsschall, 2021	Betriebsschall, 2021
niedrig	116	119	119
hoch	116	121	120

Tabelle 8: Vor dem Bau von einem geplanten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee gemessene Breitbandpegel L_{50} (Hintergrundschall) im Vergleich zu Werten von zwei benachbarten Messpositionen während der Betriebsschallmessung (alle Werte in dB re 1 μ Pa).

Tabelle 8 zeigt, dass keine pegelbestimmenden Geräuschkomponenten von den in Betrieb befindlichen Anlagen in und um den Windpark zu messen sind. Auch die vorliegende Auswertung des betriebsbedingten Verkehrs in und um diesen Windpark kann einen Anstieg des Hintergrundschalls um 3 dB für die Windklasse „niedrig“ und bis zu 5 dB für die Windklasse „hoch“ zwischen den Hintergrund- und Betriebsschallmessungen nicht vollständig erklären. Es könnte u. U. sein, dass sich die natürlichen Geräusche in der Windklasse „hoch“, wie z. B. Wellenschlag, aufgrund der nun installierten Fundamentstrukturen erhöht haben. Es ist jedoch auch nicht auszuschließen, dass der nicht OWP-relevante Schiffsverkehr um diesen Windpark innerhalb der drei Jahre zwischen Betriebs- und Hintergrundschallmessung zumindest für die

Windklasse „niedrig“ angestiegen ist. Die vorliegende Datenlage der Unterwasserschallmessungen und der AIS-Daten reicht aber nicht aus, um hierüber eine quantitative Aussage zu treffen.

Zwei weitere Beispiele benachbarter Windparks (OWEA: Siemens SWT 7.0-154, getriebelos) von durchgeführten Hintergrund- und Betriebsschallmessungen aus der nordwestlichen Zone 2 der Nordsee sind in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt. Es zeigt sich ein Anstieg von 4 dB in der Windklasse „hoch“ zwischen der Hintergrund- und der Betriebsschallmessung. Dieser Anstieg ist eindeutig auf den Betrieb der Anlagen beider Windparks zurückzuführen, da tieffrequente Schalleinträge ins Wasser vorliegen. Allerdings zeigt sich auch in diesem Fall, dass diese tonale Komponente erfahrungsgemäß mit der Entfernung zur jeweiligen Anlage deutlich abnimmt und sich zunehmend mit dem Hintergrundschallpegel vermischt. Zudem besteht schon ein weiterer Windpark sowie eine Konverterplattform in diesem Gebiet, so dass der OWP-relevante Serviceverkehr in unterschiedlichen Dichten um diesen Bereich vorliegt.

Windklasse	Hintergrundschall, 2018	Betriebsschall, 2021
niedrig	117	117
hoch	116	120

Tabelle 9: Vor dem Bau von einem geplanten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee gemessene Breitbandpegel L_{50} (Hintergrundschall) im Vergleich zu Werten von einer benachbarten Messposition während der Betriebsschallmessung (alle Werte in dB re 1 μ Pa).

Windklasse	Hintergrundschall, 2018	Betriebsschall, 2021
niedrig	118	117
hoch	118	122

Tabelle 10: Vor dem Bau von einem weiteren, geplanten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee gemessene Breitbandpegel L_{50} (Hintergrundschall) im Vergleich zu Werten der Betriebsschallmessung (alle Werte in dB re 1 μ Pa).

Der Vergleich der Messungen aus den Jahren 2018 und 2021 bzgl. der Windklasse „niedrig“ (Anlagen sind im Stillstand) zeigen keine beurteilungsrelevanten Pegeländerungen für beide Windparks. Der Einfluss des Serviceverkehrs dieser drei genannten Beispiele auf den Gesamtschallpegel wird im Kapitel 6.4 weitergehend untersucht.

6.4 Schiffsgeräusche im Zusammenhang mit in Betrieb befindlichen Windparks

6.4.1 Serviceverkehr in und um einen Windpark

Die gemessenen, breitbandigen Schalldruckpegel (L_{50}) über alle hier aufgeführten Windparks in der Windklasse „niedrig“, also bei ausgeschalteter Windenergieanlage, liegen zwischen 107 und 132 dB re 1 μ Pa; dies umfasst einen Pegelbereich > 20 dB, was einem Faktor > 10 der physikalischen Messgröße Schalldruck gleichzusetzen ist. Als Grund für einen so großen Pegelbereich kommen nur Schiffsgeräusche oder eventuell andere, anthropogene Geräusche in Frage, da durch die vorherrschenden Windbedingungen („niedrig“) hohe Schalldruckpegel durch z. B. Wind und Wellenschlag ausgeschlossen werden können. Unklar ist bislang, inwieweit dabei der zum Betrieb eines Windparks gehörende Serviceverkehr eine Rolle spielt bzw. diese Pegel den Gesamtschalldruckpegel beeinflussen.

Bis vor 2020 stand der Schalleintrag der in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen im Vordergrund jeglicher Untersuchung von Betriebsschallmessungen in Deutschland. Es zeigte sich aus den bis dahin durchgeführten Auswertungen, dass man den Schalleintrag der Anlagen nur dann einwandfrei erfassen und bewerten kann, wenn kein Schiff in der unmittelbaren Umgebung der Anlage und dem Unterwasserschallmessgerät anwesend war. Als pragmatische Lösung wurden nach Möglichkeit die Messzeiträume, in denen betriebsbedingter Verkehr in einem Umkreis von < 1 km vom allen Messpositionen innerhalb des Windparks vorlag, für die Auswertung ausgeschlossen. Es zeigte sich, dass ein nah vorbeifahrendes Schiff, egal welcher Größe oder Geschwindigkeit, den Gesamtschallpegel am Messgerät innerhalb des Windparks kurzzeitig vollständig dominiert. Ab 2020 wurden die ersten Versuche unternommen, den Schiffslärm durch die Schiffsbewegungen in und um den zu untersuchenden Windpark mittels AIS-Aufzeichnungen zu quantifizieren und zu untersuchen. AIS steht für Automatic Identification System; ein System, mit dem Schiffe regelmäßig ihre Position und andere Informationen über ihre Fahrt mitteilen. Bisher wurden nur an vereinzelt Windparks durch eine gezielte Auswahl der Messpositionen und der Nutzung von Schiffsbewegungen diese offene Fragestellung angegangen.

Ein typisches Szenario für einen Windpark in größerer Entfernung von der Küste ist, dass ein Serviceschiff zwei bis vier Wochen im Windpark bleibt, d. h. inkl. Übernachtungsmöglichkeiten für das Wartungspersonal, bevor es zum Personalwechsel und zur Aufnahme von Betriebsstoffen zum Basishafen zurückkehrt. Im Windpark bewegt sich das Serviceschiff von Zeit zu Zeit zwischen den Anlagen, um die Serviceteams für Wartungsarbeiten abzusetzen. Gelegentlich

können auch kleinere CTVs (Crew Transfer Vessels) im Gebiet für Transportfahrten aktiv sein. Diese Fahrten beschränken sich i. d. R. auf Tageslicht und „gutes Wetter“, d. h. die Serviceintervalle sind im Sommer zumeist länger als im Winter. Die längste Zeit des Aufenthaltes ist das Serviceschiff auf einer Parkposition im Windpark oder in der näheren Umgebung. Hinzu kommen Wartungsfahrten weiterer, kleinerer Schiffe für das ökologische Betriebsmonitoring für z. B. Sichtbeobachtungen und POD-Wartungsfahrten; derartige Fahrten finden alle paar Wochen (i. d. R. alle sechs bis acht Wochen) für wenige Tage im und um den Windpark, ebenfalls nur bei gutem Wetter, statt.

Bei küstennahen Windparks fahren die Serviceschiffe und CTV i. d. R. täglich vom Basishafen in die Windparks und zurück. Die Wartungsarbeiten beschränken sich dort ebenfalls zumeist auf den Tagzeitraum (BSH 2023).

Abbildung 25 zeigt den AIS-Track des Offshore-Serviceschiffes in einem Windpark in der westlichen Zone 2 der über einen Zeitraum von 52 Tagen. Ein weiteres Beispiel für den AIS-Track eines Serviceschiffes aus der westlichen Zone 2 der Nordsee ist in Abbildung 26 dargestellt. Beide Beispiele befinden sich in der zentralen, westlichen Nordsee.

Die Punkte in den AIS-Tracks haben einen Abstand von etwa 30 Minuten. Kürzere Abstände waren vom kommerziellen AIS-Provider (Fleetmon; JAKOTA Cruise Systems GmbH, Rostock) nicht erhältlich. Das liegt u. a. daran, dass die Entfernung der betrachteten Windparks von der Küste den normalen Empfang der auf VHF (very high frequency) gesendeten AIS-Daten unzuverlässig macht und auf relativ teures Satelliten-AIS ausgewichen werden musste.

Die Bewegung des Serviceschiffes in der westlichen Zone 2 der Nordsee aus Abbildung 25 wurde näher untersucht: Während des genannten Zeitraums von 52 Tagen verließ das betriebs-eigene Serviceschiff den Windpark drei Mal für einige Tage, um den Basishafen anzulaufen. In dem Windpark fuhr es insgesamt etwa 4 Stunden, wobei als Schwellenwert für den Zustand „Fahren“ eine Geschwindigkeit von 2 kn gewählt wurde. Die höchste Geschwindigkeit innerhalb des betrachteten Windparks betrug 10 kn; außerhalb wurden bis zu 12 kn verzeichnet (Abbildung 27). Für das besagte Serviceschiff wird eine Höchstgeschwindigkeit von 13 kn genannt.

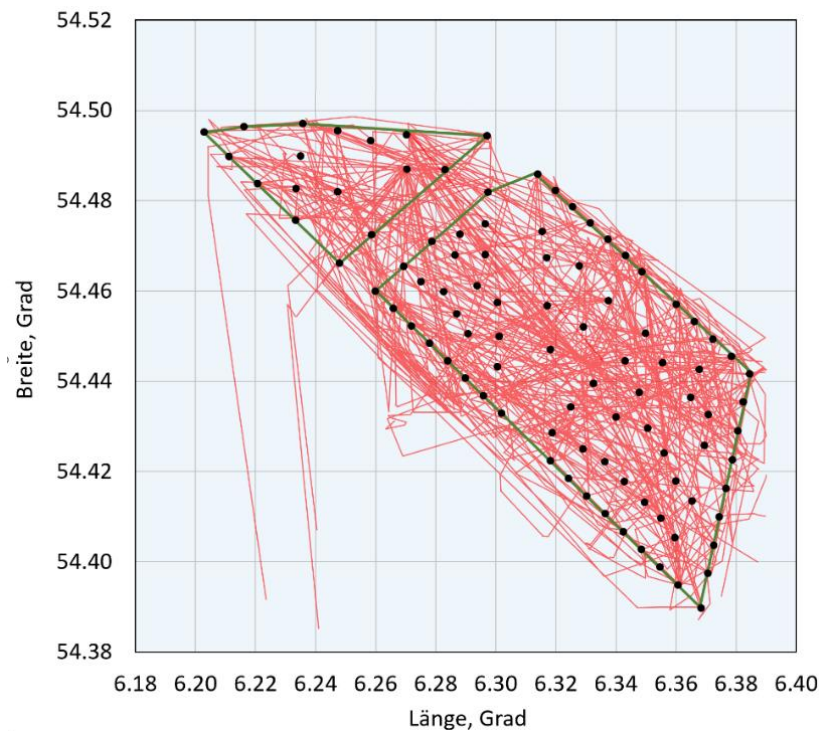


Abbildung 25: Bewegungen des betriebseigenen Offshore-Serviceschiffes in der westlichen Zone 2 der Nordsee über einen Zeitraum von 52 Tagen im Sommer 2021 während der mehrwöchigen Betriebsschallmessungen. Die Schiffsbewegungen wurden mittels AIS-Aufzeichnungen rekonstruiert.

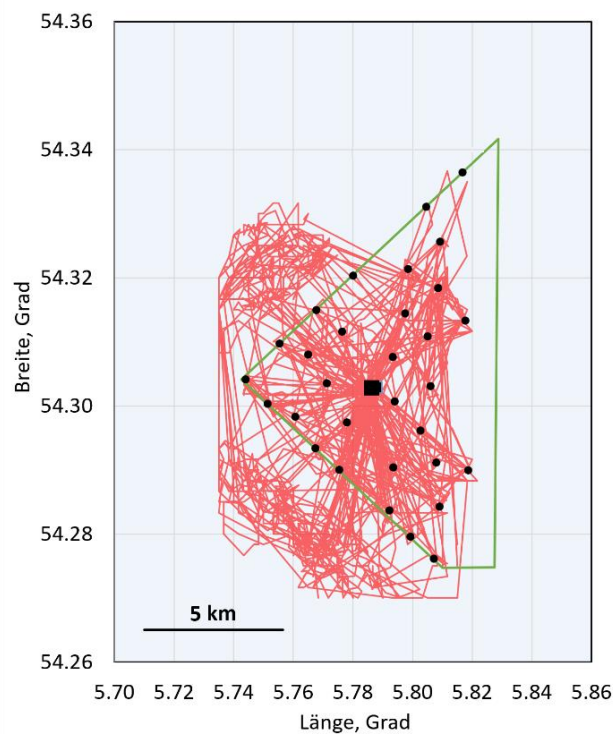


Abbildung 26: Bewegungen des betriebseigenen Offshore-Serviceschiffes in der westlichen Zone 2 der Nordsee über einen Zeitraum von 56 Tagen im Sommer 2021 während der mehrwöchigen Betriebsschallmessungen. Die Schiffsbewegungen wurden mittels AIS-Aufzeichnungen rekonstruiert. Das schwarze Quadrat im Zentrum des Windparks markiert die Umspannstation.

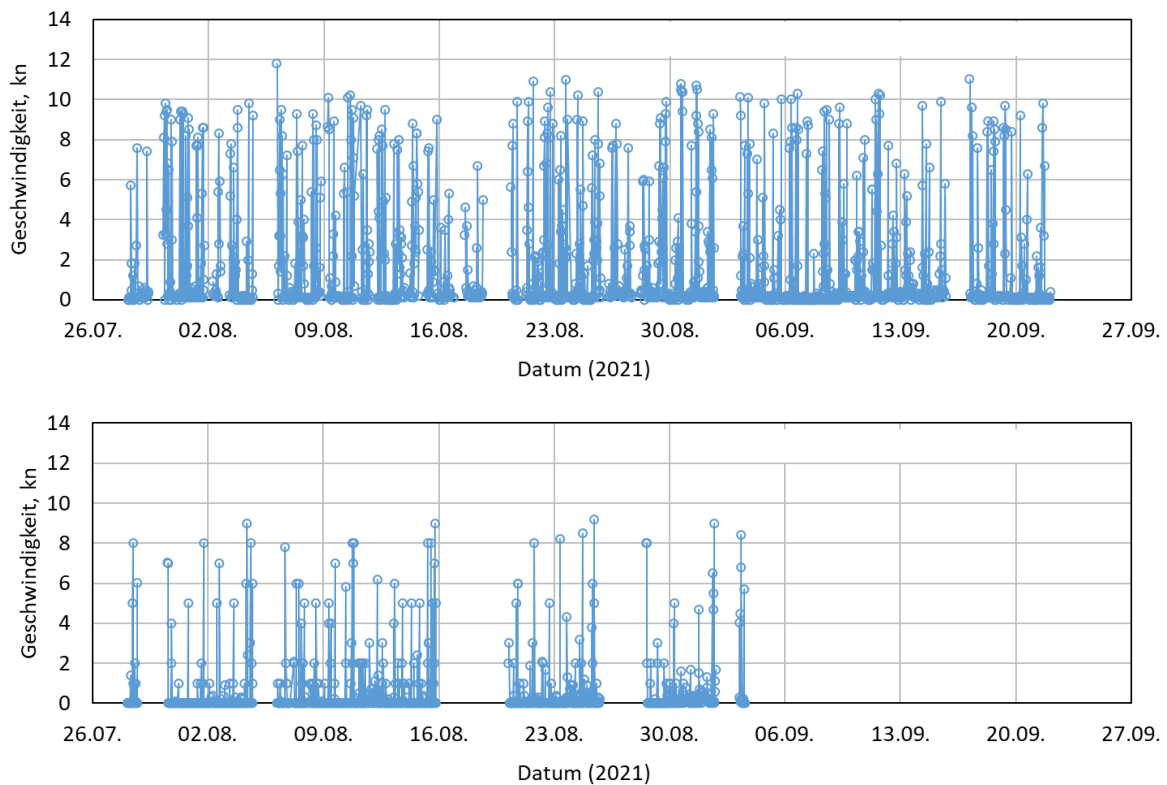


Abbildung 27: Anhand von AIS-Daten bestimmte Geschwindigkeiten der Serviceschiffe aus der Abbildung 26 und der Abbildung 27. In der überwiegenden Zeit waren die Schiffe nicht in Bewegung.

Im Folgenden soll im Sinne der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (2008) die Energie abgeschätzt werden, die

- (i) von den OWEAs eines Windparks und
- (ii) von den dort operierenden Serviceschiffen

in Form von Schall ins Meer eingetragen wird. Zunächst wird dazu der Quellpegel des Serviceschiffes benötigt. Für die o. g. Serviceschiffe war kein empirischer Quellpegelwert verfügbar, aber den Messarchiven der *itap GmbH* zufolge haben in der Bauart ähnliche Schiffe Quellpegel um $L = 170 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa @ } 1 \text{ m}$ bei Fahrt. Für einzelne OWEAs wird basierend auf Messdaten aus diesem Bericht ein konstanter Wert von $L = 120 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa @ } 100 \text{ m}$ angenommen. Für die Schallausbreitung wird vereinfachend eine Pegelabnahme von $15 \cdot \log_{10}(r_2/r_1)$ basierend auf der geometrischen Ausbreitungsdämpfung im flachen Wasser angenommen, wenn der Abstand zur Schallquelle von r_1 auf r_2 vergrößert wird. Aus diesen Werten können nun Schallleistungs- und Energiewerte überschlägig berechnet werden (Tabelle 11).

Schallquelle	Mittlere Schalleistung	Innerhalb von 50 Tagen ins Meer abgestrahlte Schallenergie
Serviceschiff während der Fahrten im OWP aus Abbildung 25; insgesamt 4 h	119 dB re 1 μ W (= 0,8 W)	114 dB re 1 J (= 0.22 MJ)
87 OWEA	130.4 dB re 1 μ W (= 11 W)	137 dB re 1 J (= 47 MJ)

Tabelle 11: Abschätzung der vom betriebseigenen Serviceschiff und den OWEAs abgestrahlten Schallenergie anhand eines Beispiels in der westlichen Zone 2 der Nordsee mit 87 OWEA mit je 7 MW Nennleistung.

Die Zahlen in Tabelle 11 bedeuten, dass das fahrende Serviceschiff im Beobachtungszeitraum von 52 Tagen etwa 200 Mal weniger (Schall-) Energie ins Wasser eingetragen hat als alle OWEAs dieses Windparks zusammen. Ein Schallpegel an einem bestimmten Ort lässt sich hieraus nicht ohne weiteres bestimmen, da die Schallquelle Serviceschiff ihre Position laufend ändert. Nur in großer Entfernung vom Windpark ist ein Schiff als ortsfeste Quelle zu betrachten, jedoch ist der Schalleintrag und die Weiterleitung im Wasser zumeist über große Entfernungen aufgrund des schlechten Signal-Rausch-Abstandes messtechnisch nicht mehr vom allgemeinen Hintergrundschall zu separieren.

Es sei jedoch an dieser Stelle angemerkt, dass auch von ruhenden Schiffen Geräusche ausgehen können. Zwar entfallen die Schraubengeräusche, außer bei Korrekturen der Position, aber die Schiffsmotoren laufen dauerhaft für die Stromversorgung und strahlen ebenfalls Schall über die Schiffshülle ab. Dieser ist aber, basierend auf eigenen Messungen und Literaturdaten, zumeist deutlich geringer als der Schalleintrag eines fahrenden Schiffes. Unabhängig davon ist aus der Literatur bekannt, dass der Schiffslärm i. d. R. mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls zunimmt (Kapitel 3.2). Eine Besonderheit stellen Schiffe im Dynamic Positioning Mode (DP-Mode) dar, die sich mittels variabler Antriebe auf Position halten können. Hier steigt der Schalleintrag ins Wasser i. d. R. bei ruhenden Schiffen meist mit der vorherrschenden Strömung. Serviceschiffe für Windparks sind größtenteils mit einem DP-Antrieb ausgestattet.

In einem zweiten Schritt wurden für die besagten Windparks alle eindeutig zuordenbaren Schiffe für diese 52 Tage gesucht und versucht, den Anteil der Liegezeiten und des Fahrtbetriebes zu ermitteln; siehe Abbildung 28.

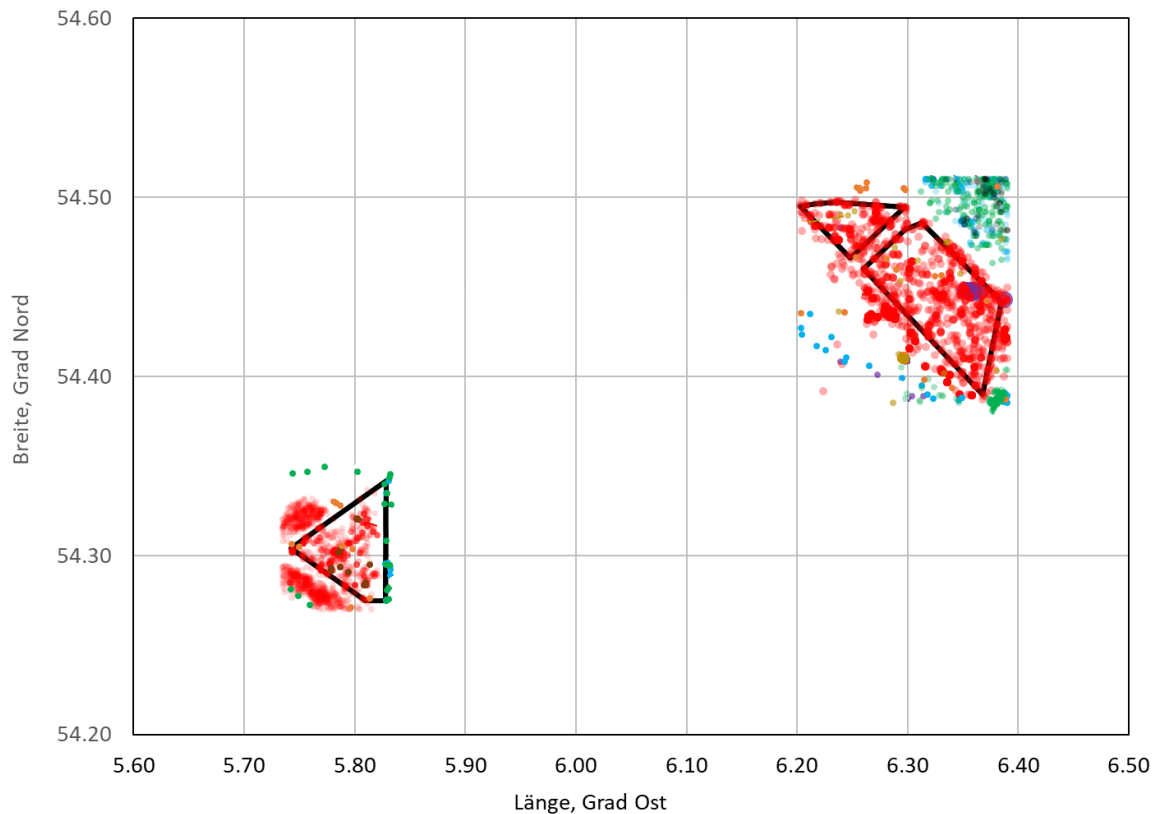


Abbildung 28: *Schiffe im Bereich ausgewählter Offshore-Windparks in der westlichen Zone 2 der Nordsee (unten links und oben rechts) während der Messperiode für Betriebsschall von Juli bis September 2021.*

Es bestätigen sich in Abbildung 28 die Angaben der OWP-Betreiber, dass für unterschiedliche, kurzfristige Einsätze auch tagesweise unterschiedliche, weitere Schiffe in den und um die Windparks in Betrieb gewesen sind. Zudem zeigt sich, dass je nach Windpark und angrenzender Windparks ein Teil der Schiffe ihre Liegezeiten auch außerhalb der Windparkgrenzen ausgeführt haben.

Für den ausgewählten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee grenzen im Osten weitere Windparks an, so dass oftmals Liegeplätze im Nordwesten oder Südwesten außerhalb des Windparks aufgesucht wurden. Die Häufung von Schiffen nordöstlich des ausgewählten Windparks sind einem weiteren, im Betrieb befindlichen Windpark und einer Konverterplattform zuzuordnen.

Es ist somit davon auszugehen, dass bei einer reinen energetischen Betrachtung der breitbandigen Schalleinträge (SPL) ins Wasser die überschlägig betrachtete Differenz von OWEA und Schiff kleiner als 23 dB ist.

6.4.2 Serviceverkehr außerhalb der Windparks

Der Einfluss von betriebsbedingtem Serviceverkehr außerhalb der gesperrten OWP-Flächen auf den allgemeinen (Gesamt-) Schalldruckpegel hängt i. d. R. sehr stark von weiterem Schiffsverkehr ab. In Abbildung 29 ist beispielsweise eine aus AIS-Daten generierte Karte der Schifffahrtsdichte für das gesamte Jahr 2017 (gemittelt) für die östliche Nordsee nördlich der Hochseeinsel Helgoland, bestehend aus drei OWPs innerhalb der Zone 1, zum damaligen Zeitpunkt dargestellt (www.marinetraffic.com). Diese drei Windparks wurden in den Jahren 2013 und 2014 in Betrieb genommen.

Deutlich sichtbar in Abbildung 29 ist die Schifffahrtsroute von der Elbe (Hamburg, Cuxhaven) zunächst nordwestlich und dann Richtung Norden, westlich in einiger Entfernung entlang des Clusters „Nördlich Helgoland“. Dies ist die Fahrtroute aller großen Schiffe, die nicht durch den Nord-Ostsee-Kanal fahren können, um durch das Skagerrak zur Ostsee zu gelangen. Die rote Linie direkt westlich der südlichen Windparks ist vermutlich dem betriebsbedingten Schiffsverkehr des nördlich angrenzenden OWPs zuzuschreiben. Vor Errichtung der drei Offshore-Windparks führte dieser Schifffahrtsweg wahrscheinlich eher östlich durch das heutige Windparkgebiet.

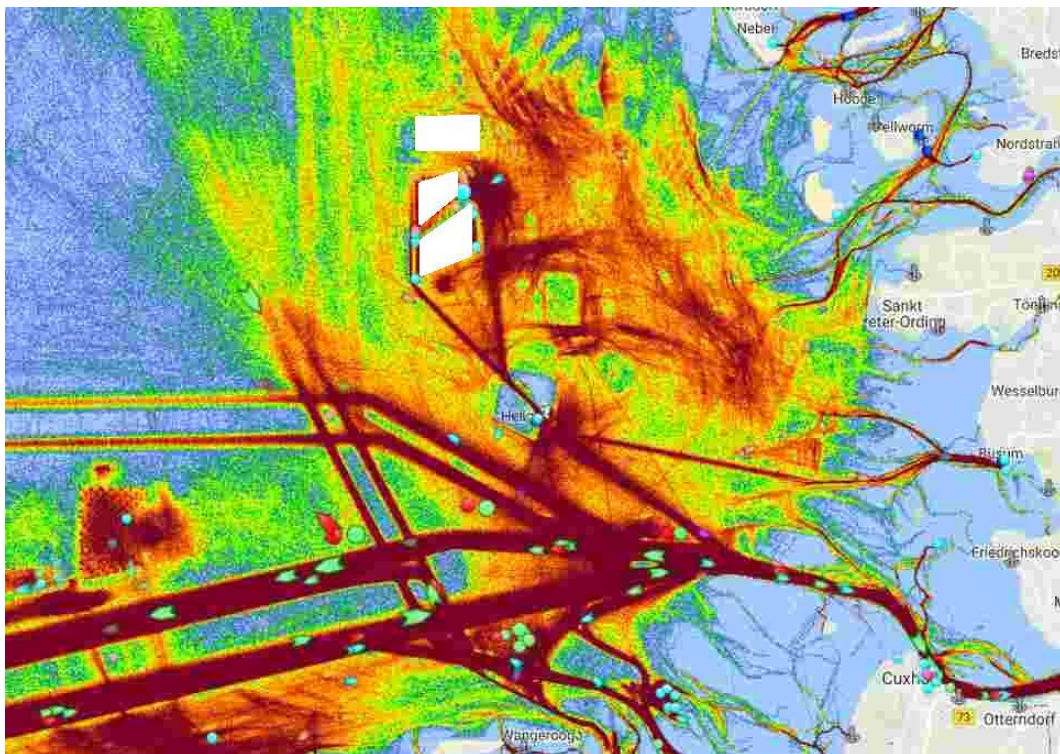


Abbildung 29: Farbcodierte Schifffahrtsdichte aus AIS-Daten für die östliche zentrale AWZ der Nordsee. Nördlich der Hochseeinsel Helgoland befanden sich im Jahr 2017 drei Windparks in Betrieb, die weiß markiert sind (Quelle www.marine-traffic.com, 03.12.2017).

Die hohe Schiffsdichte östlich des Clusters „Nördlich Helgoland“ ist vermutlich auf den betriebsbedingten Schiffsverkehr der drei OWPs und den dort betriebenen zwei Konverterplattformen zurückzuführen. Jedoch ist auch eine hohe Schiffsverkehrsdichte östlich und nordöstlich vom nördlichen Windpark zu erkennen, die eindeutig nicht auf Versorgungsschiffe der Windparks und Konverterplattformen zurückzuführen sind.

Das scheinbare Ausdünnen der Schifffahrtsdichte westlich und nördlich des Clusters „Nördlich Helgoland“ liegt an der begrenzten Reichweite der AIS-Funktelegramme. Die nächstgelegene AIS-Empfangsstation des Messnetzes von marine-traffic.com liegt in der Nähe von St. Peter Ording, ca. 84 km entfernt vom nordwestlichen AIS-Transponder des nördlichen, gekennzeichneten Windparks

. Die maximale Abdeckung des AIS-Empfängers beträgt ca. 78 km, wobei die Reichweite stark wetterabhängig ist. Daher befinden sich Schiffe westlich dieses Windparks teilweise außerhalb der Reichweite des AIS. Die AIS-Empfangsstation in Cuxhaven ist ebenfalls in zu großer Entfernung, um Schiffsbewegungen westlich und nordwestlich der drei OWPs ausreichend zu registrieren.

Eine weitere AIS-Empfangsstation befindet sich auf Sylt, deren Reichweite die drei Windparks ebenfalls nicht abdeckt. Somit erscheint der Eindruck, dass sich die Schiffsverkehrsdichte westlich der drei Windparks deutlich reduziert, jedoch etwas weiter nördlich auf Höhe von Sylt deutlich erhöht. Diese scheinbaren Schwankungen in der Verkehrsdichte sind dem nicht komplett flächendeckenden AIS-Empfangsnetz geschuldet.

Das Zusammenführen der AIS-Daten von marine-traffic.com mit den aus Dänemark verfügbaren Datensätzen der Danish Maritime Authority (www.dma.dk) ist in Abbildung 30 dargestellt und bestätigt diese Annahme.

Es sind aus Abbildung 30 eindeutig auch die Konturen weiterer, deutscher Windparks in der östlichen Zone 1 und 2 der Nordsee westlich von der Insel Sylt zu erkennen. Dabei trägt die rötliche Färbung der Zufahrtswege zu den Windparks und die Fahrten innerhalb der Windparks, da die Schiffsdichte über ein komplettes Jahr gemittelt dargestellt ist. Eine tägliche oder wöchentliche Schiffsbewegung zu den Gebieten wird ebenfalls als durchgezogene Linie dargestellt.

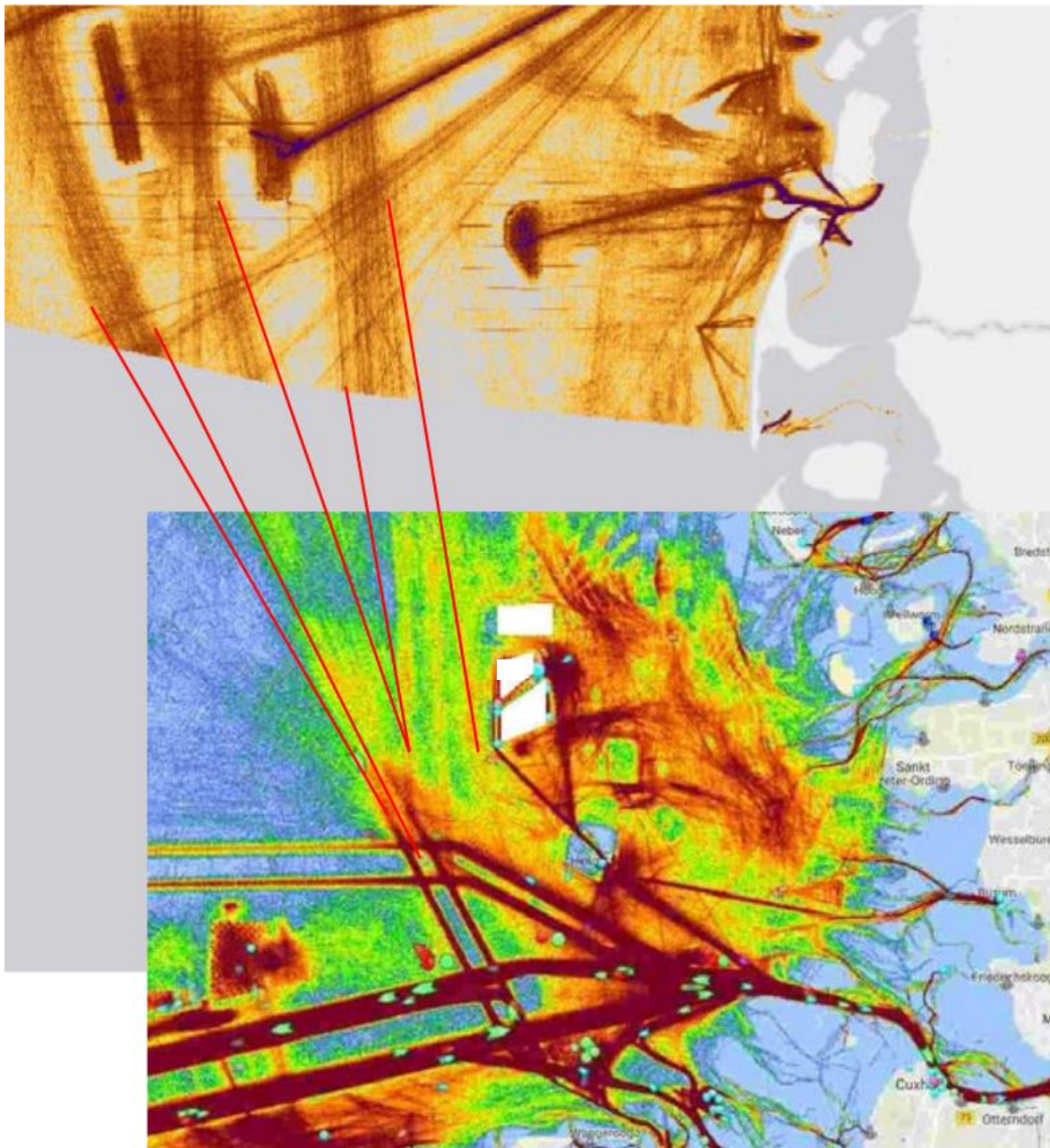


Abbildung 30: Überlagerung der AIS-Karten von www.marine-traffic.com mit den aus Dänemark verfügbaren AIS-Daten der Danish Maritime Authority (www.dma.dk). Die Schifffahrtsrouten wurden westlich der Windparks graphisch interpoliert.

7. Diskussion

7.1 Mögliche Einflussfaktoren auf den Betriebsschall

Im Rahmen dieser Studie wurden erstmalig 27 verfügbare Betriebsschallmessungen aus 24 deutschen Offshore Windparks aus der Nord- und Ostsee in einer projektübergreifenden Studie zusammengefasst. Die Datengrundlage basiert auf dem nationalen Schallregister MarinEARS für Dauerschall und umfasst:

- 16 verschiedene OWEA-Typen von sieben verschiedenen Herstellern,
- Nennleistungen zwischen 2,3 und 8,0 MW,
- gegründet auf fünf unterschiedlichen Fundamentstrukturen (Monopfähle, Tripods, Tripiles, Jackets mit geramten Pfählen und Suction Bucket Jackets) mit Pfahldurchmessern zwischen 2,42 und 8,1 m,
- in zwei Windparks wurden jeweils Anlagen desselben Typs auf zwei unterschiedliche Fundamentstrukturen gegründet,
- Wassertiefen zwischen 20 und 40 m,
- simultane Unterwasserschallmessungen an mindestens drei Messpositionen pro Windpark in Entfernungen zwischen 100 m von einer ausgewählten Anlage bis 5 km Abstand zum OWP und
- in drei definierten Betriebszuständen der Anlagen (OWEA im Stillstand, Nennleistung und $\leq 90\%$ Leistung der Anlagen),
- 12 Hintergrundschallmessungen vor dem Bau von ausgesuchten Windparks,
- sämtliche prozessierten Messdatensätze sind in standardisierter Form vorhanden und mit wesentlichen Begleitinformationen, wie den Leistungsdaten der jeweiligen, ausgesuchten Windenergieanlagen, Wetterdaten und teilweise auch Schiffsbewegungen innerhalb und außerhalb der Windparks, hinterlegt.

Basierend auf dieser großen Datengrundlage wurde in Kapitel 6.1 mittels einer projektübergreifenden Analyse der vorhandenen Daten versucht, mögliche projekt- und standortspezifische Einflussfaktoren zu identifizieren und zu quantifizieren. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Variationen der o. g. Parameter, wie z. B. die Kombination einer definierten Fundamentstruktur mit einer ausgewählten Windenergieanlage und der gegebenen Wassertiefe, sich

als so groß herausgestellt hat, dass zwar mögliche Einflussparameter identifiziert werden konnten, aber aufgrund der geringen Samplegröße verschiedenster Parameterkombinationen eine valide Quantifizierung dieser Einflussparameter nicht ohne weiteres möglich ist.

Zudem stellte sich heraus, dass lediglich die Unterwasserschallmessungen in einem Abstand von wenigen hundert Metern zu einer ausgewählten Anlage innerhalb des Windparks für die Identifikation möglicher Einflussparameter auf Betriebsschall herangezogen werden können, da ansonsten eine Vermischung des von den Windenergieanlagen verursachten Unterwasserschalls mit dem permanenten Hintergrundschall vorlag.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Studie mit bereits bekannten Studien aus der Literatur verglichen und diskutiert.

7.1.1 Fundamenttyp und Nennleistung

Der von in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen auf See ins Wasser abgestrahlte Schall ist geprägt von einer tonalen, pegelbestimmenden Komponente (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz), die sich im Frequenzbereich < 160 Hz befindet und deren Amplitude stark variieren kann.

Tendenziell ergeben sich Hinweise darauf, dass die Schallabstrahlung im Mittel über Monopfahlgründungen potentiell etwas leiser sein kann als über andere Fundamentstrukturen (Kapitel 6.1.3). Diese Annahme wird auch durch die beiden Windparks unterstützt, in denen derselbe Anlagentyp auf geramtem Monopfahl und Suction Bucket Jacket gegründet wurde. Die beiden Anlagen auf geramten Monopfählen waren 2 bzw. 4 dB leiser als die Anlagen desselben Typs und derselben Nennleistung auf den Suction Bucket Jackets. Vergleicht man die Betriebszustände „Anlagen mit Nennleistung“ zu „Anlagen im Stillstand“, steigt der Schalldruckpegel um 0 bis 3 dB bei drei der vier gemessenen Anlagen. In einem Fall war der Schalldruckpegel bei ausgeschalteten Anlagen 2 dB lauter.

Jedoch ist bei der teilweise geringen Datenlage aus Anlagentyp und Fundamentstrukturen, die keine Monopfähle sind, und der allgemeinen Messunsicherheit bei Unterwasserschallmessungen dieser Sachverhalt mit weiteren Vergleichsmessungen weitergehend zu validieren. Zudem unterscheiden sich auch die Pfahldurchmesser und Einbindungstiefen der Gründungspfähle erheblich, so dass weder eine statistisch valide Quantifizierung der unterschiedlichen Fundamentstrukturen noch der Pfahldurchmesser auf der vorliegenden Datengrundlage möglich ist.

Ein direkter Vergleich unter gleichen Randbedingungen hinsichtlich Wetter und Hintergrundschall zwischen einer Windenergieanlage in Betrieb mit Nennleistung und einer abgeschalteten bei selber Windklasse, wie es bei Betriebsschallmessungen onshore nach FGW-Richtlinie der Fall ist, wurde bisher nicht durchgeführt. Der technische, administrative und finanzielle Aufwand für eine derartige Abschaltung des Windparks oder zumindest eine Teilabschaltung während der Windklasse „hoch“ (OWEA unter Nennleistung) war bisher zu hoch. Somit bleibt lediglich der Vergleich zwischen den beiden Windklassen „niedrig“ (OWEA zumeist in Stillstand) und „hoch“ (OWEA unter Nennleistung). Dieser Vergleich ist jedoch mit einigen Unsicherheiten behaftet, da sich der Hintergrundschall aufgrund der deutlich unterschiedlichen Windverhältnisse in den gewählten Windklassen „niedrig“ (bis 3,5 m/s) und „hoch“ (ab 11 m/s) unterscheidet. I. d. R. ist mit wenig abiotischen Schalleinträgen durch z. B. Wind und Wellenschlag in der Windklasse „niedrig“ zu rechnen; dafür sind oft sehr viele Schiffe in und um die Windparks in Betrieb, so dass der anthropogene Schalleintrag durch Schiffe den Hintergrundschallpegel häufig eindeutig dominiert. In der Windklasse „hoch“ können sich i. d. R. nur noch größere Frachtschiffe auf den Verkehrstrennungsgebieten bewegen. Der Schiffsverkehr mit kleinen Schiffen sowie der betriebsbedingte Serviceverkehr ist größtenteils aufgrund der Wetterbedingungen ausgesetzt. Dafür ist mit vermehrtem, abiotischen Schalleintrag durch Wind und Wellenschlag auszugehen. So ist z. B. auch keine Quantifizierung möglich, ob und in welcher Form ggfs. der abiotische Schalleintrag durch Wellenschlag an den Gründungsstrukturen Einfluss auf den gemessenen Gesamtschallpegel in einem Windpark hat. Es wurde kein statistisch valider Zusammenhang zwischen der vorherrschenden Wassertiefe (20 bis 40 m) bzw. der Nennleistung der Anlage und dem Schalleintrag ins Wasser gefunden. Tendenziell zeigt sich zudem, dass mit zunehmender Nennleistung, neuerer Anlagentypen und einer getriebelosen Umsetzung der Anlagen der Schalleintrag ggfs. geringfügig abnehmen könnte. Die betrachtete Abnahme im Schalldruckpegel einer in Betrieb befindlichen Windenergieanlage mit zunehmender Wassertiefe könnte durch die Art der Windenergieanlagen (mit Getriebe oder getriebelos) und der Nennleistung sowie der Generation von Anlagen beeinflusst sein.

In einer Studie von Holme et al. (2023) wurde eine Teilstichprobe der Messungen dieser Studie (nur drei Windparks aus der nordwestlichen Zone 2 der Nordsee) in Abständen zwischen 63 m von ausgesuchten Windenergieanlagen bis 5.000 m vom jeweiligen Windpark verwendet, um den Einfluss von Anlagengröße bzw. Nennleistung (Siemens SWT 6.0-154 6,3 MW und Vestas V 164-8.0 8,5 MW), Windgeschwindigkeit und Gründungsart (gerammter Monopfahl und Suc-

tion Bucket Jacket) auf Betriebsgeräusche zu untersuchen. Holme et al. (2023) fanden ebenfalls keinen statistisch validen Zusammenhang zwischen dem gemessenen Breitband-Schalldruckpegel und der Nennleistung oder dem Fundamenttyp für die Unterwasserschallmessdaten innerhalb und außerhalb des Windparks.

Basierend auf den wenigen, verfügbaren Unterwasserschallstudien in Betrieb befindlicher Windenergieanlagen haben z. B. Tougaard et al. (2020) und Stöber & Thomsen (2021) versucht, das aktuelle Wissen zu erweitern und mögliche Einflussparameter zu identifizieren, um eine Abschätzung für größer werdende Windkraftanlagen modellieren zu können. Tougaard et al. (2020) verwendeten ein allgemeines, lineares Modell, während Stöber & Thomsen (2021) lineare Regressionen verwendeten, um Korrelationen zwischen gemessenem Schalldruckpegel, Messabstand, Nennleistung und Windgeschwindigkeit zu bewerten. Beide Studien verwendeten größtenteils Daten kleinerer und älterer OWEAs bis zu 6 MW mit Getrieben, die in unterschiedlichen Abständen zur Anlage und bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten erhoben wurden. Zudem basieren die Messdaten aus unterschiedlichen Mess- und Auswertungskonzepten, so dass eine direkte Vergleichbarkeit der Daten nur bedingt möglich war. Diese Studien gehen davon aus, dass sich die Schalleinträge der in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen mit der jeweiligen Nennleistung deutlich erhöhen werden, was im Gegensatz zu dieser Studie steht. Sowohl der Breitbandpegel als auch die pegelbestimmende, tonale und tieffrequente Komponente von Anlagen (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz) haben in dieser Studie abnehmende Schalldruckpegel gezeigt.

Hintergrund sind vermutlich die konstruktive Änderung hin zu getriebelosen und moderneren Anlagen und ggfs. auch die immer größer und damit schwerer werdenden Anlagen inkl. Fundamentstrukturen, so dass durch die größeren Massen weniger Schwingungen entstehen und weitergeleitet werden. Zudem haben die Anlagenentwickler mittlerweile Erfahrungen aus mindestens einem Jahrzehnt gesammelt, die eine Weiterentwicklung größerer, effizienterer und wartungsärmerer Anlagen nachhaltig unterstützen. I. d. R. ist es ein Ziel jedes Anlagenherstellers, die (Struktur-) Schwingungen bzw. Lastwechsel der Anlage bzw. der Kopplung Rotor-Antriebssystem und Übertragung auf den Turm zu minimieren, um den Verschleiß so gering wie möglich zu halten. So werden derzeit auch von einigen Anlagenherstellern Regelungstechniken entwickelt, um durch Drehzahlfenster bestimmte Drehzahlen und Frequenzen im Bereich der Eigenfrequenz der Anlage bzw. des Turms auszusparen.

Im Gegensatz zu Abbildung 22 sind in Abbildung 31 auch die Differenzen der Schalldruckpegel $L_{05 \text{ \& } 90}$ zwischen den Betriebszuständen „Anlagen im Betrieb mit Nennleistung“ (Windklasse

„hoch“) und „Anlagen im Stillstand“ (Windklasse „niedrig“) aller Betriebsschallmessungen dargestellt. Dabei wurden die Messdaten nach Nennleistung der Anlagen in aufsteigender Reihenfolge geordnet.

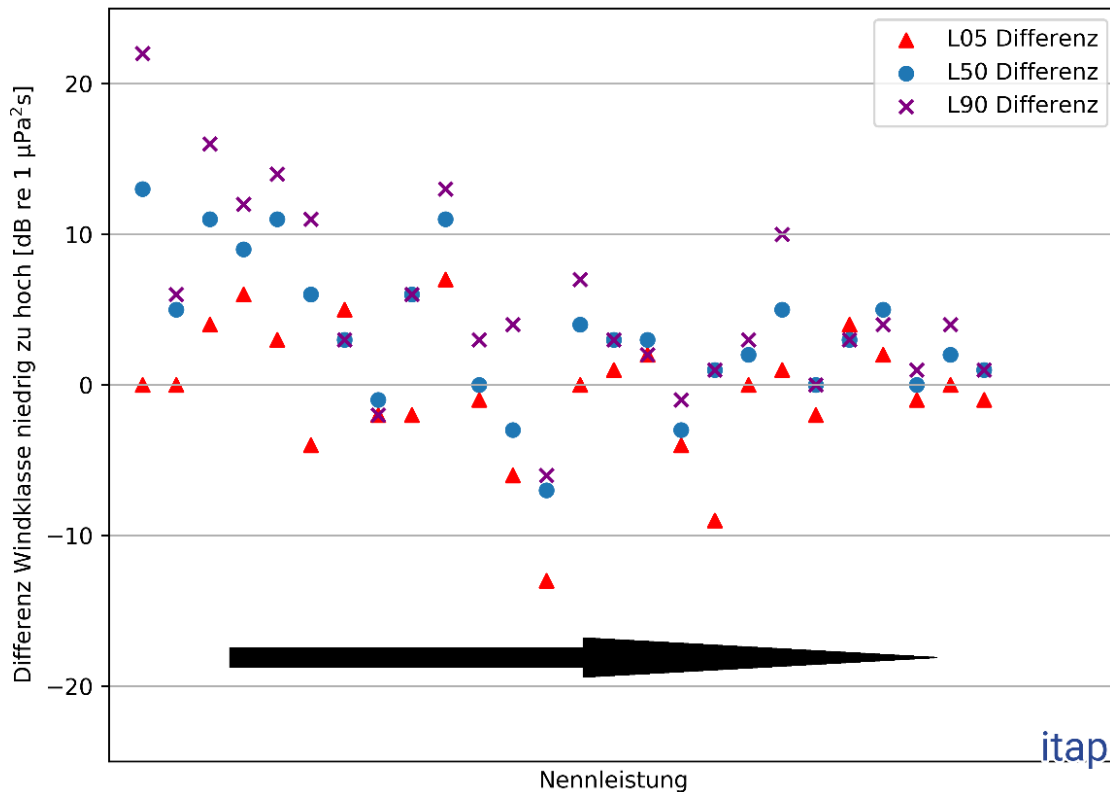


Abbildung 31: Darstellung der Differenzen der Schalldruckpegel ($L_{05, 50, 90}$) zwischen den Betriebszuständen „Anlagen im Betrieb mit Nennleistung“ (Windklasse „hoch“) und „Anlagen im Stillstand“ (Windklasse „niedrig“) für alle Betriebsschallmessungen. Die Messdaten wurden mit ansteigender Nennleistung der Anlagen in aufsteigender Reihenfolge sortiert.

Eine dargestellte Differenz > 0 dB in Abbildung 31 bedeutet eine Zunahme der Pegel unter Nennleistung (Windklasse „hoch“) gegenüber Stillstand der Anlage (Windklasse „niedrig“). Auffällig sind die mit steigender Nennleistung der Anlagen kleiner werdenden Differenzen für alle dargestellten Pegelwerte ($L_{05, 50, 90}$). Es zeigt sich aus Abbildung 31 ebenfalls, dass bei einigen Betriebsschallmessungen die Schalldruckpegel im Betriebszustand „Anlagen sind im Stillstand“ höher ausfallen als im Zustand „Anlagen in Betrieb mit Nennleistung“ (negativen Differenzen). Dieser Umstand ist vermutlich auf deutlich höhere Schiffsaktivitäten in und um den Windpark in der Windklasse „niedrig“ zurückzuführen.

Bei Holme et al. (2023) wurde gezeigt, dass die Modellierung der von OWEAs abgestrahlten Schalleinträge ins Wasser basierend auf Interpolationen von identifizierten und quantifizierten Einflussparametern auf Betriebsschall aus Tougaard et al. (2020) den gemessenen Schalleintrag ins Wasser von den drei bestehenden OWPs aus der nordwestlichen Zone 1 der Nordsee mit Anlagen der neueren Generation und Nennleistungen bis 6 MW breitbandig um bis zu 8 dB überschätzen.

Eine Validierung der aus Studien von Tougaard et al. (2020) und Stöber & Thomsen (2021) abgeleiteten Einflussparameter für eine weitergehende Modellierung von bestehenden und zukünftigen Windparks konnte weder durch diese Studie noch durch die Studie von Holmes et al. (2023) erfolgen.

In diesem Bericht wurden nur Windparks in den ersten Jahren des Betriebs messtechnisch untersucht. Erfahrungen mit Windparks an Land zeigen aber, dass sich der abgestrahlte Schall einer in Betrieb befindlichen Windenergieanlage über längere Zeiträume ändern kann. Hintergrund sind vermutlich Verschleißerscheinungen, insbesondere in der Übersetzung des Getriebes vom Rotor zum Generator. Ob derartige Verschleißerscheinungen auch bei Direktantrieben (getriebelosen Anlagen) auftreten und welchen Einfluss dies auf den ins Wasser abgestrahlten Unterwasserschall haben kann, ist derzeit weder aus den vorliegenden Daten noch aus Literaturstudien quantitativ oder qualitativ zu benennen.

7.1.2 Betriebsschall außerhalb des Windparks

Diese Studie zeigt, dass die tonalen und tieffrequenten Schalleinträge der in Betrieb befindlichen Anlagen mit dem Abstand zur Quelle erwartungsgemäß in der Amplitude abnehmen. Während diese tonalen Komponenten noch in ca. 100 m Entfernung zur Anlage pegelbestimmend sein können, erfolgt bereits in Windparkmitte und um den Windpark in Entfernungen bis 1 km eine vollständige Vermischung mit dem permanent vorhandenen Hintergrundschall, d. h. der Signal-Rausch-Abstand zwischen den tonalen Komponenten und dem Hintergrundschall beträgt < 10 dB (zumeist sogar < 6 dB). In einer Messentfernung von 5 km sind die tonalen Komponenten zumeist nicht mehr eindeutig messtechnisch erfassbar, je nach vorherrschendem Hintergrundschall.

Holme et al. (2023) fanden ebenfalls heraus, dass der Schalleintrag von Windenergieanlagen in Entfernungen von 1 km und mehr von der Windparkgrenze keinen signifikanten Einfluss auf den breitbandigen Schalldruckpegel haben. Der Schalldruckpegel innerhalb und außerhalb der

betrachteten drei Windparks dieser Studie variierten ohne Einfluss der Anlagen (Windklasse „niedrig“, d. h. Anlagen sind im Stillstand) um bis zu 5 dB, was ein Hinweis darauf ist, dass der Einfluss der Schiffsaktivitäten die Umgebungsgeräusche innerhalb, aber auch außerhalb der Windparks deutlich dominiert. Beim Betrieb von den Windenergieanlagen in diesen drei Windparks zeigt der breitbandige Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Entfernung teilweise einen steigenden, fallenden oder konstanten Breitbandpegel. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Ergebnissen dieser Studie, dass der Hintergrundschall außerhalb der Windparks größtenteils von anderen Schallquellen dominiert wird, höchstwahrscheinlich von Schiffslärm. Somit kann es je nach Schiffsverkehrsdichte um den Windpark zu einem steigenden, konstanten oder abnehmenden Breitbandpegel bzw. Hintergrundschallpegel kommen; siehe Abbildung 30.

7.1.3 Betriebsbedingter Serviceverkehr

Für diese Studie wurden Zeiträume, in denen sich Schiffe in der Nähe der Messpositionen befanden (< 1 km) aus der Auswertung ausgeschlossen, um unerwünschte Effekte durch Schiffslärm zu vermeiden. In der Studie von Holme et al. (2023) wird über den Befund berichtet, dass ein kreuzendes Schiff nahe einer Messposition einen schnellen Anstieg des gemessenen, breitbandigen Schalldruckpegels und einen schnellen Abfall über mehrere Minuten aufweist. Dies wurde auch bereits in mehreren anderen Studien zu Schiffslärm dokumentiert, insbesondere in Seegebieten, in denen die Schiffsverkehrsdichte sehr gering ist (z. B. Bellmann et al., 2017).

Im Umweltbericht des Flächenentwicklungsplans 2023 (BSH, 2023) wurden anhand von AIS-Aufzeichnungen in 19 ausgewählten Bereichen der deutschen AWZ der Nordsee der Schiffsverkehr in und um bestehende sowie geplante Windparks anhand von Verkehrsdichten untersucht. Dafür wurden AIS-Aufzeichnungen aus Juni und Dezember 2019 hinsichtlich der allgemeinen Schiffsdichte und im speziellen der Anteile von Serviceverkehr für Windparks untersucht. Es zeigte sich, dass der gemittelte, nicht-OWP-relevante Schiffsverkehr 70% im Sommer und 80% im Winter am gesamten Schiffsverkehr in den betrachteten Bereichen der Nordsee ausmacht (BSH, 2023). Für einzelne Teilbereiche kann es z. T. zu erheblichen Schwankungen hinsichtlich der o. g., gemittelten Werte kommen. Grundsätzlich zeigt sich, je höher der nicht-OWP-relevante Schiffsverkehr, desto geringer fällt der Serviceverkehr ins Gewicht. Der Anteil des OWP-Serviceverkehrs in und um die bestehenden Windparks ist hinsichtlich der

Anzahl der Schiffsbewegungen (Verkehrsdichte) relevant, jedoch in allen anderen Fällen, wie z. B. in VTG, überwiegt der nicht-OWP-relevante Schiffsverkehr. Es zeigte sich zudem, dass die Gesamtanzahl des Serviceverkehrs pro Windpark oder Konverterplattform im Gegensatz zum z. B. Bau des Windparks vergleichsweise klein ist und zumeist kleinere Serviceschiffe in und um die Windparks eingesetzt werden. Zudem ergibt sich auch ein starker, saisonaler Effekt; im Sommer sind deutlich mehr Bewegungen der Serviceschiffe zu messen als im Winter. Dies deckt sich mit den Aussagen dieser Studie (Kapitel 6.4), dass der OWP-relevante Serviceverkehr zumeist auf gutes Wetter und auf den Tageszeitraum fokussiert ist. In der Studie des BSH wird zudem auch der Trend anhand von AIS-Auswertungen dokumentiert, dass küstennahe OWPs zumeist auf tägliche Fahrten vom Basishafen zum OWP ausgelegt sind, weiter von der Küste entfernte OWPs eher auf Wohneinheiten in und um die Windparks setzen, so dass der Serviceverkehr zu Küsten als sehr gering einzuschätzen ist. Zudem nehmen die Serviceschiffe eine feste Route zwischen den OWPs und den Basishäfen. Diese Aussagen werden durch die in Kapitel 6.4 aufgeführten Detailuntersuchungen von zwei Windparks bestätigt (Kapitel 6.4). Eine Quantifizierung des Einflusses vom Serviceverkehr auf den Gesamtschall in und um die Windparks kann auf der Basis von (gemittelten) Schiffsdichten nicht erfolgen. Dafür müsste der Schalleintrag jedes Schiffstyps, basierend auf dessen Größe und Fahrtgeschwindigkeit, modelliert werden, um in einem zweiten Schritt die Schallanteile des nicht-OWP-relevanten und des OWP-Serviceverkehrs separieren zu können. Der OWP-relevante Serviceverkehr besteht aus vergleichsweise kleineren Schiffe und fährt in den Windparks mit gedrosselten Geschwindigkeiten (< 8 kn). Zudem befinden sich diese Serviceschiffe in der überwiegenden Zeit im und um die Windparks auf Reede, wie bereits in Kapitel 6.4 dargestellt. Somit ist zunächst von einem eher geringen Beitrag am Gesamtschall seitens des OWP-relevanten Serviceverkehrs auszugehen.

In Kapitel 6.3 wurde ein erster, überschlägiger Versuch unternommen, den theoretischen Einfluss des OWP-relevanten Serviceverkehrs innerhalb der Windparks zu quantifizieren. Es zeigte sich, dass der Schalleintrag des Serviceverkehrs erheblich geringer ist als der durch die in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen. Zudem verteilt sich der OWP-relevante Serviceverkehr auf eine sehr große Fläche. Somit sind durchaus zeitlich und räumlich begrenzte Bereiche identifizierbar, in denen der Serviceverkehr den Hintergrundschallpegel dominieren könnte, von einer großräumigen und dauerhaften Verlärmung ist aber eher nicht auszugehen.

Aus den o. g. Gründen ist zu erwarten, dass der Anteil der OWP-relevanten Serviceschiffe am Gesamtschall zumindest in der Nähe von Verkehrstrennungsgebieten gering bis vernachlässigbar ist.

7.2 Hintergrundschall

Aufgrund der geringen Messerfahrungen mit der Erfassung des permanenten Hintergrundschalls wurden in der Anfangszeit Hintergrundschallmessungen im Vorhabengebiet bis zu zwei Jahre vor Baustart durchgeführt. Diese Messungen weisen häufig aufgrund von Änderungen der äußeren Rahmenbedingungen erhebliche Unterschiede zur späteren Betriebsschallmessung auf, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich bzw. nicht trivial ist. Beispielsweise wurden teilweise Hintergrundschallmessungen im oder um den geplanten Windpark vor der Sperrung des Gebiets für den nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr durchgeführt. Dies führte in vereinzelt Fällen dazu, dass der Hintergrundpegel (Windenergieanlagen sind im Stillstand) der Betriebsschallmessungen wenige Jahre später in diesem Gebiet deutlich leiser waren als die zuvor aus den Hintergrundschallmessungen erhobenen Pegelwerte. Zudem wurden zum Teil die Hintergrund- und Betriebsschallmessungen zwar im selben Seegebiet, aber nicht an identischen bzw. vergleichbaren Messpositionen durchgeführt. Dies führte teilweise dazu, dass der Einfluss von nicht OWP-relevantem Schiffslärm von z. B. nahegelegenen Verkehrstrennungsgebieten im Umfeld der Messposition einen erheblichen Unterschied aufwies.

Hinzukommend lag bei vergangenen Messungen der Fokus zunächst nur auf dem direkten Schalleintrag der Windenergieanlagen, so dass der Einfluss von z. B. Schiffslärm oft nicht berücksichtigt wurde und dies z. T. zu schlechten Vergleichbarkeiten der unterschiedlichen Messungen führt.

Eine weitere Schwierigkeit bei frühen Hintergrundschallmessungen ist in der Tatsache begründet, dass bereits weitere Windparks in der unmittelbaren Nachbarschaft in Betrieb waren und somit der Einfluss dieser benachbarten Anlagen als Hintergrundschall für das neue Vorhaben gewertet werden musste. Durch die isolierte Betrachtung jedes einzelnen Bauvorhabens hatte man somit keinerlei Angaben, ob und wenn ja welche ggfs. ungewöhnlichen Schalleinträge aus den benachbarten Windparks während der Messungen vorhanden waren, z. B. durch Reparaturarbeiten, kurzzeitige Kampagnen mit erhöhtem OWP-relevantem Schiffseinsatz oder ggfs. auch Teilabschaltungen einzelner Windenergieanlagen.

Alle diese Erfahrungen haben dazu geführt, dass Hintergrund- und Betriebsschallmessungen in den Folgejahren häufig als Cluster-Untersuchungen durchgeführt wurden. Dies konnten beispielsweise Kombinationen aus zeitgleichen Betriebsschallmessungen im Windpark A und Hintergrundschallmessungen im Windpark B sein, aber auch die Kombination aus Betriebsschallmessungen in mehreren, benachbarten Windparks. Vorteil derartiger Cluster-Untersuchungen ist, dass die Betriebszustände während der Messungen aller benachbarten Windparks für die Auswertung und die Evaluation der Unterwasserschallmessungen vorlagen.

Zudem wurden mit dem Bau eines Windparks in der nordwestlichen Zone 1 der Nordsee im Jahr 2016 die Durchführung von Hintergrundschallmessungen dahingehend optimiert, dass die Messungen erst maximal 2 Wochen vor Baustart bis ca. 4 Wochen nach Baustart durchgeführt wurden. Diese Vorgehensweise hat zwei Vorteile:

- (i) das Vorhabengebiet ist bereits für den nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr gesperrt und
- (ii) es kann zusätzlich eine Evaluation der Schalleinträge, der vor und direkt bei Baustart eingesetzten Bauschiffe erfolgen.

Es zeigt sich aus dieser Analyse, dass die Schiffsdichte und auch der gemessene Hintergrundschall innerhalb des Windparks aufgrund der Bautätigkeiten innerhalb des Baufeldes teilweise erheblich zunahm, wie auch dem Umweltbericht des Flächenentwicklungsplans 2023 (BSH, 2023) zu entnehmen ist.

Ebenfalls wurde das Messkonzept dahingehend optimiert, dass möglichst identische bzw. vergleichbare Messpositionen für die Hintergrund- und Betriebsschallmessungen zu verwenden sind. Dies wird nach Möglichkeit durch die Nutzung von festen POD-Stationen für das Langzeitmonitoring in und um die Vorhabengebiete gewährleistet.

Ein weiterer Aspekt ist, dass gerade für Seegebiete in der Nähe von größeren Verkehrstrennungsgebieten möglichst kurze, zeitliche Abstände zwischen den Hintergrund- und Betriebsschallmessungen liegen sollten, da sich auf diesen Verkehrswegen die Schiffsdichte dynamisch aufgrund der konjunkturellen Wirtschaftslage stark verändern kann, so dass ein belastbarer Vergleich ggfs. nur noch eingeschränkt möglich ist. Dies trifft häufig im Besonderen auf Messposition(en) außerhalb des (geplanten) Windparks zu.

Die Änderungen in der Durchführung der Hintergrundschallmessungen mit einem Messzeitraum kurz vor Baustart im abgesperrten Windpark, an vergleichbaren Messpositionen und über einen Zeitraum von mindestens sechs Wochen haben sich in den letzten Jahren bewährt.

7.3 Biologische Effekte von Betriebsschall

Das Risiko einer Tötung oder Verletzung durch temporäre oder permanente Hörschwellenverschiebungen (engl. temporal and permanent threshold shifts, TTS and PTS) von marinen Säugetieren (Southall et al., 2019) durch Unterwasserschalleinträge von in Betrieb befindlichen OWEAs sind basierend auf den Ergebnissen dieser Studie und auch Literaturdaten (z. B. BSH, 2023; Tougaard et al., 2020; Stöber & Thomsen, 2021) auszuschließen.

Das BMU-Schallschutzkonzept (2013) weist auf eine mögliche Meide- oder Störwirkung bei Schweinswalen bis zu einem breitbandigen Gesamtschallpegel von impulshaltigen Schalleinträgen, wie z. B. Rammschall, von ca. 140 dB hin. Dieser Wert wurde durch empirische Unterwasserschallmessdaten in Verbindung mit Messungen der Schweinswalaktivitäten ermittelt und durch weitergehende Studien in den Folgejahren bestätigt bzw. etwas höhere Pegelwerte ermittelt (Brandt et al., 2016; Rose et al., 2019). Selbst innerhalb der betrachteten Windparks in einer Entfernung von 100 m von einzelnen OWEAs wurden lediglich Schalldruckpegel von bis zu 130 dB ermittelt. Zudem waren die Schalleinträge durch in Betrieb befindliche Windenergieanlagen sehr tieffrequent (< 160 Hz). Die von der TG Noise vorgeschlagenen Schwellenwerte („LOBE“) für bestimmte Spezies und Gewässer befinden sich hinsichtlich der anzusetzenden Pegelwerte für Dauerschall noch im Aufbau und in der nationalen und regionalen Abstimmung, so dass ein weiterer Vergleich mit Schwellen- oder Lärmschutzwerten an dieser Stelle noch nicht erfolgen kann.

Abbildung 32 zeigt beispielhaft gemessene 1/3-Oktavspektren in einer Entfernung von drei ausgewählten Windenergieanlagen im Betrieb (Anlagen mit Nennleistung von 6,0 bzw. 6,15 MW von zwei verschiedenen Herstellern mit und ohne Getriebe; aus der nordwestlichen Zone der Nordsee bei ca. 30 m Wassertiefe; *OWP Nordsee One, Gode Wind 01 und 02*) im Vergleich zu gemessenen (Ruhe-) Hörschwellen von verschiedenen Schweinswalindividuen (Kastelein et al., 2010 & 2017). Die Windparks befinden sich im Gebiet N2 und N3 der Nordsee bei Wassertiefen zwischen 25 und 35 m. Nördlich und südlich von den Windparks befinden sich die VTGs GBWA und Terschelling. Somit ist die Vorbelastung durch nicht OWP-relevanten Schiffslärm relativ hoch.

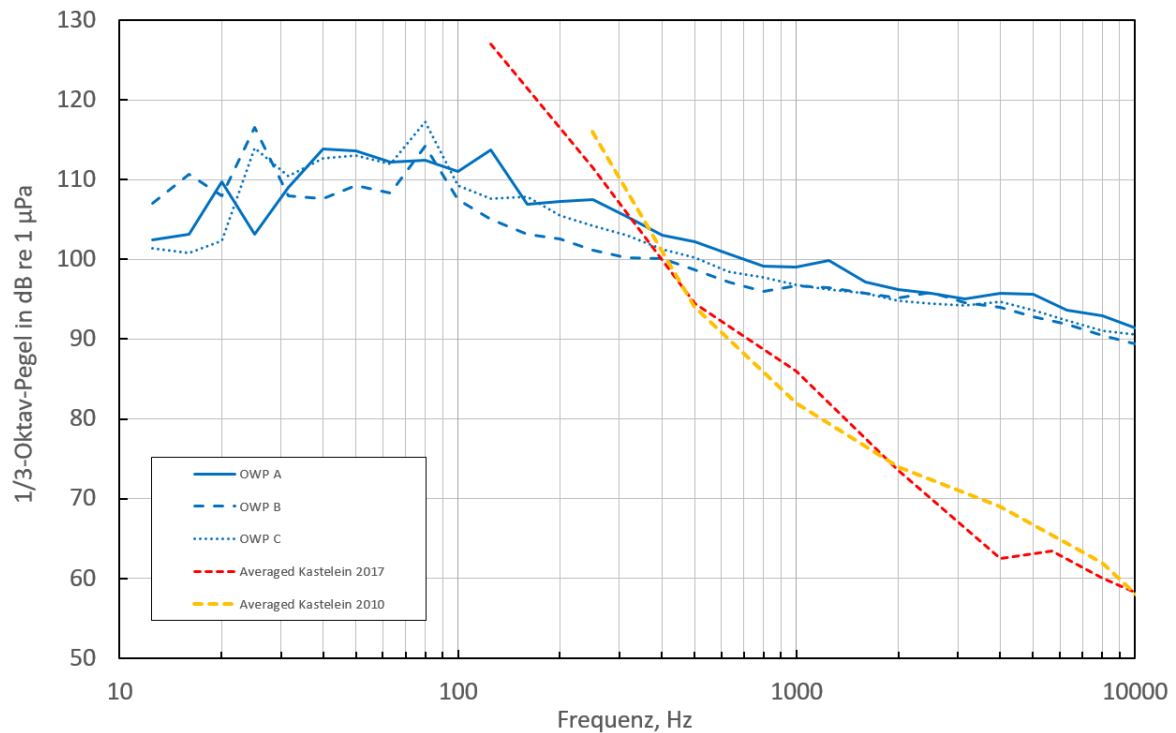


Abbildung 32: Gemessene Hörschwellen von Schweinswalen (Kastelein et al., 2010 & 2017) im Vergleich zum Betriebsschall, gemessen in 100 m Abstand von drei ausgewählten Windenergieanlagen (Anlagen mit Nennleistung von 6,0 bzw. 6,15 MW von zwei verschiedenen Herstellern mit und ohne Getriebe, Windklasse hoch aus der nordwestlichen Zone der Nordsee mit Wassertiefen um 30; OWP Nordsee One, Gode Wind 01 und 02).

Die dargestellten Hörschwellen in Abbildung 32 basieren auf einzelne Individuen von Schweinswalen und zeigen eine interindividuelle Varianz in der Hörfähigkeit. Zudem ist bekannt, dass auch die Auswahl der Messmethode und die Art der Stimuli einen Einfluss auf die Bestimmung von Hörschwellen besitzen kann (z.B. Betke, 1991). Ein direkter Vergleich der gemessenen Betriebsschallgeräusche in 1/3-Oktavbändern mit den gemessenen Ruhehörschwellen (schmalbandigen Sinussweeps) ist somit nicht eins zu eins energetisch zu vergleichen. Abbildung 32 verdeutlicht jedoch generell die frequenzabhängige Hörfähigkeit von Schweinswalen. Demzufolge sind die tonalen und tieffrequenten Komponenten (< 160 Hz) von modernen Windenergieanlagen mit und ohne Getriebe im Betrieb in einer Messentfernung von ca. 100 m im Bereich oder sogar deutlich unterhalb der Hörfähigkeit von Schweinswalen.

Aus psychoakustischer Sicht ist davon auszugehen, dass diese tieffrequenten und tonalen Komponenten vermutlich nicht von Schweinswalen wahrgenommen werden können. Im vorliegenden Beispiel liegt ab einer Frequenz von ca. 500 Hz der gemessene Schalldruckpegel oberhalb der Ruhehörschwelle von Schweinswalen. In diesem Frequenzbereich werden aber

keine bzw. kaum noch Schalleinträge durch in Betrieb befindliche Anlagen ins Wasser eingeleitet; siehe Kapitel 6.1.2. Dieser Schalldruckpegel ist i. d. R. mit dem für derartige Wetterverhältnisse (Windklasse „hoch“) typischen, breitbandigen Hintergrundschall gleichzusetzen, der zumeist durch abiotische Schalleinträge, wie Wind und Wellenschlag, und durch anthropogenen Schifflärm benachbarter Verkehrstrennungsgebiete verursacht wird.

Andere Spezies, wie Robben, Seehunde oder auch unterschiedliche Fischarten, können z.T. tieffrequente Geräusche dagegen wahrnehmen (Terhune, 1988, Popper et al., 2019). Beispielhaft sind die Ruheshwellen von Seehunden aus der Literatur (Kastelein et al., 2009, Reichmuth & Holt, 2013) den Betriebsschallgeräuschen in Abbildung 33 gegenübergestellt.

Auch hier basieren die Hörschwellen nur auf wenigen Individuen und unterschiedlichen Messmethoden bzw. Stimuli, die die interindividuellen Unterschiede erklären könnten. Auch hier ist ein energetischer eins zu eins Vergleich mit den Betriebsschalldaten nicht möglich; jedoch liegen die Schalleinträge der Windenergieanlagen deutlich oberhalb der dargestellten Hörschwellen, sodass von einer generellen Hörbarkeit auszugehen ist.

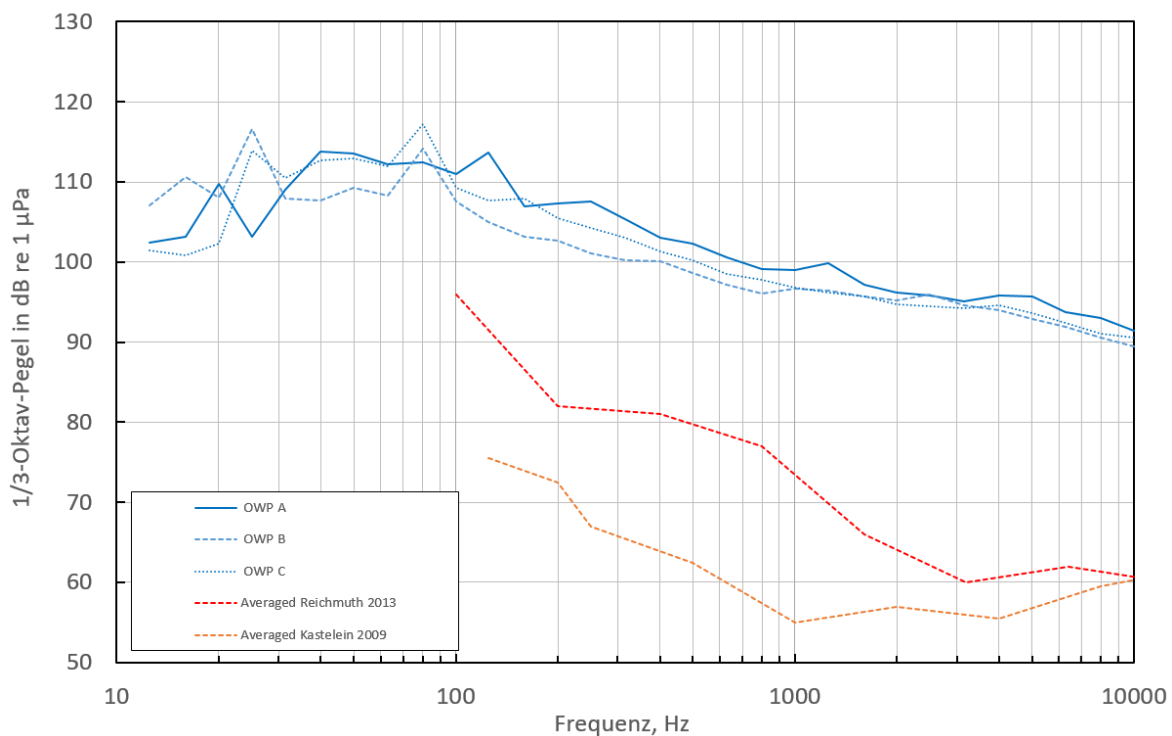


Abbildung 33: Gemessene Hörschwellen von Seehunden und Kegelrobben aus der Literatur im Vergleich zum Betriebsschall, gemessen in 100 m Abstand von ausgewählten Windenergieanlagen (Anlagen mit Nennleistung von 6,0 bzw. 6,15 MW von zwei verschiedenen Herstellern mit und ohne Getriebe, Windklasse „hoch“; OWP Nordsee One, Gode Wind 01 und 02).

Stöber und Thomsen (2021) prognostizieren für eine einzelne noch nicht in Betrieb befindliche 10 MW-OWEA eine Störwirkung auf marine Säuger bis zu einer Entfernung von 6,3 km.

Diese Entfernung verringert sich auf 1,4 km, wenn die Windenergieanlage als getriebelose Anlage ausgeführt ist. Diese Störradien wurden durch eine Interpolation von bestehenden Messdaten an Windenergieanlagen bis 6 MW prognostiziert. Inwieweit dieser Benchmark durch die vorliegende Studie basieren auf den Abbildung 32 und Abbildung 33 sowie den identifizierten Einflussparametern auf Betriebsschall (Kapitel 6.1) zu bestätigen ist, bleibt offen und bedarf weiteren Untersuchungen. Zudem zeigt diese Studie, Tabelle 6, dass getriebelose Anlagen neuerer Generation derzeit tendenziell eine tieffrequentere, tonale Komponente (Eigenfrequenzen ≤ 80 Hz) mit geringeren Amplituden als OWEAs mit Getriebe erzeugen. Basierend auf Abbildung 32 nimmt damit die Wahrscheinlichkeit einer Hörbarkeit durch Schweinswale aufgrund der tieferen, tonalen Komponente und der geringeren Amplitude weitergehend erheblich ab.

Aus psychoakustischer Sicht ist bei Menschen und auch Landsäugetieren grundsätzlich eine Störung oder Meidewirkung durch Schall unterhalb der Hörschwelle auszuschließen. Gerade bei Vögeln und Landsäugetieren wurde zudem wissenschaftlich untersucht, dass selbst hörbarer bis hin zu schädigender Schall nicht zwingend zu einer Meidung eines Gebietes führt, wenn dadurch ein Vorteil, wie vermehrte Nahrungsaufnahme oder höherer Reproduktionserfolg, vorliegt (Reck, 2001). Derartige, kumulative Effekte sind bisher für Meeressäuger noch nicht umfänglich untersucht worden.

7.4 Kumulative Effekte bei Betriebsschall

Für eine flächendeckende Evaluierung möglicher, ökologischer Auswirkungen von Betriebsschall (Status Quo oder auch zukünftiger Windpark-Szenarien) ist eine Modellierung des Dauerschalls von Betriebsgeräuschen und auch des Hintergrundschalls (vorwiegend Schiffslärm und ggfs. abiotischer Schalleintrag durch Wind und Welle) unablässig. Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie sind die wesentlichen Einflussparameter von Betriebsschall bisher zwar qualitativ bestimmbar, jedoch ist eine statistisch valide Quantifizierung derzeit noch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Aus dieser projektübergreifenden Auswertung lässt sich zumindest tendenziell ableiten, dass die Schalleinträge von in Betrieb befindlichen OWEAs nur tieffrequenter Natur (maximal wenige hundert Hz) und nur pegelbestimmend im jeweiligen Windpark in sehr geringen Distanzen zu den jeweiligen Windenergieanlagen sind. Zudem ist tendenziell nicht mit einer Erhöhung der Schalleinträge ins Wasser durch höhere Nennleistungen der OWEAs auszugehen.

Ein weiterer, bisher wenig beachteter Einflussparameter bei der ökologischen Beurteilung von Betriebsschall ist der umgebende Hintergrundscharll. So zeigt sich gerade aus den Messungen aus Deutschland, dass es bereits oftmals zu einer vollständigen Vermischung von tieffrequentem Betriebsschall, verursacht durch Windenergieanlagen, und dem permanenten Hintergrundscharll in 1 bis 5 km Entfernung von Windparks je nach Schiffsverkehrsdichte kommt. Durch die bestehenden Forschungsvorhaben BIAS und JOMOPANS kann zumindest der schiffsbasierte Hintergrundscharll flächendeckend für die Nord- und Ostsee aufgrund von bestehenden Schiffsdichten inkl. Fahrtgeschwindigkeiten und Schiffsgrößen durch Modellierungen abgeschätzt werden.

Für die ökologische Beurteilung von Betriebsschall muss einerseits eine kumulative Betrachtung von Schalleinträgen durch die Windenergieanlagen, den OWP-relevanten Serviceverkehr und den nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr sowie durch die Schalleinträge durch abiotische Effekte, wie Wind und Wellenschlag zumindest bei hohen Windgeschwindigkeiten, erfolgen. Andererseits muss ebenfalls das Hörvermögen der betrachteten Spezies, z. B. durch Ermittlungen von hörgerechten Schallpegelwerten mittels Frequenzgewichtungen (z. B. Southall et al., 2019; Kastelein et al., 2015), berücksichtigt werden, da es um Stör- und Meidewirkungen durch Unterwasserscharll geht. Die in Kapitel 6.3 dargestellte, grobe energetische (breitbandige) Abschätzung der Schalleinträge durch OWP-relevanten Serviceverkehr und Windenergieanlagen ist somit für die ökologische Auswirkung von Betriebsschall hinsichtlich nicht geeignet. Zudem müssen ggfs. auch weitere Aspekte, wie z. B. Nahrungsangebot, Reproduktionserfolg, Wasserqualität, etc. für eine umfassende Beurteilung berücksichtigt werden.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in Bereichen mit hohen, nicht OWP-relevanten Schiffsdichten bereits in geringen Abständen zu den Windparks eine vollständige Vermischung mit dem permanenten Hintergrundscharll stattfinden wird. Umgekehrt ist jedoch in Seegebieten mit keinem bzw. sehr geringen Schiffsdichten der Schalleintrag durch im Betrieb befindliche Windenergieanlagen durchaus auch außerhalb von Windparks messtechnisch erfassbar und kann einen wesentlichen Beitrag zum breitbandigen Schalldruckpegel erzeugen.

Ein Beispiel ist ein Windpark im FFH-Schutzgebiet „Sylter Außenriff“ (östliche Zone 1 der Nordsees; OWP *Butendiek*). Messungen des Hintergrundscharlls aus dem Jahr 2012 weisen dieses Seegebiet als ein „sehr leises“ für die deutsche AWZ der Nordsee aus. Der gemittelte Schalldruckpegel L_{eq} über mehrere Wochen liegt für die Windklasse „niedrig“ bei 101 dB und für die beiden anderen Windklassen bei 108 dB. Der L_{05} -Wert aller 5-Sekundenintervalle variiert unabhängig von der Windklasse zwischen 114 und 120 dB und ist in den allermeisten

Fällen auf eine der wenigen Schiffsvorbeifahrten in unmittelbarer Umgebung zum Unterwasserschallmesssystem zurückzuführen. Die Hintergrundschallmessungen wurden dabei vor der Sperrung des Windparks für den nicht OWP-relevanten Schiffsverkehr durchgeführt. Die Betriebsschallmessungen aus dem Jahr 2016 zeigen einen Anstieg des L_{eq} von 10 bis 13 dB in der Windklasse „hoch“. Dieser Pegelanstieg ist jedoch nicht eindeutig auf tieffrequente Schalleinträge der OWEAs zurückzuführen, sondern zeigt eine generelle Erhöhung des tieffrequenten Frequenzbereichs unterhalb von ca. 200 Hz. Selbst in 5 km Entfernung wurden zum Teil 5 bis 7 dB höhere Schalldruckpegel messtechnisch erfasst. Die Ursache dieser deutlichen Pegelanstiege konnte allerdings aufgrund von fehlenden AIS-Aufzeichnungen während der Hintergrund- und Betriebsschallmessungen bisher nicht eindeutig identifiziert werden; so ist sein Anstieg durch den OWP-relevanten Serviceverkehr in und um den Windpark nicht auszuschließen. Es kann jedoch auch nicht ausgeschlossen werden, dass sich die natürlichen, tieffrequenten Schallkomponenten durch Wind und Wellen aufgrund der bestehenden Fundamentstrukturen erhöht haben.

Grundsätzlich zeigt dieses Beispiel mitten im FFH-Schutzgebiet „Sylter Außenriff“, dass ein möglicher Schalldruckpegelanstieg zwar durch den Betrieb eines Windparks in einem sehr leisen Seegebiet nicht auszuschließen ist, dieser Pegelanstieg aber lediglich im tieffrequenten Bereich bis wenige hundert Hz stattfindet, so dass eine Hörbarkeit für einige Spezies nicht zwingend vorhanden sein muss. Eine ökologische Beurteilung muss somit nicht nur die kumulativen Schalleinträge, sondern auch das Hörvermögen der zu betrachtenden Spezies berücksichtigen.

Eine bisher nicht betrachtete Fragestellung ist der Frequenzbereich der bestehenden Unterwasserschallmessungen. Die Unterwasserschallmessungen wurden bisher bis 20 kHz ausgeführt. Die Schalleinträge von Windenergieanlagen und auch Schiffsbewegungen nehmen i. d. R. mit zunehmender Frequenz ab mehreren Kilohertz deutlich ab. Bestehende Unterwassersensoren, wie z. B. Echolotsysteme oder Sonare auf Schiffen, tragen allerdings ebenfalls Schallenergie im Bereich von 40 bis 120 kHz, gerichtet zum Meeresboden, ins Wasser ein. Dabei sind Schallausbreitungen in horizontaler Richtung nicht gänzlich auszuschließen. In diesem Frequenzbereich sind beispielsweise Schweinswale besonders sensitiv und ein Teil ihrer Echoortung und Kommunikation findet ebenfalls in diesem Frequenzbereich statt. Dieser sehr hochfrequente Schalleintrag ins Wasser durch Schiffe ist bisher aufgrund von fehlenden Unterwasserschallmessungen in diesem hochfrequenten Bereich hinsichtlich dieser Fragestellung nicht betrachtet worden. Es ist davon auszugehen, dass die spektral sehr schmalbandigen und gepulsten Einträge durch diese technischen Geräte nicht zu einer Anhebung des (Gesamt-)

Schalldruckpegels führen werden, aber aufgrund des Hörvermögens, u. a. von Schweinswalen, diese Frequenzen von Tieren besonders wahrgenommen werden und eine Stör- oder Meidewirkung auslösen könnten. Somit ist aus psychoakustischer Sicht zu empfehlen, ebenfalls Messungen bis zur oberen Grenzfrequenz von Schweinswalen (< 200 kHz) in und um die Windparks durchzuführen. So wurden in mehreren Studien zum Bauschall (impulshafter Rammschall) bereits mehrere Stunden vor der eigentlichen Vergrämungsmaßnahme mittels akustischer Geräte wie Pinger und Seal Scarer eine Meidewirkung um die Baustelle beobachtet (z. B. Brandt et al., 2016; Rose et al., 2019). Es ist bekannt, dass vor der eigentlichen Rammung von Fundamentstrukturen die Schiffsbewegungen rund um die Baustelle erheblich zunehmen, um z. B. das Schallschutzsystem Großer Blasenschleier am Meeresboden auszulegen, inkl. Vermessung der Lage der Düsenschläuche auf dem Boden mittels Seitensichtsonare o. ä., und die für die Effizienzkontrolle notwendigen Messsensoren auszubringen.

8. Literaturverzeichnis

- Au, W. W., & Hasting, M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics*. (W. W. Au, & M. C. Hasting, Hrsg.) Springer-Verlag New York.
- Beason, R. C. (2004). What can birds hear? *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference*, 21.
- Bellmann, M. (2016). *Erfassung und Bewertung der notwendigen Hintergrundschallmessungen für den Offshore-Windpark Nordsee One*. Tech. rep., itap GmbH.
- 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*. Tech. rep., itap GmbH.
- Bellmann, M., Gündert, S., Müller, A., Schuster, M., & Wildemann, M. (2011). *Phase 2: Pilot-Monitoring der impulshaften und kontinuierlichen Unterwasserschalleinträge in den deutschen Meere unter der EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie; Müller BBM Bericht M129013/03 im Auftrag des BSH*. Tech. rep.
- Bellmann, M., Wendt, T., May, A., Gerlach, S., & Remmers, P. (2022). *Underwater noise during percussive pile driving: Influence factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values. International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life*. Tech. rep.
- Betke, K. (1991). New hearing threshold measurements for pure tones under free-field listening conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 2400–2403.
- Betke, K. (1991). New hearing threshold measurements for pure tones under free-field listening conditions. *J Acoust Soc Am* 89, 2400-2403. <https://doi.org/10.1121/1.400927>.
- Betke, K. (2014). *Underwater construction and operational noise at alpha ventus*. In Beiersdorf A, Radecke A: *Ecological Research at the Offshore Windfarm alpha ventus*. Springer.

- Betke, K., & Bellmann, M. (2018). *Kombinierte Messung des beim Betrieb des Windparks Global Tech I entstehenden Unterwasserschalls und des Hintergrundschalls in den Windparks EnBW Hohe See und EnBW Albatros*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., & Bellmann, M. (2019). *Messung des beim Betrieb der Offshore-Windparks DanTysk und Sandbank entstehenden Unterwasserschalls*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., & Gündert, S. (2015). *Messung des beim Betrieb des Offshore-Windparks EnBW Baltic 2 entstehenden Unterwasserschalls*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., & Gündert, S. (2020). *Verwendung von verlustbehafteten Datenkompressionsverfahren ("MP3") bei Messungen von Unterwasserschall*. Memo. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., & Matuschek, R. (2012). *Messungen von Unterwasserschall beim Betrieb der Windenergieanlagen im Offshore-Windpark alpha ventus. Untersuchung im Rahmen des Projekts Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben alpha ventus zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH (StUKplus)*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., & Remmers, P. (2019). *Kombinierte Messung des Unterwasser-Betriebsschalls am Windpark Veja Mate und des Unterwasser-Hintergrundschalls für den Windpark Deutsche Bucht*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., Bellmann, M., & Euhus, A. (2022). *Kombinierte Messung des Unterwasser-Betriebsschalls der Offshore Windparks Deutsche Bucht, EnBW Hohe See und EnBW Albatros*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., Gerlach, S., & Bellmann, M. (2021). *Kombinierte Messung des Unterwasser-Betriebsschalls der Offshore Windparks Merkur Offshore, Trianel Windpark Borkum und Borkum Riffgrund 2*. Tech. rep., itap GmbH.
- Betke, K., Müller, T., & Bellmann, M. (2022). *Wind turbine operational noise. International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life*. Tech. rep.
- Betke, K., Schultz von Glahn, M., & A. Petersen, J. G. (2003). *Messung der Unterwasser-Schallabstrahlung einer Offshore-Windenergieanlage*. In: Fortschritte der Akustik – DAGA'03, 322-323. Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA).
- Betke, K., Schultz-von-Glahn, M., & Matuschek, R. (2004). *Underwater noise emissions from offshore wind turbines*. Tech. rep., Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04, Strasbourg.

- BIAS. (2016). Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape, funded R&D project by the EC, BIAS LIFE II ENV/SE 841. *Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape, funded R&D project by the EC, BIAS LIFE II ENV/SE 841*. Von <https://biasproject.wordpress.com> abgerufen
- Bjørnø, L. (1994). Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations. *Le Journal de Physique IV*, 4, C5–1023.
- BMU. (2013). *Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept)*. Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Brandt, M. J., Dragon, A.-C., Diederichs, A., Schubert, A., Kosarev, V., Nehls, G., . . . others. (2016). Effects of offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight. *Assessment of Noise Effects. Final Report*.
- BSH. (2013). Standard: Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4).
- BSH. (2017). Allgemeinverfügung des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie zur Errichtung von Messstellen in Sicherheitszonen von Offshore-Windparks in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ). AZ: *BSH/5129/Messstellen/17/M5309*.
- BSH. (2023). *Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Nordsee und Ostsee*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- BSH. (2023). *Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Nordsee*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- Carey, W. M., & Evans, R. B. (2011). *Ocean ambient noise: measurement and theory*. Springer Science & Business Media.
- Claussen KT, W. M. (2010). *Click communication in harbour porpoises Phocoena phocoena*. *Bioacoustics* 20, 1–28. .
- Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., & Nabe Nielsen, J. (2017). Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Mar Ecol Prog Ser*. doi:<https://doi.org/10.3354/meps12257>
- DIN 1320. (2009). *DIN 1320:2009-12 Akustik - Begriffe*. Tech. rep., Deutsches Institut für Normung.

- EU. (2017). Beschluss 2017/848 der Kommission vom 17. Mai 2017 zur Festlegung der Kriterien und methodischen Standards für die Beschreibung eines guten Umweltzustands von Meeresgewässern und von Spezifikationen und standardisierten Verfahren für die Überwachung und Bewertung.
- FGW Fördergesellschaft Windenergie e. V. (2008). Technische Richtlinie für Windenergieanlagen – Teil 1: Bestimmung der Schallemissionswerte. Revision 18.
- Gasch, R. (2013). *Windkraftanlagen. Grundlagen und Entwurf*. Stuttgart: Teubner, 1993.
- Gerlach, S., & Betke, K. (2021). *Kombinierte Messung des Unterwasser-Betriebsschalls der Offshore-Windparks Arkona und Wikinger*. Tech. rep., itap GmbH.
- Gerlach, S., Betke, K., & Bellmann, M. (2021). *Kombinierte Messung des unterwasser-Betriebsschalls der Offshore Windparks Gode Wind 1, Gode Wind 2 und Nordsee One*. Tech. rep., itap GmbH.
- Heffner, R. S., & Heffner, H. E. (1992). Evolution of sound localization in mammals. *The evolutionary biology of hearing*, 691–715.
- HELCOM. (2021). Guidelines for monitoring continuous noise. Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission – HELCOM),.
- Holme, C. T., Simurda, M., Gerlach, S., & Bellmann, M. (2023). The relation between underwater noise and operating offshore wind turbines. *International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life*.
- ISO 18405. (2017). *ISO 18405 (2017) Underwater Acoustics – Terminology*. Tech. rep.
- ISO 18406. (April 2017). *ISO 18406:2017, Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving*. Standard, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO/DIS 18405. (2014). *ISO/DIS 18405 (2014) Underwater Acoustics – Terminology*. Tech. rep.
- Johnson, M., Partan, J., & Hurst, T. (2013). Low complexity lossless compression of underwater sound recordings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133, 1387–1398.
- Kastelein, R. A., Hoek, L., & Van de Voorde, S. (2017). Hearing thresholds of a male and a female harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *J. Acoust. Soc. Am.* 142 (2), 1006-1010.
- Kastelein, R. A., Hoek, L., de Jong, C. F., & Wensveen, P. J. (2010). The effect of signal duration on the underwater detection thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena*

- phocoena) for single frequency-modulated tonal signals between 0.25 and 160 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (5), 3211-3222.
- Kastelein, R., Schop, J., Hoek, L., & Covi, J. (October 2015). Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for narrow-band sweeps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138, 2508-2512. doi:10.1121/1.4932024
- Kastelein, R., Wensveen, P., Hoek, L., Verboom, W., & Terhune, J. (March 2009). Underwater detection of tonal signals between 0.125 and 100 kHz by harbor seals (*Phoca vitulina*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125, 1222-9. doi:10.1121/1.3050283
- Kipple, B., & Gabriele, C. (2003). Glacier Bay watercraft noise. *Naval Surface Warfare Center technical report NSWCCD-71-TR-2003/522*.
- Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2019). Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines – Technical options for complying with noise limits, report on behalf of BfN. *Bonn, Germany*, 1–42.
- Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P. A., & Blanchet, M. A. (2009). Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 425, 4060-4070.
- Madsen, P. T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K., & Tyack, P. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 309, 279-295.
- Matuschek, R. (2014). *Offshore-Windpark RIFFGAT - Hydroschallmessungen des Betriebsschalls*. Tech. rep., itap GmbH.
- Matuschek, R., & Bellmann, M. (2019). *Messung des beim Betrieb des Windparks Borkum Riffgrund 1 entstehenden Unterwasserschalls*. Tech. rep., itap GmbH.
- Matuschek, R., Gündert, S., & Bellmann, M. (2018). *Messung des beim Betrieb der Windparks Meerwind Süd/Ost, Nordsee Ost und Amrumbank West entstehenden Unterwasserschalls*. Tech. rep., itap GmbH.
- MSRL. (2008). Richtlinie 2008/56/eg des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie).

- Müller, A., & Zerbs, C. (2011). *Offshore-Windparks. Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen. Aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie*. Tech. rep.
- Norro, A., & Degraer, S. (2016). Quantification and characterisation of Belgian offshore wind farm operational sound emission at low wind speeds, in: Degraer, S. et al. (Ed.) *Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Environmental impact monitoring reloaded*.
- NRC. (2003). *Ocean Noise and Marine Mammals. National Research Council, Committee on Potential Impacts of Ambient Noise on Marine Mammals., National Academic Press, Washington*.
- Popper A.N., H. A. (2019). *Examining the hearing abilities of fishes*. J Acoust Soc Am 146 Issue 2, 948–955 (August 2019).
- Reck, H. (2001). *Lärm und Landschaft: Referate der Tagung "Auswirkungen von Lärm und Planungsinstrumente des Naturschutzes"*. Münster : BfN-Schr.-Vertrieb im Landwirtschaftsverl.
- Reichmuth, C., Holt, M., Mulsow, J., Sills, J., & Southall, B. (April 2013). Comparative assessment of amphibious hearing in pinnipeds. *Journal of comparative physiology. A, Neuroethology, sensory, neural, and behavioral physiology*, 199. doi:10.1007/s00359-013-0813-y
- Remmers, P., & Bellmann, M. A. (2015). *Offshore Windparks „Gode Wind 01“ und „Gode Wind 02“*. *Messung des Hintergrundgeräusches im Bereich der Baufelder gemäß StUK 4*. Tech. rep., itap GmbH.
- Remmers, P., & Gündert, S. (2017). *Messung der Hydroschallimmissionen während des Betriebes des Offshore Windparks BARD Offshore 1*. Tech. rep., itap GmbH.
- Ridgway, S. H., & Joyce, P. L. (1975). *STUDIES ON SEAL BRAIN BY RADIOTELEMETRY*.
- Rose, A., Brandt, M. J., Vilela, R., Diederichs, A., Schubert, A., Kosarev, V., . . . Piper, W. (2019). Effects of noise mitigated offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight 2014-2016 (Gescha2) – Assessment of Noise Effects. doi:10.13140/RG.2.2.14790.83527
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., . . . Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45, 125–232.

- Stöber, U., & Thomsen, F. (2021). How could operational underwater sound from future offshore wind turbines impact marine life? *J Acoust Soc Am* 149, 1791-1795.
- Tougaard, J., Hermanssen, L., & Madsen, P. T. (November 2020). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148, 2885–2893. doi:<https://doi.org/10.1121/10.0002453>
- Yang, C. M., Liu, Z. W., Lü, L. G., Yang, G., Huang, L., & Jiang, Y. (2008). Observation and comparison of tower vibration and underwater noise from offshore operational wind turbines in the East China Sea Bridge of Shanghai. *J Acoust Soc Am* 144, EL522 Au WWL, *Hastings MC (2008) Principles of Marine Bioacoustics. Springer.*
- Zwicker, E., & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics - facts and models* (2. Ausg.). Springer-Verlag Berlin.

9. Anhang: Pegel an den 100 m Positionen aller OWEAs

9.1 Schalldruckpegel L_{05}

Nr.	Fundament	Nennleistung, MW	Getriebe	$L_{5, \text{„niedrig“}}$ breitbandig, dB re 1 μ Pa	$L_{5, \text{„hoch“}}$ breitbandig, dB re 1 μ Pa	Differenz, dB re 1 μ Pa	Mess- abstand, m
1	Monopile	3,6	ja	126	126	0	
2	Monopile	6	nein	121	121	0	
3	Tripile	5	ja	142	129	-13	250
4	Monopile	4	ja	132	137	5	
5	SB Jacket			135	133	-2	
6	Monopile	8	ja	125	124	-1	
7	SB Jacket			127	127	0	
8	Monopile	3,6	ja	121	121	0	
9	Monopile	3,6	ja	116	120	4	
10	Monopile	8,4	ja	124	123	-1	
11	Monopile	2,3	ja				
12	Jacket	3,6	ja	122	128	6	
13	Monopile	7	nein	121	125	4	
14	Monopile	7	nein	123	125	2	200
15	Tripod	5	ja	123	130	7	
16	Monopile	6	nein	120	121	1	
17	Monopile	6	nein	120	122	2	
18	Monopile	3,6	ja	124	127	3	
19	Monopile	6	nein	131	127	-4	
20	Monopile	6,2	ja	122	122	0	
21	Jacket	6,2	ja	121	122	1	
i22	Monopile	3,6	ja	132	128	-4	
23	Monopile	4	nein	119	117	-2	250
24	Tripod	5	ja	130	129	-1	
25	Monopile	6,3	ja	128	126	-2	
26	Monopile	6	nein	131	122	-9	400
27	Jacket	5,1	ja	124	118	-6	

9.2 Schalldruckpegel L_{50}

Nr.	Fundament	Nennleistung, MW	Getriebe	L_{50} , „niedrig“ breitbandig, dB re 1 μ Pa	L_{50} , „hoch“ breitbandig, dB re 1 μ Pa	Differenz	Messabstand, m
1	Monopile	3,6	ja	111	124	13	
2	Monopile	6	nein	111	115	4	
3	Tripile	5	ja	128	121	-7	250
4	Monopile	4	ja	125	128	3	
5	SB Jacket			131	130	-1	
6	Monopile	8	ja	119	119	0	
7	SB Jacket			121	123	2	
8	Monopile	3,6	ja	110	115	5	
9	Monopile	3,6	ja	107	118	11	
10	Monopile	8,4	ja	119	120	1	
11	Monopile	2,3	ja				
12	Jacket	3,6	ja	113	122	9	
13	Monopile	7	nein	117	120	3	
14	Monopile	7	nein	117	122	5	200
15	Tripod	5	ja	116	127	11	
16	Monopile	6	nein	114	117	3	
17	Monopile	6	nein	114	117	3	
18	Monopile	3,6	ja	111	122	11	
19	Monopile	6	nein	123	120	-3	
20	Monopile	6,2	ja	116	118	2	
21	Jacket	6,2	ja	112	117	5	
22	Monopile	3,6	ja	118	124	6	
23	Monopile	4	nein	108	114	6	250
24	Tripod	5	ja	122	122	0	
25	Monopile	6,3	ja	121	121	0	
26	Monopile	6	nein	118	119	1	400
27	Jacket	5,1	ja	115	112	-3	

9.3 Schalldruckpegel L_{90}

Nr.	Fundament	Nennleistung, MW	Getriebe	L_{90} , „niedrig“ breitbandig, dB re 1 μ Pa	L_{90} , „hoch“ breitbandig, dB re 1 μ Pa	Differenz	Messabstand, m
1	Monopile	3,6	ja	101	123	22	
2	Monopile	6	nein	105	112	7	
3	Tripile	5	ja	123	117	6	250
4	Monopile	4	ja	122	125	3	
5	SB Jacket			127	125	-2	
6	Monopile	8	ja	116	117	1	
7	SB Jacket			117	120	3	
8	Monopile	3,6	ja	97	103	6	
9	Monopile	3,6	ja	101	117	16	
10	Monopile	8,4	ja	117	118	1	
11	Monopile	2,3	ja				
12	Jacket	3,6	ja	108	120	12	
13	Monopile	7	nein	115	118	3	
14	Monopile	7	nein	114	118	4	200
15	Tripod	5	ja	112	125	13	
16	Monopile	6	nein	110	113	3	
17	Monopile	6	nein	110	112	2	
18	Monopile	3,6	ja	106	120	14	
19	Monopile	6	nein	118	117	-1	
20	Monopile	6,2	ja	113	116	3	
21	Jacket	6,2	ja	105	115	10	
22	Monopile	3,6	ja	111	122	11	
23	Monopile	4	nein	103	109	6	250
24	Tripod	5	ja	116	119	3	
25	Monopile	6,3	ja	116	116	0	
26	Monopile	6	nein	115	116	1	400
27	Jacket	5,1	ja	105	109	4	

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung von Schalldruck und statischem Wasserdruck am Beispiel eines einzelnen Tons mit einer Frequenz von 100 Hz. Der statische Druck von 200 kPa in diesem Beispiel entspricht einer Wassertiefe von etwa 10 m.....	19
Abbildung 2:	Links: gemitteltes 1/3-Oktavspektrum einer Betriebsschallmessung in ca. 100 m Entfernung zu einer Anlage sowie die dazugehörigen 5, 50 und 90% Überschreitungspegel, rechts: Schmalbandspektrum mit 1 Hz Auflösung. Der breitbandige L_{50} (Gesamtpegel der blauen Kurve im linken Bild) beträgt etwa 118 dB re 1 μ Pa.	21
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des Eintrags von Maschinengeräuschen ins Wasser. 23	
Abbildung 4:	Unterwassergeräusche von drei verschiedenen OWEA, jeweils in ca. 100 m Entfernung. OWT1: 5 MW-Anlage installiert auf einem Tripod-Fundament, OWT2 und OWT3 jeweils 2 MW-Anlage installiert auf Monopfählen mit unterschiedlichen Durchmessers (Betke und Matuschek, 2012).....	24
Abbildung 5:	Oben: Hörschwellen verschiedener Zahnwale; farblich hervorgehoben ist die Hörschwelle eines Schweinswals (Au und Hastings, 2008). Unten: Ruhehörschwellen verschiedener Schweinswalindividuen (Kastelein et al., 2015).....	27
Abbildung 6:	Gemessene Windgeschwindigkeiten in zwei Windparks in der nordwestlichen Zone 1 der Nordsee über einen Messzeitraum von ca. 6 Wochen während der Betriebsschallmessungen zwischen März und September.	34
Abbildung 7:	Elektrische Leistung als Funktion der Windgeschwindigkeit für zwei verschiedene OWEA verschiedener Hersteller mit 7 MW (schwarz, getriebeles) und 8,4 MW (blau, mit Getriebe) Nennleistung (Betke und Bellmann, 2022).	35
Abbildung 8:	Kalibrierplatz für Hydrophone. Der weiße Quader unten links umschließt das Testvolumen, in dem mit einem Lautsprecher (im zylindrischen Aufsatz) unterschiedliche Testschalldrücke erzeugt werden können; bei Betriebsschallmessungen wird ein Wert um 150 dB re 1 μ Pa benutzt. Der tatsächliche Schalldruck im Testvolumen wird mit dem Referenzmikrofon (rechtes Bild) ermittelt. Zusammen mit der Ausgangsspannung des Hydrophons wird daraus dessen Kalibrierfaktor berechnet.....	36
Abbildung 9:	Skizze der standardmäßig benutzten Messanordnung.	37
Abbildung 10:	Unterwasserschallmessgerät der itap GmbH; ganz hinten das Hydrophon mit Auftriebskörper.	38
Abbildung 11:	Schematische Darstellung des Verankerungskonzepts mit zusätzlichem Messgerät (z. B. Wildlife Acoustics SM2M oder SoundTrap, gelbes Rohr ganz rechts).	39
Abbildung 12:	Festlegung von Zonen und Flächen zur Nutzung von Offshore-Wind der deutschen AWZ der Nordsee (Quelle: Flächenentwicklungsplan des BSH 2020).....	42
Abbildung 13:	Fundamente von OWEA. Von links: Monopile, Jacket, 4-beiniger Tripod, Tripile (Foto ganz rechts: Martina Nolte, CC BY-SA 3.0 de, alle übrigen: itap GmbH).	44
Abbildung 14:	Breitbandige Schalldruckpegel L_{50} (Mittelungszeit 5 s) in 100 m Entfernung von ausgewählten, in Betrieb befindlichen OWEAs aus Tabelle 4. Mit „OWEA aus“ ist in diesem und in den folgenden Abbildungen die Messung bei Windklasse „niedrig“ gemeint. Die OWEAs laufen mit Nennleistung in der Windklasse „hoch“. Oben: mit Windparknamen; unten: ohne Windparknamen.	48
Abbildung 15:	Verteilung der spektralen Maxima und prozentuale Anzahl der Windenergieanlagen, bei denen ein pegelbestimmendes 1/3-Oktavband festgestellt wurde (Tabelle 4).	49
Abbildung 16:	Beispielhafte 1/3-Oktavspektren für Anlagen desselben Herstellers mit Getriebe (oben; Siemens SWT-3.6-120) und ohne Getriebe (unten; OWEA Siemens SWT-6.0-154). ...	51
Abbildung 17:	Beispielhafte Gegenüberstellung der Schmalband-FFT-Spektren für eine ausgewählte Windanlage mit und ohne Getriebe aus Abbildung 16 in den Windklassen „niedrig“ (Anlagen im Stillstand) und Windklasse „hoch“ (Anlagen unter Nennleistung).	52
Abbildung 18:	Breitbandige Schalldruckpegel L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA in Abhängigkeit der Fundamenttypen.....	53

Abbildung 19:	Breitbandige Schalldruckpegel L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA nach Antriebssystemen (G – Getriebe; D – Direktantrieb bzw. getriebelos) geordnet.	54
Abbildung 20:	Breitbandige L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA als Funktion der Nennleistung. Oben: Unabhängig von der Fundamentstruktur; unten: nach Fundamenttyp aufgeschlüsselt.	56
Abbildung 21:	L_{50} des 1/3-Oktavbandes mit dem höchsten Pegel in 100 m Entfernung von den OWEA als Funktion von deren Nennleistung. Oben: Unabhängig von der Fundamentstruktur; unten: nach Fundamenttyp aufgeschlüsselt.	57
Abbildung 22:	Differenzpegel zwischen dem breitbandigen Schalldruckpegel L_{50} mit in Betrieb befindlichen OWEAs mit Nennleistung (Windklasse „hoch“) und ausgeschalteten OWEAs (Windklasse „niedrig“) als Funktion der Turbinengröße.	58
Abbildung 23:	Breitbandige Pegel L_{50} in 100 m Entfernung von den OWEA in Betrieb (Nennleistung) als Funktion der Wassertiefe.	59
Abbildung 24:	Typische Schmalbandspektren an einer ausgewählten Anlage in der östlichen Zone 1 der Nordsee (Siemens SWT-3.6-120 mit Getriebe) in 100 m (oben), 1 km (Mitte) und 5 km (unten) Abstand, jeweils bei Nennleistung (Windklasse „hoch“) und Stillstand (Windklasse „niedrig“). 61	
Abbildung 25:	Bewegungen des betriebseigenen Offshore-Serviceschiffes in der westlichen Zone 2 der Nordsee über einen Zeitraum von 52 Tagen im Sommer 2021 während der mehrwöchigen Betriebsschallmessungen. Die Schiffsbewegungen wurden mittels AIS-Aufzeichnungen rekonstruiert.	67
Abbildung 26:	Bewegungen des betriebseigenen Offshore-Serviceschiffes in der westlichen Zone 2 der Nordsee über einen Zeitraum von 56 Tagen im Sommer 2021 während der mehrwöchigen Betriebsschallmessungen. Die Schiffsbewegungen wurden mittels AIS-Aufzeichnungen rekonstruiert. Das schwarze Quadrat im Zentrum des Windparks markiert die Umspannstation. 67	
Abbildung 27:	Anhand von AIS-Daten bestimmte Geschwindigkeiten der Serviceschiffe aus der Abbildung 26 und der Abbildung 27. In der überwiegenden Zeit waren die Schiffe nicht in Bewegung. 68	
Abbildung 28:	Schiffe im Bereich ausgewählter Offshore-Windparks in der westlichen Zone 2 der Nordsee (unten links und oben rechts) während der Messperiode für Betriebsschall von Juli bis September 2021.	70
Abbildung 29:	Farbcodierte Schifffahrtsdichte aus AIS-Daten für die östliche zentrale AWZ der Nordsee. Nördlich der Hochseeinsel Helgoland befanden sich im Jahr 2017 drei Windparks in Betrieb, die weiß markiert sind (Quelle www.marine-traffic.com , 03.12.2017).	71
Abbildung 30:	Überlagerung der AIS-Karten von www.marine-traffic.com mit den aus Dänemark verfügbaren AIS-Daten der Danish Maritime Authority (www.dma.dk). Die Schifffahrtsrouten wurden westlich der Windparks graphisch interpoliert.	73
Abbildung 31:	Darstellung der Differenzen der Schalldruckpegel ($L_{05, 50, 90}$) zwischen den Betriebszuständen „Anlagen im Betrieb mit Nennleistung“ (Windklasse „hoch“) und „Anlagen im Stillstand“ (Windklasse „niedrig“) für alle Betriebsschallmessungen. Die Messdaten wurden mit ansteigender Nennleistung der Anlagen in aufsteigender Reihenfolge sortiert.	78
Abbildung 32:	Gemessene Hörschwellen von Schweinswalen (Kastelein et al., 2010 & 2017) im Vergleich zum Betriebsschall, gemessen in 100 m Abstand von drei ausgewählten Windenergieanlagen (Anlagen mit Nennleistung von 6,0 bzw. 6,15 MW von zwei verschiedenen Herstellern mit und ohne Getriebe, Windklasse hoch aus der nordwestlichen Zone der Nordsee mit Wassertiefen um 30; OWP Nordsee One, Gode Wind 01 und 02).	85
Abbildung 33:	Gemessene Hörschwellen von Seehunden und Kegelrobben aus der Literatur im Vergleich zum Betriebsschall, gemessen in 100 m Abstand von ausgewählten Windenergieanlagen (Anlagen mit Nennleistung von 6,0 bzw. 6,15 MW von zwei verschiedenen Herstellern mit und ohne Getriebe, Windklasse „hoch“; OWP Nordsee One, Gode Wind 01 und 02). 86	

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definition der itap GmbH der Windklassen für die nachfolgende Auswertung gemäß der Messvorschrift des BSH (2011).....	35
Tabelle 2:	Kombinationen aus Windenergieanlagen und Fundamentstrukturen aus OWPs in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee, an denen Betriebsschallmessungen durchgeführt wurden. Für die Nordsee sind ebenfalls die Zonen und die Lage der Windparks in den Zonen aus dem FEP 2020 dargestellt. Verwendete Abkürzungen: SB = Suction Bucket, WT = Wassertiefe, N – Nord, S – Süd, O – Ost, W – West.....	43
Tabelle 3:	Zusammenfassung einiger standort- und projektspezifischer Parameter der vermessenen Anlagen.....	44
Tabelle 4:	Wesentliche Messergebnisse für die Messposition „100 m entfernt von einer ausgewählten OWEA“ in der Windklasse „hoch“ inkl. des Fundamenttyps und der Nennleistung der OWEA. Bei einigen OWEA musste deutlich von den 100 Metern abgewichen werden, siehe Spalte ganz rechts. In Klammern sind die abstandskorrigierten Werte mittels Ausbreitungsdämpfung ($15 \cdot \log_{10}(\text{Abstand})$) dargestellt. Die Nummerierung entspricht der aus Tabelle 2.	47
Tabelle 5:	Breitbandiger Schalldruckpegel ($L_{50, 5s}$) und Schalldruckpegel im höchsten 1/3-Oktavband (Rotor-Antriebssystem-Eigenfrequenz), gemessen in ca. 100 m Entfernung von allen gemessenen und in Betrieb befindlichen OWEA unter Nennleistung (Windklasse „hoch“) aus Tabelle 4.	48
Tabelle 6:	Statistische Darstellung des Schalldruckpegels L_{50r} , gemessen an in Betrieb befindlichen OWEAs unterschiedlichen Typs sowie Fundamentstrukturen in einer Messentfernung von ca. 100 m.	54
Tabelle 7:	Gemessene, breitbandige Schalldruckpegel nach Messpositionen und Windklasse geordnet für einen ausgewählten Windpark in der östlichen Zone 1 der Nordsee nördlich vor Helgoland.	62
Tabelle 8:	Vor dem Bau von einem geplanten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee gemessene Breitbandpegel L_{50} (Hintergrundschall) im Vergleich zu Werten von zwei benachbarten Messpositionen während der Betriebsschallmessung (alle Werte in dB re 1 μ Pa).	63
Tabelle 9:	Vor dem Bau von einem geplanten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee gemessene Breitbandpegel L_{50} (Hintergrundschall) im Vergleich zu Werten von einer benachbarten Messposition während der Betriebsschallmessung (alle Werte in dB re 1 μ Pa)..	64
Tabelle 10:	Vor dem Bau von einem weiteren, geplanten Windpark in der westlichen Zone 2 der Nordsee gemessene Breitbandpegel L_{50} (Hintergrundschall) im Vergleich zu Werten der Betriebsschallmessung (alle Werte in dB re 1 μ Pa).	64
Tabelle 11:	Abschätzung der vom betriebseigenen Serviceschiff und den OWEAs abgestrahlten Schallenergie anhand eines Beispiels in der westlichen Zone 2 der Nordsee mit 87 OWEA mit je 7 MW Nennleistung.....	69